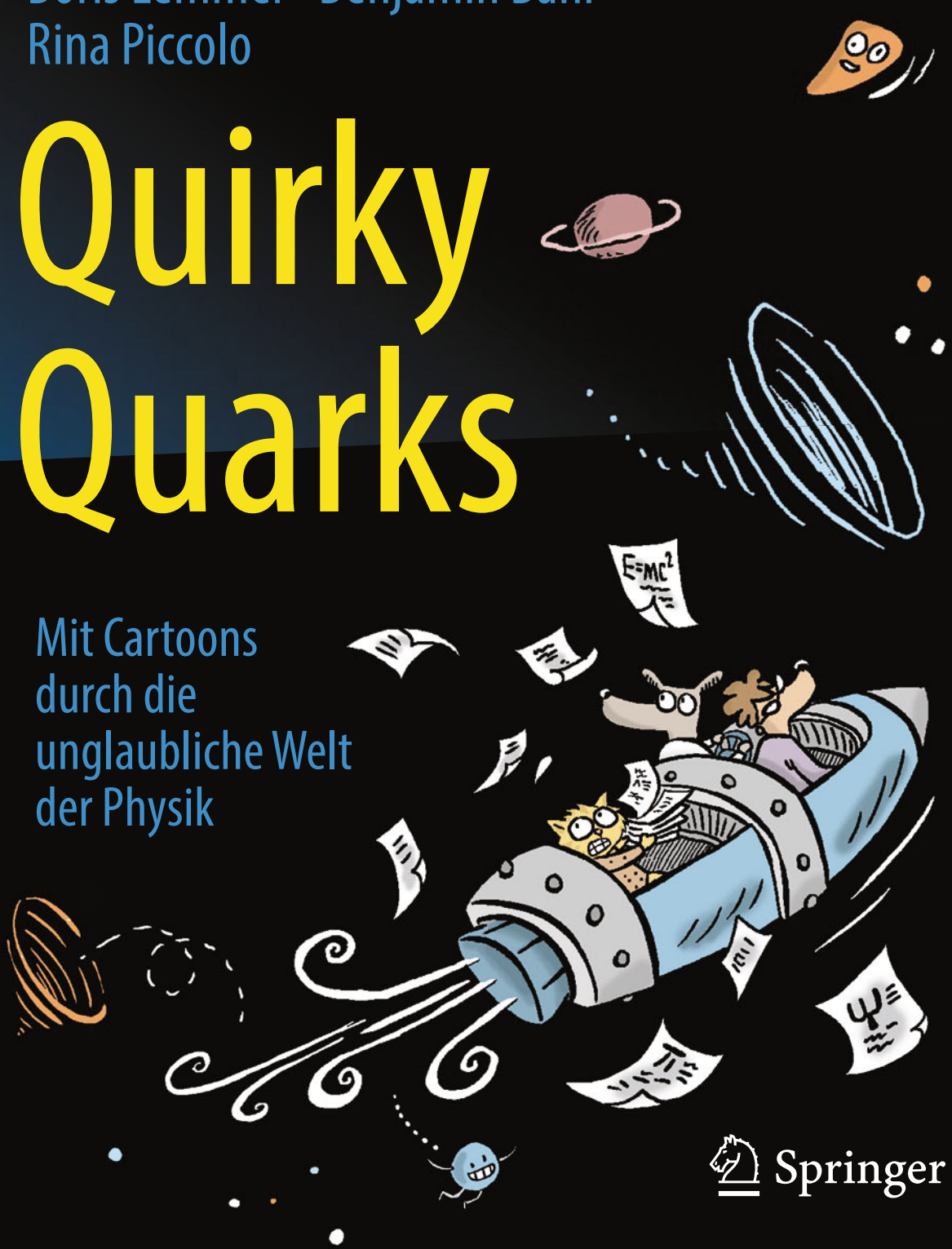
Boris Lemmer · Benjamin Bahr
Rina Piccolo

Quirky Quarks

Mit Cartoons durch die unglaubliche Welt der Physik

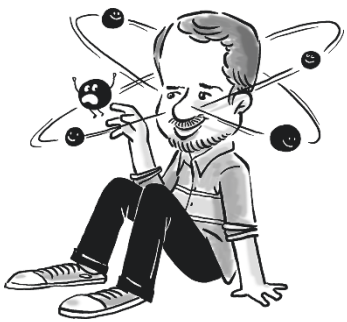


Springer

Quirky Quarks

Die Autoren

Boris Lemmer, Benjamin Bahr, Rina Piccolo



Dr. Boris Lemmer ist experimenteller Elementarteilchenphysiker und arbeitet an der Universität Göttingen und für das ATLAS Experiment in CERN. Bevor er seine Doktorarbeit in Göttingen geschrieben hat, studierte er Physik und Mathematik in Gießen.

Er liebt nicht nur die Naturwissenschaften, sondern erklärt diese gerne auch Laien, entweder in Büchern, Vorträgen oder auf der Bühne. 2011 gewann er die deutsche Science Slam Meisterschaft.



Dr. Benjamin Bahr forscht an der Universität Hamburg zur Quantengravitation. Gemeinsam mit seiner Arbeitsgruppe arbeitet er an der Vereinheitlichung von Einsteins Relativitätstheorie mit den Prinzipien der Quantenphysik.

Davor hat er am Max-Planck Institut für Gravitationsphysik in Potsdam promoviert und war Forschungsstipendiat an der Universität Cambridge in Großbritannien.

Wenn er nicht gerade zu berechnen versucht, was in ein schwarzes Loch hineingeht oder was beim Urknall passiert ist, erklärt er Laien gerne Physik – durch öffentliche Vorträge oder als Autor von Sachbüchern.



Rina Piccolos Karikaturen wurden schon in vielen Zeitschriften wie zum Beispiel dem *New Yorker*, *Barron's Business Magazine*, *The Reader's Digest*, dem *Parade Magazin* und vielen mehr veröffentlicht.

Ihr täglicher Comic „Tina's Groove" erscheint in Zeitschriften und auf Webseiten weltweit.

Boris Lemmer · Benjamin Bahr ·
Rina Piccolo

Quirky Quarks

Mit Cartoons durch die unglaubliche Welt der Physik

Springer

Boris Lemmer
Göttingen, Deutschland

Rina Piccolo
Toronto, Ontario, Kanada

Benjamin Bahr
Hamburg, Deutschland

Übersetzung der englischen Originalausgabe: Quirky Quarks von B. Bahr, B. Lemmer und R. Piccolo, erschienen bei Springer-Verlag Berlin Heidelberg, © 2016. Alle Rechte vorbehalten.

ISBN 978-3-662-50258-7 ISBN 978-3-662-50259-4 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-50259-4

Springer
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.
Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.
Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Planung: Margit Maly
Illustrationen: Rina Piccolo
Einbandabbildung: Rina Piccolo

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer ist Teil von Springer Nature
Die eingetragene Gesellschaft ist Springer-Verlag GmBH Germany
Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Vorwort

Was passiert, wenn zwei Physiker und eine Cartoonistin aufeinandertreffen?

Wenn du so an dein Physik-Schulbuch zurückdenkst wie ich an meines, wirst du mir zustimmen, dass es schwer zu tragen und noch schwerer zu verstehen war.

Ein Blick in die Seiten des Buches, das du gerade in den Händen hältst, sollte dich davon überzeugen, dass dieses Buch anders ist. Es macht beim Anschauen viel zu viel Spaß. Beim Durchblättern triffst du auf zwei Hunde, eine Katze und Quarks mit drei Augen. Du findest Cartoon-Elektronen und Comics zur Speziellen Relativitätstheorie.

Ja, und wir sollten auch nicht die Wissenschaft vergessen. In einfacher Alltagssprache, die sogar eine Cartoonistin wie ich verstehen kann, werden dir meine Coautoren Boris Lemmer und Benjamin Bahr zeigen, was Antimaterie mit Bananen zu tun hat und wieso du dir in einem Flugzeug aufgebläht vorkommst (Tipp: hat nichts mit Bananen zu tun).

Die beiden Physiker knacken Atome und lassen dich die Stabilität des Bodens, auf dem du stehst, in Frage stellen. Sie erzeugen Materie aus Energie. Sie lassen dich sogar über ein mögliches anderes Ich nachdenken, in einem möglichen anderen Universum, in dem du ein anderes Buch als das hier liest.

Als Cartoonistin und Schreiberin bin ich ein geborener Fragesteller und obwohl ich wie viele andere das Zeug mit schwarzen Löchern, Wurmlöchern und subatomarer Seltsamkeit schwierig finde, hat die Physik mich immer fasziniert.

Die Möglichkeit mit Boris und Benjamin – Physikern, die sich entschlossen haben, die größten Geheimnisse der Natur zu entschlüsseln – zusammenzuarbeiten, hat mich zu einem besseren Fragensteller und ein bisschen schlauer gemacht.

Dank dieser beiden Herren verstehe ich jetzt Dinge wie Oberflächenspannung … und finde sie genauso verrückt wie Dunkle Materie (Danke, Jungs, dass ihr den Katalog der Dinge, über die ich mich wundern kann, erweitert habt).

Wenn du wie ich begeistert deiner Neugier folgst und Spaß daran hast, dich von der bizarren Beschaffenheit der Realität verblüffen zu lassen – und wenn du Comics magst – dann hältst du genau das richtige Buch in der Hand.

Also, was bekommt man, wenn zwei Physiker und eine Cartoonistin aufeinandertreffen? Man bekommt Quirky Quarks!

-Rina Piccolo

Inhalt

Vorwort V

Charaktere XIII

Teilchen XIV

Maße zum Messen XVI

I – Raketen und Planeten 1



Polarlichter Ein anregendes Leuchten für Menschen und Atome 3

Licht Wellen im elektromagnetischen Feld 7

Tarnmäntel Ungesehen durchs Leben gehen 11

Der Doppler-Effekt Gestreckte Wellen 15

Laser Hochqualitätslicht mit neuen Möglichkeiten 19

Vakuum und Luftdruck Moleküle in Bewegung 23

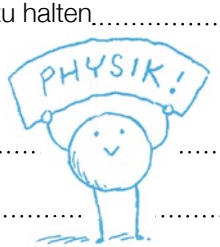
Strömungen und Turbulenzen Besser nicht auf der Autobahn testen 27

Wieso fliegt ein Flugzeug? Wie man die Luft dazu bringt, einen oben zu halten 31

Oberflächenspannung Minimale Oberfläche für maximalen Komfort 35

Nichtnewtonsches Fluid Ist es flüssig? Oder ist es fest? 39

Raketenmanöver Navigieren im Nichts 43



Die Keplerschen Gesetze Was zur Bewegung der Planeten nötig ist 47

Erhaltungssätze In der Natur geht nichts verloren 51

Die Voyager-Sonden Wo noch kein Mensch zuvor gewesen ist 55

Die Geburt des Sonnensystems Staub unter Hochdruck 59

Die Entstehung des Mondes Ein kleiner Urknall in Erdnähe 63

Extrasolare Planeten Ist jemand da draußen? 67



II – Der Kosmos und das Ganze 71

Klassifizierung der Sterne Das Who is Who der Sterne 73

Rote Riesen und Planetarische Nebel Das Ende eines Sterns der Hauptreihe 79

Supernovae Es endet mit einem Knall 83

Weiße Zwerge und Typ Ia Supernovae Sternenleichen und Standardkerzen 87

Schwarze Löcher Wer ins Schwarze trifft, kommt nicht wieder raus 91

Was passiert, wenn du in ein Schwarzes Loch fällst? 93

Der Urknall Wie auf einen Schlag alles begann 97

Zeitstrahl unseres Universums Vom Urknall bis heute 100

Die kosmische Hintergrundstrahlung Die ältesten Photonen des Universums 105

Superstrukturen des Universums Ein Netzwerk aus Sternen 109

Galaxientypen Das Aussehen zählt 113



Relativität von Raum und Zeit Wieso Licht nicht schneller wird, wenn man es schiebt 117

Die Allgemeine Relativitätstheorie Gekrümmter Raum und verbogene Zeit 121

Gekrümmte Raumzeit Eine Frage des Blickwinkels 125

Gravitationslinsen Optische Täuschungen am Nachthimmel 129

Gravitationswellen Surfen auf der Raumzeit 133

Dunkle Materie Scheinbar nicht da 137

Dunkle Energie Einsteins größte Eselei plötzlich wieder im Trend 141



III – Geheimnisvolle Quanten 145

Welle-Teilchen-Dualismus Welle oder Teilchen? 147

Das Doppelspalt-Experiment Über die Verrücktheit der Quantenwelt 151

Heisenbergsche Unschärferelation Man kann nicht beides haben 155

Schrödingers Katze Gleichzeitig tot und lebendig 159

Feynman-Pfade Realität als Summe von Wahrscheinlichkeiten 163

Der Tunneleffekt Wo eine Wellenfunktion ist, ist auch ein Weg 167

Radioaktive Zerfälle Über das Leben von Atomkernen und ihr Ende 171

Alpha-, Beta- und Gammastrahlen Kernbausteine auf Reisen 175

Kernfusion Natürliche Energiequelle, aber noch ohne Kraftwerk 179

Supraleiter Super-Autobahnen für Elektronen 183



Suprafluidität Die gruselige Art von Fluid 187

Spin Teilchentanz in diskreten Schritten 191

Verschränkung Eine spukhafte Fernwirkung? 195

Quantenteleportation Hin und wieder zurück 199

Qubits Wie man einen Quantencomputer baut 203



IV – Tatort Teilchenphysik 207

Atome vs. Elementarteilchen Kommt da noch was? 209

Das Neutrino So leicht und doch so schwer zu fassen 213

Das Standardmodell Das bisher beste Handbuch für unser Universum 217

Antimaterie Mehr Science als Fiction 221

Teilchenzerfälle Das kurze Leben und die interessanten Nachkommen der Teilchen 225

Feynman-Diagramme Ernst gemeintes Teilchengekritzel 229

Die Starke Wechselwirkung Was unsere Atomkerne zusammenhält 233

Die Schwache Wechselwirkung Schwach, aber einzigartig 237

E = mc² Energie und Masse – fast dasselbe 241

Der Higgs-Mechanismus Ursprung der Teilchenmasse 245

Die Struktur des Protons Oder auch: Wie man ohne Higgs Masse bekommt 249

Teilchenbeschleuniger Zeitmaschinen und Urknallsimulatoren 253



Teilchendetektoren Das Unsichtbare sichtbar machen 257

Kosmische Höhenstrahlung Ausgesendet von weit entfernten Beschleunigern 261

Neutrinooszillation Teilchen, die ihre Persönlichkeit ändern 265

Strahlentherapie Teilchen auf einer Mission gegen das Böse 269

V – Jenseits der Grenzen unseres Wissens 273

Exotische Materie Anders als alles, was wir kennen 275

Vor dem Urknall Ein Rückprall? 279

Quantengravitation Was ist die Quantentheorie der vierten Kraft? 283

Verdampfung Schwarzer Löcher Planckstерne statt Singularitäten? 287

Wurmlöcher Abkürzungen durch Raum und Zeit 291

Tachyonen Tatsächlich schneller als Licht 295

Warp-Antrieb Ein Ritt auf der Welle der Raumzeit 299

Supersymmetrie Eine schöne Lösung für viele Probleme 303

Stringtheorie Ein Weg zur Weltformel™ 307

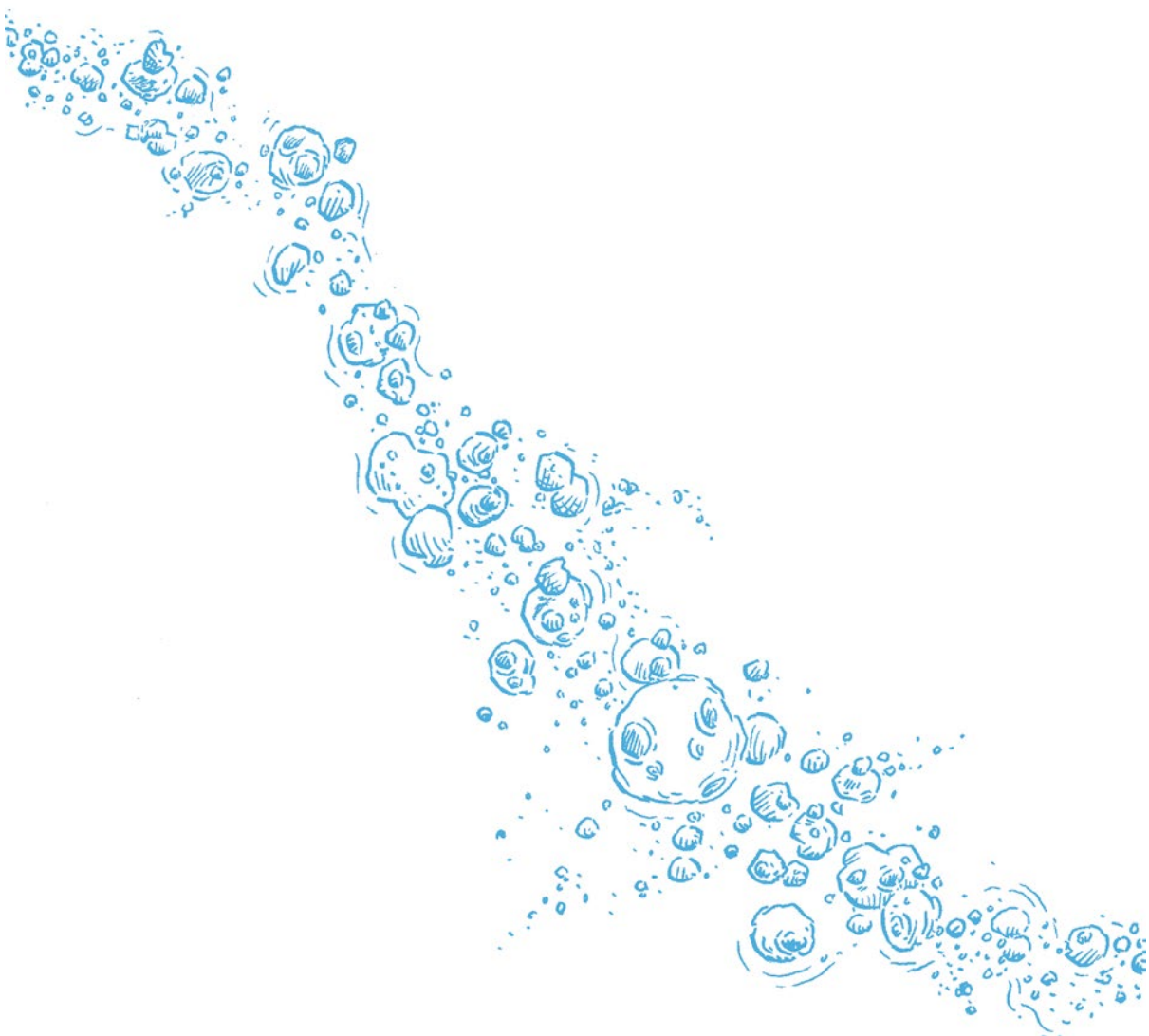
Extradimensionen Kleine versteckte Räume 311

Viele-Welten-Theorie In einem anderen Universum ist die Katze lebendig 315

Das Ende des Universums Und dann? 318









CHARAKTERE



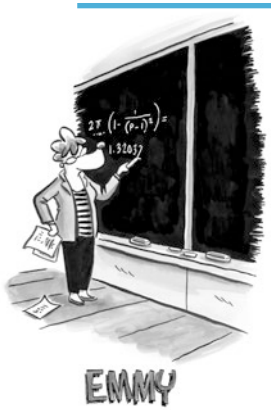
Er kann die Unschärferelation erklären, sieht aber unscharf, wenn er mal wieder seine Brille sucht. Er findet seinen Weg durch die Feynman-Pfade, ist aber schon auf dem kleinen Parkplatz am Supermarkt hoffnungslos verloren.

Das ist Erwin – unser theoretischer Physiker aus Princeton. Ein brillanter Geist wie er spart sich mit der Viele-Welten-Theorie den Waschtag. Mit seinen Worten: „Ich bin zufrieden damit, dass es irgendwo ein Paralleluniversum gibt, in dem meine Strickjacke bereits gewaschen worden ist.“

Als kleines Hündchen baute er in der Garage seines Vaters Raketen, die den Rand unserer Galaxie erreichten. Kein Wunder, dass Maxwell – seine Pfoten an Hebeln und Schaltern, seinen Kopf in den Sternen – auserwählt wurde, das Universum zu erforschen.

Heute verbringt Maxwell seine Zeit am MIT, wo er in einem Hörsaal eine inspirierende Vorlesung zur kosmischen Leere hält, im Labor an Geräten bastelt, oder in der Kneipe, wo er bei einem Bier mit Kollegen über das Reisen mittels Wurmlöcher diskutiert. In seinem Herzen gibt es übrigens einen speziellen Platz für Mathematikerinnen – vielleicht sogar für eine ganz bestimmte.





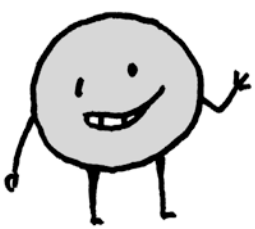
Die Schönheit des Nachthimmels ist für sie genauso wichtig wie die Präzision eines mathematischen Beweises. Hinter Emmys Leidenschaft für Zahlen steckt, so kann man sagen, eine persönliche Suche nach der rationalen Eleganz ihrer natürlichen Umgebung.

Wenn sie nicht gerade in ihrem Büro in Oxford Berechnungen durchführt, trifft man Emmy bei einem abendlichen Date mit Maxwell oder bei einer Diskussion mit Erwin über die Existenz von Gravitationswellen.

TEILCHEN

Inspiriert von www.particlezoo.net

Proton



Wenn ein Atom die Größe eines Fußballplatzes hätte, wäre dieser kleine Kerl – das Proton – kleiner als eine Spinne auf dem Spielfeld. Aus zwei Up-Quarks und einem Down-Quark zusammengesetzt, kann das Proton kein Elementarteilchen sein. Doch seine Rolle in der Quantenwelt ist von großer Bedeutung. Es ist dieser kleine Kerl, aus dem die Kerne jedes Atoms im Universum aufgebaut sind. Er ist ein fröhliches Teilchen, immer positiv geladen!

Elektron



Meistens trifft man dieses negativ geladene umherschwirrende Teilchen in seiner Heimatschale – oder Orbital – in einem Atom. Wir haben ihm vieles zu verdanken: Ohne das Elektron und seine Freunde gäbe es keine Elektrizität. Mit seiner wahrhaft magnetischen Persönlichkeit trifft man ein Elektron selten alleine an. Ständig ist es auf der Suche nach anderen Teilchen und Elektronen, mit denen es abhängen kann. Es ist diese Bindungsfähigkeit, die alle chemischen Reaktionen im Universum bestimmt.



Es gibt kein charmanteres Team aus Teilchen als dieses – die Quarks. Es gibt, soweit wir wissen, sechs Spieler in der Aufstellung der Quarks, nämlich Up, Down, Charm, Strange, Top und Bottom. Wegen dieser skurrilen Namen könnte man denken, die Quarks seien alberne Clowns in der subatomaren Welt – und läge damit falsch. Als Elementarteilchen, die nicht weiter aufgespalten werden können, sind diese Typen die Bausteine vieler anderer Teilchen, zum Beispiel Protonen, Neutronen und Hadronen. Alberne Clowns sind sie sicherlich nicht!



Wenn du noch nicht mit dem Neutrino und seiner Verwandtschaft bekannt gemacht wurdest, dann hast du was verpasst. Er und seine Milliarden Freunde fliegen jede Sekunde, Tag für Tag, durch deinen Körper. Aber keine Sorge – obwohl die Physiker noch nicht alles über diese aufdringlichen kleinen Zwerge wissen, tun sie dir nichts. Zum Glück sind Neutrinos fast masselos und wechselwirken kaum mit Objekten aus normaler Materie, so wie deinem Hund, deiner Katze, deiner Tante oder der Frisur deiner Tante. Neutrinos gibt es in drei Sorten: Elektron-, Myon- und Tau-Neutrino. Aber steck dir keines in den Mund, denn – doch halt, warte … du kaust bestimmt gerade auf einem ganzen Batzen davon herum.

Lass dich von ihrem Namen „schwache Bosonen“ nicht täuschen. Diese dicken Brummer sind Schwergewichte im Land der Elementarteilchen. Trotzdem kann man auch Mitleid mit ihnen haben – mit einer Lebensdauer, die Millionen Mal kürzer ist als die einer Fruchtfliege, sind W und Z gerade lange genug da, um ihren Job zu verrichten, bevor sie ins Gras beißen. Ihr Job? Sie sind für eine der vier Grundkräfte der Natur verantwortlich, die schwache (Kern-) Kraft, indem sie als Austauschteilchen zwischen anderen Teilchen wirken. Es sind W und Z, denen wir dafür danken sollten, dass wir am Leben sind, denn ohne die schwache Kraft könnte die Sonne nicht brennen und ihr Licht auf uns scheinen lassen.





Erst kürzlich entdeckt, hat das Higgs-Boson weltweit Schlagzeilen gemacht und wurde zum größten Star in der Teilchenwelt. Aber das Higgs lebte nicht immer in der Glamourwelt – Jahrzehnte lang spielte es ein Versteckspiel mit den Physikern. Wieso all die Aufmerksamkeit? Sagen wir es so: Dieser kleine Kerl macht Materie massiv! Stellen wir uns für einen Moment ein Universum voller masseloser Objekte vor. Kein entspanntes Spazierengehen im Park, keine Fußballspiele, nichts. Alles würde sich einfach mit Lichtgeschwindigkeit bewegen! Und wie stellt das Higgs es an? Nun, wir wissen, dass es gerne im Higgs-Feld abhängt, mit der schwachen und elektromagnetischen Kraft rumalbert und anderen Teilchen Masse gibt. Es wäre also nicht übertrieben zu sagen, das Higgs sei mehr als ein kleiner Promi; in der Symphonie des Universums spielt es ganz groß mit.

Maße zum Messen

Über die Einheiten in der Wissenschaft

Das Universum ist voller Geheimnisse, die entdeckt werden wollen. Um die Materie in unserem Universum zu verstehen, müssen wir sie vermessen. Wie viel davon gibt es? Wie schwer ist etwas? Wo ist es? Wie groß? Wie lange hat etwas gedauert? Diese Fragen kann man durch Messungen beantworten – und manchmal nur mit dem entsprechenden Budget (↗[1]). Aber ohne die richtige Einheit ist jede Messung wertlos. Und passt man nicht genau auf, verliert man auch schon mal einen Satelliten. Doch dazu später mehr. Worum geht es nun bei den Einheiten?

Die Ergebnisse unserer Messungen erscheinen immer als Zahl zusammen mit einer Einheit. Der Prozess, ein gutes Bier zu trinken, dauert z.B. 7 Minuten. In dem Fall ist die „7“ die Zahl und „Minuten“ die Einheit. Man könnte auch eine andere Einheit nehmen, etwa „Sekunden“. Da eine Minute 60 Sekunden hat, könnte man auch sagen, dass es 420 Sekunden dauert, das Bier zu trinken. Beide Aussagen sind gleichwertig und austauschbar. Für welche Einheit du dich entscheidest, bleibt dir überlassen, und hängt davon ab, was für dich – und die anderen Menschen – am bequemsten ist. Obwohl es sicherlich nicht sehr praktisch ist, zu sagen, du hättest das hier in 0,1339 Millionstel eines Jahrhunderts getrunken, wäre das genauso korrekt.

Seit Bestehen der Menschheit wurden Unmengen verschiedenster Maßeinheiten benutzt. In der Welt der Wissenschaft hat man sich dazu entschlossen, einige wenige davon als Grundlage unserer Messungen zu nutzen. Mit ihnen können wir alle physikalischen Größen beschreiben. Sie bilden das sogenannte Système International d'Unités (SI). Die drei bekanntesten SI-Einheiten sind diejenigen für Länge, Zeit und Masse: der Meter, die Sekunde und das Gramm (es gibt übrigens noch vier weitere: Candela (Cd) für Helligkeit, Mol (m) für eine Stoffmenge, Kelvin (K) für Temperaturen und Ampère (A) für elektrische Ströme, von denen aber nur Kelvin in diesem Buch eine Rolle spielen wird). Alle anderen Einheiten für Länge, Zeit und Masse lassen sich aus diesen dreien ableiten: Kilo (k) für Tausend, Mega (M) für Million, Giga (G) für Milliarde, und so weiter. Bruchteile davon bekommen ähnliche Präfixe: Milli (m) für ein Tausendstel, Mikro (μ) für ein Millionstel, Nano (n) für ein Milliardstel und so fort.

Das bedeutet, dass wir alle physikalischen Größen in ihren zugehörigen Einheiten darstellen können und dass es sehr leicht ist, zwischen den Einheiten zu wechseln – einfach die Nachkommastelle verschieben: 625 Nanometer sind dasselbe wie 0,625 Mikrometer, und so weiter. Es könnte aber – und jetzt kommt es darauf an, wo du herkommst – sein, dass das nicht die Einheiten sind, die du gewohnt bist. Wie viel ist das nochmal in Zoll oder Unzen?

Wenn man ein Buch über Physik schreibt, wird das zu einem Problem: Verwenden wir die wissenschaftlich üblichen Einheiten? Oder lieber solche, die die Leute gewohnt sind? Letzten Endes haben wir versucht, einen Mittelweg zu finden. Für die meisten physikalischen Größen verwenden wir die SI-Einheiten. Es sei denn … wir tun es nicht. Selbst europäische Wissenschaftler und Verfechter

↗[1]: *„Teilchenbeschleuniger“ auf Seite 253*



des metrischen Systems (zu denen sich die Autoren zählen) benutzen ab und an Nicht-SI-Einheiten in ihren physikalischen Artikeln. Verwenden wir etwa Mega- und Gigasekunden? Natürlich nicht, wir verwenden stattdessen Jahre und Jahrhunderte in unserer Forschung. Statt Peta- und Extametern nutzen wir Lichtjahre und Parsec. Und in der Atomphysik spricht jeder von Ångström, was 0,1 Nanometern entspricht (wenn wir ehrlich sind: Schwedische Umlaute sind einfach der Knaller!).

Teilchenphysiker bedienen sich gerne Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie (↗[2]) und machen Gebrauch von $E = mc^2$. Und weil sie die Lichtgeschwindigkeit dabei nur stört, setzen sie $c = 1$ und geben Massen die Einheiten von Energien. Schlimmer noch, statt Energie in Joule (aus den SI-Einheiten abgeleitet) anzugeben, rechnen sie sie auch noch in Elektronenvolt (eV) um. Das hat für Teilchenphysiker den Vorteil, dass diese Einheit unter anderem bei Teilchenbeschleunigern super praktisch ist: „Beschleunige ich ein Proton mit einer Spannung von 1.000.000. Volt, hat es danach 1 Megaelektronenvolt Energie und kann in einer Kollision Teilchen mit einer Gesamtmasse von bis zu 1 MeV erzeugen, echt stark!“

Ach ja, was war denn nun mit dem verlorenen Satelliten? Der „Mars Climate Orbiter“ (↗[3]) stürzte 1999 versehentlich auf den Mars, weil die NASA und einer der Softwarehersteller unterschiedliche Einheiten für den Impuls der Sonde verwendet hatten. Ups. Also aufgepasst, wenn es um Einheiten geht!

Viel Spaß mit der Wissenschaft – egal, welche Einheit du am liebsten hast. Und wenn du mal verwirrt bist, nimm einfach einen der vielen Einheiten-Umrechner, wie z.B. bei ↗[2].

↗[2]: *„Relativität von Raum und Zeit“ auf Seite 117*
↗[3]: https://de.wikipedia.org/wiki/Mars_Climate_Orbiter
↗[4]: http://www.metric-conversions.org/de/



I – Raketen und Planeten

„Wissenschaft ist großartig! Dank der Wissenschaft können wir fliegen, Krankheiten heilen, Erdbeben und Sonnenfinsternisse vorhersagen und den Sprudel in die Limo bringen. Ab und an explodiert vielleicht etwas, aber hey – was ist schon dabei, spontan ein kleines pyrotechnisches Experiment durchzuführen. Das ist Wissenschaft in Action!

Und die Wissenschaft, die man allein mit Physik betreiben kann – einfach wunderbar! Ich könnte den ganzen Tag arbeiten und basteln, bis ich ein neues, großartiges Stück Technologie entwickelt habe. Ich liebe es! Es gibt einfach soviel, was man mit Hilfe der Physik herstellen kann: Laser, Flugmaschinen, Tarnkappen und Raketen! Die mag ich am liebsten! Immer wieder verbringe ich damit meine Zeit. Es ist ein alter Traum von mir: mit einer Rakete durch das Weltall zu reisen, andere Planeten besuchen, Nahaufnahmen von Asteroiden machen, die Grenze unseres Sonnensystems erreichen … ach ja.

Auf den nächsten paar Seiten zeige ich euch ein paar Sahnestücke der Physik! Wie Flugzeuge fliegen, Laser funktionieren und wie es die Voyager Sonden durch das Sonnensystem geschafft haben. Ich hoffe, ihr findet das genauso irre wie ich.“



Polarlichter

Ein anregendes Leuchten für Menschen und Atome

Videospiele und Filme haben sich schnell weiterentwickelt und können uns mit ihren visuellen Effekten ganz schön beeindrucken. Aber zum Glück ist die Natur, was Special Effects angeht, immer noch die unangefochtene Nummer eins. Um sich davon zu überzeugen, kann man zum Beispiel ganz weit in den Norden oder Süden fahren, eine dunkle Nacht abwarten und in den Himmel hinaufschauen. Hat man Glück, sieht man eines der beeindruckendsten Phänomene der Natur: Polarlichter. Sie treten in verschiedenen Formen auf, sehen aber alle mehr oder weniger so aus, als hätte jemand den schwarzen Himmel in eine grüne Suppe verwandelt und würde mit einem großen Löffel darin herumrühren.



Es sieht tatsächlich wie ein übernatürlicher Effekt aus. Die Wikinger dachten, Polarlichter seien ein Zeichen für eine große Schlacht, die gerade irgendwo auf der Welt tobt. Auch andere Kulturen interpretierten sie als ein Zeichen übernatürlicher Wesen. Aber was ist dort oben eigentlich los? Wieso sind sie grün, tauchen nur ab und zu auf und sind nur weit oben im Norden oder weit unten im Süden zu sehen?

Wind von der Sonne

Einen ersten Hinweis liefert die Tatsache, dass man gutes Wetter braucht, um sie zu sehen. Zum einen muss der Himmel klar sein, zum anderen muss noch eine andere Art von Wetter genau passen. Es ist das sogenannte „Weltraumwetter“ und hängt mit den ständig wechselnden Bedingungen im Weltall zusammen, etwa sich bewegende Teilchen und Magnetfelder(↗[1]). Wenn man Weltraumwetterberichte und -vorhersagen anschaut, sieht man, dass die Sonnenaktivität hierbei ein wichtiger Faktor. Schaut man sich die Sonne an (bitte nicht direkt hinein sehen!), kann man dunkle Flecken auf ihrer Oberfläche erkennen. Das sind Orte mit einem sehr starken Magnetfeld. Von Zeit zu Zeit schleudert die Sonne eine große Menge Teilchen aus diesen dunklen Flecken heraus: Protonen, Heliumkerne (als Fusionsprodukt, ↗[3]) und Elektronen. Dieses Phänomen nennt man „koronaren Massenauswurf“. Dessen Häufigkeit hängt von der Sonnenaktivität ab, die in Zyklen ab- und zunimmt (↗[4]). Man kann sagen: je mehr dunkle Flecken, desto mehr Massenauswürfe. Die ausgeworfenen Teilchen fliegen dann durchs Weltall, manche vielleicht sogar in

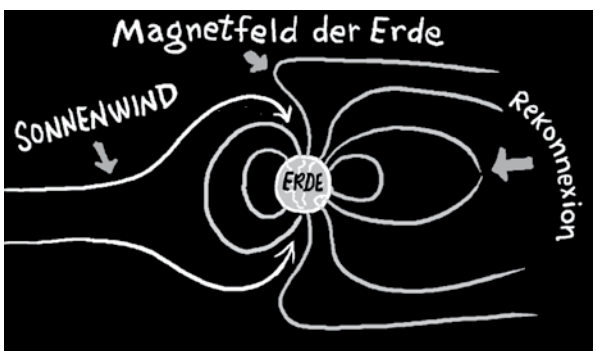


↗[1]: *„Licht“ auf Seite 7*
↗[2]: http://www.swpc.noaa.gov
↗[3]: *„Kernfusion“ auf Seite 179*
↗[4]: https://de.wikipedia.org/wiki/Sonnenfleck

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_1

Richtung Erde. Wir nennen das den „Sonnenwind“, der sowohl aus den Auswürfen als auch aus einem konstanten Strom von Teilchen aus der Sonne besteht und der unaufhörlich von der Sonne abgeht.

Dieser Sonnenwind ist Teil des Weltraumwetters. Wann immer man über das Wetter redet, will man auch gleich Vorhersagen bekommen. Während diese auf der Erde oft einen Grund zum Meckern geben, sind die Vorhersagen für das Weltraumwetter ziemlich zuverlässig. Der Grund ist, dass man genau weiß, wann etwas von der Sonne an der Erde ankommt, da man den Teilchenfluss schon bei der Entstehung an der Sonne sieht, während die Teilchen noch unterwegs sind. Das geht, weil die sichtbaren Informationen von der Sonne mit Lichtgeschwindigkeit zu uns gelangen (ca. 1.079.000.000 km/h), während der Sonnenwind mit seinen massiven Teilchen viel langsamer ist (ca. 1.448.410 km/h).



Magnetische Feldzusammenstöße

Stell dir vor, wie ein starker Sonnenwind die Erde erreicht. Wir können froh sein, dass die gute alte Erde sowohl eine Atmosphäre als auch ein Magnetfeld hat. Solch ein Sonnenwind ist nämlich nichts anderes als Strahlung, die uns ernsthaft schädigen würde, wenn wir ihr direkt ausgesetzt wären. Zum Glück kann unsere Atmosphäre diese Strahlung absorbieren. Noch besser: Das Magnetfeld der Erde lenkt den Sonnenwind ab! Das geschieht entlang der magnetischen Feldlinien, die so geformt sind, wie in der Abbildung dargestellt. Der Sonnenwind selbst ändert wiederum die Form des Magnetfeldes. Als Haufen geladener Teilchen ist er nichts anderes als ein elektrischer Strom, und Ströme erzeugen Magnetfelder. So wird das Magnetfeld der Erde an der Sonnenseite gequetscht und auf der anderen gestreckt. Es gibt mehrere Wege, wie Teilchen vom Sonnenwind die Atmosphäre der Erde erreichen können. Eine ist über offene Feldlinien an den „Polarhöckern“, wo uns das Magnetfeld der Erde nicht schützen kann. Eine andere Art ist über den „Schwanz“ auf der rechten Seite: Wenn das Magnetfeld von oben und unten zusammengedrückt wird, können sich die Feldlinien verbinden („Rekonnexion“) und zur Erde zurückschlagen. Starke Änderungen des Erdmagnetfeldes nennt man auch einen „Geomagnetischen Sturm“ (↗[5]). Nachdem sie sich wieder vereinigt haben, nehmen die Feldlinien eine große Menge geladener Teilchen mit zur Erde. Diese Teilchen können andere aus dem sogenannten „Van Allen Strahlungsgürtel“ (↗[6]) heraus in die Atmosphäre drücken. Dieser Gürtel ist ein Ort, an dem geladene Teilchen im Magnetfeld der Erde gefangen sind und ständig von Sonnenwinden und anderen intergalaktischen Quellen nachgeliefert werden.

Teilchenregen und Leuchtatome

Wir haben also geladene Teilchen, die in der Nähe des Nord- und Südpols in die Atmosphäre gelangen.

↗[5]: https://de.wikipedia.org/wiki/Magnetischer_Sturm
↗[6]: https://de.wikipedia.org/wiki/Van-Allen-Gürtel



Während sich die Teilchen bewegen, treffen sie auf Atome in der Atmosphäre. Bei diesen Zusammenstößen übertragen sie Energie auf die Atome und bringen sie in einen „angeregten Zustand“. Von diesem Zustand können sie sich wieder abregen, indem sie Licht aussenden. Abhängig vom Energieunterschied dieser Zustände kann die Wellenlänge des Lichts zwischen rot (wenig Energie) und blau (viel Energie) unterschiedlich sein (↗[7]). Sauerstoffatome senden Licht im sichtbaren Bereich aus, was im Wesentlichen auf zwei Arten geschieht, im einen Fall rot, im anderen grün. Die Zeit, die ein Elektron braucht, um sich abzuregen, ist dabei unterschiedlich: der grüne Übergang geschieht in weniger als einer Sekunde, der rote dauert länger. Weit oben am Himmel ist die Atomdichte gering. Sauerstoffatome haben Platz und haben Zeit, rotes Licht auszusenden. Rote Übergänge passieren wesentlich häufiger als grüne. Näher an der Erdoberfläche nimmt die Atomdichte zu und Atome stoßen aneinander. Dabei übertragen sie Energie, statt zu leuchten. Das Rote Licht ist unterdrückt. Was bleibt ist das „schnelle“ grüne Licht. Weiter unten ist die Dichte des atomaren Sauerstoffs so gering (nicht zu verwechseln mit Sauerstoffmolekülen, deren Dichte in Bodennähe zunimmt), dass man gar kein Licht mehr sieht. Das ist der Grund, wieso Polarlichter ganz weit oben rot (sieht man nicht immer) und weiter unten dann grün leuchten.

Nun, nimm dir die Zeit und schau ein Polarlicht an. Ist es nicht schön? Sicher eine Erfahrung, die man teilen möchte, so wie Erwin und Maxwell.



↗[7]: *„Licht“ auf Seite 7*
Foto: Hugo Løhre / NASA

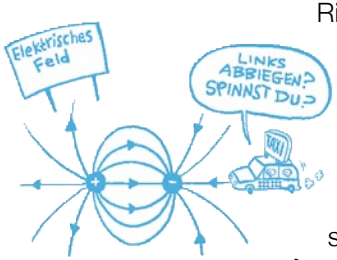

DOCH STILL, WELCH ELEKTROMAGNETISCHE STRAHLUNG DURCH IHR FENSTER SCHIMMERT!
WESHALB ROMEO NIE VON EINEM THEORETISCHEN PHYSIKER GESPIELT WERDEN SOLLTE.

Licht

Wellen im elektromagnetischen Feld

Was genau ist eigentlich Licht? Nun, Licht ist eine bestimmte Art von elektromagnetischer Strahlung. Oder auch: „Wellen im elektromagnetischen Feld“

Zunächst zum elektrischen Feld: Du weißt sicher, dass Dinge elektrisch geladen sein können. Entweder positiv oder negativ. Dinge mit gleicher Ladung stoßen sich ab, während solche mit unterschiedlicher Ladung sich anziehen. Elektrisch geladene Teilchen erfahren also immer eine Kraft, die insgesamt von allen anderen geladenen Dingen im Universum ausgeht. Dieses „Kraftfeld“ (Physiker nennen es „Feld“, weil es überall ist) nennt man „elektrisches Feld“. Man kann sich das wie ein Navi für geladene Teilchen vorstellen – es sagt ihnen, wohin sie gehen müssen.



Das magnetische Feld ist nicht ganz so leicht zu verstehen. Dinge können auch eine magnetische Ladung tragen. Wir nennen sie dann „magnetisiert“. Aber magnetische Ladung ist nicht bloß eine Zahl wie die elektrische. Vielmehr hat sie sowohl eine Größe, als auch eine Richtung. Man kann sich das Ganze wie einen Pfeil vorstellen, der auf dem Magnet sitzt. Er zeigt von dessen Nord- zum Südpol. Je länger er ist, desto stärker der Magnet. So wie die elektrische Ladung geladene Dinge durch die Gegend schieben will, möchte das auch die magnetische. Doch während es bei der elektrischen Kraft ausreicht, dass die Objekte geladen sind, müssen sie sich bei der magnetischen Kraft (der sogenannten „Lorentzkraft“) bewegen. Solange ein Proton einfach nur da liegt, kann es von einem Magneten nicht herumgeschubst werden. Nur wenn das Proton anfängt sich zu bewegen, kann der Magnet dessen Richtung ändern.

Zwei Seiten einer Medaille: die elektromagnetische Kraft

Man kennt die magnetische Kraft schon seit Jahrtausenden. Damals erkannte man, dass Nadeln aus bestimmten Materialien immer in die gleiche Richtung zeigen (zum Nordpol). Die alten Griechen wussten auch schon von der elektrischen Kraft. Sie beobachteten, dass kleine knisternde Funken (die wir heute „elektrische Entladungen“ nennen) entstehen, wenn man Bernstein auf Tierfellen reibt. Das Wort ηλεκτρον, bzw. „Elektron“, ist Altgriechisch und bedeutet „Bernstein“.

Doch es dauerte bis zum Ende des 19. Jahrhunderts, bis der Wissenschaftler James Clerk Maxwell herausfand, dass die beiden zusammengehören. Sie sind einfach zwei Phänomene derselben physikalischen Wechselwirkung, die wir heute über das „elektromagnetische Feld“ beschreiben. Die elektrische und die magnetische Kraft gehören untrennbar zusammen. Die berühmten Gleichungen, die J.C. Maxwell unsterblich machten, besagen, dass Änderungen eines elektrischen Feldes ein magnetisches Feld erzeugen – was der Grund dafür ist, dass sich drehende Ladungen wie Magnete verhalten (↗[1]). Umgekehrt erzeugt ein sich änderndes

↗[1]: *„Spin“ auf Seite 191*

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_2

Magnetfeld ein elektrisches Feld – was der Grund dafür ist, weshalb drehende Magneten in den Generatoren von Kraftwerken eingesetzt werden, um Elektronen durch die Leitungen zu drücken (das heißt, Elektrizität zu erzeugen).

Wenn man ein elektrisches Feld stört, erzeugt dies eine Änderung des Magnetfeldes, die wiederum eine Änderung des elektrischen Feldes zur Folge hat – in entgegengesetzter Richtung zur ursprünglichen Änderung. Das ist die sogenannte „Lenzsche Regel“. Beim Magnetfeld geschieht genau dasselbe. Daher vergleicht man das elektromagnetische Feld auch gerne mit einem elastischen Gummituch. Zerrt man daran, möchte es – wenn möglich – wieder in seine ursprüngliche Form zurück. Das passiert aber nicht sofort, sondert dauert etwas. Daher wird sich eine Störung im elektromagnetischen Feld – so wie auch eine Störung im Gummituch – ausbreiten und dabei hin und her schwingen. Diese Wellen breiten sich in alle Richtungen mit einer ganz bestimmten Geschwindigkeit aus. Man nennt sie „elektromagnetische Wellen“ und ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit ist die allseits bekannte Lichtgeschwindigkeit.



Das elektromagnetische Spektrum: auf die Länge kommt es an

Obwohl die Geschwindigkeit dieser Wellen immer die gleiche ist, kann die Frequenz, mit der die Wellen hin und her schwingen, verschieden sein. Je schneller sie das tun (je kürzer also ihre Wellenlänge ist), desto mehr Energie ist in ihnen gespeichert.

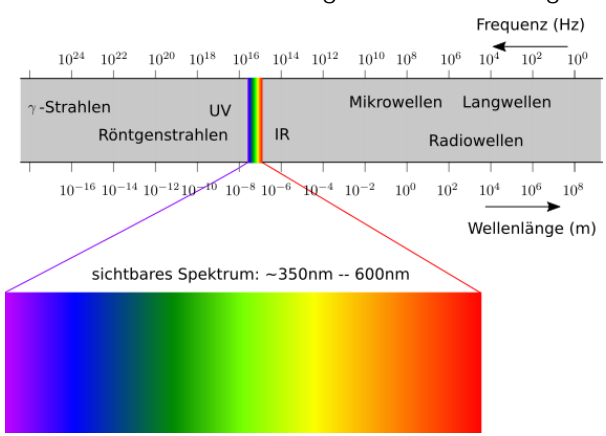
Die längsten Wellen sind lange Radiowellen. Ihre Wellenlänge beträgt über einen Kilometer. Die kürzesten dieser Sorte nutzen wir in unseren Radios: AM-Wellen sind einen Kilometer bis einhundert Meter lang, während FM-Wellen ein bis zehn Meter lang sind. Die nächst kürzeren Wellen sind Mikrowellen. Ihre Wellenlänge reicht von einem Millimeter bis hin zu einem Meter. Diejenigen, die in unseren Mikrowellen-Öfen zum Einsatz kommen, haben eine Länge von 12 cm. Das ist nicht besonders hochenergetisch, aber ist zufällig genau die Energie eines Quantenübergangs der Wassermoleküle. Das ist der Grund, warum Mikrowellen Dinge, die Wasser enthalten, gut erhitzen können.

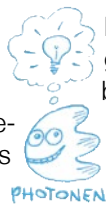
Elektromagnetische Wellen von einem bis ca. 100 Mikrometern nennt man infrarote (IR) Strahlung. Sie ist für das menschliche Auge nicht sichtbar, aber wir können sie als Wärme wahrnehmen. Halte deine Hand neben einen warmen Ofen und du kannst sie „aus erster Hand“ spüren. Der IR Bereich endet dort, wo der sichtbare beginnt: das ist die elektromagnetische Strahlung von 700 Nanometern (Rot) bis 390 Nanometern (Violett). Unser Auge ist so eingerichtet, dass es diese Strahlung sehen kann. Das ist, was wir „Licht“ nennen. Das gesamte Spektrum kann man wunderbar in einem Regenbogen beobachten.

Wir kommen nun zu Wellen mit immer mehr Energie. Jenseits der Farbe Violett beginnt die ultraviolette (UV) Strahlung. Ihre Wellenlängen reichen hinunter bis ca. 10 Nanometer. Dort beginnen die Röntgenstrahlen mit Wellenlängen bis zu 10 Picometern (ein billionstel Meter). Obwohl Röntgenstrahlung für medizinische Zwecke sehr nützlich sein kann, ist sie so hochenergetisch, dass eine Überdosierung schädlich ist. Gehen wir weiter zu noch kürzeren Wellenlängen, sind wir bei den γ-Strahlen. Diese extrem hochenergetische Strahlung erreicht uns aus den Tiefen des Weltalls, wenn Sterne explodieren (↗[2]), oder beim radioaktiven Zerfall von Atomkernen (↗[3]).

Es ist also eine Welle – oder nicht?!

Seit jeher fragen sich Philosophen, wie die Natur des Lichts ist. Lange Zeit hatten Menschen die Vorstellung, dass Licht aus kleinen Teilchen besteht, die von den Objekten in unsere Augen fliegen. Später, im 18. Jahrhundert, sprach man Licht jedoch eher einen Wellencharakter zu. Damals fand man heraus, dass man Licht, genau wie Wasserwellen, brechen, ablenken und streuen kann. Und durch J.C.Maxwell im 19. Jahrhundert wurde endlich klar, dass Licht eine bestimmte Art von elektromagnetischer Welle ist. Die Frage nach der Natur des Lichts schien geklärt und die Idee der „Lichtteilchen“ wurde verworfen.





Doch ca. 50 Jahre nach Maxwells Überlegungen machte ein junger Wissenschaftler eine bemerkenswerte Entdeckung: er fand heraus, dass man nicht beliebig wenig Energie in eine elektromagnetische Welle stecken konnte. Normalerweise ergibt sich die Energie einer elektromagnetischen Welle aus zwei Faktoren: ihrer Wellenlänge und ihrer Intensität (also Helligkeit). Der junge Wissenschaftler – sein Name war Albert Einstein – fand heraus, dass diese Energie nicht beliebig klein sein kann. Mehr noch: Die Energie einer Welle konnte nur in Paketen mit bestimmten Größen, den Quanten, zu anderen Systemen übertragen werden. Diese Quanten sind energetischer, je kleiner die Wellenlängen sind. Mit anderen Worten: Es kann zwei elektromagnetische Wellen mit der gleichen Energie geben – eine sehr helle mit großer Wellenlänge und eine dunkle mit kleiner Wellenlänge. Bei der ersten gibt es viele Energiepakete mit wenig Energie, bei der zweiten wenige mit viel Energie.

Diese Pakete nennen wir Photonen. Man kann sie sich als kleine Teilchen vorstellen, aus denen Licht (oder jede andere elektromagnetische Strahlung) besteht. Einstein bekam für diese Entdeckung später den Nobelpreis. Das war der erste Beweis dafür, dass sich ein physikalisches System sowohl wie ein Teilchen, als auch wie eine Welle verhalten kann. Daher wird Einstein oft auch als einer der Begründer der Quantenmechanik bezeichnet (↗[4]).

↗[2]: *„Supernovae“ auf Seite 83*
↗[3]: *„Alpha-, Beta- und Gammastrahlen“ auf Seite 175*
↗[4]: *„Welle-Teilchen-Dualismus“ auf Seite 147*


100% META-MATERIAL
ICH DENKE, DAS LÖST DAS HÄSSLICHE SCHLÜPFERABDRUCK-PROBLEM
DAS EINZIGE PROBLEM: ICH KANN SIE IN MEINEM TROCKNER NICHT MEHR FINDEN...
UNSICHTBARKEITS-MANTEL (...KLEIDER, HOSEN UND AUCH STRICKJACKEN.)
WENN WIR AUCH NOCH SCHMUTZ UND GESTANK TARNEN KÖNNTEN, MÜSSTE ICH NIE WIEDER WASCHEN!

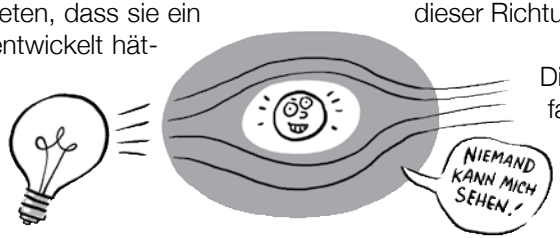
Tarnmäntel

Ungesehen durchs Leben gehen

Wer hat nicht schon einmal davon geträumt: Man läuft durch die Straßen, ohne dabei gesehen zu werden. Einfach einen magischen Umhang anziehen, und schon ist man unsichtbar. Die tollsten Streiche könnte man spielen! Obwohl die meisten Dinge, die man mit einem Tarnmantel tun könnte, bestimmt nicht besonders nett sind, hat sicher jeder von uns schon einmal daran gedacht.

Jetzt siehst du mich – jetzt nicht

Daher wurden die Menschen auch plötzlich ganz hellhörig, als Forscher der Universität von North Carolina im Jahr 2006 verkündeten, dass sie ein funktionierendes Tarngerät entwickelt hätten! Die erste Begeisterung wurde aber schnell wieder gedämpft, als die Forscher zugeben mussten, dass das Ding nur für kleine Objekte, nur mit Mikrowellen und nur bei einem Blick aus einer bestimmten Richtung funktionieren würde. Für das menschliche Auge wäre ein Objekt mit diesem Tarngerät also immer noch sichtbar. Aber man könnte es in eine eingeschaltete Mikrowelle legen, ohne das es heiß werden würde. Immerhin. Aber wie funktioniert eigentlich so ein „Tarnmantel“?



Licht verbiegen – der erste Schritt zur Unsichtbarkeit

Bevor wir verstehen können, wie Unsichtbarkeit funktioniert, müssen wir uns erst einmal im Klaren darüber sein, wie wir Dinge sehen. Die alten Griechen dachten, dass unsere Augen ständig kleine Sensorstrahlen aussenden würden. Und sobald diese auf ein Objekt träfen, könnten wir es sehen. Heute wissen wir, dass es im Wesentlichen genau anders herum funktioniert: Ein Lichtstrahl von der Sonne (oder einer anderen Lichtquelle) trifft auf ein Objekt. Von all den Strahlen, die das Objekt treffen, werden einige absorbiert (und heizen es auf) und einige werden reflektiert, je nach Wellenlänge des Lichts (↗[1]). Wann immer ein reflektierter Lichtstrahl in unser Auge trifft, gibt er uns den Eindruck einer bestimmten Farbe (je nach Wellenlänge), die aus dieser Richtung kommt.

Die Theorie ist also ganz einfach: Um ein Objekt unsichtbar zu machen, müssen wir es einfach davor bewahren, von Lichtstrahlen getroffen zu werden! Ein solcher Tarnmantel würde die Lichtstrahlen einfach um das Objekt, das unsichtbar gemacht werden soll, herumleiten. Sobald ein Lichtstrahl auf den Mantel träfe, würde er von diesem nicht reflektiert, sondern an die andere Seite des Objekts gelenkt. Dort würde der Lichtstrahl einfach weiterlaufen, als wäre nie ein Hindernis im Weg gewesen.

Kann Lichtbrechung helfen?

Alles klar. Damit ein Tarnmantel funktionieren kann, müssen wir also nur das Licht umlenken. Es gibt

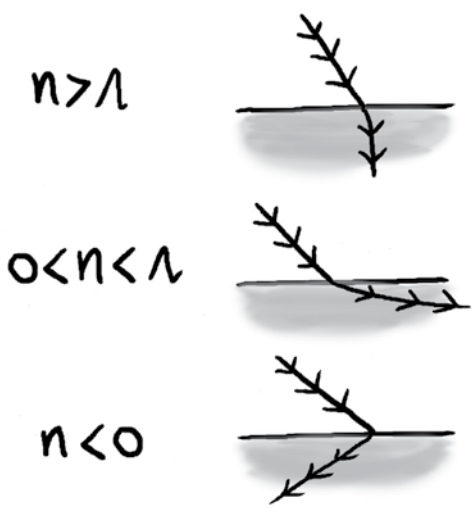
↗[1]: *„Die Keplerschen Gesetze“ auf Seite 47*

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_3



Materialien, die so etwas können. Man nennt den Effekt „Brechung“. Brechung passiert jedes mal, wenn Licht von einem Medium in ein anderes übergeht – seine Richtung wird dabei leicht verändert. Daher ist es auch so schwierig, einen Fisch mit bloßen Händen zu fangen. Der Fisch ist nie dort, wo du ihn siehst, sondern etwas daneben. Der Grund dafür ist, dass das Licht auf dem Weg vom Fisch zu deinen Augen beim Übergang von Wasser zu Luft gebrochen wird. Kann man das ausnutzen, um einen Fisch gänzlich unsichtbar zu machen?

Dabei gibt es aber ein Problem: Der Winkel, unter dem das Licht gebrochen wird, hängt vom sogenannten „Brechungsindex“ des Materials ab, durch das es geht. Vakuum hat einen Brechungsindex von genau 1. Bei Luft ist er ein klein wenig größer, bei Wasser ungefähr 1,33 und bei Glas ca. 1,5. Alle



normalen Materialien auf dieser Welt haben einen Brechungsindex größer oder gleich 1. Daher kann man Licht nur in Richtung eines Objekts brechen, nie weg davon. Damit man einen Lichtstrahl um ein Objekt herumlenken kann, bräuchte man ein Material, das an einigen Stellen einen Brechungsindex kleiner als 1 hat, oder gar einen negativen! Materialien mit solch einem Brechungsindex hätten sehr sonderbare Eigenschaften. Läge der Index zwischen 0 und 1, würde das Licht nicht nur vom Objekt weggebrochen, es wäre sogar schneller als die Lichtgeschwindigkeit. Und in Materialien mit negativem Index würde es sogar rückwärts laufen! Würde das überhaupt einen Sinn ergeben?

Metamaterialien: das Licht unserem Willen beugen

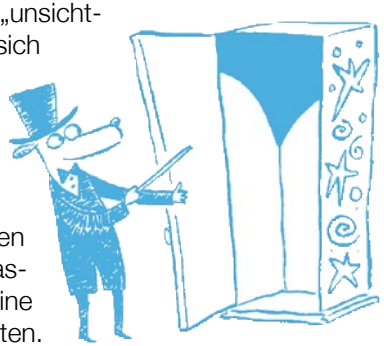
Aber das ist genau das, was die Forscher der Duke University erreicht haben: ein Material zu erschaffen, das effektiv einen Brechungsindex kleiner als 1 hat. Wie haben sie das geschafft? Nun, die optischen Eigenschaften eines Materials werden nicht nur von den Atomen bestimmt, aus denen es besteht, sondern auch von der Art, wie sie angeordnet sind: Die Forscher bauten einen Ring, der aus vielen winzigen Kupferstrukturen bestand, die nur wenige Mikrometer breit waren. Sobald eine elektromagnetische Welle mit einer ganz bestimmten Wellenlänge auf diese Struktur trifft, senden diese Strukturen wiederum elektromagnetische Wellen aus, so wie tausende winzige Antennen. Durch konstruktive und destruktive Interferenz würden sich diese Wellen addieren und eine neue Lichtwelle bilden, die sich in eine andere Richtung bewegt als die ursprüngliche. Und dieser Richtungswechsel verhält sich genau so, als hätte man ein Material mit einem Brechungsindex kleiner als 1.

Da die Interferenz von elektromagnetischen Wellen aber stark von der Wellenlänge abhängt, sollte es keine Überraschung sein, dass das Ganze nur für Wellen mit einer ganz bestimmten Frequenz funktioniert – in diesem Fall für Mikrowellen. Doch es funktionierte: Sobald Mikrowellen aus einer bestimmten Richtung auf den Ring trafen, wurden sie so umgelenkt, als wäre dort kein Ring gewesen. Und jedes Objekt innerhalb des Rings war damit für diese Wellen absolut unsichtbar.

Solche Materialen, deren optische Eigenschaften durch ihre spezielle Struktur entstehen, nennt man auch Metamaterialien. Die Forschung über sie ist in den letzten Jahren förmlich explodiert! Kurz darauf wurden zudem Tarnmäntel entwickelt, die für größere Objekte, bewegte Objekte, oder sogar mit Licht im sichtbaren Spektrum funktionierten!

„Unsichtbar“ auch für andere Arten von Wellen

Da das Ganze hier auf der Wellennatur des Lichts basiert, könnte man sich fragen: Geht das auch mit anderen Arten von Wellen? Aber klar! Vor ein paar Jahren haben die Forscher der Duke University einen „Stillemantel“ produziert. Er bestand aus Materialien aus einem 3D-Drucker und konnte ein Objekt vollständig von Schallwellen abschirmen. Du siehst ihn auf der Abbildung rechts. Wer einen solchen Mantel tragen würde, könnte nichts von seiner Umgebung hören: Alle Schallwellen würden vollständig um ihn herum geleitet. Und Fledermäuse würden gegen ihn krachen – denn für ihr Sonar wäre er absolut „unsichtbar“. Man kann sich leicht weitere Anwendungsmöglichkeiten ausdenken: Durch geschickt gebaute Barrieren könnte man Wasserwellen um kleine Inseln herum leiten. Das wäre besonders interessant für solche Inselgruppen, die bei Stürmen oft zu überschwemmen drohen. Obwohl stabile Häuser und gute Regenmäntel wahrscheinlich billiger wären …



Trotz allem: Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieses Buches gibt es noch keinen Tarnmantel, mit dem wir uns wie Harry Potter fühlen können. Und obwohl bereits große Schritte in diese Richtung gemacht wurden, fehlt noch einiges, bis wir unsichtbar durch die Straßen laufen können. Aber wer weiß, was die Zukunft noch bringt?

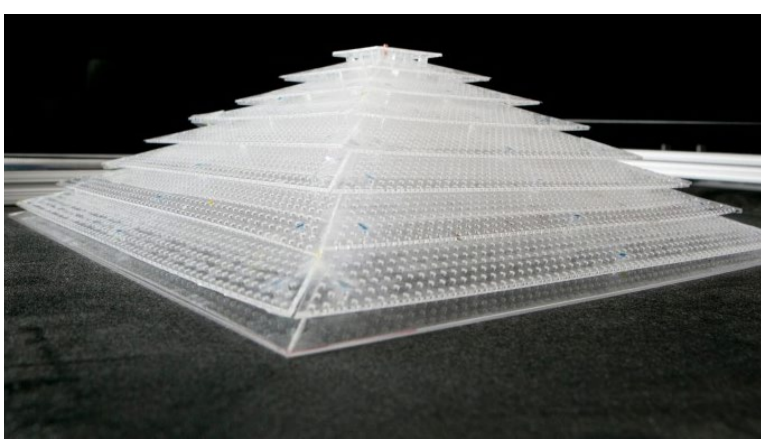


Abbildung: Mit freundlicher Erlaubnis zum Abdruck: Macmillan Publishers Ltd: „Three-dimensional broadband omnidirectional acoustic ground cloak“, Lucian Zigoneanu, Bogdan-Ioan Popa & Steven A. Cummer, Nature Materials 13, 352–355 (2014)



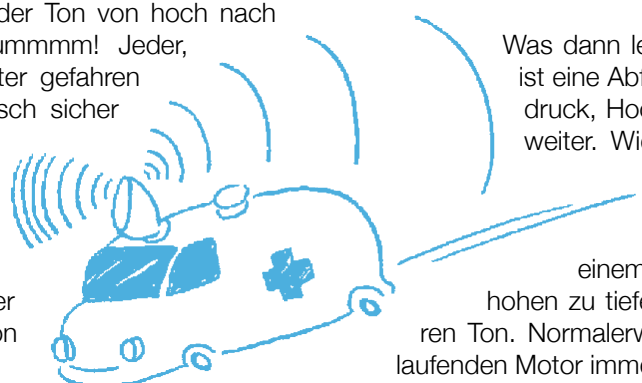
“Ich bin nicht gerast. Ich habe meinen Kollegen nur gezeigt, wie die Polizei bei der Radarkontrolle den Dopplereffekt nutzt.”

Der Doppler-Effekt

Gestreckte Wellen

Wie klingt ein fahrendes Auto? Nun, das hängt im Wesentlichen davon ab, wo man sich befindet! Sitzt man im Auto und lauscht dem Motor, hört man ein konstantes Brummen. Heutzutage ist das ein ziemlich gedämpftes Geräusch, weil Autohersteller sich Mühe geben, dass der Fahrer so wenig wie möglich von den Motorengeräuschen mitbekommt.

Die Sache sieht aber schon ganz anders aus, wenn man am Straßenrand sitzt und ein Auto vorbeifährt. Während es sich nähert, ist der Ton ziemlich hoch. Doch sobald das Auto vorbei fährt ist und sich entfernt, ändert sich der Ton von hoch nach tief. Niiiiiiiiiiiiiooouuuuummmm! Jeder, der jemals per Anhalter gefahren ist, kennt das Geräusch sicher gut. Der Grund, weshalb das Geräusch zwei unterschiedliche Tonhöhen hat, ist der sogenannte Doppler-Effekt. Und der wirkt auf alle Arten von Wellen!



Aber am einfachsten lässt sich das mit Schallwellen erklären, denn Schall ist nichts anderes als rhythmische Kompressionen der Luft. Ist es total ruhig, ist der Luftdruck (↗[1]) überall gleich. Doch sobald an einer Stelle ein etwas anderer Druck herrscht, wird sich der Druckunterschied wellenartig ausbreiten. Und es ist dieser Druckunterschied, den wir als Geräusch wahrnehmen, sobald er unser Ohr erreicht. Und je kürzer die Wellenlänge, desto höher die Frequenz und desto höher der wahrgenommene Ton.

Vibrierende Motoren und ihr Klang

Wieso macht ein Automotor überhaupt ein Geräusch? Nun, ein Motor hat viele bewegliche Teile. Und wenn ein Motor läuft, vibrieren viele dieser Teile. Wenn eines dieser, sagen wir mal, vibrierenden Metalle, Kontakt zur Luft hat, vibriert dann auch die Luft. Und diese rhythmische Komprimierung pflanzt sich als Welle fort.

Was dann letztlich unser Ohr erreicht, ist eine Abfolge von Hochdruck, Tiefdruck, Hochdruck, Tiefdruck und so weiter. Wie wir bereits erwähnt haben, hören wir bei kürzeren Wellenlängen – oder mit anderen Worten, bei einem schnelleren Wechsel von hohen zu tiefen Drücken – einen höheren Ton. Normalerweise hören wir bei einem laufenden Motor immer einen Ton mit exakt gleicher Frequenz (es sei denn, der Motor ist kaputt). Was aber passiert, wenn sich das Auto bewegt?

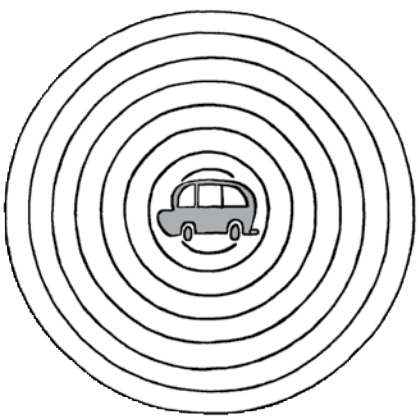
Bewegte Töne werden gestreckt – und ändern die Höhe

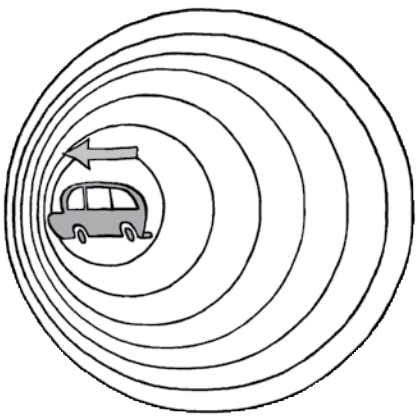
Was nun aber passiert, ist Folgendes: Die Schallwellen entfernen sich vom Motor nicht in alle Richtungen mit der gleichen Frequenz. Stattdessen werden die Wellen, die in sich in die gleiche Rich-

↗[1]: *„Vakuum und Luftdruck“ auf Seite 23*

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_4

tung bewegen wie das Auto, komprimiert. Und in der entgegengesetzten Richtung werden sie gestreckt. Wenn sich also ein lautes Auto auf uns zu bewegt, drückt es die Schallwellen vor sich zusammen. Was dann unser Ohr erreicht, ist ein Ton mit kürzerer Wellenlänge – das bedeutet, mit einer höheren Frequenz und daher mit einem höheren Ton. Wenn sich aber andererseits die Maschine von uns weg bewegt, sind die Schallwellen, die auf unser Ohr treffen, leicht gestreckt. Daher ist die Wellenlänge länger und die Frequenz und damit die Tonhöhe niedriger.





Und wenn ein Auto direkt an uns vorbei fährt? Nun, dann hören wir den typischen Klang eines Automotors oder der Sirene eines vorbeifahrenden Krankenwagens: der Ton wechselt von hoch zu tief, sobald das Auto auf unserer Höhe ist.

Der Doppler-Effekt für Licht

Der Wechsel des Tons ist wahrscheinlich etwas, das jeder von uns schon einmal wahrgenommen hat. Aber wusstest du, dass es den Doppler-Effekt für alle möglichen Arten von Wellen gibt, sogar für Licht (↗[2])? Es wird noch besser: Mit Hilfe des Doppler-Effekts kann man sogar die Temperatur der Sonne messen, oder die Geschwindigkeit, mit der sie sich dreht!

Nun gut, man kann das nur, wenn man sehr genaue Messungen anstellt. Wie du weißt, ist die Sonne im Allgemeinen recht heiß und sendet daher eine ganze Menge elektromagnetischer Strahlung mit allen möglichen Frequenzen aus. Daher nehmen wir die Sonne auch als fast weiß wahr: Das von ihr ausgesendete Licht enthält alle Farben des Spektrums.

Schaut man jedoch ganz genau hin, so sieht man, dass einige ganz bestimmte Frequenzen fehlen! Dies sind die sogenannten Fraunhofer-Linien. Physiker kannten sie schon mehr als 100 Jahre bevor sie den Grund dafür wussten, wieso sie existieren (bzw. fehlen). Einige dieser Frequenzen fehlen, weil die entsprechenden Photonen genau die richtige Energie haben, um bei Wasserstoff- (und anderen) Atomen einen Quantenübergang auszulösen. Für

↗[2]: *„Licht“ auf Seite 7*

Licht mit diesen Frequenzen ist die Sonne vollkommen undurchsichtig, während die Sonne für fast alle anderen Frequenzen nahezu transparent ist.

Wie heiß ist die Sonne?

Nun stell dir vor, dass die Wasserstoffatome in der Sonne nicht alle einfach nur still daliegen – sie bewegen sich! Und sie bewegen sich ganz schön schnell: je heißer die Sonne, desto schneller. Während ein ruhendes Atom von einem Photon mit genau der richtigen Frequenz getroffen werden muss, um einen Quantenübergang zu erzeugen, kann die Frequenz leicht verringert sein, wenn sich das Atom in genau dem Moment auf das Photon zu bewegt. Aufgrund seiner Bewegung und des Doppler-Effekts „sieht" das Atom dadurch ein Photon mit einer etwas höheren Frequenz und damit höheren Energie.

Was bedeutet das? Das bedeutet, dass im Spektrum des Sonnenlichts nicht nur genau die Frequenzen fehlen, die den Energien der Quantenübergänge entsprechen, sondern auch etwas höhere und niedrigere. Auch sie fehlen aufgrund des Doppler-Effekts! Man sagt daher, dass die Fraunhofer-Linien eine gewisse Breite haben. Und diese Breite steigt mit der Temperatur der Sonne – je höher die Temperatur, desto schneller die Atome und desto größer der Doppler-Effekt.

Und die Fraunhofer-Linien können nicht nur breiter gemacht werden, sie können sogar verschoben werden! Denn die Sonne steht nicht still, sondern sie rotiert. An ihrem Äquator dauert ein Umlauf ca. 25 Tage. Das bedeutet: Schaut man auf Licht, das von der rechten Seite der Sonne kommt (↗[3]), sind die Fraunhofer-Linien zu niedrigeren Frequenzen verschoben. Schaut man hingegen auf Licht von der linken Seite, sind sie zu höheren Frequenzen hin verschoben. Und auch das geschieht aufgrund des Doppler-Effekts: Licht, das von den Stellen der Sonne kommt, die sich von uns weg bewegen, hat niedrigere Frequenzen – das ist wie bei dem Auto, das sich von uns entfernt. Man nennt solches Licht „rot-verschoben". Das Licht vom anderen Ende der Sonne heißt dementsprechend „blau-verschoben".

Sgr A*: ein supermassives Schwarzes Loch – bewiesen durch den Doppler-Effekt

Der Doppler-Effekt wurde auch genutzt, um zum ersten Mal zu beweisen, dass sich im Zentrum unserer Milchstraße ein Schwarzes Loch (↗[4]) befindet. In der Mitte unserer Milchstraße gibt es eine Menge Sterne, die sich um ein gemeinsames Zentrum drehen. Wir wissen das, da wir Mikrowellenstrahlung beobachten, die unsere Erde von diesen Sternen erreicht. Und weil ein Teil dieser Strahlung blauverschoben und ein anderer Teil rot-verschoben ist, wissen wir, wie schnell sie sich um dieses Zentrum drehen. In den 70er Jahren des vergangenen Jahrhunderts hat man herausgefunden, dass es eine enorm große Masse gibt, um die sich die Sterne drehen müssen. Ein Stern mit einer derartig hohen Masse würde sofort in sich zusammenstürzen.



Heute wissen wir viel mehr über dieses supermassive Schwarze Loch – auch Sagittarius A* genannt – im Zentrum unserer Milchstraße. Insbesondere wissen wir, dass es ungefähr vier Millionen mal schwerer ist als unsere Sonne. Na, das sorgt aber für einen ordentlichen Doppler-Effekt!

↗[3]: *„Kernfusion" auf Seite 179*
↗[4]: *„Schwarze Löcher" auf Seite 91*


MAXWELL HAT IN SEINER VORLESUNG ÜBER DAS SCHNEIDEN MIT LASERN NICHT GUT ABGESCHNITTEN.
ÄHM... HAT JEMAND EINEN WENIGER STARKEN LASERPOINTER?
LASER ZUM SCHNEIDEN

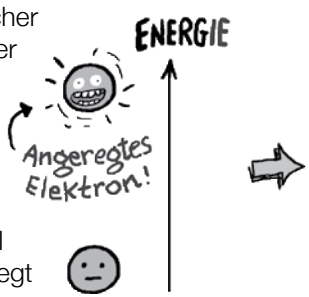
Laser

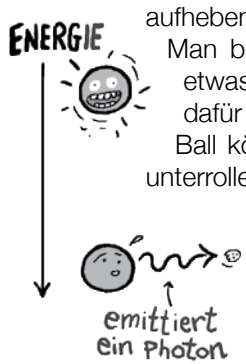
Hochqualitätslicht mit neuen Möglichkeiten

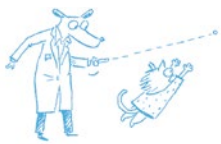
Es gibt Taschenlampen, und es gibt Laser. Irgendwie sind sie gleich: Geräte, die Licht abstrahlen. Aber wir wissen auch, dass es zwischen den beiden einen grundlegenden Unterschied geben muss. Sobald das Wort „Laser“ in einem Gespräch auftaucht, wird es irgendwie futuristisch. Es ist unmöglich, sich eine moderne, technisierte Welt ohne Laser vorzustellen. Sie lesen unsere CDs, DVDs und Blue Rays, können kaputte Augen reparieren, Entfernungen messen, Barcodes lesen und ersetzen bei Präsentationen den Zeigestock.

Atome als Lichtfabriken

Es gibt verschiedene Arten, Licht zu erzeugen. Ein bekannter Mechanismus ist die Wärmestrahlung. Heizt man ein Material auf, wird es Licht in allen möglichen Farben aussenden, aber nicht alle davon in gleicher Menge. Die Verteilung der Farben, bzw. der Wellenlängen, hängt von der Temperatur ab. Bei geringen Temperaturen sieht man überhaupt kein Licht, da der größte Anteil im infraroten Bereich liegt (↗1). Wird es wärmer, kann man das Objekt rot glühen sehen, danach vielleicht gelb und am Ende vielleicht sogar weiß (eigentlich sind es immer mehrere verschiedene Farben, aber eine dominiert). Klassische Glühbirnen strahlen solches Licht über erhitzte Wolframdrähte ab.







Neben den klassischen Glühbirnen gibt es auch Leuchtquellen, die nur Licht mit einer bestimmten Farbe abstrahlen. Eine Natriumdampflampe zum Beispiel. Sie leuchten nur gelb. Solch ein Licht funktioniert folgendermaßen: Eine Hochspannung wird angelegt, so dass ein elektrischer Strom durch das Natriumgas fließt. Die Elektronen aus dem Strom stoßen dabei gegen die Atome des Gases und übertragen Energie auf sie. Wie durch die Gesetze der Quantenmechanik beschrieben, kann ein Natriumatom eine bestimmte Menge Energie von den Elektronen aus dem Strom aufnehmen, um dabei eines seiner eigenen Elektronen in einen „angeregten Zustand“ zu bringen. Das bedeutet, dass dieses Elektron mehr potenzielle Energie als vorher. Das ist, als würde man einen Ball vom Boden aufheben und auf einen Tisch legen. Man braucht für diesen Vorgang etwas Energie und der Ball hat dafür welche bekommen. Der Ball könnte dann den Tisch herunterrollen und die Energie wieder freisetzen. Und so macht es auch das Natriumatom. Es wird den Energieunterschied zwischen dem Grundzustand und dem angeregten Zustand über die Emission eines Photons, eines Lichtteilchens, freisetzen. Diese Energiedifferenzen sind ganz speziell für jede Atomsorte; und damit auch die Energien der Photonen.

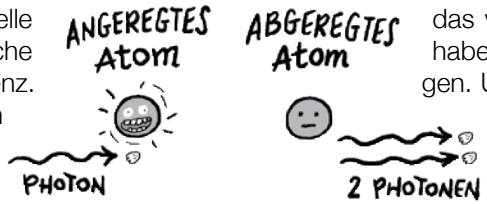
↗1: *„Licht“ auf Seite 7*

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_5

Und da Energien von Photonen den Wellenlängen des jeweiligen Lichts entsprechen, sind auch die Wellenlängen und damit die Farben unterschiedlich. Bei Natrium ist es eben gelb.

Im Gleichschritt!!

All die Photonen, die von zurückfallenden Elektronen abgestrahlt werden, bilden das ausgesendete gelbe Licht. Ein Aspekt ist dabei wichtig: Jede Welle hat eine charakteristische Wellenlänge und Frequenz. Aber jede Welle hat auch eine bestimmte Phase. Eine Phase definiert den Ort, an dem die Amplituden minimal und maximal sind. Wenn zwei Wellen die gleiche Phase haben, können sie „konstruktiv interferieren" und ihre Amplituden addieren sich. Hat man zwei Wellen, deren Phasen sich genau um eine halbe Wellenlänge unterscheiden, werden sich die beiden Wellen auslöschen (mehr über solche Interferenz im Kapitel über das Doppelspaltexperiment, ↗2). Wenn alle Photonen des Natriumlichts eine unterschiedliche Phase haben, kann uns das egal sein. Wollen wir allerdings Licht fokussieren, ist die Phase nicht egal. Zu viele verschiedene Phasen machen Ärger und beschränken den Grad der Fokussierung.



Der Physiker nimmt gerne eine Lichtquelle, bei der alle Photonen die gleiche Phase haben, als würden sie im Gleichschritt marschieren. Und das ist genau der Unterschied zwischen einer klassischen Lampe und einem Laser!

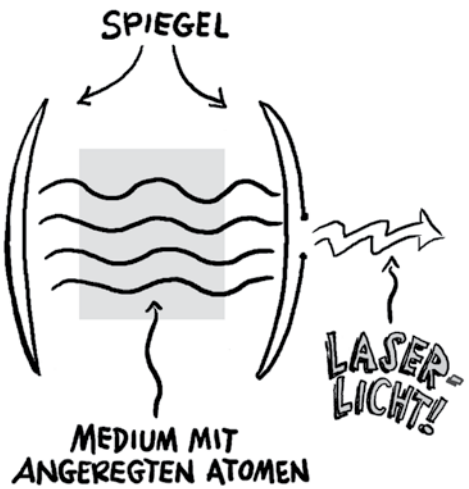


Bei einem Laser sind alle Photonen in Phase. Wir nennen so etwas „kohärentes" Licht. Aber wie bekommt man es? Es gibt die Möglichkeit, ein Elektron in einem ganz bestimmten Moment aus einem angeregten Zustand hervorzulocken und dabei Licht emittieren zu lassen. Man erreicht das, indem man nicht einfach wartet, sondern das Elektron „stimuliert". Wenn ein Elektron in einem angeregten Zustand ist und in dem Moment ein Photon vorbeikommt, das genau die Wellenlänge hat, die das vom Elektron emittierte Photon auch haben würde, wird sich das Elektron abregen. Und zwar genau dann, wenn das andere Photon vorbeikommt. Wir haben also zwei Photonen mit – und jetzt kommt's – genau der gleichen Phase! Diesem Prinzip müssen wir folgen: Photonen benutzen, um damit andere Photonen in Phase zu erzeugen.

Wir bauen einen Laser

Was brauchen wir? Zunächst ein Material, in dem wir Elektronen anregen können. Irgendwie müssen wir alle Elektronen in den angeregten Zustand bringen und dort eine Weile belassen. Wir erinnern uns: Sie sollten nicht von sich aus runterfallen, sondern wir wollen diesen Schritt durch ein anderes Photon starten. Typische Lasermaterialien haben mehr als nur einen Grundzustand und einen angeregten Zustand, aber für unsere Erklärung reichen die beiden. Das erste, was wir tun müssen, ist also unser Lasermaterial „aufzupumpen", so nennt man das Zuführen von Energie, um die Elektronen alle anzuregen. Sobald das erste Elektron zurückfällt, kommt es bei einem anderen Atom vorbei. Und dort lässt es ein weiteres Elektron herunterfallen, das ein zweites Photon freilässt, in Phase mit dem ersten. Und

↗2: *„Das Doppelspalt-Experiment" auf Seite 151*

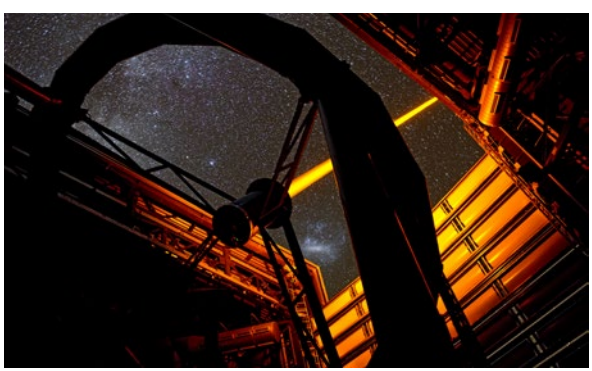


diese beiden wandern weiter und verursachen noch mehr freigelassene Photonen – alle in Phase! Das Material muss von zwei Spiegeln umgeben sein, die die Photonen hin und her schicken, damit die Lawine von Photonen nicht stoppt. Ok, irgendwann will man auch ein paar der schön kohärenten Photonen herauslassen. Indem man ein kleines Loch in einen Spiegel macht (oder halbtransparente Spiegel verwendet) erlaubt man dem Laserlicht, nach draußen zu kommen.

Es gibt viele Möglichkeiten, einen solchen Laser zu bauen. Man kann ein Gas als Lasermaterial benutzen (etwa CO_2), Halbleiter, einen Rubinkristall und vieles mehr. Das Material bestimmt die Wellenlänge des Laserlichts und damit die Farbe. Viele Laser liegen sogar außerhalb des sichtbaren Bereichs. Wie wir am Anfang beschrieben haben, gibt es viele Anwendungen für Laserlicht. Seine ideale Fokussierbarkeit erlaubt z.B. das Auslesen von DVDs mit roten und von Blue Ray Discs mit blauen Lasern. Die blauen Laser haben eine kürzere Wellenlänge, mit der kleinere Strukturen ausgelesen werden können. Daher brauchen wir für Blue Ray Discs blaue Laser, da sie kleinere Strukturen haben, um mehr Daten zu speichern. Mit fokussiertem Laserlicht kann man auch Entfernungen messen. Nicht nur in unseren Räumen oder zwischen Gebäuden, sondern auch zum Mond. Richtig, Astronauten haben auf der Mondoberfläche Spiegel positioniert, die Laserlicht von der Erde reflektieren, so dass wir den Mondabstand millimetergenau messen können.



Laser existieren nicht nur in verschiedenen Farben, sondern auch in verschiedenen Pulslängen (runter bis zu einigen Femtosekunden) und mit unterschiedlicher Leistung. Hochleistungslaser verwendet man als Waffen oder um Kernfusionen (↗[3]) in Gang zu setzen. Eine andere Anwendung ist die Erzeugung von künstlichem Sternenlicht, das in die Atmosphäre projiziert wird, um die Störungen von echtem Sternenlicht durch die Atmosphäre zu korrigieren. Der PARLA Laser, den man auf dem Foto sieht, wird von der europäischen Südsternwarte in Chile für solche Zwecke verwendet.



↗[3]: *„Kernfusion“ auf Seite 179*

Foto: G.Hüdepohl (atacamaphoto.com)/ESO


ERWIN UND MAXWELL NUTZEN DIE BILLIGEN SITZE IM "UNTERDRUCKABTEIL."
ICH HABE GEHÖRT, DASS DIE LEUTE IN DER ERSTEN KLASSE GRATIS LUFTDRUCK ZU IHREM CHAMPAGNER BEKOMMEN.

Vakuum und Luftdruck

Moleküle in Bewegung

Einige Dinge sind so allgegenwärtig, dass wir manchmal vergessen, dass es sie überhaupt gibt. Dazu gehört auch die Luft. Wir atmen sie und sie hält unseren Körper warm und lebendig. Aber das, was wir normalerweise von der Luft wahrnehmen, hat immer mit Luftdruck zu tun – oder genauer gesagt mit Änderungen des Luftdrucks. Sei es das Brummen des Staubsaugers, das Knacken in unseren Ohren, wenn wir im Flugzeug sitzen oder sehr lautes Lachen; Luftdruck ist ein wichtiger Bestandteil unseres Lebens, ob wir es merken oder nicht.

Aber was ist eigentlich Luftdruck?

Zunächst sollten wir uns bewusst sein, dass das, was wir als „Luft“ bezeichnen, eine Mischung verschiedener Elemente ist, die sich alle in gasförmigem Zustand befinden. Der größte Anteil, fast vier Fünftel, ist Stickstoff. Genauer gesagt zwei miteinander verbundene Stickstoff-Atome. Das nächsthäufigere Element ist Sauerstoff – auch in Paaren verbunden. Etwa ein Prozent bildet das Edelgas Argon, ca. vier Hundertstel eines Prozents schließlich Kohlendioxid. Und letztlich gibt es noch eine ganze Menge anderer Gase, die aber nur in winzigen Spuren vorkommen.



Zusammenstöße in der Luft: Moleküle in Fahrt

All diese Moleküle treiben nicht einfach umher – sie flitzen mit unglaublich hoher Geschwindigkeit. Fast 500 Meter pro Sekunde hat ein Luftmolekül auf dem Tacho! Aber sie können ihren Trip nicht lange genießen – Luftmoleküle fliegen nur ein paar Nanometer, bis sie mit einem anderen Luftmolekül zusammenstoßen. Diese kleinen Burschen sind allerdings ganz schön stabil. So eine Kollision bricht sie nicht entzwei, sie ändern dabei lediglich ihre Flugrichtung. Man kann sich unsere Luft daher auch als den größten Flipperautomaten der Welt vorstellen – mit Milliarden von Trillionen winziger Flipperkugeln!

Selbst an einem schönen Tag, wenn die Luft still zu stehen scheint, ist das, was wirklich geschieht, ein wildes Hin- und Hergeschubse unzählig vieler mikroskopischer Moleküle. Und wir nehmen dieses Gedränge, mit seinen Tausenden von Tausenden Einschlägen pro Sekunde, als Luftdruck wahr.

Luft ist also eine ziemlich dynamische Substanz. Daher versucht die Luft auch, wann immer sie es kann, alle Unterschiede des Luftdrucks auszugleichen. Gibt es irgendwo einen geringeren Luftdruck, bedeutet das, dass in dieser Region weniger Luftmoleküle sind, als anderswo. Als Analogie stelle man sich einmal einen Raum voller dichtgedrängter Menschen vor, die ständig gegeneinander rempeln. Wenn man jetzt zum Beispiel einen Tisch aus dem Raum entfernt, würde dort plötzlich freier Platz entstehen. Doch sofort würde einer der Menschen in den Freiraum geschubst. Dann noch einer, und noch einer, und nach kurzer Zeit wäre die

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_6

Lücke mit Leuten gefüllt. Das Gleiche passiert bei Druckunterschieden in der Luft: Die Luftmoleküle versuchen nicht bewusst, sich gleichmäßig auszubreiten, sondern es passiert von ganz alleine durch ihr ständiges Aneinanderknallen.

Oben wird die Luft dünner

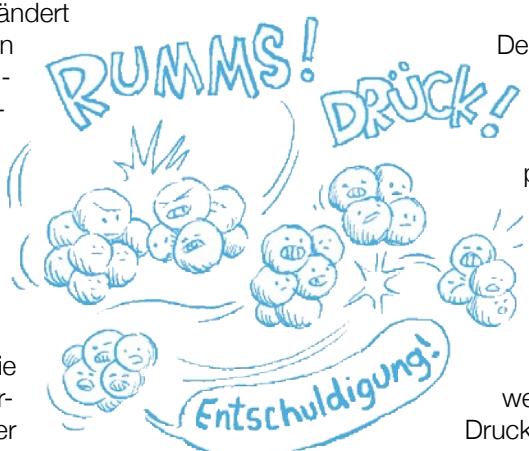
Es gibt eine Ausnahme hierfür: je höher man sich über der Erdoberfläche befindet, desto geringer wird der Luftdruck. Wieso das? Nun, Schuld daran ist die Schwerkraft!

Um das zu verstehen, ist entscheidend zu wissen, dass nicht alle Luftmoleküle die gleiche Energie haben! Durch ihr ständiges Aneinanderstoßen tauschen sie immer wieder etwas Energie aus. Aber jetzt kommt ein wichtiger Punkt, der alle Systeme mit vielen Teilchen, die ständig Energie austauschen, betrifft: Auf lange Sicht, wenn sich alle im Gleichgewicht befinden, haben sie nicht alle dieselbe Energie. Vielmehr haben im Mittel einige von ihnen mehr, andere weniger Energie. Durch den konstanten Energieaustausch ändert sich ständig, welches Teilchen nun mehr und welches weniger Energie hat. Aber die Tatsache, dass einige Teilchen eine höhere Energie haben als andere, wird sich nicht ändern. Das gleiche gilt für die, die im Mittel weniger Energie haben.

Nun ist es so, dass sich die Verteilung der Energie der verschiedenen Teilchen mit der Zeit nicht ändern wird. Es wird immer ein paar Moleküle mit mehr Energie als andere geben. Und es sind eben diese Teilchen, die wir weiter oben in der Atmosphäre finden. Um gegen den konstanten Zug durch die Gravitation antreten zu können, braucht man ziemlich viel Energie. Je mehr man hat, desto höher kommt man. Ganz weit oben trifft man nur noch die Teilchen mit den allerhöchsten Energien. Und davon gibt es nur sehr wenige. Daher wird die Luft auch immer dünner, je höher man nach oben steigt. Alle fünf Kilometer nimmt der Luftdruck um etwa die Hälfte ab (bei konstanter Lufttemperatur). Es gibt also auch keine Höhe, in der die Atmosphäre aufhört – sie wird vielmehr immer dünner und dünner und geht kontinuierlich in ein Vakuum über.

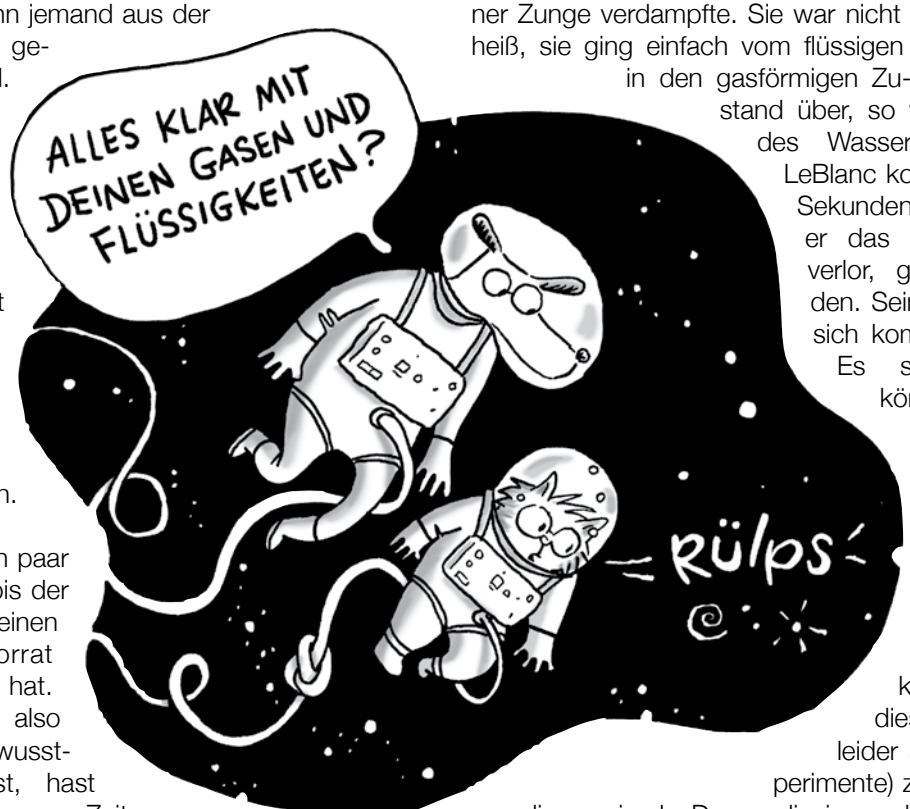
„Raus aus der Luftschleuse mit ihm!“

Wo wir gerade vom Vakuum sprechen – wie gefährlich ist das eigentlich? Wenn jemand ohne Schutzkleidung aus der Luftschleuse eines Raumschiffs geworfen werden würde, was würde passieren?



Der erste Gedanke, den man hat, ist, dass derjenige sofort explodieren würde: Der menschliche Körper ist so gebaut, dass er dem Atmosphärendruck standhält, indem er von innen mit gleichen Druck dagegen hält, so dass beide im Gleichgewicht sind. Wenn nun der äußere Druck wegfällt, sollte dann der innere Druck unseren Körper aufblasen, bis er platzt?

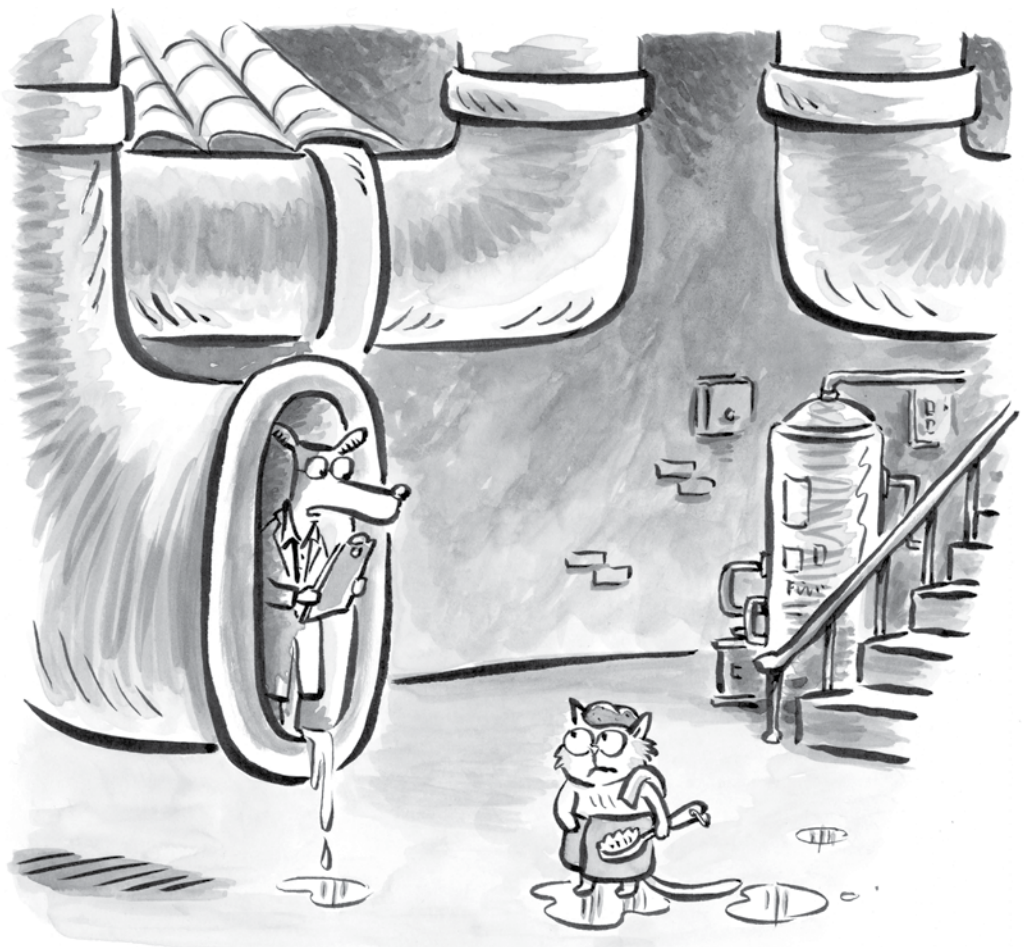
Nun, das Schicksal einer solchen Person wäre nicht ganz so hart: das ganze Gewicht der Luft auf unserer Haut entspricht lediglich ein paar Hundert Kilogramm. Auch wenn es sicherlich nicht besonders angenehm ist, erweist sich der menschliche Körper – und in erster Linie die Haut und die Blutgefäße – als flexibel genug, um das eine Weile auszuhalten. Es gibt aber einen Teil, den es sofort zerreißen würde: unsere Lungen! Sie bestehen aus Unmengen kleinster Bläschen, die recht schnell platzen würden, wenn jemand aus der Luftschleuse geworfen wird. Die erste Regel, um so lange wie möglich im All zu überleben, ist also: ausatmen! Dann könnte man es ein wenig länger aushalten.



Es dauert ein paar Sekunden, bis der Körper seinen Sauerstoffvorrat aufgebracht hat. Bevor du also dein Bewusstsein verlierst, hast du noch genug Zeit, um zu sehen, wie sich dein Körper langsam ein wenig ausdehnt – aber nicht gleich platzt. Ohne den atmosphärischen Gegendruck würden allmählich alle Gase und Flüssigkeiten anfangen, deinen Körper zu verlassen. Jim LeBlanc, ein Astronaut, der 1965 aus Versehen für eine Weile einem fast-Vakuum ausgesetzt war, berichtete, wie er fühlen konnte, dass plötzlich die Spucke auf seiner Zunge verdampfte. Sie war nicht heiß, sie ging einfach vom flüssigen in den gasförmigen Zustand über, so wie kochendes Wasser. Übrigens: LeBlanc konnte wenige Sekunden, nachdem er das Bewusstsein verlor, gerettet werden. Sein Körper hat sich komplett erholt. Es scheint, als könnten unsere Körper so einiges mehr aushalten, als man erwarten sollte.



Viele Vorkommnisse dieser Art (und leider auch Tierexperimente) zeigten, dass die maximale Dauer, die jemand im Vakuum überleben kann, in etwa zwei Minuten beträgt. Aber nicht vergessen: ausatmen!

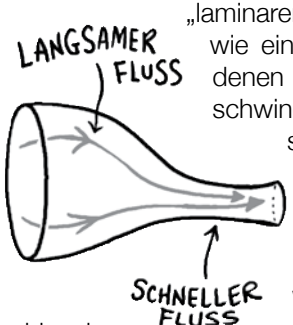


“Nun ja, natürlich hast du keinen Wasserdruck – schau dir mal die Größe deiner Rohre an!”

Strömungen und Turbulenzen

Besser nicht auf der Autobahn testen

Wofür braucht man Physiker? Das hängt davon ab, auf welchem Gebiet sie Experten sind. Manche machen den Abend romantisch, indem sie dir von den Sternen und Galaxien erzählen. Andere können dein Auto reparieren. Aber sie sollten alle in der Lage sein, die Bewegung von Objekten zu berechnen, wenn sie wissen, welche Kräfte darauf wirken. So etwas lernen sie in den ersten Semestern ihres Studiums. Folgt man den Regeln der Newtonschen Mechanik, kann man ein Objekt als punktförmig behandeln und bekommt damit auch ganz gute Ergebnisse. Zwei Beispiele: Du lässt einen Apfel in einen Brunnen fallen und stoppst die Zeit, die er benötigt, um auf dem Grund aufzukommen. Damit kannst du ausrechnen, wie tief der Brunnen ist. Oder du berechnest den idealen Winkel, um mit dem Gartenschlauch auch weit entfernte Blumen zu erreichen (45 Grad).



Bewegung von Gasen und Flüssigkeiten

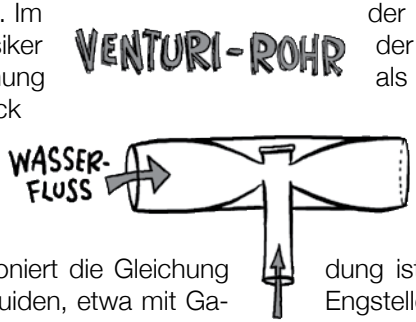
Aber was, wenn du die Bewegung von etwas ausrechnen willst, das definitiv kein punktförmiges Objekt ist? Eine unglaublich riesige Menge von Objekte, die alle miteinander reagieren und von äußeren Kräften beeinflusst werden? Dann hast du mit dem Gebiet der Bewegung von Gasen und Flüssigkeiten und der Turbulenzen zu tun. Und hier wird es schnell so kompliziert, dass selbst Supercomputer keine perfekten Lösungen errechnen können. Aber unter bestimmten Bedingungen kann man immer noch einige einfache Ergebnisse und grundlegende Gesetze berechnen, denen die Bewegungen von Fluiden gehorchen. Der Ausdruck „Fluid“ meint sowohl Flüssigkeiten als auch Gase. Fangen wir mal mit einem Fluid an, etwa mit Wasser, das sich durch ein Rohr bewegt. Wenn die Geschwindigkeit nicht allzu hoch ist und nichts den Fluss stört, bewegt sich das Fluid in geraden Linien. Wir nennen das „laminaren Fluss“. Das sieht dann so ähnlich aus wie eine Fahrbahn mit mehreren Spuren, auf denen Autos fahren, die alle die gleiche Geschwindigkeit haben und nicht die Spur wechseln. Was passiert nun, wenn eine Spur plötzlich blockiert ist? Richtig: Stau. Aber der Grund dafür ist kein fundamentales Naturgesetz, sondern vielmehr unser menschliches Verhalten. Wir bekommen einen Schreck, bremsen, wollen mit niemandem zusammenstoßen usw. Was aber würde Wasser in dieser Situation tun? In der Abbildung haben wir die Situation dargestellt, ein Rohr, das sich verengt. Wenn wir annehmen, dass sich die Flüssigkeit nicht zusammendrücken lässt (was bei Wasser der Fall ist), dann muss alles, was links in das Rohr kommt, rechts auch wieder rauskommen. Dieser Gedanke führt zur sogenannten „Kontinuitätsgleichung“: Das Produkt der Querschnittsfläche des Rohres und der Geschwindigkeit, mit der sich das Fluid darin bewegt, ist konstant. Das bedeutet: Je enger das Rohr, desto schneller das Wasser! Zurück auf die Autobahn: würden alle Autos bei der Fahrbahnverengung einfach schneller fahren, statt zu bremsen, gäbe es keinen Stau. Natürlich ist das gefährlich

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_7

und unrealistisch und zeigt, dass man über den Rat eines Physikers immer nochmal nachdenken sollte.

Die Bernoulli-Gleichung

Neben der Geschwindigkeit können wir auch noch den Druck einer Flüssigkeit mit ins Spiel bringen (↗1). Vielleicht weißt du, dass der Druckt steigt, wenn man tief unter Wasser taucht. Im 18. Jahrhundert hat der Physiker Daniel Bernoulli eine Gleichung hergeleitet, die Höhe, Druck und Geschwindigkeit von nicht-komprimierbaren Fluiden ohne Viskosität miteinander verknüpft. Bis zu einem gewissen Grad funktioniert die Gleichung auch mit komprimierbaren Fluiden, etwa mit Gasen. Die Bernoulli-Gleichung besagt:



$$p + \rho g h + 1/2 \rho v^2 = \text{konstant}$$

p ist der Druck, ρ die Dichte, g die Erdbeschleunigung, h die Höhe und v die Geschwindigkeit des Fluids. Die Summe dieser drei Terme ist konstant. Jetzt zeigen wir dir mal eine Konsequenz daraus, die dich vielleicht überrascht. Du kannst sie mit einem kleinen Experiment testen. Lege zwei leere Getränkedosen nebeneinander auf den Tisch und lass ein wenig Platz dazwischen. Dann nimmst du einen Strohhalm und pustest Luft parallel zwischen die Dosen, so wie Erwin. Was geschieht? Intuitiv würde man denken, dass die Dosen auseinander rollen. Probier es aus!



Und? Die Dosen haben sich aufeinander zu bewegt. Und die Bernoulli-Gleichung sagt, wieso: Erhöht man die Geschwindigkeit der Luft zwischen den Dosen, verringert sich der Druck, da die Summe der drei Terme gleich bleiben muss. Wenn der Druck zwischen den Dosen geringer ist als außerhalb, führt das zu einer Kraft, die die Dosen einander näher bringt. Die Bernoulli-Gleichung spielt auch eine wichtige Rolle bei der Antwort auf die Frage „Wieso fliegt ein Flugzeug?“ (↗2). Eine andere wichtige Anwendung ist das Venturi-Rohr. Das Rohr hat eine Engstelle, wo das Fluid schneller sein muss und sich dadurch ein Unterdruck bildet. Schließt man dort ein zweites Rohr an, kann man über den Unterdruck eine zweite Flüssigkeit ansaugen. Solche Venturi-Rohre nutzt man zum Beispiel, um in einem Verbrennungsmotor Benzin mit Luft zu vermischen oder um Luft mit Wein zu mischen, damit er leckerer schmeckt.

Reibung, Viskosität und Turbulenzen

Fluide verhalten sich oft nicht so ideal, wie wir bisher angenommen haben. Es gibt Reibung innerhalb der Fluide, die zu einem Widerstand gegen die Fließbewegung führen. In Zahlen ausgedrückt nennt man so etwas die „Viskosität“ eines Fluids. Sie besagt „wie dick“ ein Fluid ist. Honig hat zum Beispiel eine hohe Viskosität, Wasser nicht. Mehr dazu gibt es in dem Kapitel über Superfluide (↗3). Dem Strömen eines Fluids steht nicht nur die innere Reibung ent-

↗1: *„Vakuum und Luftdruck“ auf Seite 23*
↗2: *„Wieso fliegt ein Flugzeug?“ auf Seite 31*
↗3: *„Suprafluidität“ auf Seite 187*

gegen, sondern auch mit Reibung an allem, was dem Fluid im Weg steht. Denken wir mal an ein Auto, das schnell auf der Autobahn fährt. Die Luft umfließt es mit einer bestimmten Geschwindigkeit. Durch die Reibung zwischen Luft und Auto erfährt das Auto eine Kraft. Die Reibungskraft steigt (im Quadrat) mit der Geschwindigkeit des Autos. Doppelte Geschwindigkeit, vierfacher Widerstand! Diese Kraft kann ganz schön nervig sein, denn sie erhöht den Spritverbrauch. Will man den minimieren, muss man entweder langsamer fahren (buh) oder die Form des Autos optimieren (yeah). Die Form bestimmt, mit welchem Faktor die Kraft bei steigender Geschwindigkeit zum Quadrat zunimmt: den Strömungswiderstandkoeffizient c. Unternehmen investieren viel Arbeit in das Design ihrer Fahrzeuge, um diesen Koeffizient zu verringern. Beim nächsten starken Wind kannst du deine eigene Form mal verändern und dadurch verschiedene Koeffizienten testen.





Bisher haben wir die Geschwindigkeiten von Fluiden stets als laminar angenommen. Aber wenn die Geschwindigkeit zu hoch wird, werden aus laminaren schnell turbulente Strömungen. Das bedeutet, dass sich Druck und Geschwindigkeit des Fluids räumlich und zeitlich sehr schnell ändern. Der Moment, in dem der Übergang von laminar zu turbulent stattfindet, hängt von der Viskosität des Fluids ab. Je höher die Viskosität, desto schneller kann ein Fluid werden, ohne ins Turbulente überzugehen. Man nennt Turbulenzen auch „chaotisch“. Das bedeutet, dass kleine Änderungen der äußeren Umstände in einem System schon große Änderungen an dessen Verhalten zur Folge haben. Stellen wir uns eine laminar fließende Wasserströmung vor, in die wir unseren Finger halten. Das Wasser fließt einfach laminar um den Finger. Denken wir jetzt an eine turbulente Strömung von beispielsweise Milch, die wir in unseren Kaffee gießen. Man kann Milch mehrmals auf dieselbe Weise in Kaffee gießen, aber die Wirbelmuster sehen dabei jedes Mal anders aus. Das nennen Physiker dann „chaotisch“. Eine allgemeine Beschreibung von Fluid-Bewegungen kann mit Hilfe der sogenannten „Navier-Stokes-Gleichungen“ berechnet werden. Sie umfassen alle Spezialfälle, die wir im Text angesprochen haben. Einerseits sind diese Gleichungen sehr mächtig, andererseits sehr schwer zu lösen. Um turbulente Fluid-Bewegungen zu berechnen, ist ein extremer Rechenaufwand notwendig. Wäre die Sache nicht so kompliziert, wären unsere Wettervorhersagen vielleicht auch etwas zuverlässiger.

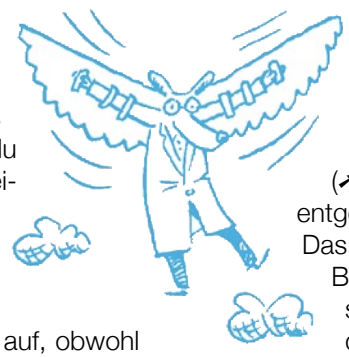



WESO FLIEGT EIN FLUGZEUG?
WUUUUSCH
KRACH
GATE 1
SIND SIE UNSER PILOT?

Wieso fliegt ein Flugzeug?

Wie man die Luft dazu bringt, einen oben zu halten

Wenn wir etwas in die Hand nehmen, hochhalten und loslassen, fällt es in der Regel runter. Manche Dinge, beispielsweise Vögel, fallen aber nicht. Das liegt daran, dass sie wissen, wie sie mit der sie umgebenden Luft umgehen müssen, damit sie oben bleiben. Oder die Luft sie vielleicht sogar noch höher bringt. Einem Vogel beim Fliegen zuzuschauen, ist bestimmt schön, aber einen 550 t schweren Airbus A380 starten zu sehen, ist mit Sicherheit beeindruckend, oder? Wie ist so etwas überhaupt möglich? Das erklären wir im folgenden Artikel!



Ein Prinzip, das oft genutzt wird, um Objekte zum Fliegen zu bringen, ist das Archimedische Prinzip: Wenn deine Dichte geringer ist als die des Fluids, das dich umgibt, erfährst du eine Auftriebskraft. Wenn du also einen Ballon mit einem Gas füllst, das leichter als Luft ist, steigt auf, wenn du ihn nicht gut festhältst. Heliumgefüllte Ballons funktionieren so. Ballons mit heißer Luft steigen auch auf, obwohl sie nur mit Luft gefüllt sind. Aber diese Luft ist, wie gesagt, heiß. Und ein heißes Gas ist weniger dicht als ein kaltes. Flugzeuge sind allerdings weder mit Helium, noch mit warmer Luft gefüllt. Was also hält sie oben?

Aktion und Reaktion

Es hilft, wenn man sich fragt, was sie oben „hält“. Wir wissen, dass ein Zug stehen bleibt, wenn man die Lokomotive abschaltet. Bei einem Flugzeug ist das anders. Es wird herunterfallen. Um oben zu bleiben, muss es sich auf jeden Fall bewegen. Das Geheimnis muss also mit der Geschwindigkeit des Flugzeugs zu tun haben. Beginnen wir mal ganz am Anfang eines Fluges, nämlich auf dem Boden. Anders als ein Auto hat ein Flugzeug keinen Motor, der seine Räder bewegt („Electric Taxiing“, wenn kleine Taxis mit Elektromotoren die Flugzeuge zur Rollbahn ziehen, kommt mehr und mehr zum Einsatz, um Sprit zu sparen). Stattdessen benutzt es seine Turbinen (alternativ gehen auch Propeller oder Raketen) um sich vorwärts zu bewegen, selbst am Boden. Die Luft wird dabei mit hoher Geschwindigkeit aus den Turbinen gedrückt. Nach den Newtonschen Gesetzen und dem Prinzip der Impulserhaltung (↗[1]), hat jede Kraft eine Gegenkraft in entgegengesetzter Richtung zur Folge. Das Ausstoßen der Luft führt also zu einer Beschleunigung des Flugzeugs. Und siehe da: Es bewegt sich. Aus Sicht des Flugzeugs steht es allerdings still. Stattdessen bewegt sich die Luft um seine Tragflächen. Die Details dieser Luftbewegung sind wichtig, um zu verstehen, wieso das Flugzeug nicht nur einen Schub, sondern auch eine Auftriebskraft erfährt. Schauen wir uns mal die Form der Flügel genauer an. Jeder Flügel hat eine asymmetrische Form. Diese führt dazu, dass die Luftströme nach unten abgelenkt werden. Und keine Ablenkung ohne Kraft! Und genau so, wie die Gegenkraft der Luft aus den Turbinen dem Flugzeug Schub nach vorne gibt, führt die Gegenkraft zur

↗[1]: *„Erhaltungssätze“ auf Seite 51*

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_8

abgelenkten Luft zum Abheben des Flugzeugs!



Dieser Effekt kann zusätzlich verstärkt werden, indem der Flügel einen bestimmten „Angriffswinkel“ einnimmt. Das bedeutet, er wird etwas schräg gestellt. Dieser Angriffswinkel – und insbesondere dessen Änderung während des Fluges – erlaubt einem Flugzeug sogar, auf dem Rücken zu fliegen. Übrigens, das Prinzip „Höherer Angriffswinkel, höhere Auftriebskraft“ funktioniert nur bis zu einem bestimmten Punkt. Übertreibt man es, löst sich der Luftstrom vom Flügel, der Auftrieb ist futsch und das Flugzeug stürzt ab.



Bernoullis Auftrieb

Neben dem Ablenken der Luftströme spielt noch ein weiterer Effekt eine entscheidende Rolle: Die Form der Flügel führt dazu, dass die Geschwindigkeit der vorbeiströmenden Luft auf der Oberseite höher ist als auf der Unterseite. Erinnern wir uns an die Bernoulli-Gleichung (↗[2]), dann wissen wir, dass schnellere Luftströme zu einem Unterdruck führen. Der Druckunterschied zwischen der Ober- und der Unterseite führt also zusätzlich zu einer Auftriebskraft.

Nimmt man nun die Summe des Bernoulli-Effekts (Unterschied der Geschwindigkeiten an Ober- und Unterseite) plus die Ablenkung der Luft nach unten plus noch weitere Effekte, die leider den Rahmen dieses Buches sprengen würden, bekommt man die Gesamtauftriebskraft. Und diese steigt, je schneller das Flugzeug fliegt. Während das Flugzeug noch am Boden ist, muss die Schubkraft so weit erhöht werden, bis die Auftriebskraft größer als die Gravitationskraft ist, die das Flugzeug nach unten drückt. Ist man erstmal oben, kann man die Geschwindigkeit und die Flügeleinstellung so wählen, dass die Auftriebskraft die Gravitationskraft genau ausgleicht und das Flugzeug in konstanter Höher fliegt.

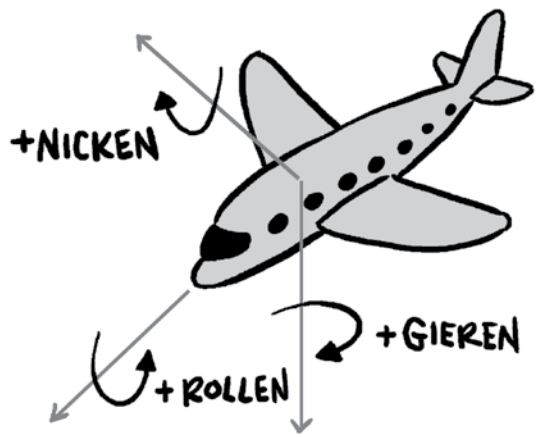
Manchmal spürt man während des Fluges auch Turbulenzen. Das passiert immer dann, wenn unerwartete Kräfte am Flugzeug rütteln. Das könnten entweder starke Winde oder thermische Effekte sein, bei denen warme Luft von unten nach oben aufsteigt und das Flugzeug mitnimmt.

Navigieren nicht vergessen!

Nun wissen wir also, wie man ein Flugzeug in der Luft hält. Aber sicherlich möchte man dort auch navigieren und am Ende wieder sicher landen. Fangen wir mit den einfachsten Möglichkeiten an, die man hat, um die Bewegung eines Flugzeugs zu beeinflussen. Man kann diese Bewegungen über Rota-



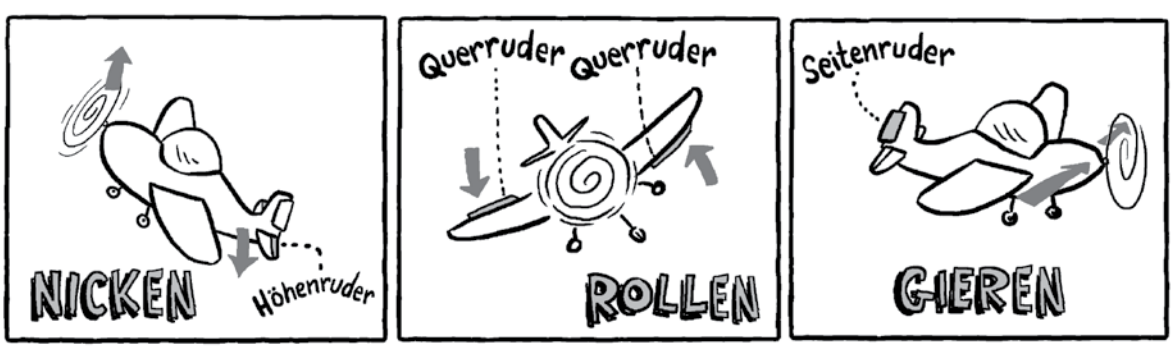
↗[2]: *„Strömungen und Turbulenzen“ auf Seite 27*



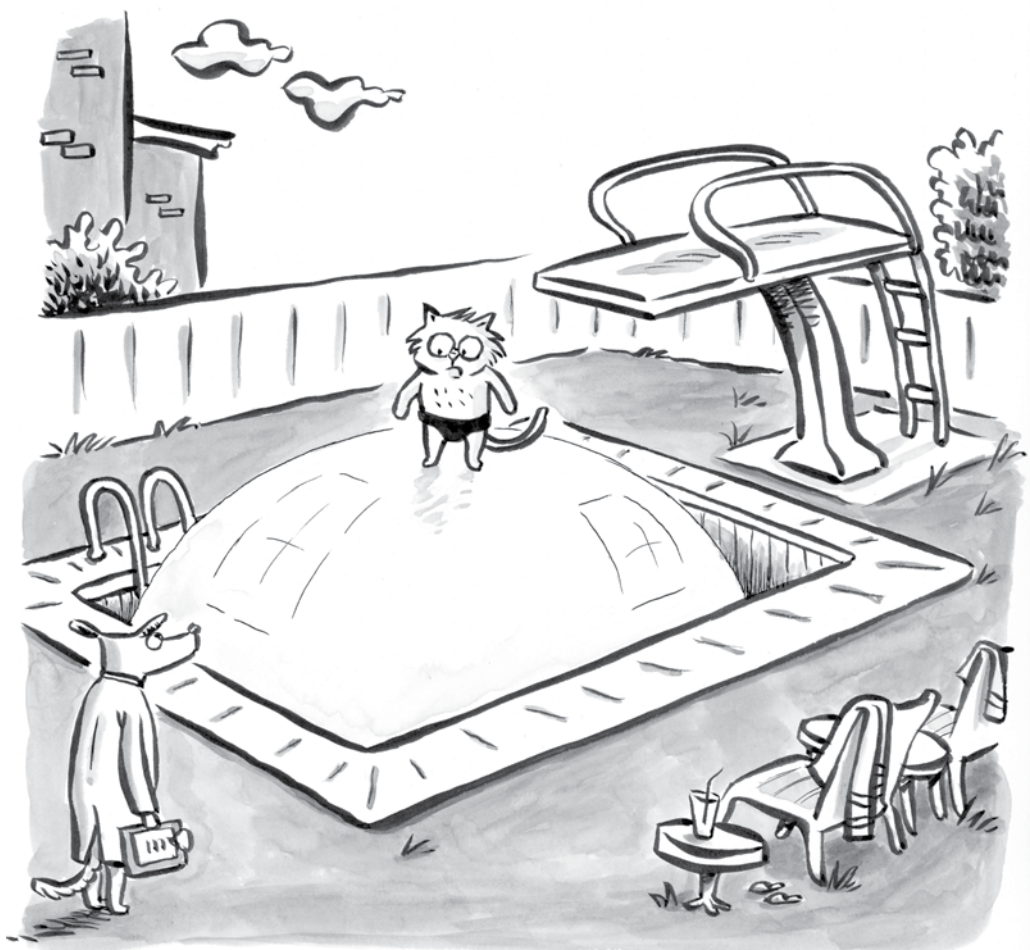
tionen um drei Achsen beschreiben, die in der Abbildung dargestellt sind. Ihre Namen beschreiben die möglichen Manöver. Die Längsachse zeigt vom Ende zur Spitze des Flugzeugs. Die Querachse läuft von einer Flügelspitze zur anderen. Und die letzte Achse, die Vertikalachse, zeigt vom Schwerpunkt des Flugzeugs nach oben, senkrecht zu den Flügeln. Damit sich das Flugzeug um die jeweiligen Achsen drehen kann, benötigen wir einige bewegliche Teile am Flugzeug.

Die „Höhenruder“ sind kleine horizontale Klappen am Heck des Flugzeugs. Indem man sie hoch- und runterstellt, verändert man den Angriffswinkel des Flugzeuges auf den Luftstrom. Bewegt man sie, kann man dem Flugzeug einen Kick nach oben geben (wenn man die Ruder senkt) oder nach unten (wenn man sie anhebt). Dadurch hebt und senkt sich die Flugzeugnase und die Maschine „nickt“, dreht sich also um die Querachse. Am hinteren Rand der Hauptflügel befinden sich die „Querruder“, kleine Klappen, die sich bei beiden Flügeln immer in der entgegengesetzten Richtung bewegen. Indem man sie bewegt, hebt man einen Flügel und senkt gleichzeitig den anderen. Dadurch verursacht man ein Rollen um die Längsachse. Die letzte Steuerklappe, das „Seitenruder“, befindet sich normalerweise an der Heckflosse des Fliegers. Bewegt man sie, drückt der Luftstrom die Flosse zur Seite und das Flugzeug dreht sich um die vertikale Achse. Man sagt auch: es „giert“. So bewegt sich das Flugzeug einfach zur Seite, ohne dabei zu rollen.

Man kann auch mehrere Bewegungen kombinieren: Um schnell umzukehren, bewegt man zugleich Höhenruder und Seitenruder. Im Internet gibt es hierzu auch ein paar schöne Animationen (↗[3]).



↗[3]: https://de.wikipedia.org/wiki/Roll-Nick-Gier-Winkel



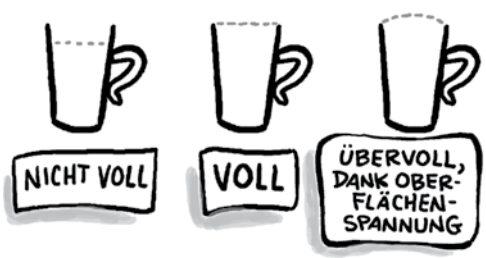
“Ist mir egal, ob es dafür einen Nobelpreis für maximale Oberflächenspannung gibt – Ich will meinen Pool zurück!”

Oberflächenspannung

Minimale Oberfläche für maximalen Komfort

Jeder weiß, dass Wasser – zumindest bei Raumtemperatur und Normaldruck – flüssig ist. Es kann also keine feste Form behalten. Stattdessen wird es überall dort hin fließen, wo es Platz findet. Und wenn man versucht, seine Form zu ändern, leistet es dabei keinen Widerstand.

Das ist für uns so offensichtlich, dass uns die Nicht-Festigkeit von Wasser (oder einer anderen Flüssigkeit) vollkommen natürlich erscheint. Wie kann es dann aber sein, dass manche Insekten über das Wasser in einem Teich laufen können, ohne zu versinken? Wieso kann eine Büroklammer, wenn man sie vorsichtig auf die Wasseroberfläche legt, schwimmen? Sie ist doch schließlich aus Metall! Und wieso kann man in ein Glas mehr Wasser hineinfüllen, als eigentlich rein passt?



Die Antwort: Die Wasseroberfläche ist nicht beliebig verformbar. Das ist anders als beim Wasser unterhalb der Oberfläche, das bei Verformung keinen Widerstand leistet. Die Oberfläche hingegen hat eine gewisse Steifigkeit, die man Oberflächenspannung nennt.

Um die Oberflächenspannung zu verstehen, muss man sich genauer anschauen, wie sich Wassermoleküle in flüssiger Form anordnen. Diese Moleküle bestehen aus einem Sauerstoff-(O) und zwei Wasserstoffatomen (H), die mit dem Sauerstoff verbunden sind. Doch nur, weil die Wasserstoffatome an ihren Sauerstoff gebunden sind, heißt das nicht, dass sie nicht auch versuchen, näher an die Sauerstoffatome der anderen Moleküle zu kommen. Wasserstoff ist in der Hinsicht ziemlich … untreu. Und den Sauerstoff scheint das nicht zu kümmern: er bekommt schließlich auch eine Verbindung zu den Wasserstoff-Atomen der anderen Moleküle. Diese Art der Verbindung zwischen Wasserstoff und Sauerstoff von verschiedenen Molekülen nennt man auch „Wasserstoffbrücke“.

Es ist nur eine Phase: die verschiedenen Formen von Wasser

Das Wichtigste dabei ist, dass die Wassermoleküle nicht alle nur für sich sind, sondern zwischen ihnen eine leichte Anziehung besteht. Die ist zwar nicht sehr stark, aber sie ist da, und sie spielt eine wichtige Rolle dabei, die „Phase“ des Wassers zu bestimmen. Dafür gibt es drei Möglichkeiten:

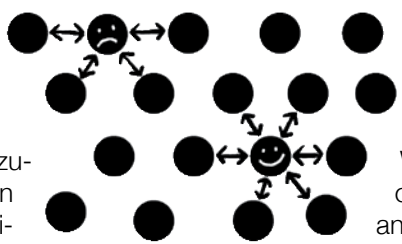
Bei kaltem Wasser sind die Moleküle sehr langsam und haben nicht viel Energie, um sich zu bewegen. Ihre Anziehung ist stark genug, sie dicht zusammenzuhalten. In diesem Fall liegt Wasser in fester Form vor. Wir nennen diese Form „Eis“ (die genaue

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_9



Beschreibung, wie Wassermoleküle sich anordnen und so wunderbare Strukturen wie Eiskristalle bilden, wäre nochmal ein Kapitel für sich).

Wenn Wasser hingegen sehr heiß ist und die Moleküle damit sehr schnell sind, haben sie genug Energie umherzufliegen. In diesem Fall reicht die Energie der Bindungen bei weitem nicht, um sie zusammenzuhalten. Wasser nimmt dann die Struktur eines Gases an, bei dem alle Moleküle frei umherflitzen. Ab und an knallen sie dann auch gegen andere Wassermoleküle, aber ansonsten sind sie für sich allein.



Es gibt aber noch einen Zwischenzustand: nicht zu warm, nicht zu kalt: in dem Fall kleben die Moleküle nicht direkt aneinander. Stattdessen können sich die Wasserstoffbrücken etwas lockern. Aber ein Wassermolekül hat immer noch nicht genug Energie, sich von seinen Nachbarn komplett zu lösen, sondern hat stets andere Kollegen um sich. Aber das müssen nicht immer dieselben sein. Stattdessen kann sich auch mal eins entfernen, so lange ein anderes seinen Platz einnimmt. Die Moleküle können also stets ihre Position verändern, was Wasser so schön verformbar macht.

Alle wollen auf die Tanzfläche

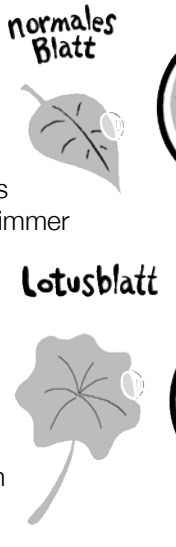
Während festes Eis mit einer dicht gepackten Menschenmenge vergleichbar ist, in der sich niemand bewegen kann und Wasserdampf einem großen freien Platz entspricht, auf dem nur wenige Leute stehen, kann man flüssiges Wasser am besten mit einer Tanzfläche vergleichen: Normalerweise sind schon einige Leute darauf, aber nicht so viele, dass man sich nicht mehr bewegen oder bei Bedarf Ausschau nach einem neuen Tanzpartner halten kann. Und die Menschen am Rand werden immer versuchen, in die Mitte zu kommen. Schließlich macht das Tanzen mehr Spaß, wenn Leute um einen herum sind!

So in etwa ist auch die Situation für die Wassermoleküle – und eigentlich genauso für fast alle anderen Flüssigkeiten. Diejenigen in der Mitte sind von anderen umgeben und werden von ihnen leicht angezogen. Solange sie jemanden um sich herum haben, können sie sich auch relativ frei bewegen. Aber die Wassermoleküle an der Oberfläche haben nur zur Innenseite hin anziehende Moleküle. Die Luftmoleküle an der Oberfläche sind hingegen ganz und gar nicht anziehend. Also versuchen sie alle, möglichst weit nach Innen zu kommen. Das versetzt die gesamte Oberfläche in Spannung, wodurch sie etwas fester wird, als das Innere der Flüssigkeit. Sogar so fest, dass kleine Insekten auf der Wasseroberfläche laufen können, ohne zu versinken.

Die Größe zählt: je kleiner die Oberfläche, desto besser!

Die Oberflächenspannung hat eine sehr wichtige Konsequenz für die Form von Wasser: Wenn keine anderen Kräfte auf das Wasser wirken (etwa die Gravitationskraft), versucht es seine Form immer so zu ändern, dass seine Oberfläche so klein wie möglich wird. Und diese Form ist eben eine Kugel – weshalb Wasser kleine Tröpfchen formt.

Wenn also ein Astronaut in der Internationalen Raumstation ISS sein Getränk ausspuckt, wird es nicht irgendwo hin platschen, sondern in Form kleiner Tröpfchen frei herum schweben. Hier auf der Erde wirkt hingegen die Gravitation viel stärker als die Oberflächenspannung. Wenn du also Wasser in ein seltsam geformtes Glas füllst, wird die Gravitation es immer in diese Form hineinpressen. Bei Quecksilber hingegen sieht die Sache anders aus: Quecksilber ist ein flüssiges Metall (bei Raumtemperatur) und seine Oberflächenspannung ist etwa sieben mal höher als die von Wasser. Kippt man also ein Glas Quecksilber um, werden sich sofort winzige Kügelchen bilden, die sich auf dem Boden ausbreiten. Bitte, mach das niemals nach, Quecksilber ist hochgiftig!



Nicht nur sauber, sondern rein – dank Oberflächenspannung!

Die Tatsache, dass Wasser immer versucht, seine Oberfläche möglichst klein zu halten, wird von der Lotusblume genutzt, um sich selbst vor Schmutz zu schützen: Die meisten Pflanzenblätter haben eine glatte Oberfläche. Regenwasser klebt dann an ihnen fest und hält sie feucht. Die Blätter der Lotusblume hingegen haben eine ganz besondere Oberflächenstruktur: Unter dem Mikroskop kann man sehen, dass die Oberfläche mit Unmengen kleiner Hügel übersät ist, als hätte sie eine Gänsehaut. Wenn nun ein Wassertropfen auf der Oberfläche sitzt, wird er nicht gänzlich auf der Oberfläche liegen, sondern nur auf den Spitzen der kleinen Hügel. Das liegt daran, dass die Oberfläche des Wasser größer werden müsste, um auch die ganzen Täler zu bedecken. Und das will das Wasser vermeiden, weshalb es sich zu kleinen Tröpfchen zusammenzieht. So berührt es nur wenig vom eigentlichen Blatt – stattdessen tropft bzw. rollt es langsam herunter. Und auf seinem Weg nimmt es jede Menge Schmutz mit. Die Lotusblume nutzt also die Oberflächenspannung von Wasser, um sich selbst sauber zu halten!





Da wir gerade von Sauberkeit sprechen: Ein Grund, in der Waschmaschine ein Waschmittel zu benutzen, liegt darin, dass es Seife und andere Substanzen enthält, die die Oberflächenspannung verringern. Ein Wasserläufer kann also nicht auf seifigem Wasser laufen! Und seifiges Wasser kommt daher auch viel besser in all die kleinen Falten der Kleidung – wofür es eine große Oberfläche braucht.

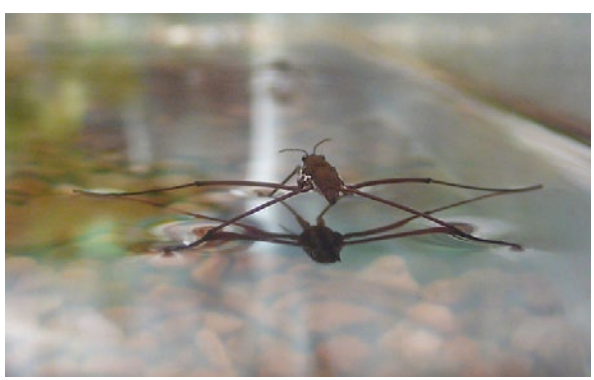


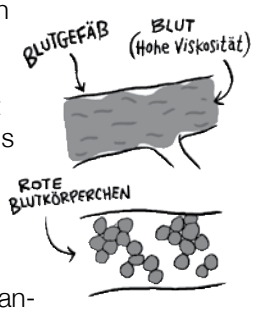
Foto: Tim Vickers


EXTRA DICK UND CREMIG
OOBLECK
SUPPE
EINFACH HAMMERSCHLÄGE HINZUFÜGEN

Nichtnewtonsches Fluid

Ist es flüssig? Oder ist es fest?

Wie könnte man eine Flüssigkeit beschreiben? Man könnte sich über ihre Farbe unterhalten, ihren Geruch oder Geschmack (Vorsicht!). Früher oder später wird man aber auch über ihre Viskosität sprechen. Die Viskosität beschreibt das, was wir üblicherweise als „dünne“ oder „dicke“ Flüssigkeit bezeichnen, in Zahlen. Zähe Flüssigkeiten, wie zum Beispiel Honig, haben hohe Viskositäten, während Wasser eine niedrige Viskosität besitzt. Mehr zur Viskosität erklären wir im Kapitel zur Supraleitung (↗1), wo wir von einer Flüssigkeit erzählen, die gar keine Viskosität hat.



Statt über Flüssigkeiten können wir auch allgemein über Fluide reden. Dieser Begriff beschreibt sowohl Flüssigkeiten, als auch Gase. Kannst du dir vorstellen, dass sich die Viskosität eines Fluids mit der Geschwindigkeit, dem Druck oder der Spannung ebenfalls ändert? Tut sie das nicht, spricht man von einem „Newtonschen Fluid“. Ändert sich die Viskosität aber tatsächlich, ist es ein „Nichtnewtonsches Fluid“. Die Änderung der Viskosität bei Anwendung einer sogenannten „Scherspannung“ kann positiv oder negativ sein. Die Viskosität wird also entweder größer oder kleiner. Eine Scherspannung wird durch Kräfte verursacht, die eine relative Bewegung zwischen den verschiedenen Schichten eines Objekts verursacht. Klingt kompliziert, ist aber einfach das, was passiert, wenn man ein Fluid durch ein Rohr drückt und das Fluid dann an der Rohrwand reibt. Wann immer sich ein Fluid bewegt, erfährt es eine Scherspannung. Und während diese normalerweise die Viskosität nicht ändert, betrachten wir jetzt einmal Fluide, bei denen das der Fall ist.

Wo Druck hilft – pseudoplastische Fluide

Wir hoffen, dass du niemals in die unschöne Lage gekommen bist, größere Mengen Blut sehen zu müssen. Vielleicht weißt du bereits, dass es dicker ist als Wasser. Da Blutgefäße relativ dünn sein können, fragt man sich schon, wie das dicke Blut dort überhaupt durchkommt. Das liegt daran, dass Blut ein tolles Beispiel für ein Nichtnewtonsches Fluid ist. Es gehört zur Gruppe der „pseudoplastischen“ oder „strukturviskosen“ Fluide. Das bedeutet, dass bei höherer Scherspannung die Viskosität abnimmt. Sehr gut! Fließendes Blut wird also dünnflüssiger und passt gut durch kleinste Blutgefäße. In der Abbildung sieht man den Effekt. Blut ist mehr als nur eine normale Flüssigkeit; es enthält viele Zellen. Die Erythrozyten, auch bekannt als rote Blutkörperchen, sind hauptverantwortlich für das Nichtnewtonsche Verhalten. In großen Blutgefäßen ohne viel Druck klumpen sie zusammen und blockieren sich gegenseitig. In dünneren Gefäßen



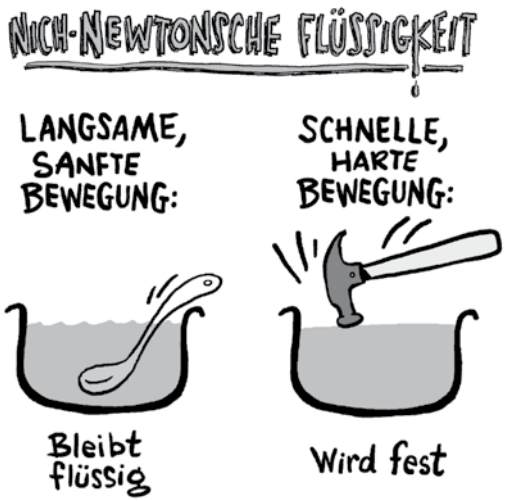
↗1: *„Supraleiter“ auf Seite 183*

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_10

bricht die Spannung die Klumpen auseinander und verformt sogar die roten Blutkörperchen. Diese Veränderung ihrer Form führt zu einem besseren Fluss und zu geringerer Viskosität. Ein anderes bekanntes Beispiel für ein pseudoplastisches Fluid ist Ketchup. Durch seine große Viskosität bekommt man es kaum aus der Flasche. Aber durch eine Scherspannung, z.B. beim Schütteln der Flasche, wird es dünnflüssiger und kommt heraus. Manchmal ist die Wirkung heftiger als gewollt. Dann gibt es statt Pommes mit Ketchup eben Ketchup mit Pommes.

Sich versteifende Fluide – Draufhauen tut weh

Die besonders Neugierigen unter euch wollen bestimmt nicht nur lesen, sondern auch gleich ausprobieren. Gute Nachrichten: Wir zeigen euch jetzt ein Fluid, das sich nichtnewtonsch verhält, gute Laune macht und noch dazu leicht herzustellen ist. Es gehört zur Gruppe der dilatanten (sich versteifenden) Fluide und verhält sich absolut gegensätzlich zu Ketchup und Blut. Wirkt darauf eine mechanische Spannung ein, steigt die Viskosität plötzlich stark an. Das Fluid, über das wir sprechen, hat Erwin als Suppe vor sich stehen. Man kennt es auch als „Oobleck“. Der Name stammt aus dem Kinderbuch „Bartholomew and the Oobleck“, das 1949 von Dr. Seuss geschrieben wurde. Es erzählt die Geschichte des Jungen Bartholomew, der im Königreich Didd lebte. Der König von Didd war gelangweilt vom vielen Regen und wollte, das etwas anderes vom Himmel fällt. Und so geschah es: Eine klebrige Substanz mit dem Namen Oobleck bedeckte das gesamte Königreich und Bartholomew musste es retten. Das Oobleck, über das wir reden (nicht das aus dem Buch) kann man leicht herstellen: Man braucht dazu nur etwas Wasser und Maisstärke. Beides wird im Verhältnis 1:1,5-2 gemischt. Wenn



man erstmal weiß, was am Ende herauskommen soll, kann man das Verhältnis später noch genauer anpassen. Die beiden sollten langsam vermischt werden, bis man etwas erhält, was auf den ersten Blick wie eine Flüssigkeit aussieht. Dann steckst du deinen Finger langsam in die Flüssigkeit und ziehst ihn schnell wieder heraus. Das Oobleck wird an ihm hängen bleiben! Und wenn du versuchst, deinen Finger schnell hereinzustecken, wird es ihn abblocken – so wie ein Festkörper.



Eine vollständige Erklärung für dilatante Fluide wie Oobleck gibt es noch nicht. Aber der „festwerde-Effekt“ ist auch mehr als nur eine gestiegene Viskosität. Eine bekannte Erklärung hat mit den relativ großen Maisstärkepartikeln zu tun. Sind sie von Wasser umringt,



können sie sich gut bewegen. Wendet man aber eine externe Kraft an, wird das Wasser aus dem Raum zwischen den Maisstärkemolekülen herausgepresst. Das verursacht eine starke Reibung zwischen ihnen, die das Oobleck klebrig und fest werden lassen.

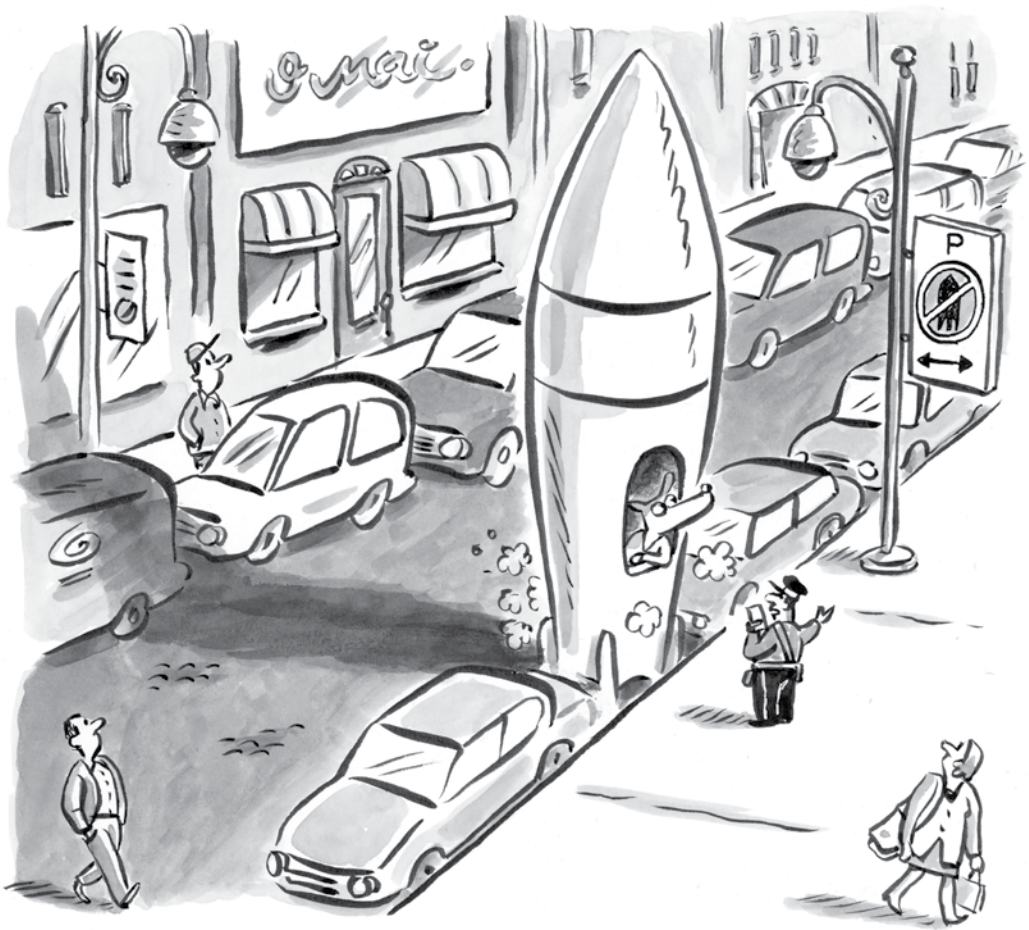
Je mehr Oobleck, desto mehr Möglichkeiten! Wenn du eine Schüssel damit füllst, kannst du es boxen. Aber pass auf, du könntest dir weh tun. Du kannst auch etwas Oobleck in die Hand nehmen und die Hand ständig schütteln. Damit kannst du das Oobleck transportieren, denn es bleibt fest. Aber sobald du aufhörst, läuft es dir aus der Hand (Vorsicht, Sauerei!). Hast du vielleicht einen großen Lautsprecher, der auch nicht mehr ganz neu und nicht teuer ist? Dann kannst du seinen Deckel abnehmen, eine Plastikfolie darüberspannen und etwas Oobleck hineinlegen. Wenn du dann die Musik anstellst, springt das Oobleck hin und her und nimmt lustige feste Formen an.

Für die Königsklasse der Oobleck-Experimente braucht man einen Pool, der ganz damit gefüllt ist, sowie einen mutigen Experimentator. Wenn du schnell genug bist, kannst du mit deinen Füßen über den Pool laufen, ohne zu versinken! Aber bleib unterwegs nicht stehen, sonst gehst du unter. Im Internet gibt es dazu auch tolle Videos. Aber nichts ist besser, als die Dinge selbst auszuprobieren, oder etwa nicht? Das Ganze sieht noch besser aus, wenn du dein Oobleck mit Lebensmittelfarbe vermischst.

Viel Spaß! Eine Warnung noch: Nach einiger Zeit trennen sich Wasser und Maisstärke wieder. Schütte das Ganze also bloß nicht in den Abfluss, der verstopft sonst. Wirf das Zeug lieber in die Mülltonne. Experimente mit Oobleck machen auf jeden Fall nicht nur Spaß, sondern man denkt auch über die Anwendungsmöglichkeiten von Nichtnewtonschen Flüssigkeiten nach. Eine damit gefüllte Weste würde sich bequem anfühlen. Sobald aber etwas schnelles, hartes (etwa eine Gewehrkugel) auf die Weste trifft, kann sie steinhart werden und dich schützen.



Abbildung: Arnulf Quadt / Georg-August-Universität Göttingen



“Schönes Manöver, aber Sie können hier nicht stehen bleiben.”

Raketenmanöver

Navigieren im Nichts

Satelliten sind ziemlich vielseitig. Sie umkreisen die Erde und helfen uns, weltweite Kommunikation zu betreiben, sie übertragen Fernsehsignale, helfen uns zu navigieren, schauen nach dem Wetter, erstellen Karten der Erde und vieles mehr. Hast du einmal daran gedacht, deinen eigenen Satelliten zu besitzen? Denken wir mal nicht an die komplizierte Entwicklung, sondern nur daran, wie wir ihn ins All bekommen könnten. Um die Sache noch mehr zu vereinfachen, denken wir an einen Tennisball, den wir ins All bringen wollen. Ein einfacher Ansatz: Wir nehmen ihn und werfen ihn in die Luft. Was beobachten wir dabei?

Zu schnell um zu bleiben

Wahrscheinlich fällt der Ball einfach wieder auf den Boden. Man kann aber auch beobachten, dass er immer höher fliegt, je schneller man ihn wirft. Die Ursache, weshalb er zurück kommt, ist die Gravitationskraft zwischen der Erde und dem Ball. Diese Kraft ist auch der Grund, weshalb wir auf der Erdoberfläche bleiben und auf ihr laufen können und nicht ins Weltall abheben. Man kann sagen, dass uns die Gravitation an die Erde bindet. Diese Bindung entspricht einer bestimmten Energie. Wenn man einen Tennisball nach oben wirft, hat er dabei eine gewisse kinetische Energie. Je schneller man ihn wirft, desto mehr. Diese Energie gleicht einen Teil der Bindungsenergie durch die Gravitation aus. An dem Punkt, wo der Ball umkehrt, hat er all seine kinetische Energie verloren und bekommt sie zurück, indem er wieder herunterfällt. Wenn man ein wenig rechnet, bekommt man die Lösung zu der Frage: „Wie schnell muss ich also meinen Ball werfen, damit er mehr kinetische Energie als Gravitationsenergie hat?“ Diese Geschwindigkeit – „Fluchtgeschwindigkeit“ genannt – ist unser Ticket ins All. Sie hängt von

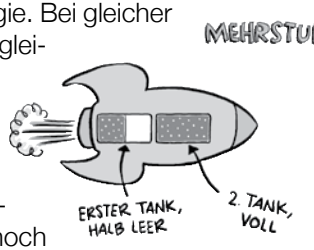




der Masse und dem Radius der Erde ab. Sie hat einen Wert von 11,2 km/s bzw. 40.000 km/h. Das ist ziemlich schnell. Bei der Sonne wäre die Fluchtgeschwindigkeit noch viel höher: 617,5 km/s. Diese Fluchtgeschwindigkeit ist in der Tat die Mindestgeschwindigkeit, die man benötigt, um die Erde zu verlassen und ins All zu gelangen – aber das stimmt

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_11

nur für den Fall, dass man keinen weiteren Antrieb hat, so wie der Ball: Einmal aus der Hand, wird er immer langsamer. Aber Raketen können weiter beschleunigen und das erlaubt ihnen, auch mit viel geringeren Geschwindigkeiten zu starten. Ein Beispiel für ein Objekt ohne Antrieb, für das die Fluchtgeschwindigkeit wichtig ist, sind Atome. Wasserstoff und Helium sind ziemlich leicht. Die Temperatur der Gase in unserer Atmosphäre bestimmt ihre mittlere kinetische Energie. Bei gleicher Temperatur, und damit gleicher kinetischer Energie, sind leichte Atome schneller. Das ist der Grund, weshalb es in unserer Atmosphäre weder Wasserstoff noch Helium gibt: im Gegensatz zu schweren Atomen wie Stickstoff und Sauerstoff sind diese leichten Atome bei der Atmosphärentemperatur schneller als die Fluchtgeschwindigkeit und entkommen der Schwerkraft der Erde.

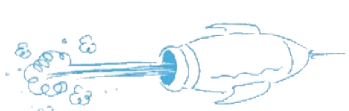


Übrigens: man kommt auf eine geringere Fluchtgeschwindigkeit wenn man berücksichtigt, dass sich die Erde dreht. Abhängig von der Startrichtung (gegen oder mit der Erddrehung) kann man die Fluchtgeschwindigkeit um 10% erhöhen oder verringern. Da die Rotationsgeschwindigkeit am Äquator am größten ist, sind viele Weltraumbahnhöfe dort angesiedelt, etwa das amerikanische Cape Canaveral oder das europäische Guyana Space Center.

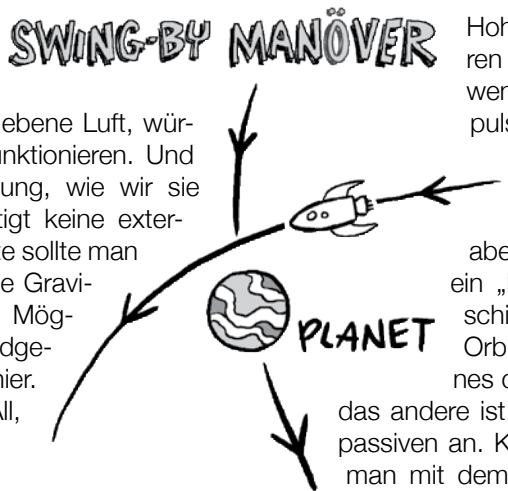
Auf, auf, Rakete!

Wir wissen jetzt, dass jede Reise ins All damit beginnt, dem Gravitationsfeld der Erde zu entkommen. Die Frage ist: Wie kommen wir auf die nötige Geschwindigkeit? Normalerweise benutzen wir Raketen. Sie stoßen ihren Treibstoff mit Höchstgeschwindigkeit aus. Entsprechend der Newtonschen Gesetze führt das zu einem Schub der Rakete. Man kann eine Rakete so lange beschleunigen, wie noch Treibstoff da ist. Das Interessante am Raketenantrieb: Er muss nicht nur die Rakete beschleunigen, sondern auch den eigenen Treibstoff. Je mehr Treibstoff also verbraucht ist, desto leichter wird es, die Rakete zu beschleunigen. Diese Tatsache berücksichtigt die berühmte „Raketengleichung“. Sie besagt, dass die maximale Endgeschwindigkeit einer Rakete durch die Ausstoßgeschwindigkeit des Treibstoffs multipliziert mit dem Logarithmus des Verhältnisses der Masse einer vollen zu einer leeren Rakete gegeben ist.

Um die maximale Raktengeschwindigkeit zu erhöhen, kann man also entweder die Ausstoßgeschwindigkeit des Treibstoffs oder das Massenverhältnis der vollen zur leeren Rakete erhöhen. Die Raketengleichung besagt auch, dass es effektiver ist, eine Mehrstufenrakete statt einer einzigen großen Rakete zu verwenden. Solche Raketen haben mehrere Stufen, alle mit eigenem Antrieb und Treibstofftank. Ist ein Tank leer, wird er vom Rest der Rakete abgestoßen. Zur weiteren Optimierung kann man auch die Ausstoßgeschwindigkeit des Treibstoffs erhöhen. Klassischer Raketentreibstoff kommt in fester und flüssiger Form vor und wird in



Verbrennungstriebwerken eingesetzt. Das Gute daran: Er funktioniert auch im Vakuum, etwa im Weltall. Dort, ohne umgebene Luft, würden Flugzeugtriebwerke nicht funktionieren. Und noch etwas: Die Raketengleichung, wie wir sie beschrieben haben, berücksichtigt keine externen Kräfte. Beim Bau einer Rakete sollte man aber, zumindest für den Start, die Gravitationskraft berücksichtigen. Die Möglichkeiten zur Optimierung der Endgeschwindigkeit gelten aber auch hier. Und ist die Rakete erstmal im All, gibt‘s keine Gravitation mehr.



Manöver im Weltall

Hat man es ins All geschafft, kann man verschiedene Manöver durchführen. Stell dir vor, du umrundest die Erde, aber du möchtest den Abstand zur Erde verändern, indem du den Orbit wechselst. Ein besonders interessanter liegt ca. 36.000 km über dem Äquator der Erde. Auf jedem Orbit braucht man eine ganz bestimmte Zeit, um die Erde zu umrunden (oder irgendein anderes Objekt im All, ↗[1]). Im geostationären Orbit ist diese Zeit genau so lange, wie die Erde für eine Umdrehung braucht. Das bedeutet, dass ein Satellit im geostationären Orbit aus Sicht der Erde immer eine feste Position hat. Das Manöver, mit dem man einen Orbit wechselt, heißt „Hohmann-Transfer“. Möchte man sich mittels eines Hohmann-Transfers weiter entfernen, braucht man zwei kleine Impulse, jeweils in Flugrichtung und tangential zum Orbit. Der erste bringt einen auf eine elliptische Bahn, den eigentlichen Hohmann-Orbit. Der zweite Impuls bewegt die Rakete aus dem Hohmann-Orbit in eine zweite, kreisförmige Umlaufbahn.



Hohmann-Transfers funktionieren natürlich auch umgekehrt, wenn man die Richtung der Impulse umdreht.

Ein anderes Manöver, das zwar romantisch klingt, aber ziemlich kompliziert ist, ist ein „Rendezvous“: Zwei Raumschiffe treffen sich im selben Orbit an der gleichen Stelle. Eines davon ist passiv und wartet; das andere ist aktiv und nähert sich dem passiven an. Klingt einfach: Erst wechselt man mit dem Hohmann-Transfer in den richtigen Orbit, dann bewegt man sich auf das passive Objekt zu. Das kann man mit ein wenig Schub erreichen. Aber halt! Dadurch ändert sich die Geschwindigkeit und dadurch wiederum der Orbit. Man braucht also etwas mehr Hirnschmalz und zusätzliche Impulse.

Kommen wir schließlich zu den „Swing-by-Manövern“. Plant man eine Mission zu einem weit entfernten Objekt, etwa zum Mars, will man möglichst viel Treibstoff sparen. Swing-by-Manöver beschleunigen ein Raumschiff über die Gravitationskraft anderer Planeten, die man auf dem Weg trifft, und die sich in die gleiche Richtung bewegen. Man kann mehrere Swing-by-Manöver nutzen, so wie es die 2004 gestartete Rosetta Mission tat (↗[2]). Auf ihrem Weg zum Kometen 67P/Churyumov–Gerasimenko wurden drei Swing-bys an der Erde und einer am Mars durchgeführt. Solch eine ausgefuchste Reise braucht perfektes Timing! „Hoppla, Mars verpasst“ hätte das Ende der Mission bedeutet.

↗[1]: *„Die Keplerschen Gesetze“ auf Seite 47*
↗[2]: *„Die Voyager-Sonden“ auf Seite 55*



“Sie sagen, sie kämen von einem Planeten, der die Keplerschen Gesetze gebrochen hat.”

Die Keplerschen Gesetze

Was zur Bewegung der Planeten nötig ist

Stell dir vor, du wärst ein bekannter Wissenschaftler und du forschst an einem spannenden Thema. Plötzlich erkennst du, dass es jemand anderen gibt, der sehr talentiert, aber nicht besonders bekannt ist. Und er arbeitet an demselben Thema wie du. Was würdest du machen? Mit ihm zusammenarbeiten, oder ihm Steine in den Weg legen? Oder eher etwas dazwischen? Einer der wichtigsten Astronomen, der Däne Tycho Brahe, war in genau so einem Dilemma. Aber beginnen wir mit dem Anfang.

Brahe beobachtete die Bewegung der Sterne und Planeten zu einer Zeit, in der Teleskope noch nicht erfunden waren, also am Ende des 16. Jahrhunderts. Selbst ohne Teleskope (die leider erst wenige Jahre nach seinem Tod entwickelt wurden) erreichte er eine ganze Menge. Eine der größten Herausforderungen, an denen er arbeitete, war die Beschreibung der Planetenbahnen. Zu dieser Zeit glaubte man noch, dass die Erde das Zentrum des Universums sei, und dass alle Planeten und auch die Sonne uns umkreisen würden.



Aber dieses Modell konnte seltsame Besonderheiten der Planetenumlaufbahnen, z.B. vom Mars, nicht erklären. In der Abbildung sieht man, wie die Mars-Umlaufbahn von der Erde aus zu sehen ist. Es scheint, als würde Mars auf seiner Bahn immer wieder kleine Schleifen durchlaufen. Eine kreisförmigene Umlaufbahn um die Erde ist das schon einmal nicht. Man versuchte, das Modell der Planetenbewegung zu verbessern, indem man einen zusätzlichen kleinen Kreis auf den großen Kreis (um die Erde) setzte. Aber auch das klappte nicht so recht.

Kepler, das junge Talent

Brahe hatte das Gefühl, dass er etwas Hilfe gebrauchen könnte, obwohl er das nicht so recht zugeben wollte. Er kannte Johannes Kepler, einen jungen, talentierten Astronom. Während Brahe durch seine Beobachtungen viele präzise Daten hatte, besaß Kepler das Talent, theoretische Modelle zu entwickeln. Zurück zum ersten Absatz: Wenn du Brahe wärst, was würdest du tun? Brahe entschied sich für die letzte Option. Er lud Kepler nach Prag ein, den Ort an dem er forschte, und bat ihn, sein Assistent zu werden. Auf diese Art konnte er von Keplers Talent profitieren. Aber wie konnte Brahe sichergehen, dass Kepler die Daten, auf die er jetzt Zugriff hatte, nicht schnell analysieren und neue Theorien aufstellen würde, um letztlich sogar bekannter als Brahe zu werden? Brahe entschied sich, Kepler ein wenig zu beschäftigen, indem er ihn vor eine Aufgabe stellte, die anscheinend nicht lösbar war (zumindest nicht in kurzer Zeit). Kepler sollte die Umlaufbahn des Mars untersuchen. Dies war in der Tat eine gro-

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_12

ße Herausforderung. Kepler begann mit einem ganz neuen Ansatz. Anders als Brahe stellte er die Sonne ins Zentrum, nicht die Erde. Wir bezeichnen dieses System als „heliozentrisch“ oder „kopernikanisch“, nach dem Astronom Nikolaus Kopernikus, der es ca. 100 Jahre vor Brahes Arbeit an der Marsumlaufbahn entwickelt hatte.

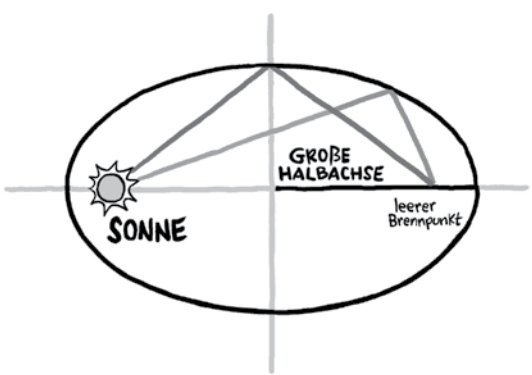
Die Keplerschen Gesetze

Selbst mit diesem System war es nicht einfach, die Umlaufbahn des Mars zu erklären. Noch immer war die Annahme, dass sich die Planeten auf Kreisen bewegten, falsch. Kepler fand heraus, dass die Bahnen keine Kreise, sondern Ellipsen waren! Und da haben wir's, das erste Keplersche Gesetz:

Die Planeten bewegen sich auf elliptischen Bahnen um die Sonne, die in einem der Brennpunkte der Ellipse liegt.

Aber was ist ein Brennpunkt? Bei einer Ellipse denkt man an „eine Art Kreis, nur gequetscht“. Aber die exakte mathematische Definition ist anders: eine Ellipse ist eine Kurve um zwei Brennpunkte, bei der die Summe der Abstände zu den beiden Brennpunkten stets konstant ist. Wow, das ist schwer zu verstehen. Denk an zwei Holzstöckchen im Boden (die Brennpunkte). Nimm nun eine Schnur die länger als der Abstand der Stöcke ist und binde sie an die Stöcke. Nimm einen Stift, strecke die Schnur und male eine Linie. Alle Punkte auf dieser Linie haben dann eine konstante Summe an Abständen zu den Brennpunkten, also genau die Länge der Schnur. Unsere Abbildung hilft bestimmt dabei, sich das vorzustellen. Übrigens: ein Kreis ist eine Ellipse, bei der die Brennpunkte aufeinander fallen, nämlich in der Mitte des Kreises. Während diejenigen, die an Kreisbahnen der Planeten glaubten, auch von einer konstanten Umlaufgeschwindigkeit ausgingen, fand Kepler heraus, dass dies nicht mehr stimmen konnte. Stattdessen ist aber eine andere Größe, die im Zusammenhang mit den Umlaufbahnen steht, konstant. Und hier kommt das zweite Keplersche Gesetz:

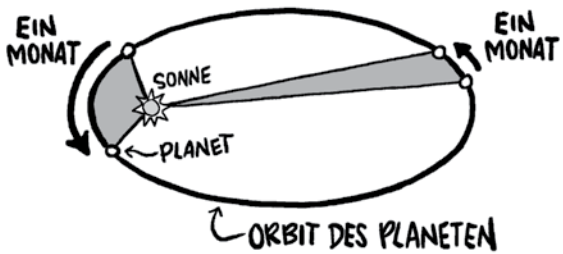




In gleichen Zeitintervallen überstreicht eine Linie vom Planeten zur Sonne die gleiche Fläche.

Je näher ein Planet der Sonne ist, desto schneller wird er. Das liegt an der Erhaltung des Drehimpulses (↗[1]). Stell dir einen Eiskunstläufer vor, der die Arme näher an den Körper bringt, um sich schneller zu drehen. Nahe an der Sonne bewegt sich ein Planet also schneller und zieht die Verbindungslinie auch schneller mit. Aber weil er so nahe ist und die Linie kurz, ist die überstrichene Fläche kleiner (pro Bewegungsstückchen). Die höhere Geschwindigkeit des Planeten gleicht diesen Effekt aber genau aus. Verrückt! Wir müssen uns im Klaren sein, dass all diese Gesetze empirisch gefunden wurden.

↗[1]: *„Erhaltungssätze“ auf Seite 51*



Das heißt, Kepler hatte lediglich ein paar Punkte, das heißt die Aufenthaltsorte der Planeten, und die entsprechenden Zeiten. Und er konnte das alles nicht aus weiter Entfernung im All betrachten, von wo aus man die Ellipsen gut hätte erkennen können, sondern nur von hier unten aus. Von solch seltsamen Umlaufbahnen wie der des Mars hat er seine beiden Gesetze abgeleitet. Während er relativ schnell auf die ersten beiden Gesetze kam, hat das dritte etwas länger gedauert. Es besagt:

Das Quadrat der Umlaufzeit geteilt durch die Länge der großen Bahnhalbachsen hoch drei ist konstant.

Die große Bahnhalbachse sehen wir in unserer Abbildung der Ellipse. Sie ist der Mittelwert des längsten und kürzesten Abstands zwischen Planet und Sonne. Grob gesagt besagt das dritte Keplersche Gesetz: Je größer die Umlaufbahn, desto länger dauert es, sie zu durchlaufen. Während das ja relativ offensichtlich ist, macht das Gesetz noch ein paar genauere Angaben, wie viel länger es dauert, die Sonne zu umkreisen. Sobald man diesen konstanten Wert kennt, zum Beispiel für die Umlaufbahn der Erde, kann man die Umlaufzeit aller anderen Planeten bestimmen! Versuchen wir es mit einem Beispiel. Der mittlere Abstand zwischen Sonne und Erde beträgt eine astronomische Einheit (1 AU), was ca. 150 Millionen km entspricht. Wenn wir also wissen, dass der mittlere Abstand zwischen Jupiter und der Sonne 5,2 AU ist, wissen wir dann auch, wie lange es dauert, bis Jupiter die Sonne umkreist? Ja, dank des dritten Keplerschsen Gesetzes! Setzen wir die Werte von Erde und Jupiter in die Gleichungen ein, kommen wir auf 11,9 Jahre.



Das Tolle an den Keplerschen Gesetzen ist, dass sie entwickelt wurden, ohne dass man die Gravitationskraft kannte, die Isaac Newton ca. 70 Jahre später formulierte. Es ist ein schönes Beispiel, wie Naturgesetze gefunden werden. Erst beobachtet man die Natur. Dann versucht man eine Formel zu finden, welche die Natur beschreibt. Und am Ende überprüft man das Gesetz an neuen Daten. Heute, wo man die Gravitation kennt, könnten wir auch anders herum anfangen: Man nimmt das Gravitationsgesetz und leitet daraus die Keplerschen Gesetze ab.

Man kann die Keplerschen Gesetze nicht nur für die Bewegung von Planeten um die Sonne verwenden. Man kann daraus auch die Umlaufbahnen von Satelliten oder die des Mondes um die Erde berechnen. Man muss nur sicherstellen, dass die Objekte relativ schwer sind und nicht durch andere, nahe und schwere Objekte gestört werden (was für die Planeten im Sonnensystem zutrifft) und dass man andere Kräfte als die Gravitation vernachlässigen kann. Das könnte z.B. eine Rolle spielen, wenn zu viele Asteroiden im Weg liegen. Aber zum Glück ist das bei den Planeten nicht der Fall.


ERHALTUNGSSÄTZE
POTENZIELL
KINETISCH
THERMISCH
ENSPANN DICH, ICH HAB DICH
PUH!
IMMER SCHÖN COOL BLEIBEN!

Erhaltungssätze

In der Natur geht nichts verloren

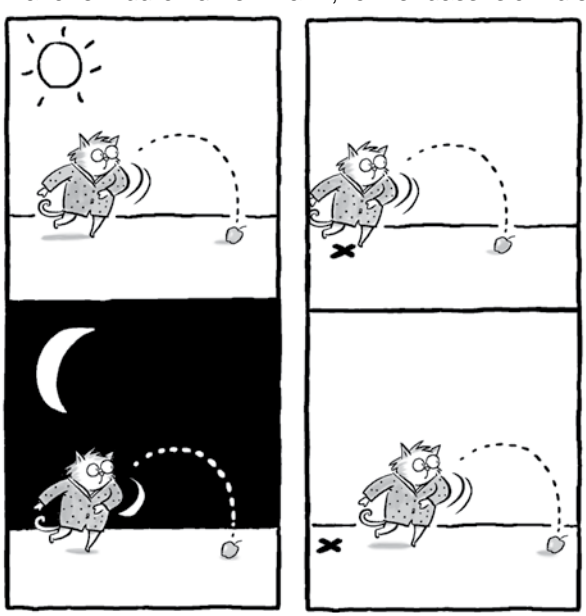
Ein Kraftwerk zu betreiben verbraucht Ressourcen, von denen wir nur eine begrenzte Menge zur Verfügung haben (zumindest für die meisten Kraftwerke). Man sieht: Es gibt keinen Grund, etwas zu verschwenden. Aber was passiert eigentlich mit der Energie, die wir verschwenden? Ist sie weg? Man kann sagen: „Ja, denn es gibt keine Möglichkeit, sie zurückzubekommen." Aber ein Physiker würde wahrscheinlich antworten: „Energie bleibt in der Natur erhalten! Immer und überall!" Und er hat recht. Unsere Naturgesetze basieren auf der Erhaltung bestimmter Größen, und Energie ist eine davon.

Symmetrien erhalten Dinge

Es ist sicherlich gut zu wissen, welche Größen in der Natur erhalten bleiben. Aber ist es nicht auch interessant zu wissen, wieso? Es ist natürlich möglich, sich eine Größe vor und nach einem physikalischen Prozess anzuschauen und zu vergleichen. Das ist ein typischer Ansatz für einen Experimentalphysiker. Aber auch der Theoretiker (wie Emmy) hat ein wichtiges Werkzeug, um sogar vorherzusagen, welche Größen erhalten bleiben. Die Mathematikerin Emmy Noether postulierte ein Theorem („Noethersches Theorem"), das 1925 von ihr bewiesen wurde. Es besagt: „Zu jeder kontinuierlichen Symmetrie eines physikalischen Systems gehört eine Erhaltungsgröße". Was heißt das? Wann immer man eine Symmetrie in der Natur beobachtet, kann man eine entsprechende Erhaltungsgröße überprüfen. Solche Symmetrien beziehen sich auf Eigenschaften, die man ändern kann, ohne die Eigenschaften des Systems zu ändern.

Ok, das wird jetzt etwas zu technisch. Fangen wir mit einem Beispiel an. Wenn man einen Apfel wirft, kann man ausrechnen, wo er lang fliegt und wann er auf den Boden trifft. Was, wenn man jetzt die Abwurfzeit in den Formeln auf später verschiebt? Nachts wird der Apfel genauso fliegen.

Es gibt noch mehr mögliche Transformationen: Lauf ein paar Schritte zur Seite und wirf dann den Apfel. Immer noch das gleiche, oder? Und wenn du magst, kannst du dich auch drehen und dann nochmal werfen. Wieder fliegt er auf die gleiche Weise (nur eben in eine andere Richtung). Es gibt keinen Zweifel, dass man die vorgeschlagenen Transformationen durchführen kann, ohne dass sich die



© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_13

Naturgesetze ändern, stimmt's? Und jetzt denken wir an Noethers Theorem: Zu jeder dieser Symmetrien gehört eine Erhaltungsgröße! Durch die erste, Zeitinvarianz (keine Abhängigkeit von der Zeit), gehört die Erhaltung der Energie. Die zweite, Translationsinvarianz (keine Abhängigkeit vom Ort), führt zur Erhaltung des Impulses. Und die Rotationsinvarianz (Unabhängigkeit von der Drehrichtung beim Abwurf) führt letztlich zur Erhaltung des Drehimpulses.

Energieerhaltung – immer da, aber vielleicht weniger nützlich

Gehen wir zurück zur Energie. Was passiert mit ihr, wenn man sie „verschwendet" hat? Das hängt vom Prozess ab. Schauen wir auf unseren Cartoon. Erwin klettert den Berg hoch. Das kostet ihn Energie (vielleicht verbrennt er Fett), aber dafür bekommt er potenzielle Energie, je höher er steigt. Diese potenzielle Energie kann er dann nutzen, um die Klippe hinabzufallen und sie in kinetische Energie umzuwandeln und schneller zu werden. Trifft er auf den Boden, wird seine kinetische Energie in Wärmeenergie umgewandelt. Die Reibung zwischen ihm und Maxwells Armen erzeugt Wärme. Würde er auf etwas anderes fallen, könnte seine Energie auch dazu dienen, dessen oder seine eigene Form zu verändern. Aber denken wir lieber nicht daran.



Wenn du ein Auto fährst, kinetische Energie hast und dann bremst, wandelst du sie in die Wärme der Bremsen (thermische Energie) um. Und selbst wenn geheimnisvollere Dinge passieren, z.B. in



Wärmepads (die plötzlich warm werden, wenn man das Metallplättchen im Inneren drückt), die scheinbar Wärme aus dem Nichts produzieren, bleibt die Energie erhalten. Der professionelle Name für solche Pads ist „Latentwärmespeicher". Indem man einen externen Auslöser (das Plättchen) betätigt, startet man einen Phasenübergang des Materials von flüssig nach fest, wobei Energie frei wird. Die Energie lag in der chemischen Struktur, und da die neue Struktur weniger Energie benötigt, um ihre Form zu behalten, wird diese Energiedifferenz als Wärme frei (exotherme Reaktion). Andere interessante Erscheinungen der Energieerhaltung findet man bei Teilchenzerfällen (↗[1]), der Kernfusion (↗[2]) und Kernspaltung (↗[3]). In diesen Prozessen wird Energie auch teilweise über $E = mc^2$ (↗[4]) in Masse umgewandelt, und umgekehrt.

Impulserhaltung – denk an den Rückstoß!

Impuls ist definiert als das Produkt von Geschwindigkeit und Masse. Man nennt diese Größe einen „Vektor", der anders als eine normale Zahl nicht nur einen Wert, sondern auch eine Richtung hat. Der



Gesamtimpuls eines Systems ist die Größe, die erhalten bleibt. Im Kapitel zum Standardmodell (↗[5]) sehen wir Erwin und Maxwell auf Skateboards. Am Anfang ist der Gesamtimpuls Null. Wenn Maxwell eine Banane wirft (z.B. nach rechts), hat die Banane einen Impuls. Um den auszugleichen, muss es einen Gegenimpuls nach links geben: Maxwell selbst.

↗[1]: *„Teilchenzerfälle" auf Seite 225*
↗[2]: *„Kernfusion" auf Seite 179*
↗[3]: *„Radioaktive Zerfälle" auf Seite 171*
↗[4]: *„$E = mc^2$" auf Seite 241*
↗[5]: *„Das Standardmodell" auf Seite 217*

Hat er das 50-fache Gewicht der Banane, beträgt seine Rückstoßgeschwindigkeit nach links 1/50 der Bananengeschwindigkeit.

Impulserhaltung ist überall und wird oft vergessen. Denk daran, wenn du nahe an einer Klippe stehst und eine Banane wirfst! Und denk auch daran, wenn du mit einem Gewehr schießt! Schnelle Kugeln verursachen einiges an Rückstoß. Und selbst wenn du in die Luft springst, gibst du der Erde dabei einen Schubs in die Gegenrichtung! Aber da die Erdmasse ca. 10^{23} Mal größer ist als deine, kann man den getrost vernachlässigen.

Dreh dich – Drehimpuls

Was der Impuls für lineare Bewegungen darstellt, ist der Drehimpuls für Rotationen. Drehst du einen Kreisel, hat er zwar keinen linearen Impuls, aber einen Drehimpuls. Rollt ein Ball den Berg hinab, hat er sowohl Linear- als auch Drehimpuls. Es gibt viele Möglichkeiten, einen Drehimpuls zu definieren. Nehmen wir eine einfache: Ein Objekt dreht sich um eine Achse. Der Betrag des Drehimpulses ist dann das Produkt der Masse und Geschwindigkeit des Objekts sowie dessen Abstand zur Drehachse. Weil dieses Produkt konstant bleibt, passieren manchmal komische Dinge. Beobachtet man Eiskunstläufer, die eine Pirouette drehen und dabei die Arme näher an den Körper bringen, sieht man, dass sie schneller werden: Wird der Abstand zur Drehachse kleiner, muss die Geschwindigkeit größer werden. Ein anderes beeindruckendes Beispiel ist ein soganannter „Feuertornado“ (dazu gibt es schöne Videos auf Youtube), den man einmal gesehen haben sollte. In der Astrophysik spielt der Drehimpuls ebenfalls eine wichtige Rolle und führt z.B. zu extrem schnell drehenden Neutronensternen (↗[6]).



Und der Rest

Es gibt noch mehr Erhaltungsgrößen. Ladungserhaltung besagt, dass jede elektrische Ladung von irgendwoher kommen muss, Elektronen müssen z.B. von einem Atom abgezogen worden sein. Oder wenn man z.B. in einem Teilchenbeschleuniger (↗[7]) Energie in Materie umwandelt, sieht man, dass zu jedem Teilchen ein passendes Antiteilchen (↗[8]) erzeugt wird.



Neben der elektrischen gibt es auch andere Ladungen, die in Reaktionen erhalten bleiben, so wie die starke (↗[9]) und die schwache (↗[10]) Ladung. Physiker führen sehr genaue Messungen durch, um die Erhaltungssätze zu testen, weil sie nach kleinsten Abweichungen suchen. Jeder verletzte Erhaltungssatz würde bedeuten, dass wir unsere Naturgesetze ändern müssten. Ein beliebtes Beispiel ist die „CP Symmetrie“ (↗[10]). Ihre Verletzung kann die Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie im Weltall erklären, ohne die wir nicht existieren würden.

↗[6]: *„Weiße Zwerge und Typ Ia Supernovae“ auf Seite 87*
↗[7]: *„Teilchenbeschleuniger“ auf Seite 253*
↗[8]: *„Antimaterie“ auf Seite 221*
↗[9]: *„Die Starke Wechselwirkung“ auf Seite 233*
↗[10]: *„Die Schwache Wechselwirkung“ auf Seite 237*


VOYAGER I & II
VOYAGER 1 HAT DIE GOLDEN RECORDS AN BORD
TED TALK
GOLDEN RECORD
...EINE MOMENTAUFNAHME DER IRDISCHEN KUNST UND KULTUR—
DIE ESSENZ DESSEN, WAS WIR SIND!
...EINES TAGES KÖNNTE DIE AUFNAHME VON EINER INTERSTELLAREN ZIVILISATION GEFUNDEN WERDEN, UND SIE WÜRDEN ALLES ÜBER UNS LERNEN...
WIR WERDEN DIE ERSTEN SEIN, DIE DIE RIESIGEN DISTANZEN ZWISCHEN DEN STERNEN ÜBERBRÜCKEN, UND "HALLO" SAGEN!
KLATSCH
KLATSCH
KLATSCH
KLATSCH
10,000,000 AD, PLANET PORG
HAT 'NEN SPRUNG.

Die Voyager-Sonden

Wo noch kein Mensch zuvor gewesen ist

Wir kennen die Planeten unseres Sonnensystems schon eine Weile. In einer klaren Nacht kann man unsere direkten Nachbarn, Mars und Venus, sogar mit bloßem Auge sehen. Schon unsere frühen Vorfahren kannten sie, und es ist kein Wunder, dass sie die Namen von Göttern tragen. Die, die weiter weg sind, so wie Neptun und Uranus, die Eisriesen am äußeren Ende unseres Sonnensystems, haben für Jahrhunderte sowohl Wissenschaftler als auch Künstler inspiriert.

Besuch bei den Eisriesen

Die menschliche Neugierde scheint unerschöpflich zu sein. Somit ist es kein Wunder, dass wir diese Planeten schon immer besuchen wollten. Dann könnten wir sehen, woraus sie gemacht sind und was hinter ihnen liegt.

In den 60er und 70er Jahren des vergangenen Jahrhunderts kamen zwei Faktoren zusammen, die es ermöglichten, von Menschen gefertigte Blechtonnen zum äußeren Rand des Sonnensystems zu schicken. Zum einen hatte sich die Technologie weit genug entwickelt, um unbemannte Sonden und bemannte Raumfahrzeuge erdnah ins All zu schicken. Die Technologien, die Raumfahrten ermöglichten, waren also vorhanden. Und bald darauf entwickelte sich ein Plan: Wir müssen Sonden zum Rand unseres Sonnensystems schicken!



Zum anderen befanden sich die Planeten in einer bestimmten Konstellation, die unbedingt erforderlich war, um über die innersten Planeten unseres Sonnensystems hinaus zu reisen. Je weiter man sich nämlich von der Sonne entfernen möchte, desto mehr Energie benötigt man. Um ihr genug Energie mit auf den Weg zu geben und damit den Rand des Sonnensystems zu erreichen, hätte die Sonde mit ca. 150.000 km/h abheben müssen! Die Menge an Treibstoff, die man dafür bräuchte, ist gigantisch – und das hätte die Sonde viel viel schwerer gemacht, wodurch sie noch mehr Treibstoff verbraucht hätte. Viel zu teuer!

Es gibt jedoch einen Trick, mit dem man der Sonde genug Energie geben kann: das sogenannte Swing-By-Manöver (↗[1]). Hierfür muss man einer Sonde nur genug Energie mitgeben, um einen Planeten zu erreichen. Dabei zielt man aber kurz hinter den Planeten. Sobald die Sonde den Planeten erreicht, spürt sie sein Gravitationsfeld und wird angezogen. Wenn man die Flugbahn genau berechnet, wird die Sonde nicht in den Planeten krachen, sondern knapp an ihm vorbei fliegen. Durch den knappen Vorbeiflug wird die Gravitationskraft des Planeten die Sonde weiter hinaus ins All beschleunigen! Tatsächlich klaut die Sonde dem Planeten dabei etwas von dessen Bewegungsenergie, die er durch die Rotation um die Sonne besitzt – doch die ist so gewaltig groß verglichen mit der Energie der Sonde, dass es den

↗[1]: *„Raketenmanöver“ auf Seite 43*

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_14

Planeten nicht weiter kümmert. Für die Sonde bedeutet das allerdings, dass sie neue Energie gewonnen hat, um sich auf ihrer Reise noch weiter von der Sonne zu entfernen.

1977 standen die Planeten gut!

Im Jahr 1977 standen die Planeten des Sonnensystems dann in einer besonderen Konstellation, die nur alle 175 Jahre stattfindet. Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun standen so, dass eine Sonde viele Swing-By-Manöver hintereinander durchführen und von jedem der Planeten Energie mitnehmen konnte!



Daher wurden 1977 die beiden Voyager-Sonden gestartet. Voyager 2 hat die Erde zuerst verlassen, und sollte Swing-By-Manöver an Jupiter, Saturn, Uranus, und Neptun durchführen. Ihre Mission war es, all diese Planeten während der dreijährigen Flugreise zu besuchen und detaillierte Fotos und Telemetrie-Daten zur Erde zu senden. Kurz nach ihrem Start folgte ihr Voyager 1 (die du in der Abbildung sehen kannst), jedoch auf einer kürzeren, schnelleren Bahn. Nachdem sie an Jupiter und Saturn vorbei war, sollte sie dem Saturn-Mond Titan, an dem die Wissenschaftler großes Interesse hatten, einen kurzen Besuch abstatten.

Obwohl sie später startete, hat Voyager 1 Voyager 2 schnell überholt. Ende 1979 erreichten die beiden nur weniger Monate hintereinander Jupiter. Das Jupiter-System (bestehend aus dem Planeten und seinen vielen Monden) wurde zu einem Ort unzähliger spannender Entdeckungen, allen voran die Tatsache, dass der Jupiter-Mond Io aktive Vulkane besitzt, die die ganze Gegend beeinflussen. Und wir haben erfahren, dass nicht nur Saturn, sondern auch Jupiter Ringe hat!

Im November 1980 flog Voyager 1 an Saturn vorbei und machte detaillierte Aufnahmen von der Atmosphäre des Titan, der gerade mal ein Jahr zuvor von den Sensoren von Pioneer 11 entdeckt worden war. Hierfür musste Voyager 1 ihren Kurs jedoch etwas ändern. Sie konnte zwar detaillierte Messungen durchführen, der geänderte Kurs beinhaltete jedoch ein Swing-By-Manöver an Titan, was sie aus der Ekliptik warf, also der Ebene, die alle Planeten bei ihrem Umlauf um die Sonne bilden. Seitdem ist Voyager 1 auf einem Weg, der sie aus unserem Sonnensystem heraus führt und sie nie wieder in die Nähe eines Planeten bringen wird. Im August 1981 flog Voyager 2 an Saturn vorbei und folgte dem ursprünglich geplanten Weg zu den anderen Eisriesen.



Sie erreichte Uranus im Jahr 1986, wo sie zehn bis dahin unbekannte Monde entdeckte. 1989 flog sie auch an Neptun vorbei, wo sie einen großen, dunklen Fleck an dessen Oberfläche entdeckte, vergleichbar mit dem

Abbildung: NASA

großen roten Fleck auf der Oberfläche des Jupiter. Das Weltraumteleskop Hubble hat mittlerweile allerdings festgestellt, dass der dunkle Fleck wieder verschwunden ist.

Während der 1990er Jahre haben die Voyagers die beiden langsameren Sonden Pioneer 10 und Pioneer 11 überholt und wurden dadurch zu den am weitesten von der Sonne entfernten Objekten, die je von Menschenhand gebaut wurden. Am 14. Februar 1990 war Voyager 1 weit genug entfernt, um ein Foto des kompletten Sonnensystems zu schießen – inklusive aller Planeten mit der Erde als blassem, blauen Fleck. Im Jahr 2004 erreichte Voyager 1 den „Termination Shock", eine Region, in der die Strahlung der Sonne auf das interstellare Medium trifft. In dieser Region ist es außerhalb der Sonde einige Millionen Grad heiß – dennoch kein Problem für die Sonde an sich: Obwohl die Teilchen durch ihre hohe Temperatur so unglaublich hohe Energien besitzen, sind es doch nur ganz wenige (denn im Wesentlichen befindet sich die Sonde im Vakuum). Der Termination Shock wird auch als Grenze des Sonnensystems angesehen.

Ab 2010 wurde dann festgestellt, dass Voyager 1 keine Anzeichen von Sonnenwind mehr empfängt. Sie hat also definitiv das Sonnensystem verlassen!

Die Golden Records

Obwohl sie eigentlich nur ein paar Jahre funktionieren sollten, sind die Voyager-Sonden nun schon fast 40 Jahre in Betrieb. Während dieser Zeit haben sie unglaublich wertvolle Daten über das Sonnensystem und seine Planeten gesammelt. Auf ihrer Reise tragen sie die „Voyager Golden Records" mit sich, fotografische Platten, die aus goldbeschichtetem Kupfer bestehen, damit sie dem Zahn der Zeit so lange wie möglich widerstehen können. Diese Platten enthalten Bilder und Geräusche von der Erde und seiner jetzigen Zivilisation: Töne von rauschenden Wellen, singenden Vögeln, Musik von Beethoven und Bach sowie Bilder über den Menschen, das Leben auf der Erde und der Standort unseres Planeten (in Relation zu den 14 sehr hellen Pulsaren in unserer Galaxie) befinden sich auf den Platten. Wenn man überlegt, wie groß das Weltall ist, ist es unwahrscheinlich, dass jemals eine entwickelte Zivilisation diese Platten finden wird.



Dennoch: Die kosmische Flaschenpost wirkt wie eine Zeitkapsel, die einige Elemente unseres Daseins in den interstellaren Raum transportiert. Vielleicht ist sie einmal das einzige, was von uns Menschen übrig bleibt, wenn die Sonne in ein paar Milliarden Jahren die Erde verschlingt.

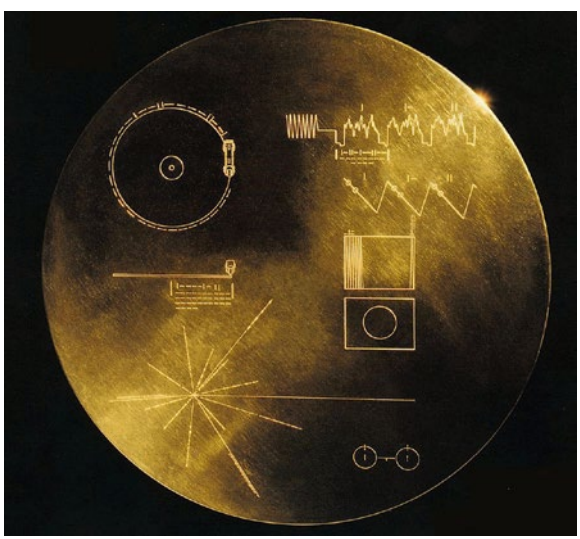


Abbildung: NASA

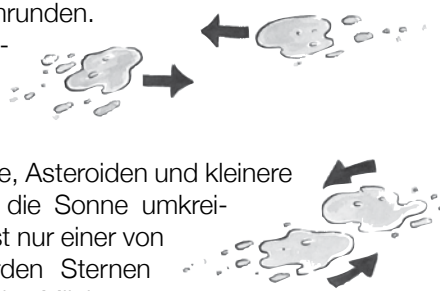


"Wo wir gerade von Gas- und Staubwolken sprechen, aus denen sich Dinge formen – du weißt, dass in deinem Badezimmer ein neues Sonnensystem heranwächst?"

Die Geburt des Sonnensystems

Staub unter Hochdruck

Das Sonnensystem ist unser Zuhause. Sein zentraler Stern, die Sonne, ist ein tosender Ball aus nuklearem Feuer, der acht Planeten erhellt, die ihn umrunden. Einer davon ist unsere Erde. Daneben gibt es noch mehrere Zwergplaneten sowie Millionen Steine, Asteroiden und kleinere Eisbrocken, die alle die Sonne umkreisen. Unsere Sonne ist nur einer von rund hundert Milliarden Sternen in unserer Galaxie, der Milchstraße. Und obwohl man das jetzt, als wir dies schreiben, noch nicht genau sagen kann, scheint es doch so, als hätten die meisten dieser Sterne auch eigene Planeten. Unsere Galaxie, und eigentlich auch das ganze Universum, scheint voller Sternensysteme zu sein. Da fragt man sich natürlich, woher all diese Sterne und ihre Planeten kommen. Wie haben sie sich gebildet?



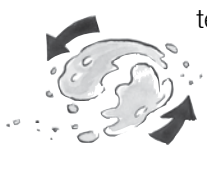
Während niemand von uns dabei war, als die Sonne ihr Leben begann und unser Sonnensystem sich formte, haben wir dennoch eine Vorstellung davon, was damals geschah. Das liegt daran, dass glücklicherweise ständig überall in unserer Galaxie neue Sterne geboren werden und wir uns das Ganze mit unseren Teleskopen anschauen können.

Staub: Rohmaterial für Sterne

Unsere Galaxie ist voll mit Staub und Gas – meistens Wasserstoff und Helium, aber auch Spuren von schwereren Elementen, Mineralien und Eis, welche das interstellare Medium bilden. Dieses Gas ist nicht gleichmäßig verteilt. Stattdessen verdichtet es sich an manchen Stellen stärker als an anderen. Wieso? Die Galaxie ist nun mal kein ruhiger Ort. Wie man in (↗[1]) lesen kann, explodieren Sterne am Ende ihres Lebens, stoßen ihre Hülle ab und schießen sie ins All. Es gibt also überall strömende und wirbelnde Gaswolken. Und manchmal knallen diese zusammen und bleiben durch ihre Gravitation aneinander kleben.



An solchen Stellen, wo die Gasdichte höher ist als im Durchschnitt, zieht sich das Gas auch mehr zusammen. Wo immer es also eine Verdichtung von Gas und Staub gibt, zieht sie noch mehr Gas und Staub an, verdichtet sich immer weiter, usw. So ist das eben mit der Gravitation: Sie ist nur anziehend, nie abstoßend. Es gibt auch keine faire Verteilung der Masse im All. Wo viel ist, kommt wie beim Geld danach noch mehr dazu. Es sollte also auch niemanden überraschen, dass das interstellare Medium voller wirbelnder Gas- und Staubwolken ist.





Eine große, wirbelnde Gaswolke wird also von ihrer eigenen Gravitation zusammengehalten. Und

↗[1]: *„Supernovae“ auf Seite 83*

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_15



sie muss groß sein, andernfalls wäre die Masse nicht groß genug, über die Gravitation alles zusammen zu halten. Es würde stattdessen alles auseinander fliegen. Die Wolke, aus der sich einst unser Sonnensystem formte, muss einen Durchmesser von etwa 20 Parsecs gehabt haben, was mehr als sechzig Lichtjahren entspricht.

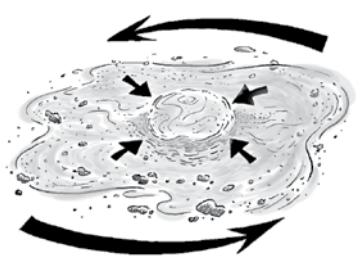
Durch ihre Rotation flacht eine Gaswolke immer mehr ab, wie ein Pfannkuchen. Dabei wird sie am Rand immer dünner und verdickt dafür in der Mitte. Nach einer Weile ähnelt sie mehr einem riesigen Spiegelei, als einem Pfannkuchen.

Die innerste Region der gigantischen interstellaren rotierenden Scheibe (das Gelbe vom Ei) zieht sich unter seiner Gravitation stark zusammen, die Atome kommen sich immer näher, und Druck und Temperatur erhöhen sich dabei gewaltig. Es wird sogar so heiß und so dicht, dass der Wasserstoff eine Kernfusion zündet (↗[2]). Leichte Atome fusionieren dabei zu schwereren und senden hochenergetische Strahlung aus, die das Ganze nur noch mehr aufheizt. Bald brennt der gesamte innere Teil in einem gewaltigen, nuklearen Feuer. Der äußere Teil hingegen, wo die Dichte nicht groß genug war, um eine Kernfusion in Gang zu setzen, brennt nicht. Die Menge an Strahlung, die frei wird, sobald vier Wasserstoff-Kerne zu einem Helium-Kern verschmelzen, ist gigantisch – sie besteht nicht nur aus hochenergetischen Photonen, sondern auch aus Anti-Elektronen (↗[3]) (Positronen) und Neutrinos (↗[4]), die entstehen, wenn zwei der Protonen sich in Neutronen umwandeln. Das macht die Kernfusion zu einer sehr starken Energiequelle – und es hat zwei wichtige Konsequenzen für die Gaswolke.

Zündung: Eine Gaswolke beginnt, von innen zu brennen

Zunächst hört sie auf, sich zusammenzuziehen. Natürlich gibt es noch immer die komprimierende Gravitation, aber der Strahlungsdruck durch die Kernfusion wirkt der Gravitation entgegen und bildet ein Gleichgewicht. Es gibt ein genau austariertes Gleichgewicht zwischen kollabierendem Gas und ständig explodierendem Gas! Dieses Gleichgewicht kann Milliarden Jahre bestehen, so lange es genügend Wasserstoff-Brennstoff gibt, damit die Kernfusion in Gang bleibt (↗[2]).

Die zweite Konsequenz der Kernfusion: Der Strahlungsdruck drückt die äußeren Schichten der Gaswolke noch weiter weg. Wie ein riesiges Laubgebläse fegt der Sternenwind seine Umgebung von





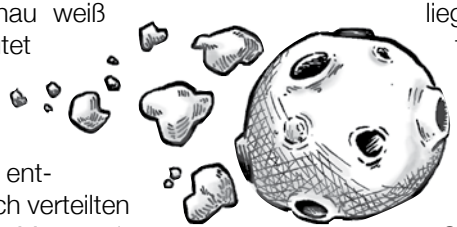


↗[2]: *„Kernfusion“ auf Seite 179*
↗[3]: *„Antimaterie“ auf Seite 221*
↗[4]: *„Das Neutrino“ auf Seite 213*

anderen Gasteilchen frei. Daher finden wir heute im Sonnensystem kaum noch Wasserstoff. Mehr noch: Mit modernen Teleskopen können wir andere Sternensysteme beobachten und die Regionen erkennen, wo ihr Sternenwind auf interstellare Materie trifft. Da die meisten Sternensysteme aber nicht still stehen, sondern sich durch die Galaxie bewegen, schieben sie gewaltige Wellen an Wasserstoff- und Helium-Gas vor sich her. Diese Welle, die oft Millionen Grad heiß ist, nennt man „Bow Shock“. Sie entsteht dadurch, dass sich eine gigantische Kugel aus nuklearem Feuer durch das interstellare Medium pflügt.

Planeten: Überreste von entstandenen Sternen

Nun, soviel zu dem zentralen Stern. Aber was ist mit seinen Planten? Das ist im Einzelnen ziemlich kompliziert, und genau weiß man es nicht. Aber man vermutet Folgendes:



So wie die Gaswolke selbst, aus der das Sonnensystem entstand, ein Ergebnis von ungleich verteilten Massen war, so sind auch die Massen innerhalb der Wolke nicht gleichmäßig verteilt, sondern in einigen Regionen dichter als in anderen. Der dichteste dieser Orte ist, wie gesagt, das Zentrum (das Gelbe vom Ei). Aber der weiße Teil vom Ei – „protoplanetarische Scheibe“ genannt – enthält auch Bereiche, die dichter sind, als der Rest. Dort bilden sich kleine Klumpen, sogenannnte „Planetesimale“.

Es scheint aber, als sei die Gravitation nicht der einzige Grund für die Bildung von Planetisimalen in der protoplanetarischen Scheibe. Vielmehr scheinen kleine Staubkörner sich zu größeren Klumpen zusammenzuschließen, die dann durch Staub und Gas wandern und dabei noch mehr ansammeln und immer größer werden.



Soweit wir das heute sagen können, beginnt die Zündung des zentralen Sterns ungefähr dann – oder kurz davor – wenn die Inhomogenitäten der protoplanetarischen Scheibe deutlich werden und sich die Materie zu Planetesimalen formt. Einer der Gründe, weshalb wir das glauben, lautet, dass die Planeten unseres Sonnensystems, die nahe an der Sonne sind (Markus, Venus, Erde und Mars) zum Großteil aus schweren Elementen bestehen, die zu schwer waren, um vom Sonnenwind aus dem Zentrum unseres Sonnensytems zum Rand hinein gedrückt zu werden. Planeten, die weiter außerhalb liegen, bestehen hingegen zum Großteil aus Gas. Jupiter ist dafür ein gutes Beispiel.

Nach einiger Zeit jedoch, wahrscheinlich vor ca. 4,5 Milliarden Jahren, hat der Sonnenwind unser Sonnensystem von fast allem Staub und Gas befreit, so dass das Wachsen der Planeten endete. Das heißt aber nicht, dass ihre Entstehung abgeschlossen war, denn es waren noch viele Steine und Brocken übrig, mit denen die neu gebildeten Planeten reagieren konnten. Sei es, über die Gravitation oder durch direkten Einschlag.

Die Dynamik der Planeten nach ihrer Entstehung ist höchst kompliziert und hat eine wichtige Rolle dabei gespielt, dem Sonnensystem seine heutige Form zu geben.


der mond
DIE BESTE ERKLÄRUNG, DIE WIR FÜR DIE ENTSTEHUNG DES MONDES HABEN, BESTEHT DARIN, DASS VOR LANGER ZEIT EIN KLEINES PLANETENÄHNLICHES OBJEKT DIE ERDE TRAF...
"...UND UNMENGEN VON DRECK UND GESTEIN IN DEN ORBIT SCHLEUDERTE."
"DAS GESTEIN KLUMPTE ZUSAMMEN UND BILDETE SCHLIEßLICH UNSEREN NACHBARSATELLITEN."
WANN FINGEN DEINE VORFAHREN AN, DEN MOND ANZUHEULEN? ALS ES NOCH EINZELNE GESTEINSBROCKEN WAREN?
NEIN.
SIE WARTETEN AUF DEN VOLLMOND.
HA HA.

Die Entstehung des Mondes

Ein kleiner Urknall in Erdnähe

Wir sind nicht alleine in unserem Sonnensystem. Es gibt einige Nachbarn, z.B. Planeten, die auch die Sonne umkreisen. Etwas näher an der Sonne haben wir die Venus und etwas weiter weg den Mars. Die Bewegungen all dieser Planeten folgen den Keplerschen Gesetzen (↗[1]). Aber außer diesen Nachbarn haben wir noch einen, der so nahe ist, dass wir ihn mit bloßem Auge sehen können: den Mond.

Er umkreist unseren Planeten mit ca. 1 km/s und braucht ca. 27 Tage für eine volle Umrundung. Manchmal steht er genau zwischen uns und der Sonne und verursacht eine Sonnenfinsternis. Er hat einen Radius von ca. 1700 km, was ungefähr einem Viertel des Erdradius' entspricht. Aber seine Masse von ca. $7 \cdot 10^{22}$ kg entspricht nur 1,2 % der Erdmasse, seine Dichte ist also viel geringer. Durch die geringere Masse sind die Gravitationskräfte an der Mondoberfläche viel kleiner: Statt mit 9,8 m/s^2 (auf der Erde) wird man dort mit lediglich 1,6 m/s^2 beschleunigt, also nur mit ca. 17% im Vergleich zur Erde. Bei einem Spaziergang auf dem Mond würdest du dich also ziemlich leicht fühlen. Der Mond ist aber immer noch schwer genug, um uns sein Gravitationsfeld hier unten auf der Erde spüren zu lassen. Auf der dem Mond zugewandten Seite werden die Ozeane angehoben. Auf der anderen Seite erfährt das Wasser ebenfalls eine Kraft weg von der Erde. Dies liegt an der Bewegung von Mond und Erde um einen gemeinsamen Schwerpunkt. Man kann diesen Effekt ausprobieren, indem man sich wie Emmy und Maxwell dreht. Man merkt, wie die Hände (durch den Zug des Partners) zur Mitte hin gezogen werden und die Haare (wenn sie lang genug sind) nach außen. Das gleiche passiert mit dem Wasser auf der Erde. Und wenn man sich vorstellt, wie sich die Erde dreht, sieht man, dass jeder Ort der Erde zweimal pro Tag an einer hohen Welle vorbeikommt. Wir nennen das Ebbe und Flut.

Unser Mond – irgendwie besonders

Unser Mond ist nicht nur deshalb besonders, weil er Ebbe und Flut verursacht, uns durch starke Re-





↗[1]: *„Die Keplerschen Gesetze" auf Seite 47*

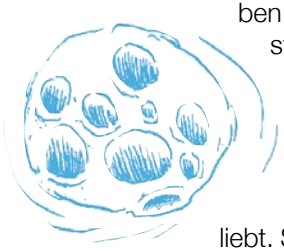
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_16



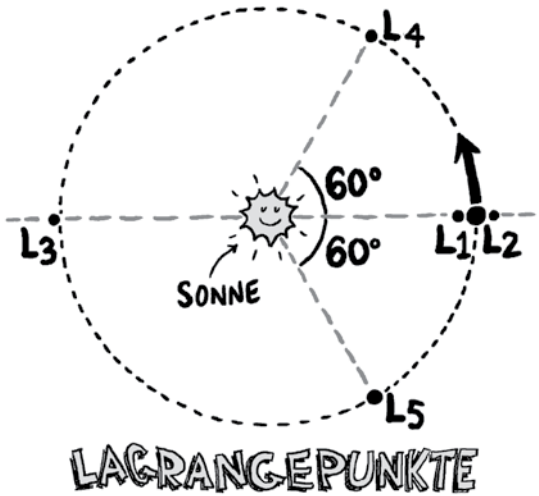
flexion des Sonnenlichts nachts den Heimweg weisen kann und bei Vollmond vielleicht noch weitere spezielle Auswirkungen hat. Er ist auch einzigartig in unserem Sonnensystem! Einige Planeten haben gar keinen Mond. Andere haben Trabanten, die man nicht wirklich Monde nennen kann, eher Asteroiden. Unser Mond ist ziemlich groß. Er hat eine geringere Dichte als die Erde, aber die Zusammensetzung der Elemente an seiner Oberfläche ähnelt der der Erdoberfläche. Die Frage ist: wieso? Die Antwort ist eng verbunden mit der Frage: Wie ist der Mond entstanden?

Kollision im All

Gehen wir zurück in die Zeit, als das Sonnensystem entstand. Anfangs war es nicht mehr als eine Staubwolke. Komprimiert durch seine eigene Gravitation, formte sich der Staub zu massiven Objekten, angefangen mit der Sonne. Mehr über die Entstehung unseres Sonnensystems und seiner Planeten gibt es in einem anderen Kapitel (↗[2]).



Bevor unser Planet seine endgültige Größe erreichte, bei ca. 90% seiner heutigen Masse, wurde er von einem anderen Planeten begleitet. Er hatte in etwa die Größe von Mars und teilte sich mit der Erde eine Umlaufbahn. Dieser zweite Planet, auch Theia genannt, hatte einen konstanten Abstand zur Erde. Dies ist nur an ganz bestimmten Punkten möglich, den sogenannten „Lagrangepunkten“.



Stellen wir uns die Erdumlaufbahn um die Sonne vor. Nehmen wir an, ein anderes, nicht allzu schweres Objekt, will auch diese Umlaufbahn benutzen. Das Problem ist, dass die Umlaufbahn durch die Gravitationskraft zwischen Erde und Sonne bestimmt wird. Wann immer ein drittes Objekt ins Spiel kommt, spürt es nicht nur die Gravitation der Sonne, sondern auch die der Erde. Es gibt aber nur fünf Punkte, an denen sich die Gravitationskräfte aufheben und die Umlaufbahn des dritten Objekts stabil bleibt. Diese Lagrangepunkte sind in der obigen Abbildung dargestellt. Drei davon liegen auf der Verbindungslinie zwischen Erde und Sonne.

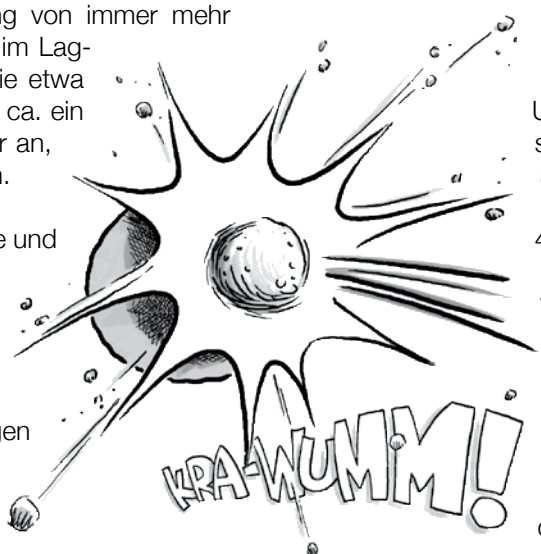
Diese Lagrangepunkte sind ziemlich beliebt. Stell dir vor, du willst einen Satelliten in der Nähe der Erde platzieren, damit er die Sonne beobachtet, so wie das SOHO Teleskop. Der beste Ort hierfür ist der Lagrangepunkt L_1! Und wenn du ein Satellit bist und nahe der Erde ins Weltall schau-

↗[2]: *„Die Geburt des Sonnensystems“ auf Seite 59*



en willst, ohne von der Sonne gestört zu werden, nimm L_2! Genau das macht der WMAP Satellit, der Informationen über die kosmische Hintergrundstrahlung (↗[3]) sammelt. Und falls du mal ein großes Geheimnis hast, versteck es bei L_3. Niemand wird es dort von der Erde aus je sehen können, weil immer die Sonne davor steht.

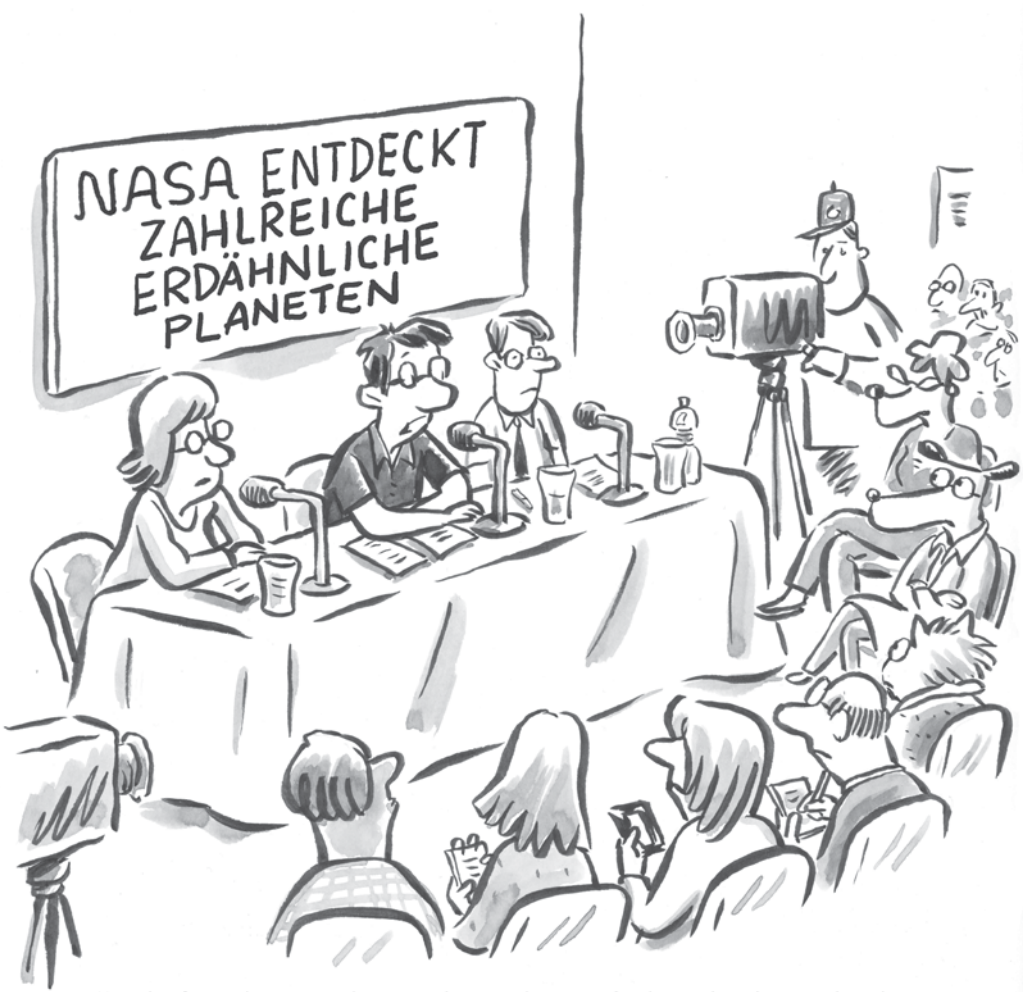
Zurück zum Prototypen der Erde und seinem Nachbarn Theia. Er war mit konstantem Abstand zur Erde bei L_4 oder L_5 platziert. Aber die Idee der stablien Lagrangepunkte funktioniert nur für zwei schwere (Erde und Sonne) und ein leichtes Objekt. Während Theia durch Ansammlung von immer mehr Staub wuchs, wurde ihr Platz im Lagrangepunkt instabil. Und als sie etwa so schwer war wie der Mars – ca. ein Zehntel der Erdmasse – fing er an, sich auf die Erde zuzubewegen.



Und dann geschah es: die Erde und Theia kollidierten. Theia wurde auseinandergerissen. Die Überbleibsel, zusammen mit Teilen der damaligen Erde, umrunden unseren Planeten und formten dabei den heutigen Mond. Die Erde gewann selbst sogar dabei noch etwas Masse hinzu. Dazu muss man sagen: Dieses Szenario zur Entstehung des Mondes ist nur eines von vielen. Andere Vorstellungen besagen z.B., dass der Mond von woanders her kam, zufällig an der Erde vorbeisauste und dann von ihr eingefangen wurde. Aber die Kollisionstheorie funktioniert recht gut, sie kann vor allem die elementare Zusammensetzung von Erde und Mond gut beschreiben.

Seit der Entstehung des Mondes hat sich sein Zusammenspiel mit der Erde etwas verändert. Jedes Jahr erhöht sich die Entfernung zwischen Erde und Mond, gemessen mit Lasern (↗[4]), um ca. 4 cm. Dies wird durch die anfangs erwähnten Gezeiten verursacht. Durch das gravitative Wechselspiel zwischen Erde und Mond wird die Erddrehung durch die Reibung der Wasserwellen verlangsamt. Das bedeutet, der Drehimpuls verringert sich. Da aber der Gesamtdrehimpuls des Erde/Mond-Systems erhalten bleibt (↗[5]) erhöht sich der Drehimpuls des Mondes. Und genau dadurch erhöht sich auch der Abstand zwischen Erde und Mond. Von seiner Entstehung vor 4,5 Mrd. Jahres bis jetzt hat sich der Abstand von weniger als 100.000 km auf 380.000 km erhöht, was ziemlich beeindruckend ist. Das bedeutet, dass die Gezeiten früher viel stärker gewesen sein müssen. Auch dreht sich die Erde immer langsamer und die Tage werden länger. Aber da es nur 15 Mikrosekunden pro Jahr sind, werden wir das zu unseren Lebzeiten nicht merken. Außer dann, wenn unserem Tag eine Schaltsekunde hinzugefügt wird, so wie es am 30. Juni 2015 geschah.

↗[3]: *„Die kosmische Hintergrundstrahlung“ auf Seite 105*
↗[4]: *„Laser“ auf Seite 19*
↗[5]: *„Erhaltungssätze“ auf Seite 51*



"Ich fürchte, es ist wahr. Die Erde ist ein kosmisches Franchise-Unternehmen."

Extrasolare Planeten

Ist jemand da draußen?

Woraus bestehen wir? Woher kommen wir? Und wohin wird die Reise gehen? Viele Wissenschaftler sind hochmotiviert, diese Fragen zu beantworten. Während Teilchenphysiker unsere Bestandteile und ihre Reaktionen untersuchen, wollen Astrophysiker wissen, ob wir alleine im Weltall sind, oder ob vielleicht noch andere Lebewesen existieren oder zumindest existieren könnten. Vielleicht können wir in ferner Zukunft weit entfernte Planeten kolonisieren. Wer weiß, wie lange die Erde noch so komfortabel bleibt, wie sie jetzt ist.



Wir prüfen sorgfältig unsere Nachbarplaneten und suchen Zeichen von Leben. Wir suchen nach Wasser, was schon einmal ein guter Indikator ist, und untersuchen die Oberflächentemperaturen. Wir haben z.B. etwas Eis an den Polarkappen des Mars gefunden. Leider also nur gefrorenes Wasser. Weiter weg von der Sonne wird es immer kälter: Die mittlere Temperatur auf dem Mars beträgt -55 °C. Aber was ist mit unserem Nachbarn auf der anderen Seite, der Venus? Nicht zu kalt, aber mit 464 °C dann doch etwas zu heiß. Es scheint, als würde es bei unseren Nachbarn nicht allzu viel Leben geben. Einige Wissenschaftler vermuten Leben in den Ozeanen unter dem Eis auf Titan, dem größten Saturnmond. Aber außer diesem Kandidaten gibt es wenig Vielversprechendes.

Suche nach einer zweiten Erde

Aber wieso sollten wir uns auf unser eigenes Sonnensystem beschränken? Es gibt geschätzt ca. 10^{22} Sterne in unserem Universum. Man kann die Zahl mit all ihren 22 Nullen aufschreiben, um zu sehen, wie groß sie ist. Wieso also nicht auch dort mal suchen? Planeten außerhalb unseres eigenen Sonnensystems nennt man extrasolare Planeten oder auch Exoplaneten.

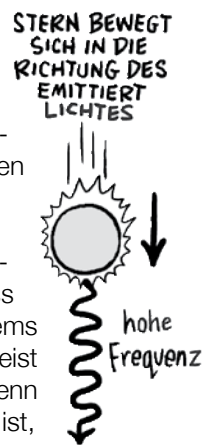
Die beste Art, einen neuen Planeten zu finden, geht so, dass man ihn mit eigenen Augen sieht. So etwas nennt man „direkte Beobachtung“. Leider stellt sich das als äußerst schwierig heraus. Im Gegensatz zu ihrem Stern strahlen Planeten kein eigenes Licht ab. Einzig über die Reflexion von Sternenlicht kann man sie sichtbar machen. Während man einige Planeten, etwa den Mars, mit bloßem Auge sehen kann, sind andere schwerer zu entdecken, selbst mit Teleskopen. Der am weitesten von der Erde entfernte Planet, Neptun, wurde ursprünglich passiv entdeckt. Abweichungen von der Umlaufbahn von Uranus, dem bis dahin am weitesten entfernten Planeten, konnte man nur durch die Existenz eines weiteren, bis dahin unbekannten Planeten erklären: Neptun. Heute können wir ihn sehen, wenn auch nur mit Teleskopen. Neptun, der sich „nur“ ca. 30 AU (1 AU, astronomische Einheit, entspricht dem mittleren Abstand zwischen Sonne und Erde, also ca. 150 Mio. km) von der Erde entfernt befindet, ist also schon schwer zu sehen. Man kann sich vorstellen, wie schwer es erst sein muss, Planeten von benachbarten Sternensystemen zu sehen. Das nächstgelegene, Alpha Centauri (eigentlich ein Doppelsternsystem), ist schon 276.110 AU entfernt. Wir brauchen also andere Techniken als die

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_17

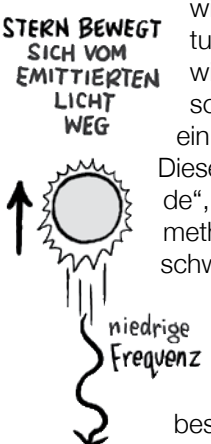
Beobachtung von reflektiertem Licht. Die wichtigsten möchten wir kurz vorstellen.

Geschüttelt, nicht gerührt

Das Problem mit Exoplaneten ist nicht nur ihr schwaches Licht. Es ist auch die Helligkeit ihrer Sterne, die ihr eigenes Licht überlagert. Falls der Stern ein Brauner Zwerg ist (↗[1]), dessen Licht nicht besonders hell leuchtet, ist eine direkte Beobachtung mit einem guten Teleskop sogar möglich. Aber was ist, wenn der Stern hell strahlt? Schauen wir genau auf das Sternenlicht. Gibt es vielleicht eine Möglichkeit, wie der Planet das Sternenlicht beeinflussen kann? Gibt es.



In unseren heliozentrischen Modellen nehmen wir immer an, dass ein Stern in der Mitte des Systems ist und von den Planeten umkreist wird. Das stimmt aber nur, wenn der Stern mit Abstand schwerer ist, als die ihn umkreisenden Planeten. Hat man also einen schweren Planeten in der Nähe eines Stern, wird er ständig an dem Stern zerren, so dass dieser nicht still steht. Beide umkreisen also letztlich einen gemeinsamen Schwerpunkt. Für einen weit entfernten Beobachter sieht es also so aus, als würde sich der Stern schütteln und periodisch nach links und rechts sowie vor und zurück bewegen. Denken wir uns, wir würden den Mond beobachten. Was würden wir eher sehen: Bewegungen nach links/rechts oder vor/zurück? Richtig, man würde links/rechts-Bewegungen sehen. Durch die zweidimensionale Projektion können wir die vor/zurück-Bewegung kaum wahrnehmen. Bei der Beobachtung von Sternen mit Teleskopen ist die Sache anders: die Auflösung der Teleskope ist nicht gut genug, um die links/rechts-Bewegungen zu sehen. Stattdessen benutzen die Teleskope einen Trick, um sowohl vor/zurück- als auch links/rechts-Bewegungen zu sehen, oder allgemeiner: Änderungen der Radialgeschwindigkeit. Der Dopplereffekt (↗[2]) führt zu kleinen Änderungen der Frequenz des Sternenlichts, während der Stern sich von uns weg bewegt oder auf uns zu. Sehen wir also kleine, periodische Fluktuationen in der Frequenz, wissen wir, dass sich der Stern langsam schüttelt. Und das sagt uns, dass ein Planet in der Nähe sein muss. Diese sogenannte „Doppler-Methode“, oder „Radialgeschwindigkeitsmethode“, klappt am besten mit schweren Planeten, die nah an ihrem Stern sind. Ein Beispiel für einen so entdeckten Exoplaneten ist der Gasgigant TrES-4, der die 1,7-fache Masse von Jupiter besitzt (schwer!) und seinen Stern in nur 3,5 Tagen umläuft (schnell!).

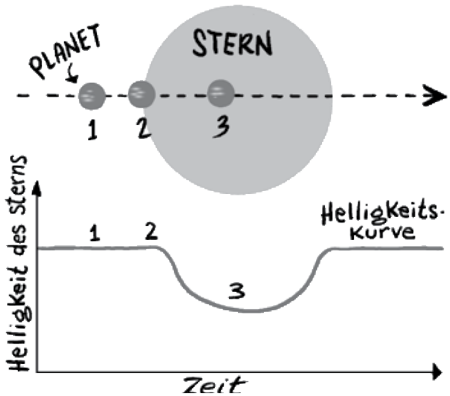


Mini-Sonnenfinsternis

Eine andere Art der indirekten Beobachtung von Planeten ist die „Transitmethode“. In dem Fall, dass ein Exoplanet seinen Stern so umkreist, dass er sich zwischen dem Stern und uns befindet, können wir eine Art Mini-Sonnenfinsternis sehen. Da wir von anderen Planet/Stern-Systemen ziemlich weit entfernt sind und der Stern in der Regel viel größer ist als der Planet, ist der vom Planet überdeckte Teil ziemlich klein. Dennoch führt das dazu, dass

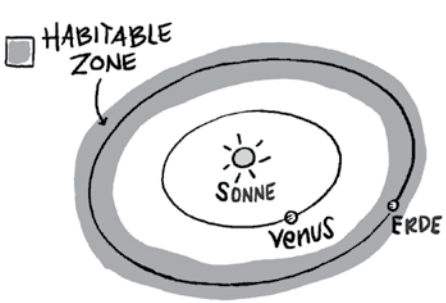
↗[1]: *„Klassifizierung der Sterne“ auf Seite 73*
↗[2]: *„Der Doppler-Effekt“ auf Seite 15*

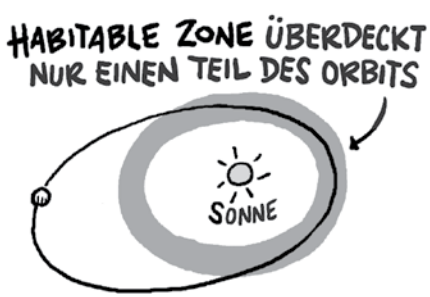
das Licht, das unsere Teleskope erreicht, etwas schwächer wird. Prüft man, wie stark diese Verringerung ist und wie lange sie dauert, bekommt man Informationen über die Geschwindigkeit und die Größe des Planeten. Da die Helligkeitsänderungen dennoch sehr klein sind, braucht man moderne Teleskope mit hohen Auflösungen. Das Kepler Teleskop, das 2009 in Betrieb ging, kann solche Messungen durchführen. Die Transitmethode haben wir nochmal in einer Abbildung dargestellt.



Planeten in der Komfortzone?

Über 2000 Exoplaneten wurden schon entdeckt. Man will sie aber nicht einfach nur zählen – man möchte auch ihre Eigenschaften herausfinden. Gibt es vielleicht andere, auf denen Menschen sich wohlfühlen könnten? Diese wären sogenannten „terrestrische Planeten“ mit einer festen Oberfläche. Es ist also wichtig, die Entfernung des Planeten zu seinem Stern zu kennen. Wie gesagt: ist er zu nah, wird es zu heiß, ist er zu weit weg, zu kalt. Die Zone, die genau richtig ist, nennt man „habitable Zone“. Es handelt sich um den Ort, an dem flüssiges Wasser existieren kann. In unserem Sonnensystem liegt nur die Erde in einer solchen Zone. Es gibt auch andere Definitionen der habitablen Zone, die nicht ganz so streng sind („nicht gerade der beste Ort für Leben, aber irgendeine Art von Leben wird schon möglich sein“) und auch den Marsorbit ein wenig mit umfassen. Einige Planeten könnten also eine Umlaufbahn haben, die nur teilweise in einer habitablen Zone liegt. Für eine optimale Untersuchung der Atmosphären von Exoplaneten und deren chemischer Zusammensetzung müsste man das Licht der Planeten genau analysieren, besser gesagt dessen Wellenlängen. Die Ab- oder Anwesenheit von bestimmten Wellenlängen sind ein Hinweis für die Absorption und Emission von Licht durch bestimmte Atome. Da sich die Technologien zur Suche von Exoplaneten schnell entwickeln, können wir in Zukunft viele spannende Ergebnisse erwarten!







II – Der Kosmos und das Ganze

„Das Universum ist wirklich gewaltig: die Sonne, die von unserer Erde umrundet wird, ist einer von Hunderten von Millionen von Sternen in unserer Milchstraße. Und unsere Milchstraße ist nur eine von Hunderten von Millionen Galaxien im Universum. Wenn du in einer klaren Nacht hoch hinauf in den Himmel schaust, kannst du einen Hauch der unglaublichen Schönheit dieses gewaltigen Universums erblicken.

Und wir sehen nur einen kleinen Teil dessen, was sich dort draußen verbirgt. Im letzten Jahrhundert haben wir immer bessere Teleskope entwickelt, mit denen wir mehr und mehr Wunder des Universums entdecken konnten. Die atemberaubenden Blitze von Supernovaexplosionen, schimmernde weiße Zwerge, kompakte Neutronensterne, umringt von riesigen, hell schillernden Nebeln, alles verschlingende schwarze Löcher und sogar das Nachleuchten des Urknalls selbst. All diese Schönheit und das Mystische eines sich ewig ausbreitenden Universums – es ist da draußen, und es wird niemals aufhören, uns zu faszinieren. Denn wir wiederum werden niemals aufhören, weitere faszinierende und verblüffende Dinge in dem Universum zu entdecken, von dem wir selbst nur ein winziger Teil sind.

Auf den folgenden Seiten werden wir dir einen kleinen Teil der Wunder des Universums vorstellen – den Teil, den wir kennen. Wer weiß, was sich noch da draußen befindet und nur darauf wartet, entdeckt zu werden.“



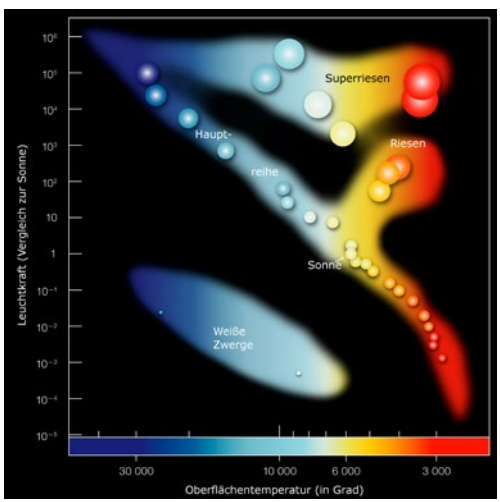
"...Und wie genau haben Sie die Energie des größten Sternes im Universum auf die Tomaten gebracht?"

Klassifizierung der Sterne

Das Who is Who der Sterne

Es gibt viele verschiedene Arten von Sternen im Universum. Als die Teleskope zu Beginn des 20. Jahrhunderts immer besser wurden, fanden Astronomen heraus, dass sich die Sterne in Größe, Helligkeit und Farbe unterscheiden.

Heute ordnen Astronomen Sterne meist im sogenannten Hertzsprung-Russell-Diagramm an. Dieses Diagramm zeigt die Helligkeit und die Temperatur der Sterne. Die heißen auf der linken Seite sind bis zu 30.000 K heiß, während diejenigen auf der rechten Seite auf mickrige 2000–3000 K kommen. Zwischen den beiden Extremen werden die Sterne einer der Klassen O-B-A-F-G-K-M („Offenbar Benutzen Astronomen Furchtbar Gerne Komische Merksätze“) zugeordnet. Die Temperatur hängt direkt mit der Farbe zusammen: Die heiße O-Klasse ist hell weiß-blau, die kalte M-Klasse tief rot.



Die Helligkeit geht von oben nach unten: Ein Stern ganz unten ist 100.000 mal schwächer als die Sonne. Würde man die Sonne gegen so einen Stern austauschen, wäre es tagsüber nicht viel heller als nachts bei Vollmond. Oben im Diagramm sind hingegen Sterne, die bis zu eine Million mal heller sind als die Sonne.

Die meisten Sterne unserer Milchstraße (und auch von anderen Galaxien) findet man in diesem Diagramm auf einer Linie von unten rechts nach oben links. Das überrascht nicht besonders: Für die Sterne dieser sogenannten Hauptreihe gilt: je heißer, desto heller. Vor ungefähr einem Jahrhundert, als das Diagramm zum ersten Mal angewendet wurde, dachte man, dass Sterne in ihrem frühen Leben sehr hell waren und mit dem Alter dunkler und kälter würden, da sie auch zusammenschrumpften (das war vor den 1930ern, als man noch nicht wusste, was Kernfusion ist). Daher nennt man die hellen, heißen oben links auch oft die „frühen Sterne“, während die unten rechts auch „späte Sterne“ genannt werden.

Was aber tatsächlich im Inneren der Sterne los ist, ist viel komplizierter. Daher gibt es auch so viele Typen von Sternen. Außerdem können sich Sterne während ihres Lebens verändern. Man kann beschreiben, was mit ihnen passiert, indem man sich anschaut, wie sie durch das Diagramm „wandern“. Diese Bewegung dauert Millionen bis Milliarden von Jahren, weshalb wir nicht direkt sehen können, was passiert. Da es aber so viele verschiedene Typen von Sternen mit verschiedenem Alter gibt, können wir uns alle Stationen ihres Lebens an den ver-

Abbildung:
ESO, CC BY 4.0; angepasst von Kristin Riebe für B. Bahr, J. Resag, K. Riebe: Faszinierende Physik, Springer Spektrum 2013

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_18

schiedenen Punkten des Hertzsprung-Russell-Diagramms anschauen.

Ein normaler Stern wandert eigentlich durch die Hauptreihe und wird dabei heißer und heller, nicht umgekehrt. Aber im Verlauf seines Alterns erreicht er normalerweise nicht die Ecke oben links – das schaffen nur die allerschwersten, die ihr Leben meist auch schon in dieser Ecke begonnen haben. Und selbst die bleiben nicht immer dort! Vielmehr drehen die meisten Sterne an einem bestimmten Punkt um und gehen nach oben rechts (oder direkt nach rechts, wenn sie schon oben waren).

Wie man im Hertzsprung-Russell-Diagram auch deutlich sehen kann, scheint es auf halber Strecke der Hauptreihe einen zusätzlichen „Arm“ zu geben, der nach oben rechts reicht. Hier sind sehr helle, aber relativ kalte Sterne. Das ist der Ort, wo normale Sterne von mittlerer Größe alt werden. Hier wachsen sie in den letzten Millionen Jahren ihres Lebens zu richtigen Giganten heran, sehr große und sehr helle, aber sehr rote und daher relativ kalte stellare Ungeheuer.

Ein normaler Stern wird also in seinem Leben die Hauptreihe von unten rechts nach oben links durchlaufen. An einem bestimmten Punkt aber wird er die Hauptreihe verlassen, sich nach oben rechts wenden und zum Giganten werden. Oben angelangt, bei größten Helligkeiten, finden wir unter den Sternen Giganten und Hypergiganten mit allen möglichen Temperaturen. Diese sind sehr massive Sterne, die ihr Leben bereits weit oben links begonnen haben und irgendwann nach rechts gewandert sind. Aber was verursacht ihren „Richtungswechsel“ im Diagramm? Darüber sprechen wir im Kapitel über Supernovae (↗[1]).



Name: Sirius A
Bayer-Bezeichnung: α Canis Majoris A
Im Sternbild: Canis Major („Großer Hund“)
Typ: Klasse A – Riese
Spektralklasse: A1V
Oberflächentemperatur: 9.940 K
Masse in Sonnenmassen: 2
Entfernung: 8,5 ly
Radius in Sonnenradien: 1,7
Alter: 200-300 Millionen Jahre
Fun Fact: Der hellste Stern am Himmel, begleitet vom blassen Zwerg-Stern Sirius B

↗[1]: *„Supernovae“ auf Seite 83*



Name: Polaris / Nordstern
Bayer-Bezeichnung: α Ursae Minoris
Im Sternbild: Ursa minor („Kleiner Bär“)
Typ: Klasse F – Variables Spektrum
Spektralklasse: F7I
Oberflächentemperatur: 6.000 K
Masse in Sonnenmassen: 4,5
Entfernung: 325-435 ly
Radius in Sonnenradien: 46
Alter: 70 Millionen Jahre
Fun Fact: Besteht eigentlich aus mehreren, dicht beieinander liegenden Sternen (Werte für den Hauptstern).



Name: Menkib
Bayer-Bezeichnung: ξ Perseis
Im Sternbild: Perseus
Typ: Klasse O – Riese
Spektralklasse: O7.5III
Oberflächentemperatur: 35.000 K
Masse in Sonnenmassen: 30
Entfernung: 1200 ly
Radius in Sonnenradien: 14
Alter: 2-3 Millionen Jahre



Name: Rigel
Bayer-Bezeichnung: β Orionis
Im Sternbild: Orion
Typ: Klasse B – Superriese
Spektralklasse: B9I
Oberflächentemperatur: 12.000 K
Masse in Sonnenmassen: 20-24
Entfernung: 800-960 ly
Radius in Sonnenradien: 70-85
Alter: 8-10 Millionen Jahre



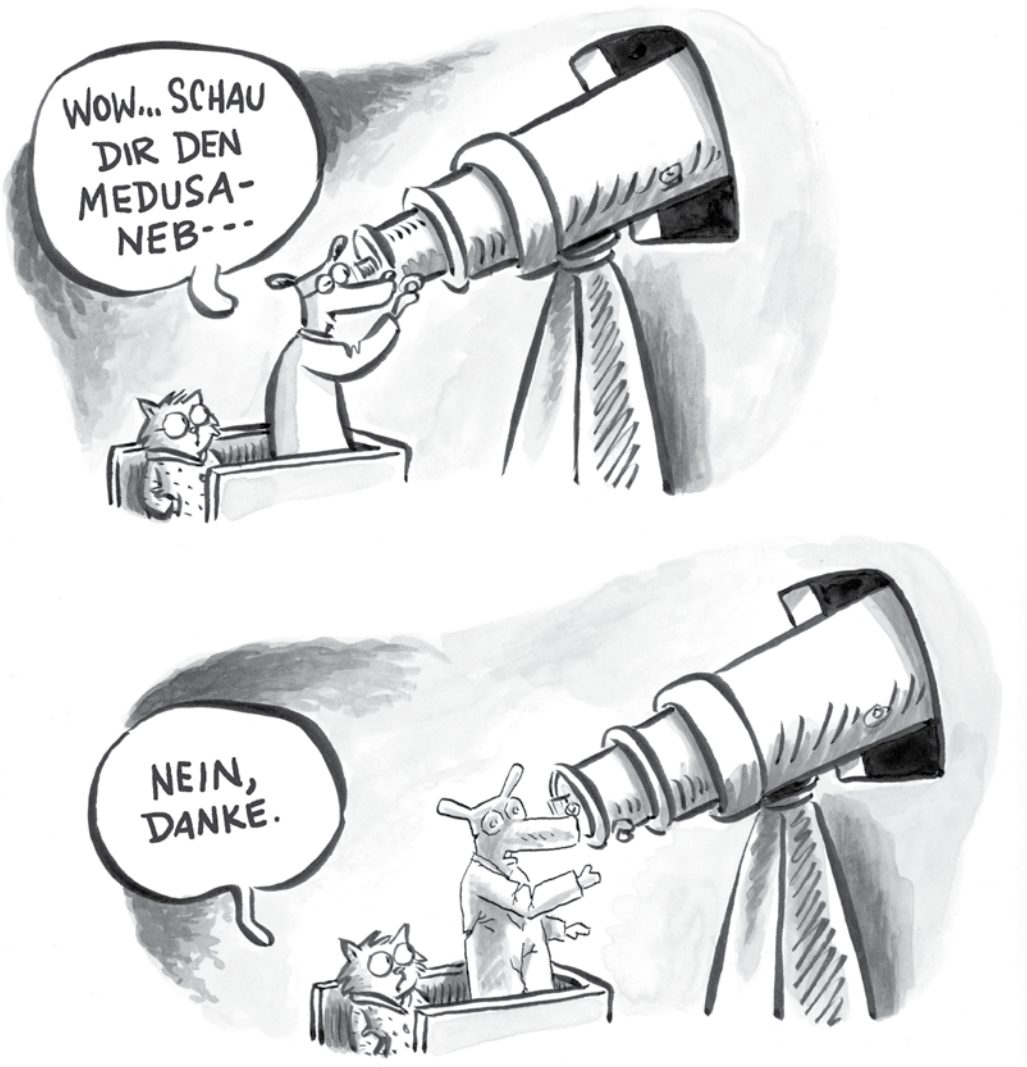
Name: Alpha Centauri
Bayer-Bezeichnung: α Centauri
Im Sternbild: Centaurus
Typ: Klasse G – Zwerg
Spektralklasse: G2V
Oberflächentemperatur: 5.790 K
Masse in Sonnenmassen: 1,1
Entfernung: 4.4 ly
Radius in Sonnenradien: 1.2
Alter: 5-7 Milliarden Jahre
Fun Fact: Besteht aus zwei benachbarten Sternen (Werte für α Centauri A – α Centauri B ist etwa genauso groß, aber ein Klasse K Stern).



Name: Arcturus
Bayer-Bezeichnung: α Boötis
Im Sternbild: Boötes
Typ: Klasse K – Orangefarbener Riese
Spektralklasse: K0III
Oberflächentemperatur: 4.300 K
Masse in Sonnenmassen: ≈ 1
Entfernung: 36.5 ly
Radius in Sonnenradien: 25.4
Alter: 600 – 860 Millionen Jahre
Fun Fact: Der hellste Stern in der nördlichen Hemisphäre.



Name: Beteigeuze
Bayer-Bezeichnung: α Orionis
Im Sternbild: Orion
Typ: Klasse M – Roter Superriese
Spektralklasse: M2I
Oberflächentemperatur: 3.100 – 3.600 K
Masse in Sonnenmassen: 8-20
Entfernung: 550-800 ly
Radius in Sonnenradien: 900-1200
Alter: 7,3 Millionen Jahre
Fun Fact: Er pulsiert, ändert seine Größe, Temperatur und Helligkeit, mit einer Periode von ca. 5 Jahren.


WOW... SCHAU DIR DEN MEDUSA-NEB---
NEIN, DANKE.

Rote Riesen und Planetarische Nebel

Das Ende eines Sterns der Hauptreihe

Sterne leben nicht ewig. Was am Ende eines Sternenlebens passiert, hängt stark davon ab, wie schwer er ist. Der Grund dafür ist, dass die Kernfusion (↗[1]) bei schweren und leichten Sternen sehr unterschiedlich abläuft. Wenn ein Stern mehr als ca. acht mal schwerer ist als unsere Sonne, ist er ein höllisch brennender Glutofen, dessen Druck und Temperatur zunehmen, je tiefer man unter seine Oberfläche geht. Während in den äußeren Schichten Wasserstoff zu Helium fusioniert, werden immer schwerere Brennelemente ausgebacken (bis hin zu Eisen), je tiefer im Stern man sich befindet. Das Ganze ist ein vielschichtiger nuklearer Ofen, der am Ende seines Lebens in eine gigantische Klasse-II Supernova übergeht (↗[2]). Und obwohl das sicherlich die spektakulärere Art ist, sich zu verabschieden, erweist sich die Mehrheit der Sterne unseres Sonnensystems – ca. 97 % – als gar nicht so schwer. Für einen 0815-Stern in unserer Galaxie läuft die Sache anders als für ein Schwergewicht. Damit wir uns nicht falsch verstehen: Sterne wie unsere Sonne sind heiß – man würde sofort verbrennen, wenn man auch nur in ihre Nähe käme. Aber verglichen mit, sagen wir, dem Inneren eines Klasse-B-Superriesen wie Rigel (↗[3]) ist das Innere eines typischen Sterns unserer Galaxie eher wie eine erfrischende Brise.



Kernfusion in leichteren Sternen

Zunächst einmal sind und Temperatur in Sternen wie unserer Sonne nicht hoch genug, damit überall eine Kernfusion stattfinden kann. Stattdessen geschieht die Fusion von Wasserstoff zu Helium nur im inneren Kern, in einer Region zwischen dem Mittelpunkt und einem Fünftel des Weges zur Oberfläche. Hier besteht ein Stern aus einem Gemisch aus Wasserstoff und Helium. Der eigentliche Brennprozess findet hier statt, bei kuscheligen Temperaturen von einigen Millionen Kelvin. Weiter vom Kern entfernt befindet sich bloß noch Wasserstoffplasma – sicherlich heiß genug, um dich blitzschnell zu frittieren, aber leider zu kalt zum Zünden einer Kernfusion.

Alte Sterne: Rote Riesen

Was passiert nun, wenn solch ein Stern alt wird? Die erste Änderung tritt ein, wenn all sein Wasserstoff im Kern verbrannt und nur noch Helium übrig ist. Der Stern ist an dieser Stelle wahrscheinlich nicht massiv genug, um den nächsten Fusionsschritt zu starten – das Fusionieren von Helium zu schwereren Elementen, etwa Kohlenstoff und Sauerstoff. Der Kern wird also einfach aufhören zu brennen und sich unter seinem eigenen Gewicht zusammenziehen. Es ist immer noch Wasserstoff in den Regionen übrig, die nicht so tief im Innern des Sterns liegen, so dass der Fusionsprozess weitergeht – in einem Feuerring um den Kern, der sich nach außen durchfrisst und den Rest des Sterns verbrennt.

↗[1]: *„Kernfusion“ auf Seite 179*
↗[2]: *„Supernovae“ auf Seite 83*
↗[3]: *„Klassifizierung der Sterne“ auf Seite 73*

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_19

Das ist der Moment, in dem ein Stern normalerweise die sogenannte Hauptreihe des Hertzsprung-Russell-Diagramms (↗[3]) verlässt. Die brennende Wasserstoff-Schicht, die sich langsam nach außen durchfrisst, dehnt den Stern gewaltig aus – und macht ihn um einiges heller und größer, aber auch etwas kälter. Er wird zu einem Roten Riesen. Wenn das mit unserer Sonne passiert (in ein paar Milliarden Jahren) wird ihr Radius ungefähr 200-fach vergrößert, wodurch sie die Planeten Merkur, Venus und die Erde auffressen wird.

Das Helium-Brennen beginnt

An einem Punkt in der Phase des Roten Riesen hat sich der Kern weit genug zusammengezogen, und sich dadurch Temperatur und Druck so stark erhöht, dass der nächste Schritt im Fusionsprozess – von Helium zu Kohlenstoff und Sauerstoff – beginnen kann. Dafür braucht es etwa 300 Millionen Kelvin im Kern, während die äußeren Schichten gerade mal einige Tausend Kelvin heiß sind. Bei etwas schwereren Sternen passiert das früher, bei den sehr leichten erst viel später, wenn sich genug Helium aus den äußeren Schichten in der Mitte angesammelt hat. Im ersten Fall passiert das Brennen langsam und kontrolliert, im zweiten Fall sehr schnell in einem sogenannten Helium-Blitz.



So oder so, die Expansion des Sterns stoppt abrupt mit dem Einsetzen der Heliumverbrennung. Aber sobald das gesamte Helium im Kern verbraucht ist und nicht-fusionierender Kohlenstoff/Sauerstoff übrig ist, zusammen mit einer langsam nach außen wanderndes Hülle aus brennendem Helium, dann beginnt das Wachstum des Roten Riesen.

Die Schluckauf-Phase: Stellare Winde zerreißen den Stern

In diesem Augenblick hat die brennende Wasserstoff-Schicht noch nicht die Oberfläche des Sterns erreicht. Mit nunmehr zwei sich ausdehnenden Schichten der Kernfusion wird der Stern immer instabiler. Ein Stern ist also keine Zwiebel, in der alles geordnet in seiner eigenen Schicht vonstatten geht. Vielmehr ist er ein Haufen turbulenter Materie aus wild umherwirbelndem Plasma. So lange er bloß aus einem brennenden Kern und dem Rest besteht, hält die Gravitation alles zusammen. Je mehr verzwickte Dinge jedoch in seinem Inneren vor sich gehen, desto instabiler wird er.

Abbildung (links): NASA, ESA, Andrew Fruchter (STScI) und das ERO Team (STScI + ST-ECF)
Abbildung (rechts): NASA, J. P. Harrington (U. Maryland) und K. J. Borkowski (NCSU)

Das ist der Grund, weshalb der Stern in diesem Moment in eine Schluckauf-Phase übergeht. Das ist zwar nicht die offizielle Terminologie, beschreibt aber am besten, was vor sich geht: In verschiedenen Regionen des Sterns zünden Kernfusionen und gehen wieder aus, und der gesamte Fusionsprozess wird ziemlich turbulent und irregulär. Die genauen Details kann man nur mit Hochleistungsrechnern simulieren, aber das Ergebnis ist klar: Massive Sternenwinde reißen die äußeren Schichten des Sterns auseinander und Schwaden von stellarer Materie – wie Wasserstoff und Helium – werden ins All katapultiert. Der Schluckauf wird zum regelrechten Erbrechen.

Ein Planetennebel ist geboren

Obwohl es sich sehr hässlich anhört, entsteht dadurch eines der schönsten Phänomene in der Galaxie: Die ausgestoßene Materie umringt den übrig gebliebenen Kern des Sterns wie eine gigantische Wolke aus himmlischer Materie. Da der Kern oft noch bestimmte Arten von Strahlung aussendet (↗[4]), bringt das die Gaswolke zum Leuchten (meist aber nicht in Farben, die man mit bloßem Auge sehen kann). Diese Wolken nennt man „planetarische Nebel“, obwohl der Name nur historisch ist und nichts mit Planeten zu tun hat. In unseren Abbildungen kann man zwei schöne Beispiele dafür sehen. Die erste zeigt NGC 2392, den sogenannten „Eskimonebel“ im Sternbild Zwilling. Der zweite, rechts, ist NGC 6543 im Sternbild Drache. Man nennt ihn auch „Katzenaugennebel“. Das Bild ist eine Kombination aus sichtbarem und Röntgenlicht.



Die Erzeugung von planetarischen Nebeln am Ende eines Sternenlebens spielt eine wichtige Rolle bei der Entwicklung unserer Galaxie. Sie bringt große Mengen an Helium und Wasserstoff in das interstellare Medium, also das Gas und den Staub zwischen den Sternen. Dieses Material kann dann später von anderen Regionen angezogen und verdichtet werden und eventuell neue Sterne hervorbringen (↗[5]).

Und was bleibt? Nun, der alte Kern aus Kohlenstoff und Sauerstoff ist alles, was vom Stern bleibt. Er ist sehr kompakt, kann aber keine Kernfusion mehr durchführen. Und er ist immer noch sehr heiß und wird sich in den kommenden Millionen Jahren langsam abkühlen. Man nennt ihn dann einen „Weißen Zwerg“, dem wir ein eigenes Kapitel widmen (↗[6]).

↗[4]: *„Alpha-, Beta- und Gammastrahlen“ auf Seite 175*
↗[5]: *„Die Geburt des Sonnensystems“ auf Seite 59*
↗[6]: *„Weiße Zwerge und Typ Ia Supernovae“ auf Seite 87*



"Kapieren die, dass das Ganze 640 Lichtjahre weit weg ist?"

Supernovae

Es endet mit einem Knall

Nichts hält ewig, nicht mal die Sterne am Himmel. Ständig werden im Universum neue Sterne geboren (↗[1]) und sterben. Wenn sie ihr Leben beenden, dann tun sie das nicht still und heimlich. Sie leuchten in Form eines der heftigsten Phänomene, wenn sie wochenlang heller als eine ganze Galaxie strahlen, bevor sie langsam verblassen. Man spricht dabei von einer Supernova-Explosion. Es gibt verschiedene Typen von Supernovae: Typ Ia, Ib, Ic, sowie II (es gibt auch noch andere, aber die kommen nur sehr selten vor). Sie unterscheiden sich in der Art der Strahlung, die sie während ihrer Explosion aussenden. In welchem Typ Supernova ein Stern letztlich endet, hängt davon ab, wie schwer er ist.

Kernfusion auf stellarem Level

Wenn ein Stern brennt, fusioniert Wasserstoff zu Helium – dieser Prozess hält das Feuer aufrecht. Der Strahlungsdruck der Kernfusion (↗[2]) stabilisiert den Stern gegen seine eigene Gravitation, die ihn zusammenzieht. Man könnte berechtigterweise auch davon sprechen, dass Sterne ständig kollabieren und explodieren, und das gleichzeitig! Aber der Treibstoff eines Sterns hält nicht ewig. Geht er aus, verändert sich der Stern. Manchmal geschieht das sehr schnell.



Den meisten Sternen geht der Treibstoff zuerst im Zentrum aus, wo Temperatur und Druck am höchsten sind. Das muss aber noch nicht das Ende sein, denn unter großem Druck kann das Helium weiter zu schwereren Elementen fusionieren, etwa Kohlenstoff oder Neon. Diese Prozesse setzen zwar nicht so viel Energie frei wie die Wasserstofffusion, aber immerhin etwas. Die schweren Elemente können dann zu noch schwereren Elementen fusionieren, und so weiter, bis hin zu Eisen. Eisen-Kerne sind energetisch am stabilsten. Deswegen ist spätestens beim Eisen Schluss mit der Fusion (↗[2,3]).

Das eiserne Herz eines Sterns

Durch diese Fusionskaskade ähneln viele Sterne einer vielschichtigen Zwiebel: In der äußersten Schicht brennt Wasserstoff, in der Schicht darunter Helium, usw., bis hin zum Zentrum des Sterns. Ein junger oder eher leichter Stern hat weniger Schichten, wohingegen ein alter oder sehr schwerer Stern sehr viele Schichten besitzen kann, und in seinem Inneren noch sehr schwere Elemente fusionieren. Schwere Sterne haben extrem dichte Eisenkerne. Ein solcher Eisenkern kann nicht weiter fusionieren, also muss er das gesamte Gewicht des Sterns aushalten. Die Eisenkerne werden durch ihr eigenes Gewicht und das der äußeren, noch brennenden Schichten zu einer extrem dichten Region zusammengedrückt. Der meiste Widerstand gegen den Druck kommt von den Elektronen der Eisenatome: Elektronen sind Fermionen – daher können nie zwei von ihnen mit den gleichen Eigenschaften am gleichen Ort sein (↗[4]). Während in der nächsten Schicht immer mehr Brennstoff ausgeht, wird immer mehr Eisen produziert und der Kern wird immer massiver (und dabei auch etwas kleiner, weil er durch die erhöhte Gravitationskraft weiter komprimiert wird).

↗[1]: *„Die Geburt des Sonnensystems“ auf Seite 59*
↗[2]: *„Kernfusion“ auf Seite 179*
↗[3]: *„Radioaktive Zerfälle“ auf Seite 171*

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_20

Ab einem Punkt aber wird der Druck zu hoch: Der Kern ist dann so schwer, dass die Elektronen aus der Atomhülle in die Protonen der Eisenkerne gepresst werden. Plötzlich findet im gesamtem Kern ein β^+-Zerfall mit Elektroneneinfang (↗5) statt, und der innerste Bereich des Sterns erfährt eine katastrophale Umwälzung. Elektronen und Protonen werden zu Neutronen, die bei ihrer Umwandlung hochenergetische Strahlung freisetzen. Lawinenartig verwandeln sich die Eisenkerne in einfache Neutronenklumpen. Die Neutronen können nun noch viel dichter komprimiert werden als die Elektronen und Eisenkerne zuvor. Durch das immense Gewicht und den Druck wird alles zu einer eng gepackten Kugel – und innerhalb von Sekunden wird der ganze Sternenkern zum Neutronenstern (↗6). Die äußeren Schichten haben dabei noch nicht bemerkt, was vor sich geht: Der Eisenkern ist zu einem winzigen Neutronenhäufchen geschrumpft. Aber die Gravitation ergreift auch die äußeren Schichten: Da nun aber nichts mehr den Stern stabil hält, stürzt der ganze Stern, von der innersten zu äußersten Schicht, in sich zusammen.



Der Kollaps: vom Eisenkern zum Neutronenstern – in Sekunden

Derweil ist der Kern zu einer fast perfekt runden Kugel dicht gepackter Neutronen verschmolzen, die wiederum dadurch stabil gehalten wird, dass Neutronen Fermionen sind: Wo eines ist, kann kein weiteres sein. Und obwohl der Neutronenkern verglichen mit dem Rest des Sterns winzig ist, wirkt er doch wie ein gigantischer Atomkern, nur ohne Protonen. Das bedeutet, er ist unglaublich hart – und jetzt ist der Rest des Sterns dabei, auf ihn zu stürzen!

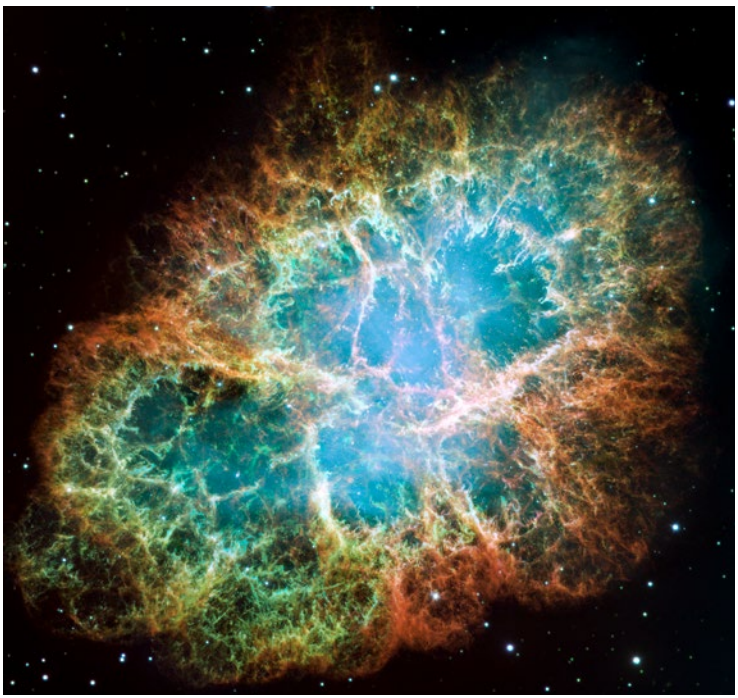
Mit Überschallgeschwindigkeit prallen die äußeren Schichten am Neutronenkern ab. Das erzeugt eine gewaltige Schockwelle durch die stellare Materie hindurch, die den gesamten Rest des Sterns nach außen trägt. Die Schockwelle wird dabei von einer gewaltigen Menge Neutrinos (↗7) unterstützt, die beim β^+-Zerfall entstanden sind. Normalerweise wandern Neutrinos ungehindert durch Materie hindurch. Aber beim Kernkollaps wurden unglaublich viele von ihnen erzeugt. Und sie haben gewaltig viel Energie. Mit ungeheurer Kraft fegen die Neutrinos alle Sternenreste fort vom Kern – der Stern explodiert ein letztes mal und schießt dabei stellare Materie und Neutrinos ins Universum.

Woher wissen wir das überhaupt? Nun, obwohl Details dieses Mechanismus immer noch nicht ganz klar sind, wissen wir über den Kollaps von Sternen aufgrund unglaublich genauer Computersimulationen mittlerweile bestens Bescheid. So sind wir zum Beispiel inzwischen davon überzeugt, dass die Neutrinos bei einer Supernova-Explosion so eine wichtige Rolle spielen. Lange Zeit dachten die Physiker, dass der Einschlag der Schockwelle einfach durch den Neutronenkern gehen würde, auf der anderen Seite wieder heraus käme und dabei all die Materie mit sich ziehen würde. Doch durch die Simulationen haben sie gelernt, dass die Schockwelle allein nicht reicht, um diese gewaltigen Supernova-Explosionen zu verursachen – sondern dass die Neutrinos gehörig mithelfen.

Alles, was wir bisher gesagt haben, trifft auf eher schwere Sterne zu, – ab ca. der achtfachen Sonnenmasse. Mit Ausnahme des Typs Ia werden alle Supernova-Explosionen durch kollabierende Kerne verursacht. Was wir vorhin beschrieben haben,

↗4: *„Spin“ auf Seite 191*
↗5: *„Alpha-, Beta- und Gammastrahlen“ auf Seite 175*
↗6: *„Weiße Zwerge und Typ Ia Supernovae“ auf Seite 87*
↗7: *„Das Neutrino“ auf Seite 213*

passt ziemlich genau zu einem Typ II. Aber auch die Typen Ib und Ic haben kollabierenden Kerne – nur haben dort die Sterne vor ihrer Explosion schon einen Großteil ihrer äußeren Schichten verloren, wahrscheinlich durch starke Sonnenwinde, oder durch einen vorbeiziehenden Stern, der sie durch seine Gravitationskraft abgerissen hat. Da sich durch die fehlenden Wasserstoff- und Heliumschichten die ausgesendete Strahlung charakteristisch verändert, können wir die Typen Ib und Ic gut von Typ II unterscheiden.



Typ Ia Supernovae sind jedoch völlig andere Biester. Sie sind explodierende Weiße Zwerge, und bekommen von uns ein eigenes Kapitel (↗6).

Supernovae im Wandel der Zeit

Supernova-Explosionen geschehen nicht allzu oft. Aus Beobachtungen ferner Galaxien schließen wir, dass sich in unserer Milchstraße jedes Jahrhundert etwa drei Supernovae ereignen.

In der Geschichte der Menschheit gab es schon sehr heftige, die auch aufgezeichnet wurden. Die früheste Aufzeichnung einer Supernova stammt von chinesischen Astronomen aus dem Jahr 185. Heute wird sie SN185 genannt.

Diese Notation wurde bis heute beibehalten. Eine der hellsten muss SN1054 gewesen sein, die man mit bloßem Auge einen Monat lang tagsüber und noch zwei weitere Jahre nachts sehen konnte. Die Überreste dieser Explosion bilden den Krebsnebel, nahe dem Sternbild des Stiers. Die zuletzt beobachtete Supernova ist SN1604. Sie wurde von Johannes Kepler entdeckt.

Die Supernovae sind aber nicht einfach nur destruktiv: Die ausgestoßene stellare Materie enthält viele schwerere Elemente, von Kohlenstoff über Sauerstoff bis hin zu Eisen, die essenziell sind, damit auf Planeten Leben entstehen kann (↗1). Es ist sehr wahrscheinlich, dass auch die Atome deines Körpers einmal in einem Stern entstanden und durch eine Supernova durchs Universum transportiert wurden.

Abbildung: NASA, ESA, J. Hester und A. Loll (Arizona State University)


MAXWELL ENTDECKT EINE UNGEWÖHNLICHE ANORDNUNG VON NEUTRONENSTERNEN UND WEIßEN ZWERGEN...
WAS ZUM--?
ALTENHEIM MILCHSTRAßE

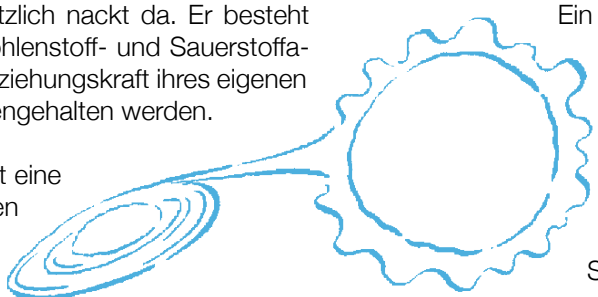
Weiße Zwerge und Typ Ia Supernovae

Sternenleichen und Standardkerzen

In anderen Artikeln haben wir über die letzten Tage im Leben eines Sterns berichtet. Aber bleibt eigentlich irgendetwas nach dem gewaltigen Ausstoß von Materie ins Universum (↗[1]) oder den noch katastrophaleren Supernova-Explosionen (↗[2]) übrig? Was bleibt, nachdem die Ausbrüche an Gamma-Strahlen verschwunden sind und die letzten Wasserstoff-Wolken ins All geblasen wurden?

Das Schicksal typischer Sterne: der Weiße Zwerg

Wir haben schon in den entsprechenden Artikeln darauf hingewiesen: Wann immer ein eher leichter Stern, so wie unsere Sonne, sein Leben beendet, bleibt von ihm ein sogenannter weißer Zwerg übrig. Die äußere Hülle des Sterns, bestehend aus Wasserstoff und Helium, wurde ins All abgestoßen, und der Kern steht plötzlich nackt da. Er besteht im wesentlichen aus Kohlenstoff- und Sauerstoffatomen, die durch die Anziehungskraft ihres eigenen Gewichts eng zusammengehalten werden.



Weiße Zwerge haben oft eine Masse, die zwischen der halben und etwas mehr als einer Sonnenmasse liegt. Dennoch sind sie meist nicht viel größer als die Erde. Mit anderen Worten: sie sind unglaublich dicht! Ein Teelöffel Weißer-Stern-Materie wiegt ungefähr so viel wie ein Auto (und nicht gerade so ein leichtes, Sprit sparendes). Da sie so schwer sind, ist die Gravitationskraft bei Weißen Zwergen enorm: Jeder Mensch auf der Oberfläche eines Weißen Zwergs würde sofort zu einer dünnen Schicht um den Stern zusammengequetscht werden.

Das warme nukleare Nachglühen von Sternen

Und während das passiert, würde die Person auch gleich noch in Flammen aufgehen. Denn ein weißer Zwerg ist ganz schön heiß. Der Fusionsprozess hat zwar aufgehört, aber die Wärmeenergie des Sterns ist noch immer im Kern gesammelt. Die Hitze wird nur sehr langsam abgegeben; oft hat ein Weißer Zwerg eine Temperatur von mehreren zehntausend Kelvin und braucht zum Abkühlen mehrere Millionen Jahre.

Ein Weißer Zwerg kollabiert deshalb nicht noch weiter, da die Elektronen und Atomkerne der Kohlenstoff- und Wasserstoff-Atome so dicht gepackt sind. Die Elektronen spielen dabei eine ganz besondere Rolle: Sie sind sogenannte Fermionen. Das Pauli-Prinzip verbietet, dass zwei Fermionen mit genau den gleichen Quantenzahlen am gleichen Ort sein können. Sie verhalten sind also wie kleine, feste Kugeln: Wo eines ist, kann kein anderes sein. Wobei das nicht ganz stimmt: Sie können schon am selben Ort sein, müssen sich dafür aber z.B. in ihrer

↗[1]: *„Rote Riesen und Planetarische Nebel“ auf Seite 79*
↗[2]: *„Supernovae“ auf Seite 83*

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_21

Geschwindigkeit oder ihrem Spin unterscheiden. Es wird aber der Punkt kommen, an dem sich plötzlich alle möglichen Sorten von Elektronen mit allen möglichen Geschwindigkeiten und Energien aufhalten, so dass kein weiteres hinzukommen kann. Und das hält die Elektronen auseinander. Anders sieht die Sache bei den Bosonen, etwa den Photonen, aus: Von ihnen kann man so viele an die gleiche Stelle bringen, wie man möchte.



Was einen Weißen Zwerg also stabil hält, ist die Quantenmechanik. Genauer gesagt, das Pauli-Prinzip. Und es macht einen tollen Job: Unsere Galaxie ist voll mit Weißen Zwergen – im Hertzsprung-Russell-Diagramm (↗[3]) haben sie ihre eigene Region, weit unter der Hauptreihe. Verglichen mit einem normalen Stern sind sie normalerweise sehr heiß, aber recht leuchtschwach. Doch man kann sie trotzdem leuchten sehen. Der von uns aus nächste Zwerg ist Sirius B, der Begleiter des Klasse-A Riesen Sirius A. Er ist nur etwa 8,5 Lichtjahre von uns entfernt, in etwa so schwer wie die Sonne, etwas kleiner als die Erde und hat sich in den letzten 120 Millionen Jahren auf gemütliche 25.000 Kelvin abgekühlt.

Wachsende Weiße Zwerge: Typ Ia Supernovae

Weiße Zwerge sind für gewöhnlich nicht alleine in der Galaxie. Eigentlich ist kein Stern wirklich alleine: Es gibt jede Menge Gas, Staub und interstellare Materie, die sie in Wolken umschwirren. Manchmal trifft eine von ihnen auf einen Weißen Zwerg. Und manchmal begleitet ein Weißer Zwerg einen anderen, noch brennenden Stern, der seinen kleinen Begleiter kontinuierlich mit stellarer Materie versorgt, die aus Sonnenwinden, Eruptionen oder ähnlichem stammt. Es gibt jedenfalls Millionen Möglichkeiten für einen Weißen Zwerg, weitere Materie aufzusammeln. Und irgendwann gibt es für ihn kein Halten mehr: Mit genug Masse kann er genug Druck aufbauen, um in seinem Kern wieder eine Kernfusion zu zünden. Was dann im Innern eines sehr massiven Stern passiert – die Fusion von Kohlenstoff und/oder Sauerstoff zu Eisen – passiert augenblicklich. Sobald ein Weißer Zwerg genug Materie angesammelt hat, zündet er. Und zwar alles auf einmal. All seine Materie führt augenblicklich eine Kernfusion durch und reißt den Stern auseinander, wie bei einer gewaltigen Atombombe.

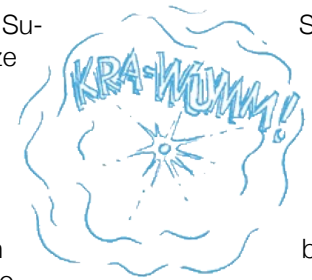
Für einen Moment lang leuchtet der Weiße Zwerg heller als eine ganze Galaxie. Dies ist eine ganz besondere Art von Supernova-Explosion, die aus historischen Gründen mit „Typ Ia“ bezeichnet wird (↗[2]). Das interessante daran ist, dass solche Explosionen alle mehr oder weniger gleich aussehen – während andere Supernova-Explosionen in allen möglichen Größen und Typen vorkommen, sind Supernovae vom Typ Ia sehr charakteristisch, da immer eine ganz bestimmte Menge von Kohlenstoff und Sauerstoff explodiert.

Standardkerzen: ein Weg, das Universum zu vermessen

Das ist jetzt zwar traurig für den Weißen Zwerg, aber fantastisch für die Astronomen hier auf der Erde! Es

↗[3]: *„Klassifizierung der Sterne“ auf Seite 73*

bedeutet nämlich, dass eine Typ Ia Supernova als sogenannte Standardkerze dienen kann. Es ist nämlich überhaupt nicht einfach zu messen, wie weit die Objekte, die wir im All beobachten, von uns entfernt sind. Besonders bei Galaxien, die sehr weit entfernt sind, ist es sehr schwer zu sagen, ob ein Stern nicht besonders hell leuchtet, weil er so weit weg ist, oder weil er so klein ist, oder weil vielleicht viel Staub zwischen ihm und der Erde liegt. Aber da Typ Ia Supernovae eine so typische Helligkeit und ein so typisches Spektrum haben, kann man sie leicht erkennen und dafür nutzen, die Entfernung zu den Galaxien zu messen, zu denen sie gehören.



In den vergangenen Jahrzehnten wurde dieses Prinzip ausgenutzt, um genau zu vermessen, wo sich andere Galaxien im Verhältnis zu uns befinden, und vor allem, wie weit sie von uns entfernt sind. Diese Messungen haben maßgeblich zu der Erkenntnis beigetragen, dass sich das Universum immer schneller ausbreitet, getrieben von einer mysteriösen Kraft mit Namen „Dunkle Energie“ (↗[4]).

Das nächste Stadium: ein Neutronenstern

Was von einem Weißen Zwerg übrig bleibt, ist nicht bloß ein Eisenkern, obwohl das manchmal auch passieren kann. Meistens aber hat der Weiße Zwerg das mindestens 1,4-fache der Masse unserer Sonne angesammelt und befindet sich oberhalb des sogenannten Chandrasekhar-Limits: Es ist das maximale Gewicht eines Eisenkerns. Noch schwerer, und er könnte sich selbst nicht mehr aufrecht erhalten, so wie es der Weiße Zwerg noch konnte. Stattdessen werden die Elektronen in die Protonen gepresst und wandeln sie zu Neutronen um. Der Weiße Stern wird dadurch zum Neutronenstern, eine Art riesiger Atomkern, nur ohne Protonen. Solche entstehen auch aus den „Leichen“ massiver Sterne, den Überbleibseln der Kollaps-Supernovae (↗[2]).

Ein Neutronenstern ist noch extremer als ein Weißer Zwerg: Mit einem Gewicht von 2-3 Sonnenmassen und einem Radius von wenigen Kilometern, herrschen in seiner direkten Nachbarschaft wirklich höllische Verhältnisse. Auch er wird durch das Pauli-Prinzip stabil gehalten (ja, Neutronen sind



auch Fermionen). Schwerer kann er nicht werden. Denn wenn er das sogenannte Tolman-Volkoff-Oppenheimer-Limit überschreitet, krümmt der Stern den Raum um sich herum so sehr (↗[5]), dass er hinter seinem eigenen Ereignishorizont verschwindet. Das Ergebnis ist ein schwarzes Loch (↗[6]), das finale Stadium jeglicher stellarer Evolution. Zumindest, soweit wir wissen (↗[7]).

↗[4]: *„Dunkle Energie“ auf Seite 141*
↗[5]: *„Gekrümmte Raumzeit“ auf Seite 125*
↗[6]: *„Schwarze Löcher“ auf Seite 91*
↗[7]: *„Verdampfung Schwarzer Löcher“ auf Seite 287*


ERWINS REISE durch ein SCHWARZES LOCH
ALS BEOBACHTER SEHEN WIR DEN ARMEN ERWIN, WIE ER AUF DEN EREIGNISHORIZONT ZUSTEUERT – DEN PUNKT AN DEM DER ZUG DER SCHWERKRAFT SO GROß WIRD, DASS NICHTS MEHR ENTKOMMEN KANN
Warum ich?
FÜR UNS SCHEINT SEINE ZEIT IMMER LANGSAMER ZU WERDEN, ABER TATSÄCHLICH BESCHLEUNIGT ERWIN IMMER WEITER!
Ich kann eigentlich auch Notizen machen...
YIELD
ERWIN FÜHLT EINE STÄRKERE GRAVITATIONSKRAFT AN SEINEN PFOTEN, WEIL SEINE FÜßE NÄHER AM SCHWARZEN LOCH SIND ALS SEIN KOPF.
kann... meine krallen... nicht... einziehen
DIE SCHWERKRAFT IST SO STARK, DASS LICHT VON ENTFERNTEN STERNEN UM DAS SCHWARZE LOCH HERUMGEBOGEN WIRD.
Nicht sehr seriös!
SIRIUS
SIRIUS?
SIRIUS?
JE NÄHER ERWIN DEM SCHWARZEN LOCH KOMMT, DESTO STÄRKER WIRD DIE SCHWERKRAFT... UND SIE BEGINNT, IHN AUSEINANDER ZU ZERREN...
soviel zu meiner Mitgliedschaft im Kleine-Herren-Klub...
ABHÄNGIG VON DER GRÖßE DES SCHWARZEN LOCHES KÖNNTE ERWIN NOCH EINEN BLICK HINTER DEN EREIGNISHORIZONT WERFEN, BEVOR ER IN STÜCKE GERISSEN WIRD!
was nützt mir ein Blick, wenn ich meine Brille verloren habe?!

Schwarze Löcher

Wer ins Schwarze trifft, kommt nicht wieder raus

Draußen im All gibt es viele wundersame und faszinierende Objekte: Gasnebel erstrecken sich über dutzende Lichtjahre, Neutronensterne mit dem Durchmesser weniger Kilometer, aber mit einem vielfachen Gewicht der Sonnen, oder gigantische Rote Riesen, fast so groß wie unser Sonnensystem. Aber kein stellares Phänomen im Universum ist so mysteriös und rätselhaft wie ein Schwarzes Loch.



Seit fast hundert Jahren kennt man die theoretisch mögliche Existenz Schwarzer Löcher, die sich aus Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie (↗[1]) ergibt. Aber es dauerte bis zu den 1960ern, als man erkannte, dass Schwarze Löcher nicht bloß skurrile Lösungen von Gleichungen waren, sondern tatsächlich in unserer Galaxie existieren; und als ausgebrannte Überbleibsel schwerer Sterne sind sie sogar sehr zahlreich.

Und am Ende gewinnt immer die Gravitation

Die Existenz eines Sterns ist ein ständiger Kampf: Während ihn das Feuer der Kernfusion auseinanderzureißen droht, versucht die Gravitationskraft seiner eigenen Masse ihn vollständig zusammenzudrücken. Diese beiden entgegengesetzten Kräfte – Strahlungsdruck und Gravitation – sind normalerweise im Gleichgewicht. So kann ein Stern für Milliarden von Jahren eine stabile Quelle für Licht und Strahlung sein. Sein nuklearer Brennstoff, der Wasserstoff, hält jedoch nicht ewig. Ab einem gewissen Punkt, wenn das meiste von ihm schon zu Helium und schwereren Elementen fusioniert ist, wird der Strahlungsdruck, der den Stern vor dem Kollabieren schützt, schwächer. Die Gravitation jedoch lässt niemals nach. Selbst die Zündung der schweren Elemente im Kern kann der Gravitation nicht standhalten: Der massive Stern kollabiert. Am Ende gewinnt immer die Gravitation. Während dieser Kontraktion werden einige der äußeren Schichten des Sterns durch eine gewaltige Explosion, die Supernova, ins All geschleudert. Und das, was vom Stern übrig bleibt, kontrahiert weiter. Wenn das Überbleibsel schwer genug ist – also eine Masse über dem sogenannten Tolman-Oppenheimer-Volkoff-Limit von einem etwa 1,5–3-Fachen der Sonnenmasse hat – gibt es nichts, was einen vollständigen Kollaps unter seinem eigenen Gewicht stoppen kann. Was übrig bleibt, kennt man als Schwarzes Loch.

In einem Schwarzen Loch ist die gesamte Masse in einem mikroskopischen Punkt, einer sogenannten Singularität, konzentriert. Um diese Singularität gibt es eine Region, wo die Gravitationskraft so unglaublich stark ist, dass ihr nichts entkommen kann. Egal wie stark die Motoren deines Raumschiffs sind: Wenn du nahe genug an der Singularität dran bist, fällst du hinein. Die Grenze dieser Region – der Punkt, an dem es kein zurück mehr gibt – nennt man Ereignishorizont. Was ihn überschreitet, ist für immer verloren. Nicht mal Licht kann der Gravitationskraft entkommen, sobald es erstmal den Ereignishorizont überquert hat. Daher bezeichnet man

↗[1]: *„Die Allgemeine Relativitätstheorie“ auf Seite 121*

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_22

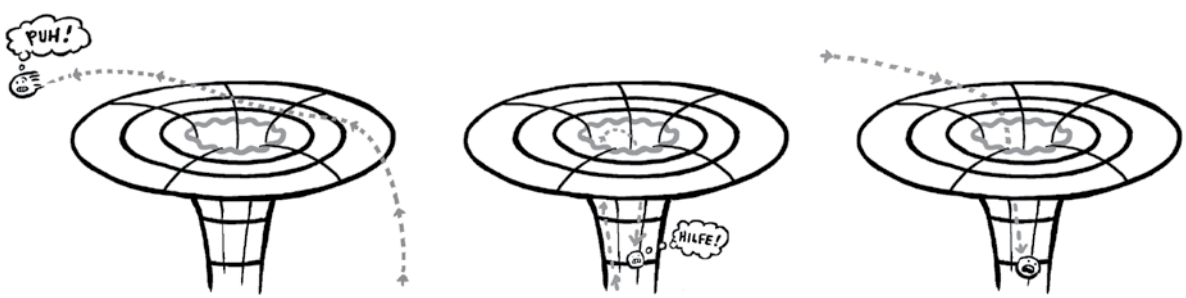
das Phänomen auch als Schwarzes Loch: Man wird es niemals direkt sehen können, da es einfach nichts aussendet, nicht einmal Strahlung.

Wir sehen es nicht, weil es nichts aussendet

Wie sieht ein Schwarzes Loch also aus? Sollten wir mal auf eins treffen und versuchen, es zu beobachten (besser nicht), würden wir einfach eine schwarze Leere sehen. Eine Kugel des Nichts, mit den Grenzen am Ereignishorizont. Die Gravitation eines Schwarzen Lochs ist sogar so stark, dass sie die Flugbahn von vorbeifliegendem Licht verändert: Wir erkennen das als starke Verzerrung des Bildes eines Sterns, der, von uns aus gesehen, hinter dem Schwarzen Loch liegt. Es verhält sich dabei als sogenannte Grativationslinse (↗[2]).

Alles, was wir bisher gesagt haben, ist richtig, wenn wir von einem „puren“ Schwarzen Loch sprechen, das ganz für sich allein existiert, ohne irgendwelche Materie in seiner Nähe. In Wirklichkeit wird ein Schwarzes Loch aber nie ganz für sich allein sein. Es wäre von großen Mengen Materie umringt, die langsam verschluckt wird: Überbleibsel seines vorherigen Lebens als Stern, Hüllen anderer Sterne, zufällig herumstreunende Asteroiden, Gaswolken und interstellare Materie. Und all das ist in seiner Nähe gefangen, zerquetscht und zerschmettert in einem flachen, drehenden Pfannekuchen mit Namen „Akkretionsscheibe“, die das Schwarze Loch umhüllt.

Ein Stück Materie am äußeren Rand der Scheibe kann ein Schwarzes Loch viele Male umrunden, sich dabei spiralförmig auf das Schwarze Loch zu bewegen und dabei intensive elektromagnetische Strahlung in allen möglichen Frequenzen aussenden, bevor es den Ereignishorizont überschreitet und für immer in die Singularität fällt. Ein entfernter Beobachter wird nie sehen, wie es den Ereignishorizont überschreitet (mehr dazu unter „Was passiert, wenn du in ein Schwarzes Loch fällst?“). Das einzige, was man sehen würde, wäre die beim Umrunden der Akkretionsscheibe abgegebene Strahlung.



↗[2]: *„Gravitationslinsen“ auf Seite 129*

Und wie viele Schwarze Löcher gibt es denn nun im Universum? Die Antwort: Niemand weiß es. Es gibt allerdings sehr starke Anzeichen dafür, dass Sagittarius A*, eine extrem starke und kompakte Strahlungsquelle im Sternbild Schütze im Zentrum unserer Galaxie, in Wahrheit ein Schwarzes Loch zusammen mit einer unglaublich hellen Akkretionsscheibe darum herum ist. Durch die extrem schnelle, kreisförmige Bewegung um ein gemeinsames Zentrum kann man schließen, dass dort ein Schwarzes Loch mit einer Masse von ca. vier Millionen Sonnenmassen sitzen muss. Unterstützt durch viele astronomische Beobachtungen vermuten Astrophysiker, dass das sogar für die meisten Galaxien zutrifft: In ihrem Zentrum enthalten sie ein supermassives Schwarzes Loch, um das sich die gesamte Galaxie dreht.

Unabhängig davon ist es leider sehr schwer zu sagen, wie viele Schwarze Löcher es gibt, selbst in unserer eigenen Galaxie. Die Milchstraße enthält mehrere Hundert Milliarden Sterne, von denen viele schwer genug sind, um zu einem Schwarzen Loch zu werden, wenn ihnen mal der Brennstoff ausgeht. Schwarze Löcher sollten also nicht allzu unüblich sein. Es gibt allerdings kein einziges Objekt, von dem man mit Gewissheit behaupten könne, es sei ein Schwarzes Loch, obwohl es viele gute Kandidaten dafür gibt.

Einer von ihnen ist Cygnus X-1, eine Quelle von unglaublich starker Röntgenstrahlung, ungefähr 6.700 Lichtjahre von uns entfernt. Es gibt eine berühmte Wette zwischen Kip Thorne und Stephen Hawking darüber, ob Cygnus X-1 nun ein Schwarzes Loch ist oder nicht. Mittlerweile sind die Beweise dafür, dass es ein Schwarzes Loch ist, so stark, dass Hawking seine Niederlage eingestanden hat. Und Kip Thorne kam zu einem Jahresabo der Zeitschrift „Penthouse“.

Seit der Entdeckung von Gravitationswellen im Jahr 2016 (↗[3]) ist man sich allerdings ziemlich sicher, dass es Schwarze Löcher geben muss: Nichts sonst hätte eine derart gewaltige Erschütterung in der Raumzeit hervorrufen können.

Was passiert, wenn du in ein Schwarzes Loch fällst?

Einfach gesagt: Du stirbst. Traurig, aber wahr. Aber du stirbst auf eine sehr interessante Art, über die es wert ist, ein wenig zu plaudern.

Wenn du vom Schwarzen Loch noch weit weg bist und auf es zu fällst, fühlt es sich an, wie sonst im All: mit einem Gefühl der Schwerelosigkeit. Außer dass ein kleiner schwarzer Punkt immer näher kommt, merkst du nichts.

Wenn du dich dem Ereignishorizont näherst, fällst du noch immer frei, aber bemerkst etwas Seltsames, wenn du dir die Sterne in deiner Umgebung anschaust. Ihr Bild wirkt immer stärker verzerrt, da das Licht, das von ihnen ausgeht, vom Schwarzen Loch verbogen wird. Die Schwarze Kugel, die den Ereignishorizont markiert, nimmt am Himmel immer mehr Platz ein. Kurz bevor du den

→

↗[3]: *„Gravitationswellen“ auf Seite 133*

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_23

Ereignishorizont passierst, kannst du die letzten Sterne hinter dir nur noch wie durch einen Tunnel sehen. Noch bist du nicht im Schwarzen Loch. Jedoch wird das meiste Licht, das von den Sternen kommt, nicht in dein Auge gelangen, sondern vom Schwarzen Loch aufgesogen. Das letzte Stückchen „normales Universum“ verschwindet aus deinem Blickfeld, sobald du den Ereignishorizont überquerst. Von da an dauert es nur noch wenige Augenblicke, bist du in die Singularität krachst.

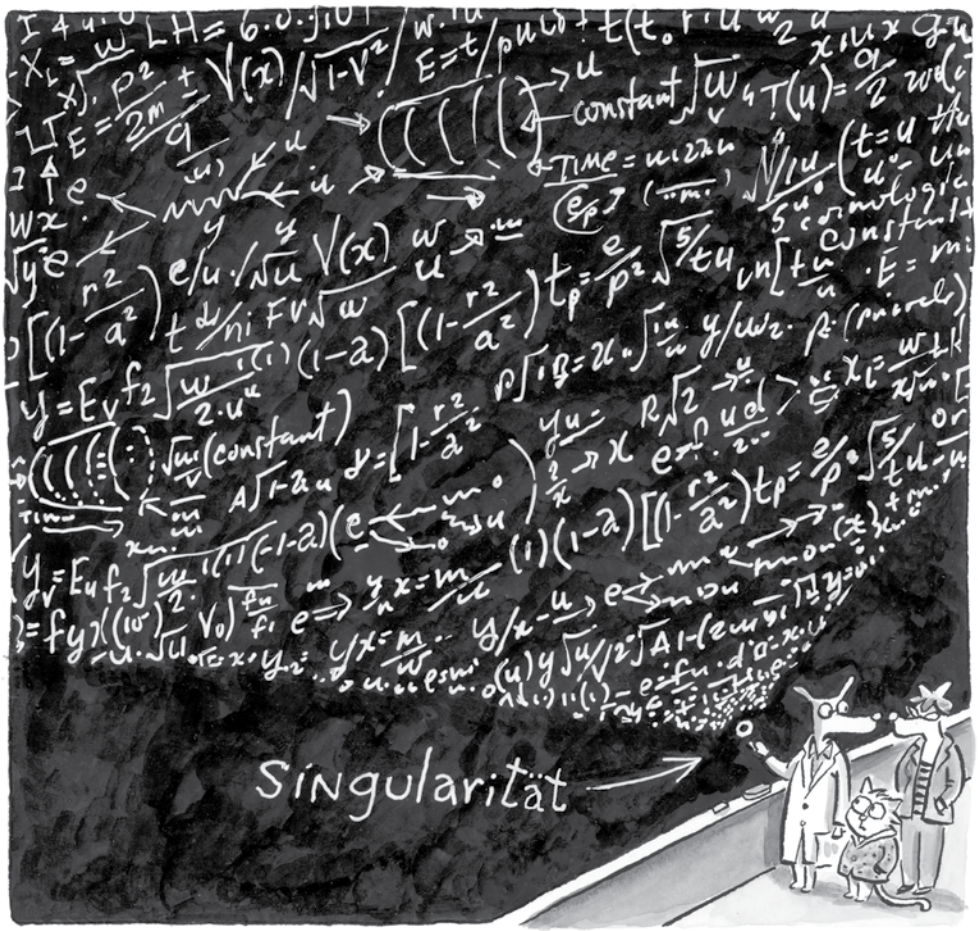


Kurz davor stirbst du aber. Obwohl du die ganze Zeit frei fällst, sind die Gezeitenkräfte ab einem bestimmten Punkt zu stark, um darin zu überleben. Der Teil deines Körpers, der näher am Schwarzen Loch ist, erfährt dabei eine stärkere Gravitationskraft als der Teil, der weiter entfernt ist. Anfangs mag der Unterschied noch nicht groß sein. Aber auf deinem Weg zur Singularität wird er immer größer, bis dein Körper lang und dünn auseinandergezogen wird und es dich zerreißt. Manche Leute nennen diesen Vorgang auch „Spaghettifizierung“.

Wann genau dieser Moment jedoch eintritt, hängt von der Größe des Schwarzen Lochs ab. Bei kleineren Exemplaren ist der Ereignishorizont so nah an der Singularität, dass es sich schon lange zerrissen hat, bevor du ihn überschreitest. Je schwerer das Schwarze Loch jedoch ist, desto weiter außerhalb liegt der Ereignishorizont. Bei einem supermassiven Schwarzen Loch, so wie z.B. bei Sgr A*, wird man erst zerrissen, nachdem man den Ereignishorizont überquert hat. Am Ereignishorizont selbst wäre es noch ganz nett.

Interessanterweise passiert aber all das nur aus unserer Sicht. Ein entfernter Beobachter mit einem guten Teleskop würde eine andere Beobachtung machen: Er würde sehen, wie du dem Ereignishorizont immer näher kommst. Aber dabei würde er beobachten, wie du langsamer und langsamer wirst. Dabei kommst du dem Ereignishorizont näher und näher, erreichst ihn aber nie. Am Ende würde er immer noch ein gefrorenes Bild von dir sehen, wie du kurz davor bist, vom Schwarzen Loch aufgesaugt zu werden. Dabei bist du in Wirklichkeit schon lange drin. Der Grund dafür liegt in der Natur des Ereignishorizonts: Licht hinter seiner Grenze kann dem Schwarzen Loch nie entkommen und das Auge des Beobachters erreichen. Das Licht in der Nähe der Grenze kann zwar entkommen, braucht dafür aber unglaublich lange. Die Lichtstrahlen, die du in den letzten Sekunden vor deinem Grenzübertritt aussenden würdest, bräuchten Jahrhunderte, um über die Gravitationsbarriere zu kriechen. Während diesem Kraftakt verliert das Licht viel Energie, was sein Farbspektrum in den infraroten Bereich verschiebt. So würde also für alle Ewigkeit ein rotverschobenes, gequetschtes Standbild von dir, wie du gerade über den Ereignishorizont gehst, am Himmel zu sehen sein.


EIN COOLER TRICK
UM DAS SCHWARZE LOCH ZU SEHEN, HALTE DAS BUCH AUF BRUSTHÖHE EIN PAAR ZENTIMETER VOR DICH UND SCHAU ES DIR DURCH DIE HANDYKAMERA AN.

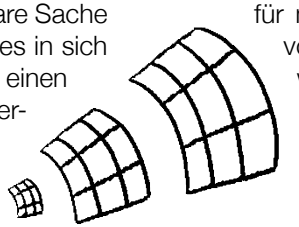


"Wir haben den Punkt erreicht, an dem die Gleichungen zusammenbrechen, Raum und Zeit geboren werden und die Physiker zum Mittagessen gehen."

Der Urknall

Wie auf einen Schlag alles begann

Schaut man nach oben in den Himmel und versucht, die Leere des Raumes dort zu begreifen, jenseits der Erde, des Sonnensystems und unserer Galaxie, dann fühlt man schon ein wenig Ehrfurcht und Erstaunen. Viele Menschen hatten in den letzten Jahrhunderten dieses Gefühl, egal, ob sie Teleskope hatten oder einfach nur in den klaren Nachthimmel schauten. Eine so wunderbare Sache wie das Universum müsse etwas Göttliches in sich haben, dachten viele. Und wie es sich für einen Gott gehört, sollte es ewig und unveränderlich sein.



Für lange Zeit war das im größten Teil der westlichen Kultur die vorherrschende Sicht der Dinge. Daher war es für Albert Einstein ein regelrechter Schock, als er herausfand, dass seine kurz zuvor veröffentlichten Gleichungen, die Raum und Zeit beschreiben (↗[1]), kein solches unveränderliches Universum zuließen. Seine Theorie besagte, dass sich das Universum entweder ausdehnen oder zusammenziehen musste. Aber so bleiben konnte es nicht. Völlig verstört, hat Einstein seine Gleichungen rasch so modifiziert, dass er ihnen einen Term hinzufügte, den er „kosmologische Konstante“ nannte. Seine geänderten Gleichungen hatten nun Lösungen, die ein statisches Universum beschrieben. So war er erstmal zufrieden.

Hubble stellt fest: Das Universum dehnt sich aus!

Es war 1929, als ein junger Astronom mit Namen Edwin Hubble seine Erkenntnisse über die spektralen Emissionen von Sternen und Nebeln publizierte. Was er herausgefunden hatte, war phänomenal: Er betrachtete Licht, das aus verschiedenen Ecken des Universums zu uns kam. Und dabei stellte er fest, dass das meiste davon rotverschoben war. Das bedeutet, dass der Dopplereffekt (↗[2]) die Wellenlängen des Lichts der Sterne gestreckt hat. Dafür müssten sich aber alle diese Sterne von uns entfernen! Besser noch: Je weiter sie weg waren, desto schneller entfernten sie sich. Es gab nur eine Erklärung dafür: Das gesamte Universum dehnt sich aus!

„Aber Moment“, könnte man jetzt sagen, „wieso muss sich das Universum deshalb denn ausdehnen? Vielleicht fliegen einfach alle Sterne von uns weg. Kann doch sein. Wieso muss sich dann gleich das Universum ausdehnen?“ Nun, es gibt zwei gute Gründe, die dafür sprechen, dass Hubbles Entdeckungen bedeuten, dass das Universum nicht statisch ist, sondern sich ausdehnt: Wenn das Universum doch statisch wäre, müsste sich die Erde genau in dessen Mittelpunkt befinden. Das wäre tatsächlich ein sehr außergewöhnlicher Ort. Bei einem so großen Universum, in dem sich überall Sterne und Galaxien befinden, wäre es wirklich nicht leicht, eine Erklärung dafür zu finden, wieso sich gerade von uns alle wegbewegen wollen.

Zum anderen erhöht sich die Geschwindigkeit der Objekte, die sich von uns entfernen, linear, je weiter sie von uns weg sind. Diese Linearität – die man auch durch die „Hubble-Konstante“ beschreibt –

↗[1]: *„Die Allgemeine Relativitätstheorie“ auf Seite 121*
↗[2]: *„Der Doppler-Effekt“ auf Seite 15*

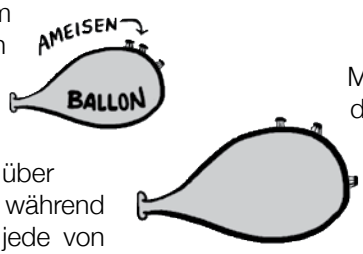
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_24

bedeutet, dass sich weit entfernte Galaxien sogar mit Überlichtgeschwindigkeit von uns weg bewegen! Wenn eine Galaxie ca. 4.3 Gigaparsec bzw. 14 Milliarden Lichtjahre von uns entfernt ist, entfernt sie sich schon mit Lichtgeschwindigkeit von uns. Ist sie doppelt so weit weg, bewegt sie sich mit doppelter Lichtgeschwindigkeit, und so weiter.



Das Universum dehnt sich aus – sogar schneller als Licht!

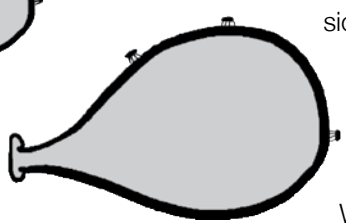
Das Ganze einfach mit sich entfernenden Galaxien zu erklären, wäre unzulässig – nichts kann sich schneller als mit Lichtgeschwindigkeit bewegen (↗[3]). Was wirklich passiert: Es bewegen sich nicht die Galaxien, sondern der Raum zwischen ihnen expandiert! Man kann sich das prima mit einem aufgeblasenen Ballon vorstellen: Der Ballon ist das Universum. Stellen wir uns vor, dass ein paar Ameisen über den Ballon krabbeln, während er sich ausdehnt. Für jede von ihnen würde es so aussehen, als würden sich alle anderen Ameisen von ihr entfernen, und zwar umso schneller, je weiter sie von ihr weg sind. Mit unserem Universum verhält sich das ganz ähnlich – es ist egal, dass Ameisen eine Höchstgeschwindigkeit haben, mit der sie über den Ballon krabbeln können (beim Universum ist das die Lichtgeschwindigkeit). Es gibt nämlich trotzdem keine Beschränkung der „Geschwindigkeit", mit der sich der Raum ausdehnt! Es scheint also nur so, als würden sich die Galaxien von uns entfernen – in Wahrheit wird einfach der Abstand zwischen ihnen und uns größer. Und die Rate dieser Ausdehnung hat kein Limit (was der Grund dafür ist, dass es einen Warp-Antrieb theoretisch geben kann, ↗[4]). Und daher sieht es für uns so aus, dass sich weit entfernte Galaxien mit Überlichtgeschwindigkeit bewegen.



Übrigens: Das sich ausdehnende Universum passt perfekt zu Einsteins erster Version seiner Gleichungen. Also hat er die Idee der kosmologischen Konstante schnell wieder verworfen und nannte sie später gar „größte Eselei seines Lebens". Heutzutage benutzt man die kosmologische Konstante allerdings wieder, aber mit einem anderen Wert als es Einstein ursprünglich tat.

Vor langer, langer Zeit: die Urknall-Singularität

Man kann die Sache aber noch ein wenig weiter denken: Die Allgemeine Relativitätstheorie beschreibt nicht nur das Universum, wie es heute ist. Sie sagt uns auch, dass sich das Universum sein Leben lang schon ausgedehnt hat, und dass es vor ca. 13,8 Milliarden Jahren ziemlich dicht und heiß war. Weiter zurück als bis zu diesem Punkt kann man mit den Gleichungen aber nicht rechnen – denn Temperatur, Dichte und Raumkrümmung werden unendlich groß. Diesen Moment nennt man heute „Urknall", und viele Physiker glauben, dass die Existenz des Universums in diesem Moment begann. Dass unsere Gleichungen in diesem Moment zu-



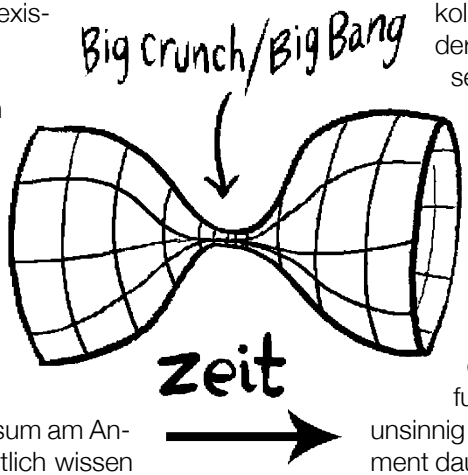
↗[3]: *„Relativität von Raum und Zeit" auf Seite 117*
↗[4]: *„Warp-Antrieb" auf Seite 299*

sammenbrechen, ist allerdings sehr bedauerlich. Das Universum muss so heiß und dicht gewesen sein, dass viele Physiker davon ausgehen, dass Einsteins Gleichungen unter diesen Bedingungen gar nicht mehr gültig sind. Vielmehr sind alle Teilchen so dicht zusammengepackt, dass Quanteneffekte der Elementarteilchen (und möglicherweise auch des Raumes selbst, ↗[5]) berücksichtigt werden müssten. Es gibt zur Zeit jedoch keine Theorie, die sowohl relativistische als auch Quanteneffekte berücksichtigt. Daher wissen wir auch nicht genau, was beim Urknall vor sich ging. Dennoch gibt es einige Punkte, bei denen wir uns recht sicher sind.



1.) Das Urknall-Modell unseres Kosmos funktioniert bis zu einigen Sekundenbruchteilen nach der Singularität sehr gut (↗[5]). Wir wissen sehr genau, welche Teilchen zu dieser Zeit existierten, und auch, wie viele.

2.) Der Urknall geschah nicht an einem bestimmten Ort, sondern überall gleichzeitig. Die Vorstellung, dass es an einer Stelle eine Explosion gab und sich von dort aus die Materie ausgebreitet hat, ist falsch – vielmehr war das gesamte Universum sehr heiß und dicht.



3.) Man hört oft, dass das Universum am Anfang „sehr klein“ war. Aber eigentlich wissen wir das gar nicht, denn wir haben keine Ahnung, ob das Universum eine endliche Größe hat oder unendlich groß ist. Stimmt Letzteres, dann war das Universum schon immer unendlich groß – auch beim Urknall. In dem Fall wäre es anfangs dicht und heiß und hätte sich seitdem ausgedehnt und abgekühlt – aber war eben schon immer unendlich groß.

4.) Wir wissen nicht, was vor dem Urknall war, oder ob überhaupt irgendetwas vor dem Urknall war. Es gibt verschiedene Szenarien, von denen keines irgendwie „sicher“ oder auch nur „wahrscheinlich“ ist: Sowohl Raum als auch Zeit scheinen erst mit dem Urknall begonnen zu haben. In dem Fall war der Urknall das erste, was überhaupt passiert ist. Die Frage, was davor war, würde dann überhaupt keinen Sinn ergeben.

Eine andere Möglichkeit ist, dass doch schon vorher etwas da war – z.B. ein anderes, kollabierendes Universum. Das andere Universum könnte sich unter seinem eigenen Gewicht zusammengezogen haben, um in einem „Big Crunch“ zu kollabieren – und von diesem sehr dichten und heißen Zustand ist es dann „abgeprallt“, um das sich heute ausbreitende Universum zu erzeugen (↗[6]). Doch selbst wenn dadurch etwas vor dem Urknall stattgefunden hätte, wäre es trotzdem unsinnig zu fragen, wie lange dieser Moment dauerte – aus dem Grund, dass es eine starke Quantenunsicherheit zwischen dem Moment der Kontraktion und der Expansion gegeben hat (↗[7]).

↗[5]: *„Zeitstrahl unseres Universums“ auf Seite 100*
↗[6]: *„Das Ende des Universums“ auf Seite 318*
↗[7]: *„Quantengravitation“ auf Seite 283*



Da sich das Universum schnell ausdehnt, können wir ziemlich sicher sein, dass es zu einem bestimmten Zeitpunkt ziemlich klein war, oder, besser gesagt: Alles war sehr dicht beieinander. Aber wir wissen noch viel mehr! Wir haben ziemlich gut verstanden, wie die Erzeugung von Teilchen funktioniert, und Einsteins Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie beschreiben im Detail, wie verschiedene Formen der Materie mit einer gekrümmten Raumzeit interagieren. Vergleichen wir diese Berechnungen mit den Beobachtungen aus der Astrophysik, und das in einer Zeit hoch präziser Teleskope, bekommen wir einen ziemlich guten Eindruck davon, was mit dem Universum passiert ist, selbst bis zu wenigen Sekundenbruchteilen nach dem Urknall – was aber genau beim Urknall passiert ist, ist uns bis jetzt noch immer ein Rätsel. Wir wollen zurückgehen zu dem Augenblick, als das Universum gerade erst entstanden ist und uns anschauen, was dann nach unserem heutigen Wissensstand passiert ist.

Schauen wir uns mal die wichtigsten Eigenschaften unseres Universums bei seiner Entwicklung an:



Alter des Universums. Mit anderen Worten: Wie viel Zeit ist seit dem Urknall vergangen?



Wie heiß ist das Universum zu diesem Zeitpunkt in etwa? Wir geben die Temperatur in K (Kelvin) an, aber man kann sich auch einfach Grad Celsius vorstellen – bei so hohen Temperaturen ist das ziemlich egal.



Der Faktor, um den das Universum damals kleiner war, als es heute ist.



Was war damals im Universum so los? Welche Art von Materie, Strahlung und Energie gab es?

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_25



0–10^{-43} Sekunden. Eigentlich ist unklar, ob überhaupt Zeit, wie wir sie kennen, vergangen ist.

Wahrscheinlich ca. 10^{32} K

Ähnlich wie bei der Zeit ergab das Konzept von einem Raum damals wohl nur wenig Sinn.

Man weiß wirklich nicht viel über die Physik bei solchen Dichten und Temperaturen. Es wird vermutet, dass die Gravitation und die drei anderen Grundkräfte vereint waren, was bedeutet, dass sie nur vier verschiedene Aspekte ein und der selben Kraft darstellt.

10^{-43}–10^{-36} Sekunden

Wohl rund 10^{29} K

10^{-51}

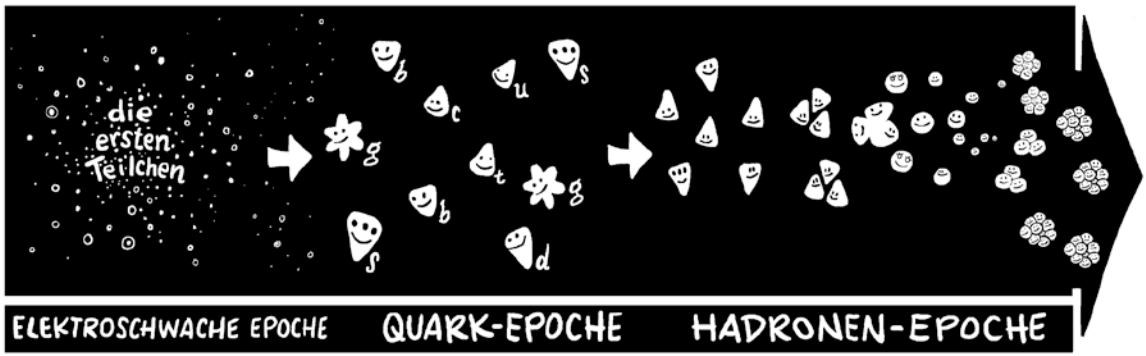
Die Gravitation hat sich abgespalten, die drei übrigen Kräfte waren gleich – am Ende spaltete sich die Starke Kraft noch ab. Ladung, Masse usw. hatten noch keine Bedeutung. Teilchen nach unserer heutigen Vorstellung existieren noch nicht.

10^{-36}–10^{-32} Sekunden

Während dieser Zeit fiel die Temperatur um einen Faktor 100.000 auf etwa 10^{24} K.

Hier wuchs das Universum unglaublich schnell, etwa um den Faktor 10^{26}.

Die inflationäre Ära ist ein Phasenübergang (etwa so wie schmelzendes Eis oder kochendes Wasser), und beginnt, als sich die Starke Kraft von den beiden anderen löst. Durch das schnelle Wachstum werden alle Falten der Raumzeitkrümmung geglättet – was erklärt, wieso das Universum heute kaum gekrümmt ist.



10^{-32}–10^{-12} Sekunden

Nach dem Aufheizen hin zu Temperaturen wie vor der Inflation fällt die Temperatur wieder, bis auf $\approx 3 \cdot 10^{15}$ K.

$\approx 10^{-29}$

Nach dem Ende der Inflationsphase zerfällt das Inflaton-Feld zu Unmengen von Teilchen und Strahlung. Materie fängt an zu existieren, aber die Schwache und die Elektromagnetische Kraft sind noch immer vereint.

10^{-12}–10^{-6} Sekunden

$\approx 10^{15}$ K

$\approx 10^{-22}$

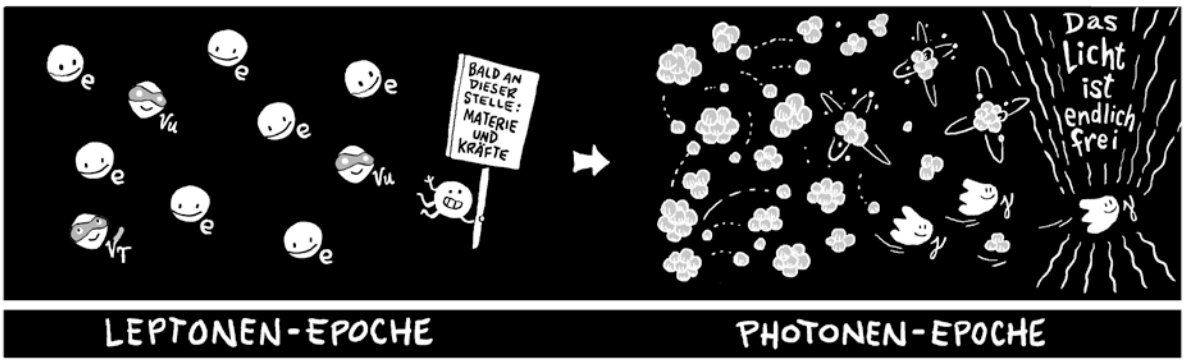
Das Universum hat sich genug abgekühlt, so dass sich die Schwache und die elektromagnetische Kraft auftrennen. Alle Grundkräfte haben nun ihre heutige Form. Es ist aber noch immer zu heiß für die Quarks, um Protonen und Neutronen zu bilden. Das Universum ist also mit einem heißen Plasma aus Quarks, Leptonen, Gluonen und ihren Antiteilchen gefüllt.

10^{-6} Sekunden–1 Sekunde

$\approx 10^{12}$ K

$\approx 10^{-15}$

Das Universum kühlt sich stark genug ab, so dass Quarks Protonen, Neutronen und andere Hadronen formen können. Physiker vermuten, dass in diesem Moment ein wenig mehr Hadronen als Anti-Hadronen erzeugt werden. Der Vernichtungsprozess zwischen ihnen hat daher so gut wie keine Antimaterie übrig gelassen.



1 Sekunde – ein paar Minuten

$\approx 10^9$ K

$\approx 10^{-10}$ bzw. 0,0000000001

Das Universum ist zum Großteil mit Strahlung gefüllt, außerdem mit Hadronen, Leptonen und Anti-Leptonen. Was vorher mit den Hadronen passiert ist, geschieht nun mit den leichteren Leptonen und Anti-Leptonen: Es gibt ein leichtes Ungleichgewicht zwischen den beiden, so dass nach deren gegenseitiger Vernichtung nur Leptonen (und davon größtenteils Elektronen) im Universum übrig bleiben. Allerdings bilden sich noch keine Atome.

halbe Stunde – 380.000 Jahre

$\approx 10^9$ K–3000 K

am Ende ca. 1/1090

Das Universum ist mit einem Plasma aus Atomkernen und Elektronen gefüllt, ähnlich wie in einem Kernfusionsreaktor. Photonen können sich nicht länger als ein paar Sekundenbruchteile frei bewegen, bevor sie entweder auf einen Atomkern oder ein Elektron stoßen. Erst am Ende dieser Zeit, die man Rekombinationsphase nennt, hat sich das Universum weit genug abgekühlt, so dass Elektronen und Kerne sich zu stabilen Atomen verbinden können. In diesem Moment, ca. 380.000 Jahre nach dem Urknall, wird das Universum transparent – Photonen können sich endlich frei bewegen. Es sind diese ersten freien Photonen, die wir heute als kosmische Hintergrundstrahlung messen können.



"Wir haben es gebaut um herauszufinden, was das Universum vor dem Urknall gemacht hat, um heute so strahlend auszusehen."

Die kosmische Hintergrundstrahlung

Die ältesten Photonen des Universums

Wenn man nachts in den Himmel schaut, kann man die Sterne leuchten sehen. Ihr Licht erreicht uns aus den Tiefen des Kosmos. Verwendet man ein großes Teleskop, das nicht nur sichtbares Licht aufnehmen kann, sondern alle möglichen Arten von elektromagnetischer Strahlung, sieht man noch viel mehr: Gammastrahlung von weit entfernten Galaxien, Röntgenstrahlung aus der oberen Atmosphäre und das tief infrarote Leuchten von Staub und Wasserstoff, die zwischen den Sternen unserer Galaxie umher treiben. Es gibt aber noch eine andere Strahlung, die hinter allem anderen liegt, und das hat Forscher ganz schön verwirrt, als sie es zum ersten Mal feststellten. Auch heute weiß man noch nicht alles darüber. Als diese Signale 1964 zum ersten mal empfangen wurden, dachte man zunächst, es würde sich um einen Messfehler der Antennen handeln. Die Strahlung kommt aus jeder Richtung – selbst aus der dunkelsten Ecke des Nachthimmels. Man kann sie mit einem Radioteleskop messen, und ihre Wellenlänge (↗[1]) liegt in der Größenordnung von ein paar Zentimetern. Man nennt sie „kosmische Hintergrundstrahlung“ (oder CMB für „cosmic microwave background“, „kosmischer Mikrowellen-Hintergrund“).

Der kosmische Hintergrund – das Licht zwischen den Sternen

Es gibt einige Punkte, in denen sich der CMB von anderer Strahlung unterscheidet. Zunächst einmal kommt er, wie bereits erwähnt, aus jeder Richtung mit ungefähr der gleichen Stärke. Es kann also keine einzelne Quelle dafür geben. Vielmehr füllt die Strahlung das gesamte Universum aus (es gibt etwa 400 Photonen des CMB in jeden Kubikzentimeter des Universums).



Noch viel seltsamer ist allerdings die Tatsache, dass sich der CMB im thermischen Gleichgewicht befindet. Das bedeutet, dass die Photonen des CMB eine ganz bestimmte Energieverteilung haben, so als hätten sie alle miteinander reagiert und Energie ausgetauscht. Für Strahlung ist das relativ untypisch. Die Photonen aus einem Laser zum Beispiel haben keine bestimmte Temperatur, denn sie haben alle genau die gleiche Energie. Strahlung aus einem radioaktiven Zerfall hat zwar eine bestimmte Energieverteilung, aber keine thermodynamische: Radioaktive Strahlung hat also auch keine Temperatur. Das Licht von der Sonne besitzt aber beispielsweise eine thermodynamische Energieverteilung. Daher kann man dieser Strahlung auch eine bestimmte Temperatur zuordnen – nämlich die Temperatur der Sonne, ein paar Tausend Grad. Was aber ist nun die Temperatur des CMB? Nun, ca. 2,7 K, also ca. -270 °C. Das ist ziemlich kalt!

Wir haben schon darauf hingewiesen, dass ein Haufen Teilchen für einige Zeit miteinander Energie austauschen muss, bis die Energie ungefähr (aber nicht genau) gleich verteilt ist, damit sie im thermodynamischen Gleichgewicht sind – also eine bestimmte Temperatur haben. Aber Photonen machen so etwas nicht. Die einzige Möglichkeit, Energie auszutauschen, besteht darin, aufeinander zu

↗[1]: *„Licht“ auf Seite 7*

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_26

prallen. Und das können Photonen nicht. Höchstens indirekt: Ein Photon knallt auf ein Atom, und dieses Atom knallt auf ein anderes Photon. So kann Energie vom ersten auf das zweite Photon übertragen werden. Das ist, was in der Sonne ständig passiert. Und dies ist auch der Grund, weshalb die Strahlung, die die Sonne verlässt, in einem thermodynamischen Gleichgewicht ist.



Das ist tatsächlich die einzige Möglichkeit, die wir kennen, damit so etwas passieren kann. Man braucht einfach die vermittelnden Atome oder irgendeine andere Art von Materie. Man kann also mit guten Gewissen annehmen, dass die Strahlung des CMB eine thermische Strahlung ist, die von einer Art Gas, Plasma oder Ähnlichem mit einer ganz bestimmten Temperatur ausgesendet wurde. Aber von was? Und vor allem: Wo soll das sein? Der CMB ist überall um uns herum, aber wo ist das ganze Plasma?

Ein Nachleuchten von vor 14 Milliarden Jahren

Die kurze Antwort darauf ist: Wir sind das Plasma! Zumindest waren wir es mal – um genau zu sein, ist der CMB das Nachleuchten aus der Zeit, als das gesamte Universum mit einem heißen, dichten, überall relativ gleichmäßig verteilten Plasma ausgefüllt war. Es war überall, und es war in einem thermodynamischen Gleichgewicht und hatte daher eine bestimmte Temperatur. Da das Plasma aus vielen positiv und negativ geladenen Teilchen bestand, konnten sich die Photonen zu dieser Zeit keine Sekunde lang frei bewegen, ohne auf ein Teilchen zu treffen (Photonen lieben es einfach, mit geladenen Teilchen zu reagieren). Daher waren damals auch alle Photonen im thermodynamischen Gleichgewicht mit diesem Plasma und hatten auch dieselbe Temperatur.

Da sich das Universum zu dieser Zeit ausdehnte (das tut es sogar immer noch, ↗[2,3]), hat sich das Plasma langsam abgekühlt, und so erging es auch den Photonen. Das passierte bis zu einer bestimmten Zeit, nämlich als das Universum so kalt wurde, dass sich alle positiv und negativ geladenen Teilchen zu elektrisch neutralen Atomen (meist Wasserstoff) verbinden konnten. Photonen reagieren aber mit neutralen Atomen viel weniger als mit geladenen Teilchen. Also hatten die Photonen plötzlich niemanden mehr, um Energie auszutauschen. Von einem zum anderen Moment – in der sogenannten Rekombinationsphase – wurde das Universum für Photonen transparent. Seitdem füllen die Photonen aus dieser Zeit das Universum aus und bilden den CMB. Er ist das schwache Nachleuchten aus der Zeit, als das Universum noch ein richtig ungemütlicher Ort war.

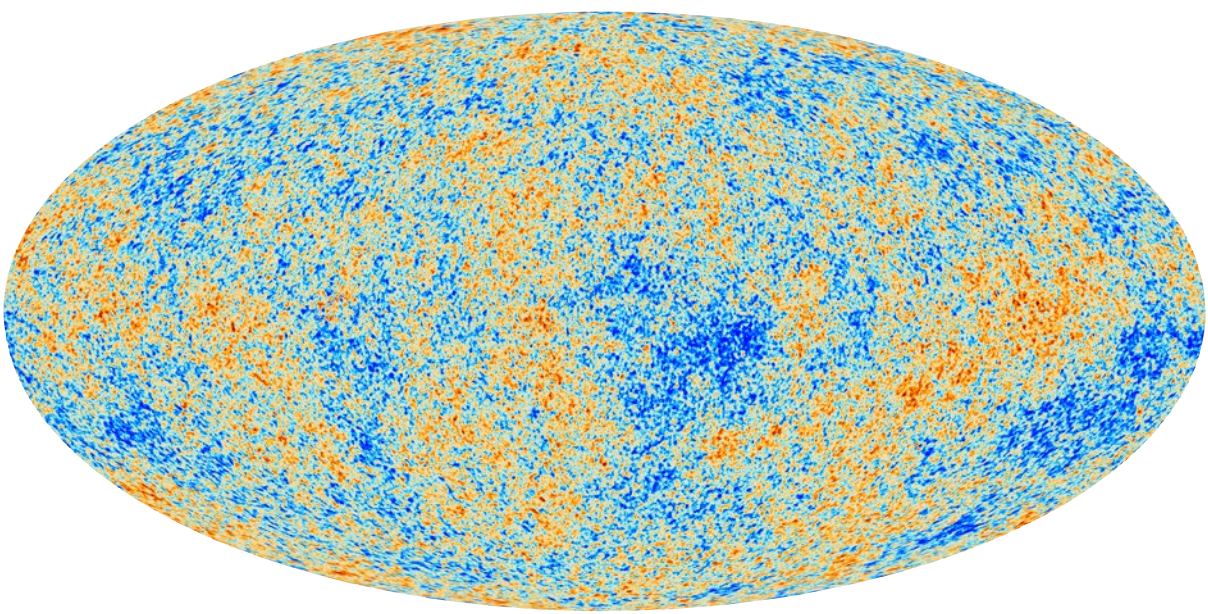
Die Materie aus dieser Zeit ist schon lange nicht mehr im thermodynamischen Gleichgewicht. Und sie hat auch viel interessante Formen angenommen, beispielsweise Sterne, Nebel, Planeten, Galaxien, Kontinente, Bäume und Erdbeereis. Aber die Photonen aus dieser Zeit sind noch immer überall und auch im thermodynamischen Gleichgewicht. Das Einzige, was mit ihnen passiert ist: Sie haben sich etwas abgekühlt. Aber das ist nicht geschehen, weil sie etwa Energie abgegeben haben. Der Grund ist vielmehr, dass sich das Universum ausgedehnt hat. Berechnungen deuten darauf hin, dass die Rekombination ca. 377.000 Jahre nach dem Urknall stattgefunden hat – vor ca. 13,4 Milliarden Jahren! Seitdem hat die Größe des Universums etwa um

↗[2]: *„Der Urknall“ auf Seite 97*
↗[3]: *„Zeitstrahl unseres Universums“ auf Seite 100*

den Faktor 1100 zugenommen. Die Energien von Photonen hängen nun mal mit ihren Wellenlängen (↗[1]) zusammen. Wenn der Raum selbst sich ausdehnt, so tun es auch die Wellenlängen der Photonen. Da eine höhere Wellenlänge einer geringeren Energie entspricht, hat sich die Temperatur seit der Rekombination um den Faktor 1100 verringert. Zu der Zeit, als das Universum transparent wurde, lag die Plasmatemperatur bei ca. 3000 Kelvin. Heute liegt sie nur noch bei einem 1100stel davon, nämlich bei etwa 2,7 Kelvin.

Das älteste Licht des Universums erzählt uns dessen Geschichte

Man kann zu Recht behaupten, dass der CMB aus den ältesten Photonen des Universums besteht. Alle anderen Photonen wurden erst nach der Rekombination erzeugt. Und da der CMB seitdem relativ ungestört war, ist er für uns ein wertvolles Relikt. Aus seinen genauen Signaturen kann man eine Menge lernen. Zum Beispiel: Der CMB sieht nicht aus allen Richtungen exakt gleich aus. Es gibt winzige Temperaturunterschiede von bis zu 0,004 Kelvin. Obwohl sich das nicht nach viel anhört, teilt uns das mit, dass das Plasma, das einst das ganze Universum ausfüllte und später die Materie bildete, aus der wir heute bestehen, kleinste Dichtefluktuationen gehabt haben muss. Bleiben Sie ungestört, vergrößern sie sich aufgrund der Gravitation im Laufe der Zeit (↗[4]). Wir können diese Fluktuationen mit unserem Wissen über die Gravitation und die Verteilung der Materie in unserem heutigen Universum abgleichen (↗[5]). Das ist eine Möglichkeit, darauf zu schließen, dass es eine Art Dunkle Materie (↗[6]) geben muss.



↗[4]: *„Die Geburt des Sonnensystems“ auf Seite 59*
↗[5]: *„Superstrukturen des Universums“ auf Seite 109*
↗[6]: *„Dunkle Materie“ auf Seite 137*
↗[7]: *„Der Urknall“ auf Seite 97*

Abbildung: ESA / Planck Collaboration



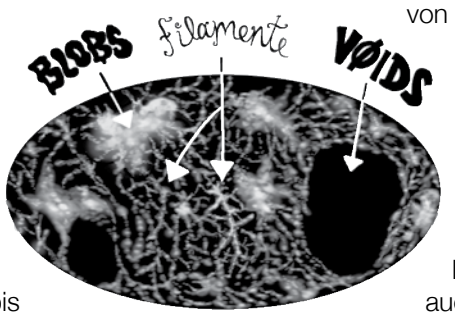
“Wie viele Räume müsstest du tapezieren, bis du das eigentliche Muster erkennst?”

Superstrukturen des Universums

Ein Netzwerk aus Sternen

Das Universum ist voller Sterne, doch wie sind sie verteilt? Hängen sie aufeinander, wie frierende Menschen am Feuer? Oder sind sie gleichmäßig verteilt, wie Rosinen im Kuchen? Die kurze Antwort: beides! Die lange Antwort ist überraschend komplex.

Unsere Sonne ist nur einer von Hunderten Milliarden Sternen in unserer Galaxie, der Milchstraße. Sie machen die meisten der leuchtenden Punkte aus, die wir am Nachthimmel sehen.



Anscheinend liegen die meisten Sterne in Galaxien. Zumindest kennen wir nur solche, denn einzelne Sterne leuchten zu schwach, um sie zu sehen. Die nächste Frage ist also: Wie sind die Galaxien verteilt? Es zeigt sich, dass sich Galaxien zu Grüppchen von einigen Zehn bis einige Hundert zusammenfinden, den sogenannten Galaxienhaufen. Viele von ihnen sind etwa 10^{14}-mal so schwer wie unsere Sonne und erstrecken sich über bis zu einige Millionen Lichtjahre. Die Milchstraße ist Teil eines Haufens, der „Lokale Gruppe“ genannt wird. Darin befinden sich auch andere alte Bekannte, so wie der Andromeda-Nebel und die große Magellansche Wolke.

Voids, Filamente und Supercluster

In den letzten Jahren gab es mehrere Versuche zu verstehen, wie sich die Galaxien und Galaxienhaufen anordnen. Das Bild auf Seite 111 zeigt die Ergebnisse von „Two Micron All Sky Survey“ – oder auch 2MASS. Jeder Punkt ist eine Galaxie. Die Farbe deutet die Rotverschiebung an, zeigt also, ob sich eine Galaxie auf uns zu (blau) oder von uns weg (rot) bewegt. Wie man sieht, sind die Galaxien und Galaxienhaufen nicht gleich verteilt.

Vielmehr ordnen sie sich in galaktischen „Superhaufen“ an, also Verdichtungen von Galaxienhaufen. Diese Superhaufen enthalten Tausende von Galaxien und sind Millionen von Lichtjahren groß. Die Superhaufen sind durch dünne, fadenartige Strukturen („Filamente“) verbunden, auf die sich die Galaxien wie Perlen auf einer Kette anordnen. Es gibt auch sogenannte Voids; große, leere Zwischenräume, die sich auch Millionen Lichtjahre weit ausbreiten können und keine, oder zumindest fast keine Galaxien enthalten.

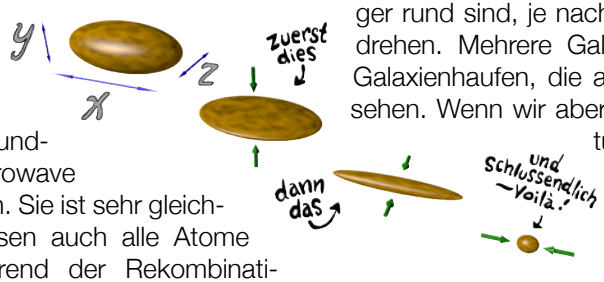
Diese netzwerkartigen Strukturen scheinen ewig weiterzugehen – zumindest füllen sie das ganze beobachtbare Universum aus, das einen Durchmesser von ca. 90 Milliarden Lichtjahren hat. Weiter entfernte Regionen können wir leider nicht sehen, da das Licht von dort seit dem Urknall noch nicht genügend Zeit hatte, zu uns zu kommen. Bei diesen riesigen Größenordnungen ist das Geflecht aus Filamenten, Superhaufen und Voids so fein, dass die Galaxiendichte mehr oder weniger überall gleich aussieht. Im großen Maßstab erscheint die

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_27

Materie im Universum also doch wieder als relativ gleichmäßig verteilt.

Falten im Kosmos

Woher kommt die Verteilung der Galaxien hin zu Superhaufen, Filamenten und Voids? Die Antwort ist einfach: Gravitation! Wir wissen sogar ziemlich genau, welche Prozesse seit dem Urknall (↗[1]) zur Bildung der Strukturen beigetragen haben. Gehen wir zurück zu dem Prozess, der „Rekombination" genannt wird. Das Universum war zu der Zeit ca. 300.000 Jahre alt (↗[2]). In dem Moment trennten sich Materie und Strahlung, und das Universum wurde lichtdurchlässig. Das Licht aus dieser Zeit können wir heute noch als kosmische Hintergrundstrahlung („cosmic microwave background", CMB) sehen. Sie ist sehr gleichmäßig verteilt. Also müssen auch alle Atome (meist Wasserstoff) während der Rekombination sehr gleichmäßig verteilt gewesen sein, denn sie waren im thermischen Gleichgewicht mit dem CMB. Wir wissen aber auch, dass es im CMB winzige Temperaturschwankungen gibt, also muss es damals auch winzige Schwankungen in der Materiedichte gegeben haben.



Durch die Gravitation zieht jedes Stück Materie alle umliegende Materie an. Wäre die gesamte Materie vollkommen gleichmäßig verteilt, würden sich alle Anziehungskräfte gegenseitig aufheben. Die Materie würde für immer absolut homogen verteilt bleiben. Aber wenn es selbst nur winzige Falten in der Materiedichte gäbe, würden diese im Laufe der Zeit wachsen. Regionen mit hoher Materiedichte würden noch mehr Materie anziehen, noch dichter werden usw. Mit der Zeit würde sich die Materie also zusammenklumpen. Das passiert schon im relativ kleinen Maßstab und führt zu Bildung von Sternen und Sonnensystemen (↗[3]), sowie im allergrößten Maßstab – dort dauert es nur viel länger.

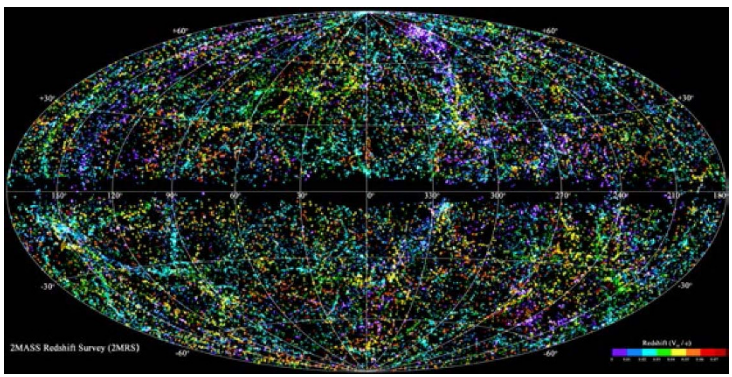
Kleine Strukturen machen große

Wenn das aber stimmt, wieso ist dann nicht die gesamte Materie verklumpt? Zumindest auf mittleren Skalen scheint sie das zu sein: Sterne kann man z.B. als runde Materieklumpen bezeichnen. Viele Sterne bilden Galaxien, die auch mehr oder weniger rund sind, je nachdem, wie schnell sie sich drehen. Mehrere Galaxien verdichten sich zu Galaxienhaufen, die auch wie Klümpchen aussehen. Wenn wir aber zu noch größeren Strukturen übergehen, dann sehen wir Filamente und Voids. Wieso bilden Superhaufen aber keine Megahaufen, und die wiederum Hyperhaufen, usw.? Die Antwort liegt in die sogenannten „hierachischen Strukturbildungen".

Um diese genauer zu verstehen, muss man sich etwas genauer damit beschäftigen, wie ein großer Haufen Materie unter seiner eigenen Anziehung kollabiert. Betrachten wir ein Ellipsoid – wie ein Ball, nur mit drei verschiedenen Durchmessern: einen von links nach rechts (x), einen von oben nach unten (y) und einen von vorne nach hinten (z). Schauen wir auf ein Beispiel, bei dem x größer als y ist, und y wiederum größer als z. Das Ellipsoid sieht also aus wie ein dicker Pfannkuchen. Angenommen, die Materiedichte im Pfannkuchen ist überall gleich, wie

↗[1]: *„Der Urknall" auf Seite 97*
↗[2]: *„Die kosmische Hintergrundstrahlung" auf Seite 105*
↗[3]: *„Die Geburt des Sonnensystems" auf Seite 59*

zieht er sich dann unter seinem eigenen Gewicht zusammen? Man könnte annehmen, dass er einfach schrumpft. Aber das ist nicht der Fall. Stattdessen passiert Folgendes: Erst kollabiert der kleinste Durchmesser. Also wird z so klein, dass wir einen flachen Pfannkuchen haben. Dann kollabiert y und wir erhalten eine dünne Wurst. Und letztlich kollabiert auch x und wir erhalten einen runden Klumpen.



Und daher sieht das Universum gerade so aus: Die winzigen Dichteschwankungen aus der Zeit der Rekombination haben sich mit der Zeit langsam verstärkt. Aber nicht irgendwie, sondern nach den Regeln der hierachischen Strukturbildung. Über große Entfernungen dauert die Kontraktion viel länger, weil die Anziehung durch die Gravitation weiter reichen muss. Im kleinen Maßstab hat sich die Materie schon in ihrer finalen Klumpenform (in Form von Sternen und Galaxien) angeordnet. Im größeren Maßstab aber ist einfach nicht genug Zeit vergangen, und wir sind noch in den Phasen der Zwischenschritte, den Filamenten (die den Würsten entsprechen) und den flachen Pfannkuchen (um die Voids herum). Im den allergrößten Maßstab haben sich die Dichteschwankungen noch nicht ausgewirkt und die Materie erscheint noch immer gleichmäßig verteilt.

Numerische Simulationen nach dem Urknall

Übrigens: Wir haben mehr als nur dieses qualitative Bild vom Entstehen der Strukturen im großen Maßstab. Heutzutage verfügen wir über sehr umfangreiche numerische Berechnungen, die diese Theorien unterstützen. Nehmen wir mal die Bolshoi-Simulation: Hier haben wir drei Stufen einer Simulation der Materieverteilung in einer Kiste mit einer Seitenlänge von einer Milliarde Lichtjahren, aufgenommen nach 500 Millionen, 6 Milliarden und 13,8 Milliarden Jahren. Anders gesagt: Vom Urknall bis heute. Und die letzte Simulation sieht tatsächlich aus wie unser heutiges Universum.



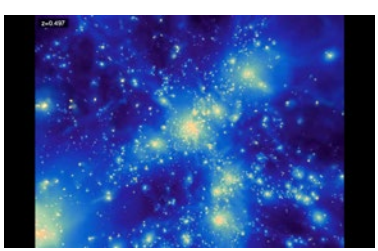




Bild oben: 2MASS, T.H. Jarrett
Bild unten: Kristin Riebe, MultiDark project



“Wir haben endlich eine noch unklassifizierte Galaxie gefunden, die unseren Aktionären gefallen sollte.”

Galaxientypen

Das Aussehen zählt

Das Universum ist voller Sterne, und unsere Sonne ist nur einer von unzähligen Feuerbällen, die die ewige Dunkelheit des Weltalls erleuchten. Diese Sterne sind aber nicht gleichmäßig verteilt, sondern bilden Galaxien (↗[1]). Jede Galaxie ist eine Ansammlung von Hunderten von Milliarden von Sternen, und wir schätzen, dass es auch Hunderte von Milliarden von Galaxien im Universum gibt. Zumindest in dem Teil, den wir beobachten können.



Die Milchstraße: eine Spiralgalaxie

Unsere Galaxie wird Milchstraße genannt, da man in einer klaren Nacht ein milchiges Band an Sternen sehen kann, das sich über den Himmel erstreckt. Die wahre Schönheit der Milchstraße eröffnet sich aber erst demjenigen, der sie sich von oben anschauen kann: Mit einem hellen, dicken Klumpen in der Mitte, zwei Balken, die sich nach außen hin erstrecken und in vier Spiralarmen Enden, die „Cygnus“, „Perseus“, „Sagittarius“ und „Scutum-Crux“ genannt werden. Da sich die Milchstraße, wie die meisten Galaxien, um sich selbst dreht, winden sich diese Arme wie Tentakel. Es gibt auch noch zwei kleinere Arme, die sich über keinen so großen Bereich erstrecken. Unser Sonnensystem liegt in einem davon, dem „Orionis-Arm“.



Das ist ein Anblick, den wir selbst wahrscheinlich nie genießen können. Die am weitesten entfernten Kameras, die wir haben, sind die Voyager-Sonden, die gerade mal unser Sonnensystem verlassen haben (↗[2]). Sie können die Milchstraße genauso gut von oben sehen, wie jemand, der um die Ecke in die nächste Straße geht, die Form des europäischen Kontinents sieht. Wenn aber noch niemand unsere Galaxie aus diesem Blickwinkel gesehen hat, woher wissen wir dann eigentlich, welche Form sie hat? Nun, zum einen gibt es sehr gute Möglichkeiten, die Entfernungen zu den Sternen in unserer Umgebung zu messen. Damit können wir einen guten Eindruck von der Form unserer Galaxie bekommen, auch wenn wir mitten drin sitzen, zumindest über den Teilbereich in unserer Nähe. Zum anderen können wir sie mit anderen Galaxien vergleichen, die wir aus großer Entfernung betrachten. Obwohl es Milliarden von ihnen gibt, fallen sie doch in nur wenige Kategorien.

Die Hubble-Sequenz: elliptisch, linsenförmig oder spiralförmig?

Es war Edwin Hubble, der eines der ersten Systeme entwickelte, mit denen man Galaxien in verschiedene Typen einteilen kann. Diese „morphologische Klassifikation“ unterscheidet drei Haupttypen: die elliptischen, die linsenförmigen und die spiralförmigen Galaxien. Wenn eine Galaxie elliptisch ist, bedeutet das im Wesentlichen, dass sie ein runder Haufen ist, ohne besondere innere

↗[1]: *„Superstrukturen des Universums“ auf Seite 109*
↗[2]: *„Die Voyager-Sonden“ auf Seite 55*

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_28



Struktur. Innerhalb einer elliptischen Galaxie sind die Sterne relativ gleichförmig verteilt. Sie erscheint glatt und ohne besondere Merkmale. Die Kennzeichnung des Typs beginnt mit einem „E“, gefolgt von einer Zahl zwischen 0 und 7. Diese Zahl zeigt an, wie elliptisch sie uns erscheint. E0 ist vollkommen kreisrund und E7 schon sehr elliptisch. Die Zahl sagt uns auch etwas über die Ausrichtung der Galaxie: Alle elliptischen Galaxien sehen mehr oder weniger wie Pfannkuchen aus. Betrachten wir sie von oben, sehen sie nach E0 aus, schauen wir von der Seite drauf, dann eher wie E7. Der am weitesten verbreitete elliptische Typ in unserem Universum ist E3.

Ursprünglich dachte Hubble, dass sich elliptische Galaxien in einem frühen Entwicklungstadium befänden. Eine Galaxie sähe demnach elliptisch aus, bevor sie sich in andere Typen umwandelt. Aber das Gegenteil scheint der Fall zu sein: Man hat herausgefunden, dass Sterne in elliptischen Galaxien meist sehr alt sind, und dass es zwischen ihnen kaum interstellare Materie gibt. Da interstellare Materie eine wichtige Rolle bei der Sternenbildung spielt (↗[3]), entstehen in ihnen kaum noch neue Sterne. Man nimmt an, dass elliptische Galaxien die ältesten sind, vielleicht sogar das Ergebnis einer Vereinigung zweier Galaxien. Wenn sich in 4-5 Milliarden Jahren die Milchstraße und der Andromeda-Nebel vereinen, wird das Ergebnis wohl auch eine elliptische Galaxie sein.



Die linsenförmigen Galaxien umfassen, wie auch die elliptischen, einen Sternenhaufen, aber zusätzlich noch eine dünne Scheibe, die ihn umgibt und in der sich einige ihrer Sterne befinden. Man könnte sie auch „Spiegelei-Galaxien“ nennen, so wie sie aussehen. Ähnlich wie die elliptischen Galaxien haben auch sie das meiste ihrer interstellaren Materie verbraucht oder verloren. Was Sternenbildung angeht, ist also nicht mehr viel los. Einige Forscher sind der Meinung, dass sie eine Zwischenstufe zwischen Spiralgalaxien und elliptischen Galaxien sind. Wenn die Scheibe im Teleskop nur schwer zu erkennen ist, kann man eine linsenförmige Galaxie auch schon mal für eine elliptische halten. Es gibt tatsächlich einige Galaxien, bei denen man sich noch darum streitet, wie man sie nun einteilen soll. Linsenförmige Galaxien bekommen die Kennung S0.

Die letzte Kategorie ist die der Spiralgalaxien. Dabei sind noch zwei wichtige Unterkategorien zu

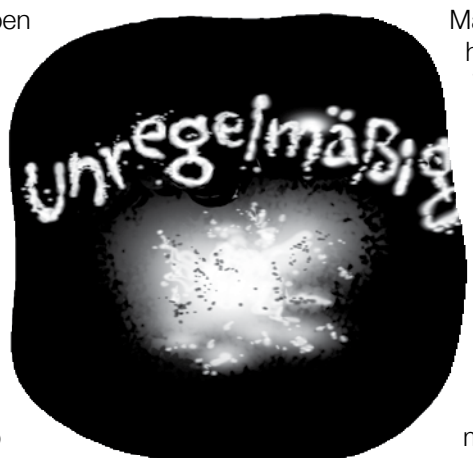
↗[3]: *„Die Geburt des Sonnensystems“ auf Seite 59*

unterscheiden: Hat die Galaxie Balken oder nicht? Diese Balken erstrecken sich aus dem inneren Haupthaufen heraus.



Spiralgalaxien haben – wie der Name schon sagt – große Spiralarme, die von ihrer Mitte ausgehen und sich um die Galaxie wickeln. Andromeda ist eine Spiralgalaxie, wie auch unsere Milchstraße. Eigentlich hat sich das Bild von einer Spiralgalaxie schon so in unseren Köpfen festgesetzt, dass man sich kaum vorstellen kann, dass es auch noch andere Typen von Galaxien im Universum gibt.

Man unterscheidet Spiralgalaxien noch weiter dadurch, wie eng die Spiralarme das Zentrum umwickeln. Solche ohne Balken haben in ihrer Kennzeichnung an zweiter Stelle einen kleinen Buchstaben: Sa Galaxien haben viele, sehr enge Spiralen, wodurch man sie nur schwer von einer S0 Galaxie unterscheiden kann. Die Sb und Sc Typen besitzen weniger und weiter ausgestreckte Arme. Sd Galaxien haben sehr kräftige Arme, die sogar heller als das Zentrum sind.



Und die mit Balken? Die bekommen einfach nur ein „B“ in ihren Namen, also SBa, SBb usw. Übrigens: unsere Milchstraße ist höchstwahrscheinlich eine Galaxie vom Typ SBc!

Immer dann, wenn die Menschen sich eine Klassifizierung ausdenken, um Ordnung in das Chaos zu bringen, das die Natur uns liefert, gibt es eine Sonderkategorie: die „Passt halt sonst nirgends rein“-Kategorie! Und natürlich existiert eine solche auch in der Morphologie der Galaxien. Galaxien, die in diese Kategorie fallen, nennt man „irregulär“. Diese werden tatsächlich noch weiter unterteilt – es gibt die Typen „Irregulär 1“ und „Irregulär 2“ , je nachdem, ob sie vollkommen asymmetrisch sind (Irr 1) oder wenigstens ein paar geordnete Strukturen enthalten (Irr 2).

Wie die meisten Klassifikationen beruhen auch diese hauptsächlich auf Beobachtungen. Man weiß nur wenig darüber, weshalb Galaxien einen bestimmten Typ und keinen anderen haben. Übrigens: Du kannst Astronomen helfen, die vielen Galaxien zu klassifizieren! Da es so viele Bilder von Galaxien gibt, aber nur so wenige Astronomen, würden sie mit der Einteilung niemals fertig werden. Sie brauchen deine Hilfe! Unter ↗[4] werden dir verschiedene Bilder von Galaxien gezeigt, und du musst entscheiden: Ist das jetzt eher ein Fall von SBa, oder eher S0?

↗[4]: http://www.galaxyzoo.org


Das ZWILLINGSPARADOXON
MAXWELL UND SEIN ANTIMATERIE-ZWILLING MAXWELL2 VERABSCHIEDEN SICH VONEINANDER:
Ich gehe auf eine interstellare reise!
Der führt doch was im Schilde...
NACH EINIGEN MONATEN KEHRT MAXWELL2 ZUR ERDE ZURÜCK —SEIN ZWILLING IST INZWISCHEN UM JAHRE GEALTERT...
Ich erinnere mich nicht mehr ...warum bin ich gealtert, und du nicht?
nun, alter Mann...
"...MEIN SCHIFF ENTFERNTE SICH BEINAHE MIT LICHTGESCHWINDIGKEIT VON DER ERDE. WEIL ZEIT BEI HOHEN GESCHWINDIGKEITEN LANGSAMER ZU VERLAUFEN SCHEINT, BIN ICH NICHT SO SCHNELL ALT GEWORDEN WIE DU."
AH, ich erinnere mich, die Spezielle Relativitätstheorie... Zeitdilatation
Moment— das ist ein PARADOXON!
"...VON DEINEM BLICKWINKEL AUS HAT SICH DIE ERDE BEINAHE MIT LICHTGESCHWINDIGKEIT VON DIR ENTFERNT. DESWEGEN HÄTTEST DU DEN EINDRUCK GEHABT HABEN MÜSSEN, DASS DER MEINE ZEIT AUF ERDE LANGSAMER VERLÄUFT."
ERDE ENTFERNT SICH
Warum bist Du dann nicht der ältere Zwilling?
Du vergisst, alter Mann
"...DIE SPEZIELLE RELATIVITÄTSTHEORIE GILT NUR FÜR INERTIALE BEOBACHTER. ALS ICH UMGEKEHRT BIN, WURDE ICH BESCHLEUNIGT, UND WAR NICHT MEHR IN GLEICHFÖRMIGER BEWEGUNG. ALSO WAR ICH KEIN INERTIALER BEOBACHTER MEHR."
Von meinem Blickwinkel aus hat die Reise nur wenige Monate gedauert.
Was auch immer. Schön dass Du da bist. Ich brauch eine neue Bettpfanne.

Relativität von Raum und Zeit

Wieso Licht nicht schneller wird, wenn man es schiebt

Oft hört man die Floskel „Alles ist relativ“, die ausdrücken soll, was Albert Einsteins Relativitätstheorie beschreibt. Das stimmt so aber nicht: Wäre alles relativ, gäbe es ja nichts mehr, zu dem es relativ sein könnte. Vielmehr besagt die Relativitätstheorie, dass einige Dinge, die wir für absolut gehalten haben, in Wahrheit relativ sind – so wie Raum und Zeit. Auf der anderen Seite besagt sie aber auch, dass einige Dinge, die wir für relativ hielten, in Wirklichkeit absolut sind – so wie die Lichtgeschwindigkeit.

Newtons Raum und Zeit waren absolut

Als Einstein 1905 seine Relativitätstheorie veröffentlichte, kam sie sehr überraschend. Mehr als 300 Jahre lang hatte die Sicht von Sir Isaac Newton unser Bild von Raum, Zeit und Materie geprägt. Und das sah so aus: Raum und Zeit waren absolut und unveränderlich. Das bedeutet, dass man sich den Raum beispielsweise als eine ewige „Bühne“ vorstellen konnte, auf der die gesamte Materie „spielte“, also der Ort, wo Teilchen sich bewegten und miteinander interagierten. Vor allem war der Raum völlig anders als Materie und davon unabhängig.



Noch grundlegender war die Absolutheit der Zeit. Man stellte sich die Zeit als einen Fluss mit konstanter Geschwindigkeit vor (etwa „eine Sekunde pro Sekunde“), der überall gleich schnell vorüberzieht, egal, wer sie wahrnimmt. Daher konnte man sagen, dass verschiedene Ereignisse „gleichzeitig“ stattfinden. Zwei Ereignisse konnten also an verschiedenen Orten, aber zur gleichen Zeit stattfinden.

All das klingt heute noch so sinnvoll wie damals im 17. Jahrhundert. Wir haben immer noch das Gefühl, dass „Was passiert jetzt gerade auf der anderen Seite der Erde?“ eine sinnvolle Frage ist, selbst wenn man sich etwas anstrengen muss, um die Antwort zu erhalten. Leider aber funktioniert unser Universum so nicht: Strenggenommen ergibt die Frage überhaupt keinen Sinn! Und der einzige Grund, weshalb wir das nicht merken, liegt darin, dass Licht so unglaublich schnell ist, verglichen mit allem anderen, was auf der Erde so los ist – in einer Sekunde kann Licht 7,5 mal die Erde umrunden!

Für uns ist Geschwindigkeit relativ – aber nicht für das Licht!

Was soll das bedeuten? Fangen wir mal mit der Beobachtung an, dass Licht für alle Beobachter immer gleich schnell ist. Verglichen mit den Erfahrungen aus unseren Alltag ist das vollkommen ungewöhnlich! Geschwindigkeiten, die wir wahrnehmen, sind relativ: Stell dir vor, du sitzt im Auto und fährst schnell über die Autobahn. Aus deiner Sicht scheint ein Auto, das dich überholt, nur langsam an dir vorbei zu kriechen. Für jemanden, der sich das Ganze von der Straßenseite anschaut, ist das Auto aber ziemlich schnell. Die Geschwindigkeit des zweiten Autos hängt also vom Beobachter ab. Das ist auch der Grund, weshalb ein Speerwerfer etwas Anlauf nimmt, bevor er den Speer wirft. Aus seiner Sicht ist die Geschwindig-

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_29

keit des Speers die normale Abwurfgeschwindigkeit. Aber aus Sicht des Schiedsrichters ist die Geschwindigkeit des Speers die Abwurfsgeschwindigkeit plus die Anlaufgeschwindigkeit des Athleten! Und da der Schiedsrichter entscheidet, will der Athlet für ihn natürlich die Speergeschwindigkeit maximieren.

Beim Licht sieht alles anders aus!

Um der Argumentation zu folgen, nehmen wir mal an, der Athlet würde keinen Speer werfen, sondern beim Laufen eine Taschenlampe anschalten (das wären superlangweilige Olympische Spiele, aber das soll uns erstmal egal sein). Die Geschwindigkeit des Lichts wäre dann aber aus Sicht des Atheleten und des Schiedrichters dieselbe. Und das obwohl der eine rennt und der andere stehen bleibt. Hätten beide ein Messgerät, um die Geschwindigkeit der Lichtteilchen (Photonen) zu messen, kämen beide auf 299.792 km/s. Wie kann das sein? Macht nicht vielleicht einer der beiden einen Fehler? Ist ein Speerwurf nicht das gleiche wie ein Photonenwurf? Es muss doch wohl möglich sein, die Photonen noch etwas schneller zu machen, wenn man sich mit der Taschenlampe bewegt, oder?



Nein, eben nicht, und zwar aus folgendem Grund: Die Lichtgeschwindigkeit ist absolut, weil die Zeit relativ ist! Genauer gesagt ist das Verständnis von „gleichzeitig“ für den Schiedsrichter und den Athleten unterschiedlich. Betrachten wir mal eine etwas, nun ja, alternative Art, die Geschwindigkeit von Licht zu messen: Nehmen wir an, der Schiedsrichter ist ein Stückchen vom Athleten entfernt (sagen wir, 100 m), wenn dieser die Taschenlampe anschaltet. Er hält sie in Richtung des Schiedsrichters, der eine (sehr, sehr genaue) Stoppuhr trägt. Da der Athlet auf Nummer sicher gehen will, hat auch er eine. Die beiden einigen sich auf folgendes: Der Athlet rennt auf den Schiedsrichter zu und schaltet, sobald er die 100-m-Linie überquert, seine Taschenlampe an und startet die Stoppuhr. Zur gleichen Zeit startet der Schiedsrichter seine. Sobald die Photonen beim Schiedsrichter ankommen, stoppt dieser seine Uhr, und der Athlet tut dies zur gleichen Zeit ebenfalls.

Normalerweise würde man folgendes erwarten: Um die Geschwindigkeit der Lichtteilchen zu bestimmen, muss man die Strecke, die die Photonen zurücklegten, durch die gemessene Zeit teilen. Da beide die Uhr zur gleichen Zeit gestartet haben, haben beide die gleiche Zeit gemessen. Aber für den Schiedsrichter hat das Licht 100 m zurückgelegt, für den Athleten jedoch etwas weniger. Das liegt daran, dass aus Sicht des Athleten der Schiedsrichter auf ihn zugelaufen ist und damit die Entfernung effektiv etwas verkürzt hat. Die Geschwindigkeit des Lichts sollte also aus Sicht des Schiedsrichters etwas größer sein als aus Sicht des Athleten.

Aber so läuft das Ganze nicht! Solange man sich mit Geschwindigkeiten bewegt, die weiter unterhalb der von Licht liegen, kann man so denken. Aber sobald die Dinge wirklich schnell werden, muss man die Relativität von Raum und Zeit berücksichtigen!

Ungleiche Gleichzeitigkeit!

Und das hier geschieht in Wirklichkeit: Schiedsrichter und Athlet werden sich uneinig sein, wann genau ihre Uhren gestartet werden müssen! Sie können es einfach nicht „gleichzeitig“ tun, da dieser spezielle Moment für beide verschieden ist. Aus

➚[1]: *„Licht“ auf Seite 7*

Sicht des Schiedsrichters starten beide ihre Uhren im gleichen Moment, aber der Athlet stoppt seine etwas früher. Für ihn hat also der Athlet eine kürzere Strecke gemessen, aber auch eine kürzere Zeit.

Aus Sicht des Athleten jedoch haben beide ihre Uhren im gleichen Moment gestoppt, aber der Schiedsrichter scheint seine Uhr zu früh gestartet zu haben. Also hat der Schiedsrichter aus Sicht des Athleten sowohl eine längere Strecke, als auch eine längere Zeit gemessen. Wenn sie sich dann beide treffen und ihre Verhältnisse von Strecke und Zeit vergleichen, kommen sie auf das gleiche Ergebnis. Für beide ist das Licht gleich schnell, da die Momente der Gleichzeitigkeit verschieden sind!



An dieser Stelle ist es wichtig zu betonen, dass keiner der beiden richtig oder falsch liegt. Und das ist die Krux der Relativitätstheorie: Ein Zeitabschnitt hängt vom Beobachter ab! Genauer gesagt: Er hängt davon ab, wie genau sich zwei Beobachter relativ zueinander bewegen. Übrigens: Im echten Leben wird dieser Effekt immer viel kleiner als ein Sekundenbruchteil sein – viel zu klein, um ihn wahrzunehmen oder mit herkömmlichen Stoppuhren zu messen. Das liegt daran, dass Orte, an denen wir die Gleichzeitigkeit wahrnehmen wollen, nur 100 m voneinander entfernt sind (in unserem Fall „Athlet schaltet Lampe an“ und „Schiedsrichter startet die Uhr“). Wird diese Entfernung aber größer, so werden es auch die Zeitunterschiede. Es ergibt also keinen Sinn zu fragen „Was passiert gerade in der Andromeda-Galaxie?“, denn sie ist unglaublich weit von uns entfernt, so dass zwei Menschen, die langsam aneinander vorbeilaufen, mit ihrer Formulierung von „gerade jetzt in der Andromeda-Galaxie“ schon einige Wochen auseinander liegen würden! Dieser Effekt hat bemerkenswerte Konsequenzen. Der erste und wohl bekannteste ist, dass man nicht schneller als Licht sein kann. Die Lichtgeschwindigkeit ist eine magische Barriere, die nichts überschreiten kann (es sei denn … ↗[2]). Insbesondere kann man Licht nicht schneller machen, wenn man es anschiebt. Andersrum wird man es aber auch nicht langsamer machen können – es ist einfach immer gleich schnell. Relativität beeinflusst auch alle genauen Zeit- und Längenmessungen. Es scheint z.B. so, als ob sich schnell bewegende Uhren langsamer gehen würden. Diesen Effekt nennt man „Zeitdilatation“, und er ist für viele Dinge sehr wichtig, vor allem GPS Navigationssysteme (du kannst auch mal im Internet nach dem Zwillingsparadoxon suchen). GPS-Satelliten umrunden die Erde zweimal täglich und brauchen sehr genaue Uhren, um zu funktionieren. So genau, dass die Effekte der Relativität mit berücksichtigt werden müssen. Ansonsten würden sie falsche Informationen zu ihrem Standort liefern: der Fehler würde sogar mit der Zeit auf einige Hundert Meter pro Tag anwachsen. Wenn du also das nächste mal dein Smartphone benutzt, um den nächst gelegenen Starbucks zu finden, denk daran: Ohne Relativitätstheorie würdest du daran vorbei laufen!

↗[2]: *„Warp-Antrieb“ auf Seite 299*


FREIZEITPARK der ALLGEMEINEN RELATIVITÄTSTHEORIE
Trete ein, WENN DU DICH TRAUST, IN DIE HALLE DER RAUMZEIT
EINTRITT NUR, WER MASSE BESITZT
VERRÜCKT!
SPRINGEN
AUTHENTISCH!
ES IST WIE EIN GUMMITUCH – ES DEHNT UND KRÜMMT SICH!
BESCHLEUNIGT DIE HALLE NACH OBEN ODER FALLEN WIR RUNTER?
SCHAU: DU WIRST VON MIR ANGEZOGEN!
MEINE UHR, SIE GEHT NACH! EINE GROßE MASSE MUSS IN DER NÄH...
PASS AUF!
OH NEIN...
SPRING

Die Allgemeine Relativitätstheorie

Gekrümmter Raum und verbogene Zeit

Im Jahr 1905 hat Albert Einsteins Relativitätstheorie (↗[1]) die Welt der Physik erschüttert. Mit seinen Gleichungen hat Einstein viele der Prinzipien, die Sir Isaac Newton ungefähr zwei Jahrhunderte zuvor formulierte, über Bord geworfen. Diese Prinzipien – allen voran die über Raum und Zeit – hatten alle lieb gewonnen, von den Physikern bis zu den Philosophen. Die Menschen gewöhnten sich also nur langsam an die neue Weltanschauung.

Überarbeitete Gravitation

Aber Einstein machte weiter. Er dachte auch über andere Gesetze nach, die Newton formuliert hatte: besonders dasjenige über die Gravitation faszinierte ihn. Das Newtonsche Gravitationsgesetz hatte seit Jahrhunderten Bestand, und es konnte die Bewegung von Planeten, Monden, Sternen und auch Äpfeln, die einem auf den Kopf fallen, erklären. Für alles, von der Berechnung der Position des Jupiter bis hin zu den Flugbahnen von Projektilen, lieferte das Newtonsche Gravitationsgesetz die richtigen Antworten, und das mit einer erstaunlichen Präzision. Einstein fragte sich: Wie würde dieses Gesetz wohl aussehen, wenn man die Relativität mit einbezieht? Die Gesetze des Elektromagnetismus, die James Clerk Maxwell ein paar Jahrzehnte zuvor verfasst hatte, passten gut in das Schema der Relativität. Also sollte etwas Ähnliches sicher auch für die Gravitation möglich sein, oder?



Überraschenderweise zeigte sich, dass es ziemlich schwierig war, Gravitation und Relativität miteinander zu verknüpfen. Ein Grund dafür war, dass laut Newton die Gravitation instantan (augenblicklich) selbst über größte Entfernungen wirkte. Wäre die Sonne plötzlich weg, würden wir das Verschwinden ihrer Anziehungskraft sofort spüren, behaupteten die Newtonschen Gesetze. Aber wie sollte das mit der Relativität vereinbar sein, bei der kein Einfluss schneller als Licht sein konnte (und der Begriff „augenblicklich“ ohnehin höchst problematisch war)?

War es auch nicht. Stattdessen musste Einstein, damit die Gravitation in die Prinzipien der Relativität passte, das Konzept von Raum und Zeit radikal überdenken – schon wieder!

Sein erster Gedanke ging so: Alle Körper fallen gleich, egal wie schwer sie sind. Die Gravitation an einem bestimmten Punkt sollte also keine ominöse Kraft, sondern vielmehr eine Eigenschaft des Raumes (und der Zeit) an diesem Ort sein. Er brauchte etwas Zeit (und die Hilfe seiner Frau) um die Details auszuarbeiten, aber zehn Jahre später, im Jahr 1915, veröffentlichte er seine „Allgemeine Relativitätstheorie“. Seine vorherige Relativitätstheorie wurde seitdem „spezielle Relativitätstheorie“ genannt. Das liegt daran, dass sie nur den speziellen Fall betrachtete, bei dem die gravitative Anziehung zwischen Objekten ignoriert werden konnte.

Gravitation oder Beschleunigung?

Die Theorie basiert auf dem sogenannten Äquivalenzprinzip. Es besagt, dass man nicht unterschei-

↗[1]: *„Relativität von Raum und Zeit“ auf Seite 117*

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_30

den kann, ob die Gravitationskraft auf einen wirkt, oder ob man sich in einem beschleunigten Bezugssystem befindet. Wenn du also beispielsweise in einem Space Shuttle stehst und merkst, wie du nach unten gezogen wirst, dann wüsstest du nicht, ob du auf der Erde stehst und deren Gravitationskraft spürst oder ob du gerade mitten im All nach oben beschleunigt wirst. Du müsstest schon rausschauen, um das zu entscheiden. Das Gefühl wäre genau das gleiche. Es wäre egal, ob die Ursache eine gravitative Anziehung der Erde oder ein Herunterdrücken durch das Hochziehen des Shuttles wäre.

Das Ganze geht auch ohne Gravitation: Wenn du dich schwerelos fühlst, kann das daran liegen, dass du dich irgendwo oben im All befindest und daher frei herumschwebst (hoffentlich im Raumanzug), oder ob du auf der Erde bist und gerade herunterfällst. Beides würde sich für dich genau gleich anfühlen. Zumindest, bis du am Boden aufschlägst.



Bei der Speziellen Relativitätstheorie wurden die drei Dimensionen des Raumes und die Dimension der Zeit nicht als zwei unterschiedliche Vorstellungen betrachtet, sondern als unzertrennliche Teile eines großen Ganzen: der vierdimensionalen Raumzeit. In ihrer Version von 1905 war die Raumzeit immer flach, wie ein Stück vierdimensionales Papier. Das bedeutet, dass zwei parallele Linien sich nur im Unendlichen treffen, sich die Summe aller Winkel eines Dreiecks immer zu 180° addiert und dass die Zeit an allen Orten gleich schnell vergeht.

Bei der Allgemeinen Relativitätstheorie ist das anders. Einstein erkannte, dass durch die Anwesenheit schwerer Massen die Raumzeit nicht länger flach, sondern gekrümmt sein muss. So wie eine Bleikugel eine Delle in ein Gummituch drücken würde, so drücken schwere Massen eine Delle in die Raumzeit. Alles, was eine Masse hat, oder zumindest eine Energiedichte – wie z.B. ein Lichtstrahl – verändert den Raum um sich herum.



Auf der anderen Seite erscheinen Objekte, die sich durch eine gekrümmte Raumzeit bewegen, so als würden sie durch eine gravitative Anziehungskraft beeinflusst. Aber dennoch: Es gibt keine Kraft, die auf Objekte in einer bestimmten Entfernung wirkt. Es ist vielmehr die gekrümmte Geometrie von Raum und Zeit, die die beiden aufeinander zu treibt.

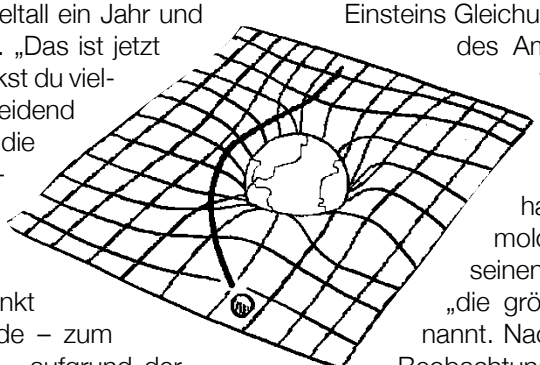
Hier eine vereinfachte Version von dem, was passiert, wobei in diesem Fall nur die Krümmung des Raumes eine Rolle spielt, nicht aber die der Zeit: Stell dir zwei Schiffe im Atlantik vor, beide auf dem Äquator und eines etwas weiter östlich als das andere. Nun fahren beide Schiffe nach Norden. Sie schauen auf ihre Kompasse, drehen ihre Schiffe genau nach Norden und starten die Motoren. Zunächst bleibt ihr Ab-

stand gleich, aber je weiter nördlich die beiden kommen, desto näher kommen sie sich auch. Wäre Grönland nicht im Weg, würden sie sich am Nordpol treffen. Es sieht so aus, als würden die beiden Schiffe sich anziehen, obwohl beide Schiffskapitäne schwören würden, dass sie einfach nur geradeaus gefahren sind! Das liegt daran, dass die Oberfläche der Erde nicht flach ist, sondern gekrümmt. Auf eine ähnliche Weise sorgt die Krümmung von Raum und Zeit dafür, dass sich massive Objekte gravitativ anziehen.



Einfluss der Gravitation auf die Zeit

Es gibt einige merkwürdige Konsequenzen der Allgemeinen Relativitätstheorie: Eine der seltsamsten ist die gravitative Zeitdilatation (↗[1]). In der Nähe von sehr schweren Massen vergeht die Zeit langsamer! Auf der Erde ist der Effekt ziemlich klein, aber dennoch messbar, wenn man sehr genaue Uhren hat. Wenn also hier unten auf der Erde ein Jahr vergeht, würde fern von uns im Weltall ein Jahr und 0,02 Sekunden vergehen. „Das ist jetzt auch nicht viel mehr", denkst du vielleicht. Aber es ist entscheidend für Weltraummissionen, die mit unglaublich genauer zeitlicher Präzision durchgeführt werden müssen! In 0,02 Sekunden bewegt sich ein Punkt auf dem Äquator der Erde – zum Beispiel eine Landebahn – aufgrund der Erdrotation um 10 Meter. Es wäre schon peinlich, wenn jemand die Landung eines Space Shuttles versaut, nur weil er die Allgemeine Relativitätstheorie nicht berücksichtigt hat.



Für die meisten Phänomene in unserem Sonnensystem reichen die Newtonschen Gesetze eigentlich völlig aus. Eine Ausnahme ist die Tatsache, dass sich das Perihel (der Punkt, an dem man der Sonne am nächsten ist) von Merkurs Umlaufbahn über die Jahre ein klein wenig verschiebt. Den Großteil dieser Verschiebung kann man durch die Gravitation der benachbarten Planeten erklären, aber es bleibt ein kleiner Teil, den man nur mit Hilfe der Allgemeinen Relativitätstheorie erklären kann. Das war eine der ersten Bestätigungen für Einsteins neue Theorie. Die erstmalige Beobachtung von Gravitationslinsen (↗[2]) war ein anderer.

Eine der gravierendsten Folgen ist jedoch die Tatsache, dass das Universum nicht statisch und unveränderlich sein kann, sondern sich entweder zusammenziehen oder ausdehnen muss (↗[3]). Zumindest, so lange man nicht einen kleinen Zusatzfaktor, „kosmologische Konstante" genannt, in Einsteins Gleichungen einbaut. Die Beobachtung des Amerikanischen Astronomen Edwin Hubble im Jahr 1929, dass sich das Universum tatsächlich ausdehnt, hat diese Frage eindeutig beantwortet. Einstein hat dann auch prompt die kosmologische Konstante wieder aus seinen Gleichungen entfernt und sie „die größte Eselei seines Lebens" genannt. Nach 1990 jedoch zeigten genaue Beobachtungen von Astronomen, dass man die kosmologische Konstante vielleicht doch wieder zu den Gleichungen hinzufügen müsste, und dass die Ausdehnung des Universums sogar immer schneller wird (↗[4])!

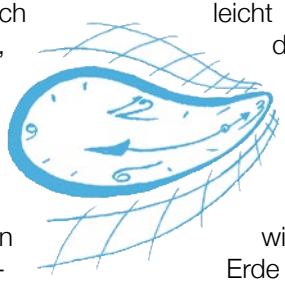
↗[2]: *„Gravitationslinsen" auf Seite 129*
↗[3]: *„Der Urknall" auf Seite 97*
↗[4]: *„Dunkle Energie" auf Seite 141*


RAUMZEIT
INSTITUT
KURVEN- UND
KRÜMMUNGSREICHE
STRECKE

Gekrümmte Raumzeit

Eine Frage des Blickwinkels

Vor mehr als hundert Jahren veröffentlichte Einstein seine Allgemeine Relativitätstheorie (↗[1]). „Allgemein“ bedeutet, dass man mit ihr noch viel allgemeinere Fälle behandeln kann, als mit seiner Speziellen Relativitätstheorie (↗[2]).



Die Spezielle Relativitätstheorie behandelt die Bewegung von einzelnen, nicht allzu schweren Teilchen durch den leeren Raum. Sie besagt insbesondere, dass sich nichts schneller als Licht bewegen kann. Die Allgemeine Relativitätstheorie kann hingegen auch beschreiben, wie sich verschiedene Objekte über die Gravitationskraft anziehen. Es war Einsteins große Leistung, zu erkennen, dass man die Gravitation nicht einfach auf die Spezielle Relativitätstheorie draufklatschen konnte, sondern sie stattdessen komplett überarbeiten musste! Insbesondere musste das Konzept vom unveränderlichen Raum und absoluter Zeit aufgegeben werden. Und all das, 250 Jahre nachdem Newton diese Vorstellungen im Unterbewusstsein zahlreicher Wissenschaftler festgeklopft hatte. Die Allgemeine Relativitätstheorie besagt, das ein großer Haufen Materie – etwa ein Stern – Raum und Zeit krümmt. Wenn sich nun ein anderes Objekt – beispielsweise ein Planet – in dieser gekrümmten Raumzeit bewegt, wird seine Bahn so beeinflusst, dass es aussieht, als würde eine Anziehung zwischen den beiden bestehen. Aber was bedeutet diese Krümmung eigentlich? Wie sieht ein gekrümmter Raum denn aus? Und wie merkt man überhaupt, dass man sich in einem gekrümmten Raum befindet? Und was soll eigentlich eine gekrümmte Zeit sein? All das lässt sich leider nicht so leicht beantworten. Zufälligerweise wurden all die mathematischen Werkzeuge, die man zur Beschreibung von gekrümmten Räumen benötigt, kurz bevor Einstein sie für seine Formeln brauchte, entwickelt. Der deutsche Mathematiker Carl Friedrich Gauß hatte sich überlegt, wie man die gekrümmten Oberflächen der Erde beschreiben konnte (was er tun musste, da er als Landvermesser arbeitete). Später hat sein Student Bernhard Riemann die vollständige mathematische Beschreibung von gekrümmten Räumen mit beliebiger Dimension (nicht zur zweidimensionaler Oberflächen) entwickelt.

Zweidimensionale Krümmung

Fangen wir mal mit zweidimensionalen Oberflächen an. Schon für die Griechen war die Geometrie solcher Oberflächen spannend: Für sie war die Wissenschaft von Linien, Winkeln, Kreisen und Dreiecken die Königsdisziplin der Mathematik. Einer von ihnen, Euklid, fragte sich: „Was ist denn nun eigentlich eine Ebene?“ Er formulierte seine berühmten Postulate, wobei die ersten vier davon beschreiben, was eine Ebene ausmacht: 1.) Eine Ebene besteht aus Punkten, von denen man jeweils zwei einer geraden Strecke verbinden kann. 2.) Jede Strecke kann ins Unendliche zu einer Geraden erweitert werden. 3.) An jede Strecke kann man einen Kreis zeichnen, so dass ein Ende der Strecke in der Kreismitte liegt und das andere auf der Kreis-

↗[1]: *„Die Allgemeine Relativitätstheorie“ auf Seite 121*
↗[2]: *„Relativität von Raum und Zeit“ auf Seite 117*

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_31

linie. 4.) Alle rechten Winkel sind überall gleich (die Griechen nannten das „kongruent“).

Euklids Axiome

Allein mit diesen vier Regeln kann man schon eine Menge anfangen. Doch es gibt ein Problem: Die eigentlich bekannte Tatsache, dass die Summe der Winkel in einem Dreieck immer 180° ist, konnte er nur mit diesen vier Regeln nicht beweisen. Dazu brauchte es eine fünfte: 5.) Hat man zwei Linien, die eine dritte so schneiden, dass die Summe der Innenwinkel weniger als zwei rechte Winkel groß ist, müssen diese Linien sich schneiden, wenn man sie nur weit genug verlängert.

Klingt jetzt nicht besonders schön, oder? Auch Euklid kam sie etwas kompliziert vor und daher entschloss er sich – und Generationen von Mathematikern nach ihm – zu zeigen, dass sie aus den ersten vier folgt. Dann könnte man sie sich ja schenken. Aber hinbekommen hat das niemand. Heute kennen wir die Gründe dafür: Es gibt Räume, in denen man die ersten vier Regeln anwenden kann, aber nicht die fünfte! Man nennt sie „nicht-Euklidsche Räume“. Sie unterscheiden sich dadurch, dass sich in ihnen die Winkel eines Dreiecks nicht zu 180° (oder „zwei rechten Winkeln, wie Euklid schrieb) addieren müssen. Der Grund: diese Räume sind gekrümmt!

Dreiecke und ihre Winkel: ein Indikator für die Krümmung

Das ist tatsächlich auch das Kernstück von Krümmungen im Allgemeinen: Die Winkel der Dreiecke addieren sich nicht zu 180°. Auf folgende Art kannst du beispielsweise zeigen, dass die Erdoberfläche gekrümmt ist: Wenn du in Berlin stehst, miss den Winkel zwischen der Richtung nach Sydney und der nach Buenos Aires. Anschließend fliegst du nach Buenos Aires (oder fragst jemanden, der dort wohnt), um das gleiche mit den Richtungen nach Berlin und Sydney zu tun. Und das Gleiche dann nochmal mit den Richtungen nach Berlin und Buenos Aires von Sydney aus. Wenn du die Winkel nun addierst, erhältst du ca. 487°! Das liegt daran, dass die Ecken deines Dreiecks in Berlin, Buenos Aires und Sydney auf der Erdoberfläche liegen – und die ist gekrümmt! Genauer gesagt ist sie positiv gekrümmt, daher ist der Winkel größer als 180°. Es gibt auch negativ gekrümmte Räume, in denen man weniger als 180° erhält.

Nun ist die Erdoberfläche zweidimensional. Daher braucht man zwei Koordinaten (Höhen- und Breitengrad) um einen Punkt auf ihr zu beschreiben. Unsere Raumzeit ist aber vierdimensional: Man braucht vier Koordinaten, um ein Ereignis zu beschreiben. So kann man z.B. Höhen- und Breitengrad, sowie die Höhe über dem Boden nehmen, um zu sagen, wo etwas stattfindet (drei Zahlen) und dann noch die Uhrzeit (eine Zahl) um zu sagen, wann.

Krümmung in vier Dimensionen: so viele Winkel!

Die Krümmung einer vierdimensionalen Raumzeit zu beschreiben ist viel komplizierter, als einfach von positiver und negativer Krümmung zu sprechen. Das liegt daran, dass es viele Möglichkeiten gibt, ein zweidimensionales Dreieck in einem vierdimensionalen Raum anzuordnen. Daher werden die Formeln in höherdimensionaler Geometrie auch schnell etwas unhandlich. Es gibt eine Frage, die immer wieder gerne gestellt wird, wenn man über die Allgemeine Relativitätstheorie spricht: „Wenn die

Raumzeit gekrümmt ist, worin ist sie dann eigentlich gekrümmt?“. Die zweidimensionale Oberfläche der Erde ist positiv gekrümmt, aber die Erde selbst liegt in einem dreidimensionalen Raum. Könnte man den benutzen, gäbe es keine Krümmung mehr: Würdest du nicht den Winkel zwischen den Strecken, die du sonst mit dem Boot zurücklegen würdest, nehmen, sondern stattdessen Löcher durch die Erde bohren, um dir den direkten Weg nach Sydney, Berlin oder Buenos Aires zu suchen, hättest du ein Dreieck im dreidimensionalen Raum. Und die Winkel würden sich wiederum zu 180° addieren. Die Krümmung der Erdoberfläche wäre also nur „zufällig“, da die Erde Teil eines dreidimensionalen Raumes ist. Wenn die vierdimensionale Raumzeit aber gekrümmt ist, in was ist sie dann gekrümmt?

Worin ist Raumzeit gekrümmt?

Nun: in nichts! Es gibt einen wichtigen Punkt zum Thema Krümmung: es gibt sie in zwei Varianten. Eine nennt sich „extrinsische Krümmung“. Ein Raum hat eine extrinsische Krümmung, weil er in einen höherdimensionalen Raum eingebettet ist, so wie die zweidimensionale Erdoberfläche in den dreidimensionalen Raum. Die andere nennt sich „intrinsische“ Krümmung, und diese ist eine Eigenschaft der Geometrie des Raumes selbst.



Bedauerlicherweise sind bei einer zweidimensionalen Oberfläche intrinsische und extrinsische Krümmung genau dasselbe: Es gibt keine intrinsische Krümmung, die man „erzeugen“ kann, indem man die Oberfläche in einen dreidimensionalen Raum steckt. Daher ist es so schwierig, den Unterschied zwischen den beiden Krümmungen am Beispiel der Erdoberfläche zu erklären. Aber es gibt aber auch einen – und die vierdimensionale Krümmung ist tatsächlich intrinsisch.

Intrinsische und extrinsische Krümmung

Eine Möglichkeit, sich den Unterschied zwischen einer intrinsischen und extrinsischen Krümmung vorzustellen, besteht darin, sich eine Kreislinie auf einer flachen Ebene vorzustellen: Sie ist eindimensional. Solche Objekte können keine intrinsische Krümmung haben (kurz: weil man in sie keine Dreiecke legen kann, um Winkel zu messen). Insbesondere weiß ein eindimensionaler Beobachter nur, dass er sich entweder vorwärts oder rückwärts bewegt. Er kann nicht erkennen, dass er sich im Kreis bewegt, da er nicht „zur Seite“ gehen kann. Es gibt also keine innere Krümmung. Doch wir, als außenstehende Beobachter, können sehen, dass der Kreis verbogen ist. Also gibt es eine extrinsische Krümmung.

Beim dreidimensionalen Raum und der vierdimensionalen Raumzeit ist die Sache nun ganz ähnlich. Der dreidimensionale Raum (unser Universum) ist zumindest im Mittel über große Entfernungen flach (↗[3]). Das bedeutet, dass wir als Bewohner des dreidimensionalen Raums keine Krümmung wahrnehmen. Ein Dreieck mit den Endpunkten auf der Erde, dem Andromeda-Nebel und der Großen Magellanschen Wolke hätte immer noch eine Winkelsumme von 180°. Aber die gesamte Raumzeit ist tatsächlich intrinsisch gekrümmt. Und das dreidimensionale Universum ist zu einer bestimmten Zeit (nach dem Urknall, ↗[4]) wiederum Teil einer vierdimensionalen Raumzeit. Daher hat das Universum eine extrinsische Krümmung – was wir dadurch wahrnehmen, dass es sich mit der Zeit ausdehnt.

↗[3]: *„Dunkle Energie“ auf Seite 141*
↗[4]: *„Der Urknall“ auf Seite 97*



"Wir kennen das Alter des Universums. Gravitationslinsen werden uns dabei helfen, sein Gewicht zu bestimmen. Wenn das Universum weiblich ist, wird sie es uns ziemlich schwer machen."

Gravitationslinsen

Optische Täuschungen am Nachthimmel

Sehen heißt glauben – aber oft ist das, was wir sehen, nicht wirklich da. Oder es ist da, aber nicht, wo wir glauben, dass es ist. Wir sehen Dinge, indem wir das Licht betrachten, das von ihnen in unser Auge geschickt wird. Wollen wir daraus schließen, wo sich ein Objekt befindet, versucht unser Gehirn eine direkte Linie von unserem Auge in die Richtung zu ziehen, aus der das Licht kam. Aber manchmal nehmen Lichtstrahlen nicht den geraden Weg. Dann wird unser Gehirn ausgetrickst und wir sehen die Dinge an einem anderen Ort, als sie eigentlich sind.



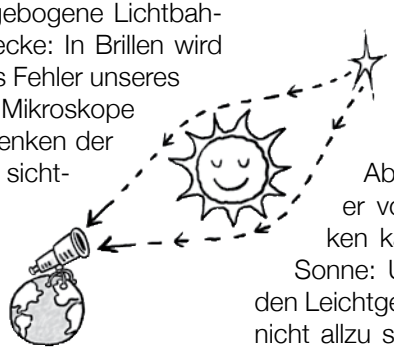
Die Krümmung von Lichtstrahlen kommt in der Natur häufig vor. So wird Licht z.B. gebrochen, wenn es von Wasser in Luft übergeht. Daher ist es so schwer, einen Fisch mit bloßen Händen zu fangen: er ist nicht dort, wo man denkt. Auch werden Lichtstrahlen leicht abgelenkt, wenn sie durch heiße Luft gehen. Daher sieht man die Luft über einer heißen Straße flimmern, oder Menschen werden in der Wüste von einer Fata Morgana in die Irre geführt und sehen Licht, das eigentlich nicht dort ist. Wir nutzen gebogene Lichtbahnen aber auch für positive Zwecke: In Brillen wird das Licht so umgeleitet, dass es Fehler unseres Auges ausgleichen kann. Und Mikroskope können durch ein cleveres Umlenken der Lichtbahnen winzige Bakterien sichtbar machen.

Es gibt aber noch eine andere wichtige Situation, in der Licht nicht unbedingt geraden Linien folgt, nämlich wenn es lange Strecken durch das Universum zurücklegt.

Licht im Universum fliegt nicht immer geradeaus

Schauen wir uns das Universum durch Teleskope und Observatorien an, sind wir dafür auf das Licht angewiesen, das quer durch den interstellaren Raum zur Erde gelangt ist. Allerdings bewegt sich dieses Licht nur selten völlig geradeaus. Grund dafür ist die Gravitation: Es ist die gravitative Krümmung des Raumes selbst (↗[1]), die den Weg des Lichts verändert. Dadurch kann man im All manchmal Dinge an Orten sehen, an denen sie eigentlich gar nicht sind. Dieser Effekt wird durch sogenannte „Gravitationslinsen“ verursacht, die für Astrophysiker unglaublich wichtig sind, um den Kosmos zu beobachten und zu vermessen.

Meistens sind es besonders schwere Massen, die den Raum krümmen und das Licht verbiegen. Mann kann Pi mal Daumen sagen: Je schwerer das Objekt, desto stärker wird das Licht verbogen. Ein relativ kleines Objekt – so wie der Mond – hat kaum Einfluss auf den Weg des Lichts. Aber ein Stern ist schon so schwer, dass er vorbeifliegendes Licht ein wenig ablenken kann. Nehmen wir als Beispiel mal die Sonne: Unter den Sternen gehört sie eher zu den Leichtgewichten. Daher verändert sie das Licht nicht allzu stark. Dennoch: im Jahr 1919 schaute



↗[1]: *„Die Allgemeine Relativitätstheorie“ auf Seite 121*

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_32

sich Sir Arthur Eddington die Sonne während einer Sonnenfinsternis sehr genau an. Dabei fiel ihm auf, dass die benachbarten Sterne an einer etwas anderen Stelle zu sehen waren, als man sie eigentlich erwartete – und zwar genau so weit verschoben, wie es die Allgemeine Relativitätstheorie vorhersagt. Und das machte Einstein über Nacht berühmt: Die Schlagzeilen „Das All ist krumm!“ gingen um die Welt und berichteten von der ersten Beobachtung von Gravitationslinsen.

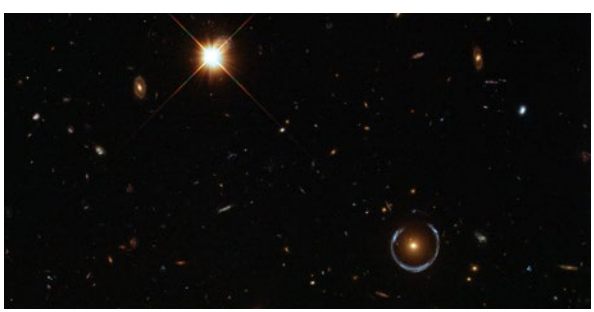


Gravitationslinsen sind überall

Heute können wir den Effekt von Gravitationslinsen überall im Universum sehen. Für Astronomen sind sie ein sehr mächtiges Werkzeug, um die Massen und/oder Entfernungen von weit entfernten Sternen und Galaxien zu berechnen. Ein bekanntes Beispiel dafür ist das sogenannte Einstein-Kreuz: Wenn man einen bestimmten Punkt im Sternbild Pegasus mit einem guten Teleskop betrachtet, kann man fünf helle Lichtpunkte erkennen, die ein Kreuz bilden. Das Zentrum davon ist eine Galaxie, die etwa 500 Millionen Lichtjahre von uns entfernt ist und den wunderschönen Namen UZC J224030.2+032131 trägt. Die anderen vier Punkte sind in Wirklichkeit vier Abbildung ein und desselben Objekts: Der Quasar QSO 2237+0305. Dieser Quasar (eigentlich eine unglaublich helle Galaxie, ↗[2]) ist ca. 10 Milliarden Lichtjahre von uns entfernt und liegt von der Erde aus gesehen direkt hinter UZC J224030.2+032131. Verglichen mit optischen Linsen funktionieren Gravitationslinsen etwas anders. Es gibt einige entscheidende Unterschiede. Zunächst einmal werden Lichtstrahlen, die durch die Mitte einer Linse gehen, viel weniger stark gekrümmt als die am äußeren Rand. Bei Gravitationslinsen ist das genau andersrum: Je näher Licht das am schweren Objekt vorbeiläuft, desto stärker wird es abgelenkt. Das liegt daran, dass Gravitationslinsen (anders als optische Linsen) keinen einzelnen Brennpunkt haben. Sie haben vielmehr eine „Brennlinie“. Statt die Bilder entfernter Objekte vergrößert zu sehen, sehen wir sie stattdessen verzerrt.

Ein zweiter Punkt: Gravitationslinsen sind meist nicht ganz rund, sondern etwas unregelmäßig geformt, so wie Galaxien. Daher ist auch ihr Gravitationsfeld etwas irregulär, was die genaue Ablenkung des Lichts sehr kompliziert macht. Das kann dann auch mal zu mehreren Abbildungen führen, so wie beim Einstein-Kreuz. Nur, wenn ein Objekt perfekt rund ist, kann man sogenannte Einstein-Ringe erhalten: Die Abbildung eines Objekts hinter





↗[2]: *„Galaxientypen“ auf Seite 113*

Fotos: ESA/Hubble & NASA

der Gravitationslinse sieht dann ringförmig aus und erscheint um die Linse herumgebogen. Das ist zum Beispiel bei der Galaxie LRG (für luminous red galaxy, „helle rote Galaxie“) 3-757 der Fall, die man auf der vorherigen Seite rechts erkennt.

Wie wir bereits erzählt haben, ist die Krümmung des Lichts stärker, je näher das Licht an dem Objekt vorbeifliegt. Theoretisch sind Schwarze Löcher (↗[3]) daher auch ideale Gravitationslinsen. Sie können so schwer wie Sterne sein, aber viel, viel kleiner. In der Nähe des Ereignishorizonts des Schwarzen Lochs wird die Gravitationskraft, die auf das Licht wirkt, so stark, dass das Licht sogar das Schwarze Loch (mehrere Male) umrunden kann, bevor es weiterfliegt. Das ist der Grund dafür, weshalb man bei einem idealen Schwarzen Loch (ohne viel Materie drumherum, die das Licht stört) sogar mehrere Einsteinringe sehen kann. Das sind Dinge, mit denen normale optischen Linsen nicht mithalten können.

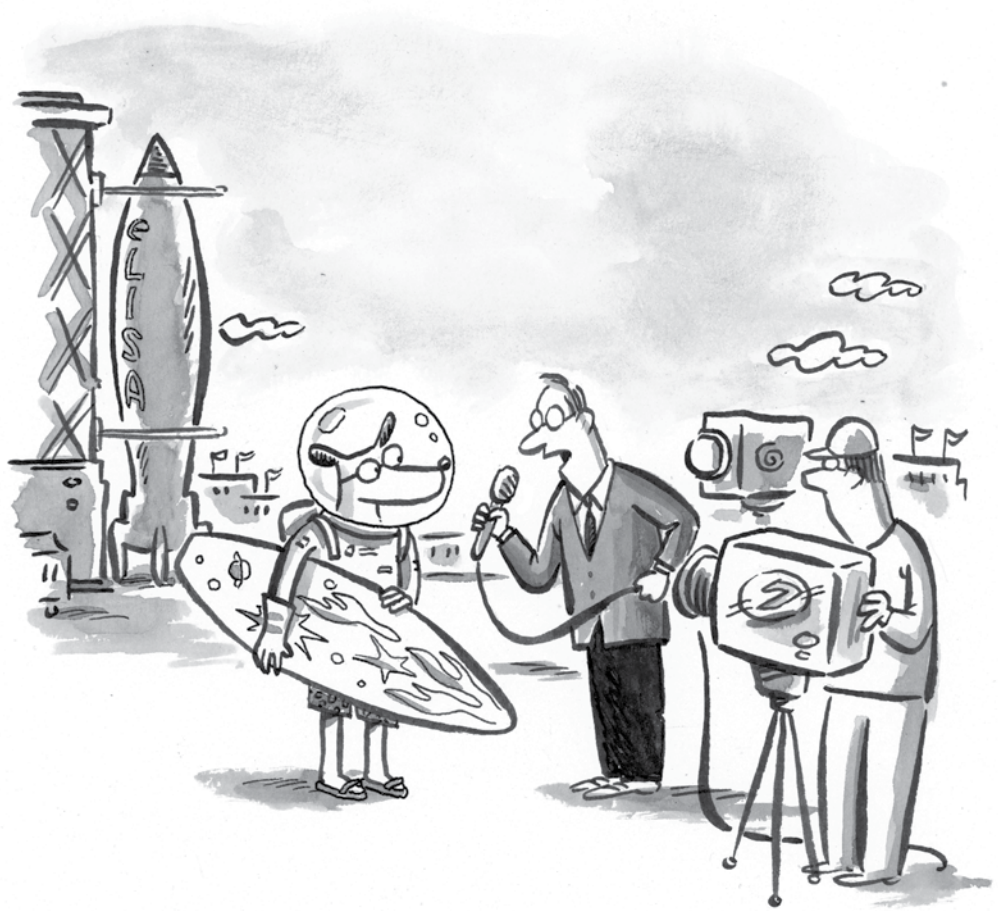


Gravitationslinsen: eine Möglichkeit, das Universum zu wiegen

Für jeden, der Bilder von Teleskopen sinnvoll deuten will, sind die Effekte von Gravitationslinsen von entscheidender Bedeutung, egal ob wir hier über die großen Antennenanordnungen im peruanischen Gebirge reden, oder die Teleskope, die auf dem Satelliten Hubble montiert sind. Viele der Bilder, die wir sehen, sind kosmische Illusionen. Der Effekt ist aber nicht einfach nur etwas, das beim Erstellen von Sternenkarten stört. Er kann auch sehr wertvoll sein, wenn man das Universum wiegen möchte. Gravitationslinsen stören das Licht von Sternen und Galaxien auf eine ganz bestimmte Art und Weise, die man schnell erkennen kann. Durch die Rotverschiebung des Lichts kann man gut abschätzen, aus welcher Entfernung es seinen Weg durch das Universum startete (↗[4]). Mit diesen beiden Informationen bekommt man eine gute Idee davon, wie viel Masse zwischen dem Ursprung des Lichts und unserer Erde liegt. Das ist in etwa so, als wenn man die Temperatur einer Straße messen würde, indem man die flimmernde Luft darüber betrachten würde – schwierig, aber nicht unmöglich!

Man hat diese Methode genutzt, um nicht bloß die Masse einzelner Galaxien zu berechnen, sondern auch, um Informationen über die Masseverteilung im gesamtem Universum zu erhalten. Und die lässt sich dann mit der Gesamtmasse vergleichen, die man erhält, wenn man alle Sterne, Galaxien, Nebel und Staubwolken, die man sieht, zusammenzählt. Das Ergebnis ist übrigens ziemlich überraschend: Die beiden Zahlen passen überhaupt nicht zusammen! Es gibt viel mehr Gravitation im Universum, als es Materie gibt. Zumindest mehr, als wir sehen können. Der Großteil der Masse im Universum, die wir über ihre Wirkung als Gravitationslinse „sehen“ können, muss unsichtbar sein (richtig unsichtbar, nicht nur schlecht beleuchtet). Diese Enthüllung deckt sich gut mit anderen, davon unabhängigen Beobachtungen, die man mit einer neuen Art von Dunkler Materie erklären könne. Darauf kommen wir auch nochmal genauer zu sprechen (↗[5]).

↗[3]: *„Schwarze Löcher“ auf Seite 91*
↗[4]: *„Der Doppler-Effekt“ auf Seite 15*
↗[5]: *„Dunkle Materie“ auf Seite 137*

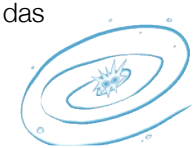


“Herr Professor, es scheint als erwarteten Sie, besonders große Wellen auf dieser Mission zu finden...”

Gravitationswellen

Surfen auf der Raumzeit

An anderer Stelle haben wir bereits darauf hingewiesen: Gravitation – oder auch Schwerkraft – ist nichts Weiteres als Krümmungen in der Raumzeit (↗[1]). Die allgemeine Relativitätstheorie von Albert Einstein sagt vorher, dass sehr massive oder energiereiche Objekte – wie zum Beispiel ein Stern – die sie umgebende Raumzeit verzerren. Wenn sich ein anderes Objekt – wie zum Beispiel ein Raumschiff – in dieser gekrümmten Raumzeit bewegt, erweckt das den Eindruck, als würde der Stern das Raumschiff durch die Schwerkraft anziehen.



Diese Verzerrungen ändern sich natürlich, wenn sich die Positionen der Sterne und Planeten ändern. Ganz speziell dann, wenn sich zum Beispiel zwei sehr schwere und kompakte Objekte, wie zum Beispiel schwarze Löcher (↗[2]) oder Neutronensterne (↗[3]) umkreisen oder sogar zusammenstoßen. Die Raumzeit in ihrer Umgebung wird dann in Schwingungen versetzt, und die breiten sich in alle Richtungen aus, wie Wellen in einem Teich. Deswegen nennt man diese Schwingungen in der Raumzeit auch „Gravitationswellen".

Verzerrungen der Raumzeit

Wie muss man sich nun eine solche Gravitationswelle vorstellen – was genau tut sie? Nun, sie zerrt die Raumzeit in einem gewissen Rhythmus hin und her. Das bedeutet zum Beispiel, dass sich, wenn sie durch das Sonnensystem laufen würde, die Abstände zwischen, sagen wir mal, Erde und Mond, rhythmisch ändern würden. Ganz wichtig hierbei: Erde und Mond spüren hierbei keine Kraft auf sich wirken, sie werden also nicht hin- und hergezerrt. Viel eher ist es so, dass sich der Raum zwischen ihnen ausdehnt und zusammenzieht. Das ist ganz analog zur Ausdehnung des Universums im kosmologischen Maßstab (↗[4]).

Dazu muss man sagen, dass diese rhythmische Ausdehnung wirklich sehr schwach ist: Bei den üblichen Gravitationswellen, die zum Beispiel bei der Kollision zweier Neutronensterne entstehen, würde sich der Abstand zwischen Erde und Mond um wenig mehr als den Durchmesser eines Protons ändern! Zum Vergleich: Das ist, als würde sich der Abstand zwischen Sonne und Erde um den Durchmesser eines Wasserstoffatoms ändern, oder der Durchmesser der Milchstraße um 10 Zentimeter, oder der Durchmesser des sichtbaren Universums um etwa 60 Kilometer!

Mit dem Interferometer zum Erfolg!

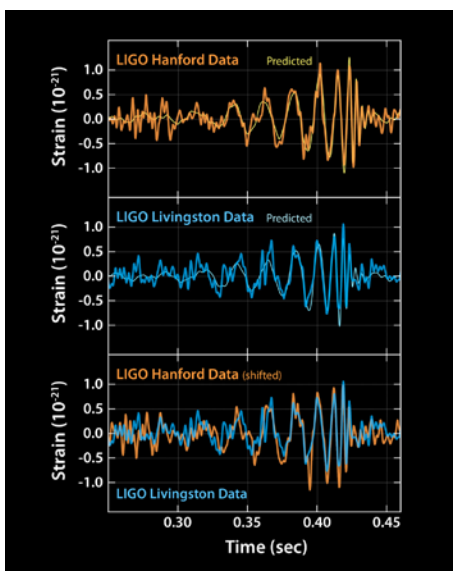
Das ist natürlich fürchterlich wenig – wie kann man solch geringe Veränderungen im Abstand zweier Gegenstände überhaupt messen? Die Antwort lautet: mit einem Interferometer. Das funktioniert nach einem sehr trickreichen Prinzip: Man nehme einen Laserstrahl (↗[5]), und spalte den in zwei Strahlen auf (z.B. mit einem halbdurchlässigen Spiegel). Beide Teilstrahlen schickt man dann in unterschiedliche Richtungen, bis sie auf einen weiteren Spiegel treffen. Der reflektiert sie, und sendet sie wieder da hin zurück, wo sie hergekommen sind. Dort treffen sie aufeinander und man überlagert sie.

↗[1]: *„Gekrümmte Raumzeit" auf Seite 125*
↗[2]: *„Schwarze Löcher" auf Seite 91*
↗[3]: *„Weiße Zwerge und Typ Ia Supernovae" auf Seite 87*
↗[4]: *„Der Urknall" auf Seite 97*
↗[5]: *„Laser" auf Seite 19*

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_33

Die Photonen in Laserstrahlen haben die Angewohnheit, dass sie alle im Gleichschritt marschieren. Wenn der Strahl aufgeteilt wird, marschieren sie jedoch jeweils für sich. Wenn die beiden Strahlen wieder aufeinandertreffen, können die Photonen aus den beiden Strahlen eventuell außer Takt geraten sein – man sagt, sie haben einen „Phasenunterschied". Den Phasenunterschied der beiden Strahlen kann man gut auf einem Schirm erkennen – wenn die Stahlen zufälligerweise wieder im Takt sind, ist es dort hell, wenn sie genau außer Takt sind, wird es dunkel. Das ist ganz ähnlich wie beim Interferenzmuster beim Doppelspaltexperiment (↗[6]).

Wenn sich die Weglänge einer der Strahlen auch nur ein bisschen ändert, ändert sich auch sofort der Phasenunterschied, und man kann das an der Änderung des hell-dunkel-Musters sofort sehen. Das haben Wissenschaftler benutzt, um riesige Detektoren zu bauen, die im Wesentlichen gigantische Interferometer mit kilometerlangen Wegstrecken sind. Damit kann man selbst die kleinste Änderung von Abständen messen – und genau das ist ein Problem: diese Detektoren schlagen nämlich auch an, wenn es irgendwo auf dem Planeten ein Erdbeben gibt. Oder wenn im Raum nebenan jemand niest. Geo600, ein in Hannover angesiedelter Gravitationswellendetektor, kann sogar sehen, wenn in Bremerhaven ein großes Transportschiff in den Hafen einfährt – und das, obwohl der Hafen über 150 km vom Detektor entfernt ist! Kann man es überhaupt schaffen, aus all diesen Signalen das richtige herauszufiltern? Woher weiß man, ob der Detektor anschlägt, weil eine Gravitationswelle die Armlänge des Interferometers ein wenig verändert hat, oder ob sich im Nachbardorf jemand den Kopf gestoßen hat?

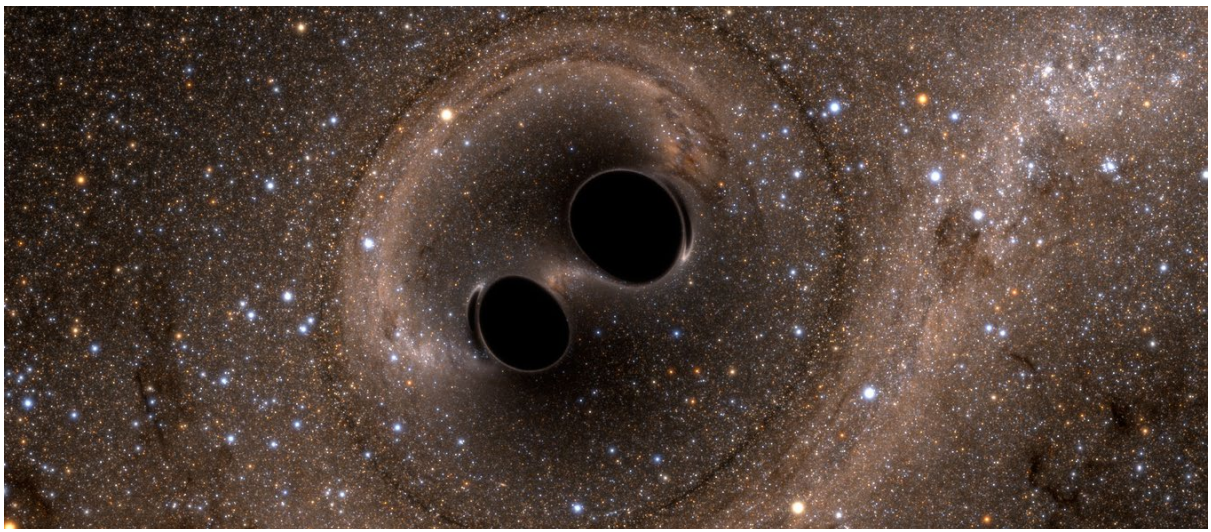


2016 – Das Jahr, in dem wir das Universum schwingen hörten

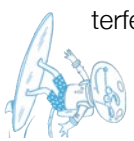
Aber genau das haben Wissenschaftler des LIGO (Large Interferometer Gravitational-wave Observatory) aus den USA geschafft: Anfang 2016 konnten sie stolz den ersten Nachweis einer Gravitationswelle verkünden – eine Meisterleistung von Physik und Ingenieurskunst!

Um diese Messung durchführen zu können, waren einige Faktoren von äußerster Wichtigkeit: Erstens war die Gravitationswelle, die sie gemessen hatten, relativ stark. Sie entstand durch die Kollision zweier ziemlich schwerer schwarzer Löcher – beide etwa dreißig mal schwerer als die Sonne! Zweitens wussten die Forscher ziemlich genau, wonach sie suchen mussten: Nach jahrelangen aufwändigen numerischen Simulationen hatten die Wissenschaftler eine recht genaue Vorstellung davon, wie die Kollision zweier schwarzer Löcher im Detektor auszusehen hat (das Signal ist nämlich ein ganz anderes

↗[6]: *„Das Doppelspalt-Experiment" auf Seite 151*
Abbildung: LIGO, CC BY-ND



als das, wenn jemand im Nebenraum niest). Und drittens hat das LIGO zwei Detektoren: Einer steht in Livingston, Louisiana, und einer in der Nähe von Richland, Washington. Damit sind die beiden fast 3000 km voneinander entfernt, aber beide haben die Gravitationswelle unabhängig voneinander gemessen! Es musste also aus dem Weltall kommen. Weil das Signal bei dem einen Detektor etwas früher gemessen wurde als beim anderen, konnte man sogar ungefähr die Richtung abschätzen, aus der die Welle gekommen sein muss.



eLISA: Einblicke in die Weiten des Universums

Dieser erste Nachweis von Gravitationswellen war ein großartiger Erfolg für die Physik, und eine fantastische Bestätigung der Allgemeinen Relativitätstheorie (↗[7]) (bis dahin gab es immer noch einige Zweifler, die aber seitdem alle verstummt sind). Aber das ist noch nichts im Vergleich zu dem, wozu die eLISA Mission in der Lage sein wird!

Das eLISA Projekt (evolved Laser Interferometer Space Antenna) ist ein System aus drei Satelliten: die jeweiligen Endpunkte eines gigantischen Interferometers, das im All nach Gravitationswellen suchen soll. Die Satelliten sollen jeweils etwa 1 Million km voneinander entfernt sein – ein gewaltiger Sprung im Vergleich zu dem etwa 4 km langen Interferometer von LIGO! Und im Weltall gibt es wirklich nur noch die Gravitation, keine Erschütterungen durch niesende Zimmernachbarn mehr! Die Forscher versprechen sich von dem Projekt, das innerhalb des nächsten Jahrzehntes starten soll, fantastische neue Einblicke in die Schwingungen der Raumzeit, die durch das Universum eilen. Man könnte sagen, eLISA soll dem Gesang des Weltalls lauschen! Es ist kaum vorauszusehen, welche Geheimnisse man dem Universum auf diese Art und Weise noch entlocken wird.

↗[7]: *„Die Allgemeine Relativitätstheorie“ auf Seite 121*

Abbildung: SXS, CC BY-ND



“Du musst zugeben: Der schwarze Pudding war gut.”

Dunkle Materie

Scheinbar nicht da

Wenn man etwas nicht sieht, wie kann man sagen, dass es existiert? Normalerweise gibt es dafür dann Anzeichen: Spuren im Schnee sagen uns, dass ein Tier vorbei gekommen sein muss. Der morgendliche Duft von gebratenem Speck verspricht ein wunderbares Frühstück, selbst wenn man noch im Bett liegt und es nicht sehen kann. Und wenn man raus schaut und in den Pfützen kleine Spritzer sieht, dann weiß man, dass es regnet, selbst wenn die Regentropfen selbst zu klein sind, um sie zu sehen. Mit der Dunklen Materie ist es ganz ähnlich: Man kann sie nicht direkt sehen, aber es gibt Anzeichen, dass da noch etwas im Universum sein muss, auch wenn es unsichtbar ist.



Fehlende Materie: Das Universum ist viel schwerer, als es aussieht

Als Physiker zum ersten Mal ernsthaft versucht haben, das Universum zu wiegen, haben sie festgestellt, dass etwas fehlt. Natürlich haben sie es nicht einfach auf eine große Waage gelegt, sondern haben die Verteilung der Materie im Universum über den Effekt der sogenannten Gravitationslinsen (↗[1]) abgeschätzt: Bilder von weit entfernten Galaxien erscheinen etwas verzerrt, da sich zwischen den Galaxien und uns andere Galaxien und Schwarze Löcher befinden. Und diese krümmen die Raumzeit (↗[2]) und verbiegen dadurch den Weg des Lichts. Je mehr das Bild entfernter Galaxien gestört ist, desto mehr Masse muss zwischen uns und der entfernten Galaxie sein. Berechnet man so die Gesamtmenge der im Universum enthaltenen Materie, erhält man einen Wert, der viel größer ist als die Gesamtmenge sichtbarer Galaxien und Sterne im Universum. Und selbst wenn man all den Staub und das Gas zwischen den Galaxien mit einbezieht, fehlt immer noch viel Masse: Die Raumzeit ist einfach viel stärker gekrümmt, als man es erwartet hätte.

Wir können also vermuten, dass es eine Art Materie gibt, die sehr schwer ist und daher die Raumzeit gut krümmt, die man aber mit bloßem Auge nicht sehen kann – oder anders gesagt: die keine elektromagnetische Strahlung aussendet. Sie ist sogar nicht in der Lage, über eine der anderen Kräfte (↗[3]) – mit Ausnahme der Gravitation – zu reagieren. Sie wäre also vollkommen durchlässig – man könnte sie auch nicht anfassen. Aber könnte es nicht einfach so sein, dass man beim Abschätzen der Gesamtmasse im Universum einen Fehler gemacht hat? Vielleicht waren die Gleichungen für die Gravitationslinsen nicht ganz richtig? Das könnte theoretisch so sein. Es gibt aber noch andere, davon unabhängige Gründe, die dafür sprechen, dass es im Universum mehr gibt, als man sieht. Eines dieser Anzeichen ist, dass sich die äußeren Regionen von rotierenden Galaxien viel schneller bewegen, als sie sollten. Galaxien, egal ob elliptisch, irregulär oder mit Spiralarmen (↗[4]), rotieren wie ein Karussell. Gäbe es nun außer der sichtbaren Materie in der Galaxie keine weitere, müssten sich die äußeren Abschnitte viel langsamer drehen als die inneren. Die Galaxien sollten ähnlich rotieren wie die Planeten in unserem Sonnensystem: Die äußeren wie Saturn und Jupiter

↗[1]: *„Gravitationslinsen“ auf Seite 129*
↗[2]: *„Gekrümmte Raumzeit“ auf Seite 125*
↗[3]: *„Das Standardmodell“ auf Seite 217*
↗[4]: *„Galaxientypen“ auf Seite 113*

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_34

sind viel langsamer und brauchen einige Zeit länger, die Sonne zu umrunden, als die inneren Planeten wie Merkur oder die Erde. Aber bei fast allen Galaxien ist dies nicht der Fall. Vielmehr drehen sich die Teile an den äußeren Rändern genauso schnell wie die in der inneren Kernregion. Es scheint, als würde eine unsichtbare Masse die äußeren Teile mitschleifen, indem es sie über die Gravitationskraft mitzieht. Die Liste der indirekten Anzeichen geht weiter: Es ist zum Beispiel ohne Vorhandensein einer großen Menge unsichtbarer Materie nicht möglich, die Verteilung der sichtbaren Materie im All zu erklären. Kurz gesagt: Gäbe es nur normale Materie, hätte sie seit dem Urknall (↗[5]) nicht genug Zeit gehabt, sich in den Mustern anzuordnen, die wir heute sehen. Was wir heute sehen, ist viel „verklumpter“ (↗[6]), als wir es erwarten würden. Man könnte die Struktur allerdings durch eine zusätzliche gravitative Anziehung erklären, die von unsichtbarer Materie verursacht wird.



Die Jagd nach Dunkler Materie

Es gab schon so einige Versuche, die eben beschriebenen Effekte begreiflich zu machen. Man könnte zum Beispiel das zweite Newtonsche Gesetz etwas anpassen, um die Rotationsgeschwindigkeit der Galaxien nachzuvollziehen. Das kann aber nicht die anderen seltsamen Beobachtungen erklären, die wir zuvor beschrieben haben. Bis heute ist die einzige Erklärung für diese Phänomene eine seltsame Art neuer Materie, die nur über die Gravitationskraft reagiert, aber nicht (oder nur sehr, sehr, sehr schwach) über die anderen Grundkräfte. Diese hypothetische Art von neuer Materie wurde „Dunkle Materie“ getauft, obwohl sie – was auch immer sie eigentlich ist – nicht dunkel ist, sondern eher transparent.

Dunkle Materie scheint auch in der Lage zu sein, einfach durch uns, oder jede andere Art von Materie, hindurchzugehen (was nur eine andere Art und Weise ist, zu sagen, dass sie nicht über die elektromagnetische Kraft reagiert). Das beste Beispiel hierfür ist der sogenannte Bullet Cluster: Es ist ein Bild zweier kollidierender Galaxienhaufen. Über den Effekt von Gravitationslinsen kann man die Massenverteilung berechnen. Das Zentrum der Massenverteilung liegt allerdings an einer anderen Stelle als das Zentrum der sichtbaren Materie. Es sieht so aus, als wäre die sichtbare Materie gegeneinander geprallt, während die unsichtbare (dunkle) einfach ungestört durcheinander hindurch gegangen wäre.



Wir können das auf dem Bild auf der nächsten Seite sehen: Der sichtbare Teil des Galaxienhaufens ist rot dargestellt. Er bildet „Schockfronten“ aus, während die Galaxien einander durchdringen. Der blaue Teil markiert die Dunkle Materie, die man über den Effekt der Gravitationslinsen bestimmt hat. Sie geht einfach ungestört durch alles hindurch. Was soll nun eigentlich diese Dunkle Materie sein? Für einige Zeit dachten Physiker, dass es sich dabei um Neutrinos (↗[7]) handeln könnte. Physiker waren sich lange nicht sicher, ob Neutrinos eine Masse haben oder nicht. Hätten sie eine nicht allzu kleine Masse, könnte es tatsächlich so sein, dass die Dunkle Ma-

↗[5]: *„Der Urknall“ auf Seite 97*
↗[6]: *„Superstrukturen des Universums“ auf Seite 109*
↗[7]: *„Das Neutrino“ auf Seite 213*

terie in Wirklichkeit einfach ein großer Haufen Neutrinos ist. Neutrinos reagieren in der Tat nur schwach, das würde passen. Leider aber hat man durch die Experimente zur Neutrinooszillation (↗[8]), herausgefunden, dass Neutrinos zwar tatsächlich eine Masse haben, diese aber so unglaublich klein ist, dass sie den Effekt des Massenüberschusses im Universum nicht erklären können. Neutrinos scheiden damit also schon mal als Kandidaten für Dunkle Materie aus. Eine andere mögliche Deutung, die sich bis heute gut gehalten hat, besteht darin, dass es sich bei Dunkler Materie um die leichtesten supersymmetrischen Teilchen (↗[9]) handelt. Die Supersymmetrie ist ein sehr interessantes theoretisches Modell und kann viele Probleme, die im Standardmodell der Teilchenphysik auftreten, gut erklären. Und sie liefert einen Kandidaten für die Dunkle Materie. Aber als dieses Buch geschrieben wurde, fehlte noch der experimentelle Nachweis dafür. Stattdessen scheint es durch Experimente wie den Large Hadron Collider (↗[10]) immer unwahrscheinlicher, hier noch etwas zu finden. Bis heute ist also die Beschaffenheit



der Dunklen Materie ein großes Mysterium. Handelt es sich um eine Art supersymmtrischer Teilchen? Gehört sie zu einer neuen, noch völlig unbekannten Art neuer Teilchen? Beruht sie vielleicht doch nur auf einem Fehler in unseren Gleichungen zur Gravitation, der uns nur glauben lässt, dass es mehr Materie gibt, als wir sehen? Ist die Dunkle Materie vielleicht nur ein seltsamer Effekt der Quantengravitation (↗[11]), mit dem wir noch nicht gerechnet haben?



Wir wissen bisher nur, dass etwas fehlt. Und bis wir herausgefunden haben, was das genau ist, wird es sich weiterhin um eines der größten ungelösten Mysterien unseres Universums handeln.

↗[8]: *„Neutrinooszillation“ auf Seite 265*
↗[9]: *„Supersymmetrie“ auf Seite 303*
↗[10]: *„Teilchenbeschleuniger“ auf Seite 253*
↗[11]: *„Quantengravitation“ auf Seite 283*

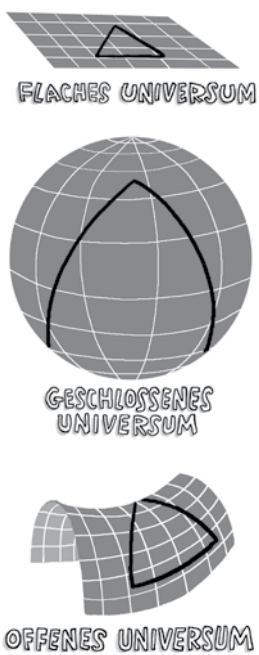
Abbildung (zusammengesetzt): Röntenabbildung: NASA/CXC/CfA/M.Markevitch et al.; Gravitationslinsen-Karte: NASA/STScI; ESO WFI; Magellan/U.Arizona/D.Clowe et al.; Optical: NASA/STScI; Magellan/U.Arizona/D.Clowe et al.


DUNKLE ENERGIE
SO FRIEDLICH, NICHT WAHR?
EINE MYSTERIÖSE ENERGIE BESCHLEUNIGT DIE AUSDEHNUNG DES UNIVERSUMS. ES GERÄT AUßER KONTROLLE UND WIR HABEN KEINE AHNUNG, WAS ES IST.
ICH HAB DEN ROMANTISCHEN MOMENT TOTAL VERSAUT, STIMMT'S?

Dunkle Energie

Einsteins größte Eselei plötzlich wieder im Trend

Seit Edwin Hubble die Entfernung und Rotverschiebung weit entfernter Galaxien gemessen hat, wissen wir, dass das Universum sich ausdehnt (↗1). Viele Jahre dachte man, dass die Antwort auf die Frage, ob sich das Universum ewig ausdehnt oder nicht, davon abhängt, wieviel Materie und Energie darin enthalten ist. Es gibt drei Möglichkeiten: die „geschlossene", die „offene" und die „flache" Form. Bei der geschlossenen Form ist das Universum so schwer, dass es früher oder später unter seinem eigenen Gewicht wieder kollabieren wird – wie ein Urknall, nur rückwärts. Bei der offenen Form ist das Universum so leicht, dass es sich ewig ausdehnt, aber immer langsamer. Die flache Form ist der Grenzfall zwischen den beiden anderen: Die Masse ist genau richtig, damit sich das Universum zwar ausdehnt, aber immer langsamer, so dass es am Ende eine endliche Größe hat. Die Ausdrücke „offen", „geschlossen" und „flach" sind aus der Geometrie abgeleitet, die das Universum jeweils: Es kann negativ, positiv oder gar nicht gekrümmt sein.



Standardkerzen in der Dunkelheit

Die Physiker haben diese drei möglichen Fälle formuliert, da sie den verschiedenen Lösungen der Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie entsprechen. Das trifft zumindest dann zu, wenn man annimmt, dass es nur Raum, Zeit und Materie (einschließlich der Dunklen Materie, ↗2) im Universum gibt.

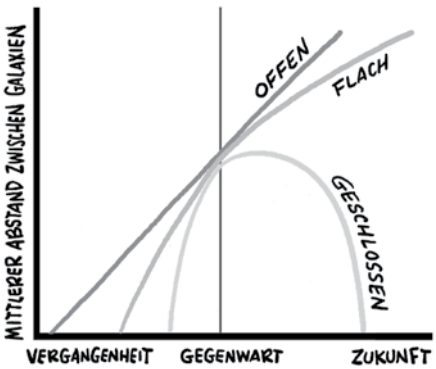
Aber diese Annahmen über die Entwicklung des Universums änderten sich plötzlich, als 1998 Beobachtungen veröffentlicht wurden, die mit den Signalen von Supernovaexplosionen zu tun haben, besonders mit denen vom Typ Ia (↗3). Diese Arten von Sternexplosionen sind für Astronomen fantastisch! Seit Bestehen der Zeit geschehen sie immer wieder. Da sich der Lichtblitz dieser Explosionen mit Lichtgeschwindigkeit in einem sich ausdehnenden Universum ausbreitet, können wir sehr gut beschreiben, wie sehr sich der Raum seit der Explosion vergrößert hat. Die Explosionen einer Typ Ia Supernova haben immer einen Lichtblitz mit einer ganz bestimmten Helligkeit. Indem man also die Intensität der Strahlung des Lichts auswertet, das bei uns ankommt, kann man abschätzen, wie weit die Supernova von uns entfernt ist.

Mehrere Jahre lang wurden Daten von vielen Supernova-Explosionen gesammelt – je weiter sie entfernt sind, desto weiter liegen sie in der Vergangenheit. Dadurch bekommt man ein detailliertes Bild über die Entwicklung des Kosmos während der letzten Milliarden Jahre. Dadurch fanden die Astronomen etwas sehr erstaunliches heraus: Das Universum dehnt sich nicht nur aus, sondern es tut dies auch

↗1: *„Der Urknall" auf Seite 97*
↗2: *„Dunkle Materie" auf Seite 137*
↗3: *„Supernovae" auf Seite 83*

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_35

schneller als früher. Anders als in den drei vorhin besprochenen Fällen findet die Ausdehnung also beschleunigt statt!



Wie sieht nun die Form des Universums aus? Ist es geschlossen, offen oder flach? Nun, diese Frage konnte Ende des letzten Jahrhunderts mit einer gewissen Genauigkeit beantwortet werden: Indem man die Verteilung der Schwankungen der kosmischen Hintergrundstrahlung sorgfältig untersuchte (↗[4]), konnte man zeigen, dass das Universum mit großer Genauigkeit flach ist.

Das Universum ist flach – und dehnt sich immer schneller aus!

Das passt natürlich überhaupt nicht in das Bild der drei Szenarien über das Schicksal des Universums. Dort würde ein flaches Universum bedeuten, dass es sich immer langsamer ausbreitet und irgendwann eine Maximalgröße erreicht. Es gibt aber noch ein größeres Problem: Damit das Universum flach sein kann, muss es schwer genug sein (oder genauer gesagt: eine bestimmte, „kritische" Energiedichte haben). Schauen wir uns aber um und zählen Sterne, Galaxien, Nebel, Staub, Photonen, usw., bekommen wir bei Weitem nicht so viel Materie und Strahlung, wie nötig wäre, um die kritische Dichte zu erreichen – sondern gerade mal 4,9 % von dem, was man bräuchte, um das Universum flach zu halten. Mit der Menge an Materie, die es enthält, sollte es eigentlich offen sein. Aber die Messungen der Hintergrundstrahlung zeigen, dass das ganz sicher nicht der Fall ist!

Das klingt nach etwas, von dem du schon gehört haben könntest: Müsste es nicht viel mehr Materie geben, als man eigentlich sieht? Ja, nämlich die sogenannte Dunkle Materie (↗[2]) – könnte die nicht die fehlende Energiedichte liefern? Nun, wie sich zeigt, gibt es zwar schon viel mehr Dunkle als normale Materie im Universum. Aber die beiden kommen trotzdem zusammen lediglich auf 31,7 % der kritischen Energiedichte des Universums. Man weiß auch, dass das, was noch fehlt, sehr gleichmäßig im gesamten Universum verteilt sein muss – ansonsten würden wir über die Gravitationslinsen etwas davon mitbekommen. Also anders als Dunkle Materie, die gerne zusammenklumpt, müsste dieses Fehlende etwas sehr gleichmäßig verteiltes sein. Und zwar selbst in den dunkelsten Ecken des Universums, wo man sonst nichts findet.

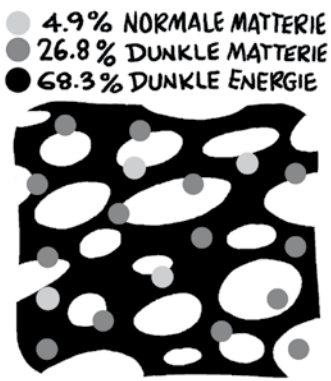


Als wäre Dunkle Materie nicht kompliziert genug …

Es ist allerdings so, dass in Einsteins Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie (↗[5,6]) auch Energie den Raum und die Zeit krümmen kann. Wenn das Universum also mit einer bestimmten Art von Energie homogen ausgefüllt wäre, dann wäre die Energiedichte groß genug, um das Universum flach zu halten, statt negativ gekrümmt. Diese fehlende Energie nennt man auch „Dunkle Energie", in Analogie zur Dunklen Materie – und sie ist sogar noch

↗[4]: *„Die kosmische Hintergrundstrahlung" auf Seite 105*
↗[5]: *„Die Allgemeine Relativitätstheorie" auf Seite 121*
↗[6]: *„$E = mc^2$" auf Seite 241*

viel mysteriöser. Es gibt eine wunderbare Art, Dunkle Energie zu erklären, die nicht nur die Frage beantwortet, wieso das Universum flach ist, sondern auch, wieso es sich beschleunigt ausdehnt. Man muss einfach einen zusätzlichen Term in Einsteins Gleichungen einbauen, die sogenannte „kosmologische Konstante". Sie verhält sich wie eine Energie, treibt aber die Ausdehnung des Universums an. Einstein erkannte, dass ein statisches Universum bei seinen Gleichungen kollabieren müsste. Da er aber wollte, dass das Universum ewig hält, hatte er die kosmologische Konstante als Gegengewicht hinzugefügt. Als er später erkannte, dass sich das Universum ausdehnt, statt statisch zu sein, hat er den neuen Term wieder entfernt und ihn „die größte Eselei seines Lebens" genannt.



Aber die kosmologische Konstante ist genau das, was man braucht, um die Dunkle Energie zu erklären: Sie verhält sich wie eine Energie und krümmt Raum und Zeit auf genau die richtige Art. Aber sie entspricht auch einem negativen Druck, also sorgt sie dafür, dass sich das Universum immer schneller ausdehnt! Als Konstante hat sie außerdem überall den gleichen Wert, was auch erklären würde, wieso die Dunkle Energie so gleichmäßig verteilt ist. Das Modell, das – in dem Moment, da wir dieses Buch schreiben – mit allen kosmologischen Messungen übereinstimmt, ist das sogenannte ΛCDM (ausgesprochen „Lambda-Si-Di-Em") Modell. Es erhielt seinen Namen, da es sowohl die kosmologische Konstante (mit dem griechischen Symbol Λ bezeichnet), als auch „kalte Dunkle Materie" („cold dark matter") enthält. Man nennt es auch das „Standardmodell der Kosmologie", weil es so wunderbar zu unseren aktuellen Beobachtungen passt.

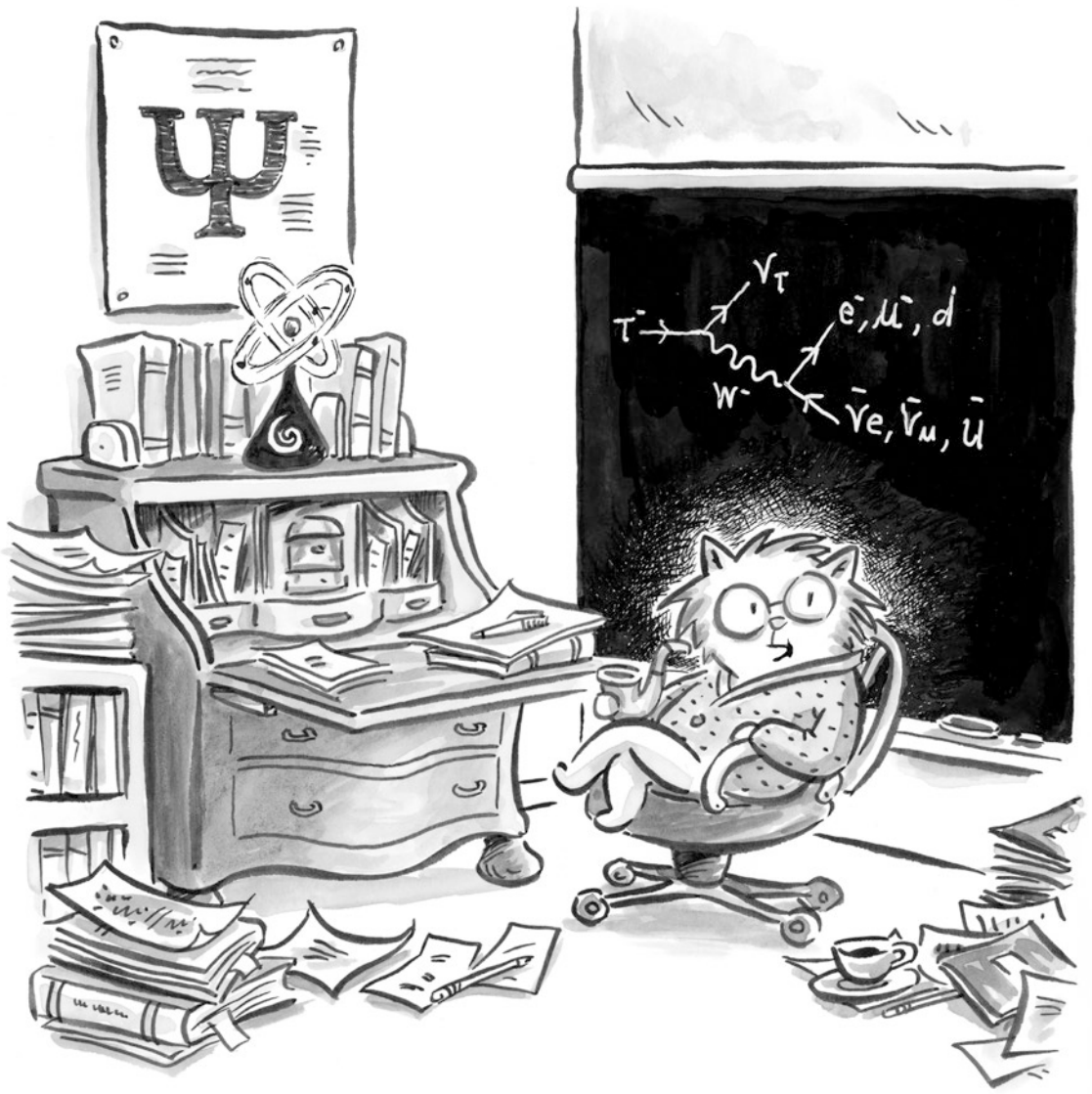
Einsteins größte Eselei – wiederbelebt als Dunkle Energie

Das könnte jetzt das Ende vom Lied sein – Dunkle Energie ist einfach eine kosmologische Konstante in den Gleichungen. Aber es gibt ein paar ästhetische Bedenken bei dieser Erklärung. Die etwas spekulativen Theorien, z.B. die Stringtheorien (↗[7]), sagen normalerweise eine kosmologische Konstante mit einem Wert von ca. 1 voraus. Der Wert, den man im ΛCDM-Modell annehmen müsste, damit es zu unseren Beobachtungen passt, ist aber 10^{-120}. Das ist eine Null, ein Komma, 119 Nullen und dann eine Eins. Diese Zahl ist allerdings so lächerlich klein, dass sie vielen Physikern etwas merkwürdig vorkommt. Es gibt auch noch andere Versuche, die Dunkle Energie zu erklären, nämlich mit exotischen Arten von Materie, die das Universum ausfüllen. Effektiv gesehen würden diese sich wie eine unglaublich kleine kosmologische Konstante verhalten, aber die Physiker würden sich mit dieser Erklärung etwas wohler fühlen.



Derzeit wissen wir nur, dass eine kosmologische Konstante viel über das „wie" zur Kosmologie erklärt, aber nichts zum „wieso". Ob das aber überhaupt eine sinnvolle Frage ist, und ob wir hier jemals Licht ins Dunkel bringen werden, sei dahingestellt.

↗[7]: *„Stringtheorie" auf Seite 307*


Ψ
τ⁻
ν_τ
W⁻
e⁻, μ⁻, d
ν̄e, ν̄_μ, ū

III – Geheimnisvolle Quanten

„Wir leben in einer besonderen Welt – alles, was wir kennen und womit wir täglich umgehen, ist groß. Stühle, Autos, sogar wir selbst, sind groß, verglichen mit den Atomen und Molekülen, aus denen wir alle bestehen. Wir sind sogar so groß, dass wir ein einzelnes Atom weder sehen, fühlen, hören noch sonst irgendwie spüren können, zumindest nicht ohne technische Hilfe. Das ist der Grund, weshalb wir vor etwa hundert Jahren große Augen machten, als die Technologie sich so weit entwickelt hatte, dass wir Zugang zu der Welt einzelner Atome bekamen. Zum ersten Mal konnten wir die Bausteine, aus denen alles aufgebaut ist, manipulieren – und sie waren ziemlich merkwürdig. Bis zu diesem Punkt hatten wir uns vorgestellt, dass Atome sich genau so wie andere makroskopische Objekte, die wir kannten, verhalten würden, so wie Stühle oder Häuser. Wir hatten uns Atome im Wesentlichen wie kleine Steine oder Murmeln vorgestellt.

Aber das sind sie nicht! Es zeigte sich, dass für Atome völlig andere Gesetze gelten als die, die wir im Alltag wahrnehmen. Selbst auf tiefergehender, philosophischer Ebene ist die mikroskopische Welt der Atome völlig anders als unsere makroskopische Welt. Wir haben es nur nicht gemerkt, weil wir im Vergleich zu einem einzelnen Atom so wahnsinnig riesig sind.

Diese mikroskopische Welt wird von den Gesetzen der Quantenmechanik beherrscht, und ihre Eigenartigkeit hat Wissenschaftler und Laien über hundert Jahre lang verwundert und inspiriert. Wann immer ein Atom zwei verschiedene Wege gehen kann, um sein Ziel zu erreichen, eine geisterhafte Fernwirkung mit einem anderen Teilchen eingeht, oder Hindernisse überwindet, indem es einfach durch sie hindurchtunnelt, dann versetzt uns die Eigenartigkeit der Quantenmechanik ins Staunen. Auf den nächsten Seiten werden Maxwell, Emmy und ich versuchen, euch von den verblüffendsten und jeder Intuition widersprechenden Phänomenen zu berichten, die man im Bereich der Quantenmechanik finden kann.“

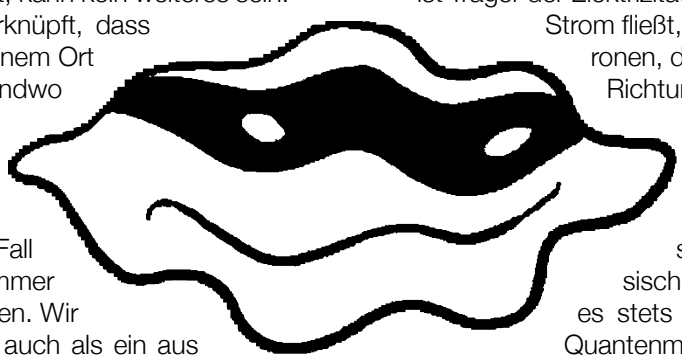

ERWIN & MAXWELL fragen
WIE WÄRE TISCHTENNIS, WENN SICH DER BALL ENTSPRECHEND DEN REGELN DER QUANTENMECHANIK VERHALTEN WÜRDE?
HATTEST DU AUFSCHLAG?
ICH HABE MIT MEINEM SCHLÄGER DORTHIN IM RAUM GESCHLAGEN, WO VIELLEICHT DER BALL WAR.
WO IST ER?
ER IST IRGENDWIE ÜBERALL.
KLATSCH!
ICH BIN MIR NICHT GANZ SICHER, ABER MIT EINER GEWISSEN WAHRSCHEINLICHKEIT KÖNNTE ICH DEN BALL ZU DIR ZURÜCKGESCHLAGEN HABEN.
MAN KÖNNTE ABER MIT EINER GEWISSEN WAHRSCHEINLICHKEIT AUCH ANNEHMEN, DASS DER BALL IM NETZ GELANET IST?
WIESO SPIELT IHR JUNGS NICHT MIT EINEM NORMALEN BALL?
DAS MACHT DOCH KEINEN SPAß.

Welle-Teilchen-Dualismus

Welle oder Teilchen?

Jedes Stück Materie in unserer Welt besteht aus Molekülen. Diese Moleküle sind eine Ansammlung von verschiedenen, zusammenhängenden Atomen. Mit genügend Energie kann man die Atome in ihre Bestandteile zerlegen: die Elementarteilchen (↗[1]). Soweit wir heute wissen, sind die Elementarteilchen aus nichts Weiterem zusammengesetzt, sondern bilden die fundamentalen Bausteine unserer Materie.

Aber was genau sind diese Elementarteilchen? Sind sie „Dinge“? Unser Gefühl für „Dinge“ ist sehr speziell – und wir sind so sehr daran gewöhnt, dass es schwer fällt, sich etwas anderes darunter vorzustellen. Makroskopische Objekte scheinen eine Reihe wichtiger Eigenschaften zu haben: Sie sind „fest“, also da, wo ein Ding ist, kann kein weiteres sein. Das ist eng damit verknüpft, dass ein Objekt immer an einem Ort sein muss, und nirgendwo sonst. Natürlich kann ein Objekt auch ausgedehnt sein und ein bestimmtes Volumen besitzen. Aber in dem Fall können wir es auch immer in kleine Stücke zerlegen. Wir können es uns daher auch als ein aus vielen Einzelteilen zusammengebautes Objekt vorstellen. Ganz ähnlich ist die Sache bei Flüssigkeiten: Wir können zwar eine Flüssigkeit in eine andere hineinschütten, aber insgeheim wissen wir, dass sich dabei nur die kleinen Bausteine vermischen, die die Flüssigkeit ausmachen.



Eine andere wichtige Besonderheit von „Dingen“ ist, dass sie bestimmte physikalische Eigenschaften haben, so wie eine Position (also wo sich ein Ding befindet), Geschwindigkeit (wie schnell es sich bewegt) und einige andere, so wie Energie, Drehimpuls und dergleichen. Selbst wenn wir nicht alle Werte von diesen Eigenschaften genau kennen, wissen wir immer, dass ein „Ding“ sie haben muss.

Elektronen verhalten sich wie Wellen …

Bedauerlicherweise stimmt nichts von dem, was wir eben beschrieben haben, wenn es um Elementarteilchen geht! Nehmen wir zum Beispiel das Elektron. Es gehört zu den eher leichten Teilchen, und es ist Träger der Elektrizität. Wenn ein elektrischer Strom fließt, liegt das an den Elektronen, die sich im Kabel in eine Richtung bewegen. Ein Elektron ist – wie alle anderen Elementarteilchen auch – ein sehr merkwürdiger Bursche. Statt sich klassisch zu verhalten, handelt es stets nach den Regeln der Quantenmechanik. Es hat beispielsweise keine genaue Position. Das bedeutet, es ist nicht einfach „hier, aber nicht dort“, sondern es gibt lediglich bestimmte Wahrscheinlichkeiten, das Elektron an einem bestimmten Punkt zu treffen. Beschrieben werden diese Wahrscheinlichkeiten durch die Wellenfunktion des Teil-

↗[1]: *„Atome vs. Elementarteilchen“ auf Seite 209*

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_36

chens. Man kann sie sich wie eine Wasserwelle vorstellen, die sich an der Oberfläche bewegt. Dort, wo die Amplitude der Welle sehr groß ist – mit anderen Worten: wo sich die Wasseroberfläche besonders stark bewegt – ist die Wahrscheinlichkeit, das Elektron zu finden, sehr groß. Und an den Punkten, wo die Amplitude verschwindet – die Wasseroberfläche also still steht – findet man das Elektron mit großer Wahrscheinlichkeit nicht.

Die Analogie mit den Wasserwellen geht sogar noch weiter: die Wahrscheinlichkeit, das Elektron zu finden, kann sogar gestreut oder reflektiert werden, und noch vieles mehr, was man auch mit einer Wasserwelle anstellen könnte. Ein charakteristisches Beispiel haben wir im Kapitel über das Doppelspalt-Experiment beschrieben (↗[2]).

… aber auch wie Teilchen!

Wir wollen daran erinnern, dass das nicht bedeutet, dass man ein Elektron in zwei Teile aufteilen kann, indem man seine Wellenfunktion aufteilt. Es gibt immer nur ein Elektron, und es hat immer dieselbe Masse und Ladung. Zwar kann man die Wellenfunktion des Elektrons aufteilen, so dass eine Hälfte in die eine und die andere in eine andere Richtung weiterläuft. Aber das bedeutet lediglich, dass wir, wenn wir nachsehen, das Elektron entweder in der einen oder in der anderen Richtung finden – und zwar mit jeweils 50 % Wahrscheinlichkeit, falls die Wellenfunktion gleichmäßig aufgeteilt wurde.



Was sind sie? Beides!

Der Welle-Teilchen-Dualismus von Elektronen (und anderen Elementarteilchen) kann auf die folgende, sehr einfache Art und Weise zusammengefasst werden: Das Elektron ist ein einzelnes, unteilbares Teilchen. Aber die Art, wie sich dieses Teilchen von einem Ort zum anderen bewegt, gleicht der Bewegung einer Welle.

Es gibt in der Tat noch einige weitere seltsame Eigenschaften von Quantenteilchen, die alle auf die eine oder andere Art mit dem Welle-Teilchen-Dualismus zu tun haben. Zum Beispiel kann man ein Elektron dazu bringen, gleichzeitig in zweiverschiedene Richtungen zu fliegen (↗[2]). Man kann es auch spontan ein eigentlich unüberwindbares Hindernis überwinden lassen, an dem es normalerweise nicht vorbei käme (↗[3]). Es ist auch sehr schwierig, den genauen Ort eines Elektrons zu bestimmen, zumindest, wenn man außerdem noch wissen will, wie schnell es ist (↗[4]). Ganz allgemein kann

↗[2]: *„Das Doppelspalt-Experiment“ auf Seite 151*
↗[3]: *„Der Tunneleffekt“ auf Seite 167*
↗[4]: *„Heisenbergsche Unschärferelation“ auf Seite 155*
↗[5]: *„Schrödingers Katze“ auf Seite 159*

ein Elektron an mehreren Orten gleichzeitig sein – zumindest bis man genau hinsieht (↗5).

Wieso ist ein Stuhl aus schrägen Teilchen nicht auch schräg?

Nun gut, wir wissen also, dass die mikroskopische Welt anders ist als die makroskopische Welt: Die Objekte aus unserem Alltag verhalten sich klassisch, aber Elementarteilchen folgen stattdessen den Regeln der Quantenmechanik. Doch Moment – hatten wir nicht gesagt, dass makroskopische Objekte, also etwa Tische, Stühle, Steine und Muffins im Prinzip aus jeder Menge Elementarteilchen zusammengesetzt sind? Wieso verhält sich also etwas, das aus Quantenteilchen zusammengesetzt ist, nicht selbst quantenhaft? Wieso benimmt sich ein Stein nicht wie ein Elektron?

Um diese Frage zu beantworten, muss man wissen, dass die Ausbreitung der Wellenfunktion eines Elektrons in beispielsweise einem Stein nur ein paar wenige Ångström, also 10^{-10} m, beträgt. Erinnern wir uns: Das ist nicht die Größe eines Elektrons, sondern die Region, in der man es mit größter Wahrscheinlichkeit antrifft. Die Wellenfunktionen von anderen Teilchen in dem Stein, so wie Protonen und Neutronen, sind noch einmal um den Faktor 2000 kleiner. Aber der Stein selbst besteht aus Millionen von Milliarden von Milliarden von Teilchen (10^{24}, eine gigantische Zahl) und hat normalerweise einen Durchmesser von ein paar Zentimetern.



Der Stein selbst hat also relativ wenig Quantenunschärfe: Die Teilchen in seinem Inneren hüpfen zwar ein paar Ångströms hin und her, aber im Mittel bleibt der Stein, wo er ist. Vielleicht gibt es eine kleine Unschärfe, was den Aufenthaltsort seiner Oberfläche betrifft. (wo also der Stein aufhört und wo die Luft beginnt), aber diese Unsicherheit hat eben nur die Größe von maximal einigen wenigen Ångström. Das ist zu wenig, als dass wir es merken würden.

Ein anderes Beispiel: Wenn ein Elektron auf eine nicht zu dicke Wand trifft, gibt es eine gewisse Wahrscheinlichkeit, dass es verschwindet und auf der anderen Seite wieder auftaucht („Tunneleffekt“, ↗2). Sagen wir, diese Wahrscheinlichkeit wäre 10 %. Wenn man einen Stein gegen eine Wand wirft und dieser dann auch verschwinden und auf der anderen Seite wieder auftauchen sollte, müssten alle Elektronen durch die Wand tunneln! Die Wahrscheinlich, dass so etwas passiert, ist 10^{-24}, bzw. 10^{-22} %! Hätte man also seit Anbeginn der Zeit Steine auf eine Wand geworfen (14 Milliarden Jahre, also $4 \cdot 10^{17}$ Sekunden), wäre die Chance, dass der Stein durch die Wand getunnelt wäre, immer noch gerade mal eins zu zehn Millionen! Es ist also einfach total unwahrscheinlich, makroskopische Objekte dabei zu beobachten, wie sie sich quantenhaft verhalten.




DOPPELSPALT-
VERSUCHSLABOR
BESUCHER
ANGESTELLTE
TEILNEHMER

Das Doppelspalt-Experiment

Über die Verrücktheit der Quantenwelt

Quantenmechanik ist schräg. Richard Feyman sagte über sie „Niemand versteht sie“. Damit meinte er übrigens nicht, dass man mit den Gesetzen der Quantenmechanik keine genauen Vorhersagen machen könne – das geht schon. Er meinte vielmehr, dass die Gesetze selbst ziemlich seltsam seien. Sie stellen sich gegen das Verständnis, das wir von Natur aus über unsere Umwelt haben. Das mag jetzt etwas überheblich klingen, aber: So ist es eben. Das beste Beispiel für das seltsame Verhalten der Quantenmechanik zeigt sich im sogenannten Doppelspalt-Experiment.

Das Doppelspalt-Experiment kennen alle Physiker: Es ist einer der direktesten Nachweise dafür, dass sich mikroskopische Elementarteilchen völlig anders verhalten als makroskopische Objekte aus unserem Alltag. Bis heute beginnen die meisten Einführungsvorlesungen zur Quantenmechanik mit der Beschreibung des Doppelspalt-Experiments. Es ist übrigens nicht nur ein Gedankenexperiment, so wie Schrödingers Katze. Im letzten Jahrhundert wurde das Experiment unzählige Male durchgeführt, um zu zeigen, wie eigenartig die Quantenmechanik ist.



Das Experiment: Lasst keine Elektronen durch!

Das Experiment geht so: Stellen wir uns eine Wand vor, mit zwei vertikalen Schlitzen nebeneinander, durch die man durch die Wand schauen kann. Vor die Wand stellt man eine Elektronenkanone, die auf die Spalte zielt. Schießt man mit der Kanone, fliegt aus ihr ein durchgehender Strahl von Elektronen in Richtung Wand. Hinter die Wand stellt man einen dunklen Schirm, der für Elektronen empfänglich ist. Jedes Mal, wenn ihn ein Elektron trifft, erscheint ein weißer Punkt. So kann man genau sehen, wo der Schirm getroffen wurde.

Die Frage ist: Wenn man die Kanone vor der Wand anschaltet, welches Muster wird man auf dem Schirm dahinter erkennen?

Okay, fangen wir mal mit einer leichteren Frage an: Kleben wir einen Spalt ab (mit irgendetwas, das keine Elektronen durchlässt). Damit haben wir eine Wand mit einem schmalen Loch. Was wird beim Schuss mit der Elektronenkanone passieren? Nun, die meisten Elektronen landen an der Wand. Aber einige treffen genau den Spalt und fliegen durch. Diese treffen dann auf den Schirm und hinterlassen einen kleinen, hellen Punkt. Lässt man die Kanone eine Weile laufen, sieht man ein weißes Abbild des Spaltes auf dem Schirm (eine Art „invertierter Schatten“). Wenn man nun den offenen Spalt abklebt und den anderen wieder öffnet, sieht man ein Abbild des anderen Spaltes auf dem Schirm. Soweit, so vorhersehbar.

Jetzt aber wird es seltsam: Was passiert, wenn man beide Spalte gleichzeitig öffnet? Jeder normale Mensch (einschließlich der Physiker, die vor dem Ende des 19. Jahrhunderts lebten) würden sagen: Nun ja, die Elektronen, die nicht gegen die Wand

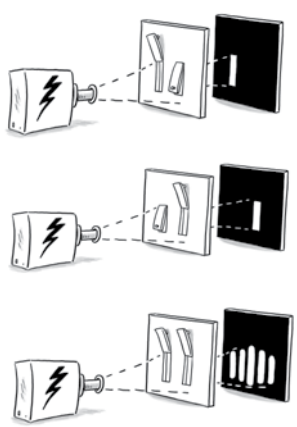
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_37

knallen, gehen entweder durch den einen oder den anderen Spalt. Und da beide offen sind, wird man auf dem Schirm die Abbildungen von beiden sehen.

Falsch! Das ist nicht, was man sieht. Stattdessen erscheint ein sogenanntes Interferenzbild auf dem Schirm. Es sieht ein wenig wie ein Zebrastreifen aus, der von links nach rechts läuft: es gibt einige vertikale Linien nebeneinander, wo viele Elektronen ankamen. Zwischen je zwei Linien ist ein dunkler Streifen, wo keine Elektronen ankamen.

Ein Teilchen interagiert mit sich selbst in einer anderen Realität

Der Grund, weshalb dieses seltsame Bild entsteht, liegt in den Quanteneigenschaften der Elektronen. Obwohl es verlockend ist, sie sich als kleine Punkte vorzustellen, die in geraden Linien durch die Gegend fliegen, hat das nichts mit der Realität zu tun. Vielmehr verhält sich die Wahrscheinlichkeit, wo das Elektron gerade ist, wie eine Welle, beschrieben durch eine sogenannte Wellenfunktion (↗[1]).



Diese erstreckt sich nun in den Raum: Die Elektronen befinden sich nicht bloß an einem Ort, sondern sind mit bestimmten Wahrscheinlichkeiten an verschiedenen Orten anzutreffen. Die Wellenfunktion eines Elektrons kann also gleichzeitig durch beide Spalte gehen. Mehr noch: Die beiden Teile der Wellenfunktion treffen hinter der Wand wieder aufeinander und interferieren – wie es sich für anständige Wellen gehört – und erzeugen ein Muster auf dem Schirm.

Wenn die beiden Teile der Welle den Schirm treffen, können zwei Extremfälle eintreten: Entweder sind beide Wellen bei ihrem Minimum oder Maximum. Dann ist die resultierende Welle die Summe von beiden und hat eine richtig hohe Amplitude. An diesen Orten trifft das Elektron mit großer Wahrscheinlichkeit auf den Schirm und man spricht von konstruktiver Interferenz. Die andere Möglichkeit ist, dass eine Welle am Maximum ist, die andere am Minimum. Sie heben sich dann gegenseitig auf, und die Amplitude der Gesamtwelle ist null. Du hast es sicher schon erraten: Das nennt man „destruktive Interferenz“. Hier ist auch die Wahrscheinlichkeit gleich null, das Elektron zu treffen. Diese Stellen auf dem Schirm sind ein wenig so wie Orte im Raum mit schlechter Akustik: Die Tonwellen interferieren destruktiv miteinander, und als Resultat kann man fast nichts mehr hören, wenn man dort steht. Bei einem Konzert hast du sicher schon mal einen solchen Ort entdeckt.

„Aber Moment mal, das ist doch Quatsch“, höre ich dich sagen, „ein Elektron kann nicht gleichzeitig durch beide Spalte gehen. Entweder links oder rechts! Und hinter der Wand knallen dann die, die links lang liefen, gegen die anderen und verursachen das seltsame Muster. Könnte man das nicht auch so interpretieren?“

Ein netter Gedanke, aber das ist leider nicht, was wirklich passiert. Man kann die Intensität der Kanone so weit herunterdrehen, dass nur noch alle paar Sekunden ein Elektron abgeschossen wird. Ein Elektron nach dem anderen wird nun einen Punkt

↗[1]: *„Welle-Teilchen-Dualismus“ auf Seite 147*

auf dem Schirm hinterlassen. Aber wenn man ein paar Stunden wartet und genug Punkte da sind, sieht man wieder das Interferenzmuster! Das Muster kann also nichts damit zu tun haben, dass zwei oder mehrere Elektronen miteinander reagiert haben – es ist ja immer nur eines unterwegs. Und dieses Elektron geht gleichzeitig durch beide Spalte und interferiert mit sich selbst. Du kannst in deinem Labor sogar auch nur ein einzelnes Elektron auf den Schirm schießen. Wenn du das Experiment dann an vielen Orten der Welt wiederholst und alle einzelnen Punkte übereinander legst, bekommst du wieder das gleiche Interferenzmuster als Ergebnis.



Nicht schummeln: keine Interferenz, sobald du nachsiehst

„Von mir aus“, kannst du sagen, „ich glaube es aber trotzdem nicht. Was ist, wenn ich einen kleinen Detektor in die Spalte einbaue, der prüft, wo das Elektron durch ging? Als pfiffige Ingenieure müssten wir doch diese Detektoren so sensitiv machen können, dass sie das Elektron messen, ohne die Flugbahn dabei zu stören.“

Ja, man könnte solche Detektoren bauen. Und mit ihnen könnte man das Experiment durchführen und sich jedes Mal notieren, welchen Weg das Elektron gegangen ist. Wenn wir das tun, können wir beobachten, wie sich ein Elektron mit einer 50/50 Wahrscheinlichkeit links oder rechts durch den Spalt bewegt. Manchmal gehen die Elektronen durch den einen, manchmal durch den anderen. Wir werden aber auch noch etwas anderes feststellen: Das Interferenzmuster auf unserem Schirm verschwindet! Stattdessen erscheint das Muster, das wir ganz am Anfang vermutet hatten, als wir von Quantenmechanik noch keine Ahnung hatten: wir sehen eine Abbildung der beiden Spalte, einer neben dem anderen!

Und so läuft der Hase mit der Quantenmechanik: Da wir Informationen darüber bekommen haben, welchen Weg das Elektron nimmt, hat es für einen Moment aufgehört, sich wie eine Welle zu verhalten. Stattdessen benahm es sich wie ein Teilchen, wie eine kleine Kanonenkugel, die perfekt in unser Verständnis eines „Teilchens“ passt, und ist durch einen der Spalte geflogen, statt durch beide gleichzeitig. Und daher liefert auch das Bild ein normales, klassisches Muster, ganz ohne Welleneigenschaften.

Aber das tut das Elektron nur, weil wir es gemessen haben, insbesondere seine Position bei den Spalten. Entfernen wir die Detektoren an den Spalten, kehrt das Muster auch wieder zurück. Das ist ein wunderschönes Beispiel dafür, wie ein Messprozess das Objekt stört, das er messen soll. Das ist ein wichtiger Punkt, den man oft mit der Quantenmechanik in Verbindung bringt.

So schwer das alles auch zu glauben ist, es ist wahr. Um es nochmal zu wiederholen: Diese Experimente werden ständig wiederholt und bestätigen immer wieder aufs Neue die Quantenmechanik. Und selbst, wenn die Gesetze der Quantenmechanik oft im Gegensatz zu unserer menschlichen Intuition stehen, müssen wir damit klarkommen, dass die Natur eben so funktioniert: Auf fundamentaler Ebene ist sie viel komplizierter und verwunderlicher, als wir uns das vorstellen. Das Universum tut uns nicht den Gefallen, unseren Erwartungen zu entsprechen.



"Der Standort ist überbewertet. Wie wäre es mit dieser wunderschönen ungewissen Adresse, die wahrscheinlich in der Nähe von irgendwas oder auch was anderem liegt?"

Heisenbergsche Unschärferelation

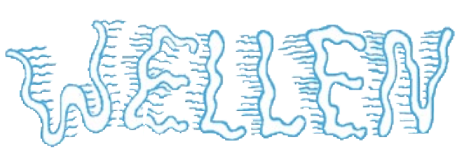
Man kann nicht beides haben

Wir haben es schon angesprochen, und werden es wahrscheinlich noch einige Male tun: Die Quantenwelt ist verrückt. Die Elementarteilchen, aus denen alle Materie besteht (zumindest die, die wir kennen), verhält sich auf eine seltsame und jeglicher Intuition widersprechenden Art. Der Kern von alledem liegt im Welle-Teilchen-Dualismus (↗[1]). Obwohl die Elementarteilchen unteilbar und fundamental sind (soweit wir wissen), bewegen sie sich nicht wie kleine, harte Bälle. Stattdessen gleicht die Art, wie sie sich bewegen, vielmehr der von Wellen.

Ort und Geschwindigkeit: Man kann nicht beide genau kennen

Eine der besser bekannten Folgen davon ist die Heisenbergsche Unschärferelation. Sie wird oft wie folgt formuliert: „Man kann den Ort und die Geschwindigkeit eines Teilchens nicht gleichzeitig messen." Anders kann man auch sagen: „Jeder Messprozess ändert das Objekt, das wir messen. Will man messen, wo ein Teilchen ist, ändert man es dabei zwangsläufig so, dass man nicht mehr weiß, wie schnell es ist."

Das klingt plausibel, weshalb diese Formulierung über Jahrzehnte immer wieder gern verwendet wurde. Aber sie geht am Wesentlichen vorbei. Es stimmt, dass jede Messung eines Teilchens dessen Zustand verändert, aber das hat nichts mit der Heisenbergschen Unschärferelation zu tun. Die Heisenbergsche Unschärferelation besagt, dass ein Teilchen keine wohl definierte Position und Geschwindigkeit zur gleichen Zeit hat. Es geht also nicht darum, was wir von dem Teilchen wissen, sondern in welchem Zustand es sich befindet.



Alles dreht sich um die Welle

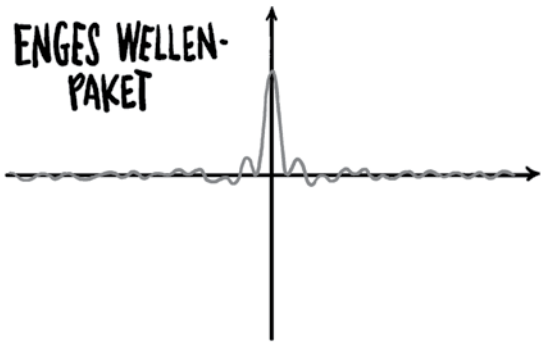
Die Tatsache, dass sich Teilchen wie Wellen verhalten, bildet den Kern der Unschärferelation. Genauer gesagt geht es darum, dass die Wahrscheinlichkeit, ein Teilchen anzutreffen, dort am größten ist, wo die Amplitude der entsprechenden Welle am höchsten ist. Die Geschwindigkeit eines Teilchens ist hingegen dann groß, wenn die Frequenz der Welle groß ist (oder auch: wenn die Wellenlänge klein ist). Wenn wir das wissen, können wir erklären, wieso ein Teilchen nicht gleichzeitig eine genaue Position und Geschwindigkeit haben kann.

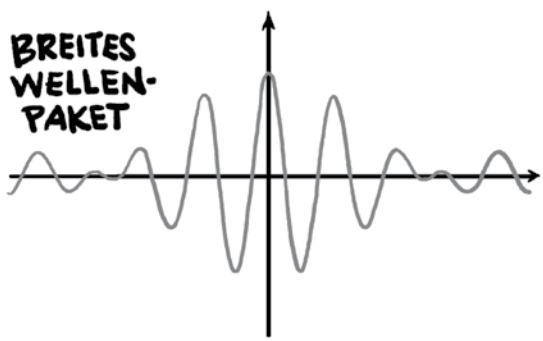
Frequenz und Amplitude

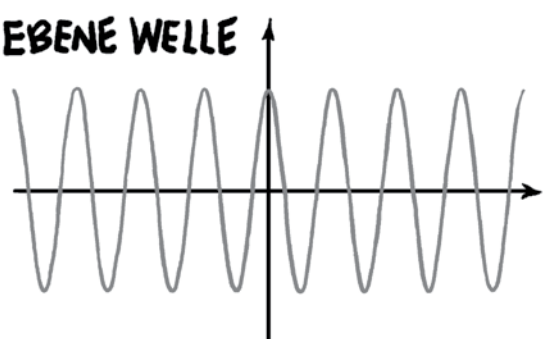
Nehmen wir an, wir sind sicher, dass sich ein Teilchen in einer ganz bestimmten, kleinen Region aufhält. Anders gesagt hat das Teilchen in dieser Region eine sehr große Amplitude. Außerhalb dieser kleinen Region muss die Amplitude bzw. die Wellenfunktion dann wieder sehr klein werden. Sie würde wie eine schmale Spitze aussehen, die sich auf einen sehr kleinen Ort konzentriert. An diesem Ort würden wir dann das Teilchen antreffen, wenn wir danach suchen.

↗[1]: *„Welle-Teilchen-Dualismus" auf Seite 147*

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_38







Eine der Eigenschaften von Wellen ist aber, dass sie normalerweise aus vielen verschiedenen Frequenzen bestehen. So wie weißes Licht von der Sonne alle Farben des Spektrums enthält (und daher die entsprechenden elektromagnetischen Wellen alle möglichen Wellenlängen, ↗[2]), enthalten Wellenfunktionen viele verschiedene Frequenzen. Entscheidend ist jetzt, dass eine Wellenfunktion jede Menge Frequenzen enthalten muss, um sich auf einen sehr kleinen Ort zu konzentrieren („enges Wellenpaket“). Je schmaler man ein Wellenpaket machen will, desto mehr Frequenzen braucht man dafür.

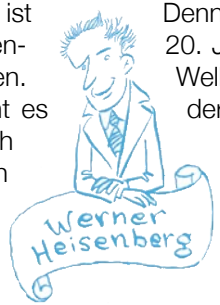
Das ist der Kern der Unschärferelation: Ein Teilchen, das mit hoher Wahrscheinlichkeit in einer sehr eng umgrenzten Region angetroffen wird, muss eine Wellenfunktion mit einer großen Zahl verschiedener Frequenzen besitzen – ist die Position genau bekannt, ist die Geschwindigkeit (die der Frequenz entspricht) total unbestimmt. Und es funktioniert auch andersherum: Nehmen wir nur einige wenige Frequenzen (und damit nur wenige verschiedene Geschwindigkeiten), verteilt sich der Aufenthaltsort über einen größeren Raum („breites Wellenpaket“). Will man nun ein Teilchen mit einer ganz genau bekannten Geschwindigkeit haben, braucht man eine Wellenfunktion mit nur einer Frequenz („ebene Welle“). Das ist aber eine Sinus-Welle, die sich in beide Richtungen unendlich weit ausbreitet und überall die gleiche Amplitude hat. Ist die Geschwindigkeit also genau bekannt, ist es der Ort überhaupt nicht.

Die Unschärferelation der Musiker

Was wir eben beschrieben haben, ist übrigens nicht nur eine schräge Seite der Quantenmechanik – es trifft auf alle Wellen zu, auch für die aus unserem Alltag!

↗[2]: *„Licht“ auf Seite 7*

Ein schönes Beispiel dafür sind Schallwellen. Es gibt sogar eine „Unschärferelation für Musiker“! Bei einer Schallwelle legt die Amplitude fest, wie laut ein Ton ist. Die Frequenz bestimmt die Tonlage. Und so läuft das Ganze: „Will man genau hören, in welcher Tonlage jemand spielt, muss man den Ton eine bestimmte Zeit lang hören. Je niedriger der Ton, desto länger die Zeit, die man ihn hören muss, um ihn zu erkennen.“ Das menschliche Ohr ist ziemlich gut darin, verschiedene Frequenzen von Schallwellen zu unterscheiden. Aber durch die Natur der Wellen braucht es dafür eine gewisse Zeit. Man kann es auch anders sagen: Will man zwei Frequenzen unterscheiden, die sehr nahe beieinander liegen, muss man sich den Ton länger anhören. Je genauer die Frequenz bekannt ist, desto weniger konzentriert darf die Welle dann sein (desto länger muss man den Ton spielen).



Das ist übrigens ziemlich wichtig für Menschen, die in einem Orchester spielen. Alle Musiker dort kennen das Phänomen, auch wenn vielleicht nur aus der Erfahrung. Die Instrumente, die nur sehr kurze Töne spielen, müssen nicht besonders genau gestimmt werden. Das liegt daran, dass das menschliche Ohr in dieser kurzen Zeit einfach nicht unterscheiden kann, ob der Ton nun genau getroffen wurde oder nicht. Auf der anderen Seite müssen die Instrumente, die üblicherweise lange Töne spielen müssen (z.B. Violinen) sehr genau gestimmt werden. Je länger ein Ton gespielt wird, desto einfacher kann man erkennen, wenn nicht alle Violinen exakt den gleichen Ton spielen.



Wenn du möchtest, kannst du die Unschärferelation für Musiker selbst online testen (↗[3]).

Quanten-Seltsamkeit: selbst ohne Messung

Die Unschärferelation ist also gar nichts Ungewöhnliches – man kannte sie schon vor Heisenberg. Dennoch kam sie für die Physiker zu Beginn des 20. Jahrhunderts überraschend. Nicht aber, weil Wellen der Unschärferelation unterliegen, sondern weil sich Teilchen wie Wellen verhielten, und man ihnen daher nicht gleichzeitig einen genauen Ort und eine genaue Geschwindigkeit zuordnen konnte.

Neben der Formulierung der Heisenbergschen Unschärferelation für den Ort und die Geschwindigkeit eines Teilchens gibt es noch weitere. Man kann sie auch für die Energie eines Teilchens und den Zeitpunkt, an dem es die Energie hat, definieren (ähnlich wie bei der Unschärferelation für Musiker). Je kleiner das Zeitintervall, desto größer darf die Abweichung von einer bestimmten Energie sein. Nehmen wir mal ein Gluon (↗[4]). Für einen sehr kurzen Moment kann es sich Energie „leihen“ und sich in ein Quark/Antiquark-Paar umwandeln. Nach einiger Zeit aber müssen die Quarks sich wieder in ein Gluon umwandeln und ihre Energie zurückgeben. Deshalb können diese Teilchen, die wir „virtuelle Teilchen“ nennen, auch nur einen kurzen Moment existieren. Je kürzer der Moment, desto mehr Energie hat man zur Verfügung und desto mehr virtuelle Teilchen kann man erzeugen.

↗[3]: http://newt.phys.unsw.edu.au/jw/uncertainty.html
↗[4]: *„Die Starke Wechselwirkung“ auf Seite 233*



"Was meinen Sie damit, dass sie nicht wirklich tot ist, bis wir den Sarg öffnen?"

Schrödingers Katze

Gleichzeitig tot und lebendig

Wir haben schon viel über die Verrücktheit der Quantenwelt gesprochen (↗1,2,3). Viele der Skurrilitäten kommen vom Welle-Teilchen-Dualismus: Bei diversen Gelegenheiten zeigen Teilchen die Eigenschaften von Wellen. Aber das ist nicht der einzige Grund, weshalb uns die Quantenwelt so seltsam vorkommt. In Wahrheit ist die Welleneigenschaft der Teilchen etwas, das wir mittlerweile sogar sehr gut verstanden haben. Es gibt aber noch einen anderen Teil der Quantenwelt, der in der Tat jeglicher Vernunft zu widersprechen scheint und regelrecht mysteriös ist. Es ist die Tatsache, dass wir die Wellennatur nicht direkt beobachten können, sondern stattdessen nur ihre Auswirkungen.

Superposition von Zuständen

Du hast vielleicht schon den Artikel über das Doppelspalt-Experiment gelesen (↗2). Ein Quantenteilchen kann sich in einer Überlagerung von Zuständen befinden. Eine physikalische Eigenschaft kann dann mehrere Zustände gleichzeitig besitzen! Ein Teilchen kann zum Beispiel zwei verschiedene Wege gleichzeitig gehen. Das an sich ist für eine Welle nichts Überraschendes – was aber so mysteriös ist: Sobald wir eine Messung machen, also z.B. nachsehen, wo das Teilchen gerade ist, zerstören wir unwiderruflich die Überlagerung an Zuständen. Wir können die Überlagerung nie direkt beobachten: Wann immer uns ein Teilchen genau anschauen, „entscheidet" es sich für die eine oder andere Möglichkeit. Und es gibt keine Möglichkeit, vorher herauszufinden, wofür sich das Teilchen entscheiden wird – wir können nur die Wahrscheinlichkeiten berechnen, mit der jede der Möglichkeiten ausgewählt wird.



Schrödinger und seine Katze: ein Gedankenexperiment

„Einen Moment", sagte ein österreichischer Physiker namens Erwin Schrödinger im Jahre 1935, „das ist wirklich sehr seltsam!" Er entwickelte das folgende Gedankenexperiment: Man nehme radioaktives Material (↗4), das eine bestimmte Halbwertszeit hat. Das ist die Zeit, die es dauert, bis (im Mittel) die Hälfte aller zugehörigen Teilchen zerfallen sind. Was passiert, wenn man nur ein einziges Atom dieses Materials hat? Anfangs befindet es sich jedenfalls in einem Zustand „Teilchen ist noch da". Nach der Halbwertszeit wird es sich jedoch in einem Quantenzustand befinden, der eine Überlagerung aus „Teilchen ist da" und „Teilchen ist zerfallen" darstellt. Es ist sowohl da als auch nicht, in einer Quantenüberlagerung beider Zustände.

↗1: *„Welle-Teilchen-Dualismus" auf Seite 147*
↗2: *„Das Doppelspalt-Experiment" auf Seite 151*
↗3: *„Heisenbergsche Unschärferelation" auf Seite 155*
↗4: *„Radioaktive Zerfälle" auf Seite 171*

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_39

„Was aber passiert“, fragte Schrödinger, „wenn wir das radioaktive Atom in eine Box stecken, und zwar zusammen mit einem Detektor, der Folgendes macht: Sobald er den Zerfall des Atoms feststellt, setzt er ein tödliches Gift in der Kiste frei. Außerdem kommt noch eine Katze in die Kiste. Dann wird die Kiste gut verschlossen, so dass kein Licht und kein Ton aus der Kiste kommen kann.“



Nachdem nun die Halbwertszeit vergangen ist, so argumentierte Schrödinger, ist das radiaktive Atom im Überlagerungszustand von „zerfallen“ und „nicht zerfallen“. Der Detektor wäre also in einem Überlagerungszustand aus „Gift freigelassen“ und „Gift nicht freigelassen“. Und die Katze selbst wäre in einem Überlagerungszustand von „tot“ und „lebendig“.

Was würde also passieren, wenn man die Kiste öffnet? Die Katze ist sowohl tot als auch lebendig, und sobald wir hineinschauen, „entscheidet“ sich das Universum und wir sehen entweder eine tote oder eine lebendige Katze? Das wäre doch total verrückt!

Die Katze ist gleichzeitig tot und lebendig – aber wieso?

Schrödinger stellte seine Idee damals vor, um zu zeigen, wie seltsam es wäre, die Konzepte der Quantenmechanik auf makroskopische Objekte aus unserer „realen Welt“ zu übertragen. Das unterstreicht aber nur eine andere wichtige Frage der Quantenphysik, für die wir keine wirklich Antwort haben: Wo ist die Grenze zwischen der Quantenwelt und der klassischen Welt? Oder, anders gesagt: Was bedeutet es eigentlich, etwas zu messen? Man könnte zum Beispiel Folgendes sagen: „Schrödingers Katze ist wegen des Detektors gar nicht in einer Überlagerung aus zwei Quantenzuständen. Der Detektor misst, ob das Atom zerfallen ist oder nicht. In dem Moment findet also die Messung statt. Das Gift wird entweder freigesetzt oder nicht, aber nicht beides.

Das ist sogar ein triftiges Argument. Aber leider ist es falsch. Und das kann man tatsächlich beweisen, nämlich mit einem Experiment, das man „Quantenradierer“ nennt. Es handelt sich dabei um ein Experiment, bei dem zum Glück keine Katze umgebracht, in dem aber dennoch eine Quantenüberlagerung zweier Zustände erzeugt wird. Dann wird eine Messung durchgeführt, die prüft, welcher der beiden Zustände von dem System angenommen wurde. Nach den Regeln der Quantenmechanik sollte das die Überlagerung zerstören. Tatsächlich aber passiert Folgendes: Wenn man die Information über das Messergebnis löscht, ohne sie jemals gelesen zu haben, dann wurde auch die Überlagerung nicht zerstört. Es geht also anscheinend nicht darum, ob eine Messung durchgeführt wurde. Vielmehr ist anscheinend von Bedeutung, ob jemand den Ausgang des Experiments kennt!

Das ist nun aber wirklich eigenartig. Es gibt keine gute physikalische Definition von „kennen“. Man könnte die Frage zu Schrödingers Katze auch folgendermaßen umformulieren: Wieso findet die Messung statt, wenn der Physiker die Kiste öffnet, und nicht wenn die Katze erkennt, dass das Gift freigesetzt wurde? Eine Katze kann schon etwas

erkennen, oder? Kann die Katze also auch eine Messung durchführen?

Wigners Freund: auch in einer Überlagerung?

Wenn man die Bedeutung des Messprozesses genau nimmt, kann man das Gedankenexperiment mit Schrödingers Katze noch einen Schritt weiter denken: Die Idee dazu kommt von dem Physiker Eugene Wigner und geht folgendermaßen: Wigner möchte das Experiment mit Schrödingers Katze durchführen und hat soweit alles vorbereitet. Aber Wigner selbst ist ein ziemlich empfindlicher Typ und hat Angst davor, eine vergiftete Katze vorzufinden. Er wartet also vor dem Labor und schickt seinen Freund hinein. Dieser Freund schaut dann in die Kiste und prüft, ob die Katze tot oder lebendig ist. Danach geht er hinaus und erzählt es Wigner.

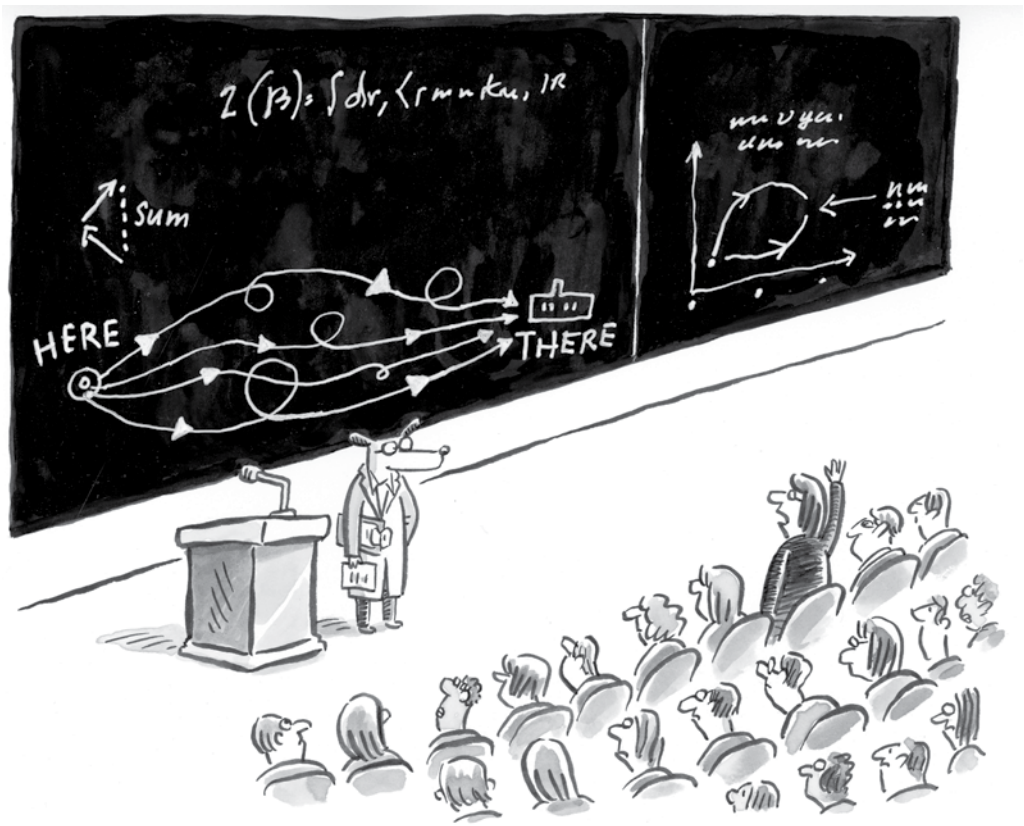


Was passiert in den wenigen Sekunden zwischen dem Öffnen der Kiste und der Mitteilung an Wigner? Wenn man das vorhin Gesagte wörtlich nimmt, nämlich dass es beim Messprozess nicht darum geht, etwas gemessen zu haben, sondern darum, ob eine Information existiert oder nicht, muss man Folgendes schließen: In dem Moment, in dem Wigner die Kiste öffnet, ist das kombinierte System „Wigners Freund und Katze“ in einem Überlagerungszustand aus „Katze ist tot und Wigners Freund entschließt sich dazu, Wigner zu sagen, besser draußen zu bleiben“ und „Katze lebt und Wigners Freund kann Wigner sagen, dass er reinkommen kann“. In dem Moment, wo Wigners Freund die Labortür öffnet und zu Wigner spricht, kollabiert die Wellenfunktion und das Universum entscheidet sich, welchen Zustand das System aus Wigners Freund und Katze nun einnimmt. Aber … wo hört das Ganze auf? Hat Wigner dir schon von dem Ergebnis erzählt? Nein? Nun, dann ist wohl das System aus der Katze, Wigner, seinem Freund und allen Menschen, die er bisher getroffen hat, in einem großen überlagerten Zustand aus „all dem, was passiert, wenn die Katze tot ist“ und „all dem, was passiert, wenn die Katze lebt“. Zumindest bis du ihn fragst. Und ab dann wirst auch du Teil des Zustands des Gesamtsystems. Puh. Ab hier wird die ganze Diskussion schon recht metaphysisch. Aus dem Grund geben die meisten Physiker an dieser Stelle auf und genehmigen sich einen Drink, oder auch drei, bis der Kopfschmerz weggeht.



Bis heute hat niemand wirklich verstanden, was es im Sinne der Quantenmechanik bedeutet, „eine Messung durchzuführen“. Wo ist die Grenze zwischen der Quantenwelt und der klassischen Welt? Vielleicht werden wir es nie erfahren. Aber wir können mit Sicherheit sagen, dass Schrödingers Katze viele Generationen von Physikern inspiriert hat. Sie erinnert uns daran, dass wir Quantenphysik mit all ihren Seltsamkeiten noch immer nicht verstanden haben.





"Herr Professor, wenn ich Sie richtig verstanden habe, ist das hier nicht die Vorlesung über Pfadintegrale, sondern es handelt sich nur um die Pfade, die man gehen muss, um zu Ihrer Vorlesung über Pfadintegrale zu gelangen?"

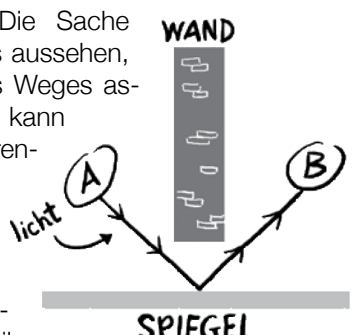
Feynman-Pfade

Realität als Summe von Wahrscheinlichkeiten

Stell dir vor, du läufst am Strand entlang. Es ist ein schöner Tag, vielleicht etwas zu warm. Plötzlich siehst du einen Eis-Wagen. Ausgezeichnet! Doch Vorsicht: Es scheint, als würde der Eisverkäufer gerade die letzten Stückchen Eis aus seinen Kisten kratzen. Keine Zeit zu verlieren! Welchen Weg würdest du gehen, um am schnellsten zum Eis zu kommen? Den direkten, ist doch klar.



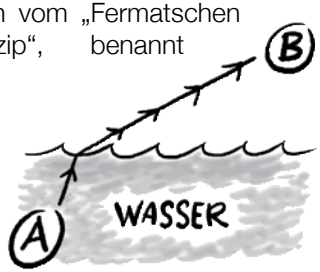
Wenn zwischen dir und dem Eis nur Sand liegt, ist der direkte auch sicher der schnellste. Die Sache kann aber anders aussehen, wenn ein Teil des Weges asphaltiert ist. Dort kann man schneller rennen, aber der Weg wäre nicht mehr direkt. Intuitiv würdest du den Weg optimieren und zum Teil auf Asphalt, zum Teil durch den Sand rennen. Das wäre dann nicht mehr der kürzeste Weg, aber der schnellste. Wusstest du, dass Licht demselben Prinzip folgt? Schaut man sich den Weg von Lichtstrahlen an, sieht man, dass Licht immer den schnellsten Weg nimmt. Mit diesem Prinzip kann man viele der fundamentalen Gesetze der Optik erklären.





Man kann das Ganze auch noch verallgemeinern zum „Hamiltonschen Prinzip“, welches besagt, dass die Wirkung eines jeden Prozesses entweder minimal oder maximal sein muss. Ziemlich abstrakt, aber einfach gesagt bedeutet es: Alles in der Natur ist optimiert.

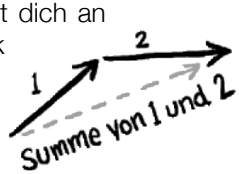
Zurück zum Licht, das den schnellsten Weg nimmt, um von A nach B zu gelangen. Man spricht dabei auch vom „Fermatschen Prinzip“, benannt nach dem Mathematiker Pierre de Fermat, der in der ersten Hälfte des 17. Jahrhunderts lebte. In unserem ersten Beispiel startet Licht von einer Lampe am Punkt A und wird am Punkt B beobachtet. Zwischen den beiden steht eine Wand, und unter der Wand liegt ein Spiegel.

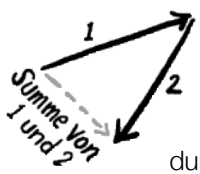


© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_40

Schauen wir uns alle möglichen Wege an, die das Licht gehen kann. Es gibt unendlich viele, und wir schauen uns mal nur diejenigen an, die aus geraden Verbindungen zum und vom Spiegel bestehen. Das sieht dann so aus wie in unserer Abbildung. Welcher ist der schnellste? Genau, der über den Punkt unter der Wand. Woher weißt du das? Entweder bist du dem Fermatschen Prinzip gefolgt und hast den schnellsten Weg genommen, oder du hast dich an das Reflexionsgesetz der Optik erinnert. Es besagt, dass der Einfalls- und Ausfallswinkel bei der Reflexion an einem Spiegel gleich sind.







Das zweite Beispiel entspricht dem Eiswagen und dem Asphalt. Ein Beobachter am Punkt B schaut auf das Licht aus einer Lampe unter Wasser am Punkt A. Da Licht im Wasser langsamer ist als an der Luft, wird es nicht mehr den direkten Weg nehmen. Der schnellste Weg ist stattdessen ein Kompromiss aus dem kurzen Weg durchs Wasser und dem schnellen durch die Luft. Unsere Abbildung zeigt ihn: Er hat einen Knick. Man nennt diesen Effekt „Brechung“ von Licht. Und der Brechungsindex n, den du vielleicht kennst, ist nichts anderes als die Geschwindigkeit von Licht im Vakuum geteilt durch die Geschwindigkeit in dem jeweiligen Medium.

Von der klassischen zur Quantenwelt

Bisher war die Antwort auf die Frage „Welchen Weg nimmt das Licht?“ immer „Den schnellsten!“. Gehen wir jetzt von der klassischen Welt in die Quantenwelt. Ein wichtiger Akteur in diesem Gebiet war Richard Feynman. Die Feynman-Diagramme (↗[1]), die die Wechselwirkung zwischen Elementarteilchen beschreiben, sind nach ihm benannt. Wichtig aber ist, dass Feynman nicht nur kleine Bildchen malte, sondern auch (zusammen mit anderen) das mathematische Gerüst entwickelte, das hinter den Bildchen steht. Im Rahmen der elektromagnetischen Wechselwirkungen spricht man dabei von der „Quantenelektrodynamik“ (QED). Eine Möglichkeit, Berechnungen in der QED durchzuführen, geht über die sogenannten „Pfadintegrale“. Dieser Formalismus (ziemlich schwierig, auch für Physikstudenten im höheren Semester) wird im Folgenden kurz erklärt. Es mag jetzt alles ziemlich abstrus klingen, hat aber sehr interessante Konsequenzen und kann einige Dinge auf vollkommen andere Art erklären. Wir halten uns dabei an eine sehr anschauliche Erklärung, die Feynman selbst in seinem Buch „QED – Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie“ benutzt hat.

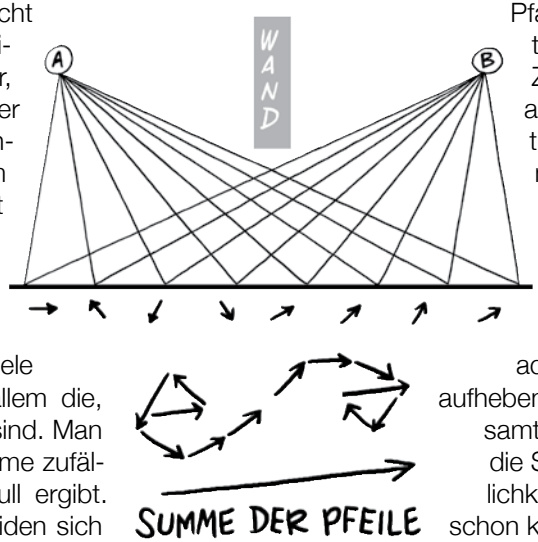
Zurück zum Licht, das von A nach B wandert. Welchen Weg wird es nehmen? Den schnellsten, würdest du sagen? Feynman hätte geantwortet: “Alle!“ Moment, wie kann das sein? Und tatsächlich, wendet man für die Berechnung die Regeln der Pfadintegrale an, wählt man alle Möglichkeiten, die man hat, egal, wie dämlich sie sind. Man nimmt die mathematischen Ausdrücke für all diese Möglichkeiten und addiert sie. Das Ergebnis ist etwas, das wir „Wahrscheinlichkeitsamplitude“ nennen. Da

↗[1]: *„Feynman-Diagramme“ auf Seite 229*
↗[2]: *„Welle-Teilchen-Dualismus“ auf Seite 147*

sich unsere Quantenteilchen wie Wellen bewegen (↗[2]), können sie auch interferieren. Das bedeutet: die Summe zweier Wellen muss nicht unbedingt etwas mit einer größeren Amplitude sein. Stattdessen können sich die Wellen auch aufheben.



Wir können das Ganze verdeutlichen, wenn wir jedem möglichen Pfad, den ein Objekt nehmen kann, einen Zeiger zuordnen. Er bewegt sich wie der Zeiger einer Uhr und zwar um so schneller, je mehr Energie das Teilchen hat. Will man alle Pfade addieren, dann reicht es hier auch, alle Zeiger zu addieren. Das geht, indem man den Anfang des nächsten an das Ende des vorherigen Zeigers setzt. Je nachdem, in welche Richtung die Zeiger zeigen, können sich zwei mit gleicher Länge entweder zu einem mit doppelter Länge addieren oder aber komplett auslöschen. Wichtig ist: Die Wahrscheinlichkeitsamplitude – die Gesamtwahrscheinlichkeit, mit der ein Prozess stattfindet – entspricht der Länge der addierten Zeiger. Je länger also der Zeiger, desto wahrscheinlicher der Prozess. Schauen wir nochmal auf das Beispiel mit dem Spiegel – diesmal aus Sicht der Feynman-Pfade – sehen wir, dass jeder Zeiger in eine andere Richtung zeigt. Addieren wir sie, erkennt man, dass sich viele von ihnen aufheben. Vor allem die, die weit weg von der Mitte sind. Man kann sagen, dass die „Summe zufällig angeordneter Zeiger“ Null ergibt. Aber in der Mitte unterscheiden sich die Zeiger kaum. Das ist der Teil, der zur Reflexion beiträgt, also der Teil, der „dem Gesamtzeiger seine Länge gibt“. Wir kommen auch zu dem Ergebnis, dass Licht den schnellsten Weg nimmt, aber auf ganz andere Art und Weise.



Man kann mit der Zeigermethode auch erklären, wieso Licht den direkten Weg nimmt, so lange es sich im selben Medium bewegt. In der Nähe der direkten Verbindung addieren sich alle Zeiger. Alle seltsamen Wege addieren sich zu null. Noch ein Beispiel: Was würde passieren, wenn man mehrere Wege hätte, die aber alle gleich schnell sind? Richtig, die Zeiger würden sich alle addieren und einen richtig großen Zeiger ergeben. Eine solche Anordnung hat man in einer Konvexlinse! Der große Zeiger entspricht dem hellen Fleck, den wir im Brennpunkt der Linse erhalten.

In der Welt der Quantenphysik führen die Feynman-Pfade auch zu seltsamen Effekten. So ist zum Beispiel der Zerfall des Higgs-Bosons (↗[3]) auf mehrere Arten möglich. Intuitiv würdest du denken, dass mehrere Zerfallsmöglichkeiten zu einer größeren Wahrscheinlichkeit eines Zerfalls führen. Stimmt aber nicht. Es gibt z.B. zwei Möglichkeiten, die sich destruktiv addieren und zum größten Teil aufheben. In diesem Fall ist die Gesamtwahrscheinlichkeit kleiner als die Summe der Einzelwahrscheinlichkeiten. Die Quantenphysik ist schon komisch, oder?

↗[3]: *„Der Higgs-Mechanismus“ auf Seite 245*

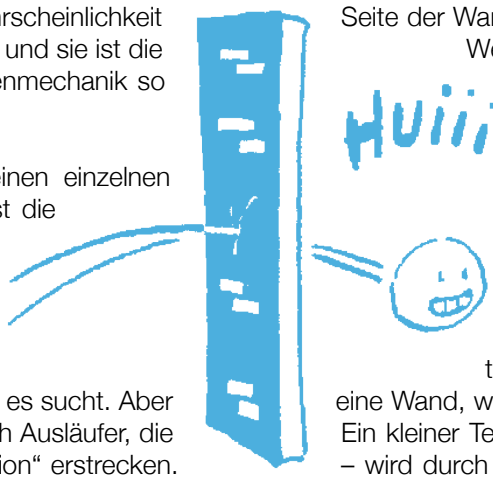

DERWEIL in der SUBATOMAREN WELT....
DER QUANTEN-TUNNEL DER LIEBE

Der Tunneleffekt

Wo eine Wellenfunktion ist, ist auch ein Weg

Quantenteilchen sind seltsame Biester. Eine ihrer nervigsten Besonderheiten ist es, dass sie zu jedem Zeitpunkt nicht einfach an einem bestimmten Ort sind. Stattdessen sind sie verteilt – oder besser gesagt: Die Wahrscheinlichkeit, sie an einem Ort anzutreffen, wenn man sie dort sucht, ist verteilt. Diese verteilte Wahrscheinlichkeit nennt man „Wellenfunktion“, und sie ist die Ursache dafür, dass Quantenmechanik so seltsam ist (↗[1]).

Obwohl man sie nie auf einen einzelnen Punkt beschränken kann, ist die Wellenfunktion meistens auf eine bestimmte Raumregion beschränkt. Das ist der Ort, wo es am wahrscheinlichsten ist, das Teilchen anzutreffen, wenn man es sucht. Aber Wellenfunktionen haben auch Ausläufer, die sich weit über ihre „Kernregion“ erstrecken. Diese Ausläufer der Wellenfunktion besagen, dass man das entsprechende Teilchen (wenn auch nur mit geringer Wahrscheinlichkeit) durchaus weit weg von dem Ort antreffen kann, an dem man es eigentlich erwartet. Manchmal kann man ein Teilchen sogar an Orten antreffen, wo es eigentlich gar nicht hingehört! Man bezeichnet das als „Tunneln“.



Tunneln: die verbotene Barriere überqueren

Ein Quantenteilchen kann beispielsweise eine Barriere, z.B. eine Mauer oder ein ähnliches Hindernis, überwinden. Damit das möglich ist, muss man das Teilchen direkt auf die Mauer schießen. Meistens verhält sich das Teilchen so, wie man es von einer kleinen, harten Kugel erwarten würde: Es prallt einfach von der Wand ab. Aber es gibt eine kleine Chance, dass das Teilchen auf der anderen Seite der Wand erscheint, als sei nie etwas im Weg gewesen! Wie kann das sein?

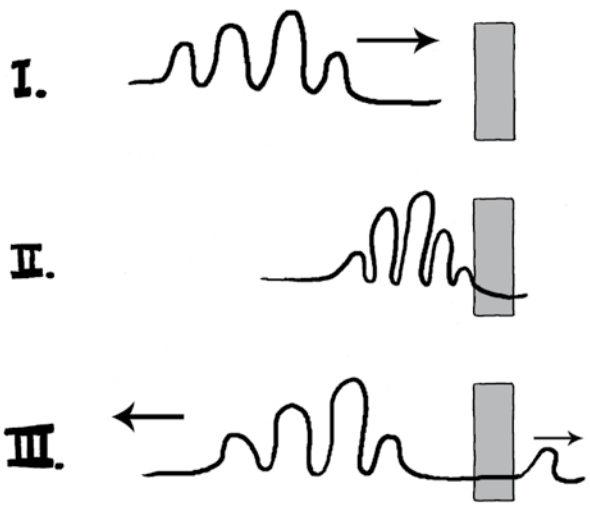
Nun, wie bereits gesagt, verhält sich ein Quantenteilchen nicht wie eine harte Kugel, sondern vielmehr wie eine Welle, die sich über eine bestimmte Raumregion ausbreitet. Wenn die Wellenfunktion auf ein Hindernis trifft, etwa eine Wand, wird sie nicht vollständig reflektiert. Ein kleiner Teil der Welle – einer der Ausläufer – wird durch die Barriere hindurch die andere Seite erreichen können. Erinnern wir uns: Die Welle sagt uns etwas über die Wahrscheinlichkeit aus, das Teilchen zu finden. Wenn ein kleiner Teil der Welle die andere Seite der Barriere erreichen kann, bedeutet das auch, dass wir das Teilchen dort mit einer geringen Wahrscheinlichkeit antreffen können!

Diese Wahrscheinlichkeit ist in der Tat wirklich klein, und sie schrumpft exponentiell mit der Dicke des Hindernisses. Für alltägliche Hindernisse, z.B. die Tür zu deiner Wohnung, ist die Wahrscheinlichkeit wirklich ganz und gar nicht groß. Ein Elektron oder

↗[1]: *„Welle-Teilchen-Dualismus“ auf Seite 147*

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_41

Atom wird daran meistens direkt reflektiert. Und die Chance, dass alle 10^{27} innerhalb eines makroskopischen Objektes (so wie du) durch die Tür tunneln, ist nochmal um einen gigantischen Faktor kleiner. Wenn du einmal die Schlüssel zu deiner Wohnung vergessen hast und versuchst, einfach hindurchzutunneln: Lass es einfach. Würdest du es einmal pro Sekunde versuchen, würde es viel, viel länger brauchen, als das jetzige Alter unseres Universums, bis es auch nur den Hauch einer Chance gibt, dass du in einem Stück durch die Tür kommst. Es gibt zwar eine größere Chance, dass es eine Hälfte von dir schafft und die andere Hälfte draußen bleibt, aber das willst du sicher nicht. Also doch besser den Schlüsseldienst rufen.



Für die Dinge aus unserem Alltag spielt der Tunneleffekt daher praktisch keine Rolle. Eine Wand ist eine Wand, und da kommt man auch so einfach nicht durch. Für einzelne Quantenteilchen ist das Tunneln allerdings etwas, das zwar nicht sonderlich oft vorkommt, aber dennoch ziemlich wichtig ist.

Kernfusion: Quantentunneln lässt die Sonne scheinen!

Nehmen wir zum Beispiel den Prozess der Kernfusion (↗[2]). In der Sonne fliegen jede Menge Atomkerne hin und her. Manchmal fusionieren zwei von ihnen zu einem schwereren Element. Bei so einem Prozess wird viel Energie frei, was letztlich der Grund dafür ist, dass die Sonne scheint. Damit eine Kernfusion stattfinden kann, müssen sich zwei Atome wirklich sehr nahe kommen. Da es aber im Innern der Sonne sehr heiß ist, wurden den Atomen alle Elektronen abgerissen. Daher sind die Atomkerne positiv geladen und stoßen sich gegenseitig ab. Wenn wir nur die thermische Energie der Kerne nehmen, können sie sich nie nahe genug kommen, um zu fusionieren. Sie sind einfach nicht heiß genug, um die elektrostatische Abstoßung zu überwinden. Man könnte sich also fragen, wieso die Kernfusion überhaupt stattfinden kann – schließlich scheint die Sonne ja. Die Antwort ist: dank des Tunneleffekts!

Das Hindernis, das die Teilchen in diesem Fall überwinden müssen, ist keine physikalische Wand, sondern eine elektrostatische Abstoßung. Normalerweise kommen sich zwei Kerne nicht nahe genug, weil ihre Abstoßung zu groß ist. Da sie aber Quantenteilchen sind, gibt es eine geringe Chance, dass sie die elektrostatische Barriere überwinden, die sie trennt. Die Chance ist nicht besonders groß – aber in der Sonne gibt es auch Unmengen von Atomen, so dass trotzdem in jedem Moment genug

↗[2]: *„Kernfusion“ auf Seite 179*

Fusionsprozesse stattfinden können, um die Sonne weiter anzuheizen. Zum Glück! Die Sonne scheint also, dank des Tunneleffekts!

Das RTM: einzelne Atome sehen

Ein anderes Beispiel, bei denen der Tunneleffekt von Elektronen für technische Anwendungen genutzt wird, ist das soganannte „Rastertunnelmikroskop“ (RTM). Solch ein Mikroskop hat weder Linsen, noch benutzt es Licht. Vielmehr sind die Dinge, die man mit einem solchen Mikroskop „beobachten“ will, viel zu klein für sichtbares Licht: Mit einem RTM kann man einzelne Atome beobachten.

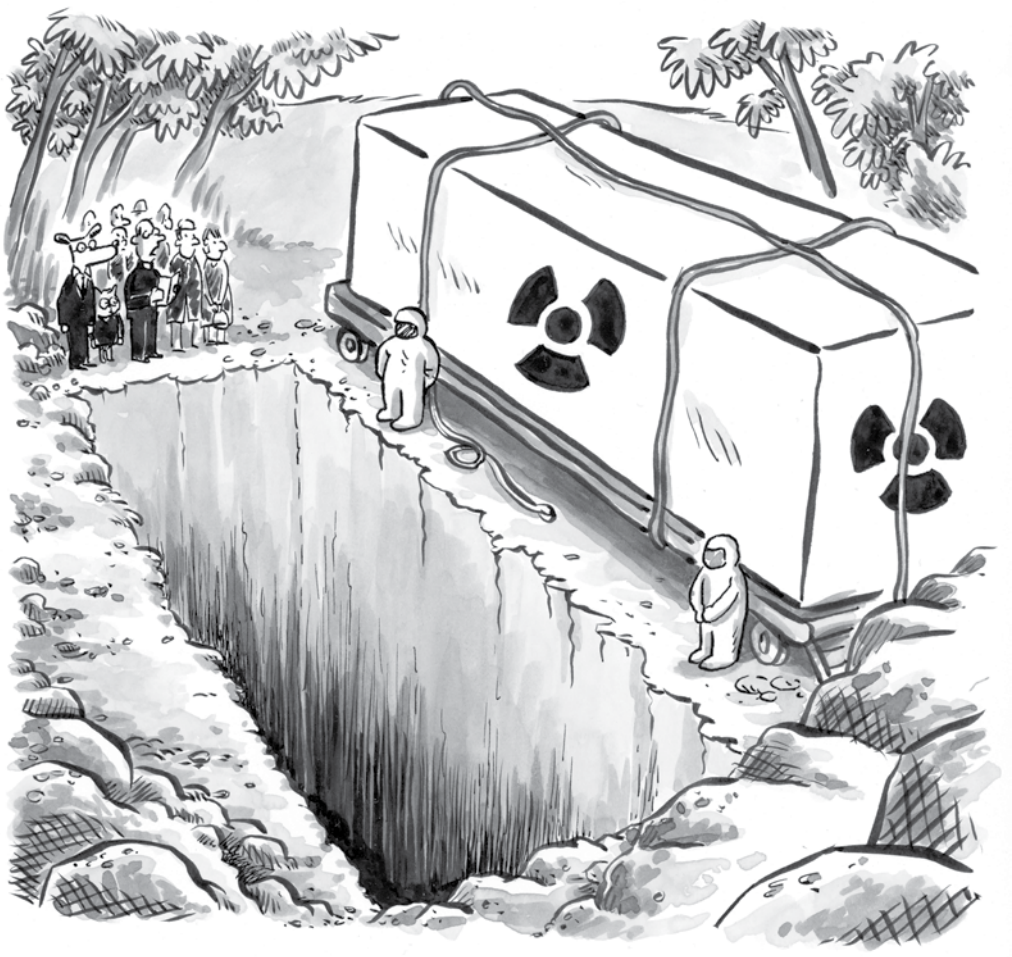
Das wichtigste Bauteil eines RTM ist eine extrem feine Nadelspitze. Diese Spitze wird sehr nahe an eine Oberfläche gebracht, die man sich anschauen will – aber sie darf sie nicht berühren. Dann nimmt man eine Batterie und verbindet ein Ende mit der Nadel und das andere mit der Oberfläche. Da die Spitze die Oberfläche nicht berührt, ist der Stromkreis unterbrochen. Es sollte also kein Strom fließen, stimmt‘s?



Stimmt nicht: Die Elektronen, die den Stromkreis bilden, haben eine kleine Chance, von der Nadelspitze zur Oberfläche hin zu tunneln. Von der Batterie bis zur Spitze kommen sie ganz normal – ab dann gibt es eine kleine Chance, dass sie durch die Barriere, in diesem Fall die isolierende Lücke zwischen Nadel und Oberfläche, durchtunneln können. Von dort kommen sie zurück zur Batterie und schließen den Stromkreis. Obwohl der Stromkreis also eigentlich unterbrochen ist, gibt es einen schwachen Strom, der dank der Quantenhaftigkeit der Elektronen fließen kann.

Und wie kann man damit jetzt ein Mikroskop bauen? Nun, erinnern wir uns daran, was wir in Bezug auf die Wahrscheinlichkeit für einen Tunnelvorgang gesagt haben: Die Chance dafür hängt sehr stark von der Dicke der Barriere ab. In unserem Beispiel entspricht die Dicke der Barriere dem Abstand von Nadel und Oberfläche. Je weiter entfernt die beiden voneinander sind, desto schwächer ist der Strom. Das kann man auch leicht nachmessen. Was man also tut: Man fährt die Oberfläche langsam mit der Nadel ab und beobachtet dabei die Stärke des fließenden Stroms. Bleibt die Stromstärke konstant, ist die Oberfläche flach – die Entfernung zwischen Nadel und Oberfläche ändert sich nicht. Sieht man plötzlich einen Anstieg des Stromes, muss der Abstand kleiner geworden sein – ein sicheres Zeichen dafür, dass wir uns gerade über einem Hügel an der Oberfläche befinden.

Das wichtigste ist: Diese Art des Abrasterns ist extrem empfindlich. Man kann damit selbst Höhenunterschiede feststellen, die der Dicke eines einzelnen Atoms entsprechen! Somit ist ein RTM ein unglaublich gutes Hilfsmittel, um allerkleinste Unebenheiten eines Materials zu erkennen, selbst auf molekularer und atomarer Ebene. Ein RTM kann also Strukturen sichtbar machen, die uns mit klassischen Mikroskopen für immer verborgen bleiben würden.

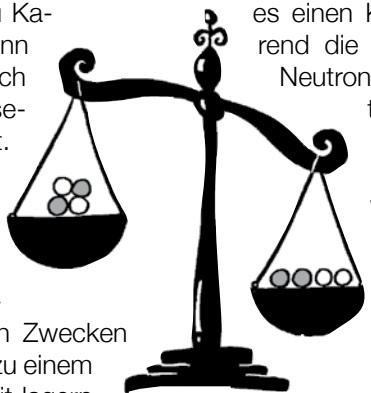


"Asche zu Asche, Staub zu Staub... instabile Teilchen zu radioaktiven Kernen..."

Radioaktive Zerfälle

Über das Leben von Atomkernen und ihr Ende

Sie macht uns Angst, wenn sie zu Katastrophen führt. Sie nützt uns, wenn sie Elektrizität produziert. Was auch immer sie tut, sie erregt sofort unsere Aufmerksamkeit: Radioaktivität. Es gibt drei Merkmale, die sie so interessant machen. Erstens erzeugt sie eine Strahlung, die wir mit bloßem Auge nicht sehen können und die uns schadet. Zweitens: Nutzen wir sie zu friedlichen Zwecken (um Strom zu erzeugen), führt das zu einem Abfall, den wir noch sehr lange Zeit lagern müssen. Und drittens: Sie ist der Beweis dafür, dass manche Elemente nicht ewig leben – denn sie zerfallen. Das bedeutet, dass eine Kiste mit Uran irgendwann nicht mehr mit Uran gefüllt ist.



Es klingt jetzt vielleicht beunruhigend, dass Atome zerfallen. Man könnte jetzt fragen: „Wieso passiert das?“ und ein Physiker würde antworten: „Wieso nicht? Was immer passieren kann, wird passieren.“ Schauen wir uns mal ein Beispiel an, um zu sehen, was das bedeutet. Ein Atomkern eines bestimmten Elements hat eine gewisse Zahl von Protonen und Neutronen. Bei einem radioaktiven Zerfall verändert sich der Kern, wobei er Strahlung aussendet, in Form der drei charakteristischen Arten von Strahlung, α- (Alpha), β- (Beta) und γ- (Gamma) Strahlung (↗[1]). Außerdem gibt es noch die Möglichkeit der Kernspaltung. Fangen wir also damit an, denn sie lässt sich ganz einfach beschreiben als „ein großer Kern, der in zwei Teile zerbricht“, was man sich ganz gut vorstellen kann. Innerhalb eines Atomkerns gibt es einen Kampf zwischen zwei Kräften: Während die Starke Kraft (↗[2]) die Protonen und Neutronen verbindet, führt die elektromagnetische Kraft zu einer Abstoßung der Protonen. Dabei dominiert die Starke Kraft und hält den Kern stabil. Doch wie sehr die Starke Kraft dominiert, ist von Kern zu Kern unterschiedlich. Ist die Dominanz gewaltig, ist der Kern sehr stabil. Sie könnte aber auch sehr schwach sein, dann ist der Kern ziemlich instabil.

Der Grund für (In-)Stabilitäten

Die Stabilität eines Kerns hängt von vielen Faktoren ab: seinem Volumen, seiner Oberfläche und der Zahl der Protonen und Neutronen. Wenn man all diese Zahlen hat, kann man mit Hilfe der sogenannten Bethe-Weizsäcker-Massenformel (↗[3]) rechnen. Wie der Name schon vermuten lässt, liefert die Formel die Masse eines Kerns, nicht seine Stabilität. Die beiden sind aber eng miteinander verknüpft. Legen wir einen Kern mal auf eine Waage und vergleichen seine Masse mit der Summe der Massen seiner Bauteile. Die Abbildung zeigt das Beispiel für einen Heliumkern. Die Waage ist im Ungleichgewicht! Man nennt dieses Phänomen „Massendefekt“. Einmal mehr geht es hier um $E = mc^2$: ein Teil der Masse der Protonen und Neutronen wurde in Energie umgewandelt. Das ist genau die Energie, die den Kern zusammenhält. Und es ist auch die Energie, die man braucht, um ihn auseinander zu brechen. Also: je größer der Massendefekt, desto

↗[1]: *„Alpha-, Beta- und Gammastrahlen“ auf Seite 175*
↗[2]: *„Die Starke Wechselwirkung“ auf Seite 233*
↗[3]: https://de.wikipedia.org/wiki/Bethe-Weizsäcker-Formel
↗[4]: *„$E = mc^2$“ auf Seite 241*

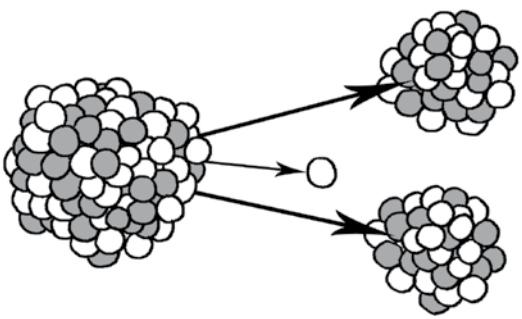
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_42



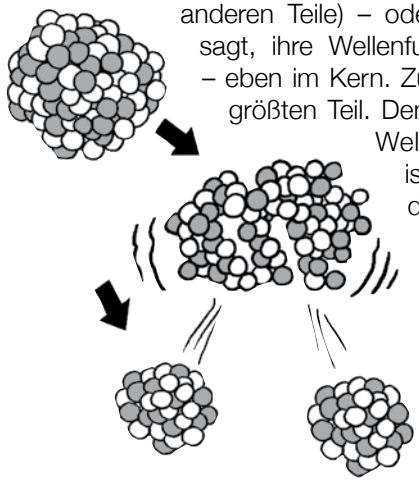
mehr Bindungsenergie hat der Kern und desto stabiler ist er.

Diese Massenunterschiede von Kernen ermöglichen radioaktive Zerfälle: Ein Kern kann in zwei leichtere zerfallen, wenn die Summe der Massen der „Tochter-Kerne“ geringer ist als die Masse des „Mutter-Kerns“. Der Massenunterschied wird dann als kinetische Energie frei, also als Geschwindigkeit, mit der die Tochter-Kerne auseinander fliegen. Wenn man es schafft, diese Energie in thermische Energie umzuwandeln, um Wasser zu Dampf zu machen, durch eine Turbine zu schicken und damit einen Generator anzutreiben, hat man im Prinzip ein Kernkraftwerk.

Kernspaltung kann spontan passieren. Du könntest jetzt fragen: „Na gut, wenn ein Kern in zwei leichtere zerfallen kann, wieso tut er das dann nicht sofort?“



Jetzt kommen einmal mehr die Regeln der Quantenmechanik ins Spiel. Ohne diese würde der Kern nämlich ewig stabil bleiben. Doch in der Quantenmechanik gilt die Heisenbergsche Unschärferelation (↗[5]): Die genaue Position des Kerns und seiner Bestandteile ist nicht exakt definiert. Innerhalb des Kerns sind die beiden Teilhälften (oder auch alle anderen Teile) – oder besser gesagt, ihre Wellenfunktionen (↗[6]) – eben im Kern. Zumindest zum größten Teil. Denn ein Teil der Wellenfunktionen ist auch weit draußen. Das kann dazu führen, dass die beiden Hälften durchaus mal so weit voneinander entfernt sind, dass sie außerhalb der Reichweite der Starken Kraft liegen. Und jetzt geht‘s los: Wir haben eine Kernspaltung! Wir kennen das, was gerade passiert ist, auch als Tunneleffekt (↗[7]).



Der Motor der Kernkraftwerke

Solch eine Spaltung kann entweder spontan passieren oder von etwas anderem ausgelöst werden. Das bekannteste Beispiel dafür ist Uran-235 (die Zahl sagt, wie viele Protonen und Neutronen sich insgesamt im Kern befinden), das von einem Neutron getroffen wird. Das Neutron wird absorbiert und der Kern wird daraufhin sehr instabil, bis er in zwei leichtere Kerne zerfällt, z.B. Barium und Krypton (nicht zu verwechseln mit dem Superman-Kaputtmacher Kryptonit), sowie zwei weitere Neutronen. Diese beiden Neutronen können dann wieder Kerne von Uran-235 treffen und wir fangen wieder von vorne an, nur eben verdoppelt. Wir nennen das „nukleare Kettenreaktion“. Dies ist auch der Prozess, der in Kernkraftwerken stattfindet.

↗[5]: *„Heisenbergsche Unschärferelation“ auf Seite 155*
↗[6]: *„Welle-Teilchen-Dualismus“ auf Seite 147*
↗[7]: *„Der Tunneleffekt“ auf Seite 167*



Bisher haben wir in diesem Kapitel nur über Kernspaltung gesprochen. Wenn man sich aber über Radioaktivität unterhält, meint man meistens α-, β- und γ-Strahlung. Auch bei dieser Strahlung gilt das gleiche Prinzip, das wir eben anhand der Kernspaltung so schön verdeutlichen konnten: Ein Kern wandelt sich in etwas leichteres um und setzt die Energiedifferenz als kinetische Energie der Zerfallsprodukte frei. Wir haben gelernt, dass die Zeit bis zum Zerfall eines Kerns sehr unterschiedlich sein kann. Das Problem (jetzt kommt wieder die Quantenmechanik ins Spiel) besteht darin, dass man niemals sagen kann, wann genau ein einzelner Kern zerfällt. Man kann nur Wahrscheinlichkeiten angeben. Es ist jedoch möglich, eine „Halbwertszeit“ als die Zeit zu definieren, nach der im Mittel die Hälfte aller Kerne einer Sorte zerfallen ist.



Wohin mit dem nuklearen Müll?

Halbwertszeiten für verschiedene Atomkerne können zwischen 10^{-10} Sekunden und über 10.000.000 Jahren variieren. Statt von einer Halbwertszeit sprechen Physiker auch gerne von einer „Lebensdauer“. Das ist die Zeit, nach der ein Anteil von 1/2,72 (statt 1/2 bei der Halbwertszeit) noch nicht zerfallen ist. Der Vorteil dieser Zahl ist, dass man ihren Kehrwert nehmen kann und sofort die Aktivität des Materials erhält. Multipliziert man diese mit der Zahl an Kernen, die man betrachtet, weiß man, wie viele von ihnen pro Sekunde zerfallen. Sehr instabile Kerne führen also zu viel Radioaktivität. Aber lange Lebensdauern sind auch nicht viel besser: die Aktivität ist zwar geringer, aber die Zeit, während der Strahlung frei wird, ist länger. Bedauerlicherweise produzieren Kernkraftwerke radioaktive Atomkerne mit ziemlich hoher Lebensdauer. Man muss also den nuklearen Abfall an einem sicheren Ort aufbewahren, wo seine Strahlung den Menschen nichts anhaben kann. Ein Lösungsvorschlag hierfür sind alte Salzbergwerke.

Ein anderer Ansatz nutzt die sogenannte nukleare Transmutation. Mit dieser Technik kann radioaktiver Abfall mit langer Halbwertszeit in solchen mit kurzer Halbwertszeit umgewandelt werden. Und der ist dann auch früher verschwunden.

Wissenschaftler sind recht aktiv im Bereich der Transmutation. Während es die Transmutation im Prinzip auch erlaubt, aus Quecksilber Gold herzustellen (lohnt sich finanziell nicht), liegt der Schwerpunkt der Forschung auf der Verringerung der Lagerungszeiten von radioaktiven Abfällen um mehrere Tausend Jahre. Klingt das nicht ermutigend?

Abbildung: Bundesamt für Strahlenschutz


DERWEIL in der SUBATOMAREN WELT...
UND SIE SIND SICHER, DASS ES EIN GAMMASTRAHL WAR, DER IHNEN EIN ELEKTRON GEKLAUT HAT?
ICH BIN POSITIV.!
POLIZEI

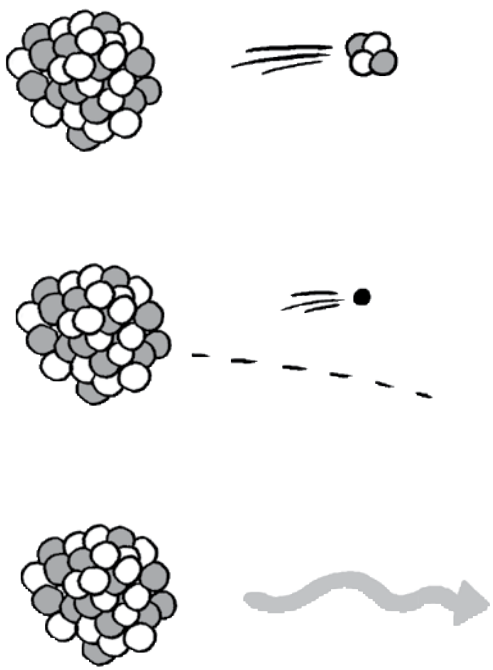
Alpha-, Beta- und Gammastrahlen

Kernbausteine auf Reisen

Im Kapitel über radioaktive Zerfälle (↗[1]) haben wir gelernt, dass nicht alle Atomkerne stabil sind. Traurig, dass man einige Kerne nur für eine bestimmte Zeit behalten kann, bevor sie zerfallen. Das besondere an zerfallenden Kernen ist, dass sie Strahlung abgeben. Dafür haben sie zwei gute Gründe. Entweder ändert sich der Inhalt eines Kerns und der „Unterschied" wird über die Strahlung freigesetzt. Oder aber der Inhalt ändert sich nicht, und stattdessen sortiert der Kern lediglich seine Bausteine um. Und bei dieser Umsortierung kann dann Energie frei werden, die der Kern ausspuckt.

Die meiste Strahlung ist ionisierende Strahlung. Das heißt, sie kann Elektronen aus anderen Atomen herausschlagen. Passiert das bei Atomen in biologischen Zellen, kann das schwere Schäden verursachen, was die Strahlung sehr gefährlich macht. Andererseits kann man mit der Strahlung auch gezielt „böse Zellen" von Tumoren schädigen und die Strahlung zur medizinischen Behandlung einsetzen (↗[2]). Schauen wir uns mal die drei wichtigsten Typen von radioaktiver Strahlung an. Sie sind nach den ersten drei Buchstaben des griechischen Alphabets benannt: Alpha- (α), Beta- (β) und Gamma(γ)strahlung.

Alphastrahlung besteht aus kleinen Heliumkernen, Bei Betastrahlung handelt es sich entweder um ein Positron oder ein Elektron (β^+- und β^--Strahlung) und Gammstrahlung besteht aus hochenergetischen Photonen. Diese drei Arten von Strahlung sind normalerweise unsichtbar. Man kann sie aber mit speziellen Detektoren (↗[3]) sichtbar machen.



Schauen wir uns diese drei Typen von Strahlung und ihre Eigenschaften mal genauer an.

α-Strahlung

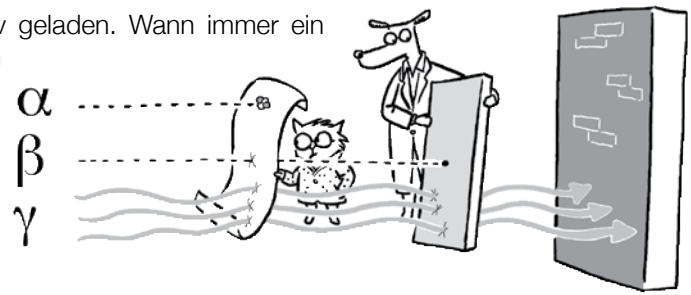


Die Heliumkerne der α-Teilchen bestehen aus zwei Protonen und zwei Neutronen. Verglichen mit den Bestandteilen der β- und γ-Strahlung sind α-Teilchen ziemlich schwer (ca. 7300-mal so schwer wie β-Teilchen) und sie

↗[1]: *„Teilchenzerfälle" auf Seite 225*
↗[2]: *„Strahlentherapie" auf Seite 269*
↗[3]: *„Teilchendetektoren" auf Seite 257*

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_43

sind zweifach positiv geladen. Wann immer ein geladenes Teilchen – mit genug Energie zum Ionisieren – durch Materie dringt, schlägt es Elektronen aus den Atomen. Um das zu tun, muss die Strahlung eine gewisse Energie auf das Atom übertragen, nämlich die Energie, mit der die Elektronen gebunden sind. Je öfter Strahlung ionisiert, desto mehr Energie verliert sie. Die „Bethe-Bloch-Formel“, die den Energieverlust von Teilchen via Ionisation beschreibt, verrät uns, dass der Energieverlust der Strahlung mit dem Quadrat seiner Ladung steigt. Daher verlieren unsere α-Teilchen viel mehr Energie als die nur einfach geladenen β-Teilchen. γ-Strahlung wird nicht von der Bethe-Bloch-Formel beschrieben: Obwohl ein Photon auch ionisieren kann, ist es nach dem ersten Ionisationsprozess bereits verschwunden (absorbiert von dem Teilchen, das es ionisiert hat).



Wenn du dich vor α-Strahlung schützen willst: kein Problem! Sie verliert ihre Energie so schnell, dass sie rasch gestoppt werden kann. Ein Blatt Papier reicht aus. Und selbst die obersten Zell-Schichten deiner Haut (die ohnehin abgestorben sind) stoppen die α-Strahlung. Klingt gut? Ist es auch. Aber jetzt stell dir vor, jemand schafft es, ein radioaktives Material, das α-Strahlung freisetzt, in deinen Körper zu schmuggeln. Die Strahlung wird zwar auch wieder schnell gestoppt, aber diesmal durch deine Organe. Das ist sehr schlecht. Da die α-Teilchen ihre Energie schnell verlieren, deponieren sie viel Energie, verteilt auf wenig (organisches) Material. Der Schaden dort ist also umso größer! Zellen können stark geschädigt werden und Krebs kann entstehen. Also: Hütet euch vor α-Strahlern! Aber sicherlich willst du gerne wissen, wo man α-Strahler denn so antrifft. Ein berühmter Kandidat dafür ist Uran-238. Die Zahl hinter dem Element steht für die Gesamtzahl an „Nukleonen“, also Protonen und Neutronen, im Kern. Für jedes Element ist die Zahl der Protonen fest (92 bei Uran), aber die Zahl der Neutronen kann variieren. Elemente mit unterschiedlich vielen Neutronen nennt man „Isotope“. Nach der Abstrahlung eines α-Teilchens wird Uran-238 zu Thorium-234.



Man sieht: α-Teilchen führen zu Elementen mit vier Nukleonen weniger (davon zwei Protonen). Wenn Thorium-234 weiter zerfällt, landet es irgendwann bei Radon-222. Man sieht, dass nur α-Zerfälle stattgefunden haben, da man von 238 zu 222 durch Abziehen eines Vielfachen von 4 kommt. Uran-238 existiert in der Erdkruste, und damit auch Radon-222. Radon ist ein unsichtbares Gas und kann sich seinen Weg aus der Erdkruste bis in unsere Keller

bahnen. Dort kann es sich ansammeln, in unsere Lungen wandern, dort zerfallen und α-Strahlung aussenden. Radon bildet den größten Anteil an der natürlichen Strahlenbelastung des Menschen. Also: Am besten zum Lachen nicht gleich in den Keller gehen. Und wenn, dann gut lüften!

β-Strahlung



Während eines β-Zerfalls wird ein Elektron bzw. ein Positron abgestrahlt, nachdem sich ein Neutron im Atomkern in ein Proton umgewandelt hat bzw. umgekehrt. Solch eine Umwandlung wird durch die Schwache Wechselwirkung (↗4) ermöglicht, die auch noch zu einem abgestrahlten Neutrino führt, was wir aber nicht sehen. Während eines β-Zerfalls bleibt die Gesamtzahl der Nukleonen also gleich. Ein bekanntes Beispiel für einen β-Strahler ist Kalium-40. In den meisten Fällen wird Kalium-40 ein Elektron abstrahlen (β^--Strahlung), aber in 10% der Fälle wird es sich durch Abstrahlung eines Positrons zu Argon-40 umwandeln. Kalium findet man häufig in Bananen und Kartoffeln, was sie zu Quellen von β^+-Strahlung macht. Da es sich bei den Positronen um Antimaterie (↗5) handelt, werden sie mit ihrem entsprechenden Materie-Partner (Elektronen) zu zwei Photonen zerstrahlen (↗5,6). Das macht radioaktive β-Strahler in der medizinischen Diagnostik sehr beliebt. Je nachdem, welches Organ man untersuchen möchte, gibt dem Patienten eine bestimmte β-Quelle. Die radioaktive Quelle wird sich an das Organ heften, β-Strahlung produzieren und die β-Teilchen werden zu zwei Photonen zerstrahlen. Stellt man einen Detektor um den Patienten und verbindet alle beobachteten Photonen mit Linien, bekommt man ein schönes Bild des zu untersuchenden Organs. Diese Methode nennt man PET (Positronen-Emissions-Tomographie)-Scan. Obwohl sie zur medizinischen Diagnostik eingesetzt wird, ist sie nicht ganz ungefährlich; besonders dann, wenn die Strahlung in unserem Körper zu viel Energie deponiert. Um β-Strahlung abzuschirmen, braucht man etwas mehr als ein Blatt Papier. Aber eine dünne Aluminiumplatte reicht schon.

γ-Strahlung



Durch die Freisetzung von γ-Strahlung ist es möglich, dass ein Atomkern Energie abgibt, ohne seinen Inhalt zu verändern. Ein Photon ist weder geladen, noch hat es eine Masse. Es ist das gleiche Teilchen, aus dem auch Licht besteht, hat aber viel mehr Energie. Du kennst sicher UV-Strahlen, die mehr Energie als sichtbares Licht haben und daher zu Sonnenbrand führen können. Während UV-Strahlen eine Energie von einigen Elektronenvolt (eV), haben, haben Röntgenstrahlen schon einige tausend Elektronenvolt (Kiloelektronenvolt, keV) und γ-Photonen gar Millionen von Elektronenvolt (MeV). Photonen von γ-Strahlen verlieren ihre Energie nicht Stück für Stück, so wie α- und β-Strahlen. Stattdessen schießen sie ein Elektron aus einem Atom und sind danach weg. Oder sie wandeln sich in ein Elektron/Positron-Paar um (der umgekehrte Prozess einer Elektron/Positron-Zerstrahlung). Die Wahrscheinlichkeit, dass ein γ-Photon verschwindet, steigt mit der Dicke der Abschirmung. Das bedeutet: je dicker, desto besser. Ein γ-Strahl mit einer Energie von 2 MeV verliert 50 % seiner Photonen nach einer 1,3 cm dicken Schicht aus Blei, 75% nach 2,6 cm und so weiter. Aber einige Photonen schaffen es immer, selbst durch die dickste Abschirmung.

↗4: *„Die Schwache Wechselwirkung“ auf Seite 237*
↗5: *„Antimaterie“ auf Seite 221*
↗6: *„Feynman-Diagramme“ auf Seite 229*



“Naja, mit der Energieausbeute sieht’s nicht so ‘sonnig’ aus ...”

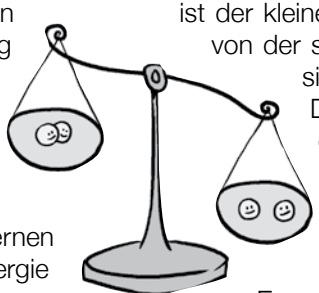
Kernfusion

Natürliche Energiequelle, aber noch ohne Kraftwerk

Das typische futuristische Kraftwerk in jedem Science Fiction Film ist ein Fusionsreaktor. Klingt ziemlich beeindruckend, aber worum geht es bei der Kernfusion überhaupt? Gibt es sie denn wirklich?

Clever kombiniert

Die Kernfusion könnte in der Tat die optimale Energiequelle der Zukunft sein. Aber sie war es auch schon in der Vergangenheit, nicht nur für uns Menschen, sondern auch für alle anderen Lebewesen. Das Problem ist nur, dass wir sie noch nicht kontrollieren können, um sie in einem Kraftwerk einzusetzen. Wir müssen die Kernfusion nutzen, die uns die Natur zur Verfügung stellt. Du fragst dich vielleicht, welche das sein soll. Es ist etwas, das wir jeden Tag sehen können, aber nicht in der Nacht. Richtig, die Sonne! Innerhalb der Sonne fusioniert eine gigantische Zahl von leichten Atomkernen zu schwereren. Und dabei wird Energie frei. Wie kann das sein? Fangen wir zur Erklärung mit den allerkleinsten Kernen an, die wir kennen: Wasserstoffkerne. Sie bestehen aus einem einzelnen Proton. Bringt man zwei Protonen sehr nahe zueinander, vereinen sie sich zu einem größeren Kern: einem Deuteron, dem Kern von Deuterium-Atomen. Deuterium besteht aus einem Proton und einem Elektron (genau wie Wasserstoff), aber zusätzlich noch einem Neutron im Kern. Das elektrisch neutrale Neutron ändert allerdings nichts an den chemischen Eigenschaften des Atoms. Deuterium ist also wie Wasserstoff, nur doppelt so schwer. Aber Moment: Wir fingen mit zwei Protonen an und haben jetzt ein Proton und ein Neutron im Deuteron. Wie kann das sein? Eines der Protonen muss sich in ein Neutron umgewandelt haben. Hierfür ist die Schwache Wechselwirkung (↗[1]) verantwortlich. Neben der Schwachen braucht man noch die Starke Wechselwirkung (↗[2]), nämlich um das Proton und das Neutron zusammenzuhalten.



Als wir sagten, dass die Masse des Deuterons doppelt so groß ist wie die von Wasserstoff (also eines Protons), waren wir nicht ganz exakt. Sie entspricht dem 1,999-fachen der Protonenmasse. Aber wo ist der kleine Rest hin? Ein Teil des Restes wurde von der schwachen Wechselwirkung in ein Positron und ein Neutrino umgewandelt. Das muss passieren, damit die Ladungen erhalten bleiben (↗[3]). Es fehlt aber immer noch ein kleiner Betrag. Dieser wurde in Energie umgewandelt. Ähnlich wie bei der Kernspaltung (↗[4]) werden hier (Teile der) Massen in Energie umgewandelt. Wir kennen das als „Massendefekt“ (↗[5]). Wir sehen also, dass man Masse sowohl über Kernspaltung als auch -fusion in Energie umwandeln kann. Allerdings wird nur bei leichten Kernen Energie durch Fusion frei und nur bei schweren durch Spaltung.

Über das Hindernis geschummelt

Während einige schwere Kerne automatisch über eine Spaltung zerfallen, brauchen andere einen Auslöser, etwa ein Neutron, das den Kern trifft und

↗[1]: *„Die Schwache Wechselwirkung“ auf Seite 237*
↗[2]: *„Die Starke Wechselwirkung“ auf Seite 233*
↗[3]: *„Erhaltungssätze“ auf Seite 51*
↗[4]: *„Radioaktive Zerfälle“ auf Seite 171*
↗[5]: *„$E = mc^2$“ auf Seite 241*

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_44



spaltet. Bei der Fusion ist die Sache etwas komplizierter. Stell dir zwei Protonen vor. Damit sie fusionieren, müssen zwei Wechselwirkungen mitmachen: Die Starke und die Schwache. Beide haben aber nur eine Reichweite von ca. 10^{-15} m. So nahe muss man also die Protonen zueinander bringen. Das Problem: Bevor die Starke und die Schwache Wechselwirkung ihren Job machen können, greift die elektromagnetische Wechselwirkung ein. Und ihre Reichweite ist unendlich. Da beide Protonen positiv sind, wirkt sie abstoßend. Schlimmer noch: Die Stärke der entsprechenden Kraft steigt quadratisch mit dem Kehrwert des Abstandes. Also: superkleiner Abstände, superstarke Kraft! Wir sehen das in der Abbilung: Die Protonen brauchen immer mehr Energie, um sich näher zu kommen. Es ist, als würden sie einen Berg hochlaufen, der immer steiler wird. Man kennt das, wenn man mit dem Fahrrad bergauf fährt: kann schwierig werden. Und je höher man will, desto mehr Energie braucht man. Jemand muss den Protonen also viel Energie geben, damit sie fusionieren können. Wenn wir dir den Hinweis geben, dass die Temperatur eines Gases ein Maß für dessen thermische Energie ist, kannst du dir dann einen Ort mit besonders hochenergetischen Teilchen vorstellen? Richtig, die Sonne!

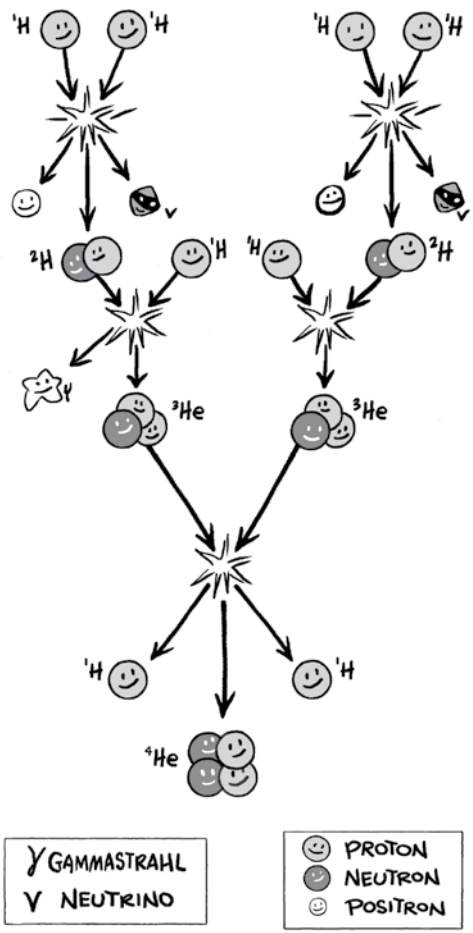


Der größte Fusionsreaktor existiert also schon eine gefühlte Ewigkeit: die Sonne. Innerhalb der Sonne finden unglaublich viele Fusionsprozesse statt. Im Wesentlichen ist die Sonne eine riesige Kugel aus Wasserstoff-Gas. Da sie so groß ist, hält sie die Gravitationskraft zusammen. Die Protonen im Zentrum spüren den Druck der eigenen Gravitationskraft. Sie komprimiert den Wasserstoff und heizt ihn auf. Dadurch werden die Protonen sehr schnell und kommen sich sehr nahe. Wirklich nahe. Aber nicht nahe genug, als dass die Starke und Schwache Wechselwirkung wirken könnten. Und jetzt brauchen die Protonen einen Trick: sie nutzen den Tunneleffekt (↗[6]). Die Quantenmechanik besagt, dass ein Teilchen selbst dann, wenn es nicht genug Energie hat, eine Barriere zu überwinden, einen Teil seiner Wellenfunktion auf der anderen Seite der Barriere haben und dadurch hindurchtunneln kann. Die Wahrscheinlichkeit ist nicht groß, aber größer als Null. Und nur durch den Tunneleffekt können Protonen fusionieren. Und die Fusion hört beim Deuteron nicht auf. Bringt man ein Deuteron und ein weiteres Proton zusammen, erhält man Helium-3 (zwei Protonen und ein Neutron) und zwei solcher Helium-3 Kerne können zu Helium-4 fusionieren (mit zwei Neutronen), plus zwei frei werdenden Protonen. Und diese Protonen können dann wieder … die Geschichte von vorne beginnen lassen. Diesen Prozess nennt man Proton-Proton-Kette. In schwereren Sternen und während Supernovaexplosionen (↗[7]) können Helium und noch schwerere Elemente weiter fusionieren und Elemente bis hin zu Eisen bilden.

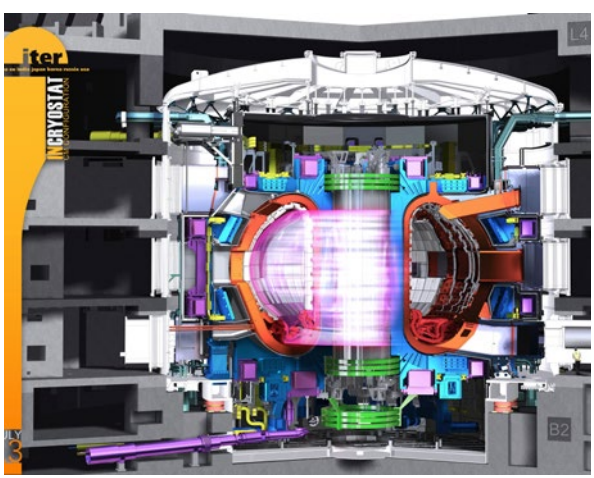
Eine Sonne auf der Erde?

Klingt das nicht toll: Während Kernspaltungskraftwerke das teure, seltene und strahlende Uran

↗[6]: *„Der Tunneleffekt“ auf Seite 167*
↗[7]: *„Supernovae“ auf Seite 83*



benötigen, bräuchten Fusionsreaktoren nur Wasserstoff (billig und leicht zu haben). Es scheint verlockend, eine Art Mini-Sonne auf der Erde zu bauen und daraus Energie zu gewinnen. Es gibt bereits viele Versuche, die in diese Richtung gehen. Was man für einen Fusionsreaktor braucht, ist auf mehrere Millionen Grad (ob Celsius, Fahrenheit oder Kelvin ist dann egal) aufgeheizter Wasserstoff (man kann auch mit Deuterium und Tritium starten). Den aufgeheizten Wasserstoff, den man auch Plasma nennt, muss man dicht und stabil zusammenhalten. Um das Plasma zu heizen, gibt es verschiedene Ansätze: Entweder kann man mit schnellen Neutronen oder Mikrowellen auf das Plasma schießen, oder im Plasma einen Strom induzieren, der es heizt. Das Plasma wird mit Hilfe von Magnetfeldern zusammengehalten. Um es dicht und stabil zu halten, sind sehr starke und präzise Magnetfelder nötig. Einige solcher Fusionsreaktoren werden zur Zeit getestet (↗[8]), aber bisher verbrauchen sie alle noch mehr Energie, als sie produzieren. In Zukunft soll das natürlich umgekehrt sein. Beenden wir das Kapitel mit einem Bild des ITER Reaktors, einem internationalen Projekt, das gerade in Cadarache (Frankreich) gebaut wird. Es ist ein Donut-förmiger „Tokamak"-Typ. Es gibt auch andere Konzepte, die getestet werden, etwa den Stellarator oder die Laser-induzierte Fusion. Schauen wir mal, was die Zukunft bringt!



↗[8]: https://www.ipp.mpg.de/16900/w7x *und* http://www.iter.org

Abbildung: © ITER Organization



"Ich gewinne dadurch an Größe, bekomme aber kalte Füße."

Supraleiter

Super-Autobahnen für Elektronen

Hast du dich jemals gefragt, wieso Strom auf Überlandleitungen mit gewaltigen Spannungen (mehrere Tausend Volt) übertragen wird, verglichen mit den 230 V aus der Steckdose? Um zu verstehen, warum das so ist, müssen wir uns überlegen, wie Strom durch Kabel transportiert wird. Elektrische Ladungen bewegen sich, beschleunigt von einem elektrischen Feld im Kabel, das entsteht, sobald eine Spannung angelegt wird. Die Bewegung der elektrischen Ladung ist der Strom. Man kann ihn sich wie Autos auf der Autobahn vorstellen. Eine hohe Stromstärke entspricht vielen Autos mit hoher Geschwindigkeit. Es gibt aber – zum Glück – einen Unterschied zwischen der Bewegung der Autos auf der Autobahn und den Elektronen im Kabel. Während die Autos versuchen, nicht miteinander oder mit den Leitplanken zu interagieren, tun das Elektronen. Die Anzahl dieser Interaktionen beschränkt den Strom und ist als „Ohmscher Widerstand" bekannt. Das Ohmsche Gesetz besagt Folgendes: Bei einer Spannung U ist der Strom I durch den Widerstand R limitiert, und zwar über $U = R \cdot I$. Während der Wechselwirkungen zwischen den Elektronen des Stroms und den Elektronen des Leiters übertragen sie Energie aufeinander. Dabei kommt es zu einer Umwandlung von elektrischer Energie in thermische Energie (↗1) und der Leiter erhitzt sich. Du kannst das prüfen, indem du bei einem Gerät mit hohem Stromverbrauch (z.B. dem Wasserkocher) nach einer Weile das Kabel anfasst. Es ist warm, stimmt's?

Der Ohmsche Widerstand hat ungewollte Nebenwirkungen. Kraftwerke produzieren Strom, transportieren ihn zu dir und auf dem Weg geht Energie verloren, weil sich die Kabel aufwärmen. Dieser Verlust wird zum einen größer, je größer der Widerstand im Kabel ist. Zum anderen wird er aber auch kleiner, je höher die eingesetzte Spannung ist. Das ist der Grund für die Hochspannung in den Überlandleitungen. Höhere Spannungen sind aber nicht immer ein geeignetes Mittel. Der Ohmsche Widerstand begrenzt auch den Strom in Elektromagneten und damit deren Magnetfeldstärke.



Eine gute Frage wäre nun: Gibt es einen Weg, den Ohmschen Widerstand zu verringern? Gibt es. Er hängt von der Dicke und der Länge des Kabels ab. Je größer der Durchmesser des Kabels und je kürzer seine Länge, desto kleiner der Widerstand. Aber kurze, dicke Kabel sind oft nicht sehr praktisch. Es gibt noch eine andere Abhängigkeit des Widerstands, nämlich von der Temperatur des Leiters. Je kälter die Temperatur, desto geringer der Widerstand (außer bei Halbleitern, da ist es umgekehrt).

Der unerwartete Sprung in superkalten Regionen

Der niederländische Physiker Heike Kamerlingh Onnes hat im Jahre 1911 den Widerstand von Quecksilber gemessen. Er variierte die Temperatur und prüfte das Prinzip: je kälter, desto weniger Widerstand. Flüssiges Helium ist dazu geeignet, Dinge auf sehr, sehr

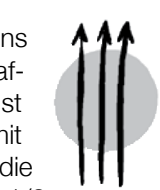


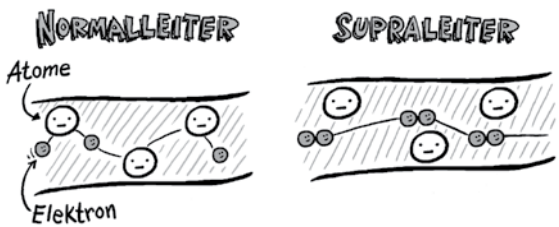
↗1: *„Erhaltungssätze" auf Seite 51*

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_45

geringe Temperaturen zu kühlen. So hat er den Widerstand bei 4,4 K (Kelvin) gemessen, was -268,75 °C (Celsius) entspricht. Die Kelvin-Skala hat einen wohldefinierten Nulllpunkt: es gibt nichts, was kälter sein kann. Temperatur entspricht der Bewegungsenergie von Atomen, und bei 0 K steht alles still. Wir haben also sehr, sehr kaltes Quecksilber. Und einen ziemlich geringen Widerstand. Kamerlingh Onnes ging runter auf 4,3 K: noch weniger Widerstand. Doch dann, plötzlich bei 4,2 K, gab es einen großen Sprung und der Widerstand fiel auf Null. Kein Ohmscher Widerstand. Das kam völlig überraschend.

Was er gerade entdeckt hatte und wofür er 1913 mit dem Nobelpreis ausgezeichnet wurde (nicht nur dafür, sondern generell für seine Arbeit mit extra tiefen Temperaturen, siehe auch ↗[2]), war das Phänomen der Supraleitung. Sie ist definiert als elektrische Leitung ohne Ohmschen Widerstand. Für die gesamte Physikerschaft war dieses Phänomen eine absolute Überraschung. Und es dauerte etwa 50 Jahre, bis man diesen Effekt erklären konnte. 1957 formulierten die Physiker Bardeen, Cooper und Schrieffer (BCS) eine Theorie, die sagt, was bei der Supraleitung vor sich geht. Vereinfacht gesagt zieht ein Elektron des Stroms positive Ladungen des Leiters an. Ein zweites Elektron gesellt sich dazu und die beiden formen ein sogenanntes „Cooper-Paar". Während ein einzelnes Elektron ein Fermion (mit einem Spin von 1/2, ↗[3]) ist, wovon maximal eins mit den gleichen Eigenschaften am selben Ort sein kann, ist ein Cooper-Paar ein Boson (mit ganzzahligem Spin), da sich die beiden Elektronenspins von 1/2





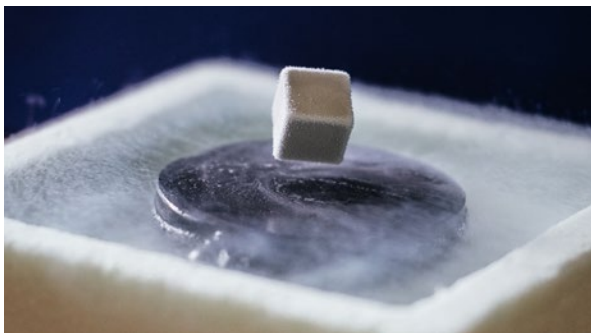
zu 0 oder 1 zusammenfügen (je nachdem, ob sie in die gleiche oder in unterschiedliche Richtungen zeigen). Das gute an Bosonen: Man kann so viele wie man will zur gleichen Zeit am gleichen Ort haben, auch mit den gleichen Eigenschaften (↗[3]). Alle Cooper-Paare befinden sich nun im gleichen Zustand und treten auch als eine Einheit auf. Will nun ein Atom des Leiters mit einem Elektron des Stroms interagieren (wie es beim Ohmschen Widerstand passiert), so muss es mit allen Elektronen gleichzeitig reagieren. Und bei so geringen Temperaturen reicht die Energie des Leiters dafür einfach nicht aus. Das ist der Grund, weshalb sich Elektronen ohne Widerstand bewegen können.

Husch, husch, Magnetfeld!

Mit der Supraleitung geht ein schöner Effekt einher. Wenn man normalerweise einen Leiter in ein Magnetfeld hält, gehen die Feldlinien durch den Leiter. Die Physiker Walther Meissner und Robert Ochsenfeld beobachteten, dass im Gegensatz zu normalen Leitern Supraleiter die Feldlinien aus ihrem Inneren herausdrängen. Das liegt an Strömen, die an der Oberfläche des Leiters induziert werden.



↗[2]: *„Suprafluidität" auf Seite 187*
↗[3]: *„Spin" auf Seite 191*



Diese Ströme induzieren wiederum ein Magnetfeld, das das externe Magnetfeld im Leiter aufhebt. Und schon haben wir einen feldfreien Leiter. Dieser Effekt ist nicht nur für Physiker interessant, sondern auch nett anzusehen. Ein Supraleiter, der alle Magnetfeldlinien verdrängt, ist ein perfekter Diamagnet (ein Magnet, der, sobald man ihn in ein externes Magnetfeld gibt, selbst ein Gegenfeld produziert und sich vom externen Feld abstößt). Er wird im externen Magnetfeld schweben, so wie wir es in der Abbildung sehen.

Neue Möglichkeiten

Stell dir die Möglichkeiten vor, die Supraleiter bieten! Ohne elektrischen Widerstand können wir Ströme verlustfrei transportieren. Während die Kühlung von Supraleitern immer noch sehr aufwendig und teuer ist, haben einige Energieversorger bereits damit begonnen, supraleitende Kabel einzusetzen. Wenn sich die Kabel erst gar nicht erwärmen, kann man durch sie viel höhere Ströme transportieren. Während die Sicherungen in unseren Haushalten (je nach Modell) schon bei 20 A rausfliegen, um Kabel vor dem Schmelzen zu bewahren, halten supraleitende Kabel viel mehr aus. Im zweiten Foto sieht man zwei Kabel. Beide halten Ströme von 12.000 A aus. Das dicke ist ein klassischer Leiter, der von innen mit Wasser gekühlt werden muss. Das kleine ist ein Supraleiter. Hohe Stromstärken in dünnen Kabeln werden gebraucht, um in den Spulen von Elektromagneten starke Magnetfelder zu erzeugen. Supraleiter sind also immer dann sehr gefragt, wenn sehr starke Magnetfelder benötigt werden, zum Beispiel in Teilchenbeschleunigern (↗[4]) oder im MRT (Magnetresonanztomographen).

Verschiedene Materialien eignen sich als Supraleiter, allerdings unterschiedlich gut. In den Magneten des Teilchenbeschleunigers LHC (aus dem auch das dünne Kabel der Abbildung stammt) werden Legierungen aus Niob und Titan verwendet. Die Temperatur, bei denen ein Material supraleitend wird, kann sehr unterschiedlich sein. Besonders interessant sind Materialien, die nicht auf 4 K, sondern nur bis 100 K (was immer noch -173 °C sind, aber hey …) gekühlt werden müssen. Bei ihnen kann man flüssigen Stickstoff anstelle Helium verwenden (was sehr teuer und selten ist). Die Hoffnung ist, dass es in Zukunft Materialien gibt, die noch weniger gekühlt werden müssen. Es ist aber jetzt schon klar, dass solche Materialien sehr komplex und kompliziert zu produzieren sein werden.



↗[4]: *„Teilchenbeschleuniger“ auf Seite 253*

Abbildung (oben links): © CERN

Abbildung (unten richts): Boris Lemmer

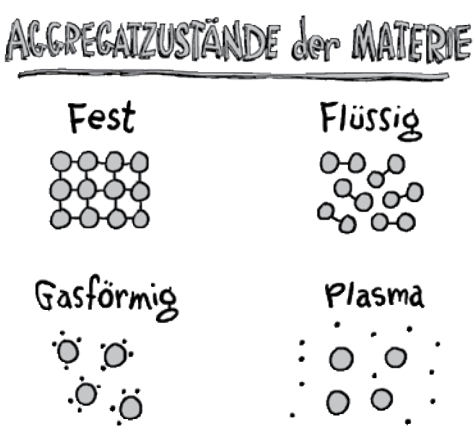

SUPRA-Flüssigkeiten
SCHLUCK
Uii, der geht runter wie Öl!
SUPRA Wein

Suprafluidität

Die gruselige Art von Fluid

Reden wir mal über Fluide. Der Ausdruck „Fluid“ bezeichnet sowohl Flussigkeiten als auch Gase. Wir haben schon gelernt, wie sich Fluide bewegen (↗[1]). Wir haben auch schon ein Fluid mit ganz besonderen Eigenschaften kennengelernt, das „Nicht-Newtonsche-Fluid“ (↗[2]). Während das Nicht-Newtonsche-Fluid etwas zwischen fluidem und festem Zustand war, werden im gleich über etwas reden, das ganz sicher ein Fluid ist.

Was macht eigentlich ein Fluid aus? Materie, wie etwa Wasser, existiert in verschiedenen Aggregatzuständen: fest, flüssig, gasförmig oder als Plasma. Welcher Aggregatzustand vorherrscht, hängt vom Druck und von der Temperatur ab. Die Aggregatzustände werden von den Kräften verursacht, die zwischen den Molekülen der Materie herrschen. Wassermoleküle können sich gegenseitig anziehen und einen festen Kristall bilden. In fester Form kann Wasser seine Form oder sein Volumen nur schwer verändern. Aber sobald die Wassermoleküle genug mittlere Energie besitzen (also das Wasser warm genug ist), brechen die Bindungen im Kristall auf und die Moleküle können sich bewegen. Daher kann man flüssiges Wasser sehr leicht verformen. Aber die Wassermoleküle sind immer noch dicht gepackt, daher kann man Wasser nicht komprimieren. Erhöht man die Temperatur weiter, bleiben die Moleküle nicht länger dicht beieinander, sondern werden frei. Und da man dann den Abstand zwischen den Molekülen auch wieder verringern kann, indem man einen externen Druck aufbaut, kann man das Gas komprimieren. Erhöht man die Temperatur weiter, kann man sogar die Elektronen vom Rest der Atome abreißen. Diesen Zustand nennt man Plasma. Mehr zu solchen Phasenübergängen gibt es im Kapitel über die Kindheit des Universums (↗[3]).



Eigenschaften von Fluiden

Zurück zu den Fluiden: Man kann sie, neben ihren elementaren Eigenschaften, auch nach ihrem Verhalten einteilen. Fluide leiten zum Beispiel Wärme. Manche mehr, manche weniger. Diesen Effekt kann man in Zahlen fassen, und zwar als Wärmeleitfähigkeit λ. Manchmal will man sie besonders klein halten, zum Beispiel um sein Haus im Winter besonders warm zu halten. Die notwendige Isolierung baut man aus Materialien mit kleinem λ, die nicht so viel Wärme nach außen transportieren. Die kleinste thermische Leitfähigkeit, die man sich vorstellen kann, hat das Vakuum. Dort ist $\lambda = 0$. Es gibt aber auch Fälle, bei denen man ein großes λ haben will, z.B. um Wärme schnell von sich erhitzenden Maschinen abzuführen, damit diese nicht kaputt

↗[1]: *„Strömungen und Turbulenzen“ auf Seite 27*
↗[2]: *„Nichtnewtonsches Fluid“ auf Seite 39*
↗[3]: *„Zeitstrahl unseres Universums“ auf Seite 100*

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_46

gehen. Kupfer und Silber sind dafür gut geeignet. Neben der thermischen Leitfähigkeit ist sicher auch die Viskosität eines Fluids ganz interessant. Die Viskosität sagt uns, „wie dickflüssig“ ein Fluid ist. Je viskoser, desto langsamer bewegt es sich. Genauer gesagt beschreibt Viskosität den Widerstand gegen Scherkräfte. In der Abbildung versuchen wir das zu verdeutlichen. Hält man die untere Platte fest und bewegt die obere, bewegt sich die oberste Flüssigkeitsschicht mit, die unterste nicht. Die Viskosität sagt nun, wie viel Kraft pro Fläche wir aufwenden müssen, um eine bestimmte Geschwindigkeit bei einem bestimmten Plattenabstand zu erreichen. Honig und Wasser sind zwei gute Beispiele für Fluide mit höchst unterschiedlicher Viskosität. Lustige Randbemerkung: Wenn du etwas mit richtig hoher Viskosität suchst, nimm Pech (nicht das Unglück, sondern die Flüssigkeit)! In einem Experiment, das 1927 gestartet wurde, wurde die Rate gemessen, mit der Pech aus einem Trichter tropft. Seit das Experiment läuft, haben es erst neun Tropfen geschafft. Und nur der letzten Tropfen wurde von einer Webcam beim Fallen beobachtet. Das Experiment, das noch immer läuft, hat es auch ins Guinnes-Buch der Rekorde geschafft – als am längsten andauerndes Laborexperiment der Welt.



Helium – kalt, kälter, krass

Aber zurück zu den Fluiden! Reden wir mal über ein ganz besonderes: Helium. Dessen bestehen aus zwei Protonen und zwei Neutronen im Kern sowie zwei Elektronen. In der Sonne kommt recht viel Helium vor, da es das Produkt der Kernfusion (↗[4]) ist. Das Helium, das wir hier auf der Erde haben, kommt allerdings nicht von der Sonne. Es stammt aus radioaktiven Elementen in der Erdkruste, z.B. Uran. Bei dessen Zerfall wird α-Strahlung frei (↗[5]). Die α-Teilchen sind bereits die Kerne der Heliumatome und müssen nur noch zwei Elektronen aus der umliegenden Erdkruste einfangen. Man kann Helium aus natürlichem Gas extrahieren und es für viele Dinge verwenden: Wenn man es einatmet, klingt man wie Mickey Maus, da die Schallgeschwindigkeit von Helium ungefähr dreimal so hoch ist wie die von Luft. Da die Dichte von Helium geringer ist als die von Luft, ist es auch ein beliebtes Füllgas für Ballons. Heliumballons können fliegen, brennen aber nicht so schnell. Das ist der große Vorteil gegenüber Wasserstoff, mit dem man zwar auch Ballons füllen könnte, doch diese wären um Einiges reaktiver (also deutlich leichter entflammbar) als Helium. Die bevorzugte Verwendung von Helium ist aber die Kühlung. Falls du jemals einen MRT-Scanner in einem Krankenhaus gesehen hast: Die Spulen seiner Elektromagneten werden mit Helium gekühlt. Der weltgrößte Teilchenbeschleuniger (↗[6]) wird ebenfalls mit Helium gekühlt. Wo wir gerade von Kühlung sprechen: Was passiert eigentlich, wenn man Helium kühlt? Am Anfang des Kapitels haben wir über Phasenübergänge gesprochen. Früher oder später wird gasförmiges Helium also flüssig. Diesen Übergang nennt man Kondensation. Während wir das gute, alte Wasser dafür nur auf unter 100 °C, oder auch

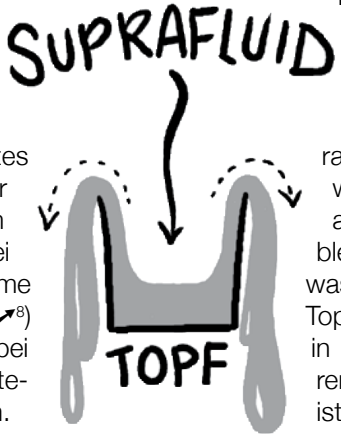


↗[4]: *„Kernfusion“ auf Seite 179*
↗[5]: *„Alpha-, Beta- und Gammastrahlen“ auf Seite 175*
↗[6]: *„Teilchenbeschleuniger“ auf Seite 253*

373 K, kühlen müssen, bleibt Helium noch bis zu 4 K flüssig! Man sieht: bis zum absoluten Nullpunkt ist nicht mehr viel Platz für Helium, um fest zu werden. In der Tat muss es dafür sogar auf unter 1 K abgekühlt werden. Aber bei normalen Bedingungen wird Helium selbst dann nicht flüssig. Man muss es schon mit 25-fachem Atmosphärendruck zusammenquetschen. Das ist sicherlich schon beeindruckend, wäre aber nicht Grund genug, Helium ein eigenes Kapitel zu widmen.

Superkalt, Superfluid

Im Kapitel über Supraleitung (↗[7]) haben wir gelernt, dass bestimmte Materialien in bestimmte Quantenzustände übergehen, wenn man sie stark genug kühlt: Sie werden supraleitend. Das bedeutet, sie verlieren all ihren elektrischen Widerstand. Wenn Helium kälter als 2 K wird, wandelt es sich in ein sogenanntes „Suprafluid“ um. So, wie sich bei der Supraleitung alle Elektronen zu einem großen System verbinden, können bei suprafluidem Helium alle Helium-Atome mit einer einzigen Wellenfunktion (↗[8]) beschrieben werden. Und genau wie bei der Supraleitung führt das zu sehr interessanten Eigenschaften beim Helium.



Die thermische Leitfähigkeit gibt an, wie schnell ein Material Wärme transportieren kann. Im heißen Teil des Materials befinden sich schnelle Atome. Indem sie an die angrenzenden Atome stoßen, können sie ihnen Geschwindigkeit übertragen. Stellen wir uns vor, wir würden jetzt an einer einzelnen Welle(-nfunktion) rütteln. Die Reaktion am anderen Ende der Welle würde unmittelbar folgen.



Wärme, die durch die Bewegung von Atomen repräsentiert wird, wird also unmittelbar von einem Ende des Materials zum anderen transportiert. Dadurch wird die thermische Leitfähigkeit λ eines Suprafluids unendlich!

Und wie sieht es mit der Viskosität aus? Während die Reibung von Elektronen im Leiter den elektrischen Widerstand bewirkt, erzeugt die Reibung der Schichten im Fluid die Viskosität. Und so wie beim Supraleiter der elektrische Widerstand vollständig verschwindet, verschwindet auch beim Suprafluid die gesamte Viskosität. Stell dir mal suprafluiden Honig auf dem Löffel vor. Wie lange könntest du den wohl balancieren?

Es ist aber nicht nur das Balancieren auf dem Löffel, das beim Suprafluid ziemlich schwierig wird. Selbst wenn du es in eine Tasse kippst und auf den Tisch stellst, wird es nicht dort bleiben. Der „Onnes-Effekt“ beschreibt, was passiert: Das Suprafluid wird den Topf hochklettern und herausfließen, wie in unserer Abbildung dargestellt. Während das für normale Fluide unmöglich ist, sind beim Superfluid die Kräfte, die es an der Wand halten, größer als die Gravitationskraft. Und da es keine Reibung (Viskosität) mehr gibt, wird ein dünner Film des Fluids den Becher bedecken und sich seinen Weg zum energetisch niedrigsten Zustand suchen. Und der ist unter dem Tisch. Der Onnes-Effekt macht es auch sehr schwierig, ultrakaltes Helium zu lagern. Ein winziges Loch reicht schon aus, und das superfluide Helium findet seinen Weg nach draußen!

↗[7]: *„Supraleiter“ auf Seite 183*
↗[8]: *„Welle-Teilchen-Dualismus“ auf Seite 147*



"Was soll das heißen: Das Teilchen hat auf die Linse gekotzt?"

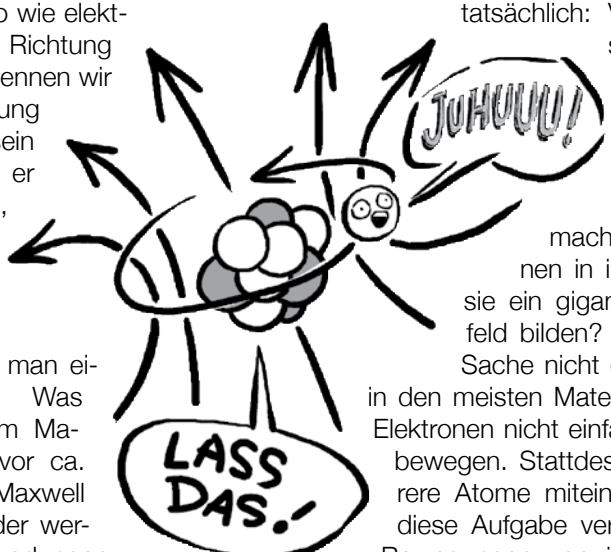
Spin

Teilchentanz in diskreten Schritten

Die Magnete in unserem Alltag erscheinen ziemlich mysteriös. Sie üben eine Kraft aus (auf andere magnetische Materialien), die scheinbar aus dem Nichts kommt. Sie erlaubt uns, unglaublich gute Kühlschrankgedichte an unser liebstes Möbelstück zu heften, die dort scheinbar für immer hängen bleiben. Doch woher kommt diese Kraft?

Magnete – so funktionieren sie

Sie kommt einfach aus dem Magnetfeld, das Magnete erzeugen (↗[1]). Genauso wie elektrische Felder haben sie eine Richtung und eine Stärke. So etwas nennen wir „Vektorfeld“. Die Ausrichtung sagt dem Magneten, wohin sein Nordpol zeigen soll. Sobald er in die richtige Richtung zeigt, bewegt er sich in Richtung der größten Magnetfeldstärke.



Alles klar, aber wie erzeugt man eigentlich ein Magnetfeld? Was macht einen Magneten zum Magneten? Nun, das wurde vor ca. 150 Jahren von James C. Maxwell herausgefunden: Magnetfelder werden von beschleunigten Ladungen erzeugt. Wann immer also ein geladenes Teilchen seine Richtung ändert, egal wohin, erzeugt es ein Magnetfeld. Dieses bleibt so lange bestehen, so lange die Richtungsänderung andauert. Am einfachsten lässt sich ein konstantes Magnetfeld erzeugen, indem man ein geladenes Teilchen im Kreis fliegen lässt. Ein schönes Beispiel dafür sind Kupferspulen: Ein Strom fließt durch sie hindurch und erzeugt ein Magnetfeld. Aber Elektronen, die im Kreis fliegen, findet man auch in fast allen Atomen: Elektronen, die um Atomkerne kreisen, eignen sich hervorragend! Und auch wenn aufgrund der Quantenmechanik die Beschreibung, dass das „Elektron in Kreisbahnen um das Atom fliegt“ nicht ganz korrekt ist, tut das Elektron etwas Quantenmechanisches, was dem Ganzen sehr nahe kommt. Und tatsächlich: Viele Atome verhalten sich aus diesem Grund auch wie kleine Magnete!

Ist es also das, was Magnete zu Magneten macht? Tanzen alle Elektronen in ihren Bahnen so, dass sie ein gigantisch großes Magnetfeld bilden? Wie sich zeigt, ist die Sache nicht ganz so einfach. Denn in den meisten Materialien können sich die Elektronen nicht einfach frei in Kreisbahnen bewegen. Stattdessen müssen sie mehrere Atome miteinander verbinden. Und diese Aufgabe verlangt ganz bestimmte Bewegungen von ihnen, die eben keine Kreisbahnen sind.

Das macht aber nichts: viele Materialien verhalten sich dennoch wie Magnete, da ihre Elektronen Magnetfelder erzeugen. Wie ist das möglich? Nun, wie

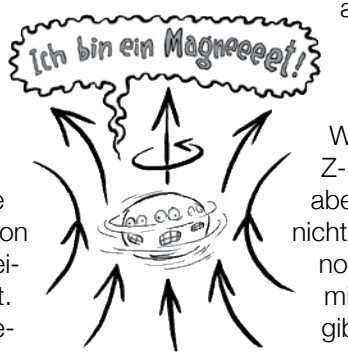
↗[1]: *„Licht“ auf Seite 7*

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_47

sich zeigt, erzeugt ein einzelnes Elektron auch dann ein Magnetfeld, wenn es sich nicht dreht. Es muss sich dafür nicht einmal bewegen!

Sich drehende Elektronen sind auch Magnete

Als Physiker das vor etwa hundert Jahren erkannten, waren sie ganz schön verwirrt. Denn diese Beobachtung schien im Widerspruch zu dem zu stehen, was Maxwells Theorie besagte. Aber sie entwickelten eine Erklärung: Das Magnetfeld der Elektronen würde dadurch erzeugt, dass sich das Elektron um sich selbst dreht, und zwar mit einer ganz bestimmten Geschwindigkeit. Wenn das Elektron ein kleiner geladener Ball wäre, würde diese Drehung in der Tat nach Maxwells Theorie ein Magnetfeld erzeugen. Daher nennt man die physikalische Größe, die diese Drehung beschreibt, auch „Spin“ (Englisch für „Drall“). Heute wissen wir, dass Elektronen keine kleinen Bälle sind, sondern kompliziertere Objekte, die den Gesetzen der Quantenmechanik gehorchen. Aber der Ausdruck „Spin“ war einfach so schön griffig, und die Idee der sich drehenden Elektronen so anschaulich, dass er sich bis heute in den Köpfen der Physiker gehalten hat. Selbst jetzt findet man noch Abbildungen dazu in zahlreichen Lehrbüchern zur Physik, obwohl das sicherlich eine starke Vereinfachung dessen ist, was wirklich mit dem Elektron passiert.



EIN ROTIERENDES ELEKTRON

Der Spin – mehr als nur eine Zahl

Die Stärke des erzeugten Magnetfeldes (verknüpft mit der „Drehgeschwindigkeit“) hat den gleichen Wert für alle Elektronen. In Planck-Einheiten hat der Spin einen Wert von 1/2. Später haben Physiker herausgefunden, dass alle Elementarteilchen einen Spin besitzen und dieser immer Werte hat, die in halbzahligen Schritten auftreten. Teilchen können also einen Spin von null haben (wie das Higgs-Boson, ↗[2]), einhalb (wie alle Quarks, das Elektron und die Neutrinos), eins (die Bosonen der Wechselwirkungen: Gluonen, W- und Z-Bosonen und das Photon – das aber kein Magnetfeld erzeugt, weil es nicht elektrisch geladen ist). Bis jetzt hat noch niemand ein Elementarteilchen mit einem Spin von 3/2 entdeckt (es gibt jedoch Teilchen mit diesem Spin, die aus mehreren Quarks zusammengesetzt sind). Das gleiche gilt für einen Spin von zwei. Doch falls es ein Graviton geben sollte, das gesuchte Boson der Gravitation, dann sollte sein Spin 2 betragen.



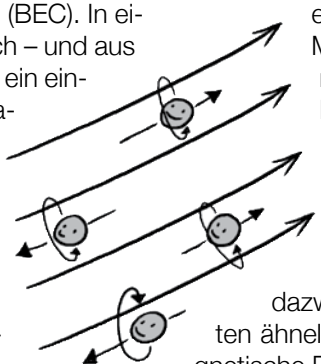
Bosonen und Fermionen

Teilchen mit ganzzahligem Spin heißen „Bosonen“, und die mit halbzahligem Spin „Fermionen“. Diese Unterscheidung ist wichtig: Bosonen und Fermionen verhalten sich grundlegend verschieden. Zusammenfassen kann man das Ganze zu der Frage „Wie viele Teilchen können gleichzeitig am selben Ort existieren?“. Mit anderen Worten: Wie viele Teilchen einer Art können identisch sein, so dass all ihre physikalischen Eigenschaften gleich sind?



↗[2]: *„Der Higgs-Mechanismus“ auf Seite 245*

Die Antwort für Bosonen ist: so viele, wie du magst! Du kannst so viele Bosonen übereinander stapeln, wie es dir gefällt. Sie haben dann alle den gleichen Ort, die gleiche Geschwindigkeit und auch sonst die gleichen Eigenschaften. Einen solchen Zustand nennt man „Bose-Einstein-Kondensat“ (BEC). In einem BEC sind alle Bosonen exakt gleich – und aus dem Grund verhalten sie sich auch wie ein einzelnes, gigantisches Teilchen. BECs waren übrigens in der Forschung über die letzten Jahre ziemlich angesagt! BECs können nämlich Phänomene wie Supraleitung (↗[3]) und Suprafluidität (↗[4]) verursachen!



Für Fermionen hingegen ist die Antwort: höchstens eines! Das bedeutet, dass sich Fermionen viel eher wie kleine Kugeln verhalten als Bosonen. Wenn ein Fermion bereits eine bestimmte Position, Geschwindigkeit, einen bestimmten Spin usw. hat, muss sich jedes andere Fermion im Universum in mindestens einer Eigenschaft von ihm unterscheiden. Es muss entweder an einem anderen Ort sein oder eine andere Geschwindigkeit haben. Und wenn zwei Fermionen am selben Ort und in Ruhe sind, muss zumindest ihr Spin in eine andere Richtung zeigen.

Quantisierter Spin: entweder mit uns oder gegen uns

Wo wir gerade vom Spin sprechen – es gibt eine andere wunderliche Eigenschaft, die die Verrücktheit der Quantenmechanik offenbart. Der Spin eines Elektrons ist wie ein kleiner Pfeil: Seine Länge gibt an, wie stark das Mangetfeld ist, das das Elektron erzeugt. Und die Richtung des Pfeils besagt, in welcher Richtung der „Nordpol“ des Magneten liegt. Man kann sich den Spin auch als die Drehachse des Elektrons vorstellen. Die Länge des Pfeils ist für alle Elektronen gleich, nämlich (in Planck-Einheiten) 1/2. Die Richtung ist allerdings alles andere als beliebig! Steckt man ein Elektron in ein Magnetfeld, verhält es sich wie alle Magnete – es will in die Richtung der magnetischen Feldlinien zeigen. Ein Elektron kann sich aber nicht einfach so beliebig drehen, wie es z.B. eine Kompassnadel tun würde. Sein Spin zeigt entweder in Richtung des Magnetfeldes oder entgegengesetzt dazu. Aber alle anderen Richtungen dazwischen sind verboten. Dieses Verhalten ähnelt der Art, wie Energie über elektromagnetische Felder ausgetauscht werden kann: Veränderungen der Energie können nur in bestimmten Schritten stattfinden, nicht kontinuierlich (↗[1]). Der Spin ist also etwas, das sich nur in Schritten einer Planck-Einheit verändern kann. Zeigt er in Richtung der Magnetfeldlinien, spricht man von einem Wert von +1/2, zeigt er entgegengesetzt, von -1/2. Und da der Unterschied der beiden Zustände in Planck-Einheiten genau eins ist, kann das Elektron nur zwischen diesen beiden Werten hin und her springen, nicht aber etwa in Zustände dazwischen, und so auch nicht zur Seite zeigen.

Das ist aber noch nicht die ganze Wahrheit. Zwar kann der Spin eines Elektrons nur in oder entgegen der Richtung des Magnetfeldes zeigen. Da Elektronen aber Quantenteilchen sind, kann er sich auch in einem Überlagerungszustand befinden und gleichzeitig in beide Richtungen zeigen (↗[5]), mit verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten. Das erlaubt es uns, Quantencomputer zu konstruieren (↗[6]), zumindest in der Theorie.

↗[3]: *„Supraleiter“ auf Seite 183*
↗[4]: *„Suprafluidität“ auf Seite 187*
↗[5]: *„Schrödingers Katze“ auf Seite 159*
↗[6]: *„Qubits“ auf Seite 203*


DERWEIL in der SUBATOMAREN WELT...
ICH BIN MIT JEMANDEM VERSCHRÄNKT, ABER ES IST NICHTS ERNSTES...

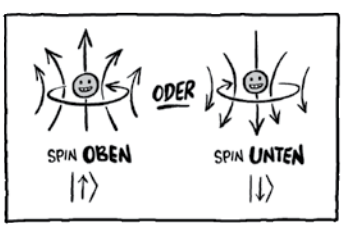
Verschränkung

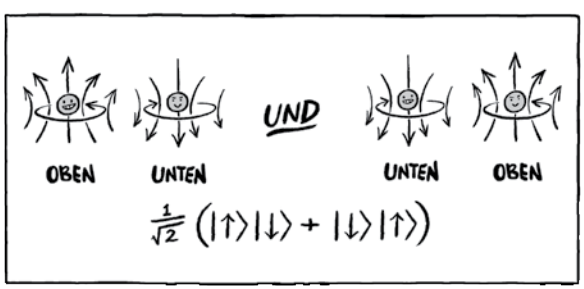
Eine spukhafte Fernwirkung?

Wir haben schon oft betont, wie merkwürdig die Quantenmechanik ist. Bei den allerkleinsten Objekten gilt die Logik unseres Alltags nicht mehr. Während ein klassisches Ding an einem bestimmten Ort, und nirgendwo sonst, sein muss, kann ein Quantending an mehreren Orten gleichzeitig sein, mit unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten.

Elektronen-Spin: hoch, runter oder beides!

Ein tolles Beispiel dafür ist der Spin eines Teilchens (↗[1]), in erster Linie der eines Elektrons. Der Spin ist das, was ein Teilchen zu einem kleinen Magneten macht. In einem externen Magnetfeld gibt es zwei Möglichkeiten, wie sich der Spin ausrichten kann: entweder in Richtung der magnetischen Feldlinien oder entgegengesetzt. Als Quantenteilchen kann sich ein Elektron aber auch in einem Überlagerungszustand dieser beiden Möglichkeiten befinden. So wie Schrödingers Katze (↗[2]) zur gleichen Zeit sowohl lebendig als auch tot sein kann, kann der Spin zur gleichen Zeit sowohl in Richtung des Magnetfeldes als auch entgegengesetzt zu ihm stehen. Stellen wir uns das Elektron wieder als sich drehende geladene Kugel vor, bedeutet das, dass sich das Elektron zur gleichen Zeit sowohl im als auch gegen den Uhrzeigersinn dreht!





Nun ist es aber nicht bloß so, dass jedes Elektron ein Quantensystem ist und sich daher in einer Superposition von zwei Zuständen befinden kann: Zwei (oder mehr) Elektronen können das genauso gut. Das bedeutet, dass sich auch das System „zwei Elektronen“ in einem Überlagerungszustand befinden kann. Und das ist sogar noch viel spannender als bloß bei einem! Denn es bedeutet, dass die beiden Elektronen verschränkt sein können.

Verschränke Elektronen: Spin, Baby, Spin!

Um das Paradebeispiel zweier verschränkter Elektronen zu beschreiben, stellen wir uns vor, die beiden würden sich in einem Magnetfeld befinden, das nach oben zeigt. Der Spin der Elektronen zeigt also entweder nach oben oder nach unten. Besser noch, das System kann sich sogar in einer Überlagerung der beiden folgenden Zustände befinden: Das erste Elektron hat den Zustand „Spin oben“, das zweite „Spin unten“ (das ist der erste Zustand) sowie das erste hat „Spin unten“ und das zweite „Spin oben“.

↗[1]: *„Spin“ auf Seite 191*
↗[2]: *„Schrödingers Katze“ auf Seite 159*

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_48

Wie auch bei Schrödingers Katze bleiben die beiden Elektronen in diesem Zustand, bis sie gestört werden – und die Messung einer der beiden Spin-Zustände zählt als Störung. Stellen wir uns jetzt vor, jemand fragt „Ist der Zustand des ersten Elektrons oben oder unten?“, und führt dann eine Messung durch, um es herauszufinden. Nach den Regeln der Quantenmechanik besteht dann eine 50-prozentige Wahrscheinlichkeit, dass der Spin des ersten Elektrons nach oben zeigt, und eine 50-prozentige Wahrscheinlichkeit, dass er nach unten zeigt. Der Spin des zweiten Elektrons steht dann aber auch automatisch fest, ohne dass wir es nochmal separat messen müssen: Je nach Ausgang der ersten Messung zeigt er nach unten bzw. nach oben (jeweils entgegengesetzt zum ersten). Der Spin des ersten Elektrons ist also zufällig, der des zweiten aber automatisch entgegengesetzt zum ersten.

Spukhafte Fernwirkung

Das scheint jetzt auf den ersten Blick nicht sonderlich überraschend zu sein. Wenn man ein Hütchenspiel mit zwei Hütchen und einer Murmel spielt, weiß man, sobald man ein Hütchen angehoben hat und die Murmel sieht, dass sie sich dort befindet, und eben nicht unter dem anderen. Dafür muss man das zweite Hütchen nicht noch extra hochheben. Diese Situation ist aber nicht vergleichbar mit der, in der wir uns mit den verschränkten Elektronen befanden. Denn beim Hütchenspiel befand sich die Murmel bereits unter einem der Becher, bevor wir nachgesehen hatten. Wir wussten es nur noch nicht. Bei den verschränkten Elektronen hingegen wurde der Zustand (Spin oben oder unten) erst dann festgelegt, als wir nachgesehen haben. Es gab keine fehlende Information.



Das Einstein-Podolski-Rosen-Paradoxon

„Nun gut“, kannst du sagen, „dann verändert die Messung des ersten Elektrons dessen Zustand. Und das erste gibt dann schnell dem zweiten Bescheid, dass es gerade gemessen wurde, und das zweite stellt dann seinen Spin entsprechend ein.“ Und das ist genau der Punkt, der Einstein, Podolsky und Rosen vor rund 100 Jahren beunruhigt hat. Es ist nämlich so: Die Spins der Elektronen können verschränkt sein, und beide Elektronen können (wenn man nur vorsichtig genug ist) beliebig weit voneinander entfernt werden. Einstein, Podolsky und Rosen argumentierten nun folgendermaßen: was wäre, wenn die beiden Elektronen bei ihrer Messung, sagen wir, ein Lichtjahr voneinander entfernt sind? Der Spin des zweiten Elektrons müsste in dem Moment umspringen, in dem die Messung des ersten durchgeführt wird. Wurde also die Information, welchen Spin das zweite Elektron annehmen muss, schneller als mit Lichtgeschwindigkeit übertragen? Natürlich war besonders Einstein mit diesem Gedanken ganz und gar nicht glücklich. Denn er hatte seine Karriere mit der Theorie begonnen, dass sich nichts schneller als Licht bewegen kann (↗[3])!

↗[3]: *„Relativität von Raum und Zeit“ auf Seite 117*

Dieses sogenannte EPR-Paradoxon (benannt nach seinen Erfindern) hat viele Physiker beschäftigt und ließ Einstein in Bezug auf die Quantenmechanik von einer „spukhaften Fernwirkung“ sprechen. Er mochte sie ganz und gar nicht. Aber bald hat man erkannt, dass das Ganze eigentlich gar kein Problem darstellt. Denn obwohl das zweite Elektron seinen Zustand in genau dem Moment festlegt, in dem das erste gemessen wird, ist es nicht möglich, bei diesem Vorgang Informationen zu übertragen.

Keine Kommunikation mit Überlichtgeschwindigkeit: Stark Trek schon wieder vereitelt

Folgendes würde passieren: Stell dir vor, du hättest jede Menge Elektronenpaare mit verschränkten Spins erzeugt und würdest den ersten Haufen einem Physiker hier auf der Erde geben und den zweiten einem anderen, weit, weit weg – sagen wir, im Andromedanebel. Die beiden Physiker haben sich darauf verständigt, die Messung in einer vorher bestimmten Reihenfolge durchzuführen, am gleichen Tag, zur gleichen Zeit. Beide werden herausfinden, dass die Hälfte der Spins nach oben zeigt, die andere nach unten. Und beide schließen daraus, dass die Ergebnisse vollkommen zufällig sind. Erst nachdem einer von beiden in ein Raumschiff steigt und den anderen besucht, werden sie herausfinden, dass immer dann, wenn einer „oben“ gemessen hat, der andere „unten“ als Ergebnis bekam, und umgekehrt. Aber um das herauszufinden, müssen sie sich erst treffen und ihre Ergebnisse austauschen. Und das kann nur mit einer Geschwindigkeit, die langsamer als das Licht ist, passieren. Mit anderen Worten: Wann immer einer der beiden Physiker einen Spin misst, kann er nicht sagen, ob sich das Elektron noch in einem verschränkten Zustand befunden und damit den Spin des zweiten Elektrons festgelegt hat, oder ob der andere bereits gemessen hat und man selbst als Folge dessen das Gegenteil davon messen musste. Und es ist auch gut so, dass man den Unterschied zwischen den beiden Fällen nicht herausfinden kann. Denn Einsteins Relativitätstheorie besagt, dass die beiden Fälle ununterscheidbar sind: Denn ein dritter Beobachter, der sich die beiden anderen Physiker anschaut (und sich fragt, ob sie das gleiche jeden Samstag zum Zeitvertreib machen), wird sehen, dass immer eine der beiden Situationen eintritt, je nachdem, wie schnell und in welche Richtung er sich bewegt. Die Relativitätstheorie ist also vor der spukhaften Fernwirkung der Quantenmechanik geschützt.



Übrigens: Obwohl das Ganze ziemlich mysteriös klingt, ist Verschränkung etwas, das man täglich in Laboren erzeugen und messen kann! Und Physiker machen das auch nicht nur zum Spaß, sondern weil Verschränkung das Herzstück von Quantencomputern (↗[4]) und Quantenteleportation (↗[5]) ist.

↗[4]: *„Qubits“ auf Seite 203*
↗[5]: *„Quantenteleportation“ auf Seite 199*



"Seufz. Vielleicht eines Tages."

Quantenteleportation

Hin und wieder zurück

Hört man von den seltsamen Eigenarten der Quantenmechanik, bekommt man den Eindruck, dass es im Wesentlichen um Unschärfe und Unbestimmtheit ginge. Es scheint, als würde man, sobald man genaue Informationen über ein Quantenteilchen haben möchte, gegen die Wand laufen. Du möchtest wissen, welchen Weg das Elektron nahm? Kann niemand sagen (↗[1]). Du möchtest gleichzeitig den Ort und Impuls eines Teilchens wissen? Pech (↗[2]). Ist die Katze in der Kiste tot oder lebendig? Wahrscheinlich beides (↗[3]). Es scheint, als könnten wir die Quantenwelt einfach nicht so richtig in den Griff bekommen.

Die Quantenwelt: Mysteriös …

Doch dieser Eindruck ist falsch! Wir wissen ganz genau, wie die Quantenwelt funktioniert – sie ist nur so völlig anders, als wir es aus unserem Alltag kennen. Es gibt bestimmte Fragen, bei denen wir einfach nicht erwarten können, eine Antwort zu bekommen, denn die Fragen ergeben keinen Sinn. Ein Quantenteilchen hat einfach keinen genau definierten Ort und Impuls zur gleichen Zeit. Zu fragen, welchen Ort und Impuls ein Teilchen hat, ist so, als würde man fragen, wie die Farbe Grün schmeckt.



Wir haben nicht bloß eine gute Vorstellung davon, wie die seltsame Quantenwelt funktioniert. Wir können ihre Eigenschaften sogar zu unserem Vorteil nutzen und damit tolle Dinge vollbringen! Eines der interessantesten Beispiele dafür ist die Quantenteleportation. Man nutzt dabei aus, dass Teilchen verschränkt sind (↗[4]), zusammen mit der Tatsache, dass jede Messung ein System verändert, um letztlich ein Qubit (↗[5]) von einem Ort zu einem anderen zu teleportieren.

… aber wir können sie unserem Willen unterwerfen!

Nun, bevor du dir jetzt Hoffnung machst, einen Teleporter wie bei Star Trek zu entwickeln – das ist jetzt nicht ganz das, worüber wir sprechen. Was wir mit Quantenteleportation meinen, ist die Tatsache, dass wir den Spin eines Elektrons – also ein Qubit – von einem Elektron zu einem anderen transportieren können, ohne die Elektronen selbst bewegen zu müssen.

Emmy hat ein Elektron

Stell dir vor, Emmy sitzt in ihrem Büro und hat ein Elektron mit einem bestimmten Qubit. Das bedeutet, sein Spin zeigt entweder hoch oder runter, oder ergibt irgendeine Quantenüberlagerung der beiden Zustände. Emmy wird höchstwahrscheinlich nicht wissen, in welchem Zustand das Elektron genau ist. Muss sie auch nicht, um die Teleportation zum Laufen zu bekommen. Ist der Zustand eines Qubits unbekannt, gibt es keine Möglichkeit, ihn herauszufinden. Man könnte das Elektron zwar messen, aber dann erhält man lediglich die Zustände „rauf“ oder „runter“. Das sagt uns aber nichts darüber, in welchem

↗[1]: *„Das Doppelspalt-Experiment“ auf Seite 151*
↗[2]: *„Heisenbergsche Unschärferelation“ auf Seite 155*
↗[3]: *„Schrödingers Katze“ auf Seite 159*
↗[4]: *„Verschränkung“ auf Seite 195*
↗[5]: *„Qubits“ auf Seite 203*

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_49

Qubit sich das Elektron zuvor befand (falls es z.B. ein Überlagerungszustand war). Und nach der Messung haben wir den Zustand ohnehin verändert. Dann gibt es auch keinen Weg mehr zurück, um ihn doch noch ausfindig zu machen!

Und das genau ist das Wunder der Quantenteleportation: Man kann ein Qubit transportieren, ohne es zu messen! Ein Qubit selbst misst man nie, man misst in Wirklichkeit etwas anderes.

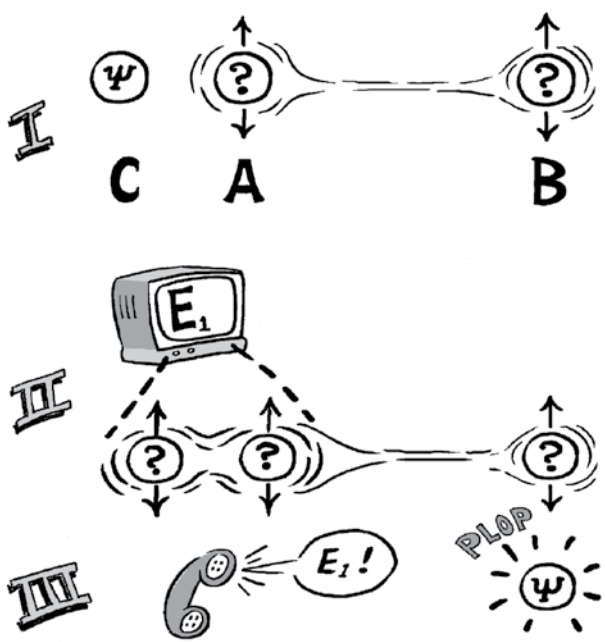
Maxwell erwartet eine Nachricht von Emmy …

Nun, es werden noch ein paar mehr Elektronen beim Quantenteleportationsprozess mitwirken. Also sollten wir ihnen besser Namen geben.

Maxwell sitzt bei unserem Experiment in einem anderen Labor. Und bevor es aufgebaut wurde, haben Emmy und er etwas vorbereitet: Sie haben ein Paar von verschränkten Elektronen erzeugt (↗[4]). Nennen wir sie A und B. Emmy hat Elektron A bei sich, Maxwell Elektron B. Sie müssen vorsichtig mit ihnen umgehen, um die Quantenverschränkung nicht zu zerstören.

Emmy sitzt in ihrem Labor und hat ihr ursprüngliches Elektron – nennen wir es Elektron C – in einem unbekannten Qubit-Zustand und möchte es zu Maxell teleportieren. Und jetzt kommt der Trick: Emmy führt gleichzeitig eine Messung von A und C durch. Sie misst, wie sehr die beiden verschränkt sind.

Aber halt – waren nicht eigentlich A und B verschränkt? C war doch mit keinem der beiden verschränkt! Das stimmt zwar, aber erinnern wir uns, dass jede Messung ein System verändert. Nachdem Emmy A und C vermessen hat, sind die beiden auf jeden Fall auf irgendeine Weise miteinander verschränkt. Und ihre Messung wird Emmy verraten, auf welche Weise genau.



Der Messprozess von Emmy hat aber auch eine Auswirkung auf Elektron B. Denn da A und B verschränkt waren, verändert die Messung von A und C auch den Zustand von B. In Wirklichkeit wird sich Maxwells Elektron B, nachdem Emmy A und C vermessen hat, in gar keinem Verschränkten Zustand mehr befinden. Stattdessen wird es sich in genau dem Zustand befinden, in dem A sich anfangs be-

fand! Einfach dadurch, dass Emmy eine Messung durchgeführt hat, hat Emmy die Rollen von B und C vertauscht! Die Teleportation hat stattgefunden.

… um ihm zu sagen, wie er sein Elektron drehen soll

Eigentlich ist das noch nicht die ganze Wahrheit. Emmy muss das Ergebnis ihrer Messung aufschreiben und Maxwell schicken.

Je nachdem, wie genau A und C verschränkt waren, ist B vielleicht nicht in genau dem gleichen Zustand wie es C vorher war, sondern etwas gedreht. Das Ergebnis von Emmy sagt Maxwell dann, wie er B drehen muss, damit er wieder das gleiche Qubit erhält wie das ursprüngliche C.

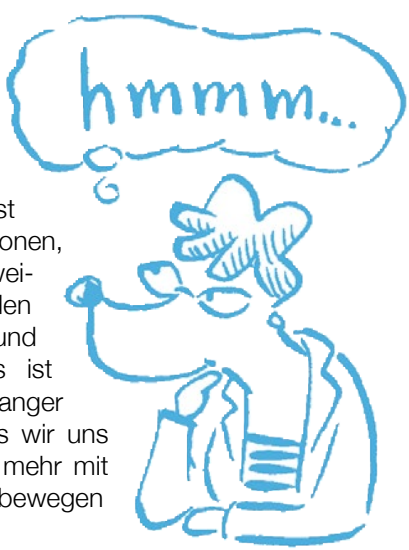
Alles klar, wir wollen lieber noch einmal besprechen, was gerade passiert ist: Die Quantenteleportation hat das Elektron nicht wirklich von einem Ort zum anderen bewegt. Es hat einfach alle Informationen von einem Elektron auf ein anderes übertragen, das weit entfernt war (von C auf B). Der Teleportationsvorgang beginnt dann, wenn Emmy anfängt, die Verschränkung von A und C zu messen. Und er endet, sobald Emmy Maxwell das Ergebnis ihrer Messung sagt. Das muss sie mit konventionellen Methoden tun, weshalb Quantenteleportation nicht schneller als Licht vonstatten gehen kann.

Es gibt keine Verdopplung bei der Teleportation!

Es ist auch wichtig, anzumerken, dass Teleportation nicht bedeutet, Dinge zu kopieren. Da Emmy die Elektronen A und C misst, verändert sie ihre Zustände. Vor der Messung hat C ein bestimmtes Qubit, aber nach der Messung ist C in einem merkwürdigen verschränkten Zustand mit A, aber nicht mehr im gleichen Qubit-Zustand wie vorher. Es ist B, das den Zustand nach Ende der Teleportation übernommen hat. Um also einen Zustand zu teleportieren, muss man seine ursprüngliche Information zerstören.

Das könnte eigentlich sogar befreiend sein – sollte man nämlich eines fernen Tages in der Zukunft in der Lage sein, ganze Menschen zu teleportieren, anstatt bloß einzelne Elektronen, sollten wir besser nicht das Problem bekommen, plötzlich mehrere Versionen von ein und derselben Person herumlaufen zu sehen.

Übrigens: Obwohl Quantenteleportation wie Science Fiction klingt, hat man diese Art der Teleportation sogar schon hinbekommen. Der Spin eines einzelnen Elektrons wurde bereits erfolgreich mehrere Kilometer weit teleportiert! Klingt nach guten Neuigkeiten. Aber denk daran: Der menschliche Körper umfasst ca. 10^{29} Elektronen, ganz zu schweigen von all den Protonen und Neutronen. Es ist also noch ein langer Weg dahin, bis wir uns vielleicht nicht mehr mit dem Auto fortbewegen müssen …





"Endlich! Wir haben die Technologie, um endlos viel Zeit zu verschwenden, um in endlos vielen Parallelwelten ganz viele Spiele gleichzeitig zu spielen!"

Qubits

Wie man einen Quantencomputer baut

Eine der interessantesten Eigenschaften von Elektronen ist ihr Spin (↗[1]). Er ist wie ein kleiner Pfeil, der an dem Elektron hängt und es zu einem kleinen Magneten macht. Die Spitze des Pfeils zeigt dabei in Richtung des Nordpols des Magneten.

Spin-Zustände: oben oder unten?

Wenn du messen möchtest, in welche Richtung der Spin in einem Magnetfeld zeigt – sagen wir, nach oben oder unten – dann gibt es nur zwei mögliche Antworten: Entweder „Der Spin zeigt nach oben" oder „Der Spin zeigt nach unten". Dazwischen gibt es nichts, keinen anderen möglichen Messwert. Insbesondere wird es kein „Der Spin zeigt zur Seite" geben. Der britische Physiker Paul Dirac hat sich für die beiden Möglichkeiten eine nette, kompakte Schreibweise ausgedacht. Man schreibt $|\uparrow\rangle$ für „oben" und $|\downarrow\rangle$ für „unten".



Das Qubit: oben, unten oder dazwischen

Da das Elektron nun aber ein Quantenobjekt ist, muss der Spin nicht entweder im Zustand $|\uparrow\rangle$ oder $|\downarrow\rangle$ sein, sondern kann sich auch in einem Überlagerungszustand der beiden befinden. So, wie Schrödingers Katze zur gleichen Zeit tot und lebendig sein kann (↗[2]), so kann der Spin des Elektrons gleichzeitig – mit gewissen Wahrscheinlichkeiten – nach oben und unten zeigen. Im Prinzip sind alle Linearkombinationen von $|\uparrow\rangle$ und $|\downarrow\rangle$ möglich. Man beschreibt dies als

$$|\psi\rangle = p|\uparrow\rangle + q|\downarrow\rangle$$

Die Zahlen p und q bedeuten Folgendes: Wenn das Elektron einen Spinzustand $|\psi\rangle$ mit den Zahlen p und q hat, dann bekommt man bei jeder Messung mit der Wahrscheinlichkeit p^2 das Ergebnis „oben" und mit der Wahrscheinlichkeit q^2 das Ergebnis „unten". Da dies nun aber die beiden einzigen Möglichkeiten sind, sollten sich die Gesamtwahrscheinlichkeiten zu 100 % addieren. Physiker mögen allerdings Prozente nicht besonders gern. Stattdessen schreiben sie lieber Anteile zwischen 0 (was vollkommen unwahrscheinlich, also 0 %, ist) und 1 (was absolut sicher, also 100 %, ist). Also sollten p und q so sein, dass die Summe ihrer quadrierten Werte 1 ergibt. Jeder Elektronenspin befindet sich in einem Zustand $|\psi\rangle$, vielleicht mit verschiedenen Werten von p und q – Hauptsache p^2 und q^2 addieren sich zu 1!

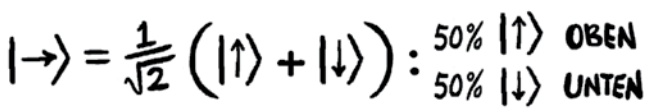
Wenn du dich schon mal näher mit Computern beschäftigt hast, dann kommt dir jetzt vielleicht der folgende Gedanke: „Wenn ein Spin nach oben oder unten zeigen kann, dann kann ich darüber doch perfekt meine Informationen speichern!" Denn alle Daten auf deinem Computer existieren in Form von Nullen und Einsen – genannt „Bits". Aber ob du nun Nullen und Einsen benutzt, oder „an" und „aus",

↗[1]: *„Spin" auf Seite 191*
↗[2]: *„Schrödingers Katze" auf Seite 159*

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_50

oder auch „Strom fließt“ und „kein Strom fließt“, spielt keine Rolle – das ist nur eine Frage der technischen Umsetzung. Das Wichtige dabei ist, dass man zwei verschiedene Zustände braucht, über die man seine Informationen codieren kann.

Und genau das kann auch der Spin des Elektrons – wenn du ihn misst, zeigt er entweder nach oben oder unten. Um nun Informationen zu speichern, braucht man einfach ganz viele Elektronen, die entweder im Zustand $|\uparrow\rangle$ oder $|\downarrow\rangle$ sind. Aber denk daran: Spins sind nicht auf diese beiden Möglichkeiten beschränkt, sie können auch jede beliebige Superposition der beiden annehmen. Daher nennt man den Spin eines Elektrons auch nicht „Bit“, sondern „Quantenbit“ oder kurz „Qubit“.



Wie man Angry Birds und gleichzeitig Battlefield 3 spielt

Ein Computer, der statt normaler Bits Quantenbits speichern kann, wird auch oft „Quantencomputer“ genannt und unterscheidet sich fundamental von den Rechnern, die wir zu Hause und in unserem Büro stehen haben. Da ein Qubit auch die Werte „oben“ und „unten“ haben kann, kann ein Quantencomputer automatisch sowieso all das, was ein normaler Computer kann – und mehr! So kann er in einem Stück Speicher beispielsweise mehr als nur eine Zahl speichern. Einigen wir uns mal darauf, dass „Spin oben“ „1“ bedeutet und „Spin unten“ „0“. In einem Speicher, der aus vier Qubits besteht, kann man dann beispielsweise die Zahl 5 speichern. Im Binärsystem (das Zahlensystem, das nur aus Nullen und Einsen besteht) würde die Zahl 5 als 0101 dargestellt werden. In unserer Quantencomputerwelt entspräche das $|\downarrow\rangle|\uparrow\rangle|\downarrow\rangle|\uparrow\rangle$. Ganz ähnlich könnte man die Zahl 7 als $|\downarrow\rangle|\uparrow\rangle|\uparrow\rangle|\uparrow\rangle$ darstellen. Man könnte aber auch irgend ein anderes beliebiges Qubit nutzen, so zum Beispiel

$$|\rightarrow\rangle = 1/\sqrt{2}\,|\uparrow\rangle + 1/\sqrt{2}\,|\downarrow\rangle$$

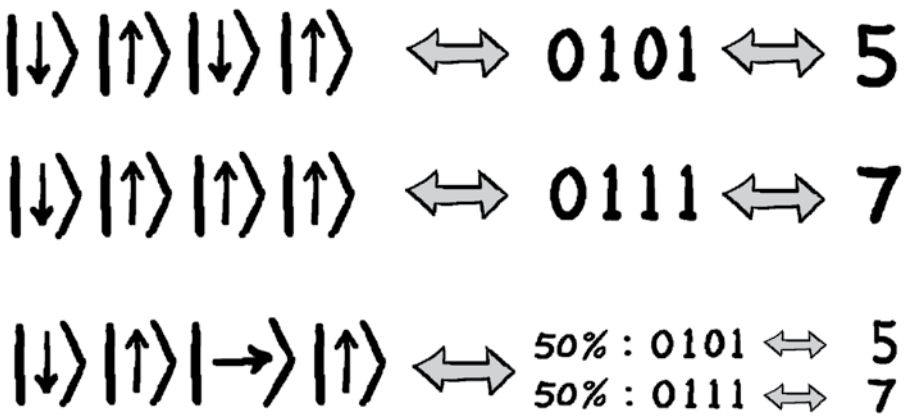
Die vier Quibits könnten dann den Wert $|\downarrow\rangle|\uparrow\rangle|\rightarrow\rangle|\uparrow\rangle$ haben – dabei würden die Werte 5 und 7 gespeichert sein, und zwar gleichzeitig! Wenn man jetzt den Speicher auslesen würde (das wäre, als würde man „alle Spins“ ausmessen), würde man entweder 5 oder 7 erhalten – mit je 50 % Wahrscheinlichkeit. Aber – und das ist das Entscheidende – eine Rechnung mit einem Quantencomputer durchführen bedeutet nicht, dass man eine Messung durchführt. Man kann also mehrere Berechnungen gleichzeitig durchführen, ohne die Wellenfunktion des Spins kollabieren zu lassen (↗[3]). Übrigens, hier nochmal eine Frage für die echten Computergeeks unter euch: Welche Zahlen würden im Speicher gespeichert sein, wenn die Qubits $|\rightarrow\rangle|\rightarrow\rangle|\rightarrow\rangle|\rightarrow\rangle$ wären?

Eine Gefahr für die Online-Sicherheit?

Will man tatsächlich Algorithmen konstruieren, die die Leistung eines Quantencomputers ausschöpfen können, ist das allerdings ziemlich kompliziert. Aber es ist machbar. Theoretisch gibt es eine ganze Menge an Berechnungen, die ein Quantencomputer viel, viel schneller als herkömmliche Computer durchführen könnte. Das ist von großer Bedeu-

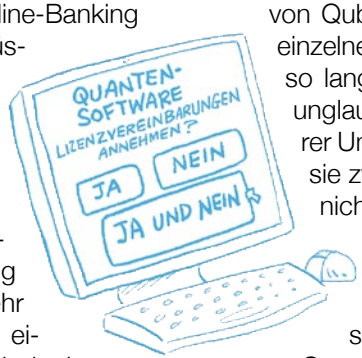
↗[3]: *„Welle-Teilchen-Dualismus“ auf Seite 147*

tung, vor allem für die Online-Kryptographie, also Verschlüsselung. Moderne Verschlüsselungsalgorithmen sind so sicher, weil sie auf der Tatsache basieren, dass es sehr, sehr schwierig ist, eine wieder sicher. Es gibt tatsächlich Algorithmen, die Quantencomputer und normale Computer gleich schlecht knacken können. Wir benutzen sie nur nicht, weil es noch nicht nötig ist.

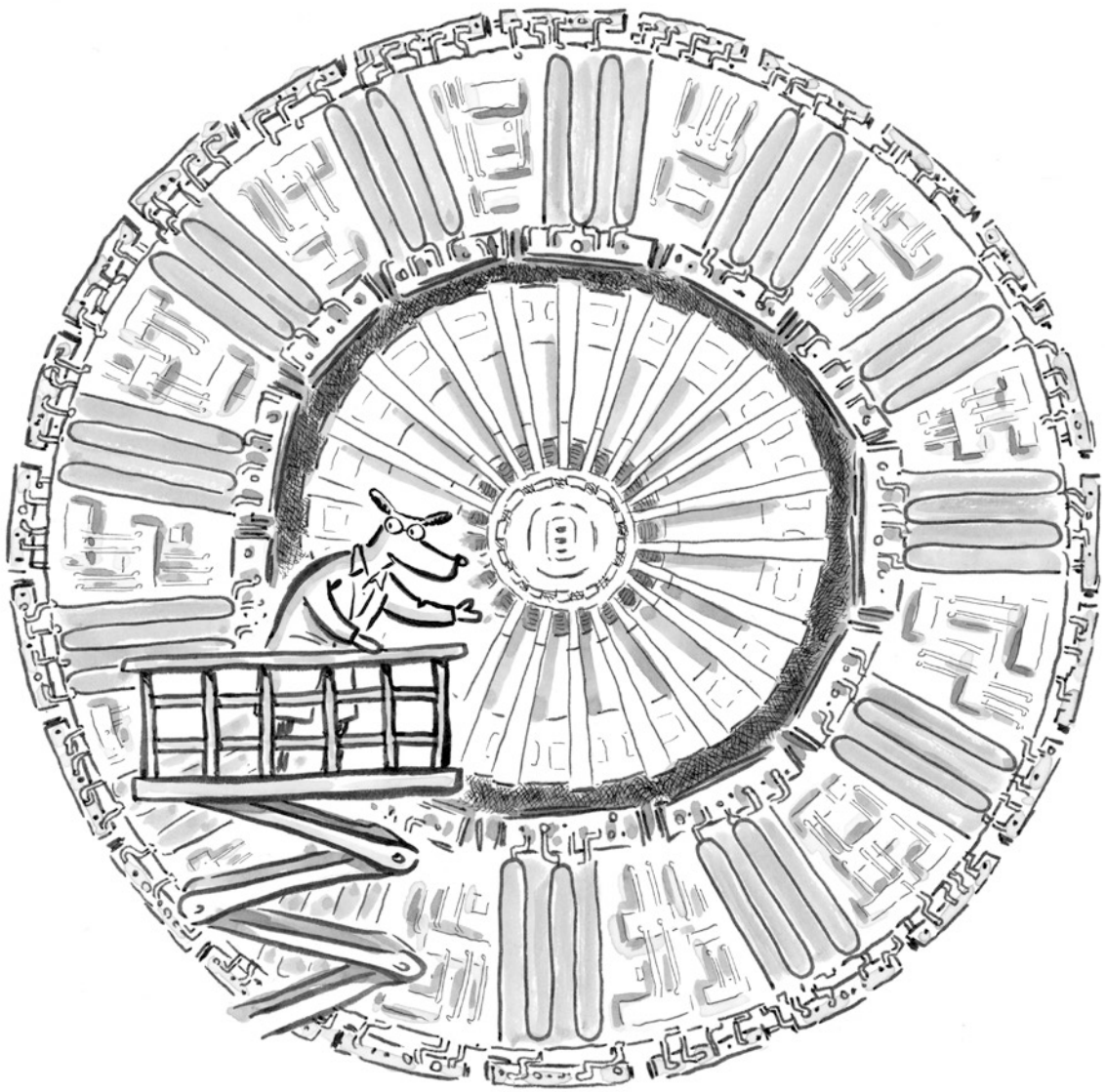


90.000-stellige Zahl in ihre beiden Primfaktoren zu zerlegen. Würde man einfach stumpf alle Möglichkeiten ausprobieren, und zwar mit einem herkömmlichen Computer, bräuchte man dafür ungefähr ein Jahrhundert. Ein Quantencomputer aber könnte das Ganze viel schneller berechnen – eine große Gefahr für alle Verschlüsselungen!

Aber sei beruhigt, deine Daten fürs Online-Banking sind vor einem Knacken der Verschlüsselung geschützt (solange niemand einen Trojaner auf deinem Rechner installiert hat), und das aus zwei Gründen: Zum einen könnte man, falls jemand einen Quantencomputer bauen würde, einfach einen anderen Algorithmus zur Verschlüsselung benutzen. Wenn der dann nicht mehr auf der Primfaktorzerlegung, sondern einem anderen Mechanismus basiert, sind wir



Zum anderen hat bisher noch niemand einen funktionierenden und effizienten Quantencomputer entwickelt. Es gibt einige experimentelle Entwürfe, die mit ein paar Bits rechnen können, aber noch nichts Weltbewegendes (zumindest nicht jetzt, da wir gerade dieses Buch schreiben). Für einen richtig guten müsste man einen ganzen Haufen Qubits verwenden, und keines davon messen. Die Stärke von Qubits ist, dass sie als Überlagerung einzelner Bits existieren können, aber nur, so lange sie niemand misst. Es ist aber unglaublich schwierig, sie so gut von ihrer Umgebung abzuschirmen, dass man sie zwar manipulieren kann, aber dabei nicht misst. So lange wir es noch nicht hin bekommen, Schrödingers Katze sprichwörtlich lange genug lebendig und tot sein zu lassen, müssen wir auch noch nicht mit Quantencomputern rechnen.



IV – Tatort Teilchenphysik

„Als kleiner Welpe liebte ich es, Dinge in Einzelteile zu zerlegen. Es war eine Art Hobby. Stell dir vor, was für eine Freude es für mich war, als ich herausfand, dass Teilchenphysiker den ganzen Tag nichts anderes als genau das tun! In gigantischen Teilchenbeschleunigern bringen sie kleinste Teilchen auf Höchstgeschwindigkeit – und schmeißen sie dann gegeneinander! Der größte Beschleuniger heißt „Large Hadron Collider“. Er liegt ca. 100 m unter der Erde, in der Nähe von Genf, und hat einen Umfang von ca. 27 km – ist das nicht verrückt? So findet man im Prinzip heraus, woraus Materie besteht: man knallt kleinste Teilchen mit hoher Energie gegeneinander und schaut, ob sie in etwas noch kleineres zerbrechen.

Dinge aufeinander zu werfen ist selbstverständlich auch heute noch eines meiner größten Hobbys (neben dem Bau von Raketen)!

Wie sich zeigt, ist alles, was wir kennen, aus einem Haufen Quarks, Elektronen und Ähnlichem aufgebaut – es sind die Grundbausteine unseres Universums. Und erst kürzlich wurde ein neues Teilchen entdeckt: das Higgs-Teilchen.

Auf den nächsten Seiten möchten wir dir einige der spannendsten Teilchen vorstellen und zeigen, was sie so tun. Ich hoffe, du wirst von ihnen genauso fasziniert sein wie ich es war, als ich zum ersten Mal von ihnen hörte.“

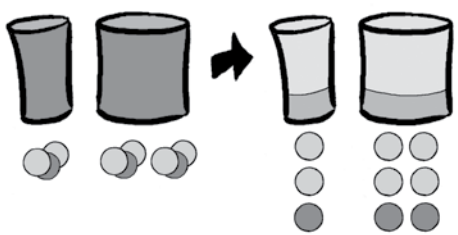


“Herrlich. Aber wo hört das auf?”

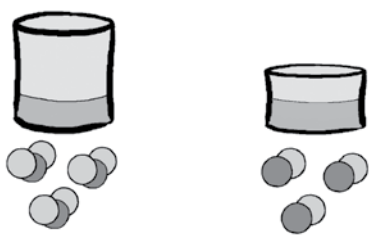
Atome vs. Elementarteilchen

Kommt da noch was?

Seit wir Menschen existieren, versuchen wir herauszufinden, woraus die Welt besteht. Eine Vorstellung war, dass es etwas Grundlegendes geben muss – einen Satz von Elementen. Alles sollte aus diesen Elementen aufgebaut sein. Für die alten Griechen bestand die Welt aus Feuer, Wasser, Erde und Luft. Nicht schlecht für einen ersten Versuch. Aber heute wissen wir, dass man Feuer, Wasser, Erde und Luft nicht mischen kann, um daraus z.B. eine leckere Pizza zu machen.



Gesetz der konstanten Proportionen



Gesetz der multiplen Proportionen

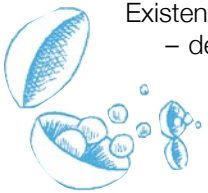
Heute haben wir einen etwas größeren Satz an Elementen, d.h. 117 sind es jetzt. Jedes davon hat individuelle Eigenschaften und eine kleinste Einheit – das Atom. Gehen wir kurz den Weg hin zur Entdeckung der Atome. Die Vorstellung und der Begriff des „Atoms“ wurde vom griechischen Philosophen Demokrit im 5. Jahrhundert v. Chr. formuliert. Die wissenschaftliche Jagd nach Atomen begann 1799, als Joseph-Lois Proust das „Gesetz der konstanten Proportionen“ formulierte. Es besagt, dass, egal wie viel man von einer Substanz nimmt, das Massenverhältnis seiner Bestandteile stets konstant bleibt. Beispiel: Egal, wie viel Salz man nimmt, 61 % davon (des Gewichts) werden immer Chlor und 39 % Natrium sein, wie im ersten Bild gezeigt.

John Dalton erweiterte diese Entdeckung hin zum „Gesetz der multiplen Proportionen“: Nimmt man zwei verschiedene Substanzen, mischt sie und erschafft daraus zwei neue Substanzen, ist das Massenverhältnis seiner Bestandteile immer ein Verhältnis ganzer Zahlen. Ok, selbst Emmy könnte jetzt verwirrt sein. Schauen wir uns ein Beispiel ein: Man kann Wasserstoff und Kohlenstoff entweder zu Methan (CH_4) – das Gas, das Kühe rülpsen – oder Wachs (e.g. $C_{20}H_{42}$) verbinden. Nimmt man die gleiche Menge an Kohlenstoffatomen (20), ist das Verhältnis der Wasserstoffatome in Methan im Vergleich zu Wachs 80:42 bzw. 40:21. Die Abbildung sollte helfen, das Gesetz besser zu verstehen.

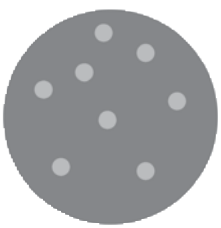
Elemente – gebaut aus Atomen

Die Tatsache, dass etwas nur in bestimmten Verhältniszahlen auftritt, ist ein starker Hinweis auf die

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_51



Existenz kleinster Bausteine der Natur – der Atome. Somit haben wir einen Satz von Elementen, alle mit individuellen Eigenschaften, die wir chemisch nicht weiter aufteilen können. Die kleinsten Einheiten der Elemente, die Atome, wurden von Dalton und seinen Kollegen im Einzelnen untersucht. Dalton fiel etwas Interessantes auf, als er die Atommassen untersuchte: Es waren offensichtlich immer ganzzahlige Vielfache der Wasserstoffatommasse. Wieder das gleiche Phänomen: ganzzahlige Vielfache eines bestimmten Wertes. Könnte das heißen, dass Atome vielleicht noch eine innere Struktur haben und aus etwas noch kleinerem bestehen?



THOMSONSCHES MODELL

Es war J. J. Thomson, der den Atomen einen weiteren Bestandteil entlockte, der bis heute elementar zu sein scheint. Indem er Kathodenstrahlen einsetzte, erzeugte er Elektronenstrahlen. Sein Experiment funktionierte ähnlich wie alte Fernseher (die nicht-flachen). Ein Draht wird durch elektrischen Strom aufgeheizt, Elektronen werden dadurch aus dem Draht freigesetzt und mittels einer Hochspannung beschleunigt (↗[1]). Somit gab es kleinere Bestandteile der Atome – die Elektronen! Thomson dachte an ein Atommodell, das auch „Rosinenkuchenmodell“ genannt wird: Elektronen sind in einem positiv geladenen Kuchen verteilt und bilden zusammen ein Atom.

Aber dieses Atommodell sollte nicht lange halten. 1911 ersetzte Ernest Rutherford es mit einer wichtigen Neuerung. Beobachtungen zeigten, dass die Struktur von Atomen ganz anders sein musste. Aber wie beobachtet man etwas, das man nicht sehen kann?

Murmeln als Mikroskop

Es gibt ein großes Problem beim Beobachten kleinster Teile: Man kann sie einfach nicht sehen. Atome haben eine Größe von ca. 10^{-10} m. Weder kann man solche Strukturen direkt sehen, noch hilft ein Mikroskop. Das Rutherfordsche Streuexperiment hatte einen anderen Ansatz. Stell dir vor, du hast ein Objekt, das du nicht sehen kannst, weil es versteckt ist. Dann lässt du einen Haufen Murmeln auf das Objekt zurollen. Die Murmeln werden dann in verschiedene Richtungen abgelenkt. Diese Richtungen hängen von der Form deines versteckten Objekts ab. Indem man also die Verteilung der gestreuten Murmeln untersucht, bekommt man eine Idee von der Struktur des Objekts, an dem man gestreut hat. Das könnte man so tun wie Erwin, indem man komplexe Formeln berechnet, oder wie Maxwell, indem man die Verteilungen mit denen von Referenzobjekten vergleicht, deren Form man kennt. Rutherford verwendete keine Murmeln, sondern Strahlung aus α-Teilchen (↗[2]), die er auf eine dünne Goldfolie schoss. Das Ergebnis des Experiments sieht man in der Abbildung neben dem Thomsonschen Atommodell: Die positive Ladung ist in einem Atomkern in der Mitte konzentriert, der fast die ganze Atommasse beinhaltet und von Elektronen umgeben ist.



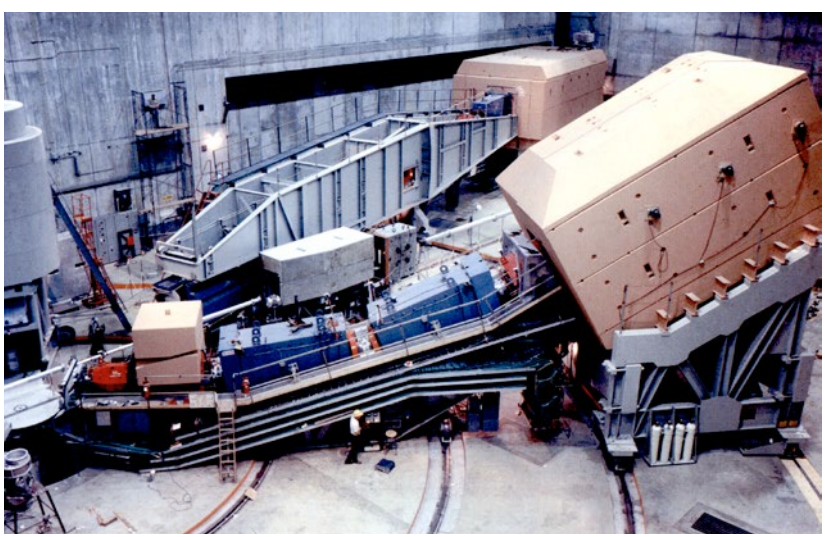
RUTHERFORDSCHES MODELL

↗[1]: *„Teilchenbeschleuniger“ auf Seite 253*
↗[2]: *„Alpha-, Beta- und Gammastrahlen“ auf Seite 175*

Und dazwischen ist nichts. Neue Einblicke in die Struktur des Atomkerns lieferten James Chadwicks Experimente im Jahr 1932. Er fand ein Teilchen mit derselben Masse wie das leichteste Atom, aber ohne Ladung: das Neutron. Die Struktur der Atommassen, die 100 Jahre zuvor von Dalton entdeckt wurde, konnte nun erklärt werden: Atomkerne bestehen aus Protonen und Neutronen. Und diese Kerne sind von Elektronen umgeben. Und dieses Modell gilt noch heute.

Mini-Murmeln aus Superkanonen

Ist das das Ende der Geschichte? Das Ende der Geschichte der Atome zunächst einmal schon, aber noch nicht das Ende der Geschichte der Elementarteilchen. Wir wissen bereits, dass Atome nicht elementar sind. Stattdessen bestehen sie aus Protonen, Neutronen und Elektronen. Das ist ziemlich bequem. Anstelle von 117 Elementen hat man nun drei Bausteine des Universums. Aber auch dieses Bild hielt nicht lange. Da Physiker wie neugierige Kinder sind, wollten sie weiter mit ihren Murmelmikroskopen spielen. Sie ersetzten die α-Strahlen durch Elektronenstrahlen und erhöhten die Energie, mit der sie auf die Atomkerne schossen. Während man Rutherfords Streuexperiment noch auf einem Tisch aufbauen konnte, sind die Elektronenkanonen und die Detektoren, mit denen man die gestreuten Elektronen beobachtet, etwas größer. Das Foto zeigt ein wichtiges Experiment, das am Stanford Linear Accelerator (↗[1]) durchgeführt wurde. Als Ergebnis mehrerer Streuexperimente fand man heraus, dass Protonen selbst eine innere Struktur haben. Die Energie war hoch genug, um Protonen aufzubrechen! Das Ergebnis passte gut zu einem Modell, in dem Protonen eine bestimmte innere Struktur haben: Quarks (↗[3])!



Man sieht, dass das Spiel, bei dem Objekte aufgebrochen werden, um zu schauen, ob etwas darin ist, seit jeher gespielt wird. Und solange „nichts mehr drin ist“, kann man ein Teilchen als elementar bezeichnen. Aber die Vergangenheit hat gezeigt: was wir als elementar bezeichnen, hängt davon ab, wie gut unser Mikroskop ist. Das ist der Grund, weshalb die Menschen gigantische Teilchenbeschleuniger bauen um zu schauen, ob es noch etwas in den Quarks gibt. All das, was wir heute als elementar bezeichnen, ist im Kapitel über das „Standardmodell“ (↗[3]) zusammengefasst. Aber: Die Suche mit Beschleunigern wird weitergehen!

↗[3]: *„Das Standardmodell“ auf Seite 217*

Foto: US DOE

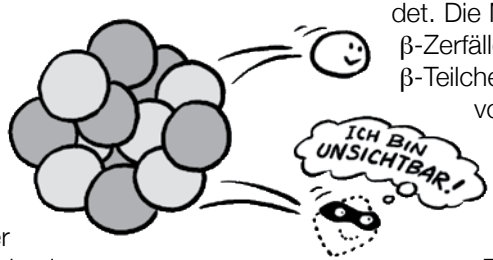


“Ich sollte mehr Ballaststoffe essen. Seit Neuestem haben es sogar Neutrinos schwer, durch mich durch zu kommen.”

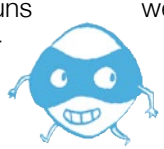
Das Neutrino

So leicht und doch so schwer zu fassen

Neutrinos gehören zu den fundamentalen Bestandteilen unseres Universums und werden vom Standardmodell (↗1) zusammen mit vielen anderen Teilchen beschrieben. Wieso aber sollte man ihnen ein eigenes Kapitel widmen? Gibt es etwas, das nur sie können?



Es gibt zunächst einmal vieles, das sie nicht können. Da Neutrinos weder elektrische noch Farbladung tragen, reagieren sie weder mittels der elektromagnetischen, noch der starken Wechselwirkung. Und da sie superleicht sind, tut sich auch kaum was bei der Gravitation. Bleibt nur noch die Schwache Wechselwirkung. Und der Name sagt es schon: Sie ist schwach. Sehr schwach. Das bedeutet, dass das Neutrino fast gar nicht wechseltwirkt. Ist auch nicht schlimm. Wusstest du, dass jede Sekunde ca. 100.000.000.000.000 Neutrinos deinen Körper durchströmen? Würden sie wie α-, β- or γ-Strahlen (↗2) reagieren, wären wir wohl innerhalb von Sekunden tot. Aber sie fliegen einfach durch uns durch. Dadurch verlieren sie auch keine Energie. Somit ist es schwer, sie zu stoppen. Wirklich schwer: Man bräuchte eine Bleiwand, die ein Lichtjahr dick ist, um 50% der durchfliegenden Neutrinos zu stoppen.



Die Entdeckung der Neutrinos

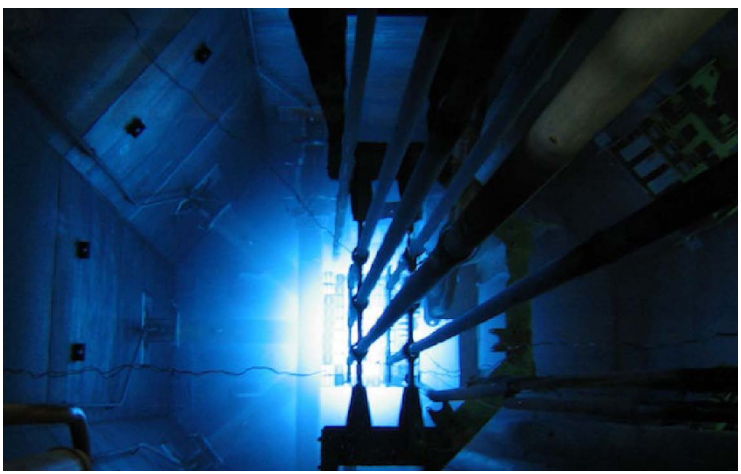
Wenn sie so schwer zu fangen sind, woher wissen wir denn, dass es Neutrinos gibt? In den 1920ern haben Physiker verzweifelt die Antwort auf eine Frage gesucht: Im radioaktiven Betazerfall wandelt sich ein Proton in ein Neutron um. Oder umgekehrt. Damit die elektrische Ladung erhalten bleibt, wird ein Positron oder Elektron (β-Teilchen) ausgesendet. Die Menschen beobachteten diese β-Zerfälle und maßen die Energie der β-Teilchen. Im Gegensatz zur Energie von α-Strahlen, die immer einen festen Wert hat, zeigten die β-Strahlen eine breite Energieverteilung. Das bedeutet, dass die β-Teilchen nicht die ganze Energie tragen, die in dem Prozess frei wird. Stattdessen schien es so, als würden sie sich die Energie mit einem weiteren Teilchen teilen. Man sah aber keines. Möglich wäre das also nur, wenn das Extrateilchen unsichtbar und masselos wäre und mit nichts reagieren würde. Aber stell dir vor, jemand erzählt dir von einem großen Elefanten, der direkt vor dir steht, den du aber weder sehen noch fühlen kannst. Schwer zu glauben, oder? Jede Theorie ist nur dann solide, wenn man sie auch experimentell überprüfen kann. Zum Glück reagiert das Neutrino (das mysteriöse unsichtbare Teilchen) wenigstens ein kleines bisschen. Das bedeutet: Der Bau eines Neutrinodetektors würde früher oder später (in dem Fall später) zu einer Entdeckung führen. In diesen Neutrinodetektoren finden umgekehrte β-Zerfälle statt: Ein Neutrino trifft auf ein Proton und wandelt es in ein Neutron und ein Positron um. Es klappte, und 1956 wurde das Neutrino endlich entdeckt.

↗1: *„Das Standardmodell“ auf Seite 217*
↗2: *„Alpha-, Beta- und Gammastrahlen“ auf Seite 175*

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_52



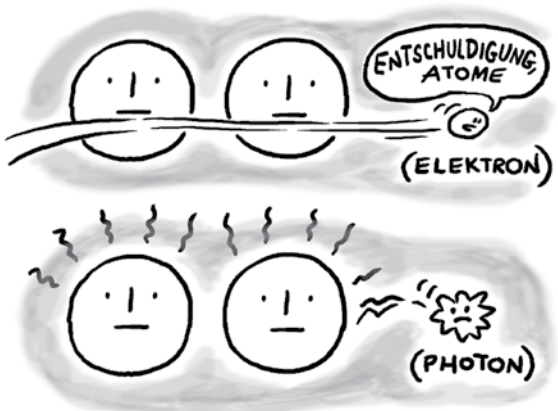
Bisher haben wir nur über ein Neutrino gesprochen. Aber das Standardmodell kennt drei: eines für jeden Typ der geladenen Leptonen (Elektron, Myon und Tau). Und jedes geladene Lepton wird nur mit seinem passenden Neutrino wechselwirken. Beim β-Zerfall sind also nur Elektron-Neutrinos mit dabei. Aber wenn zum Beispiel ein Myon zerfällt, haben wir plötzlich ein Myon-Neutrino. Es gibt auch Antimaterie-Partner der Neutrinos: Anti-Neutrinos. Die braucht man, um die Materie/Antimaterie-Balance (↗[3]) aufrecht zu halten: Wenn ein Positron (Antimaterie) beim β-Zerfall entsteht, kommt ein Neutrino (Materie) dazu. Und wenn es ein Elektron ist, wird ein Anti-Neutrino erzeugt.



Neutrinoquellen

Erinnerst du dich an die riesige Menge an durch uns durchsausende Neutrinos, über die wir am Anfang sprachen? Hast du dich gewundert, woher die überhaupt kommen? Sie werden fast alle in der Sonne produziert (↗[4]), an dem Ort, wo Protonen zu Deuterium fusionieren. Durch die Fusion wird ein Proton zu einem Neutron und ein Elektron-Neutrino wird zusammen mit einem Positron aus der Sonne gespuckt. Da die Sonne ziemlich groß ist, treffen entsprechend viele Neutrinos unsere Erde und auch uns. Um die Zahl der Neutrinos abzuschätzen, die uns treffen, braucht es ein gutes Modell der Sonne und der Dinge, die darin vor sich gehen. Und um das Modell zu testen, braucht es eine Messung, und die haben Physiker durchgeführt: Sie bauten Neutrinodetektoren und zählten Neutrinos. Erinnerst du dich an den Lichtjahre dicken Bleiklotz um Neutrinos zu stoppen? Nun, die Physiker taten ihr Bestes und bauten Detektoren, so groß sie nur konnten. Einige dieser Detektoren funktionierten wie der, mit dem das Neutrino entdeckt worden war: durch eine Umkehr der Neutrinoerzeugung. Andere nutzen einen Effekt mit Namen „Tscherenkow-Strahlung“. Falls du jemals einen Kernreaktor von innen gesehen hast, könntest du diese Strahlung gesehen haben. Es ist das bläuliche Licht im Wasser in dem die Kernbrennstäbe lagern. Bei β-Zerfällen innerhalb der Brennstäbe werden Elektronen und Positronen (wir sagen ab jetzt nur noch Elektronen, aber es kann immer genauso gut ein Positron sein) freigesetzt. Und die sind schnell. Sehr schnell. In dem Fall sogar schneller als Lichtgeschwindigkeit. „Ha“, denkst du vielleicht „nichts kann schneller als Licht sein. Das wusste schon Einstein und ich weiß es auch.“ Das

↗[3]: *„Antimaterie“ auf Seite 221*
↗[4]: *„Kernfusion“ auf Seite 179*
Foto: Kirstie Hansen / IAEA



stimmt, solange du im Vakuum bist, wo Licht die schnellstmögliche Geschwindigkeit besitzt. Aber in einem Medium wie etwa Wasser können die Dinge anders sein. Wie ist das möglich?

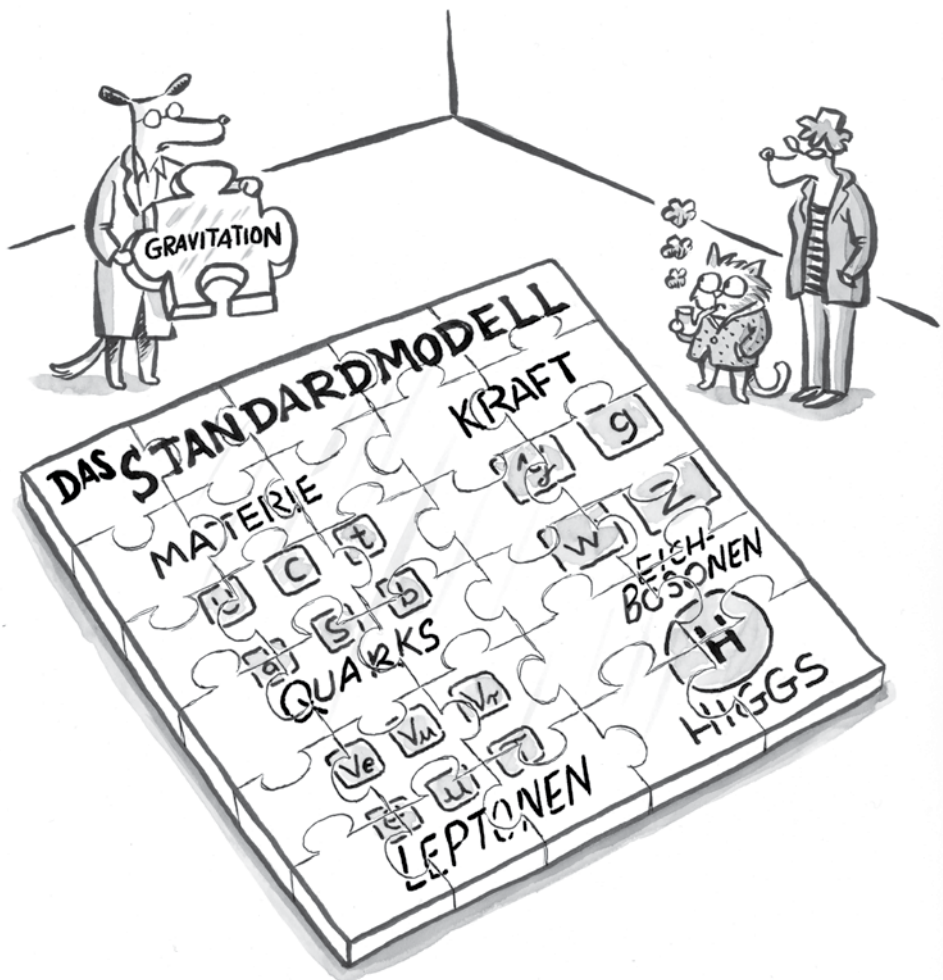
Wie man schneller als Licht wird

Die schnellste Geschwindigkeit, die man haben kann, hängt von der Interaktion mit der Umgebung ab. Schauen wir mal auf die Höchstgeschwindigkeit eines Babys, das auf einen Weihnachtsbaum zu krabbelt. Nehmen wir an, es bewegt sich in einer Umgebung, die wir „Familie“ nennen. Sie interagiert: Immer mal wieder wird jemand das Baby hochnehmen, knuddeln und wieder absetzen. Dieser Effekt verlangsamt das Baby. Und das Gleiche passiert mit Licht im Wasser: Atome absorbieren und re-emittieren es und verlangsamen es damit. Das Verhältnis von „Lichtgeschwindigkeit im Vakuum“ und „Lichtgeschwindigkeit im Medium“ nennt man „Brechungsindex“ n. Den kennt man vielleicht aus der Optik: Diese Zahl beschreibt den Knick, den Licht macht, wenn es von Luft in Wasser oder Glas übertritt. Wir haben nun also ein Elektron, das schneller als Licht (im Wasser) unterwegs ist. Durch seine elektromagnetischen Wechselwirkungen „schüttelt“ das Elektron die umgebenden Atome. Dadurch oszillieren die Elektronen der Atome, und oszillierende elektrische Ladungen senden elektromagnetische Strahlung aus: Licht. Normalerweise heben sich alle Atomschüttelungen auf. Aber wenn das schüttelnde Elektron schneller als Licht ist, bildet sich ein Kegel von „Tscherenkow-Licht“. Man kann ihn mit dem Schockwellenkegel vergleichen, den man sieht, wenn ein Flugzeug die Schallmauer durchbricht.



Nutzen wir nun mal das Tscherenkow-Licht, um Neutrinos zu zählen. Dafür brauchen wir nur Wasser und Lichtdetektoren. Reagiert ein Neutrino mittels der schwachen Wechselwirkung mit einem Wassermolekül, kann es aus ihm ein Elektron herausschlagen. Dieses fliegt dann schnell weiter und erzeugt Tscherenkow-Licht, das dann detektiert wird. Die Richtung des Lichts sagt uns etwas über die Richtung des Neutrinos. Um einen richtig guten Neutrinodetektor zu bauen, braucht man richtig viel Wasser. Wie wär's mit 50 Millionen Litern? Um den Detektor vor anderen Strahlungsquellen abzuschirmen (etwa von der kosmischen Strahlung, ↗[5]), baut man ihn am besten unterirdisch, z.B. in einem Berg. Ein schönes Beispiel für so einen Riesendetektor ist SuperKamiokande, unter dem Berg Kamioka,in Japan gelegen. Eines der Hauptziele von Superkamiokande ist die Messung der sogenannten „Neutrinooszillation“ (↗[6]). Und die ist mindestens genauso verrückt wie die Neutrinos selbst. Ein eigenes Kapitel für Neutrinos geht doch in Ordnung, oder?

↗[5]: *„Kosmische Höhenstrahlung“ auf Seite 261*
↗[6]: *„Neutrinooszillation“ auf Seite 265*

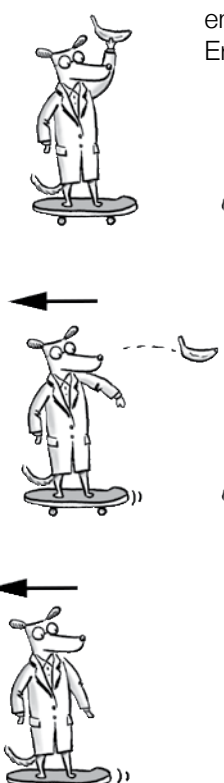


"Und wo passt das jetzt rein?"

Das Standardmodell

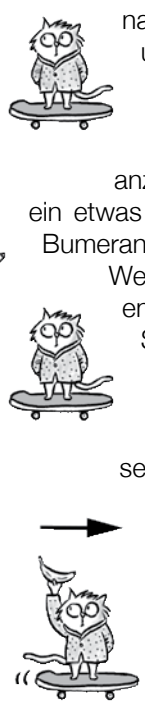
Das bisher beste Handbuch für unser Universum

Ein Teilchenphysiker kann erst dann über seinen Ruhestand nachdenken, wenn ein großes Projekt abgeschlossen ist: das Handbuch für unser Universum. Es soll alle Bausteine der Natur enthalten sowie eine Beschreibung von dem, was sie tun. Dieses Handbuch wird ständig aktualisiert, ist noch lange nicht fertig, aber schon ziemlich umfangreich. Es nennt sich „Standardmodell der Elementarteilchenphysik“. Technisch gesehen ist es eine renormierbare Quantenfeldtheorie: Die Feldquanten entsprechen den Elementarteilchen. Die Felder und Teilchen können in zwei Gruppen eingeteilt werden. Die Teilchen der einen Gruppe sind die Materieteilchen. Sie haben einen Spin (↗[1]) von 1/2 und gehören daher zur Gruppe der „Fermionen“, Teilchen mit halbzahligem Spin. Die andere Gruppe an Teilchen ist anders. Zwar enthält sie auch Teilchen, die man aber aufgrund ihres Spins von 1 „Bosonen“ nennt (das Higgs-Teilchen (↗[2]) mit Spin 0 spielt nochmal eine andere Rolle), aber deren Aufgabe ist irgendwie anders. Sie entspricht nicht dem klassischen „steck sie zusammen wie LEGO-Bausteine, um etwas größeres zu bauen“. Man nennt die Bosonen auch „Trägerteilchen der Kräfte“, da sie zwischen den Fermionen ausgetauscht werden und somit Wechselwirkungen vermitteln. Unser Bild erklärt das mit einem einfachen Beispiel.



Wechselwirkungen durch Teilchenaustausch

Stell dir vor, wie Erwin und Maxwell auf Skateboards stehen. Maxwell wirft Erwin eine Banane zu. Durch die Impulserhaltung (↗[3]) bewegt sich Maxwell in entgegengesetzter Richtung zur Banane. Nachdem Erwin die Banane gefangen hat, übernimmt er deren Impuls und rollt in Richtung der Banane los. Das Spiel kann man weiter hin und her spielen. Nun stellt euch vor, Erwin und Maxwell seien Fermionen und die Banane ein Boson, das eine abstoßende Kraft vermittelt. Für eine anziehende Kraft bräuchte man dann ein etwas anderes Modell, vielleicht mit einem Bumerang. Insgesamt sind drei fundamentale Wechselwirkungen im Standardmodell enthalten: die elektromagnetische, die Starke (↗[4]) und die Schwache Wechselwirkung (↗[5]). Ein besseres Gefühl dafür bekommt man, wenn man „Wechselwirkung“ durch „Kraft“ ersetzt. Aber wenn man sich die Wechselwirkungen genauer anschaut, sieht man, dass sie mehr können, als Dinge abzustoßen und anzuziehen. Übrigens: fehlt nicht was? Gravitation? Stimmt, und das ist einer der Schwachpunkte des Standardmodells: Es kann Gravitation nicht er-



↗[1]: *„Spin“ auf Seite 191*
↗[2]: *„Der Higgs-Mechanismus“ auf Seite 245*
↗[3]: *„Erhaltungssätze“ auf Seite 51*
↗[4]: *„Die Starke Wechselwirkung“ auf Seite 233*
↗[5]: *„Die Schwache Wechselwirkung“ auf Seite 237*

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_53

klären (nähere Infos gibt es in den Kapiteln „String Theorie" (↗6) und „Quantengravitation" (↗7)). Es gibt noch immer ungelöste Probleme, um die Gravitation in den gleichen mathematischen Formalismus zu bringen wie die anderen Wechselwirkungen. Aber auf dem Level der Elementarteilchen können wir die Gravitation getrost ignorieren: Ihr Einfluss ist einfach viel zu klein.



Während die elektromagnetische Wechselwirkung für fast alles zuständig ist, was wir im Alltag erfahren (Handy-Telefonate, Mikrowellengeräte, Herzschläge, Muskelbewegungen, Licht, …) sind die Starke und die Schwache Wechselwirkung etwas versteckt. Die Starke Wechselwirkung hat die Aufgabe, Atomkerne zusammenzuhalten. Dafür sollten wir ihr danken. Ansonsten würden wir sofort auseinanderfallen. Die Schwache Wechselwirkung erlaubt viele Kernreaktionen, zum Beispiel die Kernfusion (↗8), den Heiz-Mechanismus unserer Sonne. Also: keine Schwache Wechselwirkung, kein Sonnenlicht, kein Leben auf der Erde. Gut, dass wir sie haben!



Nicht jedes Fermion kann an jeder Wechselwirkung teilnehmen. Jede Wechselwirkung hat eine eigene „Ladung", und die muss auch das Fermion haben. Bei der elektromagnetischen Wechselwirkung ist das die klassische elektrische Ladung. Wir wissen, dass Teilchen mit positiver Ladung solche mit negativer anziehen, andere positive abstoßen und mit neutralen nichts tun. Die Starke Wechselwirkung reagiert mit allem, was eine sogenannte „Farbladung" (↗4) trägt. Fermionen mit einer solchen Ladung nennt man „Quarks". Die Fermionen ohne Farbladung heißen „Leptonen". Die Ladung der schwachen Wechselwirkung (die schwache Ladung) tragen alle Fermionen des Standardmodells. Das bedeutet, jedes Teilchen kann schwach wechselwirken. Für diejenigen Teilchen, die weder Quarks noch elektrisch geladen sind, ist das die einzige Möglichkeit wechselzuwirken. Wir nennen diese Teilchen „Neutrinos".

Die Sammlung an Standardmodell-Bosonen besteht aus Photonen, W- und Z-Bosonen, Gluonen und dem Higgs-Boson. Die masselosen und elektrisch neutralen Photonen sind die Vermittler der elektromagnetischen Kraft. Da sie masselos sind, ist die Reichweite der elektromagnetischen Wechselwirkung – auch wenn sie immer schwächer wird – unendlich. Denk an Erwin, Maxwell, die Banane und die Skateboards. Masselose Bananen können ziemlich weit geworfen werden. Bei der schwachen Wechselwirkung sieht die Sache anders aus: ihr Vermittler, die W- und Z-Bosonen, sind sehr schwer. Schau dir das Bild mit Erwin, Maxwell und der Melone an. Weit kann man die nicht werfen, stimmt's? Die Masse der W- und Z-Bosonen sorgt für eine sehr kurze Reichweite der schwachen Wechselwirkung. Für die Starke Wechselwirkung und ihre Gluonen ist die Sache nochmal anders. Gluonen sind zwar masselos, aber die Reichweite der starken Wechselwirkung ist trotzdem nur sehr kurz. Der Grund ist, dass Gluonen selbst eine Farbladung tragen. Im Kapitel über die Starke Wechselwirkung kannst du nachlesen,

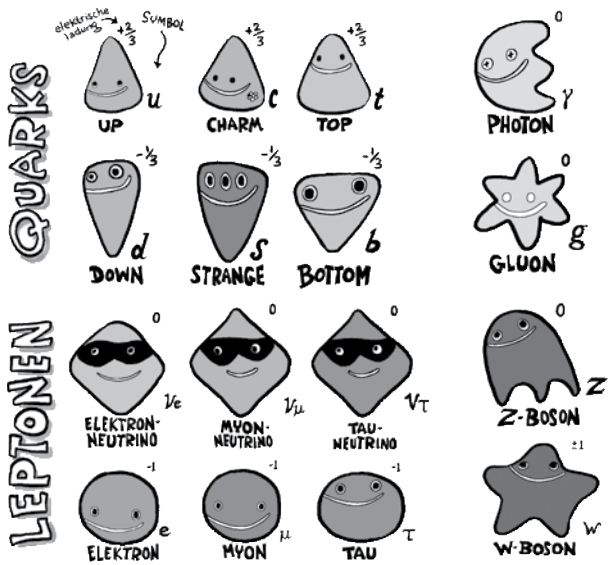
↗6: *„Stringtheorie" auf Seite 307*
↗7: *„Quantengravitation" auf Seite 283*
↗8: *„Kernfusion" auf Seite 179*

wieso das dann zu einer kurzen Reichweite führt. Das letzte Boson, das noch fehlt, ist das Higgs-Boson. Es heißt zwar Boson, hat aber im Gegensatz zu seinen Kollegen einen Spin von 0, nicht 1. Es ist auch kein Vermittler einer Wechselwirkung, stattdessen aber dafür verantwortlich, dass alle Teilchen im Standardmodell ihre Masse erhalten.



Ein ganzer Zoo von Teilchen

Auf dieser Seite siehst du eine Übersicht aller Teilchen des Standardmodells (inspiriert wurden wir hierbei von „The Particle Zoo“, wo man seine Lieblingsteilchen aus Plüsch bestellen kann, ↗[9]): Die Quarks, die geladenen Leptonen und die neutralen Leptonen (Neutrinos) sind in drei Generationen angeordnet. In der ersten Generation findet man alle Teilchen, die man braucht, um das nachzubauen, was auf der Erde so los ist: Aus zwei Up- und einem Down-Quark kann man Protonen bauen, aus zwei Down- und einem Up-Quark Neutronen. Aus Protonen und Neutronen baut man dann Atomkerne, nimmt noch die geladenen Leptonen der ersten Generation, die Elektronen, hinzu und fertig sind die Atome. Die anderen Generationen haben die gleichen Eigenschaften wie die erste, aber ihre Teilchen sind schwerer. Das erlaubt ihnen, in die Teilchen der leichteren Generation zu zerfallen (↗[10]).

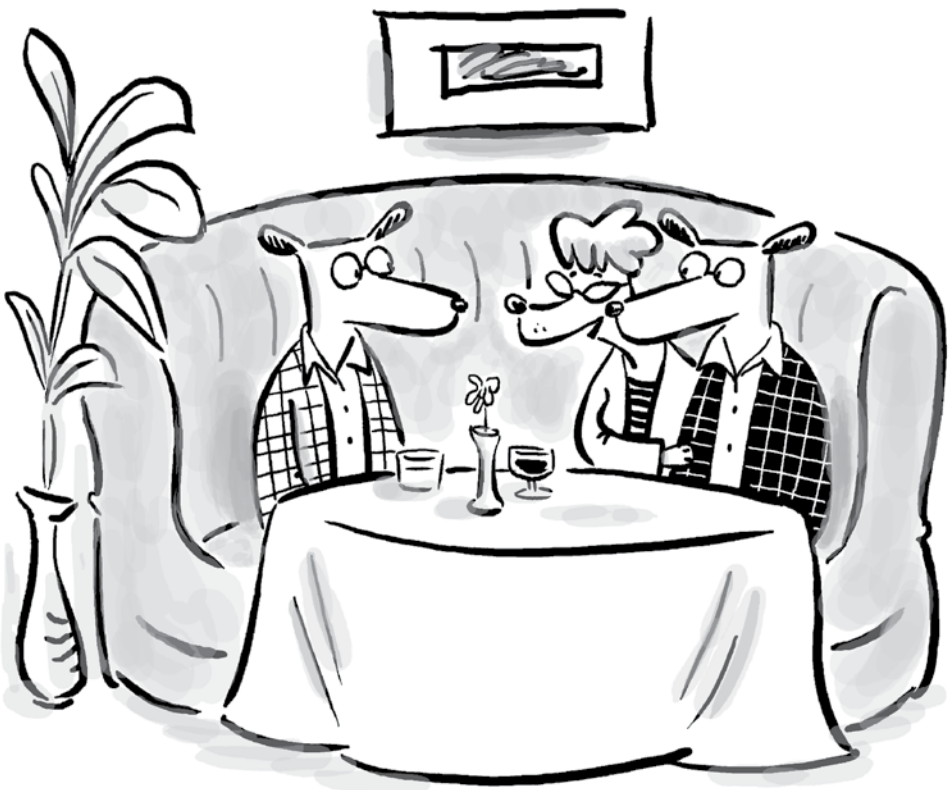


Es ist nicht so, dass man alle Teilchen von Beginn an kannte. Manchmal haben Experimentalphysiker ein neues Teilchen entdeckt und die Theoretiker mussten eine neue Generation hinzufügen. Und manchmal hatten die Theoretiker gute Gründe, ein Teilchen vorherzusagen (so wie das Top-Quark als Partner des Bottom-Quarks), das dann später im Experiment entdeckt wurde.

Symmetrien, so wie die zwischen den Teilchen-Generationen, haben stets eine wichtige Rolle in der Physik gespielt. Durch sie können viele Wechselwirkungen mit dem gleichen Formalismus beschrieben werden. Sie motivieren Physiker dazu, eine allumfassende Theorie zu suchen, die vielleicht sogar die Gravitation enthält. Ideen dafür sind zum Beispiel die Stringtheorie (↗[6]), die Supersymmetrie (↗[11]) oder die Quantengravitation (↗[7]). Diese könnten auch helfen, Antworten auf die Fragen zu finden, für die das Standardmodell keine Lösung kennt: Wieso gibt es so viele Teilchen? Was ist Dunkle Materie (↗[12])? Und wie passt die Gravitation in das Puzzle?



↗[9]: http://www.particlezoo.net
↗[10]: *„Teilchenzerfälle“ auf Seite 225*
↗[11]: *„Supersymmetrie“ auf Seite 303*
↗[12]: *„Dunkle Materie“ auf Seite 137*



“Mein ganzes Leben habe ich jemanden wie dich gesucht – wie wahrscheinlich ist es, dass ich deinem Antimaterie-Doppelgänger begegne?”

Antimaterie

Mehr Science als Fiction

Für viele Leute klingt Antimaterie cool, futuristisch und gefährlich. Man denke an den Film „Illuminati“ mit Tom Hanks, wo ein Irrer Antimaterie aus einem Labor klaut, um damit eine Bombe zu bauen. Was Antimaterie betrifft, enthält der Film sowohl Wahrheit als auch Fiktion – aber was ist sie überhaupt?



Sie ist auf eine Art definiert, die, sagen wir … etwas technisch klingt. „Antimaterie ist wie normale Materie, aber alle Quantenzahlen sind invertiert.“ Wir können uns mal auf die wichtigste Quantenzahl konzentrieren: die elektrische Ladung. Denken wir an das Elektron. Seine Ladung ist negativ. Jetzt invertieren wir seine Ladung. Und, tada, man hat ein positives Anti-Elektron, auch „Positron“ genannt. Es hat die gleiche Masse wie ein Elektron, ist aber eben positiv geladen.

Wie bekommt man Antimaterie?

Antimaterie zu bekommen, ist nicht so einfach. Man muss sich Einsteins berühmtes $E = mc^2$ (↗[1]) zunutze machen. Die Formel besagt, dass wenn man etwas Massives – z.B. Antimaterie – braucht, man sich einfach etwas Energie nehmen und sie konvertieren muss. Je massiver die Dinge sind, die man haben möchte, desto mehr Energie braucht man. Jetzt kommt aber noch ein weiterer Erhaltungssatz (↗[2]) der Natur hinzu: Antimaterie entsteht nicht einfach aus Energie. Sie entsteht immer nur zusammen mit der entsprechenden Menge an Materie. Schwere Antiteilchen brauchen viel Energie. Die Menschen bauen riesige Maschinen, pumpen einen Haufen Energie in Teilchen, knallen sie gegeneinander, um Materie/Antimaterie-Paare zu erzeugen. Diese Maschinen nennt man „Teilchenbeschleuniger“ (↗[3]).

Wenn du einfach nur ein leichtes Materie/Antimaterie-Paar erzeugen willst, reicht ein hochenergetisches Photon. Man bekommt so eins zum Beispiel von einer bestimmten Art der ionisierenden Strahlung, der γ-Strahlung (↗[4]). Diese Strahlung wird bei einer bestimmten Art von Kernzerfällen (↗[5]) frei. Andere Kernzerfälle können auch direkt Positronen produzieren: die β-Strahlung (↗[4]). Du kannst deine Freunde mit deiner eigenen Quelle für β-Strahlung beeindrucken. Geh einfach in den Supermarkt und kauf eine Banane. Das war‘s. Wie das? Bananen enthalten Kalium. Es gibt einen kleinen Teil des Kaliums, dessen Atomkerne ein Neutron mehr enthalten als üblich. Und diese Kerne zerfallen und geben dabei β-Strahlung ab. Kein Grund zur Sorge: dein Bauch ist voll, lange bevor du so viele Bananen gegessen hast, dass dir die Strahlung gefährlich werden könnte.

Wenn um uns überall Antimaterie ist (nicht nur in Bananen), stellt sich die Frage: Was passiert mit ihr? Sie verschwindet. Nicht einfach ins Nichts, aber sobald sie ein entsprechendes Materieteilchen gefunden hat, zerstrahlt sie. Das bedeutet: All ihre Masse wird wieder zu Energie, in den meisten Fällen in Form zweier Photonen. Das ist einfach $E = mc^2$ rückwärts. Bei Positronen geht das ganz fix, da es in der Materie um uns herum viele passende Elektronen gibt.

↗[1]: *„$E = mc^2$“ auf Seite 241*
↗[2]: *„Erhaltungssätze“ auf Seite 51*
↗[3]: *„Teilchenbeschleuniger“ auf Seite 253*
↗[4]: *„Alpha-, Beta- und Gammastrahlen“ auf Seite 175*
↗[5]: *„Radioaktive Zerfälle“ auf Seite 171*

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_54

Für einen solchen Annihilationsprozess gibt es sogar eine medizinische Anwendung (↗6). Aber wenn du zu viele von solchen Annihilationsprozessen hast, wird auch sehr viel Energie frei. Und schon sind wir bei der Antimaterie-Bombe aus „Illuminati".

Antimaterie-Bomben – gibt's die?

Was passiert, wenn ein halbes Gramm Antimaterie und ein halbes Gramm normale Materie aufeinander treffen? Einfach $2 \cdot 0{,}5$ g in $E = mc^2$ einsetzen (also mit der Lichtgeschwindigkeit zum Quadrat multiplizieren) und man bekommt 90.000.000.000.000 Joule an Energie. Ist das viel? Man kann sie in eine bekanntere Einheit umrechnen: Bockwürste. Eine Bockwurst enthält ca. 300 Kalorien (eigentlich sind das immer „Kilokalorien", aber das Kilo sprechen die Leute nie aus) an Energie, die unser Körper aufnimmt, wenn wir sie essen. Das entspricht 1.200.000 Joule. Will man also genauso viel Energie aufnehmen, wie bei der Annihilation von jeweils 0,5 g Materie und Antimaterie frei wird, muss man 72 Millionen Würste essen. Beeindruckend. Okay, während eine Bockwurst eine übliche Einheit sein mag, ist „72 Millionen Würste essen" kein üblicher Vorgang. Man kann die Energie, die bei der Annihilation von 0,5 g Antimaterie frei wird, auch mit der Energie vergleichen, die bei der Explosion der Atombombe „Fat Man" frei wurde, die am 9. August 1945 über der Japanischen Stadt Nagasaki detoniert ist. Man sieht: Schon 0,5 g Antimaterie können richtig viel Ärger machen. Zum Glück ist es technisch unmöglich, so viel Antimaterie zu produzieren und zu speichern. Ein einzelnes Anti-Atom zu speichern ist schon ein Riesenaufwand. Der Grund ist, dass man Antimaterie nicht einfach in einer Kiste lagern kann. Die Kiste und die Antimaterie würden annihilieren. Was man aber tun kann: Leeren Raum finden oder selbst erzeugen, nämlich ein Vakuum (↗7). Produziere deine Antimaterie am besten direkt dort. Dann ist nichts um sie rum, mit dem sie zerstrahlen kann. So weit, so gut. Aber wahrscheinlich wird sie sich bewegen, raus aus dem Vakuum. Und du weißt, was dann passiert. Damit die Antimaterie im Vakuum bleibt, kann man sie nicht einfach mit der Hand festhalten, aber mit elektromagnetischen Feldern.



Antimaterie ist also schwierig zu lagern, aber an sich machbar. Schwierig wird es jedoch, sie zu Anti-Atomen zu kombinieren, oder gar Anti-Moleküle zu formen. Man braucht zunächst eine radioaktive Quelle für Positronen. Man bräuchte auch einen Teilchenbeschleuniger, der Anti-Protonen erzeugen kann. Beide erhält man also getrennt. Dann muss man sie langsamer machen, und dafür sorgen, dass sie sich annähern. Mit etwas Glück und Geduld kombinieren sie dann zu Anti-Wasserstoff. Das ist das einfachste Anti-Atom, das man sich vorstellen kann. Durch verschiedene Ex-

↗6: *„Strahlentherapie" auf Seite 269*
↗7: *„Vakuum und Luftdruck" auf Seite 23*

perimente (↗[8]) lassen sich solche Anti-Atome produzieren, speichern und untersuchen

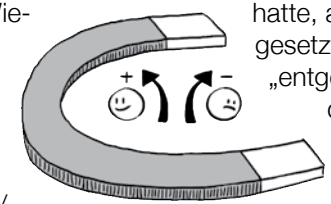
Untersuchung der Antiwelt

Was aber macht Antimaterie so interessant? Wir sagten anfangs, dass sie wie normale Materie ist, nur mit anderer Ladung. Nun, das ist zumindest das, was die Physiker glauben. Aber leuchten Anti-Atome zum Beispiel auch in den gleichen Farben wie Atome? Wird ein Haufen Anti-Atome auch herunterfallen, oder vielleicht nach oben? Es gibt viele Ideen für Experimente mit Antimaterie und die Physiker sind gerade erst dabei, sie zu verstehen. Viele Geheimnisse zum Thema Antimaterie hat man noch nicht gelöst. So zum Beispiel: Wieso existieren wir?

Nach der Urknalltheorie entsprang das Universum aus einem einzigen Punkt mit unglaublich viel Energie (↗[9]). Diese Energie wurde in Materie/Antimaterie-Paare umgewandelt. Und diese wiederum zerstrahlten. Während das Universum sich ausdehnte, ging dieser Prozess immer hin und her. Dabei kühlte es sich auch ab. Und Abkühlen bedeutet, weniger Energie. Irgendwann also stoppte der Prozess der Paarerzeugung. Wenn wir aber nur mit Energie angefangen haben, sollte die Menge an Materie und Antimaterie immer gleich sein. Stimmt das?

Nun, ganz offensichtlich nicht. Wenn wir uns im Universum umschauen, sehen wir viel Nichts und etwas Materie, aber keine Antimaterie. Gäbe es sie irgendwo, würde sie auch immer mal wieder auf Materie treffen und zerstrahlen. Das sollten wir dann beobachten können. Tun wir aber nicht. Und wir wissen nicht, wieso. Es scheint, als gäbe es eine kleine Materie/Antimaterie-Asymmetrie. Und nur durch diese kleine Asymmetrie (1 von 1.000.000 Fälle) existieren wir.

Oh, übrigens: Wie kann man Elektronen von Positronen unterscheiden? Physiker nutzen dafür Magnetfelder, die bewegte geladene Teilchen ablenken: je nach Vorzeichen der Ladung in die eine oder die andere Richtung. Auf diese Weise hat man Positronen zum ersten Mal in der kosmischen Höhenstrahlung gefunden (↗[10]). Dabei wurde ein Teilchen beobachtet (wie Physiker Teilchen beobachten, beschreiben wir im Kapitel über Teilchendetektoren, ↗[11]), das alle Eigenschaften eines Elektrons hatte, aber vom Magnetfeld in die „entgegengesetzte Richtung“ abgelenkt wurde. Also: „entgegengesetzte“ Ladung. Und da war es, das Positron!



Für fast jedes Teilchen des Standardmodells (↗[12]), also der Theorie, die alle Teilchen und eine Beschreibung ihrer Reaktionen umfasst, existiert ein eigenes Antiteilchen. Es stellt sich aber die Frage: Wenn man einen Hund auf der Straße trifft, woher weiß man dann, ob er aus Materie oder Antimaterie besteht? In ein Magnetfeld kann man ihn nicht stecken. Hunde bestehen aus neutralen Atomen und werden daher im Magnetfeld nicht abgelenkt. Was aber geht: Man kann sagen, dass der Hund auf der Straße aus normaler Materie besteht und nicht zerstrahlt. Also muss es ein normaler Hund und kein Anti-Hund sein. Aber wieso sind wir eigentlich aus Materie und nicht aus Antimaterie? Das ist reine Definitionssache. Niemand mag sich selbst gerne „Anti-Irgendwas“ nennen. Deswegen bezieht sich „anti“ immer auf die „andere Welt“.

↗[8]: http://home.web.cern.ch/topics/antimatter
↗[9]: *„Zeitstrahl unseres Universums“ auf Seite 100*
↗[10]: *„Kosmische Höhenstrahlung“ auf Seite 261*
↗[11]: *„Teilchendetektoren“ auf Seite 257*
↗[12]: *„Das Standardmodell“ auf Seite 217*


DERWEIL in der SUBATOMAREN WELT....
DIE MEISTEN VON UNS LEBEN NICHT LANGE GENUG, UM ZUM LESEN DER---
TODESANZEIGEN
TODESANZEIGEN

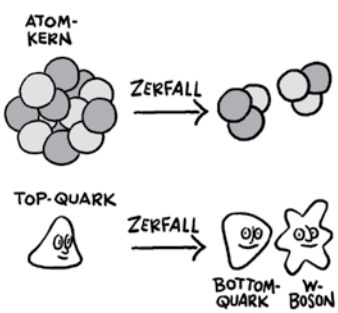
Teilchenzerfälle

Das kurze Leben und die interessanten Nachkommen der Teilchen

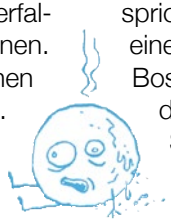
Wenn wir von den Elementarteilchen als Bausteine unserer Natur denken, haben wir ein Bild von kleinen Bauklötzen im Kopf, die wir zusammenstecken, um zu bauen, was wir wollen. Für Up- und Down-Quarks (aus denen Protonen und Neutronen bestehen) und Elektronen stimmt das sogar. Aber was ist mit all den anderen Teilchen des Standardmodells (↗[1])? Leider leben sie nicht lange genug, um etwas wie eine Burg oder ein Flugzeug zu bauen. Bevor man sie zusammenstecken kann, zerfallen sie. Das bedeutet, sie existieren nur für einen sehr kurzen Moment. Je nach Teilchen kann „kurz" 882 Sekunden (im Fall eines freien Neutrons) oder 0,000000000000000000000001 Sekunden (im Fall eines Top-Quarks) bedeuten. Eine solche Lebensdauer ist aber nur auf statistischer Basis definiert. Nimmt man einen Haufen Neutronen und wartet 882 Sekunden bis zum Ende ihrer Lebensdauer, ist immer noch ein Anteil von 1/e=0,368 da, also ca. ein Drittel von ihnen. Der Rest ist zerfallen. Eine Lebensdauer kann man nur im Mittel für einen ganzen Haufen definieren, nicht für ein einzelnes Teilchen. Es kann sofort zerfallen, oder auch viel länger leben als seine Kollegen.

Wieso Teilchen zerfallen

Man fragt sich, wieso Teilchen überhaupt zerfallen. Die Antwort ist einfach: Weil sie es können. Solange es kein Naturgesetz gibt, das einen Prozess verbietet, wird er auch stattfinden. Ein solches Naturgesetz ist oft die Energieerhaltung (↗[2]). Das Sparschwein im Kapitel über Teilchenbeschleuniger (↗[3]) wird nicht zerfallen, bevor man Energie hinzufügt (zum Beispiel mit einem Hammer), um die molekularen Bindungen zwischen den Teilchen aufzubrechen, die die Struktur aufrechterhalten. Hört man von einem zerfallenen Sparschwein, denkt man wahrscheinlich an seine Bruchstücke. Für größere Objekte, etwa auch für Atomkerne, stimmt dieses klassische Bild. Der Kern eines Uranatoms zerbricht zum Beispiel einfach in zwei kleinere. Diesen Prozess nennt man Kernspaltung (↗[4]).



Atomkerne sind zusammengesetzte Objekte aus Protonen und Neutronen (die selbst auch wieder aus Quarks und Gluonen aufgebaut sind). Aber echte Elementarteilchen wie das Top-Quark … sind eben elementar. In was sollen sie denn zerfallen, wenn sie aus nichts Weiterem bestehen? Scheint, als hätten wir ein Problem. Wenn man aber einen Teilchenphysiker nach dem Zerfall eines Elementarteilchens fragt, wird er sagen, dass der Zerfall eigentlich einer Reaktion oder einem Übergang entspricht. Schauen wir uns mal die Zerfallsprodukte eines Top-Quarks an: ein b-Quark und ein W-Boson. Das W-Boson ist das Austauschteilchen der Schwachen Wechselwirkung (↗[5]). Und die Schwache Wechselwirkung ist die einzige, die Teilchen in andere umwandeln kann. Man kann also auch sagen, dass das Top-Quark



↗[1]: *„Das Standardmodell" auf Seite 217*
↗[2]: *„Erhaltungssätze" auf Seite 51*
↗[3]: *„Teilchenbeschleuniger" auf Seite 253*
↗[4]: *„Radioaktive Zerfälle" auf Seite 171*
↗[5]: *„Die Schwache Wechselwirkung" auf Seite 237*

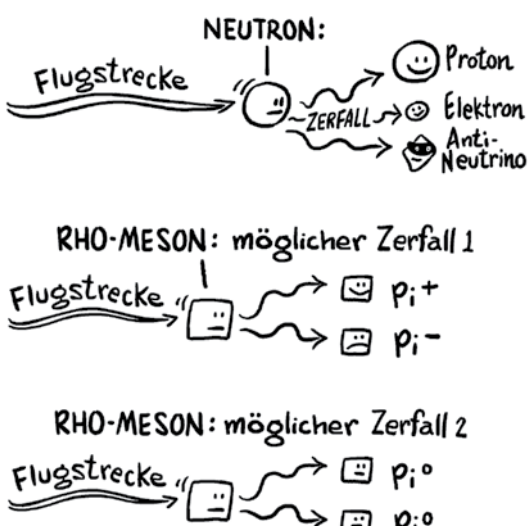
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_55

nicht in ein W-Boson und b-Quark zerfallen ist, sondern sich über die Schwache Wechselwirkung in ein b-Quark umgewandelt hat.

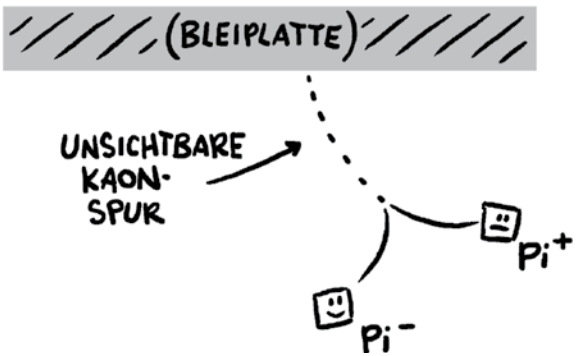
Drei Bedingungen müssen erfüllt sein, damit so etwas passieren kann. Zunächst muss das Teilchen, das zerfallen soll, eine bestimmte Ladung tragen (hier: die schwache Ladung). Wir sagen dann auch, dass das Top-Quark an das W-Boson „koppelt". Die zweite Bedingung ist, dass die Gesamtmasse all ihrer Zerfallsprodukte leichter sein muss als das ursprüngliche Teilchen. Die Differenz zwischen der Masse des Mutterteilchens und der Zerfallsprodukte wird als Bewegungsenergie an die Zerfallsprodukte weitergegeben. Und als letzte Bedingung müssen alle Quantenzahlen erhalten bleiben (↗[2]). Diese Bedingungen erlauben es zum Beispiel, dass freie Neutronen zerfallen, nicht aber freie Protonen. Bei dem Prozess, bei dem sich ein Proton in ein Neutron umwandelt (↗[5]) wird eigentlich ein Up-Quark über die Schwache Wechselwirkung zu einem Down-Quark. Indem ein Down-Quark in ein Up-Quark umgewandelt wird, wird ein Neutron zum Proton. Down-Quarks sind etwas schwerer als Up-Quarks, wodurch Neutronen (die aus zwei Down-Quarks und einem Up-Quarks bestehen) etwas schwerer sind als Protonen (zwei Up-Quarks und ein Down-Quark). Daher kann ein freies Neutron in ein Proton zerfallen, nicht aber umgekehrt. „Moment!", könntest du jetzt denken, „was ist mit dem β-Zerfall von Atomkernen? Dort werden doch Protonen zu Neutronen!". Stimmt: innerhalb eines Atomkerns kann auch ein Proton zerfallen. Das ist nicht leicht zu verstehen, aber versuchen wir es mal. Wenn ein Proton in einem Atomkern zu einem Neutron wird, gibt es danach im Kern weniger sich abstoßende positive Teilchen. Die Starke Wechselwirkung, die die Kerne zusammenhält, hat immer mit der abstoßenden elektromagnetischen Wechselwirkung zu kämpfen, die sie auseinanderreißen will. Wurde das Proton zu einem Neutron, braucht man weniger Bindungsenergie, um den Kern zu stabilisieren. Und diese gesparte Energie kann dann, à la $E = mc^2$, genutzt werden, um ein Proton in ein Neutron umzuwandeln. Puh, das war schwierig. Wenn du wissen willst, wie Physiker solche Zerfallsprodukte zeichnen und berechnen, solltest du dir das Kapitel über die Feynmandiagramme anschauen (↗[6]).

Was man von Teilchenzerfällen lernt

Die Tatsache, dass ein Teilchen zerfällt, sagt einiges aus. Zunächst mal weiß man, dass ein leichteres Teilchen existieren muss. Und indem man sich einen Zerfallsprozess anschaut, lernt man, wie das Teilchen mit anderen Teilchen wechselwirkt. Oft gibt es mehrere Möglichkeiten, wie ein Teilchen zerfallen kann. Alles, was man braucht, sind leichtere Teilchen, eine passende Wechselwirkung und Erhal-



↗[6]: *„Feynman-Diagramme" auf Seite 229*



tungssätze (↗[2]). Je mehr Zerfallsmöglichkeiten es gibt, desto kürzer wird die Lebensdauer. Gibt es keine Möglichkeit, lebt es ewig. Die Lebensdauer hängt zudem noch von der Stärke der Wechselwirkung ab, die den Zerfall vermittelt. Ein Myon lebt deswegen so lange, weil es nur über die Schwache Wechselwirkung zerfallen kann. Jede mögliche Art des Zerfalls nennt man einen „Zerfallskanal". Manchmal haben Teilchen auch ziemlich unterschiedliche Lebensdauern, obwohl sie die gleichen Zerfallskanäle haben. Wenn Physiker Lebensdauern ausrechnen, müssen sie noch etwas Wichtiges berücksichtigen: Gibt es überhaupt genug Raum für einen Zerfall? Also nicht „Raum" im Sinne von Platz, sondern eher „genug Möglichkeiten, die Energie zu verteilen, die bei dem Zerfall frei wird". Diesen Raum nennt man „Phasenraum". Je größer die Differenz der Masse von Mutter- und Tochterteilchen, desto mehr Energie kann verteilt werden. Das ist Teil der Erklärung dafür, dass ein Neutron viel länger lebt als ein Top-Quark: Während die Neutronenmasse nur 1 MeV größer ist als die des Protons, ist das Top-Quark ca. 89.000 MeV schwerer als das b-Quark und W-Boson zusammen. Die „Particle Data Group" hat alle möglichen Zerfälle aller bekannten Elementarteilchen aufgelistet. Diese beeindruckenden Listen findet man auf ihrer Homepage (↗[7]).

Ein Teilchenzerfall klingt erstmal traurig. Aber in Wahrheit ist es eine schöne Art, Neues zu entdecken! Wie im Kapitel über Teilchenbeschleuniger (↗[8]) beschrieben, kann man Teilchen nur über ihre Wechselwirkung mit einem Detektor erkennen. Einige Detektoren sind nur empfindlich für geladene Teilchen; neutrale bleiben unentdeckt. Eine Nebelkammer zum Beispiel macht geladene Teilchen durch Spuren sichtbar. Mit einer solchen Nebelkammer haben die Physiker Butler and Rochester 1947 das neutrale Kaon entdeckt. Ein Kaon besteht aus einem Strange- und einem Anti-Down-Quark. Da es neutral ist, hinterlässt es keine Spur. Aber nachdem es einige Millimeter durch den Detektor geflogen war, zerfiel das Kaon. Die Zerfallsprodukte, zwei geladene Pionen, konnten dann beobachtet und vermessen werden. Kennt man die Richtungen, Massen und Geschwindigkeiten der Zerfallsprodukte, kann man die sogenannte „invariante Masse" der Zerfallsprodukte berechnen. Und die ist gleichzeitig die Masse des Mutterteilchens, in diesem Fall die des Kaons. Für viele andere Teilchen ist die Beobachtung der Zerfallsprodukte die einzige Möglichkeit, sie zu sehen.



Übrigens: Findest du auch, dass das Wort „Zerfall" irgendwie an einen faulen Zombie erinnert? Dann bist du nicht allein. Eine Gruppe von Physikern am Forschungszentrum CERN hat einen Zombiefilm gedreht, den man sich kostenlos laden kann (↗[9]). Rate mal, wie er heißt: „Decay" („Zerfall").

↗[7]: http://pdglive.lbl.gov
↗[8]: *„Teilchendetektoren" auf Seite 257*
↗[9]: http://www.decayfilm.com



“Hätten sie uns keine bessere Karte zum Feynman-Labor geben können?”

Feynman-Diagramme

Ernst gemeintes Teilchengekritzel

Wenn ab und an eine Steinzeithöhle entdeckt wird, finden Wissenschaftler kleine Gemälde und Skizzen an ihren Wänden. Wir bekommen dann oft einen Eindruck vom Leben in dieser prähistorischen Zeit: Man kann zum Beispiel sehen, welche Tiere die Menschen gejagt haben. Wenn die Menschen in ein paar Tausend Jahren in der Zukunft die Ruinen von einem Teilchenphysik-Labor mit ein paar Zeichnungen an der Wand finden, werden sie es schwer haben, diese entweder als albernes Kindergeschmiere oder als Beschreibung eines komplexen Prozesses der Quantenchromodynamik zu deuten. Die Verwirrung entsteht nämlich dann, wenn der Prozess der Quantenchromodynamik in der Sprache der sogenannten „Feynman-Diagramme“ beschrieben ist.



Die Sprache der Teilchenphysiker

Sie ist (neben Englisch) die wichtigste Sprache, mit der Teilchenphysiker kommunizieren. Man benutzt sie, um zu beschreiben, worum es bei der Teilchenphysik geht: die Wechselwirkung zwischen Elementarteilchen. Das mathematische Gerüst, in dem die Wechselwirkung zwischen Materieteilchen (Fermionen) über den Austausch von Kraftteilchen (Bosonen) beschrieben wird, ist das Standardmodell (↗[1]). Mit ihm können über sehr komplizierte Formeln alle möglichen Arten von Teilchenzerfällen berechnet werden. Feynman-Diagramme erlauben es, diese sehr komplexen Formeln mit Hilfe einiger weniger Linien darzustellen. Alles, was man braucht, sind Linien, die man dann für alle Teilchen gemäß den Regeln des Standardmodells und der Erhaltungssätze der Natur zusammensetzt.



Diese Zeichnungen haben ein Problem. Ein physikalischer Prozess geschieht in vier Dimensionen: drei für den Raum und eine für die Zeit. Aber wenn wir etwas auf Papier zeichnen, haben wir nur zwei Dimensionen. Versuch mal, einen dreidimensionalen Würfel auf Papier zu zeichnen. Und jetzt einen vierdimensionalen. Nicht so leicht, stimmt‘s? Die Physiker haben sich dazu entschlossen, die drei Raumdimensionen zu einer zusammenzufassen. Auf dem Papier bleibt dann nur noch die Zeit übrig. Alles klar, wir haben jetzt die Raumzeit. Stecken wir ein paar Teilchen in sie hinein!

Den Linien eine Bedeutung geben

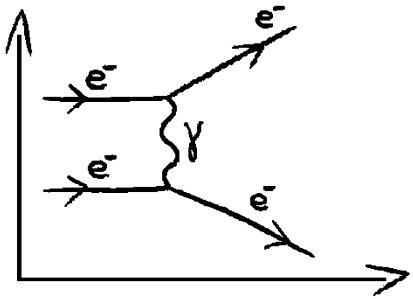
Alle Teilchen werden durch Linien dargestellt: gerade Linien für Fermionen, Schlangenlinien für Photonen, gewickelte für Gluonen und gestrichelte für W-, Z- und Higgs-Bosonen. Die Fermionen-Linien bekommen noch einen Pfeil, der die Richtung angibt, in die sich das Teilchen bewegt. „Natürlich läuft aber doch jedes Teilchen vorwärts in der Zeit“, denkst

↗[1]: *„Das Standardmodell“ auf Seite 217*

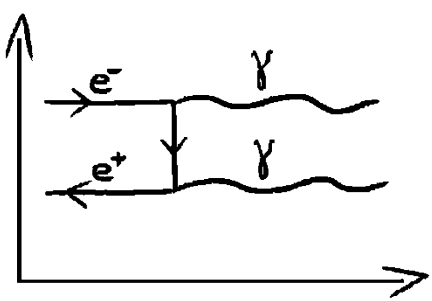
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_56

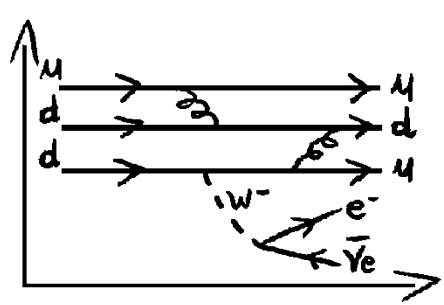


du jetzt. Stimmt. Aber Antiteilchen werden durch Pfeile dargestellt, die rückwärts in der Zeit laufen. Hört sich komisch an. Aber mathematisch gibt es keinen Unterschied zwischen Antiteilchen, die in der Zeit vorwärts laufen und Teilchen, die in der Zeit rückwärts laufen.



Du kannst jetzt Fermionen und Bosonen zusammenstecken. Eine Verbindung zwischen Teilchen nennt man „Vertex“ und wird oft durch einen Punkt dargestellt. Vergiss nicht, nur die Teilchen zusammenzustecken, die auch wechselwirken können! Zum Beispiel: Nur geladene Teilchen wechselwirken elektromagnetisch und können daher mit einem Photon verbunden werden. Und denk daran, keine Erhaltungssätze der Natur (↗[2]) zu brechen! Bevor wir einen Blick auf ein paar Beispiele werfen, sollten wir noch über das Konzept von „reellen“ und „virtuellen“ Teilchen sprechen. Alles, was wir in der Natur sehen (entweder direkt oder indirekt) ist reell. Reelle Teilchen kommen von links in ein Feynmandiagramm oder gehen rechts wieder heraus. „Virtuell“ ist alles, was dazwischen ist und bleibt. Wenn man den Prozess zweier sich mittels der elektromagnetischen Wechselwirkung abstoßender Elektronen beschreiben will, ist das dabei ausgetauschte Elektron virtuell und man wird es nie zu Gesicht bekommen. Virtuelle Teilchen spielen eine wichtige Rolle im Rahmen der Heisenbergschen Unschärferelation (↗[3]). Wir wollen zum Schluss noch drei Beispiele anschauen. Für jedes von ihnen beschreibt die horizontale x-Achse die Zeit und die vertikale y-Achse den Raum. Das bedeutet, Ereignisse starten links und enden rechts. Das erste Beispiel zeigt zwei Elektronen (e). Sie tauschen ein virtuelles Photon (γ) aus und stoßen sich ab. Die Abstoßung ist dadurch gekennzeichnet, dass die Linien der Elektronen sich nach dem Photonaustausch vertikal (räumlich) voneinander entfernen. Das zweite Beispiel ist etwas komplexer: Ein Elektron und ein Positron (nach links laufender Pfeil) treffen sich und zerstrahlen (↗[4]) zu zwei Photonen. Diesmal sind die Photonen reell, denn sie verlassen das Diagramm nach rechts. Man sieht auch: Am Ende sind das Elektron und das Positron verschwunden. Die Erhaltung von Materie und Antimaterie, die besagt, dass sich die Summe der Teil-





↗[2]: *„Erhaltungssätze“ auf Seite 51*
↗[3]: *„Heisenbergsche Unschärferelation“ auf Seite 155*
↗[4]: *„Antimaterie“ auf Seite 221*

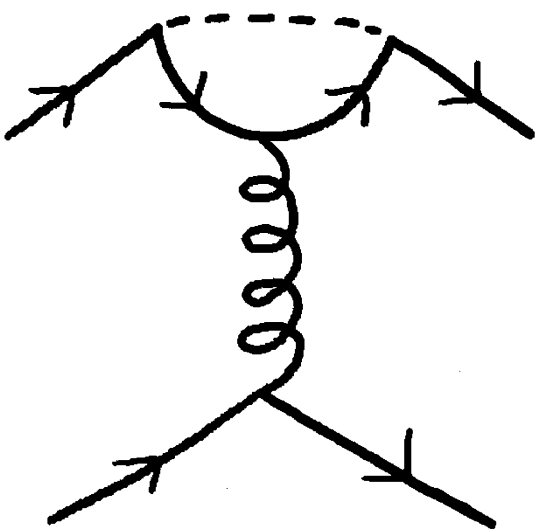


chen und Antiteilchen nicht ändert, ist durch die linke Fermionenlinie gut dargestellt: Das zerstrahlende Elektron/Positron-Paar sieht also aus wie ein Elektron, das zwei Photonen abstrahlt und dann rückwärts in der Zeit wieder verschwindet. Das letzte Beispiel zeigt einen β-Zerfall (↗[5]): ein Neutron wandelt sich in ein Proton um, indem ein Down-Quark über die Abstrahlung eines virtuellen W-Bosons, das dann weiter in ein Elektron (e) und ein Antineutrino (ν) zerfällt, in ein Up-Quark umgewandelt wird. Genaueres zu diesem Prozess gibt es im Kapitel zur schwachen Wechselwirkung (↗[6]). Wie du dir vorstellen kannst, gibt es viele noch kompliziertere Prozesse, die auch auftreten können. Aber wir belassen es jetzt mal hierbei.

Mehr als nur Linien!

Sei dir bewusst, dass jede Linie und jeder Vertex in einem Feynman-Diagramm für einen mathematischen Ausdruck steht, über den man die Eigenschaften des entsprechenden Prozesses ausrechnen kann. Zum Beispiel kann man mit dem dritten Diagramm die Lebensdauer eines Neutrons ausrechnen. Generell bekommt man über die Feynman-Diagramme die Wahrscheinlichkeiten für die jeweiligen Prozesse. Auf (↗[7]) kannst du dir die komplexen Formeln ansehen, die hinter den Diagrammen stecken.

Beenden wir das Kapitel mit einer ganz besonderen Art von Feynman-Diagramm, das wir in der letzten Abbildung sehen. Wir wollen mal nicht über den Prozess an sich sprechen (man sieht: kein einfacher), sondern über die Geschichte dahinter. Sie beginnt in einer Kneipe nahe dem Forschungszentrum CERN bei Genf in der Schweiz. Der theoretische Physiker John Ellis spielte Dart gegen einen Kollegen. Sie schlossen eine Wette ab: Sollte Ellis verlieren, müsste er in seine nächste wissenschaftliche Veröffentlichung das Wort „Pinguin“ einbauen. Für jemanden, der im Bereich der Teilchenphysik forscht, keine leichte Aufgabe. Sein Kollege verließ das Lokal, bevor das Spiel vorüber war. Aber jemand anders hat übernommen und besiegte Ellis. Er hatte keine Ahnung, wie er das Wort „Pinguin“ einbauen sollte, bis er eines Abends ein paar Freunde besuchte und plötzlich eine Inspiration hatte: Eines seiner Feynman-Diagramme hätte Ähnlichkeit



mit einem Pinguin! Zumindest seiner Meinung nach. Schau es dir selbst an. Siehst du den Pinguin? Du kannst auch versuchen, ihn in das Diagramm reinzuzeichnen, wenn du magst. Die ganze Geschichte zu dem „Pinguin-Diagramm“ gibt es auf (↗[8]).

↗[5]: *„Alpha-, Beta- und Gammastrahlen“ auf Seite 175*
↗[6]: *„Die Schwache Wechselwirkung“ auf Seite 237*
↗[7]: https://de.wikipedia.org/wiki/Feynman-Diagramm
↗[8]: https://de.wikipedia.org/wiki/Pinguin-Diagramm


EIN DANK AN DIE GÖTTIN DER STARKEN KRAFT
ohne sie gäbe es...
Keine Galaxien...
Keine Sterne...
Keinen Kohlenstoff...
Keinen Sauerstoff...
Keine komplexen chemischen Reaktionen...
Kein Leben.
Kein wir.
Keine Quirky Quarks.
STARKE KRAFT
u
u
d

Die Starke Wechselwirkung

Was unsere Atomkerne zusammenhält

Fast jede Wechselwirkung, jede Kraft, die wir im Alltag spüren, ist entweder eine elektromagnetische oder eine gravitative Wechselwirkung. Es gibt aber eine Wechselwirkung, die viel stärker ist als alles, was vom Elektromagnetismus oder der Gravitation ausgehen kann. Die Kraft ist auf der einen Seite gewaltig, auf der anderen recht bescheiden. Wir sehen sie niemals direkt. Doch ohne sie würden wir augenblicklich zerfallen. Sie hält unsere Atome zusammen. Doch wieso braucht man dafür eine eigene Kraft? Schauen wir uns einmal an, wie diese starke Kraft funktioniert:



Ein Atomkern besteht aus Protonen und Neutronen. Oft stellt man die elektrisch neutralen Neutronen als gelbe/weiße Kugeln dar und die positiven Protonen als rote. Protonen und Neutronen sind so leicht, dass die Gravitation im Atomkern keine Rolle spielt. Ganz anders aber bei der elektromagnetischen Wechselwirkung! Während die den Neutronen egal ist, stoßen sich zwei positiv geladene Protonen gegenseitig ab. Die Coulomb-Kraft, der elektrische Teil der elektromagnetischen Wechselwirkung, ist dafür verantwortlich. Können wir diese genauso vernachlässigen, wie die Gravitation? Nein, überhaupt nicht. Atomkerne sind sehr klein, ca. 10 fm (Femtometer, 10^{-15} m). Das bedeutet, Protonen sind einander sehr nahe. Und da die Coulomb-Kraft antiproportional zum Quadrat des Abstands wirkt, ist sie ziemlich stark. Stark bedeutet hier 2,3 N (Newton). Im Alltag entspricht das in etwa der Kraft, die man braucht, um zwei Tafeln Schokolade hochzuheben. „Das ist ja nix!“, sagst du jetzt vielleicht. Aber denk daran, dass wir um einiges größer sind als ein Proton. Verglichen mit der anziehenden Kraft durch die Gravitation ist die Abstoßung über die Coulomb-Kraft bei Protonen um den Faktor 10^{36} größer. Aber wie wir wissen, sind Atomkerne dennoch stabil (bis auf diejenigen, die radioaktiv zerfallen, ↗[1]). Es muss also etwas geben, das die Abstoßung der Protonen kompensiert und die Atomkerne zusammenhält. Das ist die Starke Wechselwirkung.

Die Farbigen sind stark

Wenn nur geladene Teilchen an der elektromagnetischen Wechselwirkung teilnehmen können, stellt sich die Frage: Was ist notwendig, damit man bei der starken Wechselwirkung mitmachen kann? Sie klebt Protonen und Neutronen zusammen, aber klebt sie auch Elektronen an Neutronen oder Protonen?

Die Eigenschaft, die Teilchen haben müssen, um an der starken Wechselwirkung teilnehmen zu können, nennt sich „Farbladung“. Es ist eine Ladung im Sinne von „darf bei einer Wechselwirkung mitmachen“ (so wie die elektrische Ladung), hat aber nichts mit

↗[1]: *„Radioaktive Zerfälle“ auf Seite 171*

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_57

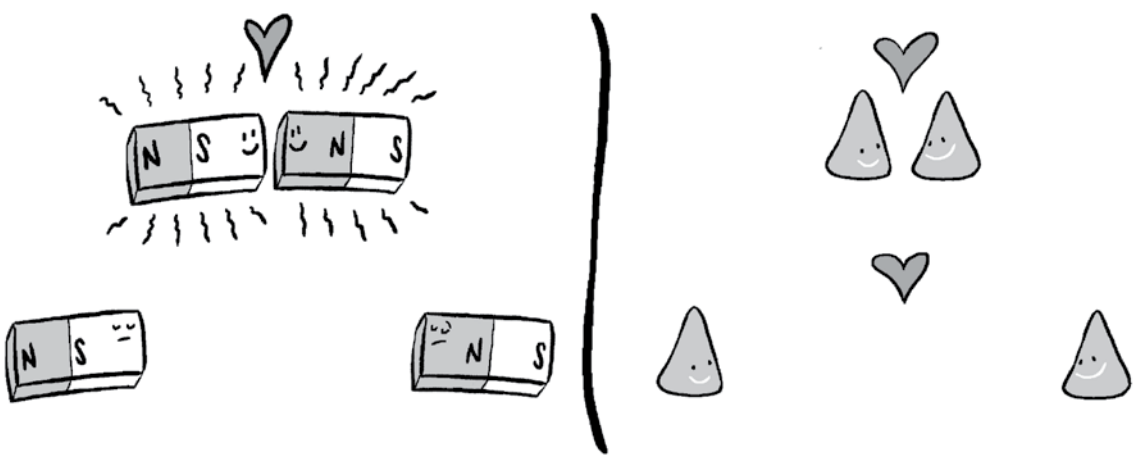
„Farbe“ im wörtlichen Sinne zu tun. Wir werden bald erfahren, wieso sich der Begriff „Farbe“ durchgesetzt hat. Die Sorte der Teilchen, die eine Farbladung tragen, nennt man „Quarks“ (↗2). Zum Glück sind Elektronen keine Quarks. Ansonsten würden die Elektronen der Atome sofort in den Kern gezogen werden. Das heißt, wir würden sofort zu winzigen Kugeln zusammenschrumpfen und könnten nichts mehr tun. Das ist genauso unangenehm, wie zu zerfallen.



Keine Entfernung zu weit

Die starke Kraft hat eine Eigenschaft, die sie wirklich seltsam macht. Sie führt zu einem Verhalten, das im absoluten Gegensatz zu dem steht, was wir normalerweise unter einer Kraft verstehen. Denken wir an Gravitation und Elektromagnetismus: Während ein Bär vom Baum auf den Boden fällt, fällt ein Bär im Weltall nirgendwo hin. Und während zwei Magneten in geringem Abstand sich ziemlich stark anziehen oder abstoßen können, scheinen sie sich voneinander entfernt kaum füreinander zu interessieren. Der Grund für das Verhalten von Bär und Magnet ist die Tatsache, dass die elektromagnetische und die Gravitationskraft mit dem Abstand zum Quadrat schwächer werden.

Im Gegensatz dazu bleibt die starke Kraft konstant, unabhängig vom Abstand. Das ist nicht so einfach zu erklären. Es hat damit zu tun, dass die Teilchen, die bei der starken Wechselwirkung ausgetauscht werden – die Gluonen – nicht nur mit farbigen Quarks, sondern auch mit anderen Gluonen reagieren. Bei Photonen, den Austauschteilchen der Elektromagnetischen Wechselwirkung (↗2), ist das nicht der Fall. Durch die Tatsache, dass die starke Kraft über die Entfernung konstant und ihre Reichweite damit unendlich ist, stellt sich eine Frage: Wieso kleben nur die Protonen und Neutronen



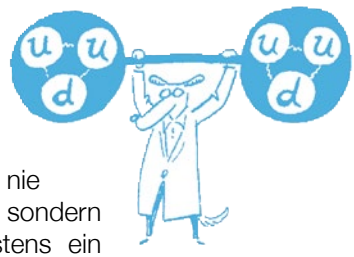
↗2: *„Das Standardmodell“ auf Seite 217*

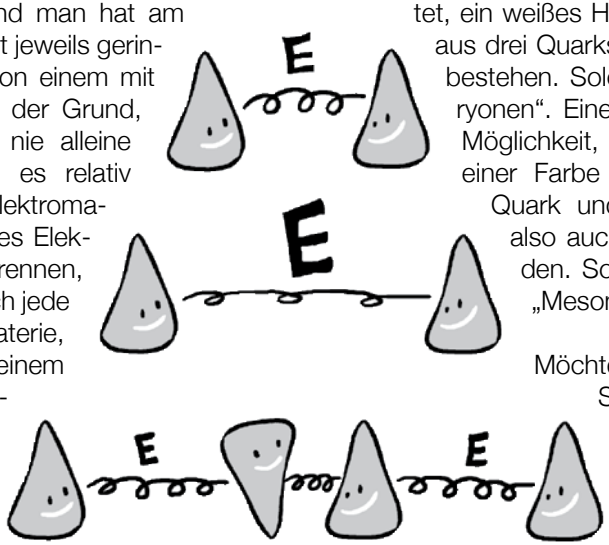
eines Atomkerns zusammen? Wieso werden nicht alle Nachbarkerne angezogen und bilden ein Superatom?

Quarks aus Feldenergie erzeugen

Schauen wir mal, was passiert, wenn man versucht, zwei durch ein Gluon verbundene Quarks (daher der Name: „Kleber“ heißt auf Englisch „glue“) zu trennen. Eine konstante Kraft führt zu einer potentiellen Energie, die linear mit dem Abstand steigt (doppelter Abstand: doppelte Energie). Je weiter man die Quarks auseinanderzieht, desto mehr Energie steckt also in dem Gluon. Denkt man an Einsteins $E = mc^2$, sieht man, dass man früher oder später einen Abstand erreicht hat, bei dem genug Energie vorhanden ist, um ein Quark/Anti-Quark-Paar zu erzeugen: $E_{gluon} = (m_{quark} + m_{antiquark})\, c^2$.

Und was passieren kann, wird auch passieren: Die Gluon-Verbindung reißt und man hat am Ende zwei Quark-Paare mit jeweils geringerem Abstand anstelle von einem mit großem Abstand. Das ist der Grund, weshalb man ein Quark nie alleine antreffen kann. Während es relativ einfach ist, ein über die elektromagnetische Kraft gebundenes Elektron von einem Atom zu trennen, produziert man automatisch jede Menge Materie und Antimaterie, wenn man das gleiche mit einem Quark versucht. Teilchenbeschleuniger (↗[3]) wie der Large Hadron Collider nutzen diesen Effekt, um eine Vielzahl von Quarks und Antiquarks zu produzieren. Diese Eigenschaft der starken Wechselwirkung erklärt auch, weshalb Quarks nie einzeln existieren, sondern immer an mindestens ein anderes Quark gebunden sind. Physiker nennen diesen Effekt „Confinement“. Sie beobachteten auch, dass Teilchen, die aus Quarks aufgebaut sind (sogenannte „Hadronen“), nur als „weiße Objekte“ existieren. Was heißt das? Erinnern wir uns, dass Quarks eine Farbladung tragen. Während eine elektrische Ladung positiv oder negativ sein kann, ist die Farbladung entweder rot, grün oder blau. Diese Farben (nicht wörtlich nehmen!) wurden aus gutem Grund gewählt. Man kennt sie vielleicht als „Grundfarben“. Mischt man sie zusammen, ergeben sie Weiß. Das bedeutet, ein weißes Hadron kann zum Beispiel aus drei Quarks unterschiedlicher Farbe bestehen. Solche Objekte heißen „Baryonen“. Eine andere, etwas pfiffigere Möglichkeit, ist die Kombination von einer Farbe mit ihrer Antifarbe. Ein Quark und ein Antiquark können also auch ein weißes Hadron bilden. Solche Objekte nennt man „Mesonen“.





Möchtest du wissen, wieso die Starke Wechselwirkung all diese seltsamen Eigenschaften hat? Wissen wir nicht. Aber hätte sie diese nicht, würden wir nicht existieren.

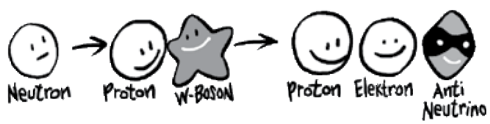
↗[3]: *„Teilchenbeschleuniger“ auf Seite 253*

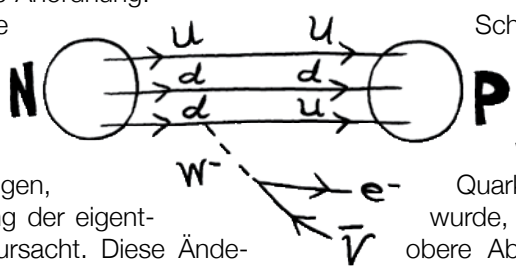

DERWEIL in der SUBATOMAREN WELT...
ICH FÜRCHTE, ES SIEHT NICHT GUT AUS. SIE SIND ÜBERGEWICHTIG, SCHWACH, UND ICH GLAUBE NICHT, DASS SIE NOCH LANGE GENUG LEBEN, UM ÜBERHAUPT DAS ENDE DIESER PROGNOSE MITZUBEKOMMEN.

Die Schwache Wechselwirkung

Schwach, aber einzigartig

Was könnte man als Wechselwirkung bezeichnen? Eine Wechselwirkung ist, was immer eine Änderung verursacht. Wechselwirkungen lassen uns sehen, hören, fühlen, laufen und leben. Sie können Wärme produzieren oder mit Hilfe von Energie Maschinen in Gang setzen. In manchen Fällen scheinen Wechselwirkungen Änderungen an Objekten zu verursachen. Zum Beispiel können sie einen Baum wachsen lassen. Aber wenn man genauer hinschaut, sieht man, dass ein Objekt selbst nie verändert wird, lediglich seine Anordnung. Atome aus Luft und Erde werden neu angeordnet: zu einem Baum. Jede Änderung, die wir im Alltag wahrnehmen, wird durch eine Änderung von Anordnungen, aber nie durch eine Änderung der eigentlichen Elementarteilchen verursacht. Diese Änderungen werden durch anziehende oder abstoßende Kräfte verursacht, die wir entweder der gravitativen, der starken oder der elektromagnetischen Wechselwirkung zuordnen können.





Die einzige Wechselwirkung, die den Typ von Teilchen ändert



Aber was ist mit Atomkernen, die sich über einen β^--Zerfall verändern (↗1)? Sie emittieren ein Elektron und ein Anti-Neutrino und wandeln gleichzeitig ein Neutron in ein Proton um. Naja, Protonen und Neutronen sind nicht elementar, also könnte man immer noch behaupten, dass einfach innerhalb der Protonen und Neutronen Dinge umsortiert wurden. Was aber eigentlich passiert: Eines der Down-Quarks des Neutrons wird in ein Up-Quark umgewandelt. Da Quarks, Neutrinos und Elektronen Elementarteilchen sind, muss also etwas anderes passiert sein als eine bloße Umordnung. Die gleiche Quark-Änderung (↗2) passiert übrigens in der Sonne. Und genau dafür brauchen wir die Schwache Wechselwirkung. Schauen wir uns die Umwandlung eines Neutrons in ein Proton mal genauer an.

Wir sehen, dass das Down-Quark, nachdem es zum Up-Quark wurde, ein W-Boson emittiert hat. Die obere Abbildung ist eher symbolisch, während die untere die Sprache der Feynman-Diagramme (↗3) enthält. Jede fundamentale Wechselwirkung wird über den Austausch eines Bosons (↗4) erklärt, und das W-Boson ist – neben dem Z-Boson – das Austauschteilchen der schwachen Wechselwirkung. Das W ist auf zweierlei Arten einmalig. Es ist elektrisch geladen und da Ladung erhalten bleibt (↗5), muss das W-Boson sie von einem Teilchen wegnehmen und zu einem anderen hinbringen. Also müssen Teilchen, die bei der schwachen Wechselwirkung mit einem W-Boson mitmachen, ihre Ladung ändern. Aber da die Ladung ein Teilchen ausmacht, ändern sich

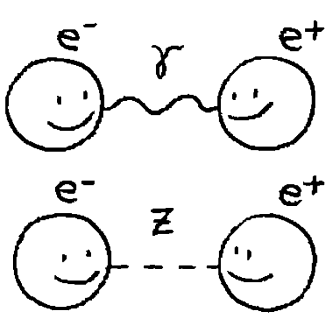
↗1: *„Alpha-, Beta- und Gammastrahlen“ auf Seite 175*
↗2: *„Kernfusion“ auf Seite 179*
↗3: *„Feynman-Diagramme“ auf Seite 229*
↗4: *„Das Standardmodell“ auf Seite 217*
↗5: *„Erhaltungssätze“ auf Seite 51*

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_58

auch die Teilchen selbst! Das kann nur die Schwache Wechselwirkung.

Schwere Bosonen machen Wechselwirkungen schwach

Wir wissen, dass Teilchen eine bestimmte Ladung haben müssen, um bei der entsprechenden Wechselwirkung mitmachen zu können. Die Ladung der schwachen Wechselwirkung ist – Überraschung – die schwache Ladung. Und jedes Teilchen trägt sie. Zum Glück auch die Neutrinos. In der Tat ist die Schwache Wechselwirkung die einzige (bis auf die Gravitation), an der die Neutrinos teilhaben. Und da die Schwache Wechselwirkung nicht besonders stark ist, sehen wir Neutrinos kaum. Nun, mit bloßem Auge sowieso nicht. Aber auch Teilchendetektoren, die geladene Teilchen sofort über hinterlassene Spuren sehen würden, haben es mit Neutrinos schwer. Aber was bedeutet es eigentlich, dass eine Wechselwirkung schwach ist? Schwach bedeutet „passiert nicht so oft“. Nach den Regeln der Quantenmechanik wird alles, was möglich ist, irgendwann auch passieren. Die Wahrscheinlichkeit dafür hängt davon ab, wie stark die entsprechende Wechselwirkung ist. Und die Stärke hängt wiederum von der Ladung der Teilchen und der Masse des Austauschbosons ab. Die schwache Ladung ist nicht besonders klein, verglichen mit anderen Wechselwirkungen. Aber die W- und Z-Bosonen sind ziemlich schwer. Und das ist der Grund, weshalb die Schwache Wechselwirkung ihren Namen auch verdient hat.



Werfen wir einen genaueren Blick auf die Quantenmechanik um herauszufinden, wieso schwere Bosonen Schwache Wechselwirkungen verursachen. Stell dir vor, dass die Energie, die über $E = mc^2$ (↗6) der Masse des Bosons entspricht, in einem Prozess nicht vorhanden ist. Das ist in der Tat für die meisten Prozesse der schwachen Wechselwirkung der Fall. Damit so ein Prozess aber dennoch stattfinden kann, muss man sich die Heisenbergsche Unschärferelation zu Nutze machen (↗7). Innerhalb einer kurzen Zeitspanne kann man sich ein wenig Energie für ein W-Boson „leihen“ und sie zurückgeben, wenn das W-Boson zerfällt. Die Menge der geliehenen Energie begrenzt die Zeit, für die man sie sich leihen kann: Je mehr man braucht, desto kürzer darf man sie behalten. Das bedeutet, dass man sich ein schweres W-Boson nur ganz kurz ausleihen kann. Da das W-Boson in dieser kurzen Zeit nicht weit kommt, ist die Reichweite der schwachen Wechselwirkung sehr kurz. Das ist ganz anders als bei der unendlichen Reichweite der elektromagnetischen Wechselwirkung mit ihren masselosen Photonen.

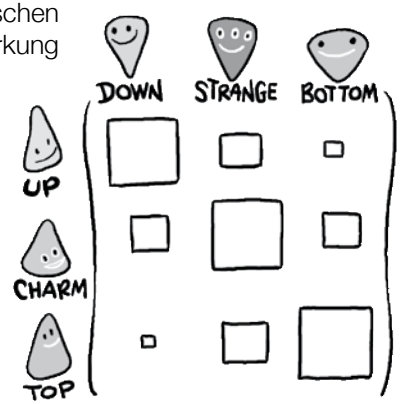
Elektroschwache Vereinigung

Das besondere an der Schwachen Wechselwirkung ist nicht nur, dass sie ein schweres W-Boson hat, sondern dass es noch ein zweites Austauschboson gibt: das Z-Boson. Das ist auch schwer, aber nicht elektrisch geladen. Und wie das W-Boson koppelt es an alle Teilchen. Wenn man also ein Elektron und ein Positron sieht, die sich anziehen, kann das entweder durch den Austausch eines Photons (Austauschteilchen der elektromagnetischen Wechselwirkung) verursacht sein, oder eben durch ein Z-Boson.

↗6: *„$E = mc^2$“ auf Seite 241*
↗7: *„Heisenbergsche Unschärferelation“ auf Seite 155*



Es gibt also zwei Möglichkeiten. Und welche davon tritt ein? Und wie kann man es herausfinden? Jetzt begegnen wir mal wieder der Verrücktheit der Quantenmechanik. Die Antwort auf die erste Frage ist: beide. Und das beantwortet die zweite Frage: kann man gar nicht. Das Beispiel zeigt besonders gut, wie eng die elektromagnetische und die Schwache Wechselwirkung miteinander verknüpft sind. 1968, 35 Jahre nachdem die Theorie der schwachen Wechselwirkung gefunden wurde, haben es die Physiker Sheldon Glashow, Abdus Salam und Steven Weinberg hinbekommen, eine gemeinsame Beschreibung der elektromagnetischen und der schwachen Wechselwirkung aufzustellen. Die Vereinheitlichung bezieht sich darauf, dass beide Wechselwirkungen nur zwei unterschiedliche Aspekte einer gemeinsamen Kraft sind: der elektroschwachen Wechselwirkung. Ein weiterer Schritt wäre es nun, auch die Starke Wechselwirkung mit ins Boot zu holen. Eine Idee dafür nennt man „Große vereinheitlichende Theorie“. Bisher hat es niemand geschafft, eine solche Theorie aufzustellen. Kürzlich hat man jedoch die Frage gelöst, woher die Massen von W- und Z-Bosonen kommen. Die Antwort lieferte der Higgs-Mechanismus (↗[8]), den Beweis die Entdeckung des dazugehörigen Higgs-Bosons.



Mögliche Veränderungen

Eine Sache haben wir noch nicht besprochen: Das W-Boson kann Teilchen ineinander umwandeln. Aber welche in welche? Was die Leptonen betrifft (↗[4]), ist die Antwort einfach: Ein Elektron kann nur in ein Elektron-Neutrino umgewandelt werden und umgekehrt. Das gleiche gilt für das Myon und sein Neutrino sowie für das Tau und sein Neutrino. Die Erhaltungssätze (↗[5]) verbieten einen Wechsel zwischen diesen Teilchentypen. Aber bei den Quarks ist die Sache anders. Quarks sind, wie auch die Leptonen, in drei Familien eingeteilt. Übergänge innerhalb der ersten Familie kennen wir durch den β-Zerfall, bei dem Up- in Down-Quarks umgewandelt werden (und umgekehrt), oder aus der Kernfusion (↗[2]). Anders als bei Leptonen sind bei Quarks allerdings auch Wechsel zwischen verschiedenen Familien möglich. Das passiert zwar nicht häufig, aber es passiert. Schauen wir uns das Up-Quark an, sehen wir, dass es am liebsten in ein Down-Quark zerfällt. Vielleicht noch in ein Strange-Quark. Aber ein Bottom-Quark? Och nö. Physiker haben die Wahrscheinlichkeiten für solche Übergänge in einer Matrix dargestellt, der sogenannten CKM-Matrix (benannt nach den Physikern Cabibbo, Kobayashi und Maskawa).

Eine genaue Messung der Einträge in dieser Matrix – die in Wirklichkeit keine Quadrate, sondern komplexe Zahlen sind – ist besonders spannend. Sie erlaubt es, mehr über das Phänomen der „CP-Verletzung“ („C“ für Ladung und „P“ für „Parität“) zu erfahren. Diese ist für die Dominanz der Materie über die Antimaterie in unserem Universum und damit auch für unsere Existenz verantwortlich. Ein guter Grund, sie spannend zu finden, nicht wahr?

↗[8]: *„Der Higgs-Mechanismus“ auf Seite 245*


REKLAMATIONEN
GEMÄß UNSEREN ALLGEMEINEN GESCHÄFTSBEDINGUNGEN MÜSSEN SIE DEN DEFEKT ERKLÄREN!
E=m²C
REKLAMATIONEN
UND DAHER IST
GESCHWINDIGKEIT,
ENTSPRECHEND DEM
ABER DIE NEWTONSCHE
SIK RELATIV ZU DE
GESCHWINDIGKEIT
ABER NICHT GLEI
Relativ
MASSE
Energie
E=m²C

$E = mc^2$

Energie und Masse – fast dasselbe

$E = mc^2$: Energie gleich Masse mal der Lichtgeschwindigkeit zum Quadrat. Masse und Energie – was würdest du ohne Einsteins weise Worte denken, wie sie zueinander stehen? Unabhängig? Irgendwie gleich? Oder sogar gegensätzlich?



Wenn du dich entscheidest, nach dem Verzehr von einem Kilo Süßigkeiten joggen zu gehen, fühlt es sich an, als hättest du durch die Masse der Süßigkeiten all meine Energie verloren. Oder wurde deine Energie in Masse umgewandelt? Oder vielleicht andersherum: Kannst du das Kilo Süßigkeiten in genug Energie für einen Marathon umwandeln? Nun, solche Gedanken sind verlockend, aber sie haben nichts mit Einsteins berühmtem $E = mc^2$ zu tun. Immer dann, wenn sich unser Körper bewegt oder Nahrung verdaut, wandelt er chemische Verbindungen um. Diese Umwandlung, eine Umordnung von Atomen, setzt chemische Energie frei. Alle Massen bleiben dabei (nun ja, nicht ganz, aber schon in sehr guter Näherung) erhalten. Wenn du Fett verbrennst und sich dabei dein Gewicht verringert, ist es nicht so, dass sich das Fett in Energie umgewandelt hat und dann verschwunden ist. Nachdem die Fettmoleküle chemische Energie freigesetzt haben, verlassen die Atome des Fetts unseren Körper auf verschiedene Weise (zum Beispiel über die Atmung oder die Verdauung). Und weg ist die Masse!

Wenn $E = mc^2$ aber garnichts mit Verdauung zu tun hat, womit dann? Es beschreibt eine neue Art der Energie. Normalerweise verbinden wir mit dem Begriff Energie entweder Bewegungsenergie (kinetische Energie) oder potenzielle Energie. Mit letzterer sind „Potenziale, die Bewegungen verursachen können“ gemeint, etwa die potenzielle Energie auf einem Berg, den ein Ball anschließend herunterrollen kann, um dabei kinetische Energie zu gewinnen. Bei $E = mc^2$ ist eine andere Art Energie gemeint. Unser Ball hätte diese einfach nur darum, weil er Masse besitzt. Es gibt nichts anderes, was er dafür tun muss. Wenn man deutlich machen will, dass es sich hier um eine Ruheenergie (ohne Bewegung) und daher um eine Ruhemasse handelt, kann man noch einen Index 0 hinzufügen: $E_0=m_0c^2$. Sobald sich unser Ball bewegt, bekommt er neben seiner Ruheenergie noch kinetische Energie. Die kinetische Energie ist dabei in einem Faktor enthalten, den man mit γ kennzeichnet:

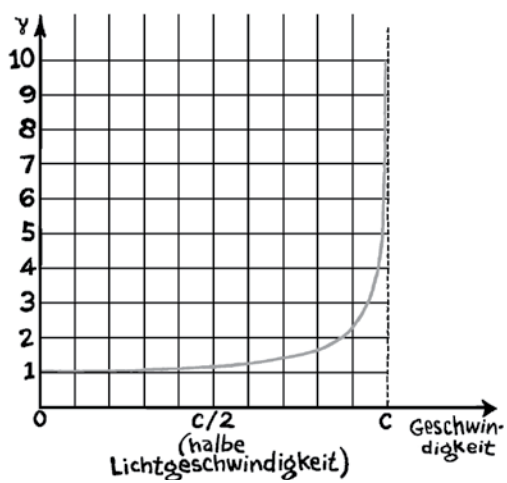
$$E_{total} = \gamma\, m_0\, c^2$$

Je höher die Geschwindigkeit eines Teilchens, desto höher seine Energie und desto größer γ. In unserer Abbildung auf der nächsten Seite kann man sehen, wie γ, und damit auch die Energie, mit der Geschwindigkeit eines Teilchens ansteigt. Die maximal erreichbare Geschwindigkeit ist dabei die Lichtgeschwindigkeit.

Wow! Man muss also nicht eine unendliche Geschwindigkeit erreichen, um unendlich viel Energie

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_59

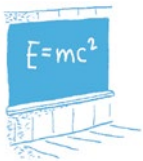
zu gewinnen. Die Lichtgeschwindigkeit c genügt schon. Die Spezielle Relativitätstheorie besagt, dass die Lichtgeschwindigkeit, 299.792.458 Meter pro Sekunde, konstant und gleichzeitig die höchstmögliche Geschwindigkeit ist, mit der sich etwas bewegen kann. Die Tatsache, dass der γ-Faktor so steil ansteigt, macht es für Teilchenphysiker sehr schwer, Teilchen auf sehr hohe Geschwindigkeiten zu beschleunigen. Wissenschaftler, die am weltgrößten Teilchenbeschleuniger LHC (↗[1]) arbeiten, kennen das Problem bestens. Bevor die Protonen in den LHC gelangen, haben sie eine Energie von 450 GeV. Nach der finalen Beschleunigung erreichen sie 7000 GeV (bzw. 7 TeV). Während sich die Energie der Protonen sehr stark erhöht hat, ist ihre Geschwindigkeit lediglich von 99,9997828 % auf 99,9999991 % der Lichtgeschwindigkeit angestiegen. Jedes Stück näher an c kostet eine Menge Aufwand. In manchen Büchern findet sich auch der Ausdruck „relativistische Masse“. Menschen, die diesen Ausdruck benutzen, stecken den γ -Faktor einfach in die Masse eines Teilchens rein und verwenden weiterhin das einfache $E = mc^2$, wobei hier die Masse mit höherer Energie ansteigt. So ist vielleicht einfacher zu verstehen, wieso man keine Lichtgeschwindigkeit erreichen kann: Je mehr Masse man hat, desto schwerer ist es, beschleunigt zu werden. Andererseits ist der Ausdruck „relativistische Masse“ nicht genau definiert. Während die Ruhemasse eines Teilchens immer die gleiche ist, hängt die relativistische Masse vom Standpunkt des Beobachters ab. Während ein Raumschiff, das sich mit sehr hoher Geschwindigkeit bewegt, aus Sicht eines Beobachters auf der Erde eine sehr große relativistische Masse hätte, würde sich die Masse aus Sicht eines anderen Raumschiffs, das sich mit gleicher Geschwindigkeit in die gleiche Richtung bewegt, nicht verändern. Daher versucht man, den Ausdruck der relativistischen Masse zu vermeiden. Also, keine Angst: Joggen gehen macht nicht schwerer.



Was ist mit den masselosen Jungs?

So weit, so gut. Nichts, das Masse besitzt, kann die Lichtgeschwindigkeit erreichen. Und je schneller man wird, desto mehr Energie hat man. Aber wir haben bisher noch nicht über die Teilchen nachgedacht, die sich tatsächlich mit Lichtgeschwindigkeit bewegen. Es sind die Lichtteilchen selbst, die Photonen (↗[2]). Photonen sind masselos, aber sie tragen eine Energie. Denk mal an die Mikrowelle (Mikrowellen sind die gleiche Art elektromagnetische Strahlung wie Licht, nur mit größerer Wellenlänge), die dein Essen erhitzt. Oder Sonnenlicht, das deine Haut erwärmt. Energie ist proportional zur Frequenz ihrer Photonen. Je höher die Frequenz, desto höher die Energie. Jetzt stellt sich folgende Frage: Verhalten sich Photonen mit einer Energie E so wie ein Objekt mit einer Masse m, entsprechend $E = mc^2$? Das würde bedeuten, dass Photonen Masse gewinnen

↗[1]: *„Teilchenbeschleuniger“ auf Seite 253*
↗[2]: *„Licht“ auf Seite 7*



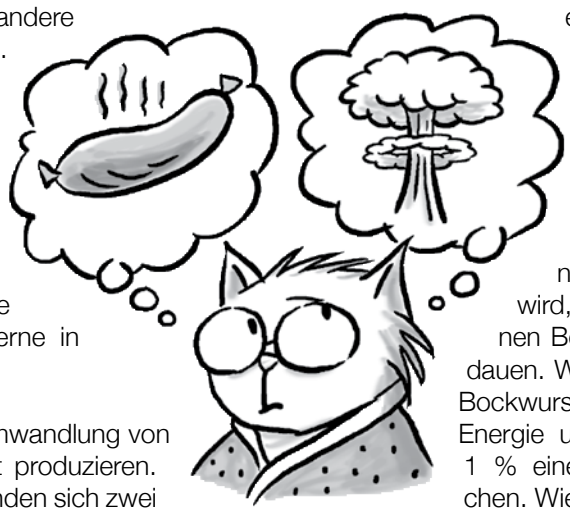
und verlieren würden, wenn sie sich in einem Gravitationsfeld bewegen. Das berühmte Pound–Rebka–Experiment konnte genau das beweisen. Photonen wurden einen 22,5 Meter hohen Turm im Jefferson Labor an der Uni Harvard hinaufgeschickt. Und tatsächlich: das Gravitationsfeld hat ihre Frequenz verändert (siehe auch ↗[3]). Die Tatsache, dass sich masselose, energiehaltige Objekte auch wie massive Objekte verhalten, spielt eine wichtige Rolle bei der Erklärung der Masse von … uns Menschen selbst! Während der Higgs-Mechanismus (↗[4]) dafür verantwortlich ist, dass Elementarteilchen ihre Masse bekommen, braucht es viel mehr als bloß den Higgs-Mechanismus, um die Masse unserer Protonen zu erklären. Mehr dazu im Kapitel über die Struktur des Protons (↗[5])!

Von m zu E und wieder zurück

Wenn E und m irgendwie das Gleiche sind, kann man dann von einem ins andere übergehen? Ja, kann man. Ein Fall, wo Masse verschwindet, ist der Zerfall eines Pions. Es hat ca. 15% der Masse eines Protons und zerfällt in zwei masselose Photonen, die die entsprechende Energie besitzen. Auch das berühmte Higgs-Boson (↗[4]) zerfällt gerne in zwei Photonen.

Wir können auch aus der Umwandlung von Masse in Energie Elektrizität produzieren. Bei der Kernfusion (↗[6]) verbinden sich zwei leichte Atomkerne zu einem schweren. Die Summe der Massen der leichten Kerne ist aber größer als die des Fusionsprodukts. Die Differenz wird als Energie frei. Diesen „Massendefekt“ – wie ihn Maxwell der Verkäuferin erklären wollte – wird auch in Kernkraftwerken genutzt, wo durch Kernspaltung (↗[7]) Teile der Masse eines radioaktiven Atomkerns in Energie umgewandelt werden. Neben einer Spaltung können Kerne auch Energie freisetzen, indem sie einfach ein Photon aussenden, die sogenannte γ-Strahlung (↗[8]). Während jetzt klar ist, dass wir Masse in Energie umwandeln können, stellt sich die Frage: Geht das auch umgekehrt? Können wir aus Energie massive Teilchen erzeugen? Oh ja, in der Tat. Wie das geht, erfährst du im Kapitel über Teilchenbeschleuniger (↗[1]).

Wir wollen das Kapitel mit einem beeindruckenden Beispiel zu $E = mc^2$ beenden. Die Explosion der Atombombe „Fat Man“ hat eine Energie von $9 \cdot 10^{13}$ J freigesetzt. Eine durchschnittliche Bockwurst mit der Masse von 100 g hat einen Brennwert von ca. 300 kcal. Da 1 kcal 4184 J entspricht, besitzt eine Bockwurst eine Energie von ca 1,2 MJ (Megajoule). Um also soviel Energie aufzunehmen, wie bei der Explosion einer Atombombe freigesetzt wird, muss man ca. 72 Millionen Bockwürste essen und verdauen. Würde man aber die 100 g Bockwurst direkt über $E = mc^2$ in Energie umwandeln, würde schon 1 % einer einzigen Wurst ausreichen. Wie klingt das?



↗[3]: *„Die Allgemeine Relativitätstheorie“ auf Seite 121*
↗[4]: *„Der Higgs-Mechanismus“ auf Seite 245*
↗[5]: *„Die Struktur des Protons“ auf Seite 249*
↗[6]: *„Kernfusion“ auf Seite 179*
↗[7]: *„Radioaktive Zerfälle“ auf Seite 171*
↗[8]: *„Alpha-, Beta- und Gammastrahlen“ auf Seite 175*


DERWEIL in der SUBATOMAREN WELT...
HIGGS-FELD
ICH KAPIER'S NICHT. ICH DACHTE, AKTIVER ZU SEIN WÜRDE UNS HELFEN, GEWICHT ZU VERLIEREN.
B
B

Der Higgs-Mechanismus

Ursprung der Teilchenmasse

Physiker versuchen alles, was sie in der Natur beobachten, in Zahlen zu fassen. Das hilft ihnen, die Naturgesetze herzuleiten. Und durch diese Gesetze können wir besser verstehen, wieso die Dinge sich so verhalten, wie sie es tun. Manchmal, wenn es um die ganz grundlegenden Dinge geht, fragen die Physiker auch mal „Wieso eigentlich?“. Vor allem, wenn es um die Eigenschaften der Materie geht. Viele Eigenschaften kann ein Elementarteilchen gar nicht haben: eine Farbe (nicht zu verwechseln mit der Farbladung), einen Geschmack oder eine Temperatur. Diese Dinge können für einzelne, punktförmige Teilchen nicht definiert werden. Aber es gibt eine Eigenschaft, die fast alle Elementarteilchen haben: Masse. Man kann sie messen und das dann anwenden, um gewisse Dinge zu verstehen: „Wieso ist die Masse eines Heliumkerns viermal größer als die eines Wasserstoffkerns?“ – „Weil Wasserstoff aus einem einzelnen Proton besteht, Helium aber aus zwei Protonen und zwei Neutronen. Und da die Masse eines Neutrons ungefähr genauso groß ist wie die eines Protons, ist Helium insgesamt ungefähr viermal so schwer wie Wasserstoff.“



Elementare Masse

Man kann das Spiel mit „Ein Objekt hat eine bestimmte Masse, weil es aus Objekten mit anderen Massen zusammengesetzt ist“ aber nur begrenzt spielen. Früher oder später kommt man zu den Elementarteilchen. Und obwohl sie punktförmig sind, also einen Durchmesser von 0 haben (der Punkt kann immer noch delokalisiert sein, da er durch eine Wellenfunktion beschrieben wird, ↗1), haben sie eine Masse. Manche sind leicht, manche schwer. Während die Masse eines Elektrons nur ca. 0,05% der Protonenmasse entspricht, ist das Top-Quark so schwer wie 176 Protonen. Wieso? Ehrlich gesagt: Niemand weiß es. Wir haben nicht mal eine Idee. Aber während es schon ziemlich blöd ist, den Grund für die verschiedenen Massen zu kennen, gibt es noch ein viel grundlegenderes Problem mit Massen. Wenn Physiker ihre Gleichungen formulieren, um das Universum zu beschreiben (↗2), lieben sie es, ihnen eine gewisse Schönheit zuzuschreiben. Es klingt vielleicht ein wenig schräg, Schönheit mit Formeln in Verbindung zu bringen. Aber vielleicht hast auch du schon einmal erfahren, wie faszinierend es sein kann, wenn komplexe Dinge sehr einfachen Regeln folgen. Die Schönheit des Standardmodells liegt in etwas, das wir Symmetrie nennen – oder genauer: eine lokale Eichsymmetrie. Die Gleichungen folgen nicht nur diesen Symmetrien, sondern erlauben es auch, sehr, sehr, sehr genaue Berechnungen und Vorhersagen für das zu liefern, was wir in der Natur beobachten. Also könnte doch jeder mit ihnen zufrieden sein, oder?

Wie immer: Probleme mit der Masse

Man kennt das, wenn alles gut läuft, bis plötzlich jemand kommt, der immer Ärger macht: die Masse. Leckeres Essen führt zu Masse. Masse führt zu Problemen. In ganz extremen Fällen führt Masse auch zu einer Symmetrie, nämlich der Kugelsymmetrie (wenn man sich rundgefressen hat).

↗1: *„Welle-Teilchen-Dualismus“ auf Seite 147*
↗2: *„Das Standardmodell“ auf Seite 217*

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_60

Was würde mit den Gleichungen des Standardmodells passieren, wenn man zunächst alle Teilchen ohne Masse einbaut und ihnen dann plötzlich doch eine Masse zuschreibt? Statt eine neue Symmetrie hinzuzufügen, zerstört man die Schönheit der Symmetrien der Gleichungen, der lokalen Eichsymmetrie. Das jetzt im Detail zu erklären, würde den Rahmen dieses Buches sprengen. Aber wir können festhalten: Schöne, gut funktionierende Gleichungen können alles berechnen, was wir beobachten (außer der Gravitation), erlaubt aber Teilchen nicht, eine Masse zu haben. Was nun?



Higgs: Lösung des Problems

Nun, die Masse von Teilchen kann man nicht abstreiten, also braucht man eine Idee. Und die hatten ein paar Menschen: In den 1960ern entwickelten die Physiker Englert, Brout, Higgs, Guralnik, Hagen und Kibble die Idee eines neuen Feldes, das man zu den Gleichungen des Standardmodells hinzufügen müsste. Heute nennt man dieses Feld oft einfach „Higgs-Feld“. Bekannte Beispiele für andere Felder sind zum Beispiel elektrische und magnetische Felder (↗[3]). Solche Felder nennt man „Vektorfelder“. Sie ordnen jedem Punkt im Raum einen Vektor zu. Dieser Vektor hat eine Größe und eine Richtung, in die er zeigt. In unserem Beispiel zeigt der Vektor die Stärke und Richtung des Magnetfeldes an. Man kann sich auch ein „Fluss-Feld“ ausdenken, das beschreibt, wie das Wasser fließt: Wie schnell fließt das Wasser und wohin? Da die Antwort an unterschiedlichen Stellen unterschiedlich sein kann, braucht man für jeden Punkt des Flusses einen Vektor. Im Gegensatz zu Vektorfeldern sollte das neu vorgeschlagene Higgs-Feld ein skalares Feld sein. Bei solchen Feldern bekommt jeder Punkt im Raum einfach einen Zahlenwert. Nehmen wir als Beispiel eine Temperaturkarte: Wie warm ist jeder Punkt auf der Karte? Temperaturen können also mit skalaren Feldern beschrieben werden.



Und was bringt uns jetzt dieses Higgs-Feld? Es ist skalar, also hat es keine Richtung, die es bevorzugt. Es ist einfach überall und macht zwei Dinge mit den Gleichungen unseres Standardmodells. Zuerst koppelt es an alle Bosonen der elektromagnetischen und schwachen Wechselwirkung (↗[4]). Diese Kopplung nennen Physiker „spontane Symmetriebrechung“. Als Konsequenz bleibt die Schönheit der Gleichungen erhalten, wie sie ohne Masse wäre, aber es gibt trotzdem Teile in der Gleichung, die wie die Massen von Bosonen aussehen. So hat man über die Kopplung an das Higgs-Feld doch noch die Massen der Bosonen eingeführt.

Während man sich diese Symmetriebrechung nur schwer vorstellen kann und sie auch nur die Massen

↗[3]: *„Licht“ auf Seite 7*
↗[4]: *„Die Schwache Wechselwirkung“ auf Seite 237*



der Bosonen betrifft, können wir nun einmal schauen, wie das Higgs-Feld den Fermionen, unseren Materieteilchen, Masse gibt. Was wir Masse nennen, ist gemäß den Newtonschen Gesetzen ein Widerstand gegen eine Beschleunigung. Je kleiner deine Masse, desto leichter kann man dich beschleunigen. Nun stell dir vor, dass alle masselosen Teilchen des Standardmodells mit dem neuen skalaren Feld wechselwirken. Einige mehr, einige weniger. Wir nennen die Stärke dieser Wechselwirkung „Kopplungsstärke". Schauen wir uns die Abbildung auf der vorherigen Seite einmal genauer an. Sie zeigt einen Haufen Studenten, die das Higgs-Feld repräsentieren. Zwei Jungs versuchen sich nun einen Kaffee zu holen. Einer ist ein Freund von Maxwell. Niemand kennt ihn, und das ist sein Vorteil, denn er kann in Ruhe seinen Kaffee holen. Er hat sozusagen eine geringe Kopplungsstärke an das Higgs-Feld. Da er sich fast frei bewegen kann, kann man sagen, dass die geringe Kopplung an das Higgs-Feld zu einer kleinen Masse führt. Anders beim armen Maxwell: Er, Superstar dieses Buches, ist so berühmt, dass jeder mit ihm wechselwirken will. Das verlangsamt ihn. Also nun: starke Kopplung, die wie eine große Masse wirkt.

Und genau auf diese Weise bekommen Fermionen ihre Masse: Sie wechselwirken mit dem Higgs-Feld. Und da die Stärke der Wechselwirkung für jedes Teilchen anders ist, sind es auch die Massen. Entwickelt in den 1960ern, war das lange nicht mehr als eine Idee. Die Erklärung der Massen hätte auch eine völlig andere sein können. Aber 2012 machten die Experimente ATLAS und CMS am weltgrößten Teilchenbeschleuniger LHC (↗[5]) eine interessante Entdeckung. Indem sie die Energie der im LHC beschleunigten Protonen nutzten, konnten sie ein neues Teilchen erzeugen. Es zerfällt sofort (↗[6]) und kann nur indirekt über die Spuren seiner Zerfallsprodukte in den Detektoren (↗[7]) gesehen werden. Einen solchen Schnappschuss der Zerfallsprodukte kann man in der Abbildung auf dieser Seite betrachten. Viele solcher rekonstruierter Teilchen sind nötig, um wirklich die Existenz eines neuen Teilchens zu bestätigen. Das liegt daran, dass auch andere Teilchen, die man schon kennt, genauso zerfallen können. Aber schließlich fand man tatsächlich ein neues Teilchen: das Higgs-Boson! Dieses neue Boson wurde von der Theorie des Higgs-Feldes vorhergesagt. Es ist eine Anregung des Higgs-Feldes selbst, so als ob die Studenten der letzten Abbildung sich verklumpen würden, auch ohne dass Maxwell zwischen ihnen stünde. Die Entdeckung des Higgs-Bosons hat nun endlich, 50 Jahre nach seiner Vorhersage, den Higgs-Mechanismus bestätigt. Und ein Jahr später, 2013, wurde die Erklärung der Massen der Elementarteilchen mit dem Nobelpreis ausgezeichnet. Ein Geheimnis weniger, das das Universum vor uns verbirgt.

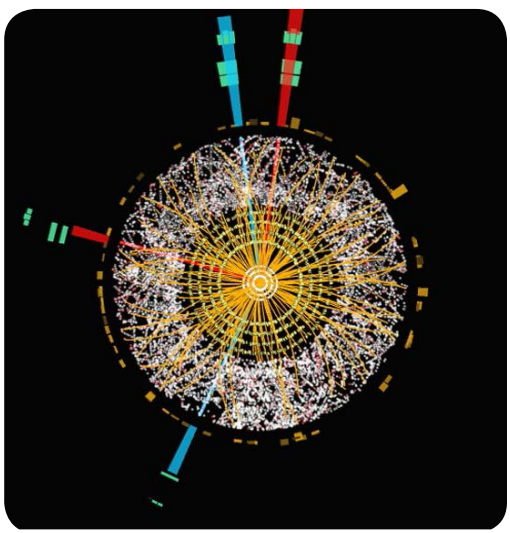


Abbildung: ATLAS Experiment © 2014 CERN

↗[5]: *„Teilchenbeschleuniger" auf Seite 253*
↗[6]: *„Teilchenzerfälle" auf Seite 225*
↗[7]: *„Teilchendetektoren" auf Seite 257*


DERWEIL in der SUBATOMAREN WELT...
LEBEN IM LARGE HADRON COLLIDER
SCHÖN, DICH ZU TREFFEN, RITA!
BIN MIR NICHT SICHER, MARIE!

Die Struktur des Protons

Oder auch: Wie man ohne Higgs Masse bekommt

Es ist schon verlockend, jemand anderen für seine eigenen Probleme verantwortlich zu machen. Zeigt die Waage zuviel an, wer ist dann schuld? Die Schokolade? Vielleicht die eigene Faulheit? Halt, Stopp! Das Higgs-Boson! Und sein Higgs-Mechanismus, der dafür verantwortlich ist, dass Teilchen ihre Masse bekommen. Also: kein Higgs, kein Übergewicht, stimmt's? Naja, nicht ganz …

Es ist nicht so, dass sich das Higgs-Boson Erwin, Emmy und Maxwell anschaut und denkt: „Ich würde jedem von euch jetzt diese und jene Masse geben". Nur Elementarteilchen bekommen von ihm eine Masse. Im Kapitel "Atome vs. Elementarteilchen" (↗1) haben wir gesehen, dass nur die allerkleinsten, nicht weiter zerlegbaren Teilchen tatsächlich als elementar bezeichnet werden können. Spielen wir noch einmal das „Kaputtmachen-und-reinschauen"-Spiel, aber konzentrieren wir uns diesmal auf die Massen. Bei winzigen Teilchen ist es praktisch, andere Maßeinheiten als Kilo und Pfund zu benutzen. Teilchenphysiker verwenden MeV („Megaelektronenvolt"), wobei ein MeV $1{,}70 \cdot 10^{-30}$ kg entspricht. Du siehst: eine wirklich kleine Einheit, wie gemacht für Elementarteilchen. Eigentlich ist MeV eine Einheit für Energie, aber man benutzt sie aufgrund der Äquivalenz von Masse und Energie (↗2) auch für Massen.



Das Proton – elementar oder nicht?

Fangen wir einmal mit einem 70 kg schweren Menschen an. Er besteht aus $1{,}5 \cdot 10^{27}$ Sauerstoffatomen mit einer Masse von 14904 MeV, $9{,}8 \cdot 10^{26}$ Kohlenstoffatomen mit einer Masse von 11178 MeV, $3{,}9 \cdot 10^{27}$ Wasserstoffatomen mit einer Masse von 938 MeV, $6{,}0 \cdot 10^{25}$ Stickstoffatomen mit einer Masse von 13041 MeV, $1{,}6 \cdot 10^{25}$ Calciumatomen mit einer Masse von 37260 MeV, $1{,}2 \cdot 10^{25}$ Chloratomen mit einer Masse von 33021 MeV, $1{,}4 \cdot 10^{25}$ Phosphoratomen mit einer Masse von 28852 MeV und noch ein paar wenigen anderen Atomen. Summieren wir alles auf, erhalten wir 70 kg. Super!

Jetzt gehen wir einen Schritt weiter und schauen uns die Struktur von einem der $6.5 \cdot 10^{27}$ Atome unseres Körpers an. Nehmen wir einmal Kohlenstoff als Beispiel. Seine Masse ist 12 mal so groß wie die von Wasserstoff. Wir kennen die Struktur der Atome aus dem Rutherfordschen Atommodell (↗1). Fast die gesamte Masse eines Atoms liegt in seinem Kern. Diese Kerne bestehen aus Protonen und Neutronen, die jeweils fast die gleiche Masse haben. Und da ein Kohlenstoffkern aus sechs Protonen und sechs Neutronen besteht, Wasserstoff aber nur aus einem Proton, erklärt das perfekt die 12-fach höhere Masse von Kohlenstoff. Stark!

Naja, fast. Wir haben da etwas unter den Tisch gekehrt. Zwölf mal die Protonenmasse ist nicht ganz die Masse von Kohlenstoff. Da die Nukleonen, also die Protonen und Neutronen, zusammenkleben müssen, brauchen sie etwas Bindungsenergie. Diese muss man von der Masse, die der Summe der Bausteine entspricht, abziehen und erhält eine

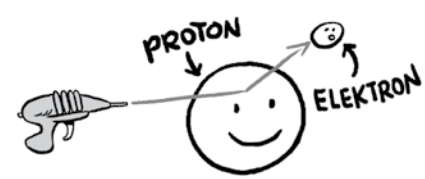
↗1: *„Atome vs. Elementarteilchen" auf Seite 209*
↗2: *„E = mc²" auf Seite 241*

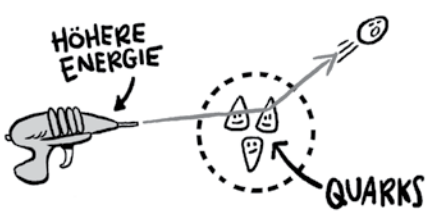
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_61

etwas verringerte Masse (siehe auch die Erklärung zum Massendefekt, ↗[2]). Kohlenstoff ist also etwas leichter als 12 Wasserstoffatome. Aber der Effekt ist winzig, nur ca. 0,8 %. Man sieht, dass im Bereich der Atomkerne Masse nicht nur massiv ist, sondern auch etwas durch die Energien beeinflusst wird.



Gehen wir ein wenig weiter in den Dschungel der Elementarteilchen hinein. Eine Ebene tiefer sind wir auch schon bei den Bestandteilen des Protons: den Quarks. Diese Jungs sind – soweit wir wissen – elementar und bekommen ihre Masse über den Higgs-Mechanismus. Physiker wussten, dass Quarks in Protonen sein müssen, indem sie Streuexperimente durchführten. Im Kapitel „Atome vs. Elementarteilchen“ (↗[1]) haben wir davon gehört. Im Rutherforschen Streuexperiment werden α-Teilchen (↗[3]) an Atomkernen gestreut, um etwas über die Struktur der Kerne zu lernen. Ganz so, als würde man Murmeln auf etwas schießen und die Form des Objekts über die Verteilung der weggestreuten Murmeln erraten. Im gleichen Kapitel haben wir auch das Bild einer riesigen Elektronenkanone gesehen, die Elektronen auf Protonen geschossen hat. Solche Experimente haben dem Proton seine Struktur entlockt. Bei geringen Energien verhält sich ein Proton in etwa wie eine Kugel. Aber bei höheren Energien sieht man, dass die Elektronen in Wirklichkeit an drei Quarks im Inneren des Protons streuen: zwei Up-Quarks und einem Down-Quark.





Indem man die Energie der Elektronenkanone noch weiter erhöht, kann man sogar eines der Quarks aus dem Proton kicken. Aber dann passiert etwas Seltsames. Es ist die Starke Wechselwirkung (↗[4]), die dafür sorgt, dass Atomkerne zusammenhalten. Und die Energie im Kraftfeld der starken Wechselwirkung wird mit größerem Abstand immer größer. So groß, dass wenn man versucht, ein Quark von seinen Kollegen zu trennen, die Energie zwischen den Quarks soweit steigt, dass man über $E = mc^2$ ein weiteres Quark/Anti-Quark-Paar erzeugen kann. Anders als alle anderen Teilchen, aus denen Materie aufgebaut ist, kann man Quarks also nicht trennen. Man kann ein Elektron von einem Atom trennen, ein Proton von einem Kern, aber ein Quark von anderen? Niemals.

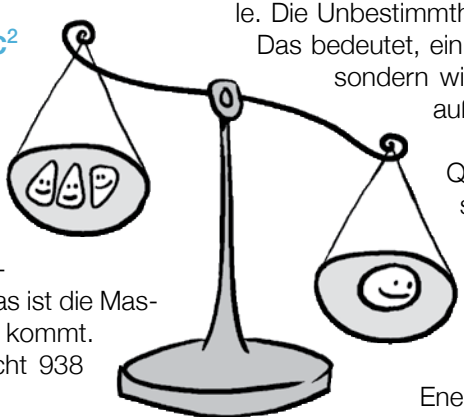


In einem einfachen Bild ist ein Proton also aus drei Quarks aufgebaut. Wenn man aber genauer hinschaut, kann man sehen, dass Gluonen (dargestellt durch kleine Federn) die

↗[3]: *„Alpha-, Beta- und Gammastrahlen“ auf Seite 175*
↗[4]: *„Die Starke Wechselwirkung“ auf Seite 233*

Quarks zusammenhalten. Und wenn man noch genauer hinschaut, machen die Gluonen lustige Dinge, wenn sie zwischen den Quarks umherwandern. Sie spalten sich in ein Quark/Anti-Quark-Paar auf. Nur ganz kurz. Wir kennen solche kurzzeitig erzeugten Teilchen als „Virtuelle Teilchen“. Schaut man noch genauer hin, sieht man, wie die virtuellen Teilchen wieder Gluonen austauschen und so weiter. Es geht ständig so weiter. Das ist also die Struktur des Protons. Aber wie sieht es jetzt mit der Masse aus?

Alles basiert auf $E = mc^2$



Gehen wir zurück zum Anfangsbild des Protons: drei Quarks und viele Gluonen. Die Gluonen sind masselos, also schauen wir mal auf die Quarks. Sowohl das Up- als auch das Down-Quark sind leichter als 10 MeV. Das ist die Masse, die vom Higgs-Mechanismus kommt. Aber drei mal 10 MeV ist … nicht 938 MeV – die Protonenmasse.

Diesen Zauber kann man über $E = mc^2$ erklären. Aber diesmal geht es um mehr als einen Unterschied von 0,8 %. Fast die gesamte Protonenmasse stammt aus einer Energiekorrektur! Der Higgs-Mechanismus ist nur für einen lächerlich kleinen Anteil von ein paar Prozent verantwortlich, nämlich die Massen der Quarks. Aber aus welcher Energie kommt die Protonenmasse dann? Wir müssen dafür auf die Heisenbergsche Unschärferelation schauen (↗[5]). Sie besagt: Je genauer man die Position eines Teilchens kennt, desto weniger weiß man über seinen Impuls. Im makroskopischen Maßstab (Haus, Hund, Ball) spielt das keine Rolle.



Der Begriff „genau“ ist natürlich relativ. Einige Menschen könnten sagen “Ich weiß genau, wo mein Auto ist: in der Garage. Und ich kenne auch genau seinen Impuls: null. Der Motor ist nämlich aus.“. Stimmt, aber man wird den Ort des Autos nicht auf einen Femtometer, also 10^{-15} m, genau bestimmen können. Aber genau das behaupten wir ja über die Position der Quarks im Proton zu wissen. Bei diesen Genauigkeiten spielt die Unschärferelation eine große Rolle. Die Unbestimmtheit des Impulses steigt rasant. Das bedeutet, ein Quark kann nicht ruhig sitzen, sondern wird wild umherschaukeln, völlig außer Rand und Band.

Quarks bewegen sich also schnell im Proton hin und her. Aber durch die Starke Wechselwirkung können sie dem Proton nicht entkommen. Wegen ihrer schnellen Bewegung tragen sie viel kinetische Energie. Und die Quarks teilen sich diese Energie mit den Gluonen, die sie austauschen. Ein Proton ist also eigentlich nur ein kleines Paket voller Energie, die man nicht freisetzen kann und die wir als Protonenmasse wahrnehmen. Sozusagen $E = mc^2$ in der Box.



↗[5]: *„Heisenbergsche Unschärferelation“ auf Seite 155*



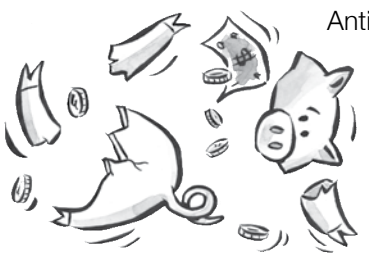
“Wir haben ja schon einige interessante Teilchenkollisionen beobachtet, aber so etwas noch nicht.”

Teilchenbeschleuniger

Zeitmaschinen und Urknallsimulatoren

Man sagt, sie könnten schwarze Löcher erzeugen. Man sagt, sie seien Zeitmaschinen, die uns zum Beginn des Universums bringen. Einige sagen auch, dass sie den Urknall nachbauen können. Gigantische Maschinen, gebaut in unterirdischen Tunneln: Teilchenbeschleuniger. Wieso bauen Physiker solche Maschinen und wie funktionieren sie?

Der Name sagt es: Teilchenbeschleuniger beschleunigen kleine Teilchen. Sobald sie schnell genug sind, lässt man sie gegeneinander („Collider“) oder gegen etwas Stillstehendes („Fixed Target“) krachen. Es gibt zwei Gründe, Teilchenbeschleuniger zu bauen. Der eine ist offensichtlich: Knallt man etwas gegeneinander, geht es kaputt und man kann sehen, was drin ist. Das kann jeder selbst zu Hause testen, indem er einen kleinen Sparschweinbeschleuniger baut, um den Inhalt des Schweins zu ergründen.



Physiker interessieren sich aber für Kleineres, etwa ein Proton. Denn dessen Inhalt birgt noch Geheimnisse. Um Protonen zu knacken, braucht man schon richtig viel Energie. Da kann man nicht einfach mit einem Hammer draufhauen.

Energie in Materie umwandeln

Neben dem „Reinschauen“ gibt es noch einen anderen Grund, Beschleuniger zu bauen. Hat man Teilchen erst einmal auf sehr hohe Geschwindigkeiten beschleunigt, haben sie auch sehr viel Energie. Und diese wird bei der Kollision frei. Denken wir an eine Kanonenkugel, die gegen eine Wand kracht: Je schneller sie ist, desto mehr kann sie die Wand … „modifizieren“. Wenn zwei Teilchen mit sehr hoher Energie kollidieren, und sie sind nicht elementar, (↗[1]), dann gehen sie kaputt. Sind sie aber elementar, können sie nicht auseinanderbrechen. Stattdessen tun sie etwas, das wir in unserer makroskopischen Welt nicht beobachten können. Sie nutzen Einsteins berühmtes $E = mc^2$ und wandeln ihre Energie in Materie um! Und sogar Antimaterie (↗[2]). Beides wird jeweils zu gleichen Anteilen produziert, meist in Paaren. Man kann auf diese Art Dinge produzieren, die man schon gut kennt. Man kann aber auch verrückte Dinge erzeugen, z.B. ein Strange-Quark (heißt wirklich so) und ein Anti-Strange-Quark. Je schwerer sie sind, desto mehr Energie braucht man, um sie zu erzeugen. Das Standardmodell (↗[3]) enthält alle bekannten Bausteine der Materie (wir vermuten aber, dass es noch mehr gibt). Gleich nach dem Urknall existierten diese auch alle schon (↗[4]), sie wurden ständig neu erzeugt und sind wieder zerfallen (↗[5]). Als das Universum sich ausdehnte und dabei abkühlte, war irgendwann aber nicht mehr genug Energie vorhanden, um neue Teilchen zu erzeugen. Deshalb kommen heute nicht mehr alle diese Teilchen in der Natur vor. Aber wir können Teilchenbeschleuniger mit genug Energie bauen, um sie wieder zu erzeugen. So sehen wir, wie die Dinge kurz nach dem Urknall

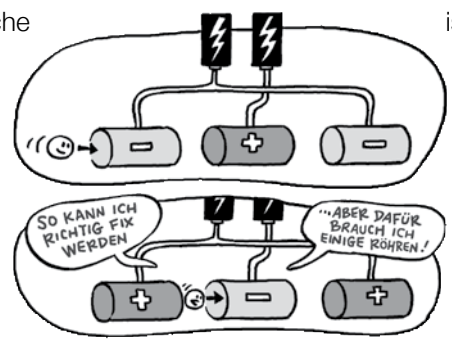
↗[1]: *„Atome vs. Elementarteilchen“ auf Seite 209*
↗[2]: *„Antimaterie“ auf Seite 221*
↗[3]: *„Das Standardmodell“ auf Seite 217*
↗[4]: *„Der Urknall“ auf Seite 97*
↗[5]: *„Teilchenzerfälle“ auf Seite 225*

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_62

waren: Welche Teilchen gab es, und wie haben sie miteinander reagiert?

Energie von Teilchenstrahlen

Man fragt sich: Wieso muss man eigentlich kleine Teilchen beschleunigen und keine, sagen wir mal, Tennisbälle? Dafür gibt es ja schließlich auch schon Experten. Wieso der Ärger mit den winzigen Teilchen? Stell dir vor, du klatschst einem Freund mit der Hand in den Nacken. Tut weh. Jetzt stell dir vor (nur vorstellen!), ihm nochmal in den Nacken zu klatschen (mit der gleichen Energie), aber diesmal mit einer kleinen Nadel an deiner Hand. Tut viel mehr weh! Wieso? Die gleiche Energie war diesmal in einen winzigen Punkt fokussiert. An der Nadelspitze war daher die „Energiedichte“ viel größer. Dieselbe Energie auf ein Elementarteilchen konzentriert, statt auf einen Tennisball, führt also zu viel höherer Energiedichte.



Versuchen wir mal ein Gefühl für die Energie von solchen beschleunigten Teilchen zu bekommen, indem wir sie in einem modernen Teilchenbeschleuniger begleiten. Der größte der Welt ist der „Large Hadron Collider“, LHC. Er steht im Forschungszentrum CERN bei Genf in der Schweiz. Er beschleunigt Protonen auf bis zu 99,9999991 % Lichtgeschwindigkeit. Das ist sehr schnell, vor allem wenn man bedenkt, dass nach der Speziellen Relativitätstheorie (↗[6]) nichts schneller als Licht sein kann. Kannst du dir vorstellen, schon einmal etwas mit so viel kinetischer Energie gesehen zu haben? Nein? Eine Mücke vielleicht? Die fliegt mit ca. 2 cm/s (nicht sehr schnell) kann aber mit den Protonen im LHC mithalten. Das klingt erstmal ziemlich verrückt. Aber: Bei der Mücke ist die kinetische Energie auf ca. 10^{21} Protonen verteilt, wie schon gesagt. Auf die Energiedichte kommt es an.



Wie man beschleunigt

Oma weiß immer eine Menge. Zufällig hat sie auch einen Teilchenbeschleuniger zu Hause. Nichts Besonderes, sondern einfach einen alten Röhrenfernseher. Das sind diejenigen, die noch nicht flach waren. Und der funktioniert so: Hinten drin ist ein dünner Draht, der von einem Strom aufgeheizt wird. Durch die Hitze bekommen die Elektronen im Draht genug Energie um sich vom Draht zu lösen und sich frei zu bewegen. Jetzt muss man sie noch dazu bringen, in die richtige Richtung zu fliegen (zum Bildschirm, damit sie die Farbpunkte treffen und ein Bild erzeugen). Ein Elektron kann man nicht einfach schubsen. Aber da es geladen ist, kann man es mit einem elektrischen Feld beschleunigen. Es bewegt sich immer in Richtung des positiveren Potenzials. Potenzialunterschiede nennt man Spannungen, und je höher die Spannung, desto schneller kommt das Teilchen an. Daher geben Physiker Energie auch gerne in „Elektronenvolt“ (eV) an. Ein Teilchen, das von einer Spannung von einem Volt beschleunigt wurde, hat danach die Energie 1 eV. Was mit dem Elektron geht, geht auch mit allen anderen geladenen Teilchen, z.B. dem Proton (fliegt nur in die andere Richtung). Will man ein neutrales

↗[6]: *„Relativität von Raum und Zeit“ auf Seite 117*



Atom beschleunigen, muss man ihm zuerst ein Elektron abnehmen, damit es geladen ist. Mit dieser Methode gibt es allerdings eine Obergrenze, die technisch bedingt ist (ca. 300 Millionen Volt). Ist das das Ende aller Beschleunigungsträume? Nein! Pfiffig muss man sein. Statt einem großen Kick kann man den Teilchen auch viele kleine geben. In unserer Abbildung sehen wir ein Proton in einer geladenen Röhre. Die nächste Röhre hat eine entgegengesetzte Ladung. Kommt das Proton aus der ersten, wird es von der zweiten abgestoßen. Blöd, keine Beschleunigung. Aus dem Grund muss man gerade dann, wenn das Proton aus der ersten Röhre kommt, die Spannung der zweiten wechseln. Und so geht es dann weiter. Statt also besonders hohe Spannungen zu nehmen, kann man auch besonders viele Röhren hintereinander bauen. Das Problem: so wird der Beschleuniger auch immer größer. Solche „Linearbeschleuniger“ werden bis zu einigen Kilometern lang, so z.B. der Stanford Linear Accelerator in Menlo Park, Kalifornien.

Im Kreis gehen

Was tut man, wenn man nicht mehr genug Platz hat? Wie wäre es, das Teilchen am Ende der Beschleunigung wieder am Anfang der ersten Röhre ankommen zu lassen? Statt vieler Röhren bräuchte man dann nur noch einen Ring. Durch die Beschleunigung mit elektrischen Feldern fliegt ein Teilchen aber erstmal nur geradeaus. Um es abzulenken braucht man Magnetfelder. Man braucht eine ganze Menge besonders starker Magneten, um es bei solchen Energie im Kreis fliegen zu lassen. Der LHC braucht 1232 Magneten, damit die Protonen den 27 Kilometer langen Kreis umrunden können. Das Magnetfeld wird von 12.000 A starken Strömen erzeugt. Zu Hause fliegt schon die Sicherung raus, sobald mehr als 16 A Strom durch die Kabel fließen. Bei höheren Strömen werden die Kabel heiß und schmelzen. Die Kabel im LHC können nicht schmelzen, weil sie auf -271 °C (sehr kalt!) gekühlt werden. Bei dieser Temperatur wird das Spezialmaterial der Kabel „supraleitend“ (↗[7]) und das Kabel wird erst gar nicht warm.

Der LHC steht in einem Tunnel, 100 m unter der Erde. Das liegt nicht daran, dass die Maschine gefährlich ist und versteckt werden muss. Es ist einfach billiger, einen Tunnel zu graben, als all das Land auf der Oberfläche zu kaufen. Oh, was wir nicht vergessen dürfen: Neben Tunneln, elektrischen und magnetischen Feldern braucht man noch etwas, um einen Teilchenbeschleuniger zu bauen. Stell dir vor, du bist mit 99,9999991 % Lichtgeschwindigkeit auf der Autobahn unterwegs. Taucht plötzlich vor dir ein Hindernis auf, hast du ein großes Problem. Das geht den Protonen im Beschleuniger genauso. Daher braucht man im Strahlrohr ein ziemlich gutes Vakuum (↗[8]), damit keine Luftmoleküle im Weg sind.

Im LHC werden zwei Protonenstrahlen in entgegengesetzter Richtung beschleunigt. Beide Strahlen bestehen aus 2802 Paketen mit jeweils 10^{11} Protonen. An vier Punkten des 27 km langen Beschleunigers werden die beiden Strahlen gekreuzt und die Protonen kollidieren. Jede Sekunde kollidieren 40 Millionen Protonenpakete, die ihre Energie in Materie und Antimaterie umwandeln. Riesige Detektoren (↗[9]) machen Bilder von diesen Kollisionen und lassen uns die Daten analysieren. Wir wissen nicht, was der LHC noch alles finden wird. Vielleicht supersymmetrische Teilchen (↗[10])?



↗[7]: *„Supraleiter“ auf Seite 183*
↗[8]: *„Vakuum und Luftdruck“ auf Seite 23*
↗[9]: *„Teilchendetektoren“ auf Seite 257*
↗[10]: *„Supersymmetrie“ auf Seite 303*


DERWEIL, in der SUBATOMAREN WELT...
NACHRICHTEN AUS DEM TEICHENBESCHLEUNIGER
VERKEHR – IM TUNNEL GAB ES EINE KOLLISION, DIE URSACHE: ÜBERHÖHTE GESCHWINDIGKEIT. UND DAS BRINGT UNS ZUM WETTER.
TUT ES DAS NICHT IMMER, PETER?
NACHRICHTEN
TEILCHEN-SCHAUER

Teilchendetektoren

Das Unsichtbare sichtbar machen

Woran denkst du bei dem Wort „Detektor“? Klingt ein wenig nach Detektiv, jemand der herausfinden will, was vor sich geht. Vielleicht bist du schon einmal einem Detektor begegnet, am Flughafen zum Beispiel. Metalldetektoren ermöglichen dem Personal, Dinge aufzuspüren, die sonst unentdeckt bleiben. Während man die Metallobjekte sehen kann, sobald sie der Detektor aufgespürt hat, bleiben unseren Augen andere Dinge grundsätzlich verborgen: Elementarteilchen. Sie sind einfach viel zu klein, um direkt gesehen zu werden. Die Frage ist: Wie kann man sie dann in einem Detektor sichtbar machen?



Die Geladenen können nicht unbeobachtet entwischen

Was haben Flugzeuge und wilde Tiere gemeinsam? Beide hinterlassen Spuren – wir wissen, dass sie da waren, selbst wenn wir sie nicht mehr sehen. An der Art der Spur kann man dann direkt erkennen, welchem Tier die Spur zugeordnet werden kann: Katze oder Pferd, du weißt Bescheid.



Eine typische Flugzeugspur sieht aus wie ein langer, dünner, wolkiger Streifen am Himmel. Der Himmel ist also eine Art Flugzeugdetektor. Ganz ähnlich funktioniert ein sehr bekannter Teilchendetektor, der weder besonders mächtig, noch modern oder schnell ist. Aber er kann unsichtbare Teilchen wie α-, β- und γ- Strahlung (↗[1]), Protonen und Myonen sichtbar machen. Sein Name ist „Nebelkammer“. Er besteht aus einer verschlossenen Glaskiste, in der Alkohol erhitzt wird. Der Alkohol verdampft und verteilt sich in der Luft. Man sagt, die Luft ist mit Alkoholdampf „gesättigt“. Das Erhitzen des Alkohols findet oben in der Kiste statt. Unten, auf dem Boden, befindet sich eine kalte Metallplatte. Die gesättigte Luft wird dann unten an der Platte gekühlt und kann als Folge dessen weniger Alkoholdampf aufnehmen. Sie ist dann nicht bloß gesättigt, sondern „übersättigt“. Den gleichen Effekt sieht man auch, wenn man im Winter ausatmet.



Um den überschüssigen Alkohol loszuwerden, braucht die Luft einen Auslöser, etwas, an das sich die Alkoholmoleküle anheften können, um kleine Tröpfchen zu bilden. Solch ein Auslöser kann ein geladenes Teilchen sein, das vorbeirauscht und genug Energie hat, um die Moleküle der Luft zu ionisieren. Der Alkoholdampf wird dann kondensieren, und zwar genau da, wo das Teilchen langgeflogen ist. Und schon haben wir ein unsichtbares Teilchen sichtbar gemacht!

Wenn man sich die Spuren in der Nebelkammer genauer anschaut, erkennt man, dass einige von ihnen kurz und dick sind, andere lang und dünn. Und von den dünnen Linien gehen einige recht gerade, während andere Zickzacklinien bilden. Die unterschiedlichen Spuren kommen von den unterschiedlichen

↗[1]: *„Alpha-, Beta- und Gammastrahlen“ auf Seite 175*

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_63



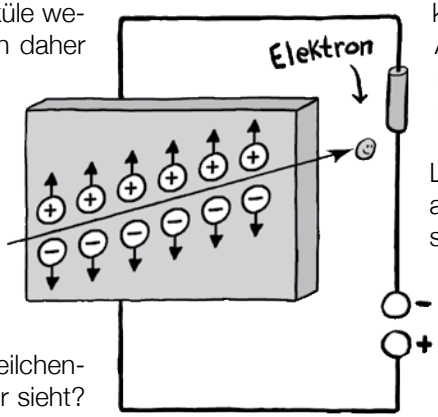
Teilchen, die sie verursachen: Je mehr Ladung sie tragen, desto mehr können sie ionisieren und desto dicker die Spur. Daher hinterlassen die doppelt positiven α-Teilchen breite Spuren. Da sie viel ionisieren, verlieren sie dabei auch viel Energie. Und je mehr sie verlieren, desto eher bleiben sie stehen. Das macht ihre Spuren so kurz. Du kannst auch Unterschiede zwischen β-Teilchen und Myonen sehen. Die schwereren Myonen werden von Stößen gegen die Luftmoleküle weniger stark abgelenkt und haben daher geradere Spuren als Elektronen.

Das Prinzip bei Nebelkammern ist das gleiche wie bei Flugzeugspuren. Dort wird die heiße Luft aus den Turbinen vom kalten Himmel gekühlt und der Wasserdampf kondensiert an kleinen Rußpartikeln. Wir können uns nun fragen: Was verrät uns ein Teilchendetektor über die Teilchen, die er sieht? Während es sehr komplexe Detektoren gibt, die auch komplexe Informationen über die Teilchen liefern können, ist die wichtigste Frage bei der Suche nach den Bausteinen der Natur: Wo sind sie langgeflogen? Und welche Energie hatten sie? Die Detektoren, die diese Fragen beantworten, nennt man Spurdetektoren und Kalorimeter.

Spurdetektoren – wohin des Weges?

Wenn du dem Weg eines Tieres auf den Spuren im Schnee folgst, möchtest du das Tier dabei nicht stören, oder? Spurdetektoren geht es bei den Teilchen genauso. Sie arbeiten dabei ähnlich wie eine Nebelkammer: Geladene Teilchen treffen auf das Detektormaterial und ionisieren es.

Das bedeutet, sie trennen neutrale Atome in negative Elektronen und einen positiven Rest. Wenn man nun eine Spannung an den Detektor anlegt, bewegen sich die positiven Teile in Richtung der negativ geladenen Seite (Kathode) und umgekehrt. Dadurch kann man einen Spannungspuls messen. Dieses elektrische Signal kann man digitalisieren und eine Art „Klick“ bekommen. Die Abbildung zeigt eine moderne Anwendung dieser Methode mithilfe einer sogenannten Halbleiterdiode. Legt man an sie eine Spannung an, fließt kein Strom hindurch. Es sei denn, man führt etwas Energie hinzu, in diesem Fall mit einem durchfliegenden Teilchen. Das Gute an solchen Halbleiterdetektoren ist, dass man sie sehr klein bauen kann, so wie Mikroprozessoren. Jedes Mal, wenn ein Teilchen hindurchfliegt, kann der Detektor sagen „hier war was“. Und je kleiner die Detektorstruktur ist, desto genauer kann man sagen, wo etwas war. Moderne Detektoren können die Position von Teilchen mikrometergenau bestimmen. Statt einer Halbleiterdiode kann man aber auch einfach ein mit Gas gefülltes Rohr benutzen. Die berühmten Geigerzähler (die Dinger, die immer „klick, klick“ machen, wenn sie Radioaktivität aufspüren) funktionieren so. Tscherenkow-Detektoren, die wir im Kapitel „das Neutrino“ (↗[2]) eingeführt haben, machen Teilchenspuren auf eine andere Art sichtbar. Statt durch Ionisation Ladung freizusetzen, wird ein Lichtkegel emittiert.

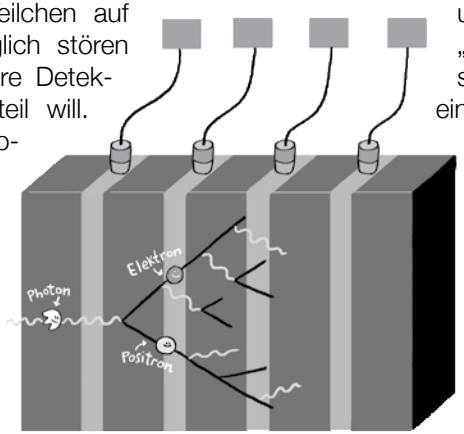


↗[2]: *„Das Neutrino“ auf Seite 213*

Spannend wird die Information über die Spur eines Teilchens dann, wenn man den Detektor in ein starkes Magnetfeld legt. Geladene Teilchen fliegen im Magnetfeld im Kreis. Je schneller sie sind (genauer: je größer ihr Impuls ist), desto größer ist der Kreis. Die Richtung der Krümmung wird dabei von der Ladung des Teilchens bestimmt. Wenn man also mit einem Spurdetektor den Weg eines Teilchens im Magnetfeld genau vermisst, kennt man die Ladung und den Impuls des Teilchens.

Kalorimeter – die Teilchenstopper

Während Spurdetektoren die Teilchen auf ihrem Weg so wenig wie möglich stören wollen, gibt es noch eine andere Detektorart, die das genaue Gegenteil will. Sie versucht, Teilchen so abrupt zu stoppen, dass sie dabei all ihre Energie verlieren. Die nennt man „Kalorimeter".



Das Wichtige ist, dass sie dabei auch messen wollen, wie viel Energie die Teilchen verloren haben. Dann weiß man nämlich, wie viel Energie das Teilchen vorher hatte. Mit Kalorimetern kann man auch die Energie von ungeladenen Teilchen messen, z.B. von Neutronen und Photonen. Da sie weder ionisieren, noch vom Magnetfeld abgelenkt werden können, nützen Spurdetekoren hier nichts.

Wie funktioniert so ein Kalorimeter? Viele von ihnen sind als „Sandwichkalorimeter" aufgebaut. Eine passive Schicht erzwingt eine Reaktion zwischen dem Teilchen und dem Detektormaterial. Das darauf folgende aktive Material liest die Energie aus, die bei dieser Reaktion frei wurde. Schauen wir uns einmal an, wie ein Kalorimeter die Energie eines einfallenden Photons messen würde. Das Photon wandelt sich in ein Elektron/Positron-Paar um (↗[3]). Die Elektronen und Positronen emittieren hochenergetische Röntgenstrahlung (Photonen). Die werden dann wieder zu Elektron/Positron-Paaren und so weiter. Die mittlere Energie der Teilchen sinkt dabei stetig. Am Ende zählt man dann die Energie der übrig gebliebenen, niederenergetischen Teilchen in der aktiven Schicht.

Solche „Lawinen" von Elektronen und Photonen nennt man auch „Teilchenschauer". Man kann sich leicht vorstellen, wie hier ein Elektron- statt Photonschauer aussehen würde. Er fängt einfach einen Schritt später an und entwickelt sich genauso weiter wie der Photonschauer. Auch Hadronen produzieren Schauer und können in Kalorimetern gestoppt werden. Solche Schauer sehen etwas anders aus und werden durch die Starke Wechselwirkung (↗[4]) verursacht.

Zusammenspiel aller Detektoren

Man kann Spurdetektoren, Magnetfelder und Kalorimeter so anordnen, dass man sehr mächtige Allzweckdetektoren bekommt, so wie die ATLAS und CMS Detektoren (↗[5]). ATLAS hat z.B. 100 Millionen Auslesekanäle (so wie eine 100 MPix Kamera), 3000 km Kabel und kann bis zu 40 Millionen Bilder pro Sekunde von vorbeifliegenden Teilchen machen.

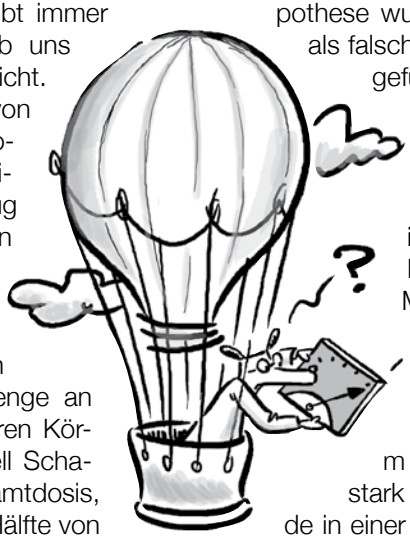
↗[3]: *„Antimaterie" auf Seite 221*
↗[4]: *„Die Starke Wechselwirkung" auf Seite 233*
↗[5]: http://atlas.ch and http://cms.web.cern.ch


ALPHA MAGNETISCHES SPEKTROMETER
STRAHLUNG
EINFALLENDE TEILCHEN
POPCORNTÜTE HIER PLATZIEREN
LEVEL 2
LEVEL 8

Kosmische Höhenstrahlung

Ausgesendet von weit entfernten Beschleunigern

Strahlung ist überall. Wir fühlen sie nicht, aber manchmal sind wir uns ihrer wenigstens bewusst. Bei einem Handy-Anruf beispielsweise. Die Information des Telefonats wird durch elektromagnetische Strahlung übertragen. Es gibt immer noch große Debatten darüber, ob uns diese Strahlung schadet oder nicht. Aber es gibt eine besondere Art von Strahlung, die zumindest das Potenzial hat, uns zu schädigen: ionisierende Strahlung. Die hat genug Energie, um Elektronen aus Atomen zu reißen und chemische Bindungen aufzubrechen. Wir können messen, wie viel Strahlung wir ausgesetzt sind, indem wir deren Dosis bestimmen. Das ist die Menge an Energie, die die Strahlung in unseren Körper gebracht hat und die potenziell Schaden verursachen könnte. Die Gesamtdosis, die uns Menschen erreicht, ist zur Hälfte von Menschen gemacht und zur Hälfte natürlich. Menschengemachte Strahlung könnten wir vermeiden. Aber man sollte wissen, dass 90 % der menschengemachten Strahlung von der medizinischen Diagnostik kommt, etwa von Röntgengeräten oder CTs. Im Notfall sagt man dazu wohl eher nicht nein.



Die natürliche Strahlung kommt größtenteils aus dem Radon-Gas, das von zerfallenen Uran-Atomen in der Erdkruste stammt. Anfang des 20. Jahrhunderts wollten Wissenschaftler diese natürliche Strahlung untersuchen und maßen sie an verschiedenen Orten. Sie überprüften dabei insbesondere die Abhängigkeit von der Höhe über dem Boden. Sollte die gesamte natürliche Strahlenbelastung aus dem Erdboden kommen, müsste sie abnehmen, je weiter man sich vom Erdboden entfernt. Diese Hypothese wurde getestet und … erwies sich als falsch. Sehr detaillierte Studien, durchgeführt von Victor Hess in den Jahren 1911 und 1912, haben das Tor zu einer neuen natürlichen Strahlungsquelle geöffnet. Er steckte seine Messgeräte für ionisierende Strahlung in einen Ballon und stellte fest, dass die Menge der Strahlung zuerst wie vermutet mit steigender Höhe abnahm. Doch dann stieg sie plötzlich an, statt weiter abzunehmen. In einer Höhe von 5000 m war sie schon etwa doppelt so stark wie auf dem Erdboden und wurde in einer Höhe von 9300 m bis zu 40-mal so stark.

Strahlung von oben

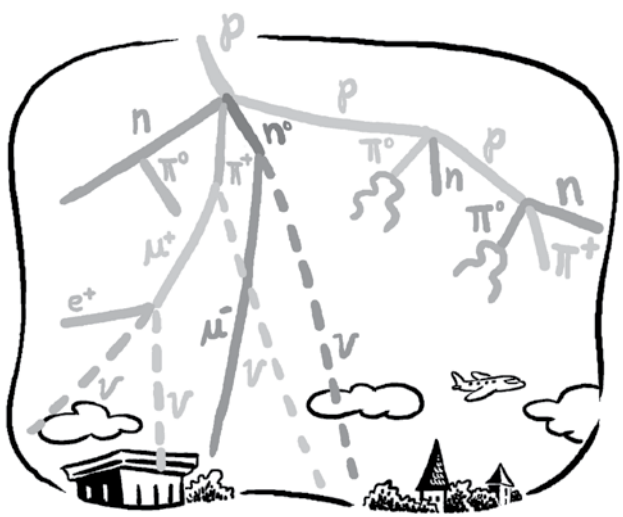
Hess schloss daraus, dass es eine neue Art von Strahlung sein musste, die von oben kommt. Die Atmosphäre schirmt dabei die Erde gegen die Strahlung ab. Und je höher man steigt, desto dünner wird die Atmosphäre und desto geringer ist daher die Abschirmung. Für die Entdeckung dieser sogenannten „kosmischen Höhenstrahlung“ wurde Hess 1936 mit dem Nobelpreis in Physik ausgezeichnet.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_64

Kosmische Höhenstrahlung ist immer noch von großem Interesse: Zwei eng verwandte Fragen beschäftigen die Physiker: 1. Was ist der Ursprung der kosmischen Höhenstrahlung? 2. Was beschleunigt sie auf die enorm hohen Geschwindigkeiten? Bisher haben wir uns noch nicht über die Geschwindigkeiten und die damit verbundenen Energien unterhalten. Kosmische Teilchen, die auf die Erdatmosphäre treffen, haben Energien von bis zu 10^{22} eV. Das ist mehr als 14 Millionen mal die Energie der Teilchen im Large Hadron Collider, des größten von Menschen gebauten Teilchenbeschleunigers. Es scheint, als habe die Natur viel bessere Beschleuniger als wir. Wie stellt sie das an?

Vom Teilchen zum Schauer

Die superhochenergetischen Teilchen schaffen es nicht, durch die Atmosphäre zu gelangen und von uns hier unten vermessen zu werden. Stattdessen nutzen wir indirekte Methoden, um Schauer wie den in der Abbildung zu untersuchen. Ein kosmisches Teilchen – meist ein Proton – trifft auf die obersten Schichten der Atmosphäre. Über die Starke Wechselwirkung (↗[1]) reagiert es dann mit einem Teilchen in der Atmosphäre. Ein Teil der Protonenenergie wird dabei in Materie/Anti-Materie-Paare umgewandelt (↗[2]). Die neu erschaffenen Teilchen verursachen weitere Wechselwirkungen mit den Atomen der Atmosphäre. Nach jeder Reaktion entstehen mehr Teilchen. Gleichzeitig fällt die mittlere Energie der Teilchen. Solche Teilchenschauer entstehen auch in Teilchendetektoren (↗[3]), den Kalorimetern. Man nennt die Schauer hadronisch (wenn sie durch die Starke Wechselwirkung entstehen) oder elektromagnetisch (wenn sie über die elektromagnetische Wechselwirkung entstehen). Die Energie des Teilchens, das den Schauer verursacht hat, wird dabei auf alle entstandenen Teilchen des Schauers verteilt. Ein ganz bestimmtes Teilchen, das in den Schauern entsteht, reagiert dabei kaum mit den Atomen der Atmosphäre: das Myon. Auf seinem Weg zum Erdboden verliert es kaum Energie und kann ihn daher auch gut erreichen. In Nebelkammern (↗[3]) können wir die Spuren dieser kosmischen Myonen sichtbar machen.





Sogar in Detektoren, die man aus Kaffeekannen baut (↗[4]) und in unseren großen Detektoren (z.B. ATLAS und CMS, ↗[5]), die Hunderte Meter unter der Erdoberfläche stehen, sind sie sichtbar.

Um die Höhenstrahlung zu untersuchen, muss man ihre Energie und Richtung untersuchen. Dafür kann man sie z.B. direkt messen, bevor sie einen

↗[1]: *„Die Starke Wechselwirkung“ auf Seite 233*
↗[2]: *„Antimaterie“ auf Seite 221*
↗[3]: *„Teilchendetektoren“ auf Seite 257*
↗[4]: http://kamiokanne.uni-goettingen.de
↗[5]: http://atlas.ch and http://cms.web.cern.ch



Schauer verursacht. Man müsste sich dafür wie Erwin und Maxwell direkt ins All begeben. Das AMS Experiment (↗[6]), das auf der Internationalen Raumstation ISS läuft, macht genau das. Eine andere Möglichkeit ist es, die Schauer direkt auf der Erdoberfläche zu vermessen. Will man die Energie des Anfangsteilchens herausfinden, muss man zunächst die Größe des Schauers messen: Je größer die Energie, desto größer der Schauer. Wirklich hochenergetische Schauer können Hunderte Quadratkilometer groß werden. Niemand kann so große Detektoren bauen. Stattdessen baut man mehrere kleine, die jeweils einen Teil vermessen. Indem sie miteinander kommunizieren, können sie alles zu einem großen Bild zuammenfügen. Solche Anlagen bestehen entweder aus Teleskopen, die die Photonen des Schauers vermessen – so wie die Experimente HESS, MAGIC und VERITAS – oder aus Tscherenkow-Detektoren, die die Energie der geladenen Komponenten der Schauer ausmessen. Das Pierre Auger Experiment (↗[7]) ist ein Beispiel für solch eine Anordnung von Tscherenkow-Detektoren. Es besteht aus 1600 Detektoren, verteilt auf über 3000 km^2 in der argentinischen Landschaft. Die Detektoren bestehen aus einem Wassertank, einer Solarzelle und einer Antenne. Die Abbildung zeigt einen von ihnen.

Vögel lieben Antennen

Dazu gibt es eine lustige Geschichte: Physiker fragten sich, wieso mehr und mehr Detektoren die Energie ausging. Es schien, als würden die Solarzellen nicht mehr laden. Schau mal auf das Foto. Hast du eine Idee, was passiert ist? Die Antenne, direkt über der Solarzelle, ist ein netter Ort für Vögel. Ab und an lassen Vögel gerne etwas fallen. Und irgendwann ist auch die gesamte Solarzelle damit bedeckt. Zum Glück gab es eine einfache Lösung für das Problem: Solarzellen abwischen und Antennen um 180° drehen.



Foto: Pierre Auger Observatorium

Noch immer laufen viele Studien zur kosmischen Strahlung. Wir würden gerne wissen, wie sie die Natur so stark beschleunigt. Eine Vermutung richtet sich auf Supernovaexplosionen (↗[8]), bei denen die Teilchen auf den Schockwellen reiten. Wichtig ist auch, die Auswirkungen von kosmischer Strahlung auf Astronauten zu untersuchen. Sie sind ihr schutzlos ausgeliefert. Gerade bei einer möglichen Reise zum Mars muss man auf diese Strahlung genau achten. Man muss nicht gleich den Mars bereisen, um einer höheren Dosis an kosmischer Strahlung ausgesetzt zu werden. Es reicht auch ein Langstreckenflug. Je höher das Flugzeug, desto weniger ist man abgeschirmt. Zwar ist der Effekt klein, aber dennoch muss das Flugzeugpersonal immer ein Auge auf die angesammelte Gesamtdosis haben.

↗[6]: http://www.ams02.org
↗[7]: https://www.auger.org
↗[8]: *„Supernovae“ auf Seite 83*


DERWEIL in der SUBATOMAREN WELT...
ICH HABE KEINE WAHRE IDENTITÄT... ICH SCHEINE ZWISCHEN DREI PERSÖNLICHKEITEN ZU OSZILLIEREN!
SEUFZ... NEUTRINOS..

Neutrinooszillation

Teilchen, die ihre Persönlichkeit ändern

Neutrinos sind schon seltsam. Sie reagieren kaum mit irgendetwas, haben keine Ladung und keine Masse, obwohl sie zu den Materieteilchen gehören. Keine Masse? Na gut, zumindest fast keine. Mittlerweile wissen Physiker, dass Neutrinos zumindest eine kleine Masse haben müssen, um etwas tun zu können, das wir „Neutrinooszillation“ nennen. Dieser Effekt ist kaum zu glauben und wir werden bald verstehen, wie er funktioniert. Aber fangen wir mal langsam an.

Die größte Neutrinoquelle ist die Sonne. Ungefähr 70.000.000.000 Neutrinos treffen pro Sekunde auf jeden cm^2 unserer Erdoberfläche. Wenn aber Neutrinos kaum mit uns reagieren, woher wissen wir dann, wie viele durch uns fliegen? Dazu haben Physiker ein Modell der Sonne erstellt. Wie groß ist sie? Wie viel Energie strahlt sie ab? Welche Prozesse finden in ihrem Inneren statt? All diese Informationen sind im sogenannten „Solaren Standardmodell“ enthalten. Die meisten Prozesse sind Kernfusionen (↗[1]): Zwei Protonen fusionieren zu einem Deuteron, nachdem über die Schwache Wechselwirkung (↗[2]) eines der Protonen in ein Neutron umgewandelt wurde. Die positive Ladung dieses Protons wurde von einem Positron „weggetragen“, das zusammen mit einem Elektron-Neutrino entstanden ist. Die meisten der „solaren Neutrinos“ (die von der Sonne), kommen von solchen Protonenfusionen. Soweit, so gut. Die Physiker berechneten also die Menge an zu erwartenden Neutrinos und verglichen sie mit Messungen.



Neutrinos zählen

Die erste Messung war gar nicht so einfach. In der Homestake Mine in South Dakota gelang ein erster Versuch. Über 1400 Meter unter der Erdoberfläche, wurden ca. 615 t Tetrachlorethylen zur Messung der Neutrinos eingesetzt. Nie von Tetrachlorethylen gehört? Keine Sorge. Alles, was wir darüber wissen müssen: Da ist Chlor drin. Und das mögen die solaren Neutrinos. Sie wandeln das Chlor in Argon um, ein leichtes Gas. Das Argon-Gas ist auf der einen Seite sehr leicht und kann gut gesammelt werden, da es aus dem Detektor aufsteigt. Auf der anderen Seite handelt es sich um ein spezielles Argon-Isotop, das radioaktiv zerfällt. So kann man es leicht erkennen und die Argon-Atome zählen. Man sollte nicht zu viel erwarten: Jeden zweiten Tag rechneten die Physiker mit einem Atom. Nicht viele, wenn man bedenkt, dass insgesamt mehr als 2.0 00.000.000.000.000.000.000.000.000.000 Chlor-Atome in dem Tank waren. Man sieht: Neutrinos zählen ist nicht leicht.

↗[1]: *„Kernfusion“ auf Seite 179*
↗[2]: *„Die Schwache Wechselwirkung“ auf Seite 237*

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_65

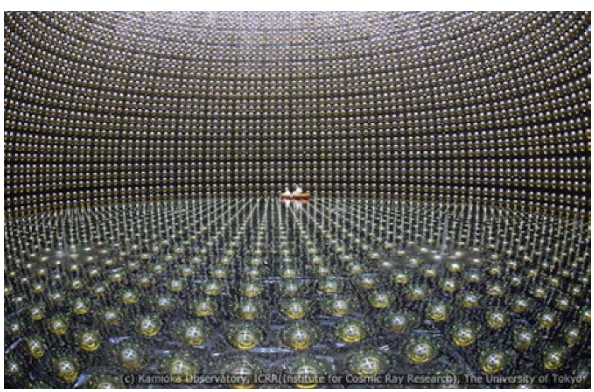
So ein riesiger Aufwand wurde betrieben, nur um die solaren Neutrinos zu zählen und das solare Standardmodell zu bestätigen. Hat aber nicht geklappt. Man zählte nur ein Drittel der erwarteten Neutrinos. Das warf die Frage auf: Wer ist schuld? Die Experimentalphysiker (so wie Maxwell), die die Neutrinos zählten? Oder die Theoretiker (wie Erwin), die die Zahl der erwarteten Neutrinos ausrechneten?

Was geschah mit den Neutrinos?

Andere Theoretiker und andere Experimentalphysiker versuchten, es besser zu machen. Aber sie kamen alle zum gleichen Ergebnis: Die Neutrinos mussten auf dem Weg von der Sonne zur Erde verschwunden sein. Also fingen die Theoretiker an, neue Ideen zu entwickeln, was mit den Neutrinos geschehen sein könnte. Eine davon schien anfangs etwas schräg: die Neutrinos könnten „oszillieren“. Wir wissen, dass es drei Arten von Neutrinos gibt: Elektron-Neutrinos, Myon-Neutrinos und Tau-Neutrinos. Was, wenn die sich ineinander umwandeln könnten? Genau das meint die Oszillationstheorie. Denken wir mal über die Folgen für unseren Alltag nach. Stellen wir uns vor, Maxwell würde seinen Kühlschrank mit 20 Flaschen Apfelsaft füllen. Am nächsten Tag findet er dort eine Flasche Orangensaft, die er nie gekauft hat. Einige Tage später ist die Hälfte des Apfelsaftes zu Orangensaft geworden, bald darauf alles. Gut, solche „Zauberei“ kennen wir auch von schimmelndem Essen. Nichts Besonderes. Aber: Maxwells Orangensaft wird sich bald darauf wieder in Apfelsaft zurückverwandeln. Und dann geht die Sache von vorne los. Die Oszillation von Neutrinos kann man mathematisch im Rahmen der Quantenmechanik beschreiben, die Teilchen durch Wellen darstellt. Die Wellenfunktionen von Neutrinos oszillieren dabei ähnlich wie zwei gekoppelte Pendel, wie in (↗[3]) schön dargestellt ist.



Durch Neutrinooszillation lässt sich nicht nur erklären, wieso Elektron-Neutrinos fehlen. Es müssten auch neue Myon-Neutrinos aus Richtung der Sonne kommen. Um das zu zeigen, musste man noch bessere Experimente aufbauen. Das Homestake konnte nichts über die Richtung der Neutrinos sagen. Aber andere Experimente, so wie das Super-Kamiokande Experiment, konnten das. Seine Größe, und die 32 Millionen Liter Wasser darin sehen beeindruckend aus, oder?



Das Super-Kamiokande Experiment war in der Tat in der Lage, Neutrinooszillation zu beweisen. Andere Experimente zogen nach. Und sie schauten nicht nur auf die Oszillation von Elektron- und Myon-Neutrinos. Auch Experimente mit Myon- und Tau-Neutrinos wurden gebaut und laufen zum größten Teil immer noch.

Experimente zur Neutrinooszillation sind sehr interessant, da man über die Messung von Oszilla-

↗[3]:https://de.wikipedia.org/wiki/Neutrinooszillation

tionen zwischen allen drei Typen auch die Masse von Neutrinos messen kann. Bisher weiß man nur, dass Neutrinos eine Masse haben müssen. Aber der genaue Wert fehlt noch. Hierfür muss man, wie gesagt, alle drei Neutrinotypen untersuchen. Starke Neutrinoquellen sind – neben der Sonne – Kernkraftwerke und Teilchenbeschleuniger. Letztere produzieren vor allem Myon-Neutrinos. Ihre Oszillation zu Tau-Neutrinos wird – unter anderem – vom OPERA Experiment untersucht. Es steht unter dem Gran Sasso Gebirge im Herzen Italiens und misst Neutrinos, die vom Teilchenbeschleuniger SPS kommen, 730 km entfernt im Forschungszentrum CERN in der Schweiz, kommen. Bei 730 km Entfernung sind die Menschen oft überrascht und fragen nach dem unglaublich langen Tunnel, durch den die Neutrinos fliegen. Aber wir wissen ja: Neutrinos reagieren kaum, daher kann man sie einfach durch Erde und Felsen zwischen CERN und Gran Sasso schicken.



Schneller als Licht?

Das beeindruckendste Ergebnis von OPERA war eine Messung, die eigentlich nur als kleines Beiwerk geplant war. Nur zum Spaß wollten die Experimentatoren die Geschwindigkeit der Neutrinos messen. Indem man weiß, zu welcher Zeit die Neutrinos starten und wie lange die Strecke von dem SPS Beschleuniger bis zum OPERA Experiment ist, kann man die Geschwindigkeit sofort ausrechnen. Gesagt, getan! Und das Ergebnis, das 2011 veröffentlicht wurde, war … sagen wir … schockierend. Die gemessene Geschwindigkeit war höher als die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum. Nehmen wir an, dass Einsteins Spezielle Relativitätstheorie stimmt, ist das absolut unmöglich. Das Ergebnis war also ein großes Problem für eine Theorie, die sich vorher jahrzehntelang bewährt hat. Dennoch begann keine physikalische Revolution. Nicht, weil Physiker so ungerne Revolutionen starten. Das Problem: Viele glaubten nicht an das Ergebnis. Nicht einmal die meisten Wissenschaftler des OPERA Experiments. Aber sie versuchten ihr Bestes, um Fehler in ihren Messungen und Berechnungen zu finden. Alle ihre Uhren hätten mit der Präzision von Nanosekunden synchronisiert sein sollen. Waren sie auch. Kein Fehler wurde gefunden, zumindest nicht bis März 2012. Es war ein kleines Detail, das ein falsches Ergebnis verursacht hat. Ein Grund, der so simpel war, dass man nicht weiß, ob man lachen oder weinen soll. Schauen wir mal, ob du es errätst: Wenn jemand sagt: „Mein Monitor geht nicht an“, was sagst du ihm dann zu allererst? Richtig: „Ist der Stecker auch richtig drin?“. Es war eines der Glasfaserkabel, das nicht richtig an einem PC angeschlossen war. Während bei einem klassischen Kupferkabel eine direkte Verbindung zwischen Stecker und Steckdose bestehen muss, kann das Licht aus dem Glasfaserkabel auch eine kleine Lücke überwinden. Deswegen hat man den Fehler nicht sofort bemerkt. Aber durch die kleine Lücke gab es Reflexionen und daher ein falsches Flugzeitsignal. Das führte dann zu einer Fehlmessung der Neutrinogeschwindigkeit. Also merke dir: Wenn du mal Einsteins Formeln widerlegen willst, schau vorher, ob du auch alle Kabel richtig angeschlossen hast!

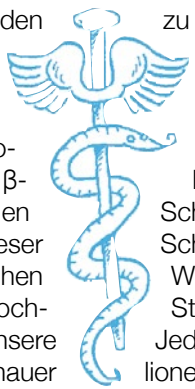



Abenteuer in der STRAHLENTHERAPIE
TIEF IM GEWEBE IM ZELLULÄREN METROPOLIS LÄSST TUMOR-TROLL DAS MUTIERTE BÖSE AUF DIE UNSCHULDIGEN EINWOHNER LOS...
IN EINEM RESTAURANT UM DIE ECKE ISST UNSERE HELDIN, PROTON-GIRL GERADE ZU MITTAG...
MEINE QUARKS SCHÜTTELN SICH! ...JEMAND BRAUCHT HILFE!
BEHALT DAS WECHSELGELD, BABY, DIE PFLICHT RUFT!
WARTE! DEINE WAFFE!
DU NENNST ES WAFFE... ICH NENNE ES BEHANDLUNG.
BALD...
NIMM DAS, TUMOR-TROLL!
AAAHG!! IONISIERENDE STRAHLUNG...
MEIN KRYPTONIT!

Strahlentherapie

Teilchen auf einer Mission gegen das Böse

Eine geladene Kanone kann ernsten Schaden anrichten. Von ihrer Kugel getroffen zu werden kann ganz schön übel sein. Wir sollten aber wissen, dass wir täglich von Unmengen natürlicher „Kugeln" getroffen werden: von ionisierender Strahlung. Sie besteht aus α-, β- und γ-Strahlen (↗[1]) von radioaktiven Zerfällen (↗[2]) sowie Röntgenstrahlen. Wir sind von dieser Strahlung umgeben, die aus allen möglichen Quellen kommt. So treffen zum Beispiel hochenergetische Teilchen aus dem Weltall auf unsere Atmosphäre und erzeugen dort Teilchenschauer (↗[3]). Außerdem enthalten beispielsweise Bananen radioaktives Kalium. Und aus der Erdoberfläche tritt radioaktives Radon-Gas aus. Wir nennen alle diese Strahlungsarten „natürliche Strahlung".



Kaputte Zellen

Wenn ionisierende Strahlung durch ein Material saust, hat sie oft genug Energie, um den Atomen ihre Elektronen herauszuschlagen und sie zu geladenen Ionen zu machen. In Teilchendetektoren (↗[4]) nutzt man dieses Prinzip, um Strahlung sichtbar zu machen, indem die geladenen Teilchen zu einem elektrischen Signal konvertiert werden. Wenn ionisierende Strahlung nicht auf einen Detektor trifft, sondern auf Zellen unseres Körpers, können die geladenen Ionen chemische Verbindungen zerstören oder ungewohnte Reaktionen verursachen. Was dann passiert, hängt von der Art der Strahlung und von ihrer Dosis ab. Als Dosis bezeichnet man die Menge an Energie, die die Strahlung in unseren Körper pro Masse hineinbringt. Ist die Dosis nicht zu hoch – speziell die Dosis pro Zeit – hat unser Körper Reparaturmechanismen, um die Schäden zu beheben.

Wenn die DNA einer Zelle beschädigt ist, kann diese – abhängig von der Schwere des Schadens und der Dosis der Strahlung – den Schaden beheben, absterben oder mutieren. Wird die DNA repariert, ist alles in Ordnung. Stirbt die Zelle, ist es auch nicht allzu schlimm: Jede Minute sterben in unserem Körper Millionen von Zellen und werden ersetzt. Wird die DNA aber nicht korrekt repariert, enthält sie falsche Baupläne für das Verhalten der Zelle. Wir nennen das dann „Mutation". In wenigen Fällen führen Mutationen zu Veränderungen, die nicht unbedingt schlecht sind. Während der Evolution des Menschen ist das schon oft passiert. Aber die meisten Mutationen führen zu einer Verschlechterung des Zustands des Menschen und im schlimmsten Fall ist eine Mutation sogar die Quelle für einen Tumor, so dass Krebs entsteht.

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurden sich die Menschen der schädlichen Wirkung von ionisierender Strahlung bewusst. Die Benutzung von Röntgenstrahlung, die in der medizinischen Diagnostik immer beliebter wurde, erlaubte einen Einblick in das Innere unseres Körpers. Die Menschen erkannten aber auch, dass zu viel Röntgenstrahlung eine negative Auswirkung auf den Körper hat: Man verlor seine Haare und bekam Verbrennungen auf der Haut. Heute wissen wir, dass wir uns gegen zu viel ionisierende Strahlung schützen müssen.

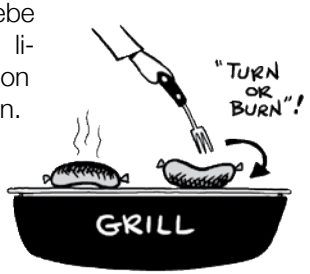
↗[1]: *„Alpha-, Beta- und Gammastrahlen" auf Seite 175*
↗[2]: *„Radioaktive Zerfälle" auf Seite 171*
↗[3]: *„Kosmische Höhenstrahlung" auf Seite 261*
↗[4]: *„Teilchendetektoren" auf Seite 257*

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_66

Aber können wir ganz allgemein sagen, dass ionisierende Strahlung böse ist? Was wäre denn, wenn ionisierende Strahlung gezielt die Zellen in unserem Körper zerstört, die man ohnehin nicht mag? Könnte man so etwas machen? Ja, können wir! Zellen, die niemand mag, sind z.B. Tumorzellen. Wir können sie loswerden, indem wir sie mit Dosen bestrahlen, die so hoch sind, dass sie sich selbst nicht mehr reparieren können. Eine solche Art der Tumorbehandlung nennt man „Strahlentherapie“ und ist oft eine gute Alternative oder Ergänzung zu einem chirurgischen Eingriff.

Strahlung gegen das Böse

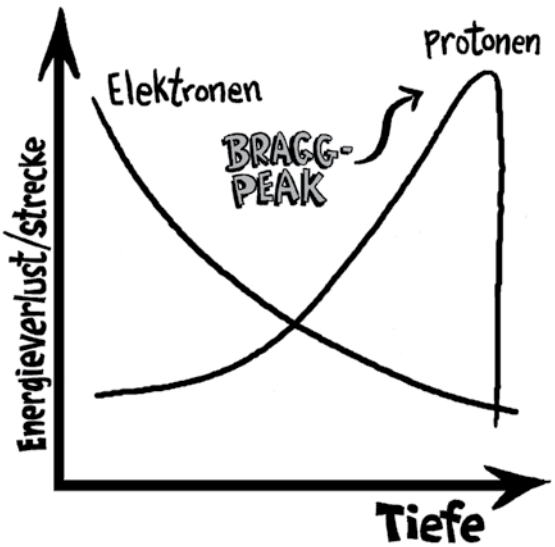
Frühe Versuche der Strahlentherapie fingen mit Röntgenstrahlung an. In den 1950ern wurde sie von radioaktiven γ-Quellen aus Kobalt oder Cäsium ersetzt, die in Kernreaktoren erzeugt wurden. Verglichen mit Röntgenstrahlung hatten diese γ-Strahlen eine höhere Energie und konnten damit tiefer in menschliches Gewebe eindringen. In den 1970ern erlaubten lineare Beschleuniger (↗[5]) die Produktion von sehr hochenergetischen Elektronen. Die Patienten konnten dann entweder direkt mit diesen Elektronen oder aber mit γ-Strahlung, die der Elektronenstrahl erzeugt, bestrahlt werden. Solche Linearbeschleuniger nutzt man heute noch. Auf eine Sache muss man aber aufpassen: Die Zellen, die bestrahlt werden sollen, sind meist von gesunden Zellen umgeben, denen man in der Regel keinen Schaden zufügen möchte. Die Menge an Energie, die von der Strahlung ins Gewebe eingebracht wird, nimmt exponentiell mit der Tiefe im Gewebe ab. Das bedeutet, dass die meiste Energie von der Oberfläche direkt aufgenommen wird. Doch die zu bestrahlenden Zellen liegen ja meist weiter innen. Wir kennen das Problem, wenn wir ein Grillwürstchen mit Wärmestrahlung behandeln. Lassen wir die Wurst einfach auf dem Grill, ist sie bald außen verbrannt und innen noch kalt. Maxwell kennt eine Lösung dafür: Würstchen drehen! Während der Strahlentherapie dreht man jetzt nicht den Menschen, aber die Strahlungsquelle (ist angenehmer für den Patienten). Dadurch wird die Strahlenbelastung für das gesunde Gewebe außen gering gehalten und es bewirkt gleichzeitig, dass sich in der Mitte nach einer vollen Umdrehung aus allen Richtungen etwas aufsummiert hat. Dieses Verfahren ist okay für viele Therapien, aber nicht für alle. Ein Gehirn ist beispielsweise zu sensibel, als dass man es einfach von allen Seiten bestrahlen könnte. Und eine Operation ist in diesen Fällen auch oft schwierig. Was also könnte man tun? Darauf gab es lange Zeit keine gute Antwort. Aber dann hatten Ärzte und Physiker einen Einfall. Er basiert auf dem Wissen, dass leichte und schwere geladene Teilchen Energie auf unterschiedliche Art ins Gewebe einbringen.





Während Elektronen und Photonen – die man in der klassischen Strahlentherapie benutzt – die meiste Energie an der Oberfläche abgeben, ist die Situation bei schweren Teilchen, z.B. Protonen, anders: Sie hinterlassen den Großteil ihrer Energie nicht an der Oberfläche, sondern an einem Punkt tief im Gewebe. Diesen Punkt nennt man „Bragg-Peak“.

↗[5]: *„Teilchenbeschleuniger“ auf Seite 253*



Wenn Physiker den Protonenstrahl des Teilchenbeschleunigers LHC stoppen wollen, schießen sie ihn auf einen Kohlenstoffzylinder, der 7 Meter lang und von 700 t Eisen und Beton umgeben ist. Während eine herkömmliche Gewehrkugel an der Oberfläche des Blocks hängenbleiben würde, bleibt die „Protonenstrahlkugel“ erst tief im Material stecken und hinterlässt das Loch auch erst mittendrin. Die Tiefe des Punktes, an dem der Strahl stecken bleibt, hängt von der Position des Bragg-Peaks und der wiederum von der Energie der Protonen ab. Denken wir wieder an den Tumor im Inneren des Gehirns. Indem man einen Protonenstrahl benutzt und die Position des Bragg-Peaks genau berechnet, kann man dann ein Gehirn bestrahlen, ohne es zu schädigen; mit Ausnahme des Tumors im Inneren.

Beschleuniger im Krankenhaus

Und es gibt tatsächlich viele Krankenhäuser, die so etwas tun! Diese Art der Strahlentherapie nennt man auch „Hadronentherapie“. Sie ist ziemlich teuer und kompliziert, aber für viele Menschen die einzige Behandlungsmöglichkeit. Man braucht zwar einen eigenen Teilchenbeschleuinger, aber der muss nicht gleich so groß wie der LHC sein, schließlich ist das menschliche Gehirn auch nicht so schwer wie 700 Tonnen Blei und Beton. Im Gegensatz zu Elektronen und Photonen geben Protonen und Ionen ihre Energie in einem genau definierten Bereich ab. Indem man die exakte Form und Position eines Tumors kennt, kann man ihn mit dem Protonenstrahl treffen. Senkrecht zur Strahlrichtung bewegt man ihn mit Elektromagneten. So funktioniert auch die Ablenkungen eines Elektronenstrahls in einem alten Röhrenfernseher. Indem man die Energie des Strahls verändert, kann man den Tumor dann auch in der Tiefe abrastern. So bestrahlt man ihn dreidimensional, ohne das umliegende Gewebe zu sehr zu belasten.



Mehr und mehr Kliniken bauen sich ihre eigenen Beschleuniger, um Patienten mit Elektronen, Photonen, Protonen und Ionen zu bestrahlen. Das ist ein schönes Beispiel dafür, dass Teilchenphysik, die normalerweise nur den reinen Erkenntnisgewinn anstrebt, indem sie die Struktur der Materie aufdeckt, zu einer medizinischen Anwendung geführt hat. Physiker, Biologen und Ärzte forschen noch immer in diesem Bereich. Eine Methode, die gerade untersucht wird (↗[6]), ist die Bestrahlung mit Antiprotonen. Neben dem Vorteil des Bragg-Peaks haben sie noch den Effekt der Annihilation von Materie und Antimaterie, bei dem zusätzliche Energie frei wird. Das erhöht den Schaden (auf die bösen Zellen), ist aber auch schwerer zu kontrollieren. Schauen wir mal, was uns die Zukunft bringt!

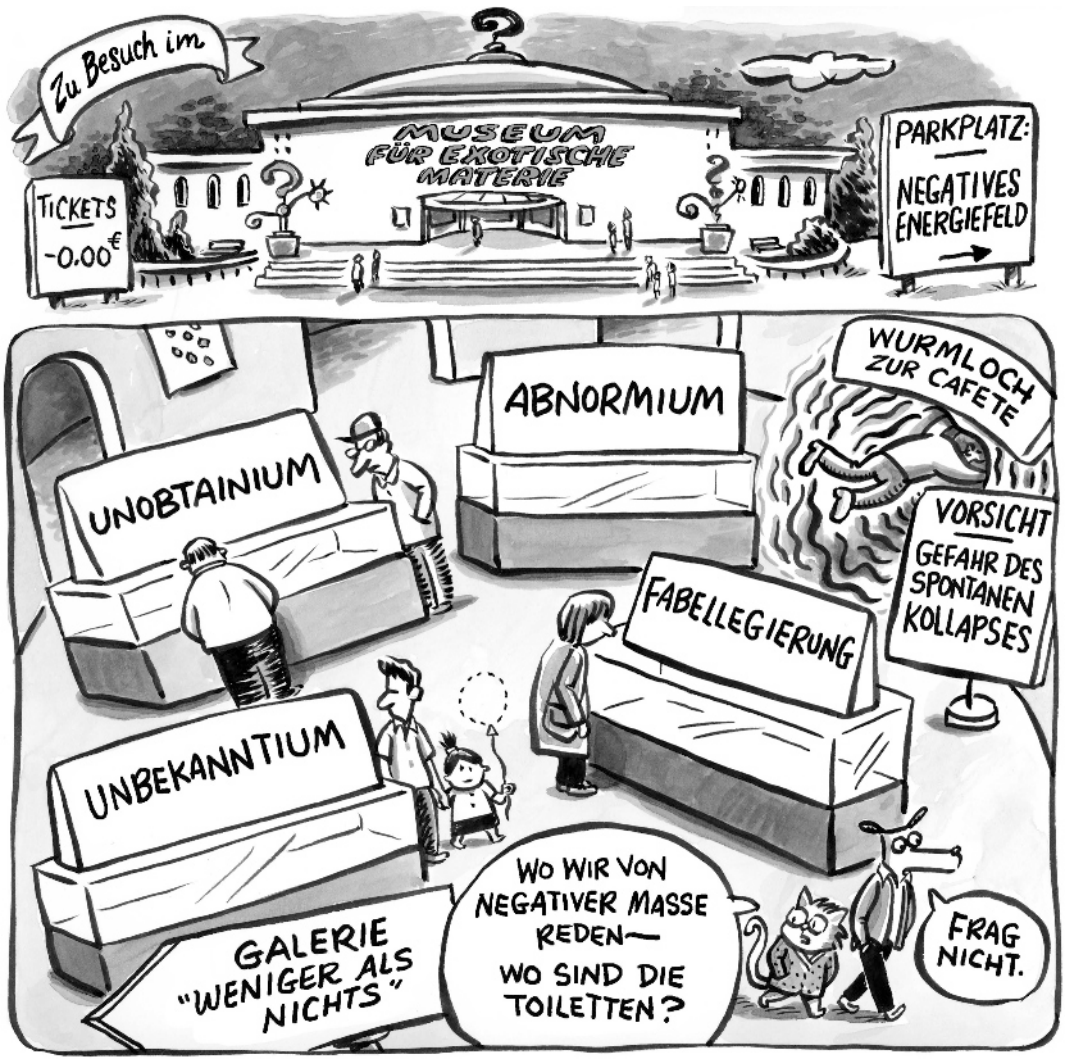
↗[6]: http://home.web.cern.ch/about/experiments/ace


EXOTIC MATTER
TACHYONS
FASTER THAN LIGHT
EXTRA DIMENSIONS
STRING THEORY
QUANTUM GRAVITY
MANY WORLDS
PLANCK STARS
BLACK HOLE EVAPORATION
BEFORE THE BIG BANG
THE END OF THE UNIVERSE

V – Jenseits der Grenzen unseres Wissens

„Physik ist eine unglaubliche Wissenschaft – sie versucht nichts Geringeres als die grundlegenden Prinzipien unseres Universums zu verstehen. Wie funktionieren die Dinge auf fundamentaler Ebene? Die Physik hat es sich zur Aufgabe gemacht, diese Frage zu beantworten. Und wir sind schon weit gekommen: Mit unserem Wissen zur Kosmologie, zur Teilchenphysik und zur Quantenmechanik haben wir ein ziemlich gutes Verständnis von den Grundregeln, die das Verhalten von Raum, Zeit und Materie bestimmen. Einige Phänomene sind vielleicht immer noch ziemlich kompliziert (die Wettervorhersage, zum Beispiel), doch von den Grundregeln, nach denen sie funktionieren, hat man schon eine recht gute Vorstellung.

Das klingt vielleicht schon ganz gut, aber wir sind noch lange nicht fertig! In unserem Wissen über die Grundlagenphysik klaffen noch einige große Lücken. Sei es die Vereinigung von Quantentheorie und Relativitätstheorie, die Frage nach der Möglichkeit, Wurmlöcher als Abkürzungen für lange Reisen im Universum zu konstruieren, die Frage nach dem, was vor dem Urknall passierte oder die Interpretation des seltsamen Verhaltens der Quantenmechanik – es gibt einige Dinge, die wir noch nicht wissen. Vielleicht sind irgendwann in der Zukunft die Themen im folgenden, letzten Abschnitt des Buches ein alter Hut. Aber im Moment gehören sie zu den interessantesten, noch ungelösten Rätseln für die Physiker unserer Zeit.“


Zu Besuch im
MUSEUM FÜR EXOTISCHE MATERIE
TICKETS -0.00€
PARKPLATZ: NEGATIVES ENERGIEFELD
WURMLOCH ZUR CAFETE
ABNORMIUM
UNOBTAINIUM
VORSICHT GEFAHR DES SPONTANEN KOLLAPSES
FABELLEGIERUNG
UNBEKANNTIUM
GALERIE "WENIGER ALS NICHTS"
WO WIR VON NEGATIVER MASSE REDEN— WO SIND DIE TOILETTEN?
FRAG NICHT.

Exotische Materie

Anders als alles, was wir kennen

„Materie“ – mit diesem Wort meinen Physiker normalerweise alles, woraus wir bestehen. Selbst alle Arten von Energie (↗1) oder Quantenfeldern gehören dazu. Im Wesentlichen alles, was nicht Raum und Zeit ist (wobei es scheint, dass die Unterscheidung von Raum, Zeit und Materie nicht immer so klar war, wie heute, ↗2).

All diese verschiedenen Arten von Materie, so verschieden und speziell sie auch sind, teilen sich einige gemeinsame Eigenschaften. Im Wesentlichen haben sie alle eine Masse, die größer als Null ist (oder besser gesagt, nicht kleiner als Null. So wie etwa bei den Photonen).



Insbesondere werden elektromagnetische Wellen auch als „Materie“ bezeichnet, selbst wenn die Elementarteilchen, die Photonen, aus denen sie bestehen, überhaupt keine Masse besitzen (↗3). Selbst Antimaterie (↗4) wird in diesem Zusammenhang als „Materie“ bezeichnet, was zugegebenermaßen ziemlich verwirrend ist.

Das Universum ist voller Materie – egal, ob wir all ihre Eigenschaften kennen oder nicht: Dunkle Materie (↗5) beispielsweise ist für uns mysteriös, aber wahrscheinlich immer noch normale Materie. Sollten wir eines Tages supersymmetrische Teilchen (↗6) finden, würden wir auch sie als normale Materie bezeichnen. (Übrigens: Während dieses Buch geschrieben wird, sieht es nicht gut für die SUSY aus. Trotz größtem Aufwand hat es noch niemand geschafft, am LHC ein supersymmetrisches Teilchen zu finden.)

Es gibt noch eine andere Sache in diesem Buch, bei der wir über Teilchen mit einer Masse gesprochen haben, die nicht größer oder gleich Null ist: Teilchen mit imaginärer Masse, Tachyonen genannt (↗7). Aber wahrscheinlich existieren sie nicht – sie würden das Universum entweder sofort kollabieren lassen oder sie würden sofort zerfallen und das Universum mit einem konstanten Quantenfeld füllen, das einen bestimmten Wert hat und dessen Fluktuationen um diesen Wert sich wieder wie normale Teilchen verhalten würden (und genau das passiert auch mit dem Higgs-Feld, ↗8).

Materie: immer positive Energie?

Aber hier möchten wir lieber über eine andere Form von exotischer Materie sprechen, nämlich über solche mit negativer Masse oder – gleichbedeutend – negativer Energie. Interessanterweise

↗1: *„E = mc²“ auf Seite 241*
↗2: *„Zeitstrahl unseres Universums“ auf Seite 100*
↗3: *„Licht“ auf Seite 7*
↗4: *„Antimaterie“ auf Seite 221*
↗5: *„Dunkle Materie“ auf Seite 137*
↗6: *„Supersymmetrie“ auf Seite 303*
↗7: *„Tachyonen“ auf Seite 295*
↗8: *„Der Higgs-Mechanismus“ auf Seite 245*

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_67

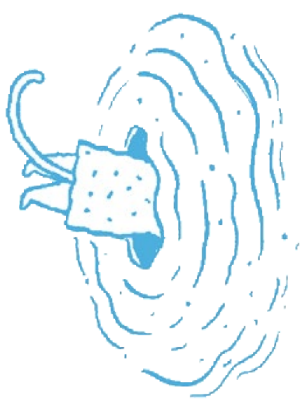
klingt das nicht nur ziemlich verrückt, sondern es ist auch durch keine grundlegenden Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie und der Quantenmechanik verboten. Bei den meisten physikalischen Gesetzen geht es um den Austausch von Energie. Energie wird an der einen Stelle erhöht und an anderer um den gleichen Betrag verringert. Negative Energie würde an dieser Stelle keine Probleme bereiten (anders als die imaginären Werte der Tachyonen) – die Energieerhaltung (↗[9]) würde immer noch überall gelten, auch wenn die Energie an manchen Stellen negativ wäre. Die Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie besagen, dass „die Energiedichte Raum und Zeit krümmt". Hierbei wird aber keine Aussage darüber getroffen, ob vor der Energiedichte ein Minus steht oder nicht. Wenn dort eines wäre, würde die entsprechende Krümmung von Raum und Zeit zugegebenermaßen ziemlich seltsam aussehen. Aber hey, na und? Lösungen der Gleichungen mit negativer Energiedichte würden Warp-Blasen ermöglichen, die eine Reise mit Überlichtgeschwindigkeit erlauben (↗[10]), oder Wurmlöcher, die verschiedene Orte (oder Zeiten) im Universum mit Abkürzung verbinden (↗[11]). Es klingt, als bräuchten wir exotische Materie, um Reisen quer durchs All möglich zu machen (oder zumindest nicht quälend langwierig).



Nochmal: nichts dergleichen ist explizit durch die Gleichungen verboten – es ist nur so, dass bis heute niemand auch nur irgendeine Art solch einer exotischen Materie beobachtet hat.

Die Energie des Vakuums absenken: der Casimir-Effekt

Es gibt jedoch ein paar Tricks, die man anwenden kann, um im Raum Bereiche mit negativer Energiedichte zu erzeugen. Der bekannteste davon ist der sogenannte Casimir-Effekt: Platziere zwei große Metallplatten sehr nah beieinander, so dass nur ein schmaler Spalt zwischen ihnen bleibt. Nun, du erinnerst dich vielleicht, dass leerer Raum wegen der Quantennatur der Materie nicht wirklich leer ist – er ist vielmehr mit Unmengen von Teilchen gefüllt, die aus dem Nichts erzeugt werden und in Sekundenbruchteilen auch wieder verschwinden. Das passiert überall, ständig. Welche Energie die erzeugten Teilchen haben, ist rein zufällig – alle Energien kommen vor.



Aber zwischen den beiden Platten gibt es nur sehr wenig Platz für die Teilchen. Da jedes Teilchen auch eine Welle ist (↗[12]), und die Wellenlänge größer wird, je geringer die Energie ist, passiert etwas Spannendes: In dem Raum zwischen den Casimir-Platten erscheinen Teilchen aus dem Nichts und verschwinden auch wieder ins Nichts, aber nur oberhalb einer bestimmten Energie! Für

↗[9]: *„Erhaltungssätze" auf Seite 51*
↗[10]: *„Warp-Antrieb" auf Seite 299*
↗[11]: *„Wurmlöcher" auf Seite 291*
↗[12]: *„Welle-Teilchen-Dualismus" auf Seite 147*

Teilchen mit geringerer Energie ist nicht genug Platz – wenn die Wellenlängen größer sind, als der Platz zwischen den Platten, können sich die Wellen nicht bilden. Also finden effektiv zwischen den Platten weniger Quantenfluktuationen statt als außerhalb der Platten, da einige Teilchen nicht erzeugt werden können. Zwischen den Platten ist die mittlere Energiedichte also geringer als außerhalb (wo einfach nur ein Vakuum besteht).



Nun könnte man sagen, dass dies ja Betrug sei: Es ist nicht so, als wäre irgendwo eine negative Energiedichte. Das Vakuum hat eine sehr, sehr hohe Energiedichte und zwischen den Platten herrscht immer noch eine sehr hohe Energiedichte, nur ist sie eben etwas geringer als außerhalb. Aber, wie wir schon gesagt haben: Bei physikalischen Gesetzen geht es immer nur um Energiedifferenzen. Würden wir die Energie von allen Dingen im Universum einfach um einen bestimmten Betrag erhöhen, würden sich die physikalischen Gesetze nicht ändern! Wenn wir die Energie des Vakuums auf Null setzen, dann hätte der Casimir-Effekt tatsächlich einen Bereich mit negativer Energiedichte erzeugt!

Exotische Materie – mysteriös, aber nicht unmöglich!

Man sollte anmerken, dass dieser Effekt auch tatsächlich gemessen wurde: Im Labor konnte man feststellen, dass eine Kraft zwischen den Platten wirkt. Es ist in der Tat das Vakuum selbst, das die Platten zusammendrückt – ein sicheres Zeichen dafür, dass zwischen den Platten eine geringere Energiedichte herrscht als außerhalb!

Traurigerweise ist dieser Effekt viel zu klein, um damit ein stabiles Wurmloch zu erzeugen. Und selbst wenn doch, müssten die Raumschiffe, die dort hindurch fliegen wöllten, sehr schmal sein: Für eine signifikant starke Kraft zwischen den Platten dürfen diese nur einige Hundert Atome voneinander entfernt sein. Wenn das mal keine unrealistischen Erwartungen an schlanke Astronautenkörper sind!

Wie auch immer: neben diesen Quantentricks wissen wir nicht, ob es überhaupt irgendwo im Universum eine Art exotischer Materie gibt, die eine negative Energiedichte hat. Neben dem ziemlich seltsamen physikalischen Verhalten dieser Art von Materie (sie hätte zum Beispiel einen negativen Druck) ist es relativ schwierig, vorherzusagen, wie diese exotische Materie mit normaler Materie reagieren würde. Könnten wir ein Stück von ihr überhaupt in der Hand halten? Schwer zu sagen. Falls nicht, könnten wir sie wahrscheinlich nicht einmal sehen – sie würde nicht mit elektromagnetischer Strahlung wechselwirken. In diesem Zusammenhang wäre sie wahrscheinlich der Dunklen Materie recht ähnlich, nur eben mit gegenteiligem Effekt bei der Gravitation.

So seltsam das auch klingt: wir können nicht ausschließen, dass exotische Materie wirklich existiert. Das Universum hat es in der Vergangenheit immer wieder geschafft, uns zu überraschen und zu beeindrucken, und es wird damit sicherlich nicht aufhören. Vielleicht können wir irgendwann in ferner Zukunft über ein Wurmloch, das mit exotischer Materie offen gehalten wird, einen Supermarkt in der Andromeda-Galaxie besuchen.


VOR dem URKNALL
ein Thema für endlose Spekulationen
ERMÜDET VON ENDLOSEN SPEKULATIONEN, ENTSCHEIDEN SICH ERWIN UND MAXWELL, DIE EREIGNISSE BEIM URKNALL PERSÖNLICH ZU ERLEBEN.
ZEIT-MASCHINE
WIR SIND AN DER SINGULARITÄT VORBEI — WO SELBST DIE ZEIT ANHÄLT.
...UND UNSERE ZEIT-MASCHINE AUCH, WIE'S AUSSIEHT.
ALARM! SYSTEM-FEHLER!
AAH! WIE KOMMEN WIR JETZT ZURÜCK IN DIE ZUKUNFT!?
WIR SENDEN EIN S.O.S SIGNAL...
GEFAHR STRAHLUNG
...EINES SO EXPLOSIV UND STARK, DASS ES NICHT ÜBERHÖRT WERDEN KANN!
ABER ES WIRD MILLIARDEN JAHRE DAUERN, BEVOR DAS LICHT IRGENDJEMANDEN ERREICHT...
"...UND SELBST DANN WERDEN SIE ENDLOS SPEKULIEREN, WAS DAS LICHT BEDEUTET UND WO ES HERKAM."
HALT DIR DIE OHREN ZU, ERWIN. GLEICH GIBT'S EINEN LAUTEN KNALL!
GEF STRA

Vor dem Urknall

Ein Rückprall?

Seit etwa 100 Jahren ist bekannt, dass sich das Universum ausbreitet. Nachdem dies zunächst von Erwin Hubble beobachtet und auch bekannt gemacht wurde, beschrieb Albert Einstein später die Theorie dazu: Solange das Universum nicht vollkommen frei von Materie und Strahlung ist (was bei unserem sicherlich nicht der Fall ist, sonst könnte auch niemand diese Worte lesen), besagt die Allgemeine Relativitätstheorie, dass es sich entweder ausdehnen oder zusammenziehen muss.

Die Gleichungen machen auch noch etwas anderes unmissverständlich klar: Das Universum breitet sich nicht schon immer aus – in der Vergangenheit muss es einen Punkt gegeben haben, an dem alles begann. Zur Zeit hat unsere genaueste Messung diesen Moment – als das gesamte Universum zu einem winzigen Punkt mit unglaublicher Dichte und Hitze komprimiert war – auf ca. 13,8 Milliarden Jahre v.Chr. bestimmt (↗[1]).

Vor 13,8 Milliarden Jahren: der Urknall

Jetzt könnte man fragen: Was passierte denn vor 13,8 Milliarden Jahren? Bedauerlicherweise wissen wir nicht mal, ob diese Frage überhaupt Sinn ergibt.

Wenn man sich die Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie anschaut, kann die Frage wirklich nicht beantwortet werden. Alle physikalischen Größen, so wie Dichte, Temperatur oder Raum-Zeit-Krümmung, gehen gegen unendlich, je näher wir dem Moment kommen, den wir Urknall nennen. Vor diesem Moment gibt es keine Zeit und kein Universum. Zu fragen, was vor dem Urknall war, ist wie die Frage: „Was ist nördlich vom Nordpol?“ Nördlich vom Nordpol gibt es nicht, denn der Nordpol ist per Definition der nördlichste Punkt der Erde (natürlich kann man auch fragen „Was liegt über dem Nordpol?“, doch das ist nicht die gleiche Frage). Wenn die Form des Universums durch die Allgemeine Relativitätstheorie vollständig beschrieben ist, dann gibt es aus dem gleichen Grund auch nichts „vor dem Urknall“.

Man darf das jetzt nicht falsch verstehen: So komisch das klingt, es könnte einfach etwas sein, womit wir leben müssen. Für den menschlichen Verstand, der sich über Millionen von Jahren entwickelt hat, und jetzt über die Welt in bestimmten Kategorien nachdenkt, ist das sicherlich eine Pille, die schwer zu schlucken ist. Wir sind einfach so sehr daran gewöhnt, in den Begriffen Ursache und Wirkung zu denken, dass der Gedanke an einen ersten Punkt in der Zeit nahezu unerträglich wird.

Aber wenn die Physik in einer solchen Situation noch funktioniert und mit allen Beobachtungen, die wir im Universum machen, übereinstimmt, könnte es eine Formulierung sein, mit der wir einfach unseren Frieden schließen müssen, auch wenn unser Verstand das nicht begreifen kann. Wieso sollte die Natur schließlich auch so nett sein, sich so zu verhalten, dass sie sich ein paar Nachfahren von haarigen Primaten auf einem kleinen Planeten am Rand einer unwichtigen Galaxie einfach vorstellen können?

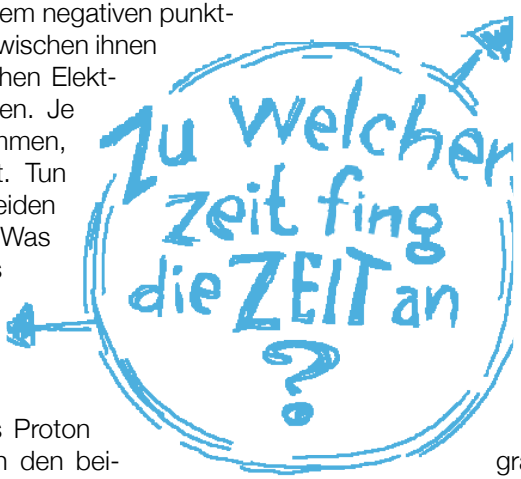
↗[1]: *„Der Urknall“ auf Seite 97*
↗[2]: *„Quantengravitation“ auf Seite 283*

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_68

Die Allgemeine Relativitätstheorie erzählt nicht die ganze Wahrheit

Wir haben allerdings einige Gründe dafür, anzunehmen, dass uns die Allgemeine Relativitätstheorie nicht die ganze Wahrheit erzählt. Einer von ihnen ist, dass die Gleichungen keine Quanteneffekte berücksichtigen. Eine Vereinigung von Quantentheorie und Allgemeiner Relativitätstheorie (↗[2]) sollte eine viel realistischere Beschreibung von dem abgeben, was vor 13,8 Milliarden Jahren los war. Die Physiker denken das, weil die Quantentheorie dazu tendiert, Singularitäten zu vermeiden, die in der klassischen Physik nur so herumtoben.

Hier ist eine Analogie: Denken wir mal an die klassische Beschreibung eines Protons und eines Elektrons, einem positiven und einem negativen punktförmigen Teilchen. Die Kraft zwischen ihnen kann man über den klassischen Elektromagnetismus gut berechnen. Je näher sich die beiden kommen, desto stärker wird die Kraft. Tun wir mal so, als würden die beiden direkt nebeneinander liegen. Was dann? Natürlich würde das Elektron sich auf das Proton zubewegen. Und jetzt kommt der springende Punkt: Nach einigen Sekunden, wenn das Elektron das Proton trifft, wird die Kraft zwischen den beiden unendlich groß! Wenn das passiert, brechen die klassischen Gleichungen zusammen, die die Bewegung des Elektrons und des Protons beschreiben, und man kann damit nicht mehr ausrechnen, was nach diesem Moment passiert. Sie können mit Unendlichkeiten einfach nicht umgehen.



Natürlich ist das nicht das, was im wirklichen Leben passiert, denn Elektronen und Protonen sind keine punktförmigen Teilchen. Das ist eine gute Näherung, wenn die beiden weit voneinander entfernt sind, aber sobald sie sich sehr nahe kommen, werden die Quanteneffekte wichtig. Die Quantenmechanik sagt uns aber, dass es aufgrund der Heisenbergschen Unschärferelation einen kleinsten Abstand zwischen Elektron und Proton gibt. Ein Proton und ein Elektron mit genau dieser Entfernung nennen wir übrigens Wasserstoffatom!

Quantengravitation – die Rettung?

Viele Physiker vermuten, dass die Art, wie physikalische Größen beim Urknall unendlich groß werden, die gleiche ist wie bei unserem Beispiel mit dem Proton und dem Elektron: Es ist einfach nicht das, was in Wirklichkeit geschieht – würde man die Quantentheorie mit ins Boot holen, hätte man ein vollständigeres Bild der Wahrheit.

Es gibt noch einen weiteren Grund zu glauben, dass beim Urknall keine wirkliche Singularität vorhanden war: Es gibt Modelle der Quantengravitation (↗[2]), in denen eine Art Heisenbergsche Unschärferelation für Entfernungen vorkommt – sie besagen also, dass es eine minimale Länge (in etwa die Planck-Länge, ca. 10^{-35} m) geben muss. Aber wenn es eine minimale Entfernung gibt, gibt es auch ein minimales Volumen. Und da „Dichte“ gleich „Masse pro

Volumen“ ist, bedeutet das, dass es eine maximale, physikalisch mögliche Dichte gibt! Sehr, sehr groß (die sogenannte „Planck-Dichte“, ungefähr so viele Sonnen, wie es Atome im Universum gibt, in einen Liter gepresst), aber eben nicht unendlich. Nun, wenn die physikalischen Größen beim Urknall nur sehr, sehr groß, aber nicht unendlich sind, gibt es eine Chance, dass tatsächlich etwas vor dem Urknall passiert ist!

Der große Rückprall: Verbindung zweier Universen

Die Quantengravitationstheorie befindet sich noch immer in der Entwicklung. Vor einigen Jahren jedoch konnten Forscher der Penn State University die Gleichungen des neuesten Modells der Quantengravitation anwenden, um auszurechnen, was während des Urknalls vor sich ging. Sie fanden etwas Überraschendes heraus: Wenn man mit einem Universum beginnt, das sich durch die Gravitationskraft langsam zusammenzieht, wird es das weiter tun, bis die Dichte des Universums in etwa so groß wird wie die Planck-Dichte. Und dann wird die Gravitation plötzlich abstoßend. Die Quantenfluktuationen des Gravitationsfeldes werden groß, so dass das Universum nicht kollabiert – stattdessen macht es eine Phase der … nennen wir es „Quantenseltsamkeit“ durch. Es wird zusammengeknäult wie ein Blatt Papier. Allerdings wird es, und das ist jetzt wichtig, nicht zu einem einzigen Punkt komprimiert! Nach dieser Phase fängt das Universum an, sich auszubreiten – und das ist das verrückte – genau so, als hätte gerade ein Urknall stattgefunden.



Obwohl viele Details noch immer unklar sind, legt uns das nahe, dass es statt eines Urknalls einen „Ur-Rückprall“ gegeben hat. Vor der Expansion unseres Universums könnte es die Kontraktion eines anderen gegeben haben.

Könnte man also fragen: „Was ist vor 13,9 Milliarden Jahren passiert?“ Leider nicht ganz. Während der Phase der Quantenseltsamkeit, die das Urknäuel des ersten mit dem Urknall des zweiten verbunden hat, sind Raum und Zeit wirklich sehr, sehr, sehr, sehr quantenhaft.

Es macht leider keinen Sinn, zu fragen, wie lange diese Phase dauerte. Um das zu tun, bräuchte man einen mehr oder weniger normalen Fluss der Zeit – doch Raum und Zeit waren während dieser Phase so sehr zusammengeknäult, dass man nicht wirklich sagen kann, wie lange es von der Kontraktion zur Expansion gedauert hat. Es scheint, als sei das Ur-Rückprallszenario noch viel seltsamer als das Urknallszenario!


QUANTEN-GRAVITATION und DIE UNGLAUBLICHE SCHRUMPFMASCHINE
DA SIE KEIN MIKROSKOP FANDEN, DAS ZUR BEOBACHTUNG DER QUANTENGRAVITATION AUSGEREICHT HÄTTE, BEGABEN SICH ERWIN UND MAXWELL SELBST AUF EINE FANTASTISCHE REISE...
SCHRUMPFMASCHINE
WAHNSINN! WIR SIND AUF 10^{-35} m GESCHRUMPFT!
SCHAU MAL! EIN RAUMZEIT-QUANT!
WAS MACHST DU DA? SEI VORSICHTIG!
JUHUUUU!!
RUUUTSCH
OOOH!
PLANCK!
WIR ERZÄHLEN EINFACH, DASS MIR EIN QUANTENAPFEL AUF DEN KOPF GEFALLEN IST.

Quantengravitation

Was ist die Quantentheorie der vierten Kraft?

An vielen Stellen in diesem Buch haben wir betont, dass es vier fundamentale Kräfte gibt: Gravitation (↗[1]), Elektromagnetismus (↗[2]), die Starke (↗[3]) und die Schwache Wechselwirkung (↗[4]). Weil ihre Reichweiten so unglaublich kurz sind, spielen die beiden letzten nur eine Rolle in der Quantenwelt der allerkleinsten Teilchen. Die ersten beiden kennen wir aus der klassischen Welt, wo sie zwischen Planeten, Stühlen, Magneten, Katzen usw. agieren. Aber all diese Objekte sind aus Elementarteilchen aufgebaut, also sollten die Kräfte zwischen großen (makroskopischen) Objekten das Resultat von Kräften zwischen kleinen (mikroskopischen) Objekten sein, oder?

Gravitonen: nicht so einfach, wie es scheint

Bei der elektromagnetischen Kraft wissen wir ziemlich genau, wie sie funktioniert. Auf mikroskopischer Ebene werden Photonen zwischen geladenen Teilchen ausgetauscht. Wenn viele Photonen in eine Richtung fliegen, bilden sie eine makroskopische elektromagnetische Welle (↗[2]). Aber wie schaut es mit der Gravitation aus? Nun, wir wissen auch, dass es in unserer klassischen Welt Gravitationswellen gibt (↗[1]). Und Physiker haben postuliert, dass es auch „Quanten des Gravitationsfeldes“ geben könnte, die „Gravitonen“ getauft wurden. In den 1970er Jahren versuchten sie, eine Quantentheorie der Gravitonen zu formulieren, die nach dem gleichen Prinzip wie die gut bekannte und gut geprüfte Quantentheorie der Photonen aufgebaut ist. Aber leider fand man heraus, dass das so nicht geht. Die Formeln ergaben keinen Sinn und lieferten unphysikalische Ergebnisse. Es schien, als wolle die Gravitation als Wechselwirkung nicht so recht in den Rahmen einer Quantentheorie passen.



Bis heute haben wir keine Quantentheorie der Gravitation. Aber wir haben einige gute Ideen, wie wir weitermachen könnten. Man hat mittlerweile auch eine Vermutung, wieso die ursprüngliche Idee nicht funktioniert hat: Sie behandelte Gravitonen genauso wie Photonen – als kleine Teilchen, die durch einen unveränderlichen Raum wandern. Raum und Zeit waren die Bühne, und Teilchen die Schauspieler. Für die anderen drei Wechselwirkungen mag das funktionieren, aber bei der Gravitation ist die Raumzeit selbst der Schauspieler – Massen krümmen und verändern die Raumzeit, die wiederum den Teilchen sagt, wie sie sich bewegen müssen. Im Schaustück des Universums sollten also Raumzeit und Teilchen beide als Schauspieler gesehen werden.

Kein Urknall ohne Quantengravitation

Alles klar, die ursprünglichen Ideen der Quantentheorie schlugen fehl – wie wäre es nun, ein paar Experimente durchzuführen und zu schauen, was sich ergibt? Wenn man einzelne Photonen messen kann, sollte das auch mit einzelnen Gravitonen gehen, oder? Nun, hier gehen die Probleme weiter – es ist unglaublich schwierig, Naturphänomene zu finden, bei denen es nicht schon ausreicht, allein die Quantenphysik oder die Allgemeine Relativitäts-

↗[1]: *„Gravitationswellen“ auf Seite 133*
↗[2]: *„Licht“ auf Seite 7*
↗[3]: *„Die Starke Wechselwirkung“ auf Seite 233*
↗[4]: *„Die Schwache Wechselwirkung“ auf Seite 237*

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_69

theorie anzuwenden, um sie zu verstehen. Das liegt daran, dass sich die Quantentheorie um ganz kleine Dinge, wie Elementarteilchen, und die Allgemeine Relativitätstheorie um ganz große Dinge, so wie Sterne und Galaxien, kümmert. Eine Situation, wo man beide Theorien bräuchte, wäre in der Tat eine sehr extreme.



Es gibt allerdings durchaus solche Phänomene: Im Inneren eines schwarzen Lochs (↗[5]) ist die Masse eines ganzen Sterns auf die Größe von weniger als einem Atom komprimiert. Beim Urknall (↗[6]) war sogar die Masse des ganzen Universums auf einen winzigen Punkt komprimiert, bevor es expandierte. Da bei diesen Phänomenen sowohl die Relativitätstheorie als auch die Quantentheorie eine Rolle spielen, bräuchte man eine Theorie der Quantengravitation, um sie zu verstehen. Haben wir aber leider nicht. Daher wissen wir auch nicht, was genau beim Urknall passierte oder in der Singularität eines schwarzen Lochs vor sich geht. Und es ist leider auch nicht so, als könne man einfach in einen Supermarkt gehen, ein schwarzes Loch kaufen und dann experimentieren. Andererseits, ist vielleicht auch besser so.

Quantisierte Raumzeit: Plancklänge und Planckzeit

Obwohl wir das Quantenverhalten der Gravitation nicht kennen, gibt es ein gutes Argument dafür, dass es als Konsequenz eine kleinste, nicht-verschwindende Länge geben muss: Nehmen wir an, du wolltest eine sehr kleine Entfernung auflösen. Hierfür bräuchtest du ein Photon mit einer Wellenlänge, die mindestens so kurz wie die Strecke ist, die du vermessen willst. Einerseits sagt jetzt die Quantentheorie, dass so ein Photon eine sehr hohe Energie haben muss. Andererseits sagt die Relativitätstheorie, dass sich, wenn man nur genug Energie in einem kleinen Punkt konzentriert, die Raumzeit krümmt und sich ein schwarzes Loch (↗[5]) bildet. Und hinter dem Ereignishorizont eines schwarzen Lochs kann man nichts sehen.

Eine schnelle Rechnung ergibt, dass genau das passiert, wenn man Entfernungen messen möchte, die kleiner als die Plancklänge von $l_{Planck} = 10^{-35}$ m sind. Mit anderen Worten: Kein Experiment kann kürzere Entfernungen messen. Es ist der kleinste Abstand, der physikalisch Sinn ergibt. Auf eine ähnliche Art kann man die kürzeste physikalisch sinnvolle Zeitspanne ausrechnen: die Planckzeit von $t_{Planck} = 10^{-43}$ m. Wenn du jemals von Zenons Paradoxon von Achilles und der Schildkröte gehört hast, weißt du, dass die Planckzeit ein Jahrtausende altes Problem lösen würde (↗[7])!

Ein guter Kandidat: Schleifenquantengravitation

Ein Versuch, die Gravitation mit den drei anderen Grundkräften zu vereinigen, ist die Stringtheorie (↗[8]). Obwohl hier Raum und Zeit noch immer als starre Bühne behandelt werden, gibt es noch Hoffnung, dass man mit ihr das Problem der unsinnigen Formeln, das die Physiker in den 70er und 80er Jahren hatten, lösen kann. An dieser Stelle möchten wir aber über ein anderes Modell sprechen, das in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen hat: Schleifenquantengravitation. Eine ihrer Grundideen besteht darin, dass der Raum nicht ein Kontinuum aus Punkten ist, sondern aus Raumquanten (auch Knoten genannt) besteht, die zu einer Art großem Netzwerk verbunden sind. Ein Materieteilchen

↗[5]: *„Schwarze Löcher“ auf Seite 91*
↗[6]: *„Der Urknall“ auf Seite 97*
↗[7]: https://de.wikipedia.org/wiki/Zenons_Paradoxien_der_Vielheit
↗[8]: *„Stringtheorie“ auf Seite 307*



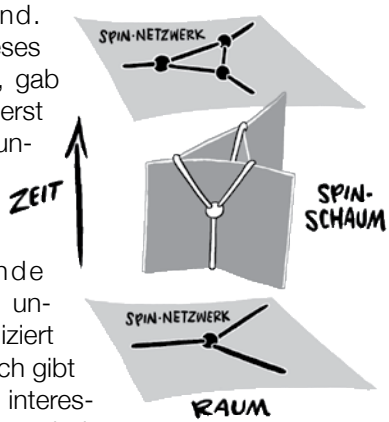
kann sich nicht einfach irgendwo befinden, sondern immer nur auf einem der Knoten. Ein Austausch-Boson wiederum kann nur auf den Verbindungslinien zwischen den Knoten sitzen – denn es beschreibt die Kraft, die ein Materieteilchen erfährt, wenn es zwischen den Knoten hin und her springt.

Es lässt sich schwer vorstellen, dass der „Raum, in dem sich Dinge bewegen“ in Wahrheit mehr wie ein „Netzwerk, in dem sich Dinge bewegen“ aussieht. Ein solches Netzwerk (auch „Spin-Netzwerk“ genannt, ↗[9]) sollte man sich nicht irgendwo im Raum vorstellen, denn es ist der Raum selbst! So wie die Atome, die man mit einem starken Mikroskop sehen kann, nicht auf dem Tisch liegen, sondern der Tisch selbst sind!

Raumzeit-Schaum statt Raumzeit?

Als Physiker begannen, die Folgen dieses Modells auszurechnen, waren sie überrascht: die Länge einer Verbindung – mit anderen Worten, die Verbindung zwischen zwei Knoten – kann nicht beliebige Werte annehmen, sondern ist quantisiert. Es gibt also eine kleinste Länge, so wie man es von einer Quantengravitationstheorie erwartet hätte! Und die ist in der Tat in etwa (wenn auch nicht genau) so groß wie die Plancklänge! Das ist zwar ermutigend, allerdings haben wir bisher nur den Raum beschrieben – was ist aber mit der Zeit? Sollten die beiden nicht zusammenhängen? Ja, und das tun sie durchaus: Das dreidimensionale Netzwerk kann sich mit der Zeit verändern und eine vierdimensionale Struktur bilden, die man Raumzeitschaum nennt. Der Name kommt daher, dass sich die eindimensionalen Linien mit der Zeit zu zweidimensionalen Flächen in der Raumzeit ausdehnen, die sich an mehreren Linien berühren und wie ein Seifenfilm aussehen.

Der Raum stellt sich in dieser Theorie also quantisiert dar, aber ist es auch die Zeit? Ja, das ist sie: Und das, obwohl es so aussieht, als wäre der Raumzeitschaum die kontinuierliche Veränderung eines Netzwerks. Die geometrischen Eigenschaften wie Längen, Flächen und Volumen können sich hierbei nur in diskreten Schritten ändern. Und Zeit ist nichts anderes als die Änderung von physikalischen Eigenschaften. Also ist auch die Zeit diskret. Die Konzepte der Quantenschleifengravitation (in einem fünfminütigen Video auf ↗[10] erklärt) sind faszinierend und recht vielversprechend. Während wir dieses Buch verfassten, gab es aber leider erst sehr wenige Lösungen zu ihren Gleichungen, da sich die dahinterliegende Mathematik so unglaublich kompliziert gestaltet. Dennoch gibt es einige sehr interessante Zwischenergebnisse über das, was beim Urknall (↗[6]) passierte. Also bleibt am Ball!



↗[9]: http://www.einstein-online.info/spotlights/spin_networks
↗[10]: https://youtu.be/_ShR3Zx0y2k



“Unglaublich! Mir war nicht klar, dass Plancksterne auch Planeten besitzen, von einer raumfahrenden Spezies ganz zu schweigen!”

Verdampfung Schwarzer Löcher

Plancksterne statt Singularitäten?

Schwarze Löcher gehören zu den mysteriösesten und furchteinflößendsten Phänomenen des Universums (↗1). Sie verschlingen alles um sich herum, zerfetzen Materie in winzige Teile und frieren das, was bleibt, für alle Ewigkeit ein.

Im innersten Kern eines Schwarzen Lochs scheint es einen Ort zu geben, der allen Gesetzen der Physik trotzt: Er krümmt Raum und Zeit um sich herum so sehr, dass er für den Rest des Universums versteckt hinter einer Barriere sitzt: hinter dem Ereignishorizont. Im Zentrum selbst sind Raum und Zeit so stark gekrümmt, dass alle uns bekannten Gleichungen zusammenbrechen, wenn wir versuchen, diesen Ort zu berechnen – Einsteins Gleichungen besagen, dass dort alles unendlich ist. Und ein Schwarzes Loch wird immer größer und größer, indem es mehr und mehr Materie aus seiner Umgebung verschlingt. Aber stimmt das wirklich? Kann ein Schwarzes Loch niemals sterben? Oder haben diese gierigen Biester eine endliche Lebensdauer, so wie alles andere im Universum auch?



Gleichungen Schwarzer Löcher: unvollständig ohne Quantenphysik!

Alles, was wir über schwarze Löcher wissen, stammt aus der Beschäftigung mit den Gleichungen, die Einstein 1915 veröffentlichte (↗2). Wenn man aber Einsteins Gleichungen folgt, ist die Antwort klar: Es gibt nichts, was ein Schwarzes Loch ungeschehen machen kann – alles, was man tun könnte, um es zu verändern, würde es nur noch größer machen. Aber selbst Einstein hat angemerkt, und das bereits ein Jahr später, 1916, dass seine Gleichungen angepasst werden müssten, um die Effekte der Quantenphysik zu berücksichtigen. Erreicht hat man das allerdings bis zum heutigen Tage noch nicht (↗3).

Doch selbst wenn man noch keine voll ausgereifte Vereinigung der Prinzipien von Raum, Zeit und Quantenphysik hat, gibt es einige Aussagen, die man zu Schwarzen Löchern treffen kann. Im Jahre 1974 dachte ein junger Physiker namens Stephen Hawking intensiv darüber nach und fragte sich: Wenn alles, das den Ereignishorizont überschreitet, verloren geht und zur Gesamtmasse des Schwarzen Lochs (↗4) hinzugezählt wird, ist es dann möglich, die Gesamtmasse zu verringern, indem man etwas mit negativer Energie hineingibt?

Zu dieser Zeit dachte er nicht an exotische Materie (↗5), aber an die Erhaltungssätze der Quantenphysik (↗6) und an Vakuumfluktuationen. Wir wissen, dass leerer Raum – aufgrund der Quantenphysik – eigentlich nie ganz leer ist. Stattdessen bildet das Vakuum ständig Paare von Teilchen und Antiteilchen, die aus dem Nichts kommen, und auch wieder ins Nichts verschwinden. Für einen kurzen Augenblick kann die Energieerhaltung verletzt werden und Masse bzw. Energie wird erzeugt.

↗1: *„Schwarze Löcher“ auf Seite 91*
↗2: *„Die Allgemeine Relativitätstheorie“ auf Seite 121*
↗3: *„Quantengravitation“ auf Seite 283*
↗4: *„$E = mc^2$“ auf Seite 241*
↗5: *„Exotische Materie“ auf Seite 275*
↗6: *„Erhaltungssätze“ auf Seite 51*

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_70

Je größer diese Verletzung, desto kürzer darf sie nur andauern. Auf lange Sicht muss die Energieerhaltung wieder gelten.

Hawking und seine Strahlung

Nun, was würde geschehen, grübelte Hawking, wenn ein Teilchen/Antiteilchen-Paar ganz in der Nähe des Ereignishorizonts erzeugt werden würde, direkt davor? Und was, wenn eines der Teilchen in die eine Richtung – über den Ereignishorizont ins Schwarze Loch hinein – und das andere in die entgegengesetzte fliegen würde? Gemäß Hawkings Berechnungen würde das Teilchen, das das Schwarze Loch verlässt, eine gewisse Energie mit sich tragen. Und weil die Energieerhaltung auf lange Sicht gilt, muss die Energie von irgendwoher kommen. Und das ist der Fall: Sie muss dem Schwarzen Loch entnommen werden!



Die eigentliche Rechnung dazu gestaltet sich nicht sonderlich schwierig (so ist das mit allen revolutionären Ideen: Ein paar Jahrzehnte später schaut man drauf und denkt sich: „Ist doch klar!“), aber die physikalische Interpretation ist nicht ganz so einfach. Eine andere Art, das was geschieht, zu interpretieren, besteht darin, dass sich zwei virtuelle Teilchen, die die Energieerhaltung verletzen dürfen, nach einer gewissen Zeit in zwei reelle Teilchen umgewandelt haben. Aber reelle Teilchen müssen der Energieerhaltung gehorchen, und da das sich vom Schwarzen Loch entfernende Teilchen eine positive Energie besitzt, muss das ins Schwarze Loch gefallene eine negative Energie besitzen. Somit hat das Teilchen mit seiner negativen Energie effektiv die Masse des Schwarzen Lochs verringert, als es hineingefallen ist.

Es gibt noch eine andere, ebenso passende Interpretation von dem, was passiert: Die Energie, die nötig ist, um das Teilchen/Antiteilchen-Paar zu erzeugen, wird dem Gravitationsfeld des Schwarzen Lochs entnommen. Wenn eines der Teilchen entkommt und das andere nicht, wird nur die Hälfte der geliehenen Energie an das Schwarze Loch zurückgegeben, so dass die Gravitationsenergie – und damit die Masse – des Schwarzen Lochs einen kleinen Energieverlust erleidet.

Verdampfen Schwarze Löcher?

Auf welche Art auch immer du das Ergebnis der Rechnung interpretieren willst: Man ist heutzutage fest davon überzeugt, dass es einen Weg gibt, durch den Schwarze Löcher Energie verlieren können. Mit anderen Worten: Sie sind nicht komplett schwarz! Vielmehr sehen die Teilchen, die von ihm ausgehend wegfliegen, von weitem aus wie eine Art Wärmestrahlung. Dies ist die sogenannte Hawking-Strahlung. Sie lässt es so aussehen, als hätten Schwarze Löcher eine Temperatur, die über dem absoluten Nullpunkt liegt!

Was aber noch viel interessanter ist: Dadurch, dass Schwarze Löcher kontinuierlich Masse verlieren, können sie sich vollständig auflösen. Nun ja, zumin-

dest prinzipiell. Ein Schwarzes Loch mit der Größe der Sonne hat eine Temperatur von ein paar Nanokelvin – das ist viel kälter als die Temperatur der kosmischen Hintergrundstrahlung (↗[7]). Das Nachleuchten des Urknalls füllt also den Massenverlust der Schwarzen Löcher schneller auf, als ihn die Hawking-Strahlung verursachen kann. Dennoch: Würde man irgendwo im Universum einem Schwarzen Loch begegnen, das nur ein paar Kilo wiegt, würde es viel schneller Energie abstrahlen und schon nach ein paar wenigen Wochen verdampft sein. Ein solches Schwarzes Loch könnte jedoch nicht auf normale Art erzeugt worden sein: Schwarze Löcher, die aus toten Sternen entstehen, sind mindestens zwei- bis dreimal so schwer wie die Sonne (↗[8]).



Übrigens: Bevor der Teilchenbeschleuniger LHC im Jahre 2010 in Betrieb ging, hatten einigen Menschen Angst, dass seine Energie groß genug wäre, um winzige Schwarze Löcher zu erzeugen, die dann wachsen und irgendwann die Erde zerstören würden. Nun, im Jahre 2016, als dieses Buch geschrieben wurde, ist die Welt immer noch da. Aber selbst, wenn der LHC das eine oder andere kleine Schwarze Loch erzeugt haben sollte, wäre es mit aller Wahrscheinlichkeit so leicht gewesen, dass es in Sekundenbruchteilen durch Abgabe von Hawking-Strahlung wieder verdampft wäre.

Alle Berechnungen von Hawking gelten aber nur für sonnengroße Schwarze Löcher. Bei den ganz kleinen ist der Verdampfungsprozess noch völlig unklar. Man kann abschätzen, dass die Hawking-Strahlung stärker wird, je kleiner das Schwarze Loch ist. Aber was ganz am Ende passiert, insbesondere in dem Moment, in dem das Schwarze Loch verschwindet, ist etwas, von dem wir zurzeit noch keine Ahnung haben. Es gibt jedoch einige (hochspekulative) Ideen aus dem Bereich der Quantengravitationsforschung.

Planck-Sterne und Weiße Löcher

Die eine besagt, dass an Stelle einer Singularität im Zentrum des Schwarzen Lochs ein sogenannter Planck-Stern entsteht. Man nimmt an, dass dieser ein sehr eng begrenzter Bereich ist, in dem Raum und Zeit besonders quantenartig sind. Die Krümmung ist sehr stark, aber nicht unendlich. Der Kontraktion unter der Gravitation stellen sich quantenmechanische Effekte entgegen – in erster Linie die Heisenbergsche Unschärferelation – die das Loch stabil halten.

Ein schrumpfendes Schwarzes Loch (welches bereits sehr klein sein müsste, etwa mit der Masse der Erde), hätte einen immer kleiner werdenden Ereignishorizont, während der Planck-Stern im Inneren immer weiter wachsen würde, je mehr Masse in das Schwarze Loch fällt. Wenn Ereignishorizont und Planck-Stern sich plötzlich träfen, würde die gesamte Energie, die im Inneren des Schwarzen Lochs gefangen ist, auf einen Schlag über eine gewaltige Explosion frei werden. Diese Explosion würde dem gleichen, was die Allgemeine Relativitätstheorie als ein „Weißes Loch“ beschreibt. Im Moment ist das hochspekulativ, aber die Forscher des Institute de Physique Théorique in Marseille behaupten, dass von Astronomen in der Tat Signale aufgezeichnet wurden, die einem Weißen Loch sehr ähnlich seien. Ob es überhaupt irgendwelche Weißen Löcher im Universum gibt oder nicht, ist im Moment noch unklar. Aber es gibt einige interessante Möglichkeiten. Vielleicht sind Schwarze Löcher letztendlich doch nicht unsterblich.

↗[7]: *„Die kosmische Hintergrundstrahlung“ auf Seite 105*
↗[8]: *„Supernovae“ auf Seite 83*


MIR EGAL, OB ES EINE ABKÜRZUNG IST. DAS AUSSEHEN VON DIESEM DING GEFÄLLT MIR ÜBERHAUPT NICHT.
EINSTEIN-ROSEN BRÜCKE

Wurmlöcher

Abkürzungen durch Raum und Zeit

Nach Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie (↗1,2) ist es unmöglich, dass sich irgendetwas schneller als das Licht bewegt. Das klingt deprimierend – der Traum, in weit entfernte Ecken unserer Galaxie flitzen zu können, wird so wahrscheinlich niemals wahr.

Nun, zumindest nicht, wenn Raumschiffe auf herkömmliche Art reisen. Denn die Allgemeine Relativitätstheorie erlaubt einige unkonventionelle Reisewege. Mit diesen könnte man durchaus weit entfernte Planeten und Sterne in kürzester Zeit erreichen und somit den Science Fiction Traum von Zeitreisen möglich machen.



Eine dieser Möglichkeiten ist ein Wurmloch. Ein Wurmloch ist wie ein Tunnel, der zwei Teile des Universums verbindet. Obwohl diese beiden Regionen Lichtjahre voneinander entfernt sein können, könnte der Tunnel selbst nur ein paar Meter lang sein. Mit gemütlicher Geschwindigkeit könnte ein Raumschiff durch den Tunnel fliegen und dabei Strecken im All zurücklegen, für die man auf herkömmliche Art tausende von Jahren benötigen würde.

Solche Wurmlöcher können in der Allgemeinen Relativitätstheorie existieren, weil die Raumzeit gekrümmt werden kann (↗3). Stell dir ein Blatt Papier vor, zusammen mit einer Ameise, die darauf herumwuselt. Wenn die Ameise nun von einem Ende des Blattes zum anderen gelangen will, könnte sie einfach gemütlich über die gesamte Breite des Papieres laufen. Das würde einige Zeit dauern. Aber jetzt stell dir vor, dir Ameise könnte das Papier irgendwie falten, und zwar genau so, dass das weit entfernte Ende genau über dem Punkt liegt, an dem sie sich anfangs befindet. Jetzt müsste die Ameise nur noch ein Loch in das Papier knabbern und hindurchschlüpfen. Sie würde auf der anderen Seite herauskommen und hätte dabei eine ganze Menge Zeit gespart! Übrigens: Alle anderen Bewohner des Papierblatts würden nicht bemerken, dass ihre gesamte Welt gekrümmt wurde – die intrinsische Krümmung des Blattes würde sich bei einem solchen Vorgang nicht ändern (↗3).

Alles klar, die Allgemeine Relativitätstheorie verbietet also nicht die Existenz von Wurmlöchern. Aber wie würden sie überhaupt aussehen? Und wie könnte man eins bauen?

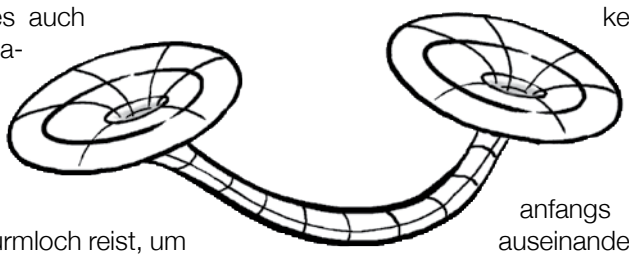
Die Einstein-Rosen-Brücke: Schwarze und Weiße Löcher

Der erste Gedanke eines möglichen Tunnels, der zwei verschiedene Orte des Alls verbindet, ist eigentlich schon recht alt: Die sogenannte Einstein-Rosen-Brücke ist eine solche theoretische Möglichkeit, eine Brücke zwischen zwei Orten im Raum herzustellen (oder gar zwischen zwei Universen). Sie ist eine Einbahnstraße: Der Eingang sieht genauso aus wie ein Schwarzes Loch (↗4). Nur, dass

↗1: *„Relativität von Raum und Zeit“ auf Seite 117*
↗2: *„Die Allgemeine Relativitätstheorie“ auf Seite 121*
↗3: *„Gekrümmte Raumzeit“ auf Seite 125*
↗4: *„Schwarze Löcher“ auf Seite 91*

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_71

ein Teilchen, das hineinfliegt, nicht in eine Singularität fällt, sondern an einem anderen Ort des Raumes durch etwas, das man „Weißes Loch“ nennt, wieder auftaucht (so, wie nie etwas dem Ereignishorizont eines Schwarzen Lochs entkommen kann, kann nie etwas näher als eine bestimmte Entfernung an ein Weißes Loch gelangen). Doch wären nicht nur die Gravitationskräfte in seinem Inneren unglaublich stark (Raumschiffe würden wahrscheinlich sofort zerquetscht), sondern sie wären zudem noch unglaublich instabil! Der Grund dafür ist, dass Weiße Löcher so besonders zerbrechlich sind (daher hört man auch so wenig von ihnen – wann immer eines existieren würde, wäre es auch gleich schon wieder kollabiert, ↗[5]). Die Zeit, die es dauert, bis ein solches Wurmloch kollabiert, ist viel, viel kürzer als die Zeit, die es dauert, bis ein Teilchen durch das Wurmloch reist, um von einem Ort zum anderen zu gelangen.



Das Morris-Thorn-Wurmloch: eine machbare Alternative?

Am Ende des zwanzigsten Jahrhunderts erkannte der Physiker Kip Thorne zusammen mit seinem Studenten Mike Morris, dass es eine Möglichkeit gibt, Wurmlöcher zu erzeugen, die nicht nur stabil sind, sondern auch in beide Richtungen durchquert werden können. Das einzige Problem mit dieser Art von Wurmloch ist, dass man hierfür exotische Materie (↗[6]) im Inneren des Wurmlochs bräuchte, um es stabil zu halten.

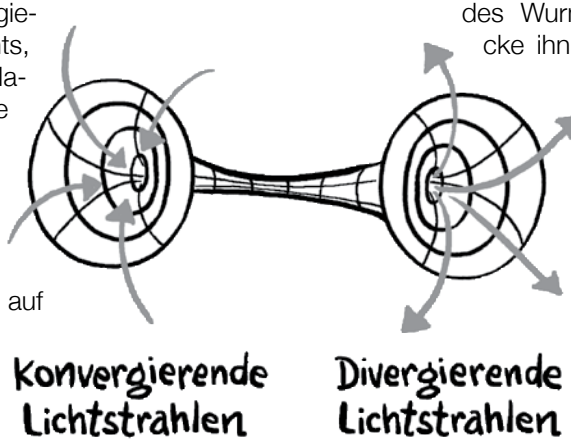
Und hier kommt das Problem mit allen Arten von Wurmlöchern: Irgendwo in ihrem Inneren brauchen sie eine Stelle, an der die Gravitation abstoßend wird, statt anziehend. Der Grund ist folgender: Stellen wir uns vor, dass ganz viele Lichtstrahlen aus verschiedenen Richtungen am Eingang des Wurmlochs zusammenlaufen. Wenn sie das Wurmloch durchquert haben, müssen sie am Ende wieder auseinanderlaufen und in verschiedene Richtungen verschwinden. Irgendwo innerhalb des Wurmlochs müssen die zusammengelaufenen Lichtstrahlen voneinander abgestoßen werden. Mit anderen Worten: die Raumzeit im Wurmloch müsste so gekrümmt sein, dass es effektiv so aussieht, als würde die Gravitation abstoßend wirken. Die genaue Begründung ist etwas komplizierter, weil Licht, das z.B. im Gravitationsfeld eines Sterns gebrochen wird, auch anfangs zusammen- und dann auseinanderlaufen kann, ohne dass der Stern an irgendeiner Stelle eine abstoßende Gravitation hat. Aber solch ein Stern hätte einen Brennpunkt, da er wie eine Gravitationslinse funktioniert (↗[7]), und ein Wurmloch hätte keinen. Zusammen mit dem auseinanderlaufenden Licht bedeutet das für das Wurmloch, dass es eine abstoßende Gravitation besitzen muss.

Exotische Materie und abstoßende Gravitation

Alle uns bekannten Formen der Materie verursachen allerdings immer nur eine solche Krümmung der Raumzeit, die zu einer gravitativen Anziehung führt (selbst Antimaterie! ↗[8]). Das liegt daran, dass alle Materie, die wir kennen, eine positive Masse besitzt (oder zumindest eine positive Energie, ↗[9]).

↗[5]: *„Verdampfung Schwarzer Löcher“ auf Seite 287*
↗[6]: *„Exotische Materie“ auf Seite 275*
↗[7]: *„Gravitationslinsen“ auf Seite 129*

Die Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie sind diesbezüglich eindeutig: Will man eine Region mit abstoßender Gravitation haben, benötigt man etwas mit negativer Energiedichte. Nun, es gibt nichts, das uns die Existenz von Materie mit negativer Masse verbietet. Man kann in der Tat durch Quanteneffekte die Energiedichte in einer eng begrenzten Region sogar unter Null bringen (das passiert aber leider auf eine Art, die für Wurmlöcher nutzlos ist). Es ist nur so, dass wir noch nie so etwas gesehen haben, was der Grund dafür ist, dass Physiker diese Art von hypothetischer Materie als „Exotische Materie“ bezeichnen.



Hätten wir irgendwie eine solche exotische Materie, wäre es theoretisch möglich, Wurmlöcher zu konstruieren, die verschiedene Regionen des Raumes miteinander verbinden. Es gibt sogar denkbare Varianten, in denen ein durchfliegendes Raumschiff der Region mit exotischer Materie fernbleiben könnte.

Zeitreisen mit Wurmlöchern: nur einen Ritt durchs All entfernt!

Übrigens: Wenn du ein Wurmloch hättest, das zwei weit entfernte Regionen des Alls verbindet, könntest du daraus auch in null-komma-nix eine Zeitmaschine bauen! Alles, was man dafür braucht, ist eine Wurmloch-Version des Zwillingsparadoxons (↗[1]): Stell dir vor, du hättest ein Wurmloch mit zwei Eingängen, die recht nahe beieinander liegen. Wenn du einen Eingang betrittst, tauchst du ein paar Meter weiter auf der anderen Seite wieder auf. Alles, was du jetzt noch tun musst: einen der Eingänge des Wurmlochs verschieben – stecke ihn in ein Raumschiff, das mit fast Lichtgeschwindigkeit fliegt, angetrieben mit einem herkömmlichen Triebwerk. Fliege mit dem Raumschiff weit weg und komm nach ein paar Stunden wieder zurück. Für einen der Eingänge des Wurmlochs, nämlich der im Raumschiff, sind nur ein paar Stunden vergangen. Für den anderen aber, der zurückblieb, sind aufgrund der relativistischen Zeitdilatation einige Jahre vergangen!

Nun verbinden die beiden Eingänge des Wurmlochs nicht nur unterschiedliche Orte, sondern auch unterschiedliche Zeiten: Wenn du eine Seite betrittst, verschwindest du und tauchst kurz darauf auf der anderen wieder auf. Da das Ganze aber eine Zeitmaschine ist, kannst du auf einer Seite des Wurmlochs ein paar Jahre bevor du es auf der anderen betreten hast, wieder auftauchen. Natürlich bietet das Ganze genug Stoff für zahlreiche Zeitreise-Paradoxa. Vielleicht ist es aber unterm Strich ganz gut, dass wir noch keinen Weg gefunden haben, Wurmlöcher zu bauen.



↗[8]: *„Antimaterie“ auf Seite 221*
↗[9]: *„E = mc²“ auf Seite 241*


ICH RUFE DICH VON MEINER NEUEN TACHYON iPHONE APP AN, DIE DU LETZTEN DONNERSTAG ERFINDEN WIRST.

Tachyonen

Tatsächlich schneller als Licht

Oft wird behauptet, dass nichts schneller als das Licht sein kann. Aber wieso ist das so? Nun, hat Einstein das nicht behauptet? In Wahrheit besagt Einsteins Relativitätstheorie etwas leicht anderes: nämlich, dass $E = mc^2$, wobei m auch „beschleunigte Masse“ (↗1) genannt wird. Hierbei ist m nicht die eigentliche Masse eines Teilchens, sondern $m = \gamma \cdot m_0$, das Produkt der eigentlichen Masse m_0 (auch Ruhemasse genannt) und dem Gamma-Faktor γ. Es ist gerade dieser Faktor, der Ärger macht, wenn man versucht, Dinge schneller als das Licht zu beschleunigen.

Unendliche Energie: das Erreichen der „Lichtmauer“

Der Wert dieses Gamma-Faktors hängt davon ab, wie schnell sich ein Teilchen bewegt. Denken wir an ein Teilchen, dass sich durch den Raum bewegt. Seine Geschwindigkeit lässt sich in Anteilen β der Lichtgeschwindigkeit ausdrücken. Wenn β Null ist, ist auch die Geschwindigkeit Null, und das Teilchen ruht. Wenn β den Wert Eins hat, bewegt sich das Teilchen exakt mit Lichtgeschwindigkeit. Ausgedrückt durch eine Formel hängt der Wert von γ ausschließlich von β ab, und zwar über

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

Wenn dir der Umgang mit Formeln etwas vertraut ist, erkennst du, was passiert, wenn β von Null zu Eins wird: Der Gamma-Faktor, und damit die Energie, wird größer und größer. Mit anderen Worten: beschleunigt man ein Teilchen auf Lichtgeschwindigkeit, braucht man dafür eine unendlich große Menge an Energie! Und das schafft niemand! Es gibt die gut bekannte Ausnahme für Photonen (und andere Teilchen ohne Masse, ↗2): Sie bewegen sich immer mit Lichtgeschwindigkeit, und man kann sie weder beschleunigen, noch bremsen.

Tachyonen: stets schneller als Licht

Theoretisch gibt es aber noch eine andere Möglichkeit: Wenn die Geschwindigkeit eines Teilchens größer wäre als die Lichtgeschwindigkeit, wäre β größer als Eins. Das würde bedeuten, dass unter der Wurzel in unserer Formel eine negative Zahl stünde. Und die Wurzel einer negativen Zahl ist eine komplexe bzw. imaginäre Zahl! Dieses merkwürdige Teilchen hätte dann zwar immer noch eine wohldefinierte Energie, aber gleichzeitig eine imaginäre Masse! Die imaginäre Einheit der Masse und die Wurzel würden sich gegenseitig aufheben und alles wäre in Ordnung, zumindest von Seiten der Mathematik.

Ein solches Teilchen, das sich mit einer imaginären Masse schneller als Licht bewegt, nennt man „Tachyon“. Es ist nicht wirklich durch Einsteins Relativitätstheorie verboten, aber eines wollen wir klarstellen: Niemand hat jemals so ein Ding gesehen!

Das tachyonische Telefon: sich selbst in der Vergangenheit anrufen

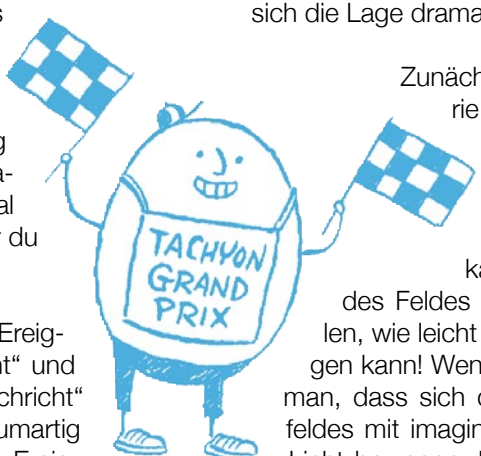
Ein Tachyon, beschrieben durch Einsteins Relativitätstheorie, hätte einige seltsame Eigenschaften. Als erstes wäre es natürlich schneller als Licht. Als

↗1: *„E = mc²“ auf Seite 241*
↗2: *„Der Higgs-Mechanismus“ auf Seite 245*

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_72

nächstes würde es alle möglichen Probleme mit sich bringen (↗[3]). Es würde das Kausalitätsprinzip verletzen, das ein zentrales Element sowohl der Relativitätstheorie als auch der Quantentheorie ist, und das garantiert, dass Ursache und Wirkung hintereinander geschehen.

Mit einem Tachyon jedoch könnte man dieses Prinzip verletzen. Es wäre damit zwar nicht möglich, direkt durch die Zeit zu reisen, aber etwas anderes wäre fast genauso schlimm: Man könnte Informationen in die Vergangenheit übertragen. Und das wäre durchaus recht einfach: Schicke eine Nachricht, die in einem Tachyonenstrahl kodiert ist, an einen Kollegen, der sich sehr schnell von dir weg bewegt. Er muss dann nur die Nachricht mit einem gleichen Typ von Tachyonenstrahl zu dir zurückschicken. Eine kurze Rechnung im Rahmen der Speziellen Relativitätstheorie zeigt: Das Signal würde bei dir ankommen, bevor du es wegschickst.



Der Grund dafür ist, dass die Ereignisse „du sendest die Nachricht“ und „dein Freund empfängt die Nachricht“ ein System bilden, das man „raumartig getrennt“ nennt. Für zwei solche Ereignisse kann man nicht sagen, dass eines definitiv vor dem anderen geschehen ist – es hängt davon ab, wie sich der Beobachter bewegt, der das Ganze beurteilt. Wenn man das weiß, scheint eine andere seltsame Eigenschaft der Tachyonen, verglichen damit, geradezu harmlos: Es wäre unmöglich, ein Tachyon auf weniger als die Lichtgeschwindigkeit abzubremsen. Es hätte sogar weniger Energie, je schneller es sich bewegt. Es wäre leicht, ein Tachyon beliebig schnell zu machen, ganz ohne Aufwand und ohne Limit. Aber um es wieder auf Lichtgeschwindigkeit zu bremsen, bräuchte man unendlich viel Energie. Somit bleibt die Lichtgeschwindigkeit ein unüberwindbares Hindernis – von beiden Seiten!

Quanteneffekte: Die Kausalität ist wiederhergestellt

All diese Überlegungen beziehen die Quantentheorie nicht mit ein. Wenn man aber berücksichtigt, welche Quanteneffekte mit solchen Teilchen zusammenhängen, würde man gleich erkennen, dass sich die Lage dramatisch ändert!

Zunächst sind in der Quantentheorie Teilchen nichts anderes als Schwankungen in einem Quantenfeld (ganz lapidar gesprochen). Eigenschaften wie die Masse des Teilchens kann man direkt in die Steifheit des Feldes umrechnen und auch feststellen, wie leicht man es zum Schwanken bringen kann! Wenn man vorsichtig rechnet, sieht man, dass sich die Anregungen des Quantenfeldes mit imaginärer Masse nicht schneller als Licht bewegen. Eine Welle im Quantenfeld bewegt sich genauso, als wenn das Feld eine herkömmliche, reelle Masse hätte.

… aber das Universum implodiert sofort!

Etwas anderes, total katastrophales würde jedoch passieren. Die Energie einer Welle im Quantenfeld

↗[3]: *„Relativität von Raum und Zeit“ auf Seite 117*

hängt vom Quadrat seiner Masse ab. Wenn die jetzt aber negativ wird, weil die Masse des Feldes imaginär ist, könnte man Energie gewinnen, indem man aus dem Nichts Tachyonen erzeugt! Und eine wichtige Regel in der Teilchenphysik ist, dass alles, was geschehen kann, auch geschehen wird – und da bei diesem Prozess viel Energie frei wird, ist es auch sehr wahrscheinlich, dass der Prozess stattfindet.

Wenn es also ein Quantenfeld mit imaginärer Masse gäbe, und nichts da wäre, um es zu stoppen, würde eine Lawine an Tachyonen aus dem Nichts erscheinen – immer mehr und mehr, die immer mehr und mehr Energie in einer niemals endenden Flut freilassen. Das komplette Universum würde augenblicklich mit mehr und mehr Tachyonen gefüllt. Dieser Prozess wurde „Tachyon-Kondensation“ getauft – und er ist etwas sehr Unerwünschtes. Mit so vielen Teilchen würde das Universum augenblicklich kollabieren (↗[4]). Das ist der Grund, weshalb es keine freien Tachyonen gibt.



Zufälligerweise hatte die ursprüngliche Formulierung der Stringtheorie (↗[5]), die in 26 Dimensionen formuliert wurde, einige Möglichkeiten, Strings so zum Wackeln zu bringen, dass die ihnen entsprechenden Teilchen eine imaginäre Masse hätten. Und aus diesem Grund wurde diese Variante der der Stringtheorie schnell vollständig verworfen – Tachyon-Kondensation war etwas, das keine ernstzunehmende Theorie vorhersagen sollte.

Das unkondensierte Higgs-Teilchen ist ein Tachyon!

Es gibt jedoch eine bekannte Ausnahme: das Higgs-Teichen (↗[2])! Technisch gesehen ist das Higgs-Teilchen ein Tachyon, da in der Formulierung seines Quantenfeldes eine imaginäre Masse auftaucht. Aber wieso ist das Universum noch nicht implodiert? Nun, in der Formulierung des Higgs-Feldes gibt es neben dem Massen-Term noch einen anderen – wenn eine bestimmte Dichte an Higgs-Teilchen erreicht ist, wird es ungünstig, weitere zu produzieren. Aber bis zu diesem Punkt hat das Higgs-Teilchen tatsächlich eine Tachyon-Kondensation durchlaufen! Aus diesem Grund füllt das Higgs-Feld das gesamte Universum aus und gibt allen Teilchen seine Masse: Das Universum ist mit Unmengen an Higgs-Teilchen ausgefüllt, die bei der Entstehung des Universums aus dem Vakuum kondensierten.

Was die Menschen heutzutage die „Masse des Higgs-Teilchens“ nennen, ist nicht der imaginäre Massen-Term in den Formeln. Stattdessen erklärt die (positive) Masse des Higgs-Bosons, die mit ca. 126 GeV ermittelt wurde, wie schwer es ist, neue Higgs-Teilchen zu erzeugen, jetzt, wo das Universum schon voll mit ihnen ist!

↗[4]: *„Die Allgemeine Relativitätstheorie“ auf Seite 121*
↗[5]: *„Stringtheorie“ auf Seite 307*


LIEBE PASSAGIERE, BITTE ENTSCHULDIGEN SIE DIE VERZÖGERUNG – ANSCHEINEND SIND WIR EINER RAUMZEITBLASE BEGEGNET UND HABEN FRANKFURT UM EINIGE MILLIARDEN KILOMETER VERFEHLT...
PASSPORT

Warp-Antrieb

Ein Ritt auf der Welle der Raumzeit

Schneller als Licht zu reisen – es scheint, als gäbe es für uns keine Möglichkeit, weit entfernte Sternensysteme zu erreichen, solange niemand einen Weg findet, eine zentrale Aussage der Allgemeinen und Speziellen Relativitätstheorie (↗[1,2]) zu umgehen: Nichts kann sich schneller als das Licht bewegen.

Raum und Zeit können sich schneller als Licht ausdehnen

Diese Aussage muss eigentlich etwas vorsichtiger formuliert werden: Nichts, was in Ruhe ist, kann so beschleunigt werden, dass es in endlicher Zeit die Lichtgeschwindigkeit erreicht. Aber man könnte Abkürzungen nehmen, um in weit entfernte Regionen des Alls vorzudringen (↗[3]). Gibt es noch andere Möglichkeiten, an der Lichtgeschwindigkeit vorbei zu kommen?

Er gibt hier eine kleine Spitzfindigkeit: Die Höchstgeschwindigkeit gilt nur für Materie, die sich im Raum bewegt – nicht für den Raum selbst. Das bedeutet, dass sich z.B. weit entfernte Galaxien mit einer Geschwindigkeit von uns entfernen, die hundertfach größer als die Lichtgeschwindigkeit ist. Aber es sind nicht die Galaxien, die sich so schnell bewegen. Stattdessen ist es das Universum, das sich zwischen uns und den Galaxien sehr schnell ausdehnt. Und es gibt keine maximale Expansionsgeschwindigkeit des Universums, zumindest soweit wir wissen! Das hat den Physiker Miguel Alcubierre Ende des letzten Jahrhunderts dazu inspiriert, einen Weg zu finden, mithilfe der Ausdehnung und Kontraktion des Raumes ein Raumschiff schneller als das Licht zu bewegen. Nun, er musste später zugeben, dass für ihn die Fernsehserie „Star Trek“ eine wichtige Inspiration war.



Und er hatte Erfolg: Alcubierre fand eine theoretische Möglichkeit, schneller als das Licht zu reisen. Es ist möglich, ein Raumschiff von einem Ort des Universums zu einem anderen mit Überlichtgeschwindigkeit zu bewegen – indem man nicht das Raumschiff an sich bewegt, sondern den Raum vor ihm kontrahiert und dahinter wieder ausdehnt.

Alcubierres Vorschlag: ein echter Warpantrieb?

Die Region dazwischen, in der das Raumschiff sitzt, nennt man Warp-Blase. Darin befindet sich das Schiff vollkommen in Ruhe und spürt in keine Richtung eine Beschleunigung. Astronauten hätten also einen ziemlich bequemen Flug, während ihr Schiff auf einer Welle gekrümmter Raumzeit durch das Universum surft. An der Oberfläche der Warp-Blase herrschen jedoch unglaubliche Gezeitenkräfte, so dass alles und jeder bei dem Versuch, diese Grenze zu überqueren, sofort in Stücke gerissen wird.

Und es kommt noch schlimmer: Die Astronauten werden die schöne Aussicht während des Fluges nicht genießen können. Das Innere und Äußere der Warp-Blase ist „kausal getrennt“. Das

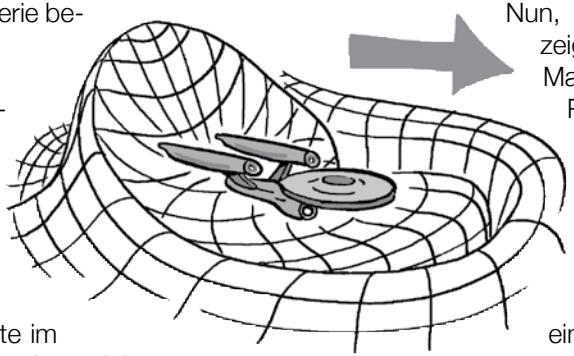
↗[1]: *„Relativität von Raum und Zeit“ auf Seite 117*
↗[2]: *„Die Allgemeine Relativitätstheorie“ auf Seite 121*
↗[3]: *„Wurmlöcher“ auf Seite 291*
↗[4]: *„Schwarze Löcher“ auf Seite 91*

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_73

bedeutet, dass es unmöglich ist, ein Signal von innerhalb der Warp-Blase nach außerhalb zu schicken, oder umgekehrt. Diese beiden Regionen des Universums sind durch einen Horizont getrennt, der dem Ereignishorizont von schwarzen Löchern (↗4) ähnelt. Was bräuchte man also, um ein Raumschiff mit Warpantrieb zu bauen? Könnte das Schiff selbst einfach eine Warp-Blase erzeugen, so wie in der Fernsehserie?

Wieder mit exotischer Materie!

Nun, wie du vielleicht schon geahnt hast, ist es nicht ganz so einfach. Die Art, wie Raum und Zeit in der Warp-Blase gekrümmt sein müssen, ist ziemlich speziell. Die Krümmung ist sogar derart beschaffen, dass man sie mit normaler Materie gar nicht verursachen kann. Vielmehr bräuchte man große Mengen an exotischer Materie (↗5), die eine negative Masse besitzen müsste – oder eine negative Energiedichte, das würde genauso gut funktionieren (↗6). Bedauerlicherweise hat niemand, obwohl es theoretisch möglich wäre, je irgendeine Art von exotischer Materie beobachtet.



Es gibt jedoch Quanteneffekte, die man nutzen könnte, um die Energiedichte in einer kleinen Region im leeren Raum herabzusenken. Der Casimir-Effekt ist eine solche Methode, und er könnte im Prinzip genutzt werden, um eine solche Warpblase zu erzeugen. Erste Abschätzungen sagen aus, dass man für die Konstruktion einer Warpblase, die ein kleines Raumschiff transportieren könnte, allerdings mehr Materie bräuchte, als es im gesamten sichtbaren Universum gibt. Das könnte nun ein kleines Konstruktionsproblem geben – verschiedene Anordnungen mit Warp-Ringen und Warp-Tori, die viel weniger Energie benötigen, wurden daher vorgeschlagen.

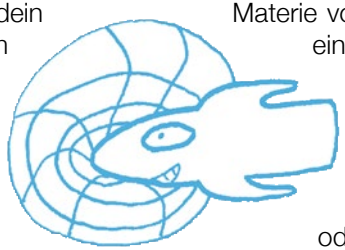
Warp-Fahrbahnen durch das Universum

Das ist aber nicht das größte Problem: die negative Energie müsste sich vor dem Schiff mit einer Geschwindigkeit, schneller als Licht, bewegen, so dass sie Raum und Zeit derart krümmen kann, dass das Schiff sich in ihrem Schlepptau bewegen könnte. Die exotische Materie selbst wäre allerdings nicht in der Warp-Blase, und müsste daher mit konventionellen Methoden reisen. Daher wurde auch schon gesagt, dass man „einen Alcubierre-Antrieb braucht, um einen Ancubierre-Antrieb anzutreiben“. Muss man die Idee, schneller als das Licht zu reisen, damit verwerfen?

Nun, nicht ganz: Es wurde gezeigt, dass man die exotische Materie durchaus schon vor Reisebeginn auf dem Weg des Raumschiffs anordnen kann. Das verfehlt allerdings irgendwie den Zweck der ganzen Sache. Nehmen wir an, du hast dich entschlossen, zu einem weit entfernten Sternensystem zu reisen. Sagen wir, Rigel, etwa 900 Lichtjahre entfernt (↗6). Du müsstest dann, um deine Warp-Fahrbahn von der Erde zu Rigel zu bauen, exotische Mate-

↗5: *„Exotische Materie“ auf Seite 275*
↗6: *„E = mc²“ auf Seite 241*

rie auf dem Weg verteilen – mit herkömmlichen Reisemethoden. Letztendlich würde dich das 900 Jahre kosten (viel länger, wenn dein Raumschiff nicht superschnell ist). Am Ende könntest du zwar blitzschnell von der Erde zu Rigel reisen – aber die Reise muss dafür sehr weit im Voraus geplant sein. Man könnte vielleicht ein Netzwerk an Reiserouten durch das All konstruieren. Aber spontane Reisen ohne vorher gebaute Warp-Fahrbahnen sind nicht drin.



Außerdem: Ist man erst einmal auf der Warp-Fahrbahn unterwegs, gibt es keine Möglichkeit, Halt zu machen und umzukehren. Erinnern wir uns daran, dass das Innere der Warp-Blase vollständig vom Rest des Universums abgetrennt ist. Die Astronauten könnten niemals den Kurs ändern oder sich entscheiden, umzukehren, da sie für die gesamte Zeit der Reise in der Warp-Blase gefangen sind.

Es gibt noch einen anderen Punkt der die Reise mit einem Alcubierre-Antrieb praktisch unmöglich macht – oder zumindest sehr gefährlich: Das Universum ist nicht vollkommen leer. Stattdessen ist es mit Gas, Staub und Strahlung gefüllt, wenn auch nur mit geringer Dichte. Dennoch würde ein Schiff, das mit einem Alcubierre-Antrieb reist, auf seinem Weg durchs Universum jede Menge Materie aufsammeln. Innerhalb der Warp-Blase ist man von seiner Umgebung vollkommen abgeschirmt – bei einem Flug durch einen Stern hätte also der Stern ein Problem, nicht das Schiff! Dennoch würde das Schiff die ganze gesammelte Materie mit sich schleifen – bis es anhält. Wenn das Fahrzeug dann am Ende seiner Reise ankommt und die Warp-Blase schwächer und schwächer wird, bis sie zusammenbricht, kommt ihr Inneres mit dem Rest des Universums wieder in Kontakt. Bis dahin wäre die interstellare Materie von mehreren tausend Lichtjahren auf ein paar Meter zusammengedrückt. Die wäre dann ganz schön heiß. Und es ist nicht klar, wer letztlich mehr leidet: das Schiff, das mit genug Materie vor der Nase, um einen kleinen Stern zu formen, ankommt, oder wer auch immer dem Schiff dann im Weg steht.

Unterwegs mit Warp – hoffentlich mit freier Fahrbahn!

Eine Möglichkeit wäre, dass die gesamte Materie in einem gewaltigen Strahl freigelassen wird, der alles, was ihm im Weg steht, wegfegt. Wenn das so wäre, sollte man vielleicht besser nicht direkt vor dem Planeten ankommen, den man besuchen will – der wäre dann nämlich vielleicht gar nicht mehr da.

Eine andere Möglichkeit wäre, dass sich die Materie einfach durch ihr eigenes Gewicht zusammenzieht – abhängig davon, wie weit sie während des Fluges bereits komprimiert wurde (das würde dann davon abhängen, wie die Warp-Blase im Einzelnen geformt ist). Dann könnte sich ein Schwarzes Loch bilden, wenn das nicht schon während des Fluges geschah, und das Schiff verschlucken, und vielleicht auch gleich das Reiseziel selbst.

All das zeigt, dass Warp-Reisen, wenn sie jemals möglich werden, nicht frei von Risiken wären, um es mal vorsichtig zu formulieren. Im Jahr 2016, als dieses Buch geschrieben wurde, ist von einem seriösen Vorschlag zum Bau eines Warpantriebes noch weit und breit nichts zu hören.


DERWEIL in der SUBATOMAREN WELT...
WENN SUPERSYMMETRIE WAHR IST, WIESO HABE ICH DANN IMMER NOCH KEINEN PARTNER ABGEKRIEGT?

Supersymmetrie

Eine schöne Lösung für viele Probleme

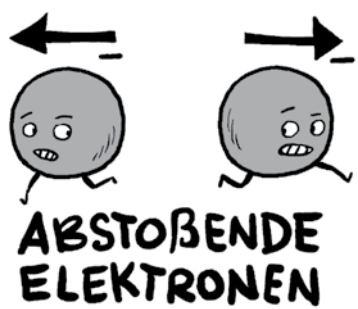
Unsere Welt ist voller Symmetrien. Menschen sind (fast) symmetrisch: unsere linke und rechte Seite sehen sich sehr ähnlich. Man könnte sagen, dass wir entlang einer vertikalen Achse durch unsere Körpermitte spiegelsymmetrisch sind. Eine andere, schöne Symmetrie sieht man bei Schneeflocken. Man kann sie an verschiedenen Achsen und Punkten spiegeln oder drehen und sie sehen immer wieder aus wie vorher.

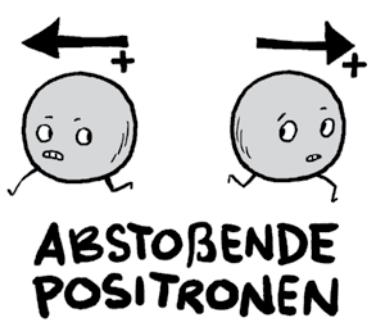


Es sind nicht nur die von den Wissenschaftlern beschriebenen Objekte, die symmetrisch sind, sondern auch die von ihnen verwendeten Formeln. Im Kapitel über Erhaltungssätze (↗[1]) haben wir verschiedene Symmetrien kennengelernt. Die Translationssymmetrie (oder Erhaltung) erlaubt es uns, dass wir uns an einen anderen Ort begeben, das Experiment dort wiederholen und genau das gleiche Ergebnis erhalten (sofern sich die Bedingungen durch die neue Umgebung nicht geändert haben). Wir haben auch gelernt, dass es noch weitere Invarianzen gibt, wie z.B. die Rotations- und Zeitinvarianz. Es gibt auch Symmetrien, die die Eigenschaft von Teilchen betreffen, etwa die Ladungssymmetrie. Sie besagt, dass man sich die Reaktion zwischen zwei geladenen Teilchen anschauen kann und genau das gleiche Ergebnis erhält, wenn man alle Ladungen durch ihre Anti-Ladungen ersetzt (also alle positiven Ladungen durch negative und umgekehrt). Nehmen wir als Beispiel zwei Elektronen, die sich abstoßen. Wenn wir sie nun durch zwei Positronen ersetzen, werden sie sich genauso und mit gleicher Stärke abstoßen, wie zuvor die Elektronen.

Dein Spin macht dich einzigartig!

Neben all diesen schönen Symmetrien gibt es aber auch Eigenschaften, die man nicht einfach in ihr Gegenstück umwandeln kann. Schaut man sich das





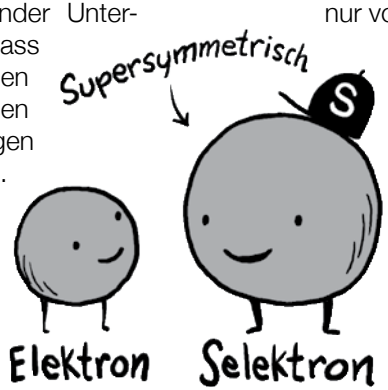
↗[1]: *„Erhaltungssätze“ auf Seite 51*

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_74



Standardmodell der Teilchenphysik (↗[2]) genauer an, so sieht man, dass alle Materieteilchen einen Spin (↗[3]) von 1/2 haben. Im Gegensatz dazu haben alle Teilchen, die Wechselwirkungen verursachen, die Eichbosonen, einen Spin von 1. Und dann gibt es noch ein ganz spezielles Teilchen, das Higgs-Boson (↗[4]), mit einem Spin von 0.

Es gibt absolut keine Möglichkeit, zu sagen „Alles klar, wir vertauschen jetzt mal die Spins von Elektron und Photon." Ein grundlegender Unterschied zwischen den beiden ist, dass man so viele Objekte mit den gleichen Eigenschaften am gleichen Ort haben kann, solange sie einen ganzzahligen Spin haben, so wie unsere Bosonen. Daher kann man z.B. auch beliebig viele Photonen in eine Kiste stecken. Mit Fermionen – Teilchen mit halbzahligem Spin – geht das nicht. Dieses Phänomen ist auch als „Pauli-Prinzip" in der Atomphysik bekannt. Zwei Elektronen können nicht am gleichen Ort sein, wenn sie sich nicht in mindestens einer Quantenzahl (also Eigenschaft) voneinander unterscheiden.



Machen wir die Welt supersymmetrisch!

Was aber, wenn es eine neue Symmetrie zwischen Fermionen und Bosonen gäbe? Was, wenn es für jeden Fermionentyp – also für jede Art von Materieteilchen – ein entsprechendes Gegenstück existieren würde, mit den gleichen Eigenschaften, aber ganzzahligem Spin? Und das gleiche für Bosonen? Theoretiker hatten eine solche Idee. Diese neue Symmetrie nennt man nun „Supersymmetrie" – nicht gerade bescheiden, oder?

Ganz offensichtlich ist unsere Natur nicht supersymmetrisch. Keines unserer Fermionen hat einen Superpartner. Ansonsten hätte man ihn mit Sicherheit schon gesehen. Aber was, wenn die Symmetrie nicht ganz exakt, sondern etwas gebrochen ist? Viele Symmetrien in der Natur sind gebrochen: Viele Schneeflocken sind nicht vollkommen symmetrisch, aber Fotos machen wir immer nur von den schön symmetrischen. Auch der menschliche Körper ist nicht ganz symmetrisch. Das Herz ist etwas weiter links, der Magen auch, die Leber ist auf der rechten Seite und manchmal sind sogar die äußeren Körperteile nicht ganz symmetrisch, so wie die Nase von einem unserer Autoren (nennen wir ihn mal Herrn L., damit er anonym bleibt). Wir könnten es also mit einer gebrochenen Symmetrie zu tun haben. Das würde dazu führen, dass die Massen der Superpartner nicht gleich, sondern viel, viel größer sind. Eine ungebrochene Symmetrie hätte nämlich gleiche Massen zur Folge (was wir aber nicht beobachtet haben), während bei einer gebrochenen Supersymmetrie jedes Teilchen einen Superpartner haben könnte, nur eben mit anderer Masse.

Nur eine Idee, aber eine gute

Bisher haben wir nur über eine Idee von Theoretikern gesprochen. Aber wofür wäre die überhaupt gut? Nun, Supersymmetrie wäre einfach schön! Was auch immer die Formeln, die unsere Welt be-

↗[2]: *„Das Standardmodell" auf Seite 217*
↗[3]: *„Spin" auf Seite 191*
↗[4]: *„Der Higgs-Mechanismus" auf Seite 245*

schreiben, symmetrischer macht, ist äußerst willkommen. Denken wir mal an die Maxwell-Gleichungen, die uns sagen, dass Elektrizität und Magnetismus im Grunde genommen das Gleiche sind. Aber bei der Supersymmetrie geht es um mehr als schöne Formeln. Sie könnte uns helfen, einige Probleme zu lösen, für die unser Standardmodell keine guten Antworten kennt. Das erste Problem betrifft die Vereinigung der Kräfte. Maxwell (nicht unser Hund, sondern der menschliche Physiker James C. Maxwell) hat Elektrizität und Magnetismus zum Elektromagnetismus vereint. Die Physiker Glashow, Weinberg und Salam haben es geschafft, die elektromagnetische und die Schwache Kraft (↗[5]) zur Elektroschwachen Kraft zu vereinigen. Aber bis heute ist niemandem eine Vereinigung der Elektroschwachen Kraft mit der Starken Kraft (↗[6]) gelungen. Die Supersymmetrie könnte helfen, eine Theorie zu etablieren, in der alle Elementarkräfte (bis auf die Gravitation) vereinigt sind. Aber nicht nur das: Einige der supersymmetrischen Teilchen sind auch gute Kandidaten für die Dunkle Materie (↗[7]), die man im Universum zwar beobachtet, aber sich nicht erklären kann.



Die Jagd nach der Supersymmetrie

Da die Supersymmetrie dazu beitragen würde, all die oben genannten Probleme zu lösen, versuchen Experimentalphysiker alles, um Hinweise zu finden, die ihre Existenz bestätigen könnten. Zur Zeit sieht es diesbezüglich nicht gut aus für die Supersymmetrie. Denn bisher hat man noch kein supersymmetrisches Teilchen gefunden. Physiker versuchen diese in hochenergetischen Kollisionen von Teilchenbeschleunigern (↗[8]) zu erzeugen. Ein beliebter Kandidat ist das „leichteste supersymmetrische Teilchen“ (LSP, „lightest supersymmetric particle“). Es könnte stabil und neutral sein und kaum interagieren. Daher würde es auch keine Spur in einem Teilchendetektor (↗[9]) hinterlassen. Wird das LSP aber zusammen mit anderen Teilchen produziert, kann man alle anderen Teilchen vermessen und dann merken, dass etwas fehlt. Und wenn der fehlende Teil mit keinem Baustein des Standardmodells (wie z.B. Neutrinos, ↗[10]) erklärt werden kann, wäre das ein Hinweis auf ein LSP. Aber bisher war alles Suchen erfolglos. Und es gibt hierfür viele mögliche Erklärungen. Zunächst die einfachste: Die Theorie der Supersymmetrie ist falsch. Keine Supersymmetrie, keine supersymmetrischen Teilchen, die man entdecken kann. Eine andere Erklärung besagt, dass supersymmetrische Partnerteilchen einfach so schwer sind, dass man sie bisher noch nicht entdeckt hat. Je schwerer ein Teilchen ist, desto mehr Energie braucht man in einem Teilchenbeschleuniger, um es zu erzeugen. Aus diesem Grund erhöhen Teilchenbeschleuniger wie der LHC (↗[8]) ihre Energie immer weiter. Die Suche wird weitergehen, und vielleicht werden noch größere Beschleuniger gebaut. Einfach deshalb, weil die Supersymmetrie viel zu schön ist, um einfach nur eine Idee zu sein.

↗[5]: *„Die Schwache Wechselwirkung“ auf Seite 237*
↗[6]: *„Die Starke Wechselwirkung“ auf Seite 233*
↗[7]: *„Dunkle Materie“ auf Seite 137*
↗[8]: *„Teilchenbeschleuniger“ auf Seite 253*
↗[9]: *„Teilchendetektoren“ auf Seite 257*
↗[10]: *„Das Neutrino“ auf Seite 213*



"Ich muss noch mal nachrechnen, aber es scheint, als hätte ich die Fäden gefunden, an denen wir ziehen müssen, um weitere Forschungsgelder zu bekommen."

Stringtheorie

Ein Weg zur Weltformel™

In den 60er und 70ern des zwanzigsten Jahrhunderts entdeckten die Physiker mehr und mehr Teilchen, indem sie immer größere Detektoren (↗1) verwendeten. Es war das goldene Zeitalter für Physiker, aber die unglaubliche Komplexität der riesigen Familie von Teilchen hat sie verwirrt. Gab es irgendeine Ordnung im Chaos?

Ordnung im Chaos: Vereinigung der Teilchen

Wie sich zeigte, gab es sie: Die Physiker haben herausgefunden, dass es im Endeffekt nur eine kleine Zahl von Elementarteilchen gibt, angeordnet in Familien, die wir heute als Standardmodell der Teilchenphysik (↗2) bezeichnen. Alle anderen Teilchen, die man in den Detektoren gesehen hat, waren aus den Bausteinen des Standardmodells zusammengesetzt. Durch dieses System war man sogar in der Lage, die Existenz weiterer Teilchen, die man bis dahin noch gar nicht in Detektoren gefunden hatte, vorherzusagen, die aber eigentlich existieren müssten. Ihre Entdeckung (so z.B. das Ω^{2+} – „Omega Zwei Plus“ – bestehend aus drei Up-Quarks) war ein großer Erfolg für die Teilchenphysik.



Noch mehr Ordnung: Vereinigung der vier Kräfte!

Aber es gab sogar noch mehr Ordnung, als das Standardmodell zunächst vorgegeben hat: Es schien, als gäbe es vier grundlegende Kräfte, die auf die Materie wirken – die Schwache Kraft, die Starke Kraft, die elektromagnetische Kraft und die Gravitation. Jedoch bei Experimenten mit immer höherer Energie schienen sich zwei davon – die elektromagnetische und die Schwache Kraft – immer ähnlicher zu werden. Diesen Vorgang nennt man „elektroschwache Vereinigung“. Das letzte Mal, als die Energiedichte so hoch war, dass die Kräfte eins waren, war kurz nach dem Urknall (↗3). Heutzutage sind die beiden Kräfte unterschiedlich und getrennt, aber es sind eigentlich nur zwei Seiten derselben Medaille.

Etwas Ähnliches scheint mit der Starken Kraft zu passieren: Bei sehr hohen Energien (weit über dem, was wir mit unseren heutigen Teilchenbeschleunigern erreichen können) scheint sie der elektroschwachen Kraft sehr ähnlich zu werden. Die Kombination der beiden nennt man „Große Vereinheitlichung“ – sehr kurz nach dem Urknall schien das sehr angesagt zu sein (eine genaue mathematische Beschreibung einer solchen vereinheitlichenden Theorie ist jedoch immer noch in Arbeit, ↗4).

Seit Bekanntwerden der Theorie ist es der Traum aller Teilchenphysiker, eines Tages einen Weg zu finden, alle Teilchen und alle Kräfte – selbst die Gravitation – in einem einheitlichen Formalismus zu beschreiben. Und das würde man dann die „Weltformel“ oder auch „Theorie von Allem“ nennen.

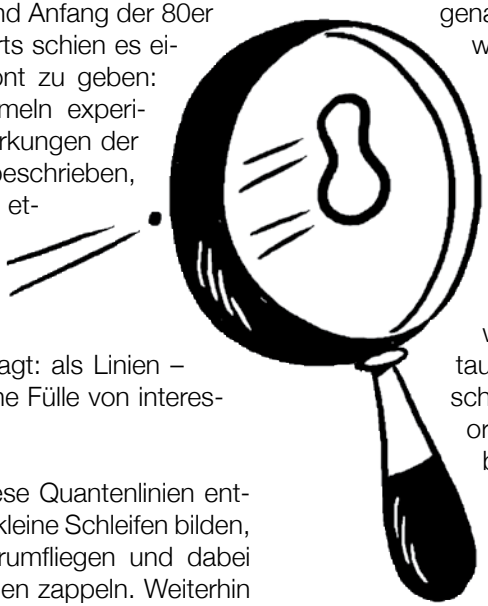
↗1: *„Teilchendetektoren“ auf Seite 257*
↗2: *„Das Standardmodell“ auf Seite 217*
↗3: *„Zeitstrahl unseres Universums“ auf Seite 100*
↗4: *„Supersymmetrie“ auf Seite 303*

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_75

Und der Gedanke ist wirklich sehr verführerisch. Zur Zeit ist man noch relativ weit davon entfernt zu verstehen, wie das überhaupt funktionieren soll. Vor allem, wenn man bedenkt, dass wir noch keine Ahnung haben, wie man die Gravitation zwischen Elementarteilchen beschreiben kann (↗[5]).

Eine Weltformel?

Aber gegen Ende der 70er und Anfang der 80er Jahre des letzten Jahrhunderts schien es einen Silberstreifen am Horizont zu geben: Während man mit den Formeln experimentierte, die die Wechselwirkungen der Gluonen mit den Quarks beschrieben, fanden theoretische Physiker etwas Erstaunliches. Wenn man sich die Teilchen nicht als Quantenpunkte, sondern als ausgedehnte Objekte – oder genauer gesagt: als Linien – vorstellen würde, gäbe es eine Fülle von interessanten Konsequenzen!



Zunächst einmal könnten diese Quantenlinien entweder geschlossen sein und kleine Schleifen bilden, oder offen, wodurch sie herumfliegen und dabei mit ihren kleinen offenen Enden zappeln. Weiterhin könnten – und würden – sie oszillieren, und zwar in allen möglichen Frequenzen. Das war der Grund, weshalb man sie auch als „Strings“ („Saiten“ oder „Schnüre“) bezeichnete.

Alle Elementarteilchen als Strings?

Nun, das an sich wäre schon relativ interessant. Aber was hat das mit der Vereinheitlichung der vier Grundkräfte zu tun? Die Antwort ist einfach: Unterschiedliche Oszillationsfrequenzen der Strings würden unterschiedlichen Sorten von Elementarteilchen entsprechen!

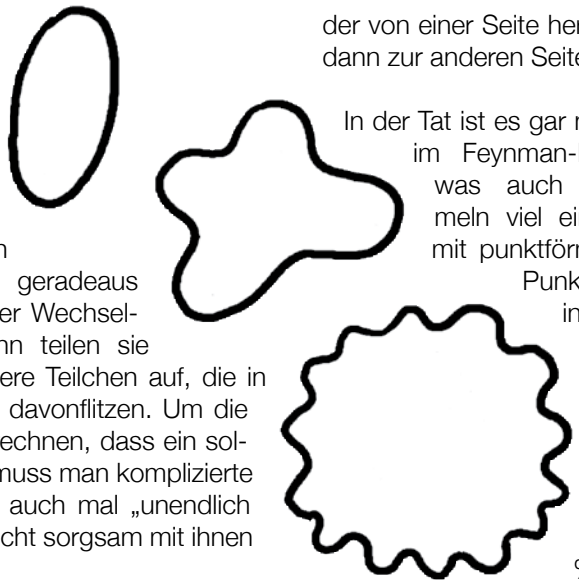
Ein String kann auf verschiedene Arten vibrieren, und es zeigt sich, dass jeder Vibrationsmodus (jeder spielbare Ton auf einer Saite, um die Analogie zur Musik beizubehalten) dem String ein völlig anderes Verhalten gibt. Abhängig von der genauen Frequenz kann er sich entweder wie ein Elektron, ein Photon oder irgendein anderes Teilchen des Standardmodells verhalten. Und noch besser: Es gibt sogar Oszillationen, die aus dem String ein masseloses Teilchen mit einem Spin von 2 (↗[6]) machen – genau so, wie man es bei einem Graviton erwarten würde, dem mutmaßlichen Austauschteilchen der Gravitation. Es scheint so, als könne die Stringtheorie nicht nur erklären, dass alle beobachteten Teilchen des Standardmodells unterschiedliche Vibrationsformen von Strings sind, sondern als könne sie auch die vier Grundkräfte auf eine einheitliche Art beschreiben. Der Star unter den Kandidaten für die Weltformel war geboren!

Feyman-Diagramme der Stringtheorie: viel schöner!

Es gibt noch andere Vorteile bei der Behandlung von Elementarteilchen als (eindimensionale) Strings anstelle von (nulldimensionalen) Punkten: Die Feyn-

↗[5]: *„Quantengravitation“ auf Seite 283*
↗[6]: *„Spin“ auf Seite 191*

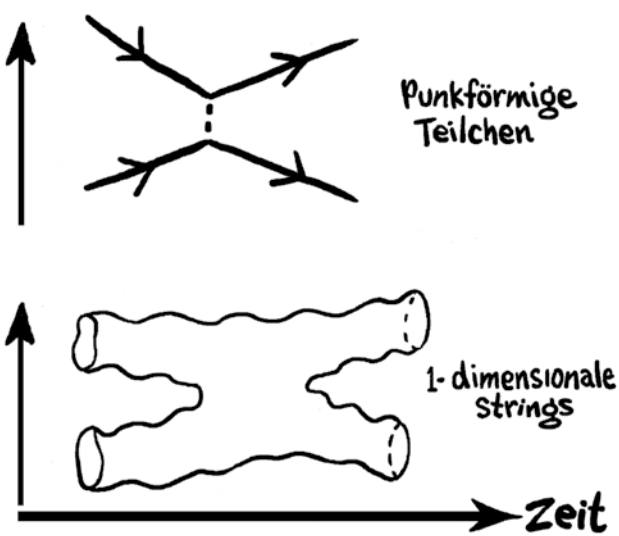
man-Diagramme (↗7) verhalten sich viel besser! Feynman-Diagramme beschreiben die Wechselwirkung der verschiedenen Teilchen des Standardmodells. Teilchen werden durch Linien beschrieben, die geradeaus wandern – bis sie an einer Wechselwirkung teilnehmen. Dann teilen sie sich in verschiedene andere Teilchen auf, die in verschiedene Richtungen davonflitzen. Um die Wahrscheinlichkeit zu berechnen, dass ein solcher Prozess stattfindet, muss man komplizierte Formeln ausrechnen, die auch mal „unendlich %“ ergeben, wenn man nicht sorgsam mit ihnen umgeht.



der von einer Seite hereinmarschiert, sich teilt, und dann zur anderen Seite hin wieder verschwindet.

In der Tat ist es gar nicht so schwer, einen String im Feynman-Diagramm „abzuschnüren“, was auch die entsprechenden Formeln viel einfacher aussehen lässt als mit punktförmigen Teilchen. Dort ist der Punkt, an dem sich ein Teilchen in mehrere andere aufspaltet, relativ kompliziert – das String-Diagramm hingegen ist durch eine einzige, glatte Oberfläche definiert. Die Formeln verhalten sich hier also viel besser und enden nicht so oft in „unendlich %“!

Ein Feynman-Diagramm der Stringtheorie hingegen sieht ganz anders aus: Da in Feynman-Diagrammen die Zeit von links nach rechts läuft, sieht ein geschlossener String, der sich in der Zeit bewegt, wie ein wabernder Schlauch aus. Eine Wechselwirkung eines Strings (z.B. der Zerfall von einem String in zwei neue) würde wie eine Amöbe aussehen, die sich aufteilt. Das entsprechende Feynman-Diagramm würde dann einen Schlauch zeigen,



Eine solche Theorie ist in der Tat ein sehr vielversprechendes und faszinierendes Thema. Könnte es sein, dass sie eine Weltformel liefert, die alle Teilchen und Kräfte im Universum einheitlich beschreibt? Nun, leider ist nicht alles Friede, Freude, Eierkuchen mit der Stringtheorie. Sie hat so ihre Macken, die einem den Spaß verderben. Eine von ihnen werden wir noch in einem eigenen Kapitel behandeln (↗8).

↗7: *„Feynman-Diagramme“ auf Seite 229*
↗8: *„Extradimensionen“ auf Seite 311*


WIR SIND WIEDER DA, WO WIR ANGEFANGEN HABEN.
EINEN GROßARTIGEN ORT HAT SICH EMMY DA FÜR IHRE VORLESUNG ÜBER EXTRADIMENSIONEN AUSGESUCHT.

Extradimensionen

Kleine versteckte Räume

In den 80ern und 90ern des vergangenen Jahrhunderts hat der Gedanke, dass Teilchen kleine vibrierende Strings statt punktförmiger Teilchen seien, immer mehr an Boden gewonnen (↗[1]). Die verschiedenen Typen von Teilchen wären dann nichts anderes als „Vibrationsformen" einer kleinen, eindimensionalen Linie aus purer Energie. Es schien auch so, als sei die Theorie ziemlich „steif", in dem Sinn, dass man einzelne Teile nicht so leicht ändern könnte. Von Physikern wurde das, nämlich ihre Vorhersagekraft, gefeiert: Es gab nicht viele Möglichkeiten, eine Stringtheorie zu formulieren, nur einige wenige mit wenigen festen Parametern. Und diese wenigen (fünf, um genau zu sein) verschiedenen Stringtheorien schienen durch gewisse Symmetrien miteinander verknüpft zu sein, das heißt, die schienen ein und dieselbe Theorie zu sein, nur in fünf verschiedenen Formulierungen.



Die Stringtheorie schien das Potenzial zu haben, alle bekannten Teilchen und Wechselwirkungen beschreiben zu können. Damit konnte sie die Grundlage der „Weltformel" sein.

Gesucht: sechs Extradimensionen

Es gab nur ein kleines Problem, das recht schnell offensichtlich wurde. Die Stringtheorie funktionierte nur, wenn die Raumzeit zehndimensional war (eine Zeit und neun Raumdimensionen)! Das verträgt sich nicht so ganz mit dem, was wir im Alltag erfahren: Ist es nicht offensichtlich, dass es eine Dimension für die Zeit und drei für den Raum gibt, statt neun? Aber es gab keinen Weg daran vorbei: Mit einer anderen Zahl von Dimensionen würde die Stringtheorie inkonsistent werden. Das war eine ihrer „steifen" Eigenschaften: Eine genauso gut funktionierende Stringtheorie mit vier Dimensionen konnte man einfach nicht aufschreiben. Entweder zehn oder gar nicht!

Nun, was sollte man in so einer Situation tun? Lagen die Stringtheoretiker einfach komplett daneben? Aber in vielen anderen Aspekten war sie einfach zu gut, um wahr zu sein, also waren die Physiker noch nicht bereit, die Stringtheorie aufzugeben. Und tatsächlich, es gab einen Ausweg aus dem Dilemma!

Extradimensionen verstecken: die Gartenschlauch-Analogie

Es zeigt sich, dass die zehn Dimensionen existieren müssen. Aber dass sie groß sein sollten, hat niemand gesagt. Stattdessen könnten sie auch einfach so sehr aufgerollt sein, dass man sie mit bloßem Auge gar nicht erkennt.

Die Idee der „aufgerollten Dimensionen" kann man sehr schön mit einem Gartenschlauch veranschaulichen. Wenn man ihn ganz aus der Nähe betrachtet,

↗[1]: *„Stringtheorie" auf Seite 307*

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_76

kann man erkennen, dass er ein langer Schlauch ist. Jetzt stellen wir uns ein kleines Insekt vor, so wie eine Ameise, die auf dem Schlauch herumkrabbelt. Die Ameise hat zwei unabhängige Richtungen, in die sie marschieren kann: entlang der Länge des Schlauchs, und um ihn herum. Da eine Ameise verglichen mit der Dicke des Schlauchs recht klein ist, würde sie wahrscheinlich noch nicht einmal merken, dass eine der beiden Richtung in sich selbst verdreht ist. Wenn sie eine Markierung hinterlässt, könnte sie merken, dass sie nach kurzer Zeit wieder da ankommt, wo sie angefangen hat, nachdem sie eine Weile seitwärts um den Schlauch lief. Ansonsten würde sie einfach zwei Dimensionen sehen und wahrscheinlich nicht weiter darüber nachdenken. Aus der Nähe betrachtet ist also der Schlauch (bzw. dessen Oberfläche) zweidimensional.

Von der Ferne aus betrachtet stimmt das allerdings nicht. Stell dir vor, du fliegst in einem Hubschrauber, schaust hinunter in dein Viertel und siehst einen Nachbarn mit einem Schlauch seinen Garten bewässern. Bei gutem Sichtkontakt kannst du den Schlauch vielleicht als eine dünne Linie erkennen, aus der an einem Ende Wasser kommt. Und er würde sicherlich für dich eindimensional aussehen. Auf keinen Fall könntest du eine Ameise darauf seitwärts krabbeln sehen, dafür wärst du zu weit weg! Also: Aus der Ferne ist ein Gartenschlauch eindimensional.



Man kann das Ganze auch etwas anders ausdrücken: Die Oberfläche des Schlauchs ist zweidimensional, aber eine der Dimensionen ist groß und die andere aufgewickelt. Wenn man jetzt nicht die Möglichkeit hat, sich die Oberfläche aus der Nähe anzuschauen, würde man nur die großen, nicht aber die kleinen, aufgerollten Dimensionen sehen. Bei der Stringtheorie muss man sich die Situation sehr ähnlich vorstellen: Von den neun Raumdimensionen sind sechs ganz klein aufgewickelt und drei sind weiterhin groß. Und der Unterschied ist so gewaltig, dass es scheint, als sei unsere Welt lediglich vierdimensional, statt zehndimensional.

Lecker Universum – jetzt mit extra Dimensionen

Stringtheoretiker vermuten, dass alle sechs Extradimensionen sehr klein aufgerollt sind – sie nennen sie „kompaktifizierte Richtungen“. Es gibt also drei Richtungen, in denen das Universum groß ist und sechs, in denen das Universum sehr, sehr klein ist.

Aber selbst wenn diese zusätzlichen kompaktifizierten Dimensionen klein sind, wieso sollten wir sie dann nicht sehen können? Wir sollten doch immer noch in diese Richtungen laufen können, nur wären wir immer wieder sofort an dem Punkt zurück, an dem wir losgegangen sind, oder? Nun ja, nicht ganz. Aufgrund der Quantenphysik bräuchten wir enorm viel Energie, um in eine der sechs kompaktifizierten Extradimensionen zu gelangen. Der Grund dafür ist, dass die Wellenfunktion eines Teilchens – der

Name sagt es ja – eine Welle ist (↗[2]). Wenn sich eine Welle in eine Richtung bewegt, in der sie sehr viel Platz hat, kann sie dabei jede beliebige Wellenlänge annehmen. Aber wenn sie sich in eine kompaktifizierte Richtung bewegen möchte, dann müsste sie in eine kurze Richtung laufen, wäre wieder am Anfang und müsste dabei mit sich selbst interferieren. Damit diese Interferenz aber nicht destruktiv ausfällt, bräuchte sie eine sehr kurze Wellenlänge – höchstens so lang wie der Radius des Universums in dieser Richtung.

Ein Teilchen, das sich in eine kurze, kompaktifizierte Richtung bewegen möchte, bräuchte eine wirklich kurze Wellenlänge – so klein wie diese Dimension selbst. Und eine so kurze Wellenlänge bedeutet eine große Energie (↗[3]).

Da viele Stringtheoretiker davon ausgehen, dass diese Extradimensionen in etwa die Größe der Plancklänge von etwa 10^{-35} m haben sollten, bräuchte ein Teilchen, das sich in eine andere als unsere drei geliebten Dimensionen bewegen wöllte, eine Energie, die größer ist als alles, was wir mit unseren Teilchenbeschleunigern (↗[4]) erreichen können. Kurz nach dem Urknall hatten die Teilchen dafür noch genug Energie, aber heutzutage wäre es praktisch unmöglich ein Teilchen im Universum mit so hoher Energie zu finden.



Einige Physiker, die an der Stringtheorie forschen, halten an der Idee fest, dass die Extradimensionen in Wirklichkeit groß (und damit meinen sie „groß, verglichen mit der Plancklänge, aber immer noch viel kleiner als ein Atom“) sein könnten. Wenn das stimmen würde, könnte man sie in Teilchenbeschleunigern wie dem LHC (↗[4]) sehen.

Wie genau aufgerollt? Zu viele Möglichkeiten!

Die Extradimensionen haben allerdings zur größten Krise der Stringtheorie geführt. Wenn man nur eine Dimension hat, die man klein machen möchte, gibt es im Wesentlichen auch nur eine Möglichkeit, das zu tun. Man kann sie gerade so aufrollen, wie auch der Gartenschlauch seine aufgerollte Dimension hat. Hat man aber sechs, gibt es viele Möglichkeiten. Niemand weiß, wie viele genau – man hat versucht, abzuschätzen, auf wie viele Arten das geschehen könnte. Dabei kam man auf Zahlen wie 10^{500} – das ist eine Eins mit fünfhundert Nullen! Und jede dieser Möglichkeiten führt zu einer völlig anderen Stringtheorie, mit verschiedenen Arten von Teilchen und verschiedenen Naturkonstanten. Es scheint absolut unmöglich, herauszufinden, welche die richtige ist, oder ob es überhaupt eine gibt, die unser Universum korrekt beschreiben kann.

Die gesamte Vorhersagekraft der Stringtheorie scheint also verloren zu sein: Zuerst schien es noch, als ob die Steifheit der Stringtheorie nur eine einzige Form zulassen würde, wie das Universum existiert. Heute scheint es Milliarden von Milliarden von Stringtheorien zu geben – alle mit anders kompaktifizierten Extradimensionen – und es gibt keine geeignete Möglichkeit herauszufinden, welche die Richtige ist. Vielleicht wird das Problem in Zukunft noch gelöst, aber als wir dieses Buch geschrieben haben (2016), ist man dem Traum einer Weltformel noch nicht viel näher gekommen als 30 Jahre zuvor.

↗[2]: *„Welle-Teilchen-Dualismus“ auf Seite 147*
↗[3]: *„Licht“ auf Seite 7*
↗[4]: *„Teilchenbeschleuniger“ auf Seite 253*


VIELE WELTEN
Eis*
WENN ICH SCHOKOLADE WÄHLE...
...SPALTET SICH DAS UNIVERSUM IN EIN ANDERES UNIVERSUM, IN DEM ICH VANILLE WÄHLE...
...UND NOCH EIN ANDERES UNIVERSUM IN DEM ICH BEIDE WÄHLE.
...UND WIEDER EINES, IN DEM ICH KEINES VON BEIDEN WÄHLE.
DANN WIEDERUM GIBT ES DAS UNIVERSUM IN DEM ICH GERADE JETZT BIN, WO JEDER SAUER AUF MICH IST, WEIL ICH EWIG BRAUCHE UM MICH ZU ENTSCHEIDEN.
IN ORDNUNG, ICH NEHME VANILLE!
WAFFEL ODER BECHER?

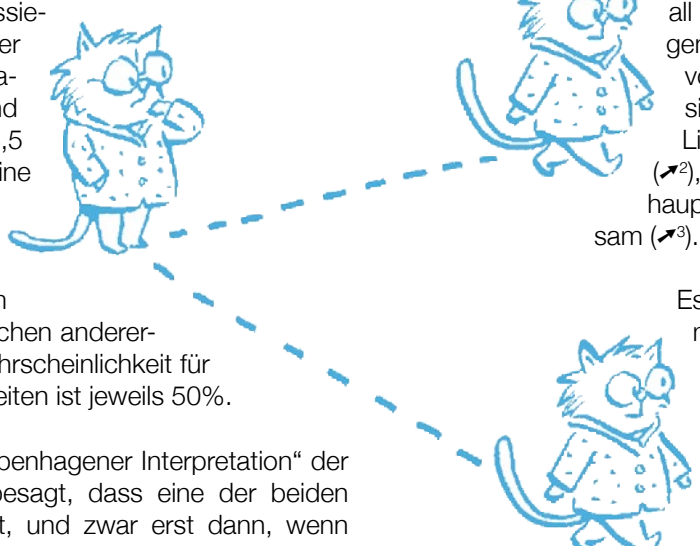
Viele-Welten-Theorie

In einem anderen Universum ist die Katze lebendig

Die Gesetze der Quantenphysik beruhen in ihrem Kern auf Wahrscheinlichkeiten. Jeder Prozess, der möglich ist, geschieht nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit. Diese kann in der Quantenphysik genau berechnet werden – doch welche der Möglichkeiten eintritt, kann nicht vorhergesagt werden. Die Sache ist sogar noch etwas verrückter: Solange niemand nachsieht, geschieht alles, was möglich ist, auch tatsächlich!

Die Superposition: Wann hört sie auf, zu existieren?

Stell dir ein instabiles Atom vor, z.B. Uran-238. Es ist radioaktiv und hat eine Halbwertszeit von 4,5 Milliarden Jahren. Wenn du nun so lange wartest (viel Spaß), was wird passieren? Die Regeln der Quantenphysik besagen, dass der Zustand des Systems nach 4,5 Milliarden Jahren eine Überlagerung aus einem Uran-Atom einerseits und einem Thorium-Atom mit einem Alpha-Teilchen andererseits ist (↗[1]). Die Wahrscheinlichkeit für die beiden Möglichkeiten ist jeweils 50%.



Die sogenannte „Kopenhagener Interpretation“ der Quantenmechanik besagt, dass eine der beiden Möglichkeiten eintritt, und zwar erst dann, wenn man eine Messung durchführt. Hier heißt das: Man muss nachsehen, ob das Atom zerfallen ist oder nicht. Erst dann wird sich der Zustand des Systems ändern – wenn du ein Uran-Atom beobachtest, ist der Zustand zu 100 % ein Uran-Atom. Wenn du dann tatsächlich misst, dass ein Zerfall stattfand, ist der Zustand zu 100 % ein Thorium-Atom und ein Alpha-Teilchen. Der Messprozess verändert also den Zustand, und zwar im Moment der Messung.

Die Kopenhagener Interpretation: Kollaps der Wellenfunktion

Die Interpretation des Messprozesses ist bestimmt etwas problematisch. Zum einen behauptet sie, dass sich die Wellenfunktion eines Zustandes überall ändert, und zwar augenblicklich. In einer Welt, von der wir wissen, dass sich nichts schneller als Licht bewegen kann (↗[2]), erscheint diese Behauptung doch etwas seltsam (↗[3]).

Es wird aber noch schlimmer: Die Interpretation macht einen klaren Unterschied zwischen dem Quantensystem einerseits und dem Messgerät andererseits (oder vielmehr dem Wissenschaftler,

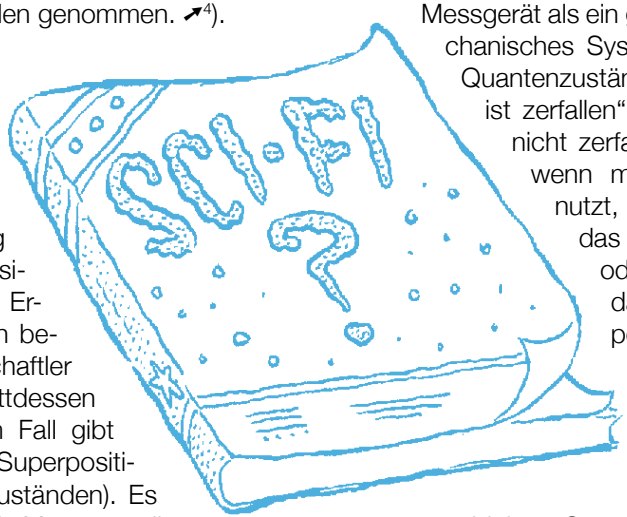
↗[1]: *„Alpha-, Beta- und Gammastrahlen“ auf Seite 175*
↗[2]: *„Relativität von Raum und Zeit“ auf Seite 117*
↗[3]: *„Verschränkung“ auf Seite 195*

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_77

der die Messung durchführt). Letzteres wird damit ganz klassisch behandelt. Das heißt, was das Messgerät angeht, werden keine Quanteneffekte mit einbezogen! Das Wichtigste aber ist: Das Messgerät kann niemals das Ergebnis liefern „Das Atom ist sowohl zerfallen als auch nicht zerfallen".

Aber sowohl das Messgerät, als auch der Wissenschaftler bestehen doch aus Atomen. Damit sollten sie auch den Gesetzen der Quantenmechanik folgen, oder? Also, wieso ist die eine Sache quantenhaft und die andere nicht? Wo liegt die Grenze zwischen der Quantenwelt und der klassischen Welt? Schrödinger fand diese Vorstellung so seltsam, dass er sich eine raffinierte Art ausgedacht hat, Katzen zu quälen, um die Sache zu klären und zu zeigen: Das kann nicht die ganze Wahrheit sein (Das war allerdings nur ein Gedankenexperiment. Keine Katze hat je Schaden genommen. ↗[4]).

Es wird noch merkwürdiger. Denn es scheint, als wäre es möglich, einen „Quantenradierer" zu entwickeln: Man kann eine Messung durchführen und dann sicherstellen, dass das Ergebnis der Messung den beobachtenden Wissenschaftler nie erreicht, sondern stattdessen zerstört wird. In diesem Fall gibt es immer noch eine Superposition (Überlagerung von Zuständen). Es scheint, als sei es nicht die Messung, die eine Superposition zerstört, sondern die Tatsache, dass jemand weiß, welche der Möglichkeiten eingetreten ist!



Aus vielerlei Gründen, von denen wir einige eben beschrieben haben, scheint die Kopenhagener Deutung der Quantenmechanik heute nicht mehr angemessen zu sein – selbst wenn sie das, was passiert, gut beschreibt. Zumindest, so lange man die Relativitätstheorie ignoriert und sich nicht zu viele Gedanken über die philosophischen Konsequenzen macht.

Alles ist quantig: Atom und Messgerät verschränken

Was aber würde geschehen, wenn es einfach keine Grenzen zwischen der klassischen Welt und der Quantenwelt gäbe? Denken wir den Gedanken mal zu Ende: Der Quantenzustand befindet sich in einer Superposition aus „Uran-Atom" und „Thorium-Atom mit Alpha-Teilchen". Denken wir uns nun das Messgerät als ein gigantisches quantenmechanisches System mit zwei möglichen Quantenzuständen: „Gerät misst: Uran ist zerfallen" und „Gerät misst: Uran nicht zerfallen". Was passiert nun, wenn man das Messgerät benutzt, um herauszufinden, ob das Uran-Atom zerfallen ist oder nicht? Wird es sich dann auch in einer Superposition zweier möglicher Zustände befinden?

Nein, es zeigt sich, dass das nicht so ist. Vielmehr wird das kombinierte System „Messgerät und Uran-Atom" nach der Messung verschränkt sein (↗[5])! Es befindet sich in einer Superposition der folgenden Zustände: „Uran-Atom und Messgerät misst: Uran

↗[4]: *„Schrödingers Katze" auf Seite 159*
↗[5]: *„Verschränkung" auf Seite 195*

nicht zerfallen“ sowie „Thorium-Atom und Messgerät misst: Uran-Atom ist zerfallen“. Die beiden möglichen Ausgänge werden immer noch in einem Quantenzustand dargestellt, der sowohl das Atom als auch das Messgerät enthält. Sobald nun auch noch der Wissenschaftler ins Spiel kommt und das Ergebnis ausliest, wird sich das System „Atom + Messgerät + Wissenschaftler“ – du hast es sicher geahnt – in einer Superposition von „Uran-Atom + Messgerät misst: nicht zerfallen + Wissenschaftler hat Uran-Atom“ einerseits und „Thorium-Atom und Alpha-Teilchen + Messgerät misst: zerfallen + Wissenschaftler fragt sich: Wo ist das Uran-Atom?“ andererseits befinden.

Das Universum teilt sich

Auf eine gewisse Weise passieren also beide möglichen Ausgänge der Messung, und zwar gleichzeitig! Aber etwas anderes passiert auch: Da das Messgerät (und auch der Wissenschaftler) aus so unglaublich vielen, vielen Quantenteilchen besteht, die noch dazu alle viel miteinander wechselwirken, wird die Wellenfunktion nicht kollabieren (also auf einen Zustand zurückfallen), sondern stattdessen „dekohäriert“. Diese Dekohärenz bedeutet, dass sich die beiden Möglichkeiten nach kurzer Zeit ganz unabhängig entwickeln und nicht mehr miteinander wechselwirken. Es ist so, als hätte sich das Universum in zwei Teile geteilt: eines, in dem das Uran-Atom zerfallen ist und eines, indem es noch ganz ist.

Diese Interpretation wurde ursprünglich von Hugh Everett im Jahre 1957 entwickelt und wurde später als „Viele-Welten-Theorie“ oder „Viele-Welten-Interpretation der Quantenmechanik“ bekannt. Sie besagt: Sobald die Messung eines Quantensystems durchgeführt wird, spaltet sich das Universum in so viele Teile, wie es vorher überlagerte Zustände gab. In jedem der Universen hat einer der möglichen Ausgänge der Messung stattgefunden. Und ab dann entwickelt sich jedes der Universen (jede „Welt“) unabhängig von der anderen weiter, ohne mit ihnen kommunizieren zu können.

Parallel-Universen für jedermann!

Die Viele-Welten-Theorie hat natürlich für Jahrzehnte viele hitzige Diskussionen unter den Physikern ausgelöst. Besonders die Tatsache, dass man die genauen Umstände der Dekohärenz kaum verstand, hat wiederholt für Kritik gesorgt. Es scheint auch, als sei diese Interpretation nicht zeitsymmetrisch: Das Universum kann sich in verschiedene Zweige aufspalten, aber es ist nicht möglich, Universen zusammenzufügen. Und das, obwohl die Regeln der Quantenmechanik eigentlich zeitsymmetrisch sind (wobei der Messprozess in der Kopenhagener Interpretation natürlich auch nicht zeitsymmetrisch ist).



Wahrscheinlich wird man hierüber noch lange diskutieren müssen. Und selbstverständlich war das Thema auch Stoff für zahlreiche Fantasy- und Science-Fiction-Geschichten! Welcher Autor kann denn schon zu wissenschaftlich genehmigten Paralleluniversen nein sagen?

Das Ende des Universums

Und dann?

Wir wissen ziemlich genau, wann das Universum begann: Vor ca. 13,8 Milliarden Jahren ist es in der gewaltigen Explosion des Urknalls (↗1) entstanden. Damals war es ziemlich klein und heiß, hat sich seitdem aber ausgedehnt und abgekühlt. Aber wie wird es enden? Wird es sich ewig ausdehnen? Oder wieder zu einem Punkt zusammenfallen? Oder gibt es noch eine ganz andere Möglichkeit?



Zunächst sollten wir festhalten: Niemand weiß, wie das Universum enden wird (obwohl es genug apokalyptische Propheten gibt, die regelmäßig vom Ende der Welt berichten). Es gibt jedoch einige mehr oder weniger wahrscheinliche Möglichkeiten, wenn wir die physikalischen Gleichungen, die all unser Wissen über Raum, Zeit und Materie beschreiben, auf den aktuellen Zustand unseres Universums anwenden.

Das Große Einfrieren



Derzeit dehnt sich das Universum schnell aus (↗1). Soweit wir wissen, wird die Expansionsgeschwindigkeit auch immer größer! Was allerdings nicht größer wird, ist die Menge an Materie und/oder Energie – davon scheint es nur eine endliche Menge zu geben Kleine Randbemerkung: in der Mitte des 20. Jahrhunderts war die „Steady-State-Theorie“ („Gleichgewichtstheorie“) ziemlich beliebt. Sie besagt, dass sich nicht nur das Universum ausdehnt, sondern auch ständig neue Materie produziert wird. Da die Theorie aber, im Gegensatz zur Urknalltheorie, nicht zu unseren Messdaten passt, wurde sie mittlerweile verworfen. Das bedeutet, dass die Energiedichte im All immer weiter abnimmt, bis irgendwann zu wenig da ist, um irgendwas Interessantes geschehen zu lassen. Es wird zu wenig Materie da sein, um neue Sterne entstehen zu lassen (↗2). Die Sterne werden also einer nach dem anderen ausgehen, wobei vielleicht ein paar schwarze Löcher übrig bleiben (↗3). Und selbst die werden nach sehr langer Zeit über die Hawking-Strahlung (↗4) zerstrahlt sein. Die Temperatur des Universums wird auf den absoluten Nullpunkt fallen – das Universum hat sich totgefroren.

Der Hitzetod



Eine Variante des Großen Einfrierens ist der Hitzetod des Universums. Dieses Szenario basiert auf dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik: Ein physikalisches System wird immer den Zustand maximaler Entropie annehmen – für unser Universum würde das bedeuten, dass am Ende die gesamte Materie und Strahlung überall gleichmäßig verteilt sein wird. Aber ohne Temperaturunterschiede sind keine Reaktionen möglich und kein Leben kann existieren. Ob es zum Große Einfrieren oder dem Hitzetod kommen wird, hängt

↗1: *„Der Urknall“ auf Seite 97*
↗2: *„Die Geburt des Sonnensystems“ auf Seite 59*
↗3: *„Schwarze Löcher“ auf Seite 91*
↗4: *„Verdampfung Schwarzer Löcher“ auf Seite 287*

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
B. Lemmer et al., *Quirky Quarks*, DOI 10.1007/978-3-662-50259-4_78

davon ab, wie schnell sich das Universum in Zukunft ausdehnt und ob Schwarze Löcher zerfallen können oder nicht.

Das Große Auseinanderreißen



Die Allgemeine Relativitätstheorie (↗[5]) erlaubt einige Singularitäten – das Schwarze Loch und der Urknall sind die bekanntesten. Es gibt aber noch eine andere, bei der die Expansionsrate des Universums nach einer bestimmten Zeit unendlich wird. In diesem Szenario expandiert das Universum so schnell so stark, dass es „auseinanderreißt". Alle Punkte im Universum werden unendlich schnell voneinander wegbeschleunigt! Alles reißt sofort auseinander, und nichts vom Universum bleibt übrig. Zum Glück kann das nur passieren, wenn das Universum mit einer mysteriösen Kraft namens „Phantom-Energie" gefüllt ist, eine bestimmte Form der Dunklen Energie. Wenn es nur baryonische Materie, Dunkle Materie und Dunkle Energie gibt – wie wir sie kennen und wie es unsere Modelle nahelegen – wird der Große Auseinanderriss nicht passieren.

Der Big Crunch

Im Augenblick sieht es so aus, als würde sich das Universum ausdehnen und damit auch weitermachen. Wenn es aber nur eine endliche Größe hat (man spricht von einem „geschlossenen" Universum) und gewisse Vorhersagen der Quantenmechanik stimmen (↗[6]), könnte die Expansion des Universums an einem Punkt in ferner Zukunft stoppen. Danach würde es wieder schrumpfen. Das Universum könnte so enden, dass es schließlich zu einem Punkt kollabiert – der Urknall rückwärts, ein „Big Crunch" („Großes Knautschen").



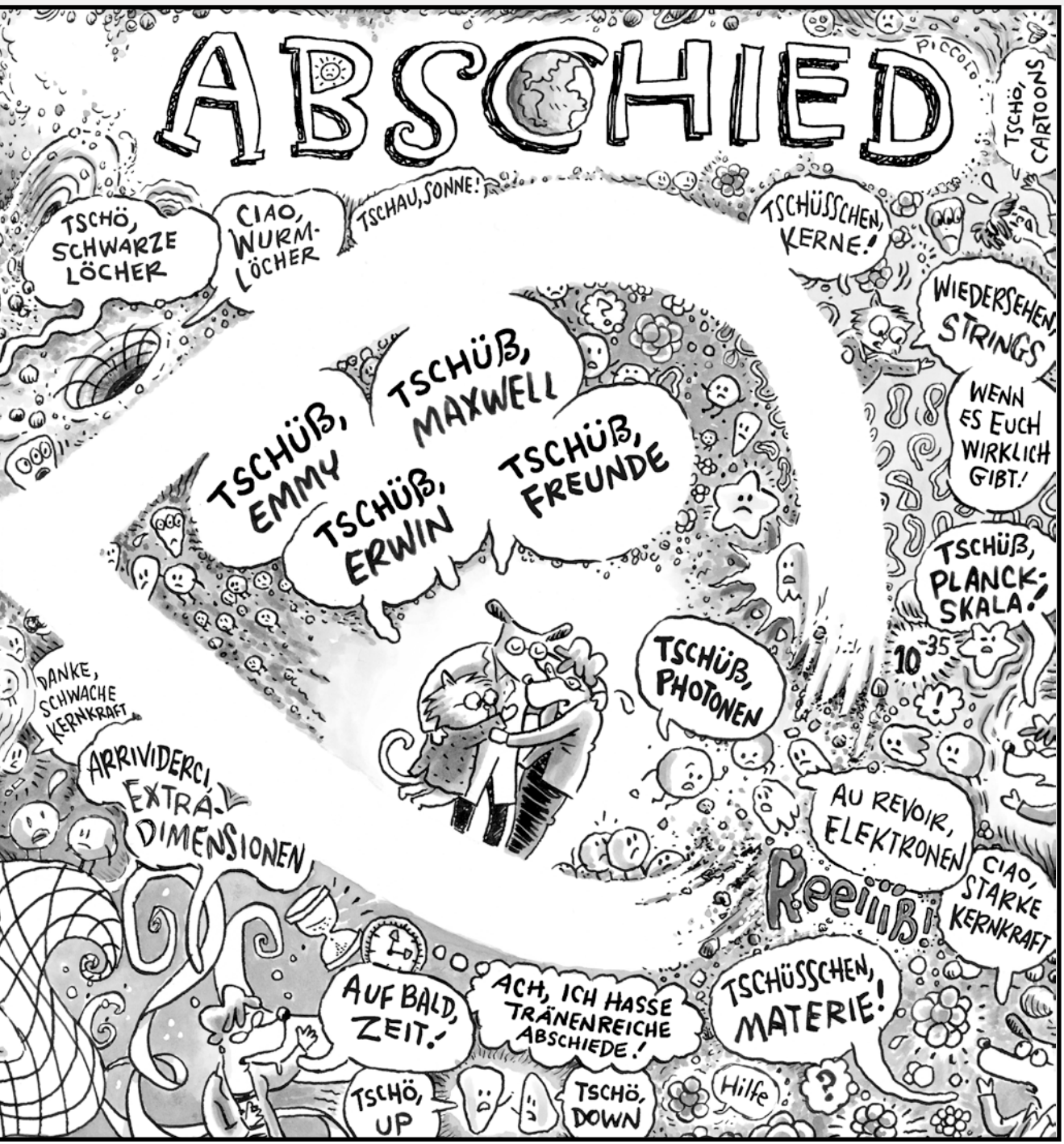
Der Große Prall



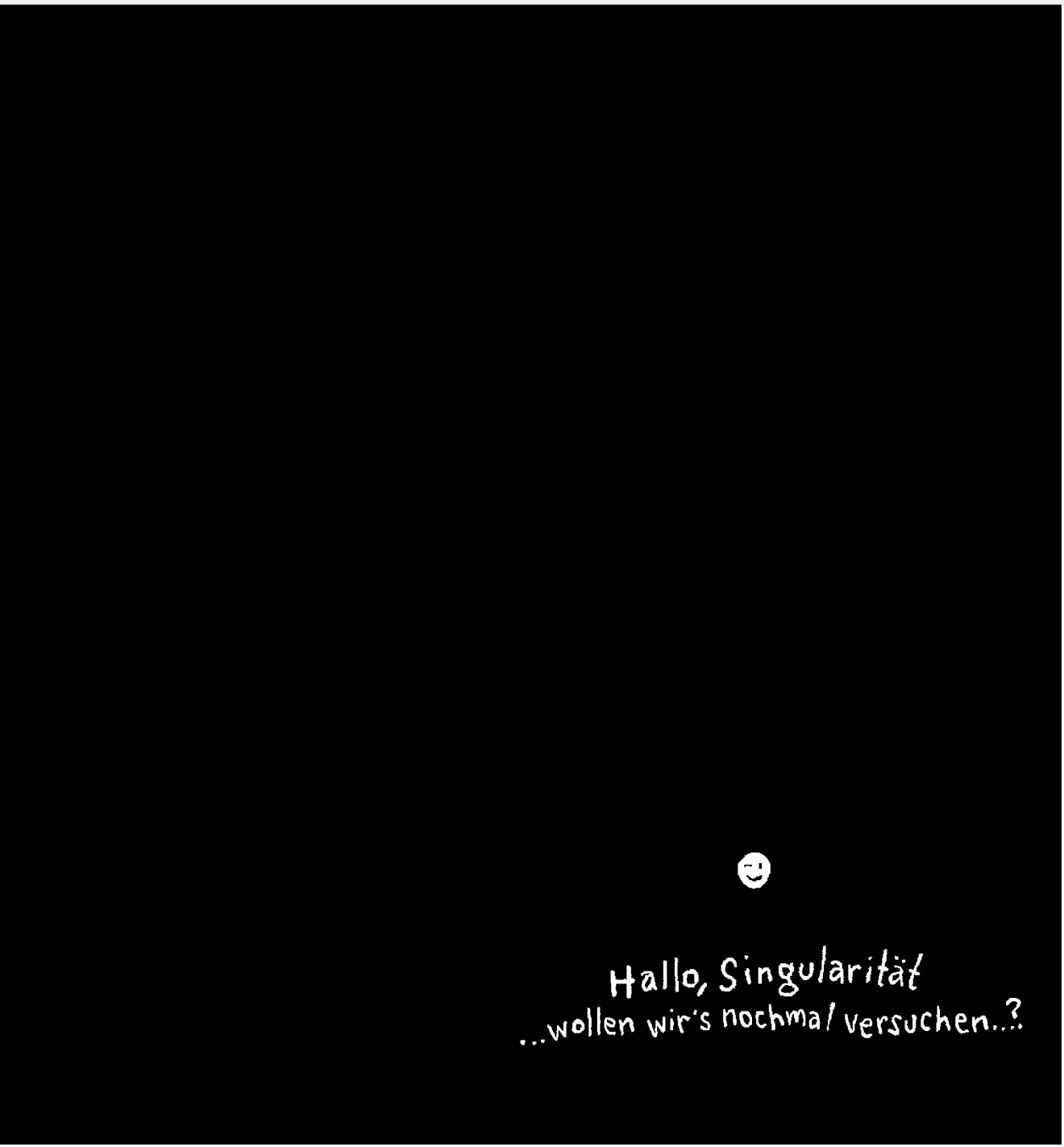
Wenn man gewissen Quantengravitationstheorien glauben kann (↗[6]), muss das Große Knautschen nicht das Ende bedeuten (↗[6]) – statt zu einem Punkt zu kollabieren, könnte das Universum auch zu einer sehr kleinen, aber endlichen Größe zusammenfallen. Wenn seine Dichte an diesem Punkt etwa so groß wie die Planck-Dichte ist (ungefähr die Masse des sichtbaren Universums auf die Größe eines Quarks komprimiert), wird die Gravitation abstoßend und das Universum „prallt zurück". Es dehnt sich plötzlich wieder schnell aus! Ein neues Universum ist geboren und ein neuer Urknall entsteht. Vielleicht eines der hoffnungsvollsten Szenarien, oder was meinst du? Was immer geschehen wird, liegt so weit in der Zukunft, dass wir bis dahin wahrscheinlich sowieso alle verschwunden sein werden. Aber wer weiß, was die Zukunft noch so alles bringt?

↗[5]: *„Die Allgemeine Relativitätstheorie" auf Seite 121*
↗[6]: *„Quantengravitation" auf Seite 283*
↗[7]: *„Vor dem Urknall" auf Seite 279*


Der Lange
TSHÖ
TSCHAU!
WIEDERSEHEN
TSCHÜSSCHEN
AUF WIEDERSEHEN, DUNKLE MATERIE
AU REVOIR, MATHE
TSCHÜSSIKOWSKI, HIGGS-FELD
TSCHÖ, NEUTRINOS
TSCHÖ, NACHTHIMMEL
DAS ENDE DES UNIVERSUMS LIEGT IN SO FERNER ZUKUNFT, DASS WIR GENUG ZEIT HABEN UNS ZU VERABSCHIEDEN, UND ZWAR VON JEDEM...
...UND ALLEM.
CIAO, WELLENFUNKTION!
BIS DENNE, RAUMZEIT
TSCHAU, CMB
Ciao, Licht
TSCHÜSSIKOWSKI, SCHWERKRAFT
MACH'S GUT, INFLATION
WIEDERSEHEN, BESCHLEUNIGER
ARRIVIDERCI, MILCHSTRAßE!


ABSCHIED
PICCOLO
TSCHÖ, CARTOONS
TSCHÖ, SCHWARZE LÖCHER
CIAO, WURM-LÖCHER
TSCHAU, SONNE!
TSCHÜSSCHEN, KERNE!
WIEDERSEHEN, STRINGS
WENN ES EUCH WIRKLICH GIBT!
TSCHÜSS, EMMY
TSCHÜSS, MAXWELL
TSCHÜSS, ERWIN
TSCHÜSS, FREUNDE
TSCHÜSS, PLANCK-SKALA!
10^{-35}
TSCHÜSS, PHOTONEN
DANKE, SCHWACHE KERNKRAFT
ARRIVIDERCI, EXTRA-DIMENSIONEN
AU REVOIR, ELEKTRONEN
CIAO, STARKE KERNKRAFT
ReeiiB!
AUF BALD, ZEIT.
ACH, ICH HASSE TRÄNENREICHE ABSCHIEDE!
TSCHÜSSCHEN, MATERIE!
TSCHÖ, UP
TSCHÖ, DOWN
Hilfe


...und was dann?


Hallo, Singularität
...wollen wir's nochmal versuchen..?