

Bogdan Povh

Von den Tiefen des Alls in den Mikrokosmos

Ein Streifzug
durch die moderne Physik



Springer

Von den Tiefen des Alls in den Mikrokosmos

Bogdan Povh

Von den Tiefen des Alls in den Mikrokosmos

Ein Streifzug durch die moderne Physik



Springer

Bogdan Povh
Max-Planck-Institut für Kernphysik
Heidelberg, Deutschland

ISBN 978-3-662-50266-2
DOI 10.1007/978-3-662-50267-9

ISBN 978-3-662-50267-9 (eBook)

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© 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

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer ist Teil von Springer Nature
Die eingetragene Gesellschaft ist Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg

Vorwort

Die Naturwissenschaft beschreibt und erklärt die Natur nicht einfach so, wie sie „an sich“ ist. Sie ist vielmehr ein Teil des Wechselspiels zwischen der Natur und uns selbst.

Werner Heisenberg

Drei Minuten nach dem Anfang der kosmologischen Zeitrechnung gab es im Universum nur Wasserstoff, Helium, geheimnisvolle dunkle Materie und viel Energie. Noch dreimal mussten Wasserstoff und Helium in Sternen verbrennen, um den Staub durch Mischung der Elemente zu synthetisieren, aus dem die Erde besteht. Die Sonne lieferte die notwendige Energie, um das Leben, das Wasser und die Atmosphäre zu ermöglichen, die die Erde in ihrer heutigen Form prägen. Aus diesem kosmischen Staub besteht auch der Mensch, der gerne verstehen will, ob es eine kosmische Formel gibt, die zu seiner Existenz geführt hat. Dabei kann es sein, dass andere Wesen auf erdähnlichen Planeten leben oder er alleine in unserem Universum ist. Aber die physikalischen Gesetze erlauben auch, dass unser Universum nur eines von vielen Universen ist und das Entstehen des Menschen nicht nur eine biologische Evolution, sondern auch eine kosmische Evolution verlangt.

Um die Frage nach unserer Herkunft stellen zu können, mussten wir den Weg über die Erforschung der physikalischen Gesetze, erst des Sonnensystems, dann der Atome, Kerne und ihrer Bausteine beschreiten. Mit der Erforschung der elementaren Bausteine der Materie haben wir realisiert, dass deren Physik und die Physik des früheren Universums eng verknüpft sind. Die Gesetze der Physik beschreiben nicht nur die Natur und das Universum, sie sagen deren Entwicklung schlüssig vorher. Daher können wir die Entwicklung des Universums von Anfang an verfolgen. Was vor diesem Anfang war und warum dieser Anfang die in diesem Buch beschriebene Form des Universums verursacht hat, bleibt uns bisher oder gar für immer verschlossen.

Das Bild der täglichen Welt wird von unserem Gehirn mit den Informationen, die unsere Augen und andere Sinnesorgane aufnehmen, geformt. Das ist ein sehr qualitatives und subjektives Bild der Welt. Die Vermessung der Welt liefert neue quantitative Informationen über sich, die zu einem verfeinerten Bild der Natur führen und die in der Natur herrschenden physikalischen Gesetze enthüllen. Mit immer größeren Teleskopen sehen wir tiefer und tiefer in das All, mit den immer größer werdenden Beschleunigern sehen wir immer tiefer und tiefer in den Mikrokosmos. Um aus den Informationen, die Teleskope und die Beschleuniger liefern, ein Bild der Natur zu bekommen, müssen menschliche Gehirne arbeiten. Das Buch beschreibt das Wechselspiel zwischen dem Experiment und uns in der Bemühung, die physikalische Welt und die in ihr herrschenden Gesetze zu verstehen. Deswegen wird im Buch erst das Experiment und dann die Deutung präsentiert.

Die Physik ist eine der bestimmenden Kräfte in der modernen Welt. Dies betrifft unsere Weltanschauung wie auch die politischen Diskurse über die Energie, das Weltklima und die Ethik. Das Buch will das Hintergrundwissen vermitteln, um die aktuellen Diskurse besser zu verstehen und daran teilhaben zu können.

Die Anregung, dieses Buch zu schreiben, wie auch den Vorschlag des Titels hat mir Frau Dr. Vera Spillner, damals noch beim Springer-Verlag, gegeben. Den Untertitel hat Frau Margit Maly vom Springer-Verlag beigetragen. Bei der Formulierung von Vorwort und Epilog hat mir mein Kollege Thomas Walcher geholfen. Für die ersten Textkorrekturen und die Herstellung der Bilder bedanke ich mich bei Herrn Baptist Piest, Patrick Froß und Sebastian Kebrich. Zwei Wirtschaftsprofis, Wolfram Sutter und Godehard Wackenhut, haben getestet, ob das Buch für Nichtnaturwissenschaftler geeignet ist. Besonderen Dank schulde ich dem Lektor, Herrn Bernhard Gerl, der mit viel Mühe den trockenen Text aufgelockert und die Untertitel mit einprägsamen Erweiterungen ergänzt hat. Als Emeritus des Max-Planck-Instituts für Kernphysik genieße ich dessen volle Unterstützung bei meiner Arbeit.

Heidelberg 2016

Bogdan Povh

Inhaltsverzeichnis

1	Freier Fall – von den Anfängen der Astronomie bis hin zur dunklen Energie	1
1.1	Galilei und die Erdanziehung	9
1.2	Newton und die Kraft – was hat ein Apfel mit der Gravitation zu tun?	12
1.3	Die Kepler'schen Gesetze – wie der Drehimpuls die Bahnen der Planeten bestimmt	22
1.4	Planeten, kinetische und potentielle Energie	27
1.5	Aufbau der Milchstraße – Betrachtung des großen Ganzen	30
1.6	Determinismus und deterministisches Chaos – was können wir über die Bewegung eines Systems vorhersagen?	36
1.7	Raum, Zeit und Raumzeit – wann und wo wir sind	39
1.8	Masse und Energie sind äquivalent	53
1.9	Einstins allgemeine Relativitätstheorie – wie Massen die Raumzeit krümmen	56
1.10	Gravitationswellen – die Raumzeit raschelt	60
1.11	Schwarze Löcher	63
1.12	Dunkle Materie – das unbekannte, schwere Etwas	65
1.13	Dunkle Energie – die finstere Unbekannte	69
1.14	Zusammenfassung	70

2

Atome – von der unteilbaren Kugel

zum quantenmechanischen System	71
2.1 Kathodenstrahlen – die Entdeckung der ersten Elementarteilchen	75
2.2 Photonen – Wellen auf dem Weg zum Teilchen .	81
2.3 Rutherfordstreuung – die Entdeckung des Kerns	85
2.4 Wasserstoffatom – sein einfacher Aufbau hilft zu verstehen	88
2.5 De Broglie – Elektronen sind Wellen	92
2.6 Schalenmodell – wie größere Atome aufgebaut sind	98
2.7 Heisenberg'sche Unschärferelation – man kann nicht alles wissen	100
2.8 Quantenelektrodynamik – Pingpong mit virtuellen Teilchen	110
2.9 Atome direkt beobachten – der Laser als Kühlmittel	115
2.10 Zusammenfassung	118

3

Atomkerne – was Protonen und Neutronen

zusammenhält und spaltet	121
3.1 Nukleonen und Kerne – zusammen ist es leichter	123
3.2 Fusion – warum die Sonne scheint	130
3.3 Synthese schwerer Elemente – wir sind Sternen- staub	135
3.4 Radioaktiver Zerfall – wie aus Großem Kleines wird	140
3.5 Neutrinos – Boten aus der Sonne und der Erde .	144
3.6 Kernspaltung – wie gewaltige Energien freigesetzt werden	146
3.7 Neutronensterne – riesige Transurane	151
3.8 Strahlenbelastung – Radioaktivität gehört zu unserer Welt	152
3.9 Zusammenfassung	155

4	Unser Planet – wie ein Wohnort im All entsteht	157
4.1	Entstehung des Sonnensystems – aus Chaos wird Ordnung	159
4.2	Thermodynamik – Energie gibt es nicht geschenkt	164
4.3	Erdklima – wir leben in einem Treibhaus	170
4.4	Selbstorganisation – wie wir zu verstehen lernen	174
4.5	Exoplaneten – sind wir allein?	178
4.6	Zusammenfassung	181
5	Quarks und Leptonen – der Blick tief in die Materie	183
5.1	Ära der Beschleuniger – Mikroskope, die Unteilbares zerlegen	188
5.2	DESY – Quarks kann man beobachten	194
5.3	Quantenchromodynamik – warum Quarks unzertrennlich sind	196
5.4	GUT – die Vereinheitlichug der Kräfte	201
5.5	Der Higgs-Mechanismus – wie alles Masse bekommt	205
5.6	Large Hadron Collider – gebaut für die Suche nach Higgs	209
5.7	Zusammenfassung – Standardmodell der Elementarteilchen	211
6	Expandierendes Universum – die Raumzeit dehnt sich	213
6.1	Rotverschiebung – wie groß ist das Universum? . .	216
6.2	Einstein, Friedmann, Lemaître – auf dem Weg zum Uratom	218
6.3	Der Anfang – Steady State gegen Big Bang	220
6.4	Hintergrundstrahlung – die Babyfotos des Universums	225
6.5	Indizienkosmologie – indirekte Bestätigung des Urknalls	228
6.6	Zusammenfassung – das Urknallmodell	232

XII Von den Tiefen des Alls in den Mikrokosmos

7 Epilog	237
Glossar	245
Literatur	255
Namens- und Sachverzeichnis	257

1

Freier Fall – von den Anfängen der Astronomie bis hin zur dunklen Energie

Das Buch der Natur ist mit mathematischen Symbolen geschrieben.

Galileo Galilei

Galilei hat als Erster die Erdbeschleunigung untersucht, Newton hat den Begriff der Kraft eingeführt und die erste Gravitationstheorie formuliert. Einstein hat die Gravitation durch die Einführung seiner Relativitätstheorie als intrinsische Eigenschaft der Raumzeit neu interpretiert.

Die Astronomie gegen Ende des 16. Jahrhunderts hat sich kaum von den Vorstellungen der Antike unterschieden. Das Weltbild der damaligen Zeit sah wie folgt aus: Die Sonne und der Mond kreisten brav um die Erde, ebenso die Planeten, die jedoch in Pirouetten tanzten, und die Fixsterne pendelten im Jahreszyklus hin und her. Diese Vorstellung

wird **geozentrisch** genannt – die Erde als Mittelpunkt des Universums. Die Hauptaufgabe der Gelehrten war die Erstellung des Jahreskalenders. Dieser war nämlich von großer Wichtigkeit für die Landwirtschaft und die Zeitpunkte der religiösen Feste. Neben dem Tages- und Mondzyklus konnte man anhand der Lage der Erde in Bezug auf die Fixsterne die Länge eines Jahres bestimmen. Man stellte fest, dass ein Jahr um etwa ein Viertel eines Tages länger als 365 Tage dauert. Schon die Assyrer und Ägypter haben aus diesem Grund das Schaltjahr eingeführt.

Besonders eindrucksvoll für die Menschen war, dass die Gelehrten die Mond- und Sonnenfinsternisse exakt vorhersagen konnten. Deren Berechnung war damals im geozentrischen System einfacher als im **heliozentrischen**, in welchem sich die Erde um die Sonne dreht. Der Winkel zwischen den Ebenen, in denen sich die scheinbaren Bahnen der Sonne und des Mondes, wie man sie von der Erde aus betrachtet, befinden, beträgt 6 Grad. Durch die Betrachtung des Zeitverlaufs der relativen Lage der Sonne und des Mondes kann man die Finsternis voraussagen. Rechnet man aber mit der Sonne im Zentrum, dann muss man berücksichtigen, dass sich die Erde um die Sonne dreht und der Mond um die Erde. Dann müsste man ausrechnen, wann alle drei Planeten sich in einer Linie befinden. Mit den heutigen verfügbaren Rechnern ist das kein Problem mehr. Aber damals wäre eine Vorhersage im heliozentrischen System unmöglich gewesen. Griechen haben die Buchstaben des Alphabets als ihre Zahlschrift benutzt. Mit dieser können aufwändige Rechnungen gar nicht bewältigt werden.

Die Anfänge der Astronomie in der Antike gehen zurück in das 3. Jahrtausend v. Chr. in Mesopotamien. Angefangen

bei den Sumerern, wurde sie von den Assyrern und Babylonien weitergeführt. Die Griechen haben die mesopotamische Tradition übernommen und die Astronomie weiter entwickelt. Der altgriechische Philosoph Thales von Milet hat in Mesopotamien Astronomie gelehrt. Von ihm ist vor allem seine Vorhersage der Sonnenfinsternis am 28. Mai im Jahre 585 v. Chr. bekannt. Diese Finsternis hat vor allem durch folgende Legende Bekanntheit erlangt: Die zwei iranischen Völker der Lyder und Meder führten schon fünf Jahre Krieg gegeneinander. Als während der Schlacht die Finsternis hereinbrach, hatten sie in dem Glauben, dass es sich um ein Zeichen Gottes handelte, einen langfristigen Frieden beschlossen.

Der Wahrheitsgehalt dieser Geschichten über die Voraussage des Thales und der Schlacht am Tag der Finsternis wird aus heutiger Sicht allerdings nicht sehr hoch eingeschätzt. Vermutlich konnte Thales lediglich das Jahr anstelle des genauen Datums vorhersagen.

Nicht nur die Sonne, der Mond und die Planeten, sondern auch die **Milchstraße** (Abb. 1.1) wurde in der griechischen Mythologie mit einer eigenen Legende geehrt. Zeus hat seinen Sohn Herakles, den er mit einer Sterblichen gezeugt hatte, seiner schlafenden Frau Hera zum Stillen gegeben. Dadurch sollte Herakles göttliche Kraft erlangen. Das Kind sog aber so ungestüm, dass Hera aus ihrem Schlaf erwachte. Als sie sah, dass sie ein fremdes Kind stillte, hat sie es von sich weggestoßen. Ungeschickterweise ist dabei die Milch auf den Himmel gespritzt, die seitdem als Milchstraße am klaren Nachthimmel zu sehen ist. Noch bis 1929 hat man geglaubt, dass die Milchstraße das gesamte Universum sei.



© Serge Brunier

Abb. 1.1 Eine Aufnahme der Milchstraße von dem Observatorium La Silla in Chile. Das aus mehreren Teleskopen bestehende Observatorium wird von der Europäischen Südsternwarte (ESO) betrieben. La Silla liegt etwa 600 km nördlich von Santiago de Chile auf einer Höhe von 2400 Metern über dem Meeresspiegel. Mit freundlicher Genehmigung von ESO/S. Brunier, All Rights Reserved

Gegen Ende des 16. Jahrhunderts war eine wesentliche Neuigkeit zu verzeichnen. Im Vatikan hat man gemerkt, dass die Ostertermine nicht mehr zu den Angaben im Neuen Testament passten und zu spät im Jahresverlauf auftraten. Mit dem vierjährigen Schaltjahr gibt es in etwa hundert Jahren einen Tag Überschuss. Papst Gregor XIII. hat deshalb den alten julianischen dem nach ihn benannten gregorianischen Kalender abgelöst. Doch damit wurde das Problem nicht gelöst.

Es ist erstaunlich, wie wenig der reichhaltigen wissenschaftlichen Errungenschaften aus Alexandria die tausend Jahre Mittelalter in Europa überlebt haben. Schon im alten Athen zu Zeiten Platons, Aristoteles und Philolaos wurde über die geozentrische und heliozentrische Hypothese diskutiert. Wegen fehlender Messungen konnte man keine Entscheidung zwischen diesen Hypothesen treffen, sondern nur die Empfehlung geben, bessere Messdaten zu bekommen.

In Alexandria, der Hochburg der wissenschaftlichen Errungenschaften in der Antike, wusste man schon, dass die Erde rund ist und dass sie sich um die Sonne dreht. Diese Erkenntnis wird dem Astronomen Aristarchos von Samos (310–230 v. Chr.) zugeschrieben. Eratosthenes von Kyrene (274/273–194 v. Chr.) hat eine für heutige Begriffe exzellente Bestimmung des Erdumfangs, nämlich 40.000 km, und des Abstandes Sonne-Erde, 130 Millionen km, gemacht. Aus diesen Zahlen war es für Aristarchos ein Leichtes, die Abstände des Mondes zur Erde und der Planeten zur Sonne anzugeben [Lel10]. Es klingt überraschend, dass man heute so genau in unseren Messgrößen die damaligen Messergebnisse angeben kann. Dies ist möglich, da die Alexandriner damals ihre Längen in Stadien, entsprechend der Länge eines Stadions, dessen Länge uns heute noch bekannt ist, angegeben hatten.

Nach der Blütezeit der Naturwissenschaften in Alexandria zeigten sich in den ersten Jahrhunderten n. Chr. Ermüdungserscheinungen. Den endgültigen Schluss der hellenistischen Periode dieser Stadt aber stellte die Besetzung Ägyptens durch die Araber im Jahr 642 n. Chr. dar.

Nach dem Zerfall Alexandrias hat man sich in Europa ausschließlich mit Glaubensfragen beschäftigt. Erst im 16. Jahrhundert fing man wieder damit an, den Nachthimmel und die Sterne eingehender zu studieren. Der im heutigen Thorn (Polen) geborene preußische Domherr Nikolaus Kopernikus (1473–1543) hat, wahrscheinlich ohne Kenntnisse der Arbeiten von Aristarchos von Samos, das heliozentrische System neu entdeckt. Sein Buch *De revolutionibus orbium coestium* (lateinisch für *Über die Umschwünge der himmlischen Kreise*, 1543) gehört zu den bedeutendsten wissenschaftlichen Veröffentlichungen der damals beginnenden Neuzeit. Die Erde und der Mensch sind nicht mehr das Zentrum des Universums. Es ist verständlich, dass es starke Opposition gegen das neue Weltbild gab, und das besonders seitens der Kirche. Das neue Weltbild war nicht mit der Genesis des Alten Testaments in Einklang zu bringen.

Johannes Kepler (1571–1630) zeigte mithilfe der umfangreichen und präzisen Dokumentation der Planetenbewegungen des herausragenden Astronomen Tycho Brahe (1546–1601), dass diese elliptisch um die Sonne verlaufen.

Neben diesen Persönlichkeiten war der bedeutsamste Naturforscher dieser Zeit sicherlich Galileo Galilei (1571–1642), seines Zeichens Physiker, Mathematiker, Astronom und Philosoph (Abb. 1.2).

In die Geschichte eingegangen ist seine Kontroverse mit Papst Urban VIII. Galilei war ein Befürworter des heliozentrischen Systems nach Kopernikus. Als ein gläubiger Katholik war er der Ansicht, dass die Kirche die neuen Erkenntnisse akzeptieren und das heliozentrische System als das wahre Weltbild akzeptieren solle. Er meinte auch, dass die heilige

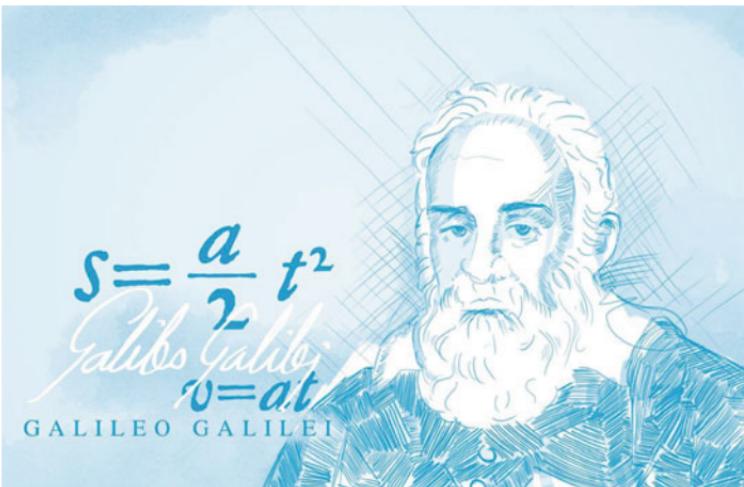


Abb. 1.2 Galilei hat mit einem Experiment gezeigt, dass sich unter der Anziehung der Erde die Körper gleichförmig beschleunigt bewegen. Das bedeutet, die Geschwindigkeit v wächst linear mit der Zeit t , in Formeln ausgedrückt $v = a \cdot t$, wobei a die Beschleunigung ist. Bei der gleichförmig beschleunigten Bewegung nimmt die zurückgelegte Wegstrecke s mit der Zeit quadratisch zu. Galilei konnte auch zeigen, dass die Beschleunigung eines Körpers unabhängig von seiner Masse ist. Zeichnung Jakob Piest, Springer-Verlag Berlin Heidelberg

Schrift nicht wörtlich ausgelegt werden solle. Für seine Bemühungen, die kirchliche Autoritäten von der Richtigkeit seines Weltbilds zu überzeugen, bekam er 1616 die Ermahnung, er solle von der Verbreitung des kopernikanischen Weltbilds absehen. Erst nach der Veröffentlichung seines Buches *Dialogo*, in dem er das kopernikanische System vertrat, fühlte sich Papst Urban VIII persönlich betroffen und Galilei wurde von der römischen Inquisition verurteilt. Der Streit mit dem Papst um das damalige Weltbild ging noch

mal glimpflich aus – er wurde zu lebenslänglichem Hausarrest verurteilt. Seine bedeutendste Arbeit über die Mechanik und die beschleunigte Bewegung wurde in der Zeit seines Hausarrests geschrieben.

Ein schlimmeres Schicksal ereilte Galileis Zeitgenossen Giordano Bruno (1548–1600), der auf dem Scheiterhaufen endete. Er hat nicht nur das heliozentrische System vertreten, sondern auch behauptet, dass die restlichen Sterne wie unsere Sonne Planeten haben und ebenso wie die Erde mit Menschen besiedelt sind. Es ist bis heute unentschieden, wer von beiden bei der zweiten Frage Recht behalten soll, die päpstliche Inquisition oder Giordano Bruno. Die Suche nach extrasolaren Planeten (Exoplaneten) hat gerade erst begonnen.

Galilei baute ein für damalige Verhältnisse exzellentes Fernrohr, mit dem er die vier sogenannten *galileischen Monde* des Jupiter – Io, Europa, Ganymed und Kallisto – entdeckt hatte und sehen konnte, dass die Monde um den Jupiter und nicht um die Erde kreisen. Dies stand im Widerspruch zum geozentrischen Weltbild. Wie tief das scholastische Denken bei den damaligen Intellektuellen verwurzelt war, zeigt die Tatsache, dass sich die Professoren in Florenz geweigert hatten, durch sein Fernrohr zu schauen. Sie wussten, dass nicht sein kann, was nicht sein darf.

Mit seinem Fernrohr hat Galilei auch gesehen, dass das Band der Milchstraße aus vielen Sternen besteht. Neben seinen astronomischen Erfolgen war er auch der erste, der beobachtete, dass ein Pendel mit einer konstanten Frequenz schwingt, was zur Entwicklung der modernen Uhren geführt hat. Für die Physik werden besonders seine systema-

tischen Experimente zur Untersuchung der Bewegung von Körpern unter dem Einfluss der Erdanziehung als wichtig erachtet.

1.1 Galilei und die Erdanziehung

Die Gravitation ist sicherlich die erste Wechselwirkung, mit der man im Leben leider meist auf schmerzhafte Weise konfrontiert wird. Doch bis zum Ende des 16. Jahrhunderts haben die Gelehrten Aristoteles (384–322) geglaubt, der meinte:

Körper von unterschiedlichem Gewicht fallen mit Geschwindigkeiten, die im selben Verhältnis zueinander stehen wie ihre Gewichte.

Zu dem großen griechischen Philosoph Aristoteles passt folgendes Zitat von dem Mathematiker und Philosophen Bertrand Russel:

Aristoteles beharrte darauf, dass Frauen weniger Zähne hätten als Männer. Obwohl er zweimal verheiratet war, kam er nie auf den Gedanken, seine Behauptung anhand einer Untersuchung der Münster seiner Frauen zu überprüfen.

Das passt auch zu den Scholastikern, die mehr Aristoteles als eigenen Augen geglaubt haben.

Die ersten konkreten Messungen der beschleunigten Bewegung im Gravitationsfeld der Erde wurden jedoch erst Anfang des 17. Jahrhunderts von Galilei durchgeführt. Da-

zu benutzte er die schiefe Ebene, die in Abb. 1.3 dargestellt ist. Auf dieser ließ er Kugeln rollen und maß die Zeit, die sie brauchten, um die Ebene herabzurollen. Die schiefe Ebene war mit 2 bis 3 Grad nur leicht gegenüber dem Boden geneigt, sodass die Beschleunigung nicht zu groß war, um mit seiner langsamem Uhr die Zeitabhängigkeit der beschleunigten Bewegung zu messen.

Die Zeit hat er mit einem gleichmäßig schwingenden Pendel gemessen und dabei die Positionen der Kugeln bei den festen Zeitabständen 1, 2, 3, usw. bestimmt. Dabei stieg der zurückgelegte Weg der Kugeln unabhängig von ihrem Gewicht proportional zum Quadrat der Zeit an: $s = a/2 \cdot t^2$. Galilei hatte damit die erste mathematische Formulierung eines physikalischen Gesetzes gefunden, die aus einem Experiment hervorging!

Galilei hat erkannt, dass alle Körper, leichte wie schwere, die gleiche Beschleunigung im Erdfeld erfahren. Er war auch der Meinung, dass sich Körper auf einer horizontalen Ebene mit konstanter Geschwindigkeit ewig weiterbewegen würden, wenn es keine Reibung gäbe. Diese experimentellen Erkenntnisse bildeten die Basis für die Newton'sche Definition der Kraft, auf der Newton später die Mechanik begründete. Die große Bedeutung Galileis für die Naturwissenschaften ist die grundlegende Erkenntnis, dass man nur durch systematisches Experimentieren und Messen den Gesetzen der Natur auf den Grund kommen kann.

Den freien Fall, die beschleunigte Bewegung eines frei-fallenden Körper, direkt zu messen ist nicht einfach, wie wir kurz schildern. Die Geschwindigkeit misst man z. B. in Metern pro Sekunde [m/s], die Zeit in Sekunden [s] und die Beschleunigung in Metern pro Sekunde zum Quadrat



Abb. 1.3 Die Apparatur, die Galilei benutzte, um die beschleunigte Bewegung im Gravitationsfeld zu messen [VC09]. Eine direkte Messung des freien Falls konnte er nicht durchführen, da seine Uhr, wahrscheinlich ein Sekundenpendel, sowie die Reaktionsgeschwindigkeit zu langsam waren. Als Ausweg wählte er eine schiefe Ebene mit geringer Neigung, bei der die Geschwindigkeiten so langsam und die zu messenden Zeitintervalle so groß waren, dass er sie messen konnte. Um die Reibung zu minimieren, benutzte er eine Kugel, die von einer Rille an zwei Punkten geführt wurde, was links im Querschnittsbild zu sehen ist. Der einfache und effektive Aufbau dieser Apparatur bescheinigt Galileis experimentelle Genialität. Mit freundlicher Genehmigung von Roberto Vergara Caffarelli, „Galileo Galilei and Motion“

[m/s²]. Wenn sich ein Körper gleichförmig-beschleunigt bewegt, beschreitet er nach Abb. 1.2 in der Zeit t den Weg $s = \frac{1}{2}a \cdot t^2$. Beim freien Fall bekommt die Beschleunigung den Wert der Erdbeschleunigung g , also $a = g$. Der gemessene Wert von der Erdbeschleunigung beträgt 9,81 m/s². Das bedeutet, dass ein frei fallender Stein in der ersten Se-

kunde einen Weg von etwa $s \approx 5\text{ m}$ zurücklegt. Nach zwei Sekunden sind es schon 20 Meter. Kein Wunder also, dass man bis Galilei und noch lange nach ihm keine Vorstellung hatte, was beim freien Fall passiert. Es gab keine geeigneten freistehenden 20 Meter hohen Gebäude und keine Uhren, um Sekunden messen zu können. Warum uns die Beschreibung des aristotelischen freien Falls intuitiv näher liegt als die Galileis, kommentieren wir noch einmal, wenn wir die Gleichheit von der trügen und schweren Masse besprechen (siehe Abschn. 1.2).

Galilei war, wie schon erwähnt, Naturwissenschaftler und Philosoph. Dass wir ihn als den ersten Experimentalphysiker der Geschichte einstufen, liegt daran, dass er das physikalische Problem erkannt und in der Folge das richtige Experiment dazu erdacht hat. Der neue Zugang zu einer Naturforschung durch Experimente kennzeichnet eine Revolution im Denken der Forscher der Renaissance. Bis dahin bildeten rein qualitative Beobachtungen die Basis der Forschung, die grundsätzlich jedoch nicht quantifiziert oder durch Messungen untermauert wurden.

1.2 Newton und die Kraft – was hat ein Apfel mit der Gravitation zu tun?

Es hat ein halbes Jahrhundert gedauert, bis Galileis Erkenntnisse von Isaac Newton (1643–1727) aufgegriffen und mit dem Konzept der Kraft in einer physikalischen Theorie gedeutet wurden. Im alltäglichen Leben wird das

Wort Kraft für viele, besonders körperliche Anstrengungen benutzt. Newton hat eine physikalische Definition der Kraft eingeführt, welche die Dynamik der Sterne und Planeten, aber auch die Dynamik der physikalischen Objekte in der Alltagswelt beschreibt – zumindest wenn man die Reibung geschickt einbezieht. Newton fasste seine Theorie der Mechanik in seinem 1687 erschienenem Werk *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* in drei grundlegende Gesetze zusammen, den sogenannten *Axiomen*. In Abb. 1.4 ist das zweite Axiom, das *Aktionsprinzip*, dargestellt: Die Kraft F ist das Produkt aus Masse m und Beschleunigung a . Dies beschreibt allgemeine Kräfte, also auch die Gravitationskraft. Man sagt, die Anziehungskraft der Erde F gibt dem Körper der Masse m eine Beschleunigung a . Im Falle der Erdanziehung können wir a bekannterweise wieder mit $a = g = 9,81 \text{ m/s}^2$ gleichsetzen und direkt die Gewichtskraft ausrechnen, die ein Körper der Masse m im Gravitationsfeld der Erde erfährt. Die Masse, die in der Definition der Kraft steckt, nennen wir die *träge Masse*. Die träge Masse gibt den Widerstand eines Körpers seine Bewegung zu ändern an, wenn auf ihn eine Kraft wirkt.

Dies führt uns zum ersten Axiom, dem sogenannten *Trägheitsprinzip*: Wenn keine Kraft auf den Körper wirkt, bewegt er sich mit einer konstanten Geschwindigkeit oder ruht. Heute sagen wir lieber: Der Impuls $p = m \cdot v$ des Körpers bleibt konstant, wenn keine Kraft auf ihn wirkt. Dies ist auch mit dem zweiten Axiom vereinbar, denn wenn wir für F sehr kleine Werte einsetzen, sehen wir, dass entsprechend auch die Beschleunigung a sehr klein werden muss. Gesetzt den Fall, dass keine Kraft wirkt, wird also auch $a = 0$. Da Beschleunigung lediglich die Änderung

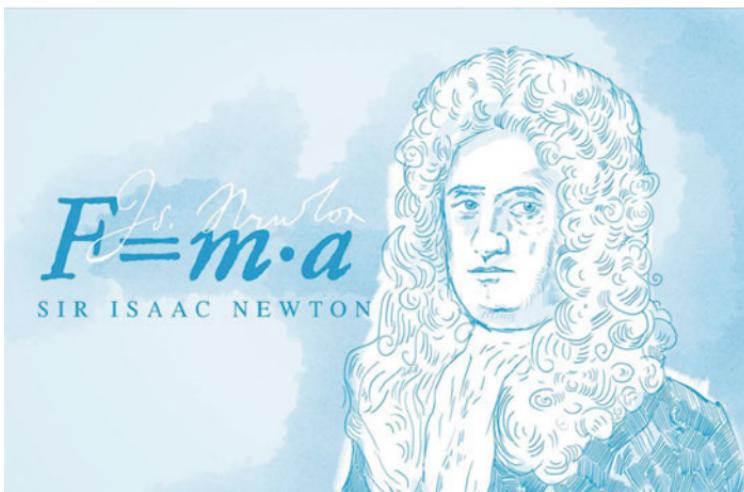


Abb. 1.4 Isaac Newton, einer der wichtigsten Physiker der Geschichte, hat das Konzept der Kraft so formuliert, dass man die Dynamik der wechselwirkenden Körper quantitativ behandeln kann. Er hat die Kraft für die damals einzige bekannte **Wechselwirkung**, die Gravitation, angewendet. Sie ist aber die Grundlage aller bekannten Wechselwirkungen, wie später gezeigt wird. Newton war auch ein genialer Mathematiker. Soweit wir wissen, hat er zeitgleich und unabhängig von Leibniz die Differentialrechnung entwickelt. Zeichnung Jakob Piest, Springer-Verlag Berlin Heidelberg

der Geschwindigkeit beschreibt, ändert diese sich nicht mehr, muss also konstant (oder null) bleiben.

Noch eine kurze Bemerkung zur Bedeutung des eben eingeführten Impulses: Da der **Impuls** $p = m \cdot v$ eine mit der Geschwindigkeit v gewichtete Masse m ist, können wir ihn uns anschaulich als *bewegte Masse* vorstellen. Den Unterschied zwischen großem und kleinem Impuls können wir uns leicht vorstellen: Es macht einen Unterschied, ob uns

ein Regentropfen mit 30 km/h trifft oder ob wir mit einem 30 km/h schnellen Auto zusammenstoßen. Den entscheidenden Unterschied dieser Stoßprozesse macht nicht die Geschwindigkeit – die ist in beiden Fällen gleich. Die ungleichen Massen der betrachteten Objekte sind hier wichtig. Deshalb ist der Impuls, der sowohl Masse als auch Geschwindigkeit einbezieht, bei der Beschreibung von Stößen besonders nachvollziehbar.

Das letzte Axiom beschreibt das *Reaktionsprinzip*. Wirkt ein Körper mit einer Kraft auf einen zweiten ein, wirkt auch eine ebenso große, entgegengesetzte Kraft vom zweiten auf den ersten Körper. Oder kurz und bündig in Newton'schen Worten: Actio ist gleich Reactio.

Wenn ich beispielsweise einen Koffer auf Rollen mit einer konstanten Geschwindigkeit vor mir herschiebe, übt mein Körper eine Kraft auf den Koffer aus. Nach dem Reaktionsprinzip muss nun eine ebenso große Kraft auf mich wirken. Diese wirkt in diesem Beispiel etwa aufgrund der Reibung der Räder. Da die Kräfte entgegengesetzt gleich sind, heben sich Schiebekraft und Reibungskraft gegenseitig auf und die Summe aller Kräfte auf den Koffer ist null, weshalb er sich nach dem ersten Axiom gleichmäßig fortbewegt.

Da die Theorie der Kräfte die Dynamik der Körper auf der Erde gut beschreiben konnte, hat Newton sich mit seinen Kräften an die Bewegung des Mondes und der Planeten gewagt. Diese Systeme sind aus mathematischer Sichtweise wesentlich einfacher und genauer zu beschreiben als das System aus Koffer und Mensch. Die Himmelskörper unterliegen keiner Reibung, da sie, wie wir heute wissen, im luftleeren Raum schweben und eignen sich damit hervorragend, um die Theorie auf Herz und Nieren zu überprüfen.

1. *Trägheitsprinzip*: Wenn keine Kraft auf einen Körper wirkt, bewegt er sich mit konstanter Geschwindigkeit oder ruht.
 2. *Aktionsprinzip*: Die Kraft F ist das Produkt aus Masse m und Beschleunigung a .
- $$F = m \cdot a$$
3. *Reaktionsprinzip*: Wirkt ein Körper mit einer Kraft auf einen zweiten ein, wirkt auch eine ebenso große, entgegengesetzte Kraft vom zweiten auf den ersten Körper (*Actio gleich Reactio*).

Laut seiner Freunde soll Newton bei der Beobachtung der fallenden Äpfel in seinem Garten auf die Idee gekommen sein, dass die beschleunigte Bewegung des fallenden Apfels und die Bewegung des Mondes um die Erde die gleiche Ursache haben, nämlich die Anziehung durch die Erde. Diese Überlegung ist sinnvoll, wenn man die Anziehung zwischen den Massen Apfel-Erde beziehungsweise Mond-Erde mit einem allgemeinen Gravitationsgesetz beschreiben kann, welches die Kraft zwischen zwei beliebigen Massen liefert. Dieser Sachverhalt ist in Abb. 1.5 schematisch dargestellt [Seg90a].

Die Größe dieser Kraft ist gegeben durch das Produkt der beiden Massen, dividiert durch ihren Abstand zum Quadrat, multipliziert mit einer Naturkonstante, der Gravitationskonstante G . Der Wert der Gravitationskonstante ist $G = 6,673 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2}$.

Die Tatsache, dass die Gravitationskraft zur Masse m proportional ist, klärt auch die Frage, warum alle Körper die gleiche Beschleunigung unter der Erdanziehung erfahren.

Wenn wir einen Stein der Masse m_s in der Hand halten, drückt er auf unsere Hand mit einer Kraft $F = m_s \cdot g$.

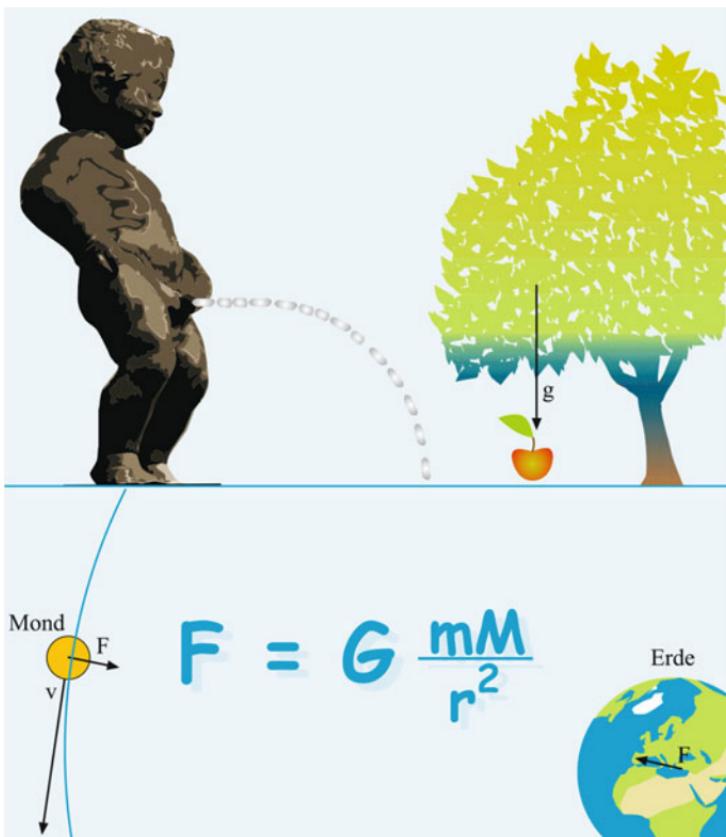


Abb. 1.5 Wie Newton von seinem fallenden Apfel darauf gekommen ist, dass der Mond um die Erde und die Planeten um die Sonne kreisen, wissen wir nicht. Unser Gedankenweg könnte so aussehen: **a** Der Apfel am Baum ruht in Bezug auf den Boden. Er fällt senkrecht mit der Beschleunigung g auf die Erde. **b** Der Manneken Pis von Brüssel zeichnet eine bildschöne Parabel, der Strahl fließt proportional zu der Zeit in horizontaler Richtung und fällt zu Boden mit der Beschleunigung g . **c** Für den letzten Schritt, dass der Mond stabil um die Erde kreist, musste Newton noch das Gravitationsgesetz postulieren, wie wir im Text zeigen. Zeichnung Gernot Vogt, Springer-Verlag Berlin Heidelberg

Da diese Masse die Eigenschaft der Anziehung charakterisiert, nennen wir sie *schwere Masse* m_s . Wenn wir den Stein fallen lassen, dann widersetzt sich der Stein der Kraft der Anziehung mit der *trägen Masse* m_t . Alle Körper fallen mit der gleichen Beschleunigung, was bedeutet, dass die schwere und die träge Masse eines Körpers identisch sind – zumindest gibt es noch keinen Gegenbeweis. Mathematisch könnten wir die beiden Formeln für F gleichsetzen und die Massen wegkürzen, wenn sie gleich sind. Dann bleibt $a = g$ stehen und die Beschleunigung ist unabhängig von den Massen immer gleich. Diese Tatsache ist seit Galilei bekannt, wurde aber auch unzählige Male experimentell bestätigt. Auf der Gleichheit der schweren und der trägen Masse beruht die allgemeine Relativitätstheorie.

Die umständliche Art, mit der Gravitationskonstante zu rechnen, können wir zumindest für den Mond und andere Erdsatelliten umgehen. Bei der Anwendung der Gravitationsformel kann man so tun, als ob die Gesamtmasse eines ausgedehnten Körpers im Schwerpunkt konzentriert wäre. Im Fall der Erde ist das in ihrer Mitte. Im Abstand des Erdradius erteilt sie Körpern an der Oberfläche der Erde die Beschleunigung $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. Der Mond ist 60 Erdradien von der Erde entfernt. Die Beschleunigung des Mondes wegen der Erdanziehung ist dann um einen Faktor 60 mal 60, d. h. 3600 mal kleiner als die Anziehung auf der Erdoberfläche. Sie beträgt damit etwa 3 mm/s^2 zum Quadrat. Dabei umkreist der Mond die Erde in etwa 27 Tagen. Bei einer Entfernung von 60 Erdradien bedeutet das, dass er mit 900 m/s um die Erde rast. Gäbe es keine Erdanziehung, würde sich der Mond tangential entfernen. Wegen der Erd-

anziehung fällt er aber gleichzeitig mit einer Beschleunigung von 3 mm/s^2 in Richtung Erde, was gerade notwendig ist, damit er sich auf einer stabilen Umlaufbahn befindet und näherungsweise eine Kreisbahn um die Erde zieht.

Newton war, wie schon erwähnt, auch ein exzelterner Mathematiker. Er war in dieser Zeit der einzige, der zeigen konnte, dass die Umlaufbahnen der Planeten unter dem Einfluss der Gravitation, so wie Kepler es gefunden hat, nicht nur Kreise, sondern auch Ellipsen beschreiben können. Der Erfolg von Newton zeigt, dass die theoretischen Physiker Mathematik als ihr Werkzeug unbedingt brauchen. Um eine theoretische Aussage als richtig zu akzeptieren, muss sie exakt mit Experiment oder Beobachtung übereinstimmen. Exakt bedeutet hier, dass die theoretisch gewonnenen Zahlen innerhalb der Messfehler des Experiments oder der Beobachtung liegen. Die Frage, wieviel mathematisches Werkzeug man als Nichtphysiker braucht, um die Physik zu verstehen, lassen wir hier offen.

Seine Erkenntnisse der Mechanik und der Gravitation hat Newton im Jahre 1687 in seinem Buch *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* publiziert. Aus seiner Korrespondenz erfährt man auch, dass er mit seiner Gravitationstheorie nicht vollkommen zufrieden war. Das Gesetz der Gravitation beschreibt exzellent die Bewegungen der Planeten. Die Frage jedoch, *wie* die Massen miteinander auf große Entfernungen kommunizieren, bleibt unbeantwortet. Unter diesem Gesichtspunkt bleibt Newtons Theorie unvollständig. Diese Frage wurde erst von Albert Einstein mit seiner Gravitationstheorie, der allgemeinen Relativitätstheorie, beantwortet.

Der schnelle Durchbruch von Newtons Gravitationstheorie war dadurch bedingt, dass er zeigen konnte, dass die elliptischen Bahnen der Planeten mit dem Gravitationsgesetz in Einklang stehen. Für seine Arbeit bekam Newton nicht nur von der Fachwelt volle Anerkennung und wurde in England als großer Wissenschaftler gefeiert. Er wurde geadelt und zum Präsidenten der *Royal Society* berufen.

Von Newton lernen wir auch, dass schon damals die Anerkennung, als Erster eine Entdeckungen gemacht zu haben, für die Forscher eine unschätzbarer Bedeutung hatte. Newton hat seine bedeutende Arbeit schon im Jahre 1666 gemacht. In England brach die Pest aus, Cambridge wurde geschlossen, und Newton kehrte in seine ursprüngliche Heimat zurück. In dieser Zeit hat er die **Differentialrechnung** entdeckt, die erst die Berechnung der Bewegungen des Mondes und der Planeten ermöglichte. Über diese Arbeit hat er aber nur im kleinen Bekanntenkreis andeutungsweise berichtet. Sonst hat er sie geheim gehalten. Seine *Principia Mathematica* erschien aber erst drei Jahre nach der Veröffentlichung von Gottfried Wilhelm Leibniz (1646–1716) *Acta Eruditorum*, in welcher er ebenfalls die Differentialrechnung präsentierte. Es folgte der wohl bekannteste Streit um die Priorität der Entdeckung in der Geschichte der Mathematik, der Streit um die Entdeckung der Differentialrechnung. Newton beschuldigte Leibniz, dass er von ihm die Differentialrechnung übernommen habe. Der Streit spaltete die Mathematiker der Insel und des Festlandes noch Generationen nach dem Tod der beiden Kontrahenten. Die beiden hatten sich persönlich nie gekannt, und aus ihrem schriftlichen Nachlass konnte man keine Hinweise bekommen, dass sie je über Differentialrechnung kom-

muniziert hätten. Heute glaubt man, dass sie unabhängig voneinander die Differentialrechnung entdeckt haben.

Nicht nur Leibniz und Newton haben die Differentialrechnung unabhängig voneinander entdeckt. Aus dem Nachlass von Pierre de Fermat (1601–1665) kann man entnehmen, dass auch er schon mit der Differentialrechnung umgehen konnte. Es ist nicht verwunderlich, dass große Entdeckungen etwa gleichzeitig von verschiedenen Leuten gemacht werden. Große Entdeckungen sind noch nie im leeren Raum entstanden, sondern immer im Kontext zu parallelen Entwicklungen in Wissenschaft und Gesellschaft zu sehen.

Auch Newton war nicht ganz alleine, als er seine Gravitationstheorie entwickelte. Um diese Zeit gab es in England schon einige Physiker und Naturforscher, die sich auch gefragt haben, wie der Mond an die Erde und die Erde an die Sonne gekoppelt sind.

Newton hat wahrscheinlich von den Forschungen Robert Hooke (1635–1702) profitiert. Hooke war ein Naturforscher und begabter Experimentator. In der Physik ist er bekannt durch das Hooke'sche Gesetz der Elastizität, in der Biologie führte er den vorläufigen Begriff der Zelle, *cellula*, ein. Er war ruhmbegierig und hat in verschiedenen Bereichen um seine Urheberschaft der Entdeckungen gestritten.

Er war auch der Meinung, dass die Gravitation eine universelle Kraft ist und vermutlich mit dem Quadrat des Abstandes zwischen den Körpern abnimmt. Newton war ihm jedoch weit überlegen, da er mit seinen mathematischen Kenntnissen die Gravitation quantitativ formulieren konnte. Newton hat Hooke nie Anerkennung gegönnt. Nach seinem Tod ist das einzige Gemälde von Hooke in der Roy-

al Society, deren Präsident Newton war, beim Umzug verschollen. Man vermutet, dass sich Newton und seine Freunde aktiv bemüht haben, die Bedeutung von Hooke für die Geschichte der Naturwissenschaften möglichst klein zu halten.

1.3 Die Kepler'schen Gesetze – wie der Drehimpuls die Bahnen der Planeten bestimmt

Die Stärke von Newtons Differentialrechnung war, dass durch sie elegant eine Bewegung mit momentanen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen beschrieben werden kann. Anschaulicher ist die Physik aber mit zusammenhängenden Begriffen darstellbar. Die von Kepler formulierten Gesetze benutzen die Mittelwerte der Geschwindigkeiten und implizit die Mittelwerte der Beschleunigung. Daraus kann man vieles über die Himmelsmechanik lernen, ohne sich in die Differentialrechnung einarbeiten zu müssen.

Das *erste Kepler'sche Gesetz* besagt, dass die Bahnen der Planeten Ellipsen sind, in deren einem Brennpunkt sich die Sonne befindet. Ellipsen werden mathematisch durch die Lage ihrer zwei Brennpunkte charakterisiert. Dies und die anschauliche Bedeutung der Brennpunkte ist in Abb. 1.6 dargestellt. Newtons Theorie konnte noch mehr leisten: Er konnte aus den Differentialgleichungen, die sich nach Anwendung seiner Axiome ergeben, die genaue Form der elliptischen Bahnen der Planeten herleiten.

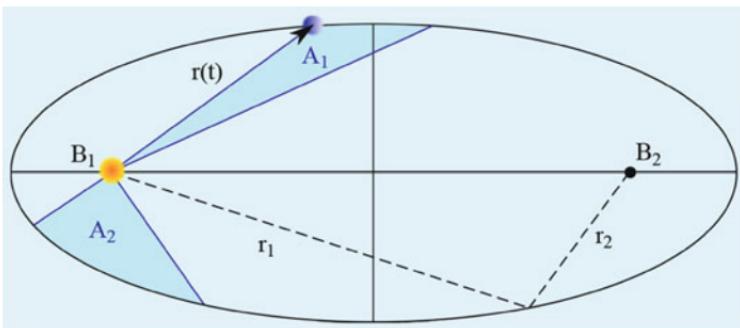


Abb. 1.6 Die Ellipse ist mit dem Kreis verwandt. Die Punkte eines Kreises liegen im Abstand des Radius r vom Zentrum entfernt. Bei der Ellipse liegen die Punkte so, dass die Summe der beiden Abstände von den Brennpunkten $r_1 + r_2$ konstant ist (*gestrichelte Linien*). Das erste Kepler'sche Gesetz besagt nun, dass sich die Sonne in einem der Brennpunkte befindet. In gleicher Zeit t beschreitet der Planet einen Bogen, der die gleiche Fläche $A_1 = A_2$ überstreicht (zweites Kepler'sches Gesetz). Befindet sich der Planet in der Nähe der Sonne (*Perihel*), ist anschaulich klar, dass er sich dort schneller bewegen muss, als wenn er am sonnenfernsten Punkt ist (*Aphel*). Ansonsten wäre das zweite Kepler'sche Gesetz nicht erfüllt

Das *zweite Kepler'sche Gesetz* besagt: Die Verbindungslinie zwischen dem Schwerpunkt des Planeten und der Sonne überstreicht bei der Rotation des Planeten um die Sonne in der gleichen Zeit die gleichen Flächen. In der Konsequenz bedeutet dies, dass sich ein Planet umso schneller bewegt, je kleiner seine Distanz zur Sonne ist und umso langsamer, je weiter er von ihr entfernt ist. Dies ist ebenfalls in Abb. 1.6 dargestellt.

Quantitativ formuliert würde man sagen, dass das Produkt aus Geschwindigkeit des Planeten und dem jeweiligen Abstand zur Sonne immer gleich bleibt. Wie bereits im letz-

ten Abschnitt bei der Diskussion des ersten Newton'schen Axioms erwähnt, gestehen wir Physiker dem Impuls, also dem Produkt aus Geschwindigkeit und Masse, aus verschiedenen Gründen eine besondere Stellung zu. Das gleiche tun wir auch hier, indem wir bevorzugt sagen, das Produkt zwischen *Impuls* des Planeten und Abstand zur Sonne bleibe zeitlich konstant. Diese Größe hat eine herausragende Bedeutung in der Physik und wird als *Drehimpuls* bezeichnet.

Die Rolle des Impulses bei der geradlinigen Bewegung übernimmt bei der Rotation der *Drehimpuls*, das Produkt zwischen dem Abstand des Körpers (Planeten) von der Rotationsachse und dem Impuls.

Bis jetzt haben wir es vermieden den Begriff des *Vektors* für bestimmte physikalische Größen zu verwenden. *Vektoren* unterscheiden sich von normalen Größen dahingehend, dass sie nicht nur einen Zahlenwert, sondern auch eine Richtung besitzen. Anschaulich kann man sie sich als gerichtete Pfeile vorstellen, deren Länge dem Zahlenwert des Vektors entspricht. Für die Geschwindigkeit, die Beschleunigung und den Impuls ist es selbstverständlich, dass für sie neben ihrer Größe auch die Richtung wichtig ist. Die Kraft und die Beschleunigung zeigen in die gleiche Richtung, womit klar ist, dass auch die Kraft eine vektorielle Größe ist. Bei der Rotation ist dies anders. Der Pfeil zeigt gerade nicht in Richtung der momentanen Bewegung, sondern senkrecht auf die Ebene der Rotation. Bei der Rotation ist neben ihrer Größe auch ihr *Drehsinn* wichtig. So kann eine Drehung mit oder gegen den Uhrzeigersinn verlaufen, sie kann eine Rechtsdrehung oder eine Linksdrehung sein. Nach unserer Definition sind die Drehungen der Erde um die Sonne und die Drehung der Erde um ihre

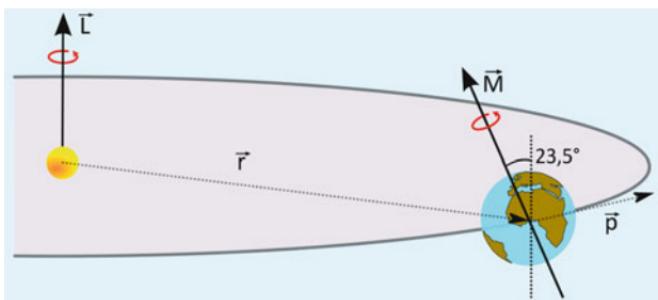


Abb. 1.7 Die Erde dreht sich um die Sonne. Die Drehachse steht senkrecht auf der Rotationsebene. Diesen Drehimpuls symbolisieren wir mit einem Vektor L , der senkrecht auf der Bewegungsebene steht, die von r und p aufgespannt wird. Die Erde dreht sich auch um ihre eigene Drehachse, was wir genauso mit einem neuen Drehimpuls M beschreiben. Der Vektorpfeil zeigt in die Richtung Südpol-Nordpol, da die Sonne am Osten aufgeht und die Erde sich gegen den Uhrzeigersinn dreht

Achse (Abb. 1.7) Rechtsdrehungen, beide drehen sich gegen den Uhrzeigersinn. Den Zusammenhang zwischen dem Drehsinn und der Richtung des Pfeils des Drehimpulsvektors kann man gut mit einer Schraube veranschaulichen. Mit wenigen Ausnahmen benutzen wir im Alltag vorwiegend rechtsdrehende Schrauben. Drehen wir die Schraube rechts herum, bewegt sich die Schrabe vorwärts, drehen wir sie links herum, bewegt sie sich rückwärts. Der Pfeil des Drehimpulsvektors zeigt in die Richtung der Bewegung der Schraube.

Der Drehimpuls spielt in allen Gebieten der Physik eine zentrale Rolle. Die Elementarteilchen haben einen eigenen Drehimpuls, *Spin* genannt (siehe Abschn. 2.6). Zusätzlich haben die Elementarteilchen in zusammengesetzten Systemen, wie beispielsweise Atomen, wohldefinierte

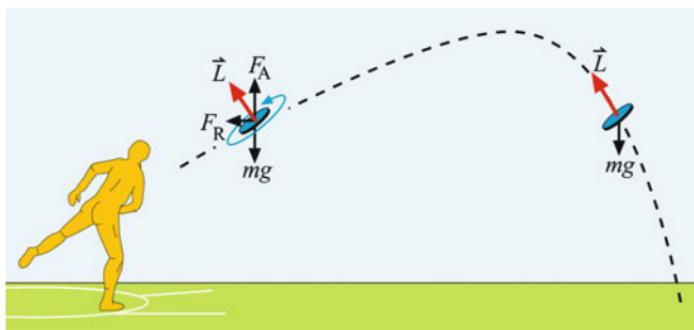


Abb. 1.8 Der Diskuswerfer erteilt dem Diskus einen Drehimpuls L . Im gezeichneten Fall zeigt der Drehimpuls (rot) nach oben. Der Diskus ist leicht geneigt in Bezug auf die Flugtrajektorie. Das erteilt dem Diskus die Auftriebskraft F_A , die teilweise die Schwerkraft mg kompensiert. Wegen der Luftreibung F_R wird der Diskus in Flugrichtung gebremst, seine Rotation wird dadurch aber nicht beeinflusst. Zeichnung Gernot Vogt, Springer-Verlag Berlin Heidelberg

Bahndrehimpulse. Bei den Gravitationssystemen ist der Drehimpuls besonders wichtig. Die Erhaltung des Bahndrehimpulses sorgt für die Stabilität der Umlaufbahnen der Planeten, der Eigendrehimpuls der Drehung um die eigene Achse sorgt für die Erhaltung der Achsenrichtung.

Jeder Fahrradfahrer nutzt die Erhaltung des Drehimpulses, ohne die das Fahren unmöglich wäre. Solange sich das Fahrrad bewegt und sich die Räder drehen, halten die Achsen der Räder ihre Richtung im Raum konstant. Besonders schön wird die Drehimpulserhaltung beim Werfen eines Diskus demonstriert. Ohne seine Drehung würde ein Diskus vermutlich nicht viel weiter als zehn Meter kommen. Die Erhaltung des Drehimpulses hält die Rotationsachse des Diskus im Raum konstant. Er fliegt mit gleichbleibender

Neigung bis zum Aufprall durch die Luft. Die Rolle des Drehimpulses beim Diskuswurf ist in Abb. 1.8 skizziert.

1.4 Planeten, kinetische und potentielle Energie

Nach Diskussion der ersten beiden Kepler'schen Gesetze wollen wir uns dem dritten Gesetz zuwenden: *Die Quadrate der Umlaufzeiten zweier Planeten verhalten sich wie die dritten Potenzen der großen Bahnhalbachsen.* Wenn wir die große Bahnhalbachse mit dem Symbol A und die Umlaufzeit mit T kennzeichnen, lässt sich das Gesetz in Form einer Formel ausdrücken: Es gibt eine Zahl Z , sodass die Gleichung $A^3 = Z \cdot T^2$ die Abhängigkeit zwischen der Umlaufzeit und der großen Halbachse eines Planeten korrekt beschreibt. In Abb. 1.9 ist das dritte Gesetz grafisch dargestellt.

Das dritte Kepler'sche Gesetz ist sehr praktisch, da es nicht nur für Planeten gilt, sondern auch für Systeme von Massen außerhalb unseres Sonnensystems. Wenn man beispielsweise die Masse von rotierenden Sternsystemen bestimmen will, muss man die Umlaufzeiten und Abstände der Sterne messen, auf ein solches Diagramm wie in Abb. 1.9 auftragen und die Steigung der resultierenden Geraden berechnen. Damit erhält man direkt ein Maß für die Masse des Zentrums.

Im dritten Kepler'schen Gesetz steckt allerdings auch fundamentale Physik: die Erhaltung der mechanischen Energie. Die Summe der kinetischen und potentiellen Energie der Planeten ist konstant.

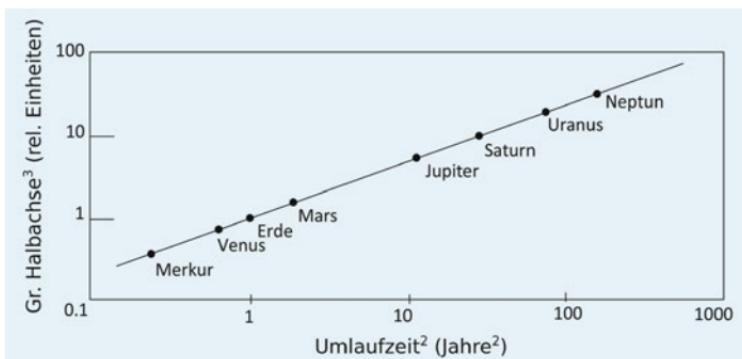


Abb. 1.9 In diesem Diagramm sind die Quadrate der Umlaufzeiten der Planeten in Abhängigkeit von den dritten Potenzen der großen Halbachsen aufgetragen. Als Einheit der Zeit ist geschickt ein Jahr, als Einheit des Abstandes die mittlere Entfernung Sonne-Erde (Astronomische Einheit) gewählt worden. Dass sich alle Planeten auf einer gemeinsamen Geraden befinden, ist eine Bestätigung des dritten Kepler'schen Gesetzes. Die Steigung der Geraden ist abhängig von der Sonnenmasse

Der Begriff der Energie, der all ihre Formen umfasst, ist erst Mitte des 19. Jahrhunderts eingeführt worden. Dass es eine Verbindung zwischen dem gibt, was wir heute beispielsweise als kinetische und potentielle Energie eines Pendels bezeichnen, ist schon im alten Griechenland bekannt gewesen. Später haben sich Galilei und nach ihm viele andere damit befasst.

Bei der Beobachtung des Pendels konnte man feststellen, dass es eine direkte Beziehung zwischen dem maximalen Ausschlag (*Amplitude*) und dem Quadrat der Geschwindigkeit der Kugel beim Nulldurchgang des Pendels gibt. Heute würden wir die Energieerhaltung beim Pendel folgendermaßen formulieren. Beim Auslenken der Masse m haben wir

mechanische Arbeit geleistet, denn wir haben sie gegen die Schwerkraft, also dem Produkt aus Masse mal Erdbeschleunigung ($F = m \cdot g$), auf die Höhe h gehoben. Die Arbeit W , die wir dabei geleistet haben, ist Kraft mal Weg, $W = F \cdot h = m \cdot g \cdot h$. Diese Arbeit ist jetzt als potentielle Energie in der hochgehobenen Kugel gespeichert $E_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h$. Lassen wir die Kugel los, beginnt sie sich nach unten zu bewegen, wodurch sie wieder an potentieller Energie verliert und diese in kinetische Energie umwandelt. Beim Nulldurchgang, also in der Mitte des Schwingungsvorgangs, hat sie keine potentielle Energie mehr. Im Gegensatz dazu ist die kinetische Energie maximal und beträgt $E_{\text{kin}} = m \cdot v^2 / 2$. Zurück zur Planetenbewegung: Die Umwandlung von kinetischer in potentielle Energie und umgekehrt findet hier analog statt. Die kleinste potentielle Energie besitzt der Planet, wenn er den kleinsten Abstand zur Sonne besitzt. An diesem Punkt ist er am schnellsten. Umso weiter er sich von der Sonne entfernt, desto weniger schnell wird er. Seine kinetische Energie nimmt in dem Maße ab wie seine potentielle Energie zunimmt. Die gesamte Energie des Planetensystems bleibt erhalten.

1. Die Planetenbahnen sind Ellipsen, in deren Brennpunkt sich die Sonne befindet.
2. Die Verbindungsstrecke zwischen dem Schwerpunkt des Planeten und der Sonne überstreicht in gleichen Zeiten gleiche Flächen.
3. Das Quadrat der Umlaufzeit eines Planeten ist proportional zur dritten Potenz der großen Halbachse seiner Ellipsenbahn um die Sonne.

Es ist interessant zu erwähnen, dass der von Newton eingeführte Begriff der Kraft als so fundamental empfunden wurde, dass man die Energie mit der Kraft umschrieben hat. Noch im Jahre 1847 hat Hermann von Helmholtz die Unmöglichkeit eines Perpetuum mobiles 1. Art mit der *Erhaltung der Kraft* begründet. Gemeint war jedoch eigentlich das Produkt aus Kraft mal Weg, also die Energie. Das Perpetuum mobile 1. Art beruht auf dem Glauben, dass man mit mechanischen Tricks umsonst Energie gewinnen kann. Aufgrund der Energieerhaltung ist jedoch die Gesamtenergie in jedem physikalischen Prozess erhalten, das heißt, man kann nicht zusätzlich extra Energie aus dem „Nichts“ erzeugen.

1.5 Aufbau der Milchstraße – Betrachtung des großen Ganzen

Nachdem wir nun Planeten und unser Sonnensystem betrachtet haben, erweitern wir unser Blickfeld und schauen uns die nächst größere Struktur an – unsere Heimatgalaxie, die Milchstraße. Die Sterne der Milchstraße werden durch die Anziehung der Gravitation zusammengehalten und die zentrifugalen Kräfte sorgen dafür, dass die Milchstraße nicht kollabiert. Die Bewegung des Sonnensystems um das galaktische Zentrum kann aus Beobachtungen der Bewegung vieler Sterne in der Milchstraße bestimmt werden. Der Abstand R der Sonne zum galaktischen Zentrum beträgt etwa 25.000 bis 28.000 Lichtjahre. Ein **Lichtjahr** ist die Strecke, die das Licht in einem Jahr zurücklegt. Das sind etwa 9,5 Billionen Kilometer. Das galaktische Jahr (die Zeit, die die

Sonne braucht, um das galaktische Zentrum zu umkreisen) beträgt 220 bis 240 Millionen Jahre. Um die Abstände in der Milchstraße zu veranschaulichen, ist es gut, sie mit denen im Sonnensystem zu vergleichen. Der Abstand von der Erde zum Mond beträgt 1,3 Lichtsekunden, der zur Sonne 8,3 Lichtminuten. Man müsste also demnach 800 Millionen Mal von der Erde zur Sonne und zurück fliegen, um die Entfernung zum galaktischen Zentrum zurückzulegen. Mit dem bekannten galaktischen Jahr und dem Abstand der Sonne zum galaktischen Zentrum, kann man mithilfe des dritten Kepler'schen Gesetzes die Masse der Milchstraße berechnen, die auch die Sonne umfasst. Sie beträgt einige hundert Milliarden Sonnenmassen. Dies ist in guter Näherung auch etwa die Anzahl der Sterne in der Milchstraße. Die Milchstraße ist eine sogenannte Spiralgalaxie. Da wir uns in der Ebene der Spirale befinden, sehen wir sie leider nur von der Seite. In Abb. 1.10 ist die Milchstraße dargestellt, wie sie wohl von einem äußeren Beobachter von oben betrachtet aussehen würde.

Der zentrale Bereich unserer Milchstraße ist dicht mit Sternen gepackt und im Zentrum befindet sich, wie in den meisten Galaxien, ein supermassives schwarzes Loch mit einer Masse von etwa 3,6 Millionen Sonnenmassen. Direkte Beobachtungen dieser Region im optisch sichtbaren Bereich sind aufgrund des dichten absorbierenden Staubes nicht möglich. Dieser Staub ist jedoch, ebenso wie unsere Atmosphäre, für Wellenlängen dreier schmaler infraroter Spektralbereiche durchlässig.

Das schwarze Loch ist schon lange unter dem Namen Sagittarius A* als eine sehr kompakte und intensive Quelle für **Radiowellen** bekannt. Schwarze Löcher sind, entgegen des-



Abb. 1.10 So könnte die Milchstraße für einen Beobachter aus einer benachbarten Galaxie aussehen. Im Zentrum befindet sich ein Schwarzes Loch mit der Masse von 3,6 Millionen Sonnenmassen. Eingezeichnet ist unsere Sonne im Abstand vom galaktischen Zentrum von 25.000 bis 28.000 Lichtjahren. Mit freundlicher Genehmigung der *NASA/künstlerische Darstellung*

sen, was Ihr Name verspricht, nämlich nicht völlig schwarz! Die Objekte, die vom Loch verschluckt werden, werden beschleunigt und entsenden dabei elektromagnetische Wellen, besonders Radiowellen. Die erstaunlich gute Kenntnis des Inneren der Milchstraße verdanken wir der Tatsache, dass es zwei Fenster im [Spektrum der elektromagnetischen Strahlung](#) gibt, in dem die Strahlung für die Erdatmosphäre und das Innere der Milchstraße transparent ist (Abb. 1.11).

Abb. 1.12 zeigt das Resultat einer mehr als zehnjährigen Beobachtung der Sterne in infrarotem Licht, die sich auf den Kepler'schen Bahnen um das schwarze Loch bewegen.

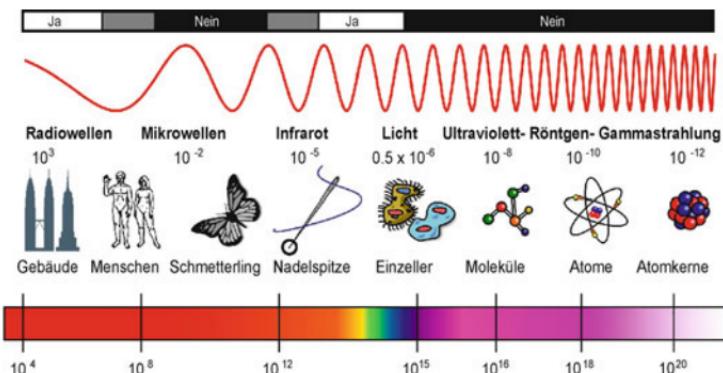


Abb. 1.11 Das Spektrum der elektromagnetischen Wellen von den langwelligen Radiowellen bis zu den hochenergetischen Gammastrahlen. Die zwei für die Atmosphäre durchlässigen Frequenzintervalle sind angezeigt. Das schwarze Loch in der Mitte der Milchstraße wurde erst mit Radiowellen entdeckt und mit den Namen Sagittarius A* getauft. Infrarotes Licht ist für die Beobachtung der Umgebung des schwarzen Loches geeignet. In diesem Frequenzintervall ist die dicht gepackte Umgebung des schwarzen Lochs wie auch die Erdatmosphäre für die elektromagnetische Strahlung durchlässig. Aus Wikipedia – Electromagnetic spectrum

Ein eindrucksvolles Bild: Fast 40 Sterne mit Massen, die der Sonnenmasse ähneln, umkreisen das dicke, schwarze Loch in der Mitte der Milchstraße, welches 3,6 Millionen Sonnenmassen misst.

Wir wollen aus den Bahnen der Satelliten, das sind ganz normale, um das schwarze Loch kreisende Sterne mit Massen vergleichbar mit der der Sonne oder mehr, und mithilfe der Kepler'schen Gesetze die Masse des schwarzen Lochs bestimmen. Die beste Bestimmung lässt sich über den Stern S2 treffen, der das schwarze Loch in kleinster Distanz umkreist. In Abb. 1.13 ist die elliptische Bahn von S2 darge-

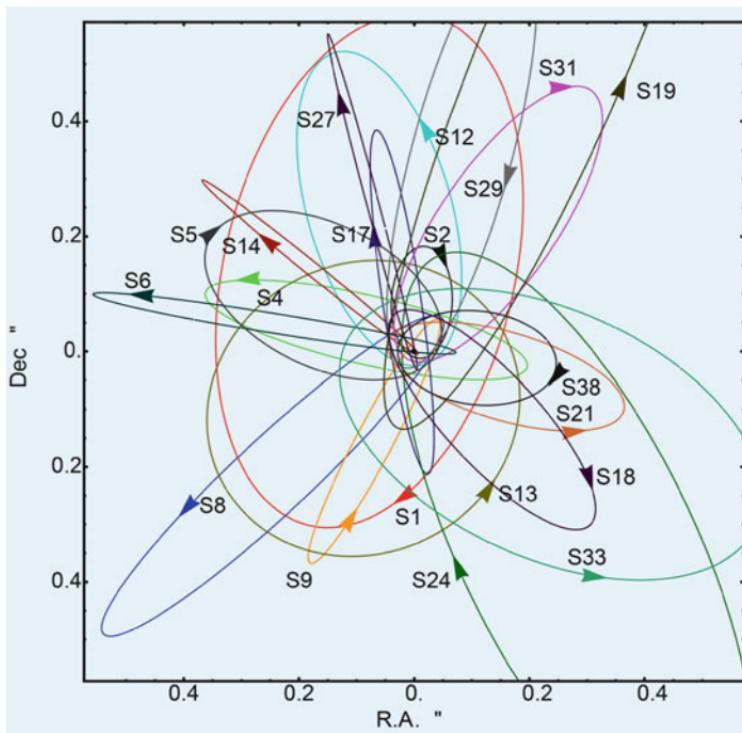


Abb. 1.12 Das Bild zeigt die Resultate weit mehr als zehnjähriger Messungen der Umlaufbahnen der Sterne um das schwarze Loch Sagittarius A*, das nur im Radiowellenbereich zu sehen ist. Die Messungen der umkreisenden Sterne wurden in schmalen Infrarotbereichen durchgeführt. Mit freundlicher Genehmigung von "MPE Galactic Center Team" (Gillessen et al. 2013, Proc. IAUS 289, 29; 2009, ApJ 692, 1075)

stellt. In dieser Abbildung sind die Messdaten der Beobachtungswinkel aufgetragen. Aus der Entfernung des galaktischen Zentrums von der Erde, 25.000 bis 28.000 Lichtjahre, und dem Winkelunterschied von 0,11 Bogensekun-

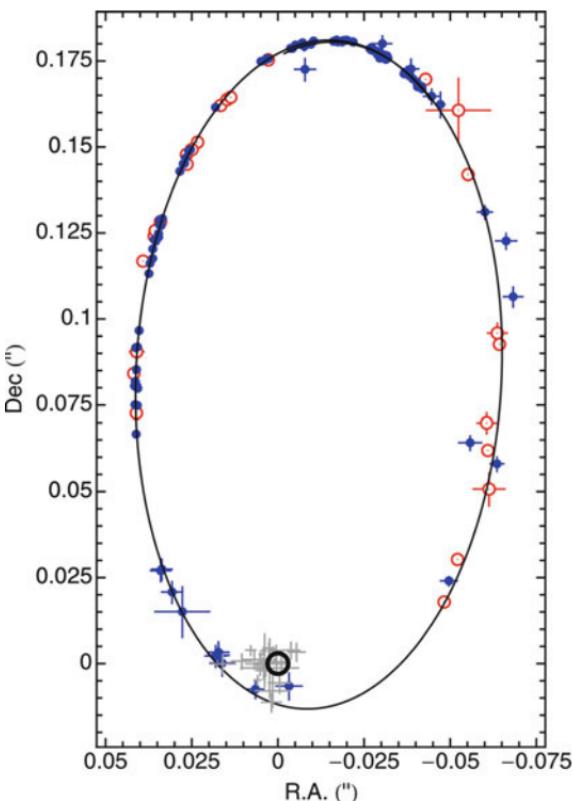


Abb. 1.13 Im Bild ist die Umlaufbahn des S2 ausgewählt. Aus dem gemessenen Winkel von 0,22 Bogensekunden, unter welchem man die doppelte Halbachse beobachtet, und dem Abstand zu Sagittarius A* von 25.000 bis 28.000 Lichtjahren kann man die große Halbachse zu $a_{S2} = 5,4 \pm 0,5$ Lichttagen bestimmen. Mit freundlicher Genehmigung von "MPE Galactic Center Team" (Gillessen et al. 2013, Proc. IAUS 289, 29; 2009, ApJ 692, 1075)

den der großen Halbachse der Ellipse konnte die Länge der großen Halbachse zu $a_{S2} = 5,4 \pm 0,5$ ld (Lichttagen) berechnet werden. Die Umlaufzeit ist direkt aus der Beob-

achtungszeit zu $T_{S2} = 15,24 \pm 0,36$ a (Jahre) bestimmt worden.

Wenn wir uns die Mühe machen, die Lichttage in Minuten auszudrücken, dann ist das Verhältniss der Halbachsen der Bahn von S2 um das schwarze Loch zu dem Abstand Erde-Sonne 937 zu 1. Das Verhältniss der Umlaufzeiten von S2 zu der der Erde beträgt 15,24 zu 1. Mithilfe des dritten Kepler'schen Gesetzes berechnen wir eine Masse von $937^3 / 15,24^2 \approx 3,6$ Millionen Sonnenmassen. Die meisten Galaxien haben in ihrer Mitte ein supermassreiches, schwarzes Loch, das allerdings mit der Zeit wächst. Alle Sterne, die das schwarze Loch umkreisen und sich nicht brav auf stabilen Kepler'schen Bahnen aufhalten, landen letztendlich im schwarzem Loch. Selbst die stabilen Bahnen halten nicht ewig. Die Sterne stören sich gegenseitig und werden aus ihren Bahnen gebracht. Das Bild von Sagittarius A*, das wir zurzeit sehen, entspricht wegen der endlichen Lichtgeschwindigkeit (siehe Abschn. 1.7) der Situation von vor 28.000 Jahren. Wie viele jetzt noch da sind, werden wir wohl erst in 28.000 Jahren wissen.

1.6 Determinismus und deterministisches Chaos – was können wir über die Bewegung eines Systems vorhersagen?

Schon in alten Kulturen hat man Wege gefunden, um die zyklischen Bewegungen der Himmelskörper vorauszusagen. Mit Newton kam noch die theoretische Begründung

der elliptischen Bahnen der Erde und der anderen Planeten um die Sonne hinzu. Die einzelnen Planeten sind allerdings in Wirklichkeit nicht isoliert voneinander und stören sich gegenseitig in ihren sonst idealen elliptischen Bahnen. Da aber diese Störungen verglichen mit der Sonnenanziehung schwach sind, kann man sie näherungsweise als kleine Störung berücksichtigen.

Die mathematische Grundlage zur Berechnung dieser gegenseitigen Wechselwirkungen, *Störungsrechnung* genannt, wurde von *Pierre Simon Laplace* (1749–1827) in seinem berühmten Buch *Traité de Méchanique Céleste* gelegt. Aus der Annahme, dass man die Bewegungen der Planeten exakt berechnen kann, folgte, dass das Universum im Prinzip vorhersehbar, also deterministisch sei. Die bekannteste klassische Formulierung des physikalischen **Determinismus** stammt von Laplace: „Ein alles erfassender Weltgeist – im Folgenden auch *Laplace'scher Dämon* genannt – der den gegenwärtigen Zustand des Universums mit allen Details (Ort und Impuls aller Teilchen) kennt, kann die Vergangenheit und Zukunft des Weltgeschehens in allen Einzelheiten beschreiben.“ In dieser Formulierung nimmt man an, dass der *Laplace'sche Dämon* die Koordinaten und Impulse aller Körper unendlich genau kennt. Aus diesen Angaben könnte der Dämon die zukünftigen Orte und Impulse aller Körper bestimmen. Somit wäre die Zukunft (und Vergangenheit) deterministisch festgelegt.

Die Frage des Determinismus beschäftigte auch die Philosophen. Die Erweiterung des Determinismus auf den freien Willen, der ein zentrales Thema in der Philosophie ist, hat mit dem physikalischen Determinismus allerdings nur den Namen gemein.

Heute wird der mechanische Determinismus aufgrund der Quantenmechanik, insbesondere durch das [Heisenberg'sche Unschärfeprinzip](#), prinzipiell ausgeschlossen (Abschn. 2.7). Dies besagt, dass man den Ort und den Impuls eines Teilchens gleichzeitig nicht beliebig genau bestimmen kann. Wir nehmen an, dass auch der *Laplace'sche Dämon* das Unschärfeprinzip nicht überlisten kann und es keinen *Quantendämon* gibt.

Die alte Frage, inwieweit wir die Dynamik eines physikalischen Systems voraussagen können, kennen wir heute unter dem Namen *deterministisches Chaos*. Betrachten wir ein abgeschlossenes, klassisches System, in dem weder die Energie noch die Materie mit der Umgebung ausgetauscht wird und alle kinematischen Größen mit endlichen Fehlern bekannt sind. Die Wechselwirkungen der Körper miteinander sind deterministisch, was bedeutet, dass man das Resultat der Wechselwirkungen zwischen zwei Körpern mit der gleichen Genauigkeit voraussagen kann, wie die Genauigkeit des Systems vor der Wechselwirkung war. Es zeigt sich jedoch, dass sich auch im völlig deterministischen Fall das System chaotisch benehmen kann. Von einer chaotischen Entwicklung des Systems reden wir, wenn bei endlichen Anfangsmessfehlern die Fehler des Ergebnisses mit der Zeit exponentiell zunehmen, das heißt ansteigen und Überhand nehmen.

Das Sonnensystem ist kein abgeschlossenes System. Die Sonne strahlt den Großteil ihrer Energie ins Weltall und auch die Materie des Sonnensystems wird mit der Umgebung ausgetauscht. Trotzdem könnte man in einer Näherung das Sonnensystem zeitbegrenzt mit einem Modell eines *deterministisch-chaotischen Systems* betrachten. So lange

wie die Menschen den Himmel beobachten, gibt es keine Anzeichen dafür, dass sich die Bahnen der Planeten geändert haben. Die Einflüsse von Außen sind nicht groß, das Sonnensystem befindet sich in einer weitgehend staubfreien Oase an der Peripherie der sonst unfreundlichen Milchstraße. Diese Region nennt man *lokale Blase*.

1.7 Raum, Zeit und Raumzeit – wann und wo wir sind

Dass der Raum und die Zeit irgendwie zusammen gehören, wissen wir aus der Erfahrung. Wenn man sich mit jemandem treffen will, muss man drei örtliche Koordinaten angeben: Straße, Hausnummer und das Stockwerk. Dazu kommt noch die Zeit des Treffens. Die Zeit ist vom Raum unabhängig. Sie läuft bei mir und der Person, mit der ich mich treffen will, synchron. In der klassischen Mechanik sagt man: Die Zeit ist nur der Parameter, mit dem man die Bewegung der Körper im dreidimensionalen Raum beschreibt.

Es ändert sich aber vieles, wenn wir uns mit jemandem in einem irdischen Satelliten verabreden. Dort gilt, wie wir sehen werden, dass seine und unsere Uhren verschieden laufen. Die Zeit ist nicht mehr vom Ort unabhängig, sie hängt auch noch von der relativen Bewegung der Protagonisten ab.

Um den Einstein'schen Begriff der *Raumzeit* einzuführen, müssen wir erstmal einiges über das Licht als elektromagnetische Welle vorwegnehmen. Im Jahre 1831 hat Michael Faraday (1791–1867) seine berühmte Arbeit



Abb. 1.14 Michael Faraday mit einem Aufbau zur Messung der elektromagnetischen Induktion. Bewegt man einen Magneten durch eine Spule, wird zwischen deren Enden eine Spannung erzeugt. Die Bewegung des Magneten entspricht einer Änderung des Magnetfeldes, die zu einem elektrischen Feld führt. Auf diesem Prinzip beruht die Erzeugung elektrischen Stroms in einem Generator. Zeichnung Jakob Piest, Springer-Verlag Berlin Heidelberg

über die sogenannte *elektromagnetische Induktion* veröffentlicht. Durch Änderung eines elektrischen Feldes wird ein Magnetfeld induziert und umgekehrt das elektrische Feld durch Änderung des Magnetfeldes [Seg90a]. In Abb. 1.14 ist ein Portrait Faradays mit einem seiner Versuchsaufbauten zur Messung der Induktion dargestellt. 1865 hat James Clerk Maxwell (1831–1879) seine Theorie veröffentlicht, welche die von Faraday beschriebenen Effekte systematisch unter einen Hut bringt. Abb. 1.15 zeigt Maxwell mit der symbolisch gezeichneten elektromagnetischen Welle. Die

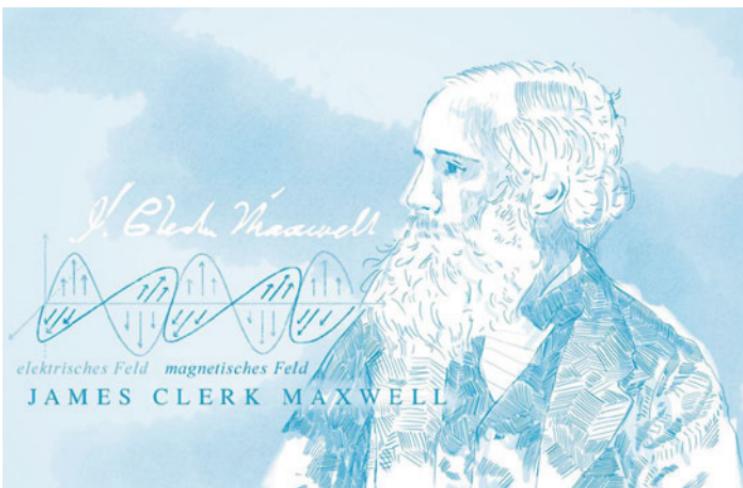


Abb. 1.15 James Clerc Maxwell hat die magnetischen und elektrischen Phänomene in einer Theorie der elektromagnetischen Wechselwirkung vereinheitlicht. Elektromagnetischen Wellen breiten sich mit der Lichtgeschwindigkeit aus. Zeichnung Jakob Piest, Springer-Verlag Berlin Heidelberg

Wechselwirkung zwischen elektrischen und magnetischen Feldern wird besonders interessant, wenn sie im freien Raum, also ohne fest vorhandene elektrische Ladungen und Spannungen, stattfindet. Sich bewegende elektrische Felder erzeugen magnetische Felder gleicher Stärke und umgekehrt. Während dieser ständigen wechselseitigen Umwandlung bewegen sich diese Wechselfelder als Welle mit Lichtgeschwindigkeit fort. So entstand der Begriff der elektromagnetischen Welle. Aufgrund der Vorhersage, dass sich diese Wellen mit Lichtgeschwindigkeit fortbewegen, liegt die Vermutung nahe, dass auch das Licht eine elektromagnetische Welle ist.

Bis dahin kannte man nur die Wasserwellen und die akustischen Wellen. Beide breiten sich in einem Medium aus – hier Wasser beziehungsweise Luft. Da wir das Licht von der Sonne auf der Erde sehen können, kam die logische Frage auf, was das Medium zwischen uns und der Sonne ist, in dem sich das Licht ohne Verlust ausbreitet. Dieses hypothetische Medium nannte man *Äther*. Um ihn nachzuweisen, wurde damals ein einfaches Experiment durchgeführt, das uns zu den Grundlagen der Relativitätstheorie führen wird. Da sich die Erde um die Sonne mit einer Geschwindigkeit von 30 Kilometern pro Sekunde durch den ruhenden Äther bewegt, sollte man einen Unterschied zwischen der Lichtgeschwindigkeit parallel und senkrecht zur Bewegungsrichtung der Erde messen können. Dies wäre dann der Nachweis des Äthers, des Trägers der elektromagnetischen Welle. Im 19. Jahrhundert gab es schon einige Messungen der Lichtgeschwindigkeit. Aber keine war genau genug, um den Unterschied der Lichtgeschwindigkeit in Bezug auf die unterschiedlichen Richtungen bestimmen zu können. Zu diesem Zweck hat Albert A. Michelson ein Präzisionsinstrument, ein sogenanntes [Interferometer](#), entwickelt, das die Bewegung der Erde relativ zu dem hypothetischen Äther nachweisen konnte. Die Grundidee des Apparates ist in Abb. 1.16 skizziert. Michelsons Idee war so genial wie einfach. Der Lichtstrahl einer Lampe trifft auf einen halbdurchlässigen Spiegel, der unter einem Winkel von 45 Grad zur Strahlrichtung steht. Die eine Hälfte des Strahls geht in der gleichen Richtung weiter, die andere Hälfte wird senkrecht zur Strahlrichtung abgelenkt. Nach der Reflexion an den zwei äußeren Spiegeln werden die beiden Strahlen mithilfe

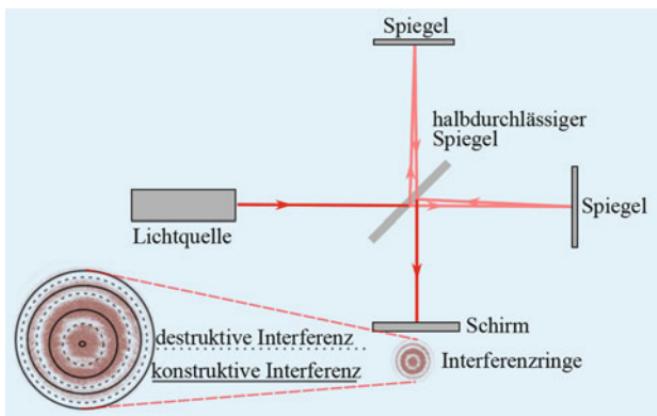


Abb. 1.16 Konzept des Apparates für den Nachweis des Äthers

des halbdurchlässigen Spiegels wiederum zusammengeführt und treffen auf einen Schirm, auf dem ein Interferenzbild erscheint. Das sind helle und dunkle Kreise (siehe Abb. 1.16 unten links). An Orten, an denen die Lichtamplituden synchron schwingen, addieren sie sich und es wird hell. Dort, wo die Lichtamplituden entgegengesetzt schwingen, kompensieren sich die Lichtwellen und es wird dunkel. Man betrachtet das Interferenzbild während des Flugs der Erde um die Sonne. Gäbe es den Äther, dann müsste sich in Abhängigkeit der Flugrichtung in Bezug auf den Äther die Lichtgeschwindigkeit in den beiden Armen des Interferometers ändern und mit ihr auch das Interferenzbild.

Das entscheidende Experiment hat Michelson zusammen mit Edward W. Morley im Jahr 1887 durchgeführt (Abb. 1.17). Die Apparatur wurde auf einen Block aus Sandstein montiert und schwamm in einer Wanne gefüllt mit Quecksilber, um die Vibrationen zu minimieren.

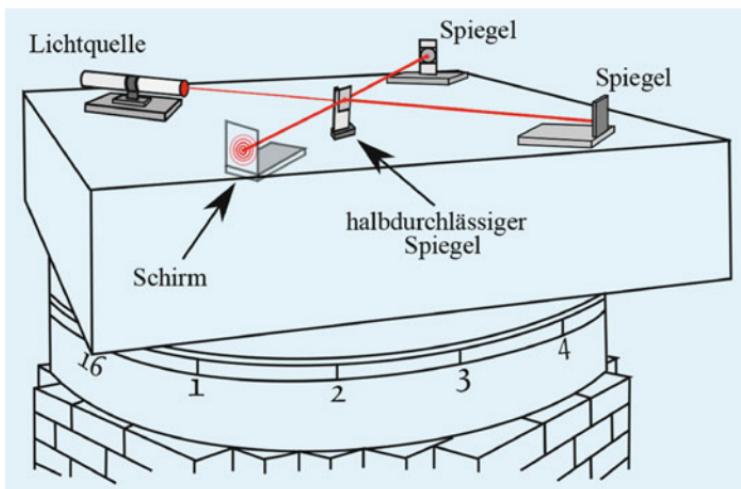


Abb. 1.17 Eine Skizze des Michelson-Morley-Interferometers

Durch die Kosten des Experiments wurde Michelson fast finanziell ruiniert. Während der Vorbereitung erlitt er auch noch einen Nervenzusammenbruch. Im 19. Jahrhundert wurde das Experimentieren nicht vom Staat finanziert. Aber schon damals war das Experimentieren nicht billig. Um Experimente durchzuführen, war der Experimentator auf reiche Sponsoren und eigenes Vermögen angewiesen. Nachdem aber auch der Staat realisiert hat, dass sich nicht nur die angewandte, sondern auch die Grundlagenforschung langfristig auszahlt, wird sie heute überwiegend vom Staat getragen.

Das Ziel des Experiments war die Existenz des Äthers zu beweisen und aus den experimentellen Daten die relative Geschwindigkeit der Erde zum Äther zu bestimmen. Michelson und Morley konnten mit sehr hoher Präzision

feststellen, dass es keine Verschiebung des Interferenzbildes gibt. Die Lichtgeschwindigkeit ist demzufolge in jede Richtung konstant und unabhängig von der Bewegung der Erde. Es kann also keinen universellen Äther geben. Das negative Resultat war zunächst eine Enttäuschung. Erst später wurde das Michelson-Morley-Experiment zu einem der wohl bedeutendsten Experimente in der Geschichte der Physik gekürt.

Eine direkte Folgerung aus diesem Experiment ist die Tatsache, dass sich das Licht unabhängig von der relativen Geschwindigkeit zwischen der Lichtquelle und dem Beobachter immer gleich schnell fortbewegt, nämlich mit der Lichtgeschwindigkeit c . Dieses seltsame Verhalten widerspricht unserer Alltagserfahrung. Wir können einen Lichtstrahl also niemals einholen, da er sich stets mit Lichtgeschwindigkeit von uns fortbewegt, egal wie schnell wir sind. Dann müsste ja der Lichtstrahl von einem laufenden Beobachter A zur Zeit t schon weiter sein als der vom ruhenden Beobachter B betrachtete Lichtstrahl. Diese scheinbaren Widersprüche, die entstehen, wenn man die Zeit und Geschwindigkeiten verschiedener Beobachter miteinander vergleicht, hatten schnell mehrere Theoretiker beseitigt. Sie haben angenommen, dass die Erde den Äther mitschleppt. Die mathematische Transformation, die das beschreibt, nennt man die *Lorentz-Transformation*. Einstein hat diese zunächst rein mathematische Transformation physikalisch umgedeutet.

Der Weg zur Relativitätstheorie wurde noch von anderer Seite geebnnet. Der österreichische Physiker und Philosoph Ernst Mach (1838–1916) hat das Newton'sche Bild von ei-

nem absoluten Raum kritisiert. Mehr noch, er hat es als Metaphysik abgetan.

Konkret bezog sich die Kritik auf die Interpretation der Zentrifugal- und Zentripetalkraft. Die Gondel eines Karussels wird durch die Zentripetalkraft auf einer Kreisbahn gehalten. Wir, die in der Gondel sitzen, spüren eine Kraft, die nach außen zieht. Diese Kraft nennen wir die Zentrifugalkraft. In der Newton'schen Interpretation gibt es einen absoluten Raum, der durch die Position der Fixsterne definiert ist. Die zentrifugalen und zentripetalen Kräfte entstehen, weil wir uns in diesem Raum drehen. Mach hingegen vertrat die Auffassung, es sind die materiellen Massen, die für beide Kräfte verantwortlich sind. Man dürfe nur von Größen reden, die man messen kann, aber der absolute Raum gehöre nicht dazu. In der Philosophie wird diese Denkweise als Positivismus bezeichnet. In der Physik hat sich diese Betrachtungsweise, wie im Falle der Relativitätstheorie und auch der Quantenmechanik, als sehr nützlich erwiesen.

An dieser Stelle sollte erwähnt werden, dass auch der Begriff der Raumzeit schon vor Einsteins Arbeit bekannt war. Im Jahre 1848 vertrat der Autor E. A. Poe in einem Essay über Kosmologie die Meinung, dass Raum und Zeit daselbe seien. Den heutigen Begriff der Raumzeit schlug Einsteins Lehrer Hermann Minkowski in einem Essay im Jahre 1908 vor.

In seinem berühmten Wunderjahr 1905 hatte Einstein gleich fünf bahnbrechende Veröffentlichungen geschrieben. Die Wichtigste ist eine Arbeit über eine neue Interpretation des Michelson-Morley-Experiments, die Einstein erst mit *Zur Elektrodynamik bewegter Körper* und später *Spezielle Relativitätstheorie* betitelt hat. Die Einstein'sche speziel-

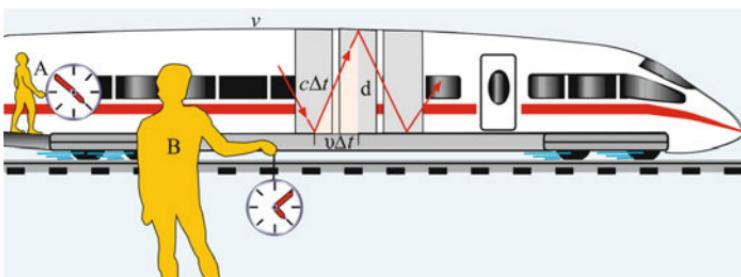


Abb. 1.18 Veranschaulichung der Raumzeit: Nicht nur die Koordinaten des Raums, sondern auch die Zeit hängt von der relativen Bewegung der Beobachter ab. Die Messung der Zeit findet mithilfe der Lichtuhr statt. Die Lichtuhr wird hier dargestellt als roter Lichtstrahl, der zwischen zwei Spiegeln hin und her reflektiert wird. Für den ruhenden Beobachter dauert der betrachtete Reflexionsvorgang im vorbeifahrenden Zug (oben) länger als für einen Beobachter, der *im* Zug den gleichen Vorgang in *relativer Ruhe* betrachtet (rechts unten). Der Vorgang im Zug läuft also für den ruhenden Beobachter (links) langsamer ab. Gleichzeitig wird der Zug in Bewegungsrichtung, ebenfalls nur für den ruhenden Beobachter sichtbar, der Länge nach gestaucht, er wird also „*kürzer*“. Diesen Effekt nennen wir **Lorentzkontraktion**. Für den mitfahrenden Beobachter hingegen wäre der Zug immer noch derselbe (rechts unten). Zeichnung Gernot Vogt, Springer-Verlag Berlin Heidelberg

le Relativitätstheorie beruht auf der Feststellung, dass die Lichtgeschwindigkeit in allen Systemen, unabhängig von der Geschwindigkeit, mit der sie sich bewegen, gleich ist. Die Lichtgeschwindigkeit ist eine *universelle Konstante*.

Die erste Folge der Universalität der Lichtgeschwindigkeit ist, dass die Zeit in relativ zu uns bewegten Systemen langsamer abläuft als bei uns. Das versuchen wir in Abb. 1.18 zu veranschaulichen. Bei diesem Experiment benutzen wir eine Lichtuhr. Diese besteht aus zwei Spiegeln,

zwischen denen das Licht hin und her reflektiert wird. Als Zeiteinheit wählen wir die Durchlaufzeit des Lichtstrahls zwischen den beiden Spiegeln. Der Unterschied zwischen den Zeiten die der Experimentator im bewegten System und im ruhenden System misst, ist offenkundig. Die Zeiteinheit für den Experimentator im *bewegten* System ist einfach die Länge L dividiert durch die Lichtgeschwindigkeit c . Für uns in dem *ruhenden* System ist die Strecke, die das Licht zwischen den beiden Spiegeln durchqueren muss, länger. Dies ist leicht mit dem Satz des Pythagoras auszurechnen. Der neue Lichtweg ist die Hypotenuse des Dreiecks mit der Kathete L und der Strecke, die das System in der Zeit, in der der Lichtstrahl von einem zu dem anderen Spiegel gewandert ist, zurückgelegt hat. Und die Hypotenuse ist länger als die Kathete L . Das bedeutet, dass sich die Zeiteinheit im bewegten System verlängert hat – man spricht von *Zeitdilatation*. Nun wird auch deutlich, dass die Lichtgeschwindigkeit die höchstmögliche Geschwindigkeit sein muss. Je schneller sich das Raumschiff, verglichen mit der Lichtgeschwindigkeit, fortbewegt, desto länger würde die Hypotenuse werden und damit auch die Zeiteinheit. Im Grenzfall, dass die Geschwindigkeit gleich der Lichtgeschwindigkeit ist, würde die Zeiteinheit unendlich stark gedehnt werden. Dies ist aus praktischen und logischen Gründen natürlich nicht realisierbar – man kann mit endlicher Energie nur eine Geschwindigkeit beliebig nahe der Lichtgeschwindigkeit erreichen, sie allerdings nie erreichen. Bewiesen haben wir das an dieser Stelle nicht. Unsere Argumentation fußt nur auf gesundem Menschenverstand. Die gegenteilige Annahme, dass man die Lichtgeschwindigkeit erreichen oder sogar überschreiten könnte, würde schnell

zu logischen Widersprüchen führen, die sich nicht auflösen lassen.

Wenn sich in dem bewegten System die Zeit dehnt, dann muss sich die Länge des Systems von außen aus betrachtet in Richtung der Bewegung verkleinern, da die Lichtgeschwindigkeit in jedem System von jedem Beobachter aus betrachtet gleich sein muss. Dieses Phänomen bezeichnet man auch als *Längenkontraktion*. Damit sind Raum und Zeit nicht mehr voneinander unabhängig. Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit bedeutet in der Konsequenz, dass wir Raum und Zeit nicht getrennt voneinander betrachten dürfen, wir reden stattdessen von der *Raumzeit*.

Schon Newton hat erkannt, dass Bewegungen nur innerhalb eines festgelegten Bezugssystems sinnvoll beschrieben werden können [Seg90b]. Es war naheliegend, dass er jenes System, in dem die Fixsterne in Ruhe sind, als dieses angenommen hatte. Die Zeit wäre für das gesamte Universum gleich. Das war auch die ursprüngliche Idee des Äthers, der das ganze Universum ausfüllt und in dem sich das Licht ausbreitet. Wenn sich ein System mit einer Geschwindigkeit v bezüglich der Fixsterne bewegt, erwartet man, dass die Messung der Lichtgeschwindigkeit entweder $c + v$ oder $c - v$ ergibt, je nachdem, ob man sich in Lichtrichtung oder entgegengesetzt dazu bewegt.

Unserer täglichen Erfahrung folgend ist es schwer der sogenannten **Zeitdilatation** und der Längenkontraktion einen realen Effekt zuzuschreiben. Aus Mangel der experimentellen Evidenz entflammte in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts eine Diskussion zwischen Gegnern und Befürwortern der Relativitätstheorie. Dabei wurden zahlreiche Gedankenexperimente durchgeführt, von denen das wohl

bekannteste das so genannte Zwillingsparadoxon ist. Schon die Wahl des Namens zeigt den polemischen Charakter auf, mit dem diese Diskussion geführt wurde. Einer der Zwillinge macht sich mit nahezu Lichtgeschwindigkeit auf eine Reise ins All. Wenn er nach einigen Jahrzehnten zurückkommt, ist er viel jünger als sein zurückgebliebener Bruder, da sich die Zeit für ihn langsamer entwickelt hat. Aus dem Blickwinkel des reisenden Zwillings jedoch entfernt sich die Erde mit nahezu Lichtgeschwindigkeit, weshalb man ja auch genauso gut sagen könnte, der reisende Zwilling ruhe und die Erde entferne sich mit hoher Geschwindigkeit und kehre schließlich zurück. Dann müsste allerdings der Zwilling auf der Erde viel jünger sein. Falsche Überlegung. Der reisende Bruder springt nämlich erst auf eine mit fast Lichtgeschwindigkeit beschleunigte Rakete und nach einer Weile springt er auf eine, in die umgekehrte Richtung bewegte Rakete, die sich ebenfalls mit nahezu Lichtgeschwindigkeit bewegt. Dabei ändert er spürbar seine Bewegungsrichtung, was sich in Form einer kräftigen Beschleunigung bemerkbar macht. Wenn er die Erde erreicht, springt er wieder ab zu seinem Zwillingsbruder. Nach einer so beschriebenen Reise ist der zurückgebliebene Zwilling, der während der Reise seines Bruders das Leben auf der Erde genießen konnte, in der Tat der ältere.

Heute gehört die Zeitdilatation zur täglichen Routine der Physiker. Teilchenbeschleuniger produzieren Teilchen, die wieder in weniger stabile Teilchen zerfallen. Der zeitliche Verlauf des Zerfalls folgt einem exponentiellen Abfall mit gut definierter Lebensdauer. Die Lebensdauer wird im Labor mit den Teilchen, die bezüglich des Labors *in Ruhe* sind, gemessen. Als Beispiel betrachten wir das **Myon**, der schwe-

rere Bruder des Elektrons. Das Myon hat eine etwa 200 Mal größere Masse als das Elektron und zerfällt exponentiell mit einer Lebensdauer von 2,19 Mikrosekunden in ein Elektron und ein Antineutrino. Exponentiell bedeutet hier Folgendes: Wenn wir am Anfang beispielsweise 1000 Myonen hätten, werden nach 2,19 Mikrosekunden nur noch 368 Myonen überleben, nach 4,38 Mikrosekunden nur 74 und nach 6,57 Mikrosekunden sind es nur noch 5. Die radioaktiven Zerfälle sind statistische Prozesse. Deswegen gelten diese Zahlen nur im Mittel, wenn man sehr viele Messungen wiederholt.

Myonen sind keine sonderlich exotischen Teilchen. Sie entstehen beispielsweise laufend als Produkt von Wechselwirkungen kosmischer Strahlung in der Erdatmosphäre. Trotz ihrer kurzen Lebensdauer erreichen sie aufgrund der Zeitdilatation die Erde: Etwa 30 Myonen pro Sekunde passieren unsere Körper. Dabei richten sie glücklicherweise kaum Schäden an, zählen aber zu der natürlichen radioaktiven Belastung.

Die kosmischen Strahlen entstehen bei einer Höhe von etwa 10 km. Auch wenn sich die Myonen fast mit Lichtgeschwindigkeit bewegen, würde sich ihre Zahl ohne die Zeitdilatation bei jeder Strecke von 600 Meter auf etwa ein Drittel reduzieren. In 2 Mikrosekunden legt das Licht nämlich gerade 600 Meter zurück. Bis die Myonen die Erde erreichen, würde sich ihre Zahl sechzehn Mal um ein Drittel reduzieren. Genau gerechnet würde im Mittel nur eines von 9 Millionen Myonen die Erde erreichen.

Die 2 Mikrosekunden Lebensdauer sind für heutige Messinstrumente keine besonders kurze Zeit. Trotzdem möchte man das Myon und seine Eigenschaften im Detail

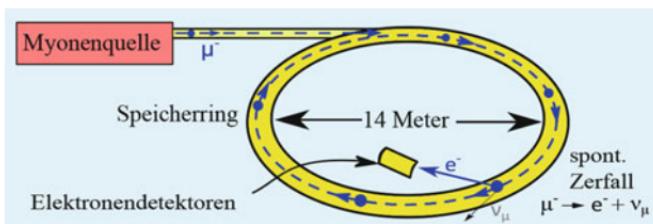


Abb. 1.19 Beispiel eines Speicherringes (hier z. B. Brookhaven National Laboratory)

verstehen. Insbesondere die Unterschiede zum Elektron, dem kleinen Bruder des Myons, sind von großem Interesse. Um sie untersuchen zu können, speichert man die Myonen in einem Speicherring, wie es in Abb. 1.19 veranschaulicht wird. Um ihre Lebenszeit und damit die verfügbare Messzeit zu verlängern, speichert man sie bei Geschwindigkeiten nahe der Lichtgeschwindigkeit. In einem Experiment im amerikanischen Großforschungslaboratorium Brookhaven hatten die gespeicherten Myonen aufgrund der Zeitdilatation eine um den Faktor 64 verlängerte Lebensdauer.

Mit diesem Experiment kann man die Zeitdilatation direkt nachweisen. Da der Myonzerfall statistisch verläuft, können wir nicht einzelne Myonen nehmen, aber ausreichend viele, sodass wir mit Mittelwerten arbeiten können. Beginnen wir mit eintausend Myonen, die sich uns bezüglich in Ruhe befinden und eintausend Myonen, die mit nahezu Lichtgeschwindigkeit im Ring gespeichert sind. Die Myonen in Ruhe zerfallen mit der bekannten Lebensdauer von etwa 2 Mikrosekunden, während die im Speicherring mit einer Lebensdauer von 140 Mikrosekunden viel länger leben!

1.8 Masse und Energie sind äquivalent

Als Einstein (Abb. 1.20) die Newton'sche Mechanik zu den relativistischen Energien erweiterte, was bedeutet, dass sich die Körper mit Geschwindigkeiten bewegen, die sich der Lichtgeschwindigkeit nähern, entdeckte er die berühmte Beziehung zwischen der Energie und der Masse, $E = mc^2$. Diese einfache Formel besagt, dass Masse und Energie ineinander umwandelbar und gleichwertig zu behandeln sind. Er hat diese Energie als die Ruheenergie des Teilchens mit der Masse m bezeichnet. Damals gab es keinen experimentellen Nachweis, dass dieser Beziehung eine echte Massen-Energie-Äquivalenz zugrunde liegt. Heute kann sie bereits durch einfache Experimente untersucht und vor-

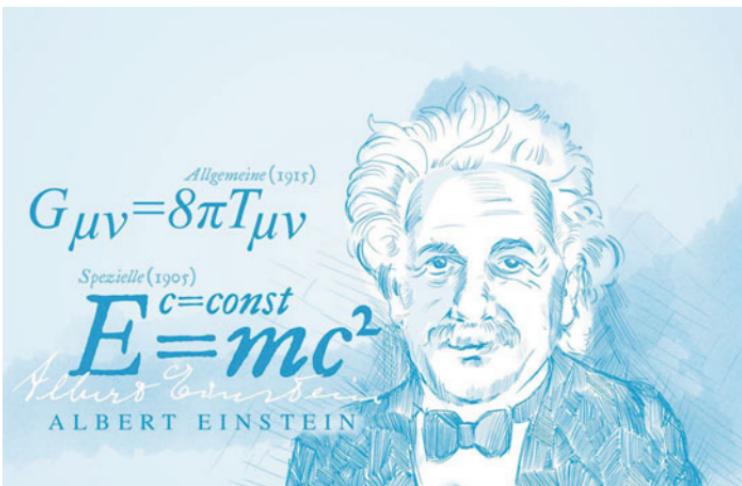


Abb. 1.20 Albert Einstein und drei seiner Gleichungen. Zeichnung Jakob Piest, Springer-Verlag Berlin Heidelberg

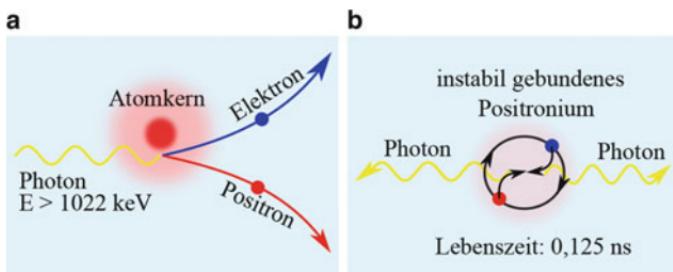


Abb. 1.21 a Im elektrischen Coulombfeld des Kerns können Gammastrahlen in Elektron-Positron-Paare umgewandelt werden. b Das positiv geladene Positron wird vom negativen Elektron angezogen und die beiden vernichten sich. Davor bildet es ein instabiles System, das Positronium genannt wird. Treffen Elektron und Positron aufeinander, entstehen allerdings zwei Photonen statt nur eines. Der tiefere Grund für dieses Verhalten liegt in der Impulserhaltung

geführt werden. Eines möchten wir hier vorstellen. Die Identität $E = mc^2$ ist besonders leicht mit elektromagnetischer Strahlung hoher Energie zu demonstrieren. Als Beispiel betrachten wir die Paarerzeugung durch Gammastrahlen (Abb. 1.21) und die Annihilation von Positron und Elektron. Bevor wir die zwei Experimente verstehen können, die die Äquivalenz von Masse und Energie demonstrieren, müssen wir etwas mehr über die Eigenschaften des Lichts sagen. Maxwell hat sich die elektromagnetischen Wellen ähnlich wie Wasserwellen vorgestellt. Das bedeutet auch, dass sie ebenso viel Energie übertragen, wie sie vom Verursacher bekommen haben. 1900 hat jedoch Max Planck herausgefunden, dass das Licht in Energiepaketen emittiert wird. Diese kleinsten Quanten des Lichts bezeichnete Einstein mit dem Begriff **Photon**. Einstein war

nicht nur ein genialer Physiker. Er konnte die Bezeichnungen der Phänomene auch so wählen, dass man das Gefühl bekommt, die Physik zu verstehen. Jedenfalls, wenn wir Photon sagen, meinen wir, dass diese elektromagnetische Strahlung eine Energie und einen Impuls besitzt, die als Ganzes übertragen werden können. Am Beispiel von Wasserwellen würde das bedeuten, dass die Gesamtwellenverschwindet und ein Stein aus dem Wasser springt – was in der Realität natürlich nicht geschieht. Dies ist der kleine Unterschied zwischen der klassischen Physik und der Quantenmechanik.

Auch die Veröffentlichung, in der Einstein den Begriff des Photons einführte, fand im berühmten Jahr 1905 statt. Dort findet sich, dass die Energie des Photons durch das Produkt von einer Konstanten, dem Planck'schen Wirkungsquantum, und der Frequenz der Strahlung ν , $E_\gamma = \hbar\nu$, gegeben ist. Diese Veröffentlichung war die erste, die ohne Wenn und Aber ein Quantenphänomen postulierte.

Wenn die Energie des Photons größer ist als die doppelte Elektronenmasse mal c^2 , kann das Photon im elektrischen Feld, dem Coulombfeld eines Atomkerns, ein Elektron-Positron-Paar erzeugen.

Das **Positron** ist das Antiteilchen zum Elektron, hat damit exakt die gleiche Masse, aber entgegengesetzte Ladung. Aus dem Photon mit der Energie E_γ werden also zwei Teilchen mit gleicher Masse $m_{e^-} = m_{e^+}$ erzeugt. Analog kann man ein freies Positron mit einem Elektron zu zwei energiereichen Photonen annihilieren, die zusammen eine Energie von zwei mal $m_e c^2$ haben.

1.9 Einsteins allgemeine Relativitätstheorie – wie Massen die Raumzeit krümmen

Im Jahre 1916 hat Einstein seine Arbeit mit dem Titel allgemeine Relativitätstheorie veröffentlicht. Diese Theorie beruht auf der experimentellen Erkenntnis, dass die schwere und die träge Masse eines Körpers gleich sind.

Einstein wollte nach dem Vorbild der Maxwell'schen Theorie der Elektrodynamik eine Feldtheorie für die Gravitation entwickeln. Die physikalischen Konzepte waren klar. Für die mathematische Formulierung der Gravitationstheorie hat er allerdings die Hilfe mehrerer Mathematiker gebraucht. Nicht zuletzt baute er auf die Hilfe des berühmten David Hilbert. Hilbert hatte die mathematische Lösung des physikalischen Problems sogar vor Einstein veröffentlichen können, jedoch ohne Anspruch auf Priorität. Nichtsdestotrotz blieben Einstein und Hilbert weiterhin in einem sehr guten freundschaftlichen Verhältnis.

Man kann mit diesem Hintergrund gut verstehen, dass die mathematische Behandlung von Gravitationsproblemen so schwer ist, dass man sie nur in einigen wenigen Fällen exakt lösen kann. Die Einstein'sche Gravitation hat aber eine anschauliche geometrische Interpretation: Massen, und aufgrund der Äquivalenz von Masse und Energie auch die Energie, krümmen die Raumzeit.

Wir wollen diese Krümmung der Raumzeit graphisch veranschaulichen. Eine vierdimensionale Raumzeit kann man graphisch nicht darstellen. Sie ist generell optisch nicht vorstellbar. Wir können aber versuchen das Konzept

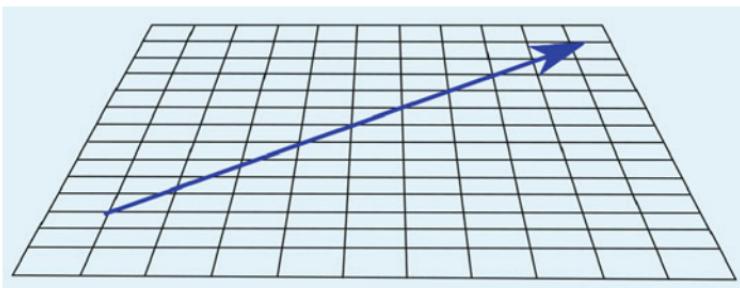


Abb. 1.22 Der Raum ist hier nicht gekrümmmt, da es keine Massen gibt. Der Lichtstrahl fliegt also geradeaus

der Einstein'schen Gravitation zu verstehen, indem wir uns die Phänomene in einer dreidimensionalen Raumzeit anschauen. Das bedeutet, dass der Raum zweidimensional, vorstellbar als ein Blatt Papier oder ein gespannter Stoff, ist. Alles spielt sich also innerhalb einer Fläche ab. Diese kann beliebig gekrümmt sein, aber sämtliche Körper und das Licht bewegen sich nur innerhalb dieser Fläche. Die Zeit kann mit einer Lichtuhr gemessen werden. Sie liegt ebenso im zweidimensionalen Raum. Die Einheit der Zeit ist gegeben durch die Zeit, die das Licht benötigt, um eine Zelle des zweidimensionalen Raums zu durchkreuzen. In Abb. 1.22 sieht man die Fläche des zweidimensionalen Raums ohne massiven Körper. Das Licht breitet sich geradlinig aus. Die Zeit ist überall gleich.

Wenn sich im Raum allerdings ein massiver Körper befindet, werden sich nach den komplexen Gesetzen der allgemeinen Relativitätstheorie der Raum und die Zeit um den Körper verbiegen. Die gravitative Anziehung übernimmt dann die Krümmung des Raums. Was sich ohne

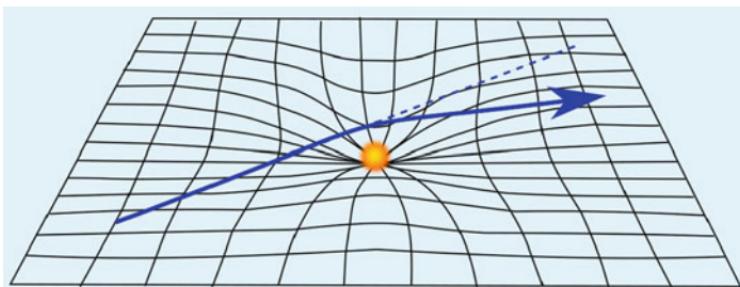


Abb. 1.23 Befindet sich eine schwere Masse im Raum, so wird die Raumzeit um sie herum gekrümmt. Der Lichtstrahl wird also abgelenkt. Im Mai 1919 wurde bei einer Sonnenfinsternis die Ablenkung von Licht im Schwerefeld der Sonne beobachtet. Die Einstein'sche Vorhersage des Ablenkwinkels δ wurde bestätigt

Anwesenheit der Gravitation gerade bewegt hat, wird jetzt der gekrümmten Form der Fläche folgen. Wie man in Abb. 1.23 sieht, wird das Licht abgelenkt. Da es durch eine Vertiefung läuft, wird es verglichen mit dem nicht gekrümmten Raum länger brauchen, um den massiven Körper zu passieren. Die Zeit im Gravitationsfeld, in unserem Bild in der vertieften Fläche, läuft dann also langsamer als im Raum ohne Masse (siehe Abb. 1.24).

Das Global Positioning System (GPS) können wir als einen laufenden Test der speziellen und allgemeinen Relativitätstheorie ansehen.

Die Zeitdilatation als Folge der speziellen, wie auch der allgemeinen Relativitätstheorie, kann man heute mit Atomuhren in Satelliten, die man für Navigationsgeräte benutzt, sehr genau testen. Durch die Anziehung der Erde ticken unsere Uhren etwas langsamer als die Uhren in den Satelliten. Dies ist eine Folge der allgemeinen Relativitätstheorie. Zu-

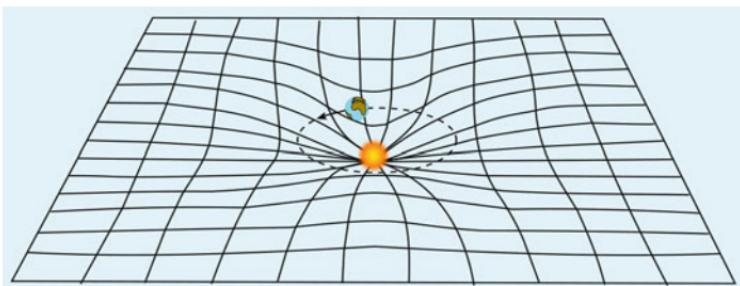


Abb. 1.24 Auch die Erdbewegung folgt der Raumkrümmung, was der eigentliche Grund ist, weshalb sie im Endeffekt die Sonne umkreist

sätzlich bewegen sich die Satelliten uns gegenüber und ihre Zeit wird dadurch verlangsamt, was eine Folge der speziellen Relativitätstheorie ist. Dies entspricht in gewisser Weise der Situation des Zwillingsparadoxons. Da sich aber die Satelliten umso langsamer bewegen, je weiter sie von uns entfernt sind, ist der Effekt durch die allgemeine Relativitätstheorie stärker. Die für die Positionsbestimmung benutzten Satelliten umkreisen in einer Höhe von etwa 20.000 Kilometer die Erde. Bei ihnen tickt die Uhr pro Sekunde um 0,44 Milliardstel Sekunden schneller als die Uhren auf der Erde. Das klingt erstmal nach wenig, aber die Korrektur dieser Zeit ist für die Ortsbestimmung unerlässlich. Die Lösung ist einfach. Sie kostet nur Geld. Man braucht das Signal von drei Satelliten. Einer gibt die Zeit an. Die zwei anderen bestimmen den Ort.

1.10 Gravitationswellen – die Raumzeit raschelt

Die Einstein'sche Gravitation ist experimentell exzellent bestätigt worden. Aber Einstein hat seine Theorie analog zur Maxwell'schen elektromagnetischen Theorie formuliert. Der wichtigste Erfolg der Maxwell'schen Theorie ist, dass sie die elektromagnetischen Wellen, das Licht, voraussagt. Die **Gravitationswellen**, also Wellen, die sich analog den Lichtwellen in der Raumzeit ausbreiten, konnten zweimal nachgewiesen werden. Es gibt erst eine indirekte, jedoch sehr eindrucksvolle Bestätigung ihrer Existenz. Russell Alan Hulse und Joseph Taylor entdeckten in 1974 einen Doppelstern, zwei Neutronensterne mit Massen von etwa 1,4 Sonnenmassen, die um einen gemeinsamen Schwerpunkt rotieren. Da sie immer schneller rotieren, nimmt man an, dass sie durch die Gravitationsstrahlung ihre Rotationsenergie verlieren und damit immer schneller zusammenrücken. Die Abstrahlung der Gravitationswellen kann man sehr genau berechnen. Und diese Berechnung stimmt mit dem beobachteten Energieverlust der rotierenden Sterne überein. Hulse und Taylor haben für ihre Entdeckung und Analyse den Physik-Nobelpreis im Jahre 1993 bekommen. Der Doppelstern ist 21.000 Lichtjahre entfernt. Wenn man die schnelle Abnahme des Abstands der beiden betrachtet, sind sie bereits zu einem schwarzen Loch verschmolzen, was wir aufgrund der großen Entfernung aber erst später erfahren werden.

Trotzdem würde man gerne das Rieseln der Raumzeit in einem Erddetektor nachweisen. Der direkte Nachweis von

Gravitationswellen hat in der Grundlagenforschung daher einen hohen Stellenwert. Zur Zeit existieren zwei Detektoren, mit denen man versucht die Gravitationswellen nachzuweisen. Beide sind in einem Abstand von 3000 km zueinander in den USA stationiert. Diese Detektoren sind quasi technisch verbesserte Michelson-Interferometer. Sie bestehen aus zwei zueinander senkrechten Laufstrecken. Beim Michelson-Interferometer waren die Laufstrecken nur einige Meter lang, bei den Gravitationsdetektoren sind es 4 km. Dadurch wird die Empfindlichkeit des Interferometers gesteigert. Zudem wird Laserlicht verwendet, welches im Vergleich zum Michelson-Experiment deutlichere Interferenzen zulässt.

Wenn uns eine Gravitationswelle erreicht, dann verformt sich die Raumzeit. Die Laufzeit in den beiden Laufstrecken ändern sich unterschiedlich, wodurch sich das Interferenzbild ändert.

Ende 2015 haben beide Detektoren das gleiche Signal um die gleiche Zeit beobachtet. In Abb. 1.25 wird das Signal und seine Interpretation gezeigt. Für Russell und Taylor war das Kreisen von zwei Neutronensternen ausreichend, um die Gravitationswellen nachzuweisen. Für den Nachweis der Gravitationsstrahlen mit den Erddetektoren mussten sich schon zwei üppige schwarze Löcher zusammenfinden und sich nach einem kurzen Tanz verschmelzen. Das eine schwarze Loch hatte eine Masse von 29, das zweite von 36 Sonnenmassen. Es klingt sehr eindrucksvoll, dass man aus einem mickrigen Signal mit wenigen Schwingungen eine so exotische Geschichte wie den Totentanz zweier schwarzer Löcher glaubhaft machen kann. Die Rechnung ist nicht allzu schwierig. Die Einstein'schen Formeln für die

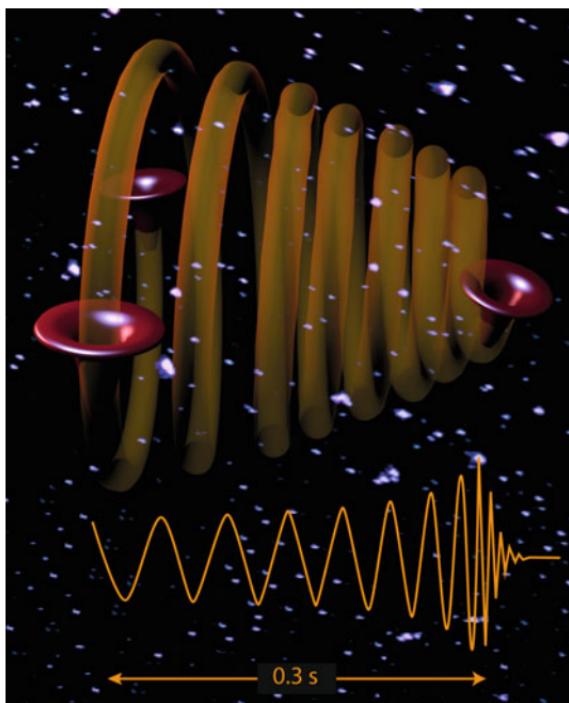


Abb. 1.25 Zwei schwarze Löcher mit 36 und 29 Sonnenmassen kreisen um ihren Schwerpunkt, emittieren die Gravitationswellen, verlieren dadurch die Energie und nähern sich auf spiralförmigen Bahnen an, bis sie endlich miteinander verschmelzen. Durch die Verformung der Raumzeit breiten sich die Wellen aus, die in zwei Erddetektoren nachgewiesen wurden. Nach vielen Jahren des Wartens folgte die große Entdeckung: Man hat die Gravitationswelle auf der Erde gesehen. Ob diese Beobachtung nun großes Glück war oder nicht, wissen wir nicht, weil wir keine Informationen zur Häufigkeit von Gravitationswellen, die die Erde erreichen, haben. Das gemessene Signal der Gravitationswelle ist gezeichnet. Zeichnung Gernot Vogt, Springer-Verlag Berlin Heidelberg

Abstrahlung der Gravitationsenergie muss man schon kennen. Wie man das macht, haben Hulse und Taylor bereits gezeigt. Einiges hatte schon Newton ausrechnen können. Aus den bekannten Massen der beiden schwarzen Löcher und dem Zeitverlauf der Oszillationen kann der Zeitverlauf des Abstands zwischen den schwarzen Löchern nach Keppler berechnet werden.

Bei dem Nachweis der Gravitationswellen handelt es sich um eine Beobachtung dessen, was Physiker seit rund 100 Jahren vermuten. Nichtsdestotrotz wurde dem Ereignis große Aufmerksamkeit geschenkt – verständlich, wenn man bedenkt welche technischen Meisterleistungen dafür nötig waren. Angesichts der langen Wartezeit auf das ersehnte Signal, spielte auch Glück eine große Rolle

1.11 Schwarze Löcher

Ein schwarzes Loch ist ein Objekt, dessen Gravitation so groß ist, dass weder Materie noch Licht dem gravitativen Umfeld des Objekts entweichen kann. Im Sprachgebrauch der allgemeinen Relativitätstheorie würde man sagen, dass die Raumzeit so stark gekrümmt ist, dass weder Materie noch Licht das schwarze Loch verlassen kann. Wie das Innere des schwarzen Lochs aussieht, wissen wir nicht. Wir kennen nur seine Masse und nehmen an, dass diese in einem Punkt unendlich dicht zusammengepackt vorliegt. Eine wichtige Größe ist der Radius, ab der die elektromagnetische Strahlung die Gravitation der Punktmasse gerade noch überwinden kann. Dieser Radius wird nach *Karl Schwarzschild* benannt, der ihn 1916 erstmals richtig aus-

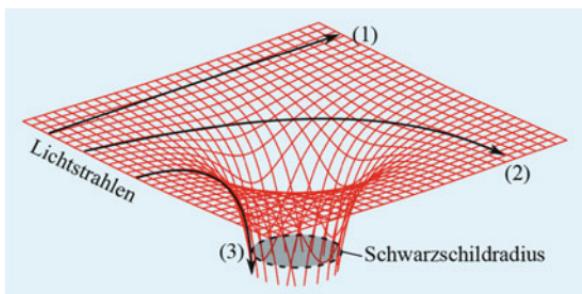


Abb. 1.26 Lichtablenkung in der Nähe eines schwarzen Lochs. Weit entfernte Lichtstrahlen (1) fliegen unbeeinflusst weiter. Je näher die Lichtstrahlen dem schwarzen Loch kommen, desto stärker werden sie abgelenkt (2). Überschreiten sie den Schwarzschildradius (3), werden sie vom schwarzen Loch verschluckt und können seinem Gravitationsfeld nicht mehr entfliehen

gerechnet hat. Kein Lichtstrahl, der den Schwarzschildradius überschreitet, kann das schwarze Loch wieder verlassen. Dies ist in Abb. 1.26 dargestellt.

Das schwarze Loch verhält sich anders als die üblichen Sterne und Planeten. Mit genügend großer Energie kann eine Rakete der Erdgravitation entfliehen. Egal wie hoch die Energie einer elektromagnetischen Strahlung ist, sie kommt aus dem schwarzen Loch nie heraus. Die Raumzeit ist an dem Schwarzschildradius abgeschlossen. Und die elektromagnetischen Strahlen folgen der Raumzeit.

Die Annahme einer Punktquelle ist für ein schwarzes Loch in Ordnung. Wir wissen nämlich nicht, wie es im Innern des schwarzen Lochs aussieht. Im Prinzip können wir nichts über das Innere des schwarzen Lochs erfahren. Es gibt keine Kommunikation zwischen dem, was innerhalb des Schwarzschildradius passiert und dem Universum au-

ßerhalb. In allen Galaxien, auch in unserer Milchstraße, gibt es viele kleine schwarze Löcher mit Massen von 1,4 Sonnenmassen und mehr. Ihre Schwarzschildradien betragen etwa 100 Meter. Sie sind die Reste alter verbrannter Sterne. Viel größer sind die schwarzen Löcher in den Zentren der Galaxien. Wie wir gesehen haben, ist das schwarze Loch im Zentrum der Milchstraße ziemlich einsam. Offensichtlich ist das meiste interstellare Material um das schwarze Loch herum bereits in ihm gelandet. Ihr Schwarzschildradius beträgt etwa 13,3 Milliarden Kilometer!

1.12 Dunkle Materie – das unbekannte, schwere Etwas

Die Astronomen zählen nicht einzelne Sterne, wenn sie die Massen von Galaxien angeben. Stattdessen messen sie die Leuchtkraft im optischen Bereich sowie den [Raumwinkel](#) der Emission, um die Massen abzuschätzen. Die zugrundeliegende Annahme dabei ist, dass die Leuchtkraft einzelner Sterne proportional zu ihren Massen ist. Vergleicht man die Leuchtkraft der Sterne mit der Leuchtkraft der Sonne, erhält man die Masse der Galaxie in der Einheit der Sonnenmasse. Allerdings hat Fritz Zwicky (1898–1974) schon 1933 entdeckt, dass die Galaxien, wenn man sie nach ihrem Gravitationsverhalten beurteilt, wesentlich, bis zu einem Faktor zehn, mehr Masse haben, als man aus ihrer Leuchtkraft schließen könnte. Es musste also zusätzliche, nicht direkt beobachtete massive Materie geben. Diese nannte er *dunkle Materie*, da sie weder selbst leuchtet noch anderes Licht absorbiert.

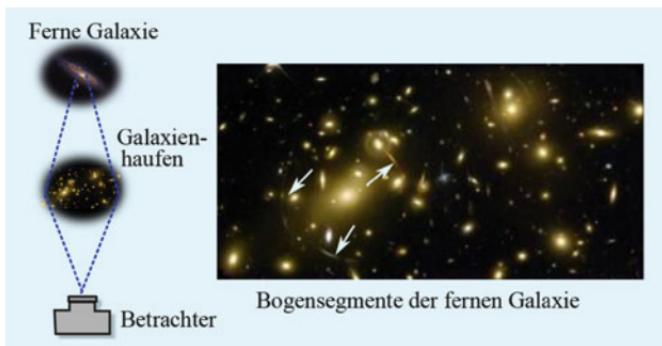


Abb. 1.27 Im Zentrum der Abbildung ist der Galaxienhaufen Abell 2218, aufgenommen vom Hubble-Teleskop, zu sehen. Der Haufen wirkt als Gravitationslinse. Zentral hinter dem Haufen befindet sich weit entfernt eine starke Lichtquelle, deren Licht um den Haufen abgelenkt wird und im Bild als helle Flecken entlang von Kreisbogensegmenten zu sehen ist. Da der Haufen nicht perfekt symmetrisch ist, entsteht als Bild kein abgeschlossener Kreis, sondern nur einzelne Teile des Kreises. Mit freundlicher Genehmigung von NASA/ESA

Erst etwa 50 Jahre nach Zwicky hat man das Konzept wieder aufgegriffen und sich erneut mit der dunklen Materie befasst. Es gab zwei neue Messungen, die zur Unterstützung der Annahme, dass es so etwas wie dunkle Materie geben muss, dazugekommen sind. Eine spektakuläre Erscheinung ist die Beobachtung sogenannter Gravitationslinsen (Abb. 1.27). Auf der Erde beobachtet man eine weit entfernte Galaxie, die sich hinter einem massiven Objekt befindet. Das Licht der hinter dem Objekt liegenden Galaxie wird durch das massive Objekt wie durch ein Linsenglas abgelenkt. Dadurch erscheint die Galaxie als Anordnung von Bogensegmenten auf einem Kreis. Der Linseneffekt kann

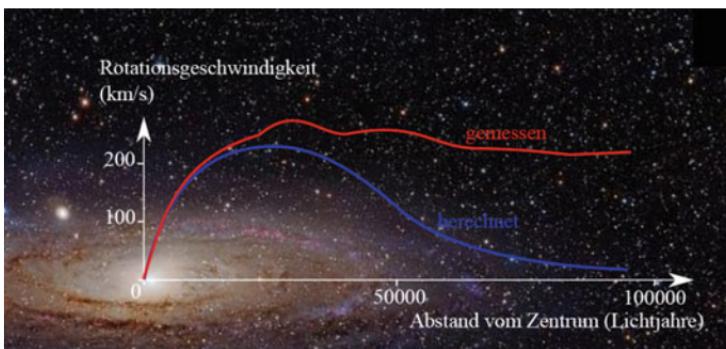


Abb. 1.28 Rotationsgeschwindigkeit des Wasserstoffs einer Galaxie. Foto: NASA/ESA

nur dann erklärt werden, wenn die Masse der Galaxie um einen Faktor sechs größer angenommen wird, als die Masse, die man nur aus der leuchtenden Materie berechnet. Aus der Messung der Geschwindigkeit von Wasserstoffatomen am Rande der Milchstraße (Abb. 1.28) nimmt man zusätzlich an, dass die dunkle Materie wesentlich weiter als die leuchtende Materie ausgedehnt ist.

Beide Messungen besagen, dass die Gesamtmasse der Galaxien sechsmal größer ist als die Masse der uns bekannten, leuchtenden Materie. Aus dem Verlauf der Rotationsgeschwindigkeiten des Wasserstoffs entnimmt man aber auch, dass sich die dunkle Materie weiter als die strahlende Materie ausdehnt. Aufgrund dieser Messung kann man auf einige Eigenschaften der dunklen Materie schließen. Sie wechselwirkt weder mit unserer Materie noch mit sich selbst. Sie verhält sich wie ein ideales Gas, welches außer der Gravitation keine Wechselwirkungen spürt. Die Masse der Teilchen der dunklen Materie entspricht in etwa der Masse mittel-

schwerer Atomkerne. Warum die dunkle Materie weiter als die leuchtende Materie ausgedehnt ist, lässt sich leicht erklären. Normale Materie klumpt und bildet Sterne. Durch die Kompression erhitzten sich die Sterne und geben die Energie in Form von Strahlung ab. Dadurch kühlen sie ab. Die nicht klumpende, dunkle Materie hingegen kann ihre Energie nicht durch Abstrahlen abgeben. Die normale und die dunkle Materie wechselwirken nur durch die Gravitation und möglicherweise durch die schwache Wechselwirkung (siehe Kap. 5). Beim Klumpen der normalen Materie bleibt der Drehimpuls erhalten. Deswegen rotiert die Milchstraße mit der normalen Materie schneller als die Michstraße der dunklen Materie, die in ihrer Größe gleich bleibt. Eine Hoffnung die dunkle Materie mit den irdischen Detektoren nachzuweisen ist, die Stöße zwischen der dunklen und normalen Materie in unterirdischen Laboratorien zu beobachten. Die Geschwindigkeitsunterschiede zwischen der normalen und der dunklen Materie sind klein. Deshalb sind auch die Stöße untereinander sehr mild. In den unterirdischen Laboratorien sind die Detektoren von der kosmischen Strahlung weitgehend abgeschirmt und es besteht eine Hoffnung, dass man die dunkle Materie direkt sieht und nicht nur indirekt aus der Bewegung der Galaxien ableiten kann. Das größte europäische unterirdische Laboratorium befindet sich in Italien, etwa 2000 Meter unterhalb des Gran Sasso Gebirgsmassivs.

1.13 Dunkle Energie – die finstere Unbekannte

Wir haben gesehen, dass sowohl unsere als auch die dunkle Materie die Raumzeit krümmen. Die Frage ist jedoch, ob die Raumzeit des Universums als Ganze auch großräumig gekrümmt ist. Alle astronomischen Beobachtungen zeigen jedoch, dass dies nicht der Fall ist. Die Raumzeit des Universums ist flach. Dies verlangt eine bestimmte Materie-/Energiedichte im Universum. Aber die Gesamtheit der normalen und dunklen Materie ist zu gering, um die Raumzeit zur Fläche zu formen. Das flache Universum wird erreicht, wenn nicht nur unsere und die dunkle Materie das Universum füllen, sondern noch eine weitere zusätzliche Energiequelle, die sogenannte dunkle Energie. Man glaubt, dass das Universum zu 70 % aus dunkler Energie, zu 25 % aus dunkler Materie und nur zu 5 % aus der uns bekannten Materie besteht. Wie wir im Kapitel über Kosmologie diskutieren werden, glaubt man, die dunkle Energie bereits nachgewiesen zu haben. Mit der Verbanung des Äthers ist das Universum nicht durchsichtiger geworden. Nicht nur die dunkle Energie, sondern auch das Higgs-Feld erfüllt das Universum (siehe Kap. 5). Das Kapitel über die Gravitation können wir mit den Worten von George Bernard Shaw abschließen: *Die Wissenschaft löst nie ein Problem ohne zehn neue zu schaffen.*

1.14 Zusammenfassung

Drei experimentelle Befunde, die in diesem Kapitel besprochen wurden, sind entscheidend: Kräfte hängen über die Newton'schen Axiome mit beschleunigten Bewegungen zusammen. Die Lichtgeschwindigkeit ist eine universelle Konstante und die träge und schwere Masse sind gleich. Dies sind die Grundlagen der modernen Gravitationstheorie. Die Gravitationskraft ist anziehend. Deshalb sind stabile Zustände nur möglich, wenn rotierende Systeme vorliegen. Stabile Rotation ist möglich, wenn der frei fallende Körper auf einer Kreisbahn gehalten wird. Dies gilt immer, angefangen vom Erde-Mond-System über das System Planet-Sonne und die Rotation des Sonnensystems um das Zentrum der Milchstraße.

Das Universum kann als Ganzes nicht rotieren. Ernst Mach würde dies damit begründen, dass es in dem Fall keine Bezugsmassen gäbe, in Bezug auf die das Universum rotieren könnte. Die Gravitation des Universums ist ein Kapitel für sich und die Kosmologie Gegenstand aktueller Forschung.

2

Atome – von der unteilbaren Kugel zum quantenmechanischen System

Denn wenn man nicht zunächst über die Quantentheorie entsetzt ist, kann man sie doch unmöglich verstanden haben.

Niels Bohr

Elektromagnetische Wellen breiten sich durch das gesamte Universum aus und sind die wichtigsten Informationsträger aus den Weiten des Kosmos.

Frei bewegliche Elektronen, die nicht an Atome gebunden sind, liefern den elektrischen Strom mit seinen unzähligen Erscheinungen, welche meist durch die Theorie der Elektrodynamik beschrieben werden.

Die im Atom gebundenen Elektronen enthüllen den quantenmechanischen Charakter der atomaren Struktur und der elektromagnetischen Wechselwirkung.

Der Name Atom ($\alpha\tauομος$ = unteilbar), den Demokrit (ca. 460–370 v. Chr.) für die Beschreibung der grundlegendsten, unteilbaren Bausteine der Materie gewählt hatte, würde viel besser zu den heutigen unteilbaren Elementarteilchen namens Quarks passen. Zumindest hätte *Atom* mehr Bedeutung gehabt als *Quark*. Aber jener Name ist im 19. Jahrhundert für die damals noch hypothetischen, kleinsten mikroskopischen Objekte reserviert worden.

Es gab in dieser Zeit viele Hinweise darauf, dass sich die Formenvielfalt, in der die Materie erscheint, mit der Annahme erklären lässt, dass jede Substanz aus einer endlichen Zahl grundlegender Bausteine aufgebaut ist. Die Chemiker haben sich schon sehr früh mit den Atomen angefreundet. Sie konnten mit den Atomen, deren chemische Eigenschaften aus bekannten Verbindungen abgeleitet werden konnten, gezielt neue Verbindungen synthetisieren. Dazu kam, dass Dimitri Mendelejew (1834–1907) Ende des 19. Jahrhunderts ein überzeugendes Periodensystem der Elemente vorgestellt hat. Aus der Tatsache, dass sich die chemischen Eigenschaften der Elemente periodisch wiederholen, konnte man schließen, dass eine Systematik in ihrem Aufbau steckt und die Atome keineswegs unteilbar sind.

Die Atome, ob nun teilbar oder nicht, waren die ersten physikalischen Objekte, die man weder mit dem bloßen Auge noch mit einem Mikroskop sehen konnte. Darf man in der Physik von hypothetischen Atomen reden, wenn man gar nicht weiß, wie sie aussehen? Diese Frage war der Anlass zu einer Kontroverse zwischen Ernst Mach (1838–1916) und Ludwig Boltzmann (1844–1906).

Boltzmann gehörte zu den bedeutendsten Physikern des 19. Jahrhunderts. Als Professor für mathematische Phy-

sik in Graz und als Nachfolger Josef Stefans (1835–1893) für theoretische Physik in Wien, hatte er außerdem noch einen Lehrstuhl für Philosophie inne. Mithilfe seiner statistischen Mechanik konnte er makroskopische Eigenschaften der Materie als statistische Mittelwerte der molekularen Bewegungen deuten. Die weitere Würdigung von Boltzmanns Werk werden wir aber zunächst in das Kapitel zur Thermodynamik verschieben.

Wie Boltzmann war auch Mach ein bedeutender österreichischer Physiker, und auch er hatte, wie damals nicht unüblich, neben der Physik auch einen Lehrstuhl für Philosophie. Er vertrat aber eine zu Boltzmann konträre Ansicht. Die Boltzmann'sche Interpretation der Eigenschaften der Materie im Atombild hatte er durchaus als konsistent akzeptiert. Trotzdem war er der Ansicht, dass man besser die handfesten physikalischen Größen wie Temperatur, Druck, Zähigkeit, etc. als die Bewegung von fiktiven Atomen benutzen sollte. Mach hatte sich voll und ganz dem europäischen Positivismus und amerikanischen Pragmatismus verschrieben. In der Physik versteht man unter dem Positivismus, dass man in der Physik nur über experimentell nachweisbare Objekte und ihre Eigenschaften redet. Der amerikanische Pragmatismus geht noch weiter: Man solle nur die praktischen, für das Leben relevanten Eigenschaften der Natur untersuchen. Auch nachdem die Existenz der Atome bereits evident war, ließ er sich nicht von seiner Überzeugung abbringen.

Heutzutage binden wir uns in der Physik nicht mehr an philosophische Prinzipien. Die großen Entdeckungen in der Physik, wie auch in anderen Naturwissenschaften, wurden experimentell aus Neugier gemacht. Später, im Rahmen der

ersten Modelle, waren es die theoretischen Überlegungen, die zu verfeinerten Experimenten geführt haben. Es war immer klar, dass das Experiment über die Richtigkeit theoretischer Modelle entscheidet.

In diesem Kapitel werden wir auf eine ähnliche Kontroverse treffen, wenn es um die Interpretation der Quantenmechanik geht. In diesem Fall scheint sich aber der positivistische Standpunkt durchgesetzt zu haben. Nachdem die Existenz von Quarks als grundlegende Bausteine der Kernmaterie vorgeschlagen wurde, wusste man lange Zeit nicht, ob sie nun echte Teilchen, ein theoretisches Konstrukt oder nur ein Hilfsmittel sind, um die Buchhaltung der Vielzahl gefundener Teilchen zu vereinfachen. Der experimentelle Nachweis, dass die Quarks echte Teilchen sind, war eine wahre Bestleistung der Experimentalphysik.

Die Untersuchung der atomaren und subatomaren Systeme verlangt neue experimentelle Methoden, die das Sehen der makroskopischen Welt ersetzen. Sehen im makroskopischen Sinne bedeutet, dass wir die Objekte, die wir beobachten, beleuchten oder aufheizen, sodass sie Licht aussenden. Die Sonne und die Sterne sind beispielsweise von sich aus heiß genug, um selbst zu leuchten. Bei der Beobachtung mikroskopischer Objekte liegt der Unterschied tatsächlich nur in der Art der „Beleuchtung“ und der „Aufheizung“. Je kleiner das zu untersuchende Objekt ist, umso kleiner muss die Wellenlänge der Strahlung sein, um überhaupt das Objekt sehen zu können. Eine kleine Wellenlänge bedeutet eine hohe Frequenz, wobei die Energie der Strahlung zu der Frequenz proportional ist. Wenn wir unsere Umgebung mit sichtbarem Licht beleuchten, ändert sich an der

Umgebung nichts. Die Sachen, die wir mit unseren Augen sehen, sind so groß, dass sie das Licht, mit dem wir sehen, nicht beeinflusst. Wenn aber ein einzelnes Atom mit energetischen Strahlen beleuchtet wird, ändert sich sein Zustand sehr wohl. Auch die Aufheizung von Atomen und noch viel mehr von Kernen beruht auf der Energiezufuhr mithilfe von Beschleunigern, die sie zum Leuchten bringen.

Ein wichtiger Unterschied zwischen einer klassischen und einer quantenmechanischen Messung lautet also: Die klassische Messung lässt das beobachtete Objekt unbeeinflusst, während die quantenmechanische Messung mit einer Beeinflussung einhergeht.

2.1 Kathodenstrahlen – die Entdeckung der ersten Elementarteilchen

Julius Plücker (1801–1868) hat in der Mitte des 19. Jahrhunderts die Gasentladung entdeckt. In einer meist als Kathodenstrahlröhre bezeichneten Röhre mit einem schlechten Vakuum und jeweils einer auf Hochspannung liegenden positiven und negativen Elektrode beobachtete er ein fluoreszierendes Gas. Wenn im dünnen Gas ein Atom ein **Elektron** abgegeben hat, wurde dieses im elektrischen Feld so weit beschleunigt, dass es weitere Atome ionisierte oder anregte. Das dünne Gas leuchtete dadurch in schönen Farben. Später, mit einem besseren Vakuum, bildete sich im Rohr von der negativen Kathode ausgehend ein Strom aus Elektronen (Abb. 2.1). Diese Röhren sind damit bereits klei-

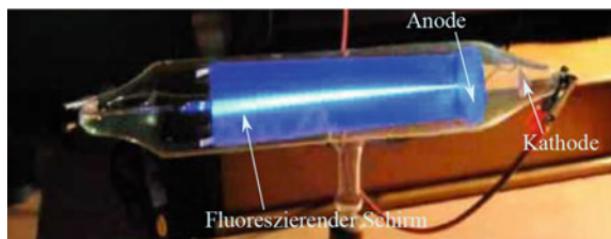


Abb. 2.1 In einer Kathodenstrahlröhre treten Elektronen aus der Kathode aus, werden zur Anode hin beschleunigt und treten dort durch ein Loch hindurch. Ein fluoreszierender Schirm macht hier den Elektronenstrahl sichtbar. Das bläuliche Leuchten kommt also nicht durch die Elektronen selbst, sondern entsteht erst durch Anregung des Materials

ne Elektronenbeschleuniger. Schon der erste Schritt in das Innere der Atome verlangte Elektronen mit Energien, die man durch Beschleunigung im elektrischen Feld gewonnen hat.

Die spektakulärste Entdeckung, die mithilfe der Kathodenstrahlröhre gelang, war die Entdeckung der Röntgenstrahlen. Neben ihrer vielfältigen Anwendung in Medizin und Technik spielt die Röntgenstrahlung auch eine große Rolle bei der Erforschung der inneren Struktur von Festkörpern und Atomen.

Wilhelm Konrad Röntgen (1845–1923) hat 1895 unterschiedliche Kathodenstrahlröhren, die damals zur Verfügung standen, untersucht. Die Fluoreszenz in der Kathodenstrahlröhre war wohlbekannt. Mit dem Strom in der Röhre fluoreszierten das Gas und das Glas an der Stelle, wo es vom Elektronenstrahl getroffen wurde. Röntgen hatte die Röhre abgeschirmt, damit kein Fluoreszenzlicht aus

der Röhre kommen konnte. In der Nähe der Röhre stand zufällig ein Schirm aus fluoreszierendem Material. Bei eingeschalteter Spannung an den Elektroden floss nicht nur der Strom in der Röhre. Röntgen konnte trotz der vollständigen Abdeckung der Röhre eine leichte Fluoreszenz auf dem äußeren Schirm beobachten. Die Fluoreszenz war auch unter verschiedenen Abständen von der Röhre zu sehen. Mit gleichem Erfolg wiederholte er den Versuch mit unterschiedlichen Röhren und mit Unterstützung anderer Experimentalwissenschaftler wie William Crookes (1832–1919) in England oder Philipp Lenard (1862–1947) in Deutschland. Er beschloß also, dass er eine neue unsichtbare Strahlung entdeckt hatte, die er X-Strahlen nannte. Innerhalb weniger Tage hat er die wichtigsten Eigenschaften dieser neuen durchdringenden Strahlung bestimmt. Dabei entstand das berühmte Bild mit der Hand seiner Frau und ihrem Ehering, durchleuchtet von den Röntgenstrahlen. Schwere Elemente, wie Gold, absorbieren die Strahlung stark, mittelschwere Elemente, wie Kalzium, moderat. Das Gewebe ist für die Strahlung fast durchlässig. Die erste und auch heute noch wichtigste Anwendung der Röntgenstrahlung ist das gleichnamige medizinische Bildgebungsverfahren. Er selbst benutzte für die neue Strahlung immer nur den Namen X-Strahlen. Später wurde die Strahlung zu seinen Ehren als Röntgenstrahlung bezeichnet. Er wollte seine Entdeckung nicht patentieren lassen. Der erste Nobelpreis in Physik ging 1901 an Röntgen.

Einige Jahre nach der Entdeckung von Röntgen konnte Max von Laue zeigen, dass die Röntgenstrahlen elektromagnetische Wellen sind. An regelmäßigen Kristallen zeigen

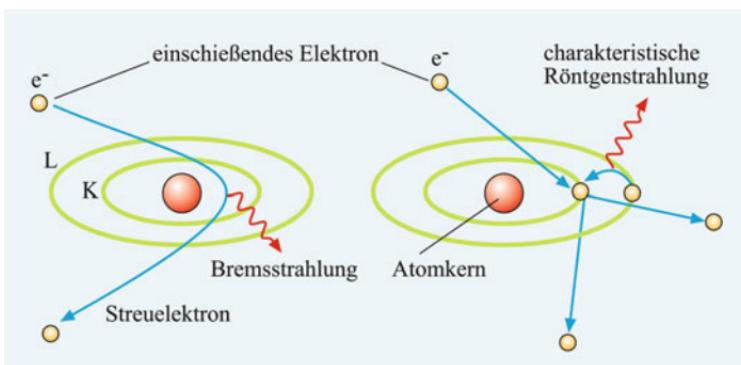


Abb. 2.2 Die Röntgenstrahlen entstehen beim Abbremsen der Elektronen im elektrischen Feld der Atomkerne (Bremsstrahlung). Die Elektronen ionisieren die Atome. Beim Auffüllen der freigewordenen Plätze durch äußere Elektronen entstehen die charakteristischen Strahlen, die von der Art der Atome abhängig sind

sie Interferenzen, ähnlich wie man es vom Licht kennt. Für diese Entdeckung bekam er den Nobelpreis im Jahre 1914.

Die physikalische Deutung der Röntgenstrahlung war damit klar (Abb. 2.2). Wenn eine elektrische Ladung beschleunigt oder abgebremst wird, emittiert sie elektromagnetische Wellen. Im Falle der Röntgenröhre werden die energiereichen Elektronen in der Anode durch die Kerne des Metalls abgelenkt, was physikalisch einer Beschleunigung entspricht. Dabei emittieren sie elektromagnetische Wellen und verlieren somit einen Teil ihrer kinetischen Energie. Diesen Anteil der Röntgenstrahlen nennt man Bremsstrahlung. Die Elektronen können aber auch Elektronen aus der Schale des Atoms herausschlagen. Der freigewordene Platz wird mit einem im Atom vorhandenen Elektron gefüllt. Dabei gibt das Elektron seine Energie durch die Strahlung

ab. Die ist für das Atom charakteristisch und wird daher *charakteristische Röntgenstrahlung* genannt.

Die Röntgenstrahlen wurden auch schon vor Röntgen beobachtet. Beispielsweise von William Crookes (1832–1919) an der von Johann Hittorf (1824–1914) und ihm entwickelten Kathodenstrahleröhre oder von Philipp Lenard (1862–1947) an der von ihm entwickelten Röhre. Sie haben eine Schwärzung von fotografischen Platten beobachtet, aber keine wissenschaftlichen Folgerungen gezogen.

Lenard hat trotzdem den Einspruch erhoben, dass man ihm die Entdeckung der neuen Strahlen anerkennen sollte. Es gab aber nie einen Zweifel, dass die Entdeckung der neuen Strahlen allein Röntgen zuzuschreiben ist.

Ein weiteres wichtiges Ergebnis der Anwendung der Kathodenstrahleröhre war die Identifizierung des Elektrons als Träger des Stroms in der Röhre von Joseph John Thomson im Jahre 1897. Eine Skizze der Apparatur ist in Abb. 2.3 zu sehen. Man schloss aus der Tatsache, dass das Elektron im elektrischen und magnetischen Feld abgelenkt werden konnte, darauf, dass es sich um ein Teilchen handeln muss. Die Wissenschaftler zogen damals daraus auch den Schluss, dass das Elektron keine elektromagnetische Welle wie beispielsweise das Licht ist. Thomson konnte mithilfe seiner Apparatur das Verhältnis zwischen Ladung und Masse des Elektrons bestimmen. Dieses war sehr groß, was bedeutet, dass das Elektron eine sehr kleine Masse, verglichen mit einem Wasserstoffatom, haben muss. Aufgrund dieser Erkenntnis hat Thomson 1904 das erste Modell des Atoms vorgeschlagen. Das Atom besteht aus einer positiv geladenen Masse, in der die negativ geladenen Elektronen eingebettet sind. In seiner Vorstellung verglich Thomson es mit

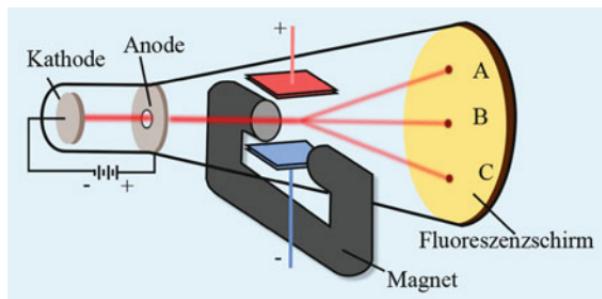


Abb. 2.3 Thomson hat eine Kathodenstrahlröhre mit einer elektrischen und magnetischen Ablenkung ausgerüstet. Dadurch konnte er das Verhältnis zwischen der Elektronenladung und der Elektronenmasse bestimmen. Aufgrund der kleinen Masse der Elektronen ist dieses Verhältnis viel größer als beispielsweise für die sehr viel schwereren Protonen

einem positiv geladenen Teig, in dem die negativ geladenen Elektronen wie Rosinen verteilt sind. Deshalb erscheinen die Atome in der Summe nach außen hin elektrisch neutral. Das Modell bekam den anschaulichen Namen *Rosinenkuchenmodell*.

Thomson bekam 1884 die angesehene Stelle der *Cavendish Professorship of Experimental Physics* in Cambridge. 1906 erhielt er den Nobelpreis in Physik für den experimentellen Nachweis, dass das Elektron ein Teilchen ist. Mit dem Elektron ist das erste richtige Elementarteilchen entdeckt worden. Zumindest gibt es bis heute keine Anzeichen dafür, dass das Elektron aus noch kleineren Bausteinen besteht. Es muss an dieser Stelle erwähnt werden, dass seinem Sohn, George Paget Thomson, dreißig Jahre später der Nobelpreis für die Entdeckung, dass das Elektron auch eine Welle ist, zuerkannt wurde.

Dass das Licht den Wellencharakter hat, wusste man schon früh im neunzehnten Jahrhundert durch die Beobachtung von Beugungerscheinungen. Das Elektron jedoch wurde seit jeher als Teilchen betrachtet. Wie kann ein Teilchen mit sich selbst interferieren? Die Antwort ist die Quantenmechanik, die wir noch in diesem Kapitel behandeln werden. Zwei von Thomsons Schülern beziehungsweise Assistenten, Rutherford und Aston, von denen wir später noch hören werden, haben weitere Nobelpreise in der Chemie bekommen, auch wenn ihre Pionierarbeiten in der Kernphysik lagen.

2.2 Photonen – Wellen auf dem Weg zum Teilchen

Die Sonne leuchtet in allen sichtbaren Farben, was wir insgesamt als weiß wahrnehmen. Sie leuchtet aber auch in für uns unsichtbaren Frequenzen, etwa in kurzwelliger Ultraviolettsstrahlung und langwelliger Infrarotstrahlung. Die Frequenzverteilung des Sonnenlichts nennen wir Schwarzkörperstrahlung. Die wichtigste Eigenschaft des schwarzen Körpers ist, dass die abgestrahlte Frequenzverteilung nur von der Temperatur, aber nicht von der chemischen Zusammensetzung abhängt.

Die Strahlungsenergie der Sonne wurde schon von Josef Stefan (1836–1893) vermessen und zusammen mit Boltzmann zu einem Stefan-Boltzmann-Gesetz formuliert: Die abgestrahlte Energie des schwarzen Körpers hängt von der vierten Potenz der Temperatur ab. Eine genaue theoretische

Erklärung zur Temperaturabhängigkeit und zum Spektrum der Strahlung gab es damals aber nicht. Ein ähnlich weißes Spektrum wie das Sonnenspektrum weisen die Glühbirnen mit Wolframfäden auf. Es beruht also rein auf der hohen Temperatur des Glühdrates. Das Spektrum von Energiesparlampen oder LEDs hingegen beruht auf anderen Mechanismen und hat nichts mit dem Spektrum eines heißen schwarzen Körpers zu tun. Deshalb entsteht manchmal auch der Eindruck von „kaltem“ Licht, da bestimmte Farben im Spektrum nicht enthalten sind.

Die Glühbirnen-Industrie hat Max Planck (1858–1947) darum gebeten eine Theorie für die Strahlung schwarzer Körper zu entwickeln. Die Lösung des Problems, das Planck'sche Strahlungsgesetz, hat eine Revolution in der Physik ausgelöst und führte schließlich zur Erfindung der Quantenphysik. Das Planck'sche Strahlungsgesetz beschreibt in einer Formel den genauen Verlauf des Spektrums eines schwarzen Körpers in Abhängigkeit von seiner Temperatur. Das bereits erwähnte unvollständige Stefan-Boltzmann-Gesetz ergibt sich als ein Spezialfall des allgemeinen Planck'schen Strahlungsgesetzes. Max Planck hat immer beteuert, er sei kein Revolutionär. Trotzdem hat er eine der größten Revolutionen in der Geschichte der Physik ausgelöst. Bei der Herleitung der Formel musste er zwei psychologische Hürden überwinden. Erstens musste er die sogenannte statistische Mechanik von Boltzmann, trotz seiner Abneigung gegen die statistische Beschreibung der Materie, bemühen. Zweitens tritt die abgestrahlte Energie einer bestimmten Frequenz nur in Quanten, also kleinen Energiepaketen, auf. Dafür musste er in der Formel ein Wirkungsquantum einführen, spä-

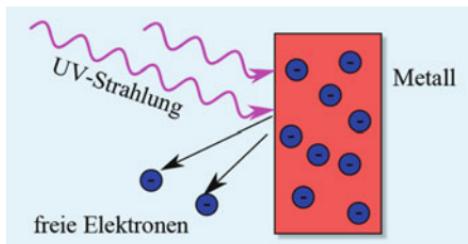


Abb. 2.4 Prinzip des Photoeffekts. Kurzwellige Ultraviolett-Strahlung trifft auf ein Metall, in dem sich Elektronen befinden. Dadurch können diese herausgelöst werden, wodurch freie Elektronen entstehen

ter Planck-Konstante h genannt. Etwa gleichzeitig zur Veröffentlichung des Planck'schen Strahlungsgesetzes beobachtete Lenard in Heidelberg die Emission von Elektronen bei der Bestrahlung von Metallen mit Licht. Dieser Mechanismus ist schematisch in Abb. 2.4 dargestellt. Das Hauptresultat dabei war, dass die Energie der emittierten Elektronen ausschließlich von der Lichtfrequenz, aber nicht von der Lichtintensität abhängt. Diesen Effekt nennen wir heute den *Photoeffekt* und auf einem ähnlichen Prinzip beruhen die heutigen Solarzellen zur Erzeugung von elektrischem Strom.

Der junge Einstein hat in seinem fruchtbarsten Jahr, 1905, die beiden Erkenntnisse von Planck und Lenard zusammengefasst: Das Licht ist in Energiepaketen, Energiequanten, der Größe $E = h\nu$, gebündelt. Dabei sind h das erwähnte Planck'sche Wirkungsquantum, eine neue Naturkonstante, und ν die Frequenz des Lichts. Die Energie der einzelnen Lichtquanten hängt nur von ihrer Frequenz ab. Die Frequenz vom blauen Licht ist zweimal höher als

die Frequenz vom roten Licht. Die einzelnen Photonen des blauen Lichts haben deshalb eine zweimal höhere Energie als die Photonen von rotem Licht.

Mit der Zeit sind noch weitere Quanteneffekte des Lichts beobachtet worden, insbesondere die Streuung des Lichts an Elektronen, der sogenannte *Comptoneffekt*. Wenn wir die Quanteneffekte des Lichts betonen wollen, reden wir anstelle von Licht von *Photonen*.

Was macht das Licht zum Photon? Licht ist eine elektromagnetische Welle. Man kann die Schwingungen des elektrischen und magnetischen Feldes messen. Ein Photon ist eine elektromagnetische Welle und keineswegs so lokalisiert, wie wir uns ein materielles Teilchen vorstellen. Aber wenn es mit anderen Teilchen wechselwirkt – im Falle des Photoeffekts mit Elektronen im Atom – gibt das Photon stets seine Gesamtenergie $E = h\nu$ als ganzes Quant an das Elektron ab. Dies macht das Licht zu Photonen.

Max Planck hat 1918 für die theoretische Erklärung der Schwarzkörperstrahlung den Nobelpreis bekommen, Einstein im Jahre 1921 für die theoretische Erklärung des Photoeffekts mithilfe der Lichtquanten.

Der Nobelpreis für Einstein war eine Notlösung. Er hat ihn nicht für seine Hauptleistung, die Relativitätstheorie, bekommen, da damals der Widerstand im Komitee zu groß war. Die Relativitätstheorie erschien den meisten Leuten zu spekulativ.

Lenard hat 1905 den Nobelpreis für seine Arbeiten an der Kathodenstrahleröhre bekommen. Er hat nicht verkraftet, dass die berühmten Entdeckungen der Röntgenstrahlen und des Photons, die er mit seinen Experimenten hätte machen können, andere gefunden haben. Möglicherweise war

dies einer der Gründe für die späteren Entgleisungen seiner politischen und wissenschaftlichen Aktivitäten. In die Geschichte ging er ein als ein exponierter Nationalsozialist und Autor des vierbändigen Lehrbuches *Deutsche Physik*, eine Verneinung der Quantenmechanik und der Relativitätstheorie.

2.3 Rutherfordstreuung – die Entdeckung des Kerns

Ernest Rutherford (1871–1937) (Abb. 2.5) wird häufig als Vater der Kernphysik betrachtet. Generell gilt aber, dass man die großen Physiker nicht so einfach in einzelne Schubladen stecken kann. Rutherford hat wichtige Beiträge zur Radioaktivität geleistet, er hat die ersten Kernreaktionen bemerkt und vieles mehr. An dieser Stelle wollen wir uns seine Bestimmung des Kernradius durch die Streuung von Alphateilchen an Gold anschauen. Mit Alphateilchen bezeichnen Physiker positiv geladene Teilchen aus zwei Protonen und zwei Neutronen. Die Streuung der Alphateilchen war das Schlüsselexperiment zur Klärung der Atomstruktur und gleichzeitig der Beginn der Kernphysik.

Die zwei Assistenten von Rutherford, Hans Geiger (1882–1945) und Ernest Marsden (1889–1970) haben unter der Anweisung von Rutheford das sogenannte Geiger-Marsden-Experiment durchgeführt. Da es noch keine Beschleuniger gab, benutzten sie eine radioaktive Radon-222-Quelle. Die Alphateilchen, die aus der Quelle kommen, haben eine kinetische Energie von 5 Millionen Elektronen-



Abb. 2.5 Rutherford gilt als Pionier der Kernphysik. Seine Bestimmung des Kernradius hat den Weg zum modernen Bild des Atoms bereitet. Zeichnung Jakob Piest, Springer-Verlag Berlin Heidelberg

volt. Im Experiment, das in Abb. 2.6 skizziert ist, wurden die gestreuten Alphateilchen mithilfe von Zinksulfid nachgewiesen.

Zinksulfid leuchtet, wenn ein geladenes Teilchen darauf prallt. Geiger und Marsden mussten mit ihren Augen die Blitze registrieren und den Ablenkinkel auftragen. Die Streuung passierte nur sehr selten und die mühsame Durchführung des Experiments dauerte einige Jahre. Kein Wunder, dass Geiger nach dem mühsamen Zählen der Blitze den ersten elektronischen Zähler für radioaktive Teilchen entwickelt hat, den berühmten Geigerzähler. Das wichtigste Resultat des Versuches war, dass die Alphateilchen, wenn auch selten, zu großen Winkeln streuen

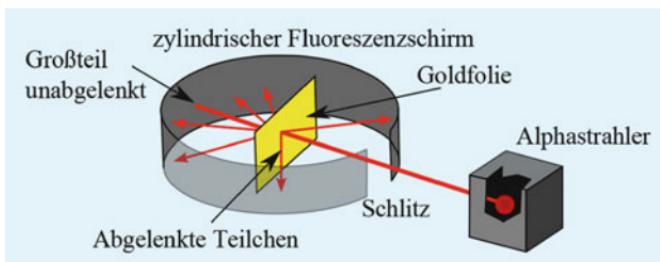


Abb. 2.6 Geiger-Marsden-Experiment. Ein radioaktives Präparat sendet Alphastrahlung auf eine Goldfolie, die von einem zylindrischen Fluoreszenzschirm aus Zinksulfid umgeben ist. Auf dem Schirm lassen sich die abgelenkten Alphateilchen registrieren

können. Dies allerdings erfordert sehr starke elektrische Felder, die nur in der Nähe von sehr kleinen geladenen Objekten auftreten können. Der Atomkern muss dafür viel kleiner sein, als in der Vorstellung Thomsons. Der Radius des Atoms war schon näherungsweise bekannt und nun wusste man, dass er hunderttausend-mal größer ist als der Radius des Kerns. Mit diesen Erkenntnissen hat Rutherford ein Modell des Atoms mit dem Kern in der Mitte und ihn umkreisenden Elektronen vorgeschlagen. Allerdings führt auch dieses Modell zu Widersprüchen, die sich erst durch die Einführung der Quantenmechanik auflösen lassen. Das Problem ist, dass eine Kreisbewegung eine beschleunigte Bewegung ist. Und aufgrund seiner Ladung müsste ein beschleunigtes Elektron ständig elektromagnetische Strahlung aussenden und müsste dadurch stetig an Energie verlieren, bis es schließlich im Kern landet. Rutherford konnte keine Begründung geben, warum die Elektronen nicht im Kern landen. So bekam er nicht die Ehre dem ersten Atommodell

den Namen zu geben. Niels Bohr war mutiger: Er hat die zulässigen Bahnen der Elektronen postuliert, die später von der Quantenmechanik begründet wurden.

2.4 Wasserstoffatom – sein einfacher Aufbau hilft zu verstehen

Im 19. Jahrhundert war die optische Spektroskopie schon sehr weit entwickelt. Man wusste, dass den chemischen Elementen charakteristische Emissionslinien zugeschrieben werden konnten. Der Schweizer Mathematiker und Physiker Johann Jakob Balmer (1825–1898) hat sich mit den Emissionslinien des Wasserstoffs beschäftigt. Diese Emissionslinien wurden damals mit einer Apparatur gewonnen, die beispielhaft in Abb. 2.7 skizziert ist. Eine leuchtende Wasserstofflampe sendet das charakteristische Licht des Wasserstoffs in ein Prisma, wo es in seine spektralen Komponenten zerlegt wird. Die einzelnen Linien lassen sich dann an einem Schirm ablesen und bestimmten Wellenlängen zuweisen. Balmer fand im Jahre 1885 heraus, dass die Wellenlängen im sichtbaren Bereich mit einer einfachen Formel beschrieben werden können. Drei Jahre später hat Johannes Rydberg (1854–1912) die Balmer'sche Formel auf den Gesamtbereich der Emission des Wasserstoffs ausgedehnt.

Gegen Ende von 1910 waren alle experimentellen Daten über die Struktur des Wasserstoffatoms vorhanden. Es besteht aus einem massiven und kompakten Kern, umgeben von leichten Elektronen. Das angeregte Wasserstoff-

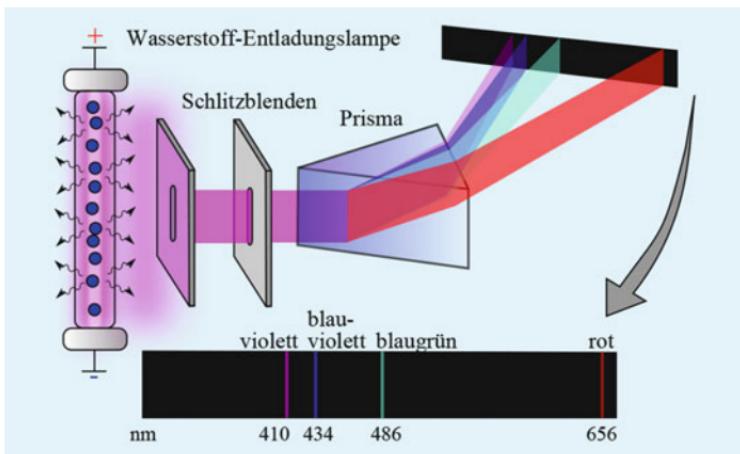


Abb. 2.7 Balmer konnte die Wellenlängen der Emissionslinien des Wasserstoffatoms mit einer einfachen Formel innerhalb des sichtbaren Bereichs reproduzieren. Rydberg hat diese Formel auch für die Linien außerhalb dieses Bereichs erweitert

atom strahlt Licht in diskreten Frequenzen aus, deren genaue Werte durch die Rydberg-Formel gegeben sind.

$$\nu = R \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \quad \text{wobei} \quad n_2 < n_1$$

Niels Bohr (1885–1962) hat die Frequenzen der Lini en, die er aus der Rydberg-Formel entnommen hatte, nach der Einstein'schen Regel, dass die Energie der Photonen $E = h\nu$ ist, der Strahlung zwischen den angeregten Zuständen im Atom zugeschrieben. Dann war für Bohr nur noch ein Puzzle zu lösen, nämlich die Zustände des Atoms

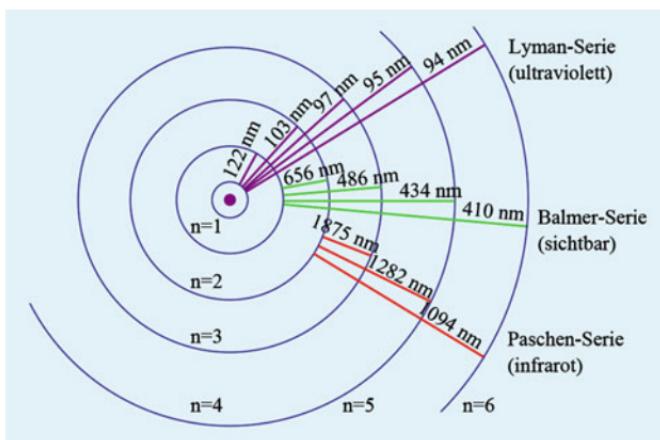


Abb. 2.8 Die erste Version des Bohr'schen Atommodells am Beispiel des Wasserstoffatoms. Die Energien der angeregten Zustände und damit die der Emissionslinien sind durch die Rydberg-Formel gegeben

mit den zum Spektrum passenden Energiedifferenzen zu finden! Dieses Prinzip ist in Abb. 2.8 für einige Übergänge im Wasserstoffatom zusammengefasst. Analog zu den Planeten um die Sonne kreisen Elektronen um den Kern. Der große Unterschied dabei ist, dass Elektronen nur bestimmte Bahnen besetzen können. Die Frage nach dem Warum musste allerdings erst noch beantwortet werden.

Der Radius im energetisch niedrigsten Zustand, den Grundzustand, nennt man den *Bohradius*. Er beträgt etwa ein halbes Ångström [Å]. Ein Å ist der Zehnmillionste Teil eines Millimeters. Wenn man sich für die atomaren Strukturen interessiert, sollte man sich die Abstände nicht mehr in Metern oder Millimetern vorstellen. Man sollte in Ångström denken. Ångström ist aus dem neuen Ein-

heitensystem herausgeflogen, da es nicht in die Reihe der Einheiten passt, die mit einem Tausendstel des Meters skaliert werden: Meter, Millimeter, Mikrometer, Nanometer, usw. Ein Ångström ist so viel wie 0,1 Nanometer und wurde an die Größe des Atoms angepasst.

Das Bohr'sche Modell, das unter anderem besagt, dass sich die Elektronen in Kreisbahnen bewegen, wurde von Arnold Sommerfeld (1868–1951) auf elliptische Bahnen erweitert und mit relativistischen Korrekturen verfeinert. Dieses verfeinerte Atommodell, manchmal auch Bohr-Sommerfeld-Modell genannt, wird als semiklassisches Modell bezeichnet. Die Elektronenbahnen bewegen sich auf wohldefinierten Bahnen, so wie wir sie aus der klassischen Mechanik kennen, während die Abstände vom Kern von der Quantenmechanik vorgegeben sind.

Wir wollen noch einmal auf das Photon zurückkommen. Wenn Atome diskrete Zustände haben, dann kann das Licht nur in entsprechenden Energiepaketen, die den Unterschieden zwischen den Energieniveaus des Atoms entsprechen, abgestrahlt werden. Ein Energiepaket, das sich mit der Lichtgeschwindigkeit ausbreitet, hat einen Impuls, nämlich seine Energie dividiert durch die Lichtgeschwindigkeit. In jeder Wechselwirkung von Licht mit der Materie, etwa beim Stoß von einem Atom mit einem Elektron oder anderen geladenen Teilchen, müssen die Gesamtenergie und der gemeinsame Impuls erhalten bleiben. Das gilt auch für den Photoeffekt und den Comptoneffekt. So weit scheint das Photon eine direkte Konsequenz der Quantenstruktur des Atoms zu sein.

Wir dürfen aber Nils Bohr nicht entäuschen und so tun, als ob wir die Quantentheorie sofort verstehen würden. Ein

Photon als Welle betrachtet breitet sich in alle Richtungen aus. Das werden wir noch an Interferenzen am Doppelspalt zeigen. Aber der Spuk der Quantenmechanik besteht darin, dass das Photon im Moment, in dem wir es an einer Stelle geortet haben, zum lokalen Phänomen wird. Der Wellencharakter ist urplötzlich verschwunden.

2.5 De Broglie – Elektronen sind Wellen

Im Jahre 1924 stellte Louis-Victor de Broglie (1892–1987) in seiner Doktorarbeit die These auf, dass auch materielle Teilchen als Wellen betrachtet werden können. Damit konnte man in Analogie zu „stehenden Lichtwellen“ das Auftreten diskreter Atomzustände begründen. Auf das Bohr'sche Atommodell angewandt bedeutet dies, dass nur solche Bahnen erlaubt sind, bei denen der Kreisumfang ein ganzzahliges Vielfaches der Elektronenwellenlänge beträgt. Nur dann kann sich eine stabile Welle ausbilden, wodurch diskrete Bahnen beziehungsweise Energieniveaus erzwungen werden.

Die originelle These de Broglies war der Auslöser zur quantenmechanischen Beschreibung des Atoms im Jahre 1926 und ein Jahr später zum experimentellen Nachweis des Wellencharakters der Elektronen. Es ist hier jedoch besser mit der Erklärung des Experiments anzufangen als mit den abstrakten Lösungen der Wellengleichungen, um sich vom Wellencharakter des Elektrons überzeugen zu lassen.

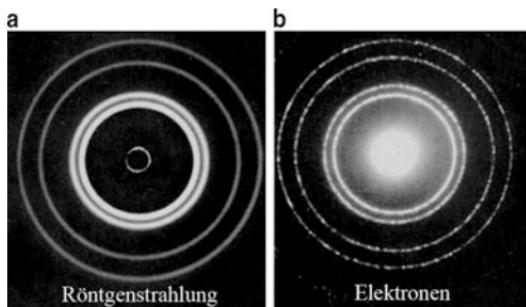


Abb. 2.9 Durchgang der Röntgenstrahlen (a) und Elektronen (b) durch eine Aluminiumfolie. Das Bild wurde mit vergleichbaren Wellenlängen von Röntgenstrahlen und Elektronen aufgenommen. Quelle: Sexl, Raab, Streruwitz; Der Weg zur modernen Physik, Bd. 3

1927 haben zwei Physiker, George Paget Thomson (1892–1975), Sohn von J.J. Thomson, und Clinton Joseph Davisson (1881–1958) gezeigt, dass die Elektronen, ähnlich wie Röntgenstrahlen, an kristallinen Substanzen Interferenzerscheinungen zeigen. Ein Vergleich dieser Interferenzmuster, die bei der Überlagerung zweier Wellen entstehen, ist in Abb. 2.9 zu sehen. Wenn ein klassisches Teilchen, nach unseren Vorstellungen also streng lokalisiert, durch eine Folie fliegt, wechselwirkt es nur mit einzelnen Atomen hintereinander. Man bekäme auf der Fotoplatte nur einen mittleren Punkt. Um allerdings Interferenzringe sehen zu können, müsste die Streuung gleichzeitig an mehreren Atomen stattfinden. Dies ist nur bei Wellen der Fall. Zumindest ist es in unserer makroskopischen Welt so, da eine Welle nicht genau lokalisiert ist. Das zeigt, dass

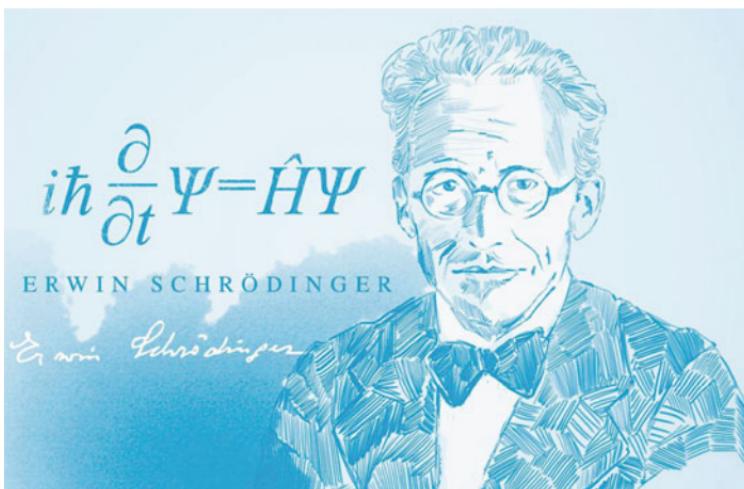


Abb. 2.10 Schrödinger hat die Quantenmechanik mit einer Differentialgleichung, der sogenannten Schrödingergleichung, formuliert. In der atomaren Welt werden die klassischen Bahnen der Elektronen durch die Wahrscheinlichkeitsfunktionen Ψ ersetzt. Die messbaren Größen sind die Wahrscheinlichkeiten der Elektronenposition um die klassischen Bahnen herum, die experimentell nachgewiesen werden können. Zeichnung Jakob Piest, Springer-Verlag Berlin Heidelberg

Elektronen, genau wie die Röntgenstrahlung, Welleneigenschaften aufweisen müssen.

Auch Erwin Schrödinger (1887–1961) (Abb. 2.10) war von de Broglies Idee fasziniert. Nach seiner Promotion und Habilitation in Wien ist er, nach einem schnellen Wechsel der Stellen quer durch Europa, mit einer Professur in Zürich gelandet.

Im Jahre 1926 berichtete er in einem Seminar über de Broglies These. In der nachfolgenden Diskussion kommentierte Peter Debye, auch einer der berühmten Schüler von

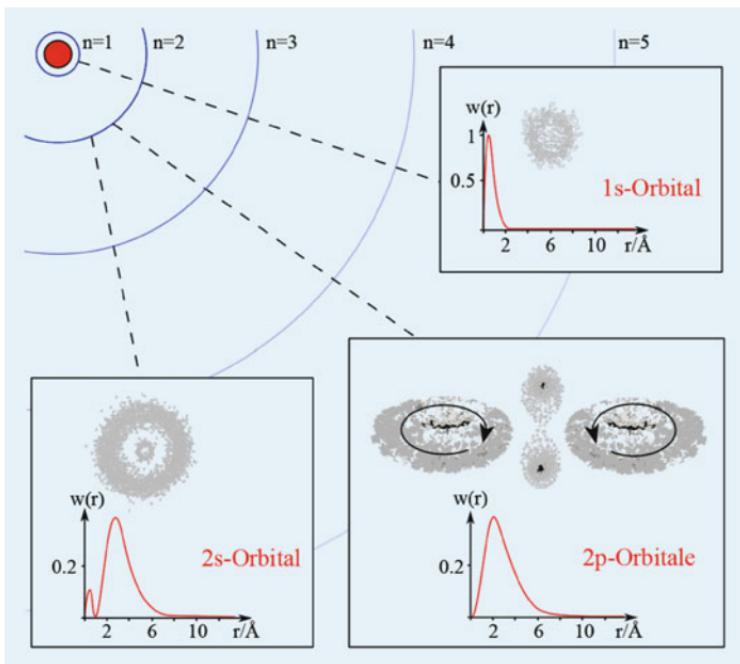


Abb. 2.11 Auch in Schrödingers Vorstellung des Atoms, in dem die Wahrscheinlichkeiten der Elektronenposition angegeben werden, erkennt man die klassischen Bahnen. Sie werden hier Orbitale genannt und bekommen neue Namen wie beispielsweise 1s-, 2s- oder 2p-Orbital

Sommerfeld: „Sie reden von Materiewellen, doch wo ist die zugrundeliegende Wellengleichung?“ Schrödinger ist dieser Forderung noch im selben Jahr nachgekommen und hat die berühmte Schrödinger-Gleichung präsentiert.

In Abb. 2.11 demonstrieren wir, wie sich die Vorstellungen über das Wasserstoffatom beim Übergang vom Bohr'schen zum quantenmechanischen Atommodell än-

dern. Was im Bohr-Sommerfeld'schen Atom noch feste Kreise und Ellipsen waren, sind es im Schrödinger'schen Bild des Wasserstoffatoms Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Elektronen, deren Formen, mit etwas Fantasie, an die alten Bahnen erinnern.

Aber wo sind die stehenden Wellen? Die stehenden Wellen im Atom sind dreidimensionale Wellen. Ihre Form kann durch die sogenannten Kugelflächenfunktionen elegant beschrieben werden, welche in der Mathematik schon lange bekannt waren. Die stehenden Wellen in einem sphärischen Gebilde wie dem Atom haben einen Anteil in radialer Richtung und einen senkrecht dazu, also entlang der Rotationsrichtung des Elektrons um den Kern. Die Funktionen, die das tun, nennt man Kugelfunktionen und sind in Abb. 2.11 gezeigt.

Die radialen stehenden Wellen haben einen Knoten am Ort des Kerns, gefolgt von einem oder mehreren Wellenbüchen. Der niedrigste Zustand des Atoms, der Grundzustand, bekommt die Bezeichnung $n = 1$. Die Zahl n nennen wir die Hauptquantenzahl. Sie bezeichnet die Reihenfolge der möglichen Zustände nach der Energie. In dem Zustand mit $n = 1$ gibt es eine stehende Welle nur in Radialrichtung. Diesen Zustand bezeichnet man als $1s$ -Zustand, oder als $1s$ -Orbital in Anlehnung an die alten Bohr-Sommerfeld-Bahnen. Die erste Zahl sagt, dass die Hauptquantenzahl $n = 1$ ist und der Buchstabe s besagt, dass das Elektron kein Bahndrehimpuls hat. Hier hat die Wahrscheinlichkeitsverteilung einen Knoten am Ort des Kerns und einen Bauch direkt dahinter. Dies erinnert uns an die stehenden Wellen in einem Blasinstrument, bei dem der tiefste Ton dann erklingt, wenn es nur einen Wellen-

bauch zwischen dem Knoten bei den Lippen des Spielers und dem Ende des Instruments gibt.

Der zweite, der erste angeregte Zustand mit der Hauptquantenzahl $n = 2$, hat zwei Wahrscheinlichkeitsbäuche. Entweder zwei in radialer Richtung, was als $2s$ -Zustand bezeichnet wird, oder jeweils einen in radialer und einen in Rotationsrichtung des Elektrons, was als $2p$ -Zustand bezeichnet wird. Das Elektron kann in drei unterschiedliche Richtungen kreisen, was durch die drei unterschiedlichen Arten an $2p$ -Zuständen in Abb. 2.11 angedeutet wird: Entweder um die vertikale Achse im oder gegen den Uhrzeigersinn oder es kreist in der Ebene der vertikalen Achse. Die radialen Wellen tragen keinen Drehimpuls, die Wellen entlang der Rotationsrichtung hingegen schon. Der Drehimpuls ist in kleinste Einheiten von $\hbar = h/2\pi$ quantisiert, je nach Anzahl der Wellenbäuche entlang dieser Richtung.

Der nächste angeregte Zustand $n = 3$ hat drei Wahrscheinlichkeitsbäuche, die wieder auf die radiale Wellenfunktion oder die Drehung verteilt werden.

Dieser Versuch, ein anschauliches Bild des Atoms zu geben, wäre unvollständig ohne das berühmte Zitat von Heisenberg 1945:

Das Atom der modernen Physik kann alleine durch eine partielle Differentialgleichung in einem abstrakten vieldimensionalen Raum dargestellt werden. Alle seine Eigenschaften sind gefolgt; keine materiellen Eigenschaften können ihm in direkter Weise zugeschrieben werden. Das heißt, jedes Bild des Atoms, das unsere Einbildung zu erfinden vermag, ist aus diesem Grunde mangelhaft. Ein Verständnis der atomaren Welt in jener ursprünglicher sinnlichen Weise ist unmöglich.

2.6 Schalenmodell – wie größere Atome aufgebaut sind

Wenn man das Wasserstoffatom begriffen hat, ist die Struktur schwererer Atome leichter zu verstehen. Ein Kern mit der Ladung Z bindet Z Elektronen an sich, um ladungsneutral zu werden. Die Elektronen sitzen dann in den niedrigsten Niveaus, so wie wir sie für das Wasserstoff gefunden haben. Durch die höhere Ladung des Kerns werden die ersten Elektronen näher um den Kern kreisen und stärker gebunden sein als die Elektronen im Wasserstoffatom. Beim Auffüllen der Niveaus gibt es aber noch eine weitere Regel zu beachten, das sogenannte Pauli'sche Ausschlussprinzip oder *Pauli-Prinzip*: In einem Atom können keine zwei Elektronen die gleichen Quantenzahlen haben. Die Hauptquantenzahl n haben wir schon bei der Diskussion des Bohr'schen Atommodells kennengelernt. Ein gebundenes Elektron besitzt aber noch mehr Quantenzahlen, beispielsweise einen Bahndrehimpuls und eine Art Eigendrehimpuls, Spin genannt. In Quantensystemen ist auch der Drehimpuls quantisiert. Er kommt in Einheiten von \hbar vor. Das Elektron und alle weiteren bisher genannten Elementarteilchen haben einen halbzahligen Spin, also beispielsweise $\hbar/2$. Der Spin kann entweder nach oben zeigen oder nach unten. Dies entspricht zwei unterschiedlichen Quantenzahlen des Spins.

Der Kern des Heliumatoms hat die Ladung $Z = 2$. Nach dem Pauli'schen Prinzip können sich nur zwei Elektronen in dem $n = 1$ Zustand befinden. Die beiden sind in dem gleichen Zustand $1s$. Sie müssen aber entgegengesetzte Spins haben, damit sie die gleiche Quantenzahl n und l haben.

setzte Spinorientierungen haben. Die Spinquantenzahl der beiden ist verschieden. Damit ist das Pauli-Prinzip erfüllt. Der Gesamtdrehimpuls addiert sich dann zu Null. Auch die schwereren Atome mit Kernladungen größer als $Z = 2$ können nicht mehr als zwei Elektronen im Zustand $n = 1$ haben. Mit zwei Elektronen ist der Zustand mit $n = 1$ eine abgeschlossene Schale.

Anfangen von Lithium bis Neon füllen die Elektronen das zweite Niveau $n = 2$ mit den $2s$ und $2p$ Zuständen auf. Das macht zusammen acht weitere Elektronen, die sich auf der $n = 2$ -Schale unterbringen lassen. Energetisch ist ein abgeschlossenes Niveau immer am günstigsten. Aus diesem Grunde sind die sogenannten Edelgase, also Helium, Neon, Argon, Krypton, Xenon und Radon, chemisch besonders stabil und nicht reaktiv.

Das Sauerstoffatom hat zwei Elektronen weniger als Neon. Deswegen ist Sauerstoff sehr reaktiv und oxidiert alles was es kann, um sich in der Verbindung zwei fehlende Elektronen von dem Partner auszuleihen oder sogar anzueignen.

Mit der Ausnahme von den anaeroben Organismen benutzen alle Tiere die Verbrennung von Kohlenstoff mit Sauerstoff als Energiequelle. Der Bioenergiezyklus ist einfach. Die Tiere verbrennen Kohlenhydrate mit Sauerstoff in Kohlenstoffdioxid und Wasser, die Pflanzen synthetisieren Kohlenhydrate aus Kohlendioxid und Wasser mithilfe der Sonnenenergie.

2.7 Heisenberg'sche Unschärferelation – man kann nicht alles wissen

Es konnte also gezeigt werden, dass die Elektronen Wellencharakter haben und dies wird von der Schrödinger-Gleichung richtig beschrieben. Das ist ausreichend, um die physikalischen Probleme zu lösen. Allerdings beantwortet die Schrödinger-Gleichung nicht, *warum* ein Elektron Welleneigenschaften zeigt. Aus der täglichen Erfahrung sind wir gewohnt, dass sich materielle Körper anders als beispielsweise Wasser-, Radio- oder akustische Wellen verhalten. Denn Materie ist im Gegensatz zu Wellen genau lokalisiert. Diese intuitive Extrapolation unserer Vorstellungen in den Mikrokosmos scheint nicht zu funktionieren.

Das Licht, das wir mit unseren Augen wahrnehmen, hat Wellenlängen von etwa einem Mikrometer, also dem Tausendstel eines Millimeters. Mit dem bloßen Auge können wir Strukturen bis zur Größe eines Zehntelmillimeters erkennen. Das ist noch immer hundertmal größer als die Wellenlänge des Lichts. Mit einem Mikroskop kann man prinzipiell beliebig vergrößern. Objekte jedoch, die kleiner sind als die Wellenlänge des Lichts, können nicht mehr aufgelöst werden. Das liegt daran, dass die Lichtwellen örtlich nicht lokalisiert sind. Die sogenannte Beugung des Lichts an den betrachteten Objekten begrenzt das Auflösungsvermögen des Mikroskops.

Wie es zur [Interferenzbildung](#) kommt, zeigt Abb. 2.12. Nach dem Huygens'schen Prinzip ist jeder Punkt einer Welle eine neue Quelle der Welle. Was nachher passiert, hängt

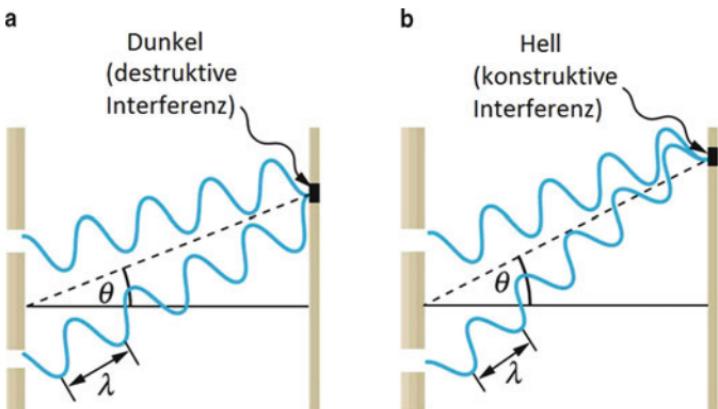


Abb. 2.12 Zwei Punktquellen emittieren synchron die Wellen in alle Richtungen. Wenn die zwei Wellen an dem Ort, an dem sie sich treffen, entgegengesetzte Amplituden haben, vernichten sie sich (a). Wenn aber sich die beiden mit den gleichgerichteten Amplituden antreffen, dann addieren sie sich (b). Zwischen den beiden Extremen verstärken sich die beiden teilweise oder schwächen sich gegenseitig ab. Quelle: <http://www.grenswetenschap.nl/permalink.asp?i=9518>

davon ab, wie sich die Wellen von verschiedenen Quellen addieren.

Wenn eine Welle auf kein Hindernis trifft, dann breiten sich die Wellen ungestört aus. Interessant wird es, wenn die Wellen auf ein Hindernis treffen.

Das Phänomen der Beugung wird gerne mit der Beugung am Spalt veranschaulicht, was in Abb. 2.13 für eine Wasserwelle demonstriert ist.

Die **Beugung** des Lichts wurde schon im 17. Jahrhundert beobachtet. Um diese Effekte zu erklären, hat Huygens (1629–1695) die Wellentheorie des Lichts formuliert. Diese besagt, dass die Fortpflanzung der Lichtwellen folgen-

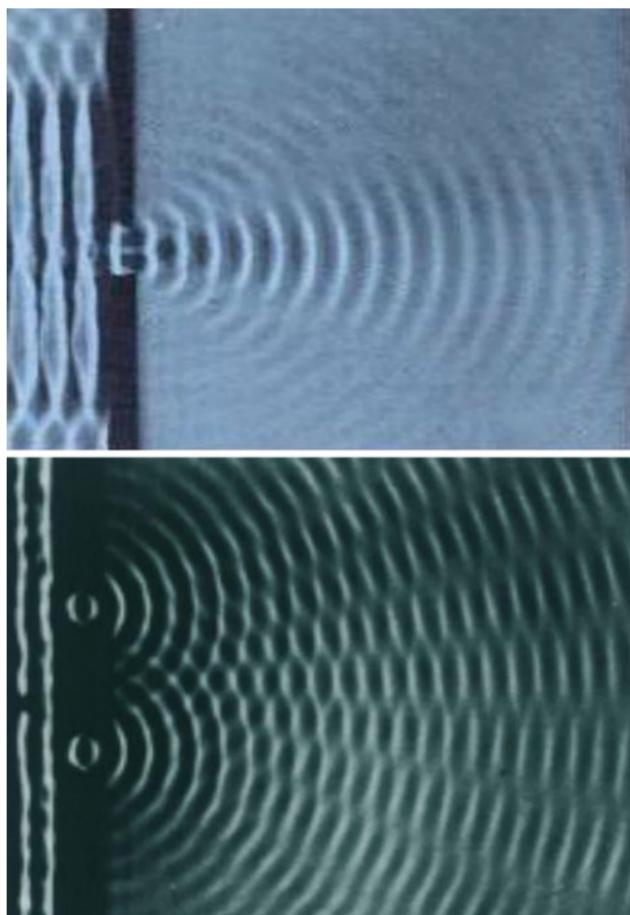


Abb. 2.13 Beugung am Spalt und Interferenzen beim Doppelspalt mit einer Wasserwelle. Aufgrund des Huygens'schen Prinzips entstehen am Ort eines Spalts neue Wellen, die sich in alle Richtungen ausbreiten. Aufgrund der Überlagerung aller Elementarwellen entsteht durch Addition ihrer Amplituden ein charakteristisches Interferenzmuster, welches im rechten Bereich des Bildes als charakteristisches Muster heller und dunkler Bereiche sichtbar wird. Quelle: Gerhard Grüssing: Wasser als Vor-Bild zur Naturforschung, Austrian Institute for Nonlinear Studies

dermaßen funktioniert: Jeden Punkt der Wellenfront kann man als weitere Quelle einer Welle betrachten, welche ihrerseits Wellen in alle Richtungen sendet. Die weitere Ausbreitung der Gesamtwellen hängt davon ab, wie sich die Amplituden aller einzelnen Wellen addieren. Steht ein Hindernis im Lichtweg, breiten sich die Wellen auch hinter dem Hindernis aus. Jene Wellenzüge, die von dem Hindernis nicht gestört werden, senden ihre Wellen in alle Richtungen aus, auch hinter das Hindernis. Dieses Phänomen nennt man Beugung und ist allen Wellen eigen.

Nicht nur die Amplituden der Wellen, die aus einem Spalt kommen, sondern auch die Amplituden der Wellen aus mehreren (in Abb. 2.13 unten beispielsweise zwei) Spalten addieren sich oder können sich auslöschen. Schaut man sich die Wellen entlang einer Ebene an, resultiert ein Interferenzbild, welches durch Addition aller Wellenamplituden zustande kommt. Das Interferenzbild ist ein für die Wellenlänge charakteristisches Muster aus hellen und dunklen Bereichen, bzw. Bereichen hoher Intensität und geringer Intensität. Es ist klar, sobald man im Doppelspalt einen beliebigen der beiden Spalte abdeckt, bekommt man das Bild des Einzelspalts. Das Interferenzbild des Doppelspalts ist allerdings nicht die Summe der Interferenzbilder zweier Einzelspalte. Dies liegt darin begründet, dass sich die Amplituden der Wellen addieren, und nicht ihre Intensitäten.

Die Huygens'sche Wellentheorie wurde lange Zeit nicht akzeptiert. Dafür war die Autorität Newtons, der eine Teilchentheorie des Lichts vertrat, zu groß. Huygens hatte nicht nur Ärger mit Newton, sondern auch noch Streit mit Hooke. Die beiden hatten sich darum gestritten, wer als erster die Federuhr entwickelt hat, und Hooke ist auch aus diesem

Streit als Verlierer hervorgegangen. Heute wird Huygens als Erfinder der Federuhr bezeichnet.

Um die Heisenberg'sche Unschärferelation verstehen zu können, wollen wir die Analyse der Beugung nicht nur für Wasserwellen, sondern auch für das Licht vornehmen. Das Licht ist in Energiepaketen, Photonen, gebündelt. Damit haben Photonen neben einer definierten Energie auch einen Impuls, ähnlich wie materielle Teilchen. Das parallele Licht, das auf den Spalt trifft, hat seinen Impuls nur in Richtung der Ausbreitung, aber keinen Impuls senkrecht dazu. Nachdem der Strahl den Spalt passiert hat, ist er aufgrund der Beugung seitlich verschmiert. Das bedeutet, dass das Photon nach dem Durchqueren des Spalts einen seitlichen Impuls oder Stoß bekommen hat. Entsprechend der Winkelverschmierung der Wasserwellen nach dem Spalt beträgt im Falle der Photonen die seitliche Impulsverschmierung Δp_x . Die Breite der Spaltöffnung bezeichnen wir mit Δx . Die seitliche Verschmierung ist, wie es auch für eine Wasserwelle der Fall wäre, umgekehrt proportional zur Spaltbreite. Je kleiner der Spalt, desto stärker breitet sich die Welle hinter dem Spalt auch in seitlicher Richtung aus. Anders ausgedrückt: Je genauer man also durch Kenntnis der Spaltbreite den Ort des Photons begrenzen möchte, desto stärker wird die Impulsunschärfe Δp_x . Wenn man Abb. 2.13 auf Photonen erweitert, bekommt man also eine seitliche Impulsunschärfe als Folge der räumlichen Eingrenzung des Photons durch den Spalt. Das Produkt $\Delta x \cdot \Delta p_x = \hbar$ hat für Photonen dann den Wert einer festen Konstanten, der Planck'schen Konstante \hbar . Diese Beziehung bezeichnet man als Orts-Impuls-Unschärfe des Photons.

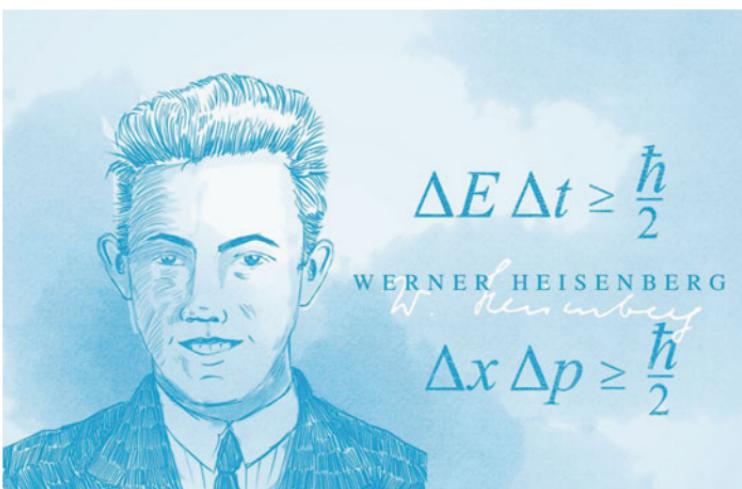


Abb. 2.14 Werner Karl Heisenberg hat 1927 mit 26 Jahren die nach ihm benannte Unschärferelation veröffentlicht. Diese Relation ist nicht die Folge schlechter Messungen, sondern der prinzipiellen Begrenzung der Genauigkeit einer quantenmechanischen und damit jeglicher Messung. Zeichnung Jakob Piest, Springer-Verlag Berlin Heidelberg

Schon seit Huygens hat man von der Beugung des Lichts gewusst. Später konnte man auch präzise die maximal mögliche, beugungsbegrenzte Auflösung eines Mikroskops formulieren – die Auflösung hängt von der Wellenlänge des Lichts ab. Aber niemand hat damals die Wellenlänge des Lichts mit der Energie oder dem Impuls des Lichts in Verbindung gesehen, weshalb diese Beziehung noch nicht bekannt war.

Die konzeptionelle Grundlage der Quantenmechanik wurde von Werner Heisenberg (1901–1976) (Abb. 2.14) in seiner berühmten Veröffentlichung *Über den anschaulichen*

Inhalt der quantenmechanischen Kinematik und Mechanik im Jahre 1927 gelegt.

Aber zunächst eine Anekdote, die mit der bedeutendsten Arbeit Heisenbergs zusammenhängt. Heisenberg hat bei Sommerfeld in München studiert. Er war sein Lieblings-schüler und auch der berühmteste. Heisenberg hat 1923 nach nur drei Jahren promoviert. Seine Promotionsprüfung verlief jedoch nicht so glatt. Einer der Prüfer, der Experimentalphysiker Wilhelm Wien, offensichtlich irritiert vom Heisenberg'schen Desinteresse für die Experimentalphysik, wollte wissen, wodurch die Auflösung eines Mikroskops begrenzt ist. Das Resultat der Befragung war, dass Sommerfeld mit Mühe eine 3 für die Promotion aushandeln konnte. Aus eigener Erfahrung weiß jeder, dass man sich nach einer verunglückten Prüfungsfrage im Nachhinein gründlich mit ihr befasst!

Mit dem, was wir oben über die Beugung von Licht am Spalt gelernt haben und dem Inhalt der Unschärferelation, ist es nicht gerade abwegig zu vermuten, dass gerade die Frage Wiens Heisenberg zur schnellen Formulierung der Unschärferelation geholfen hat.

Eine ähnliche Überlegung, die wir für das Photon gemacht haben, hat Heisenberg für die gleichzeitige Messung des Ortes und des Impulses für das Elektron gemacht. Aber diesmal aus messtechnischen Überlegungen und ohne im Voraus einen Wellencharakter des Elektrons anzunehmen. Warum die Unschärfe gerade zwischen Ort und Impuls besteht, ist klar:

Um den Impuls des Elektrons zu messen, muss man seine Geschwindigkeit bestimmen. Das bedeutet, man muss die Zeit zwischen zwei definierten Messpunkten ermitteln. Die-

se Messungen erfolgen mit Photonen bestimmter Wellenlänge und bestimmten Impulsen. Je genauer wir den Ort des Elektrons bestimmen möchten, desto kleiner muss die Wellenlänge des Messphotons sein und damit allerdings umso größer sein Impuls, der bei der Messung auf das Elektron übertragen wird. Dadurch wird der Impuls des Elektrons wiederum gestört, was zu einer Orts-Impuls-Unschärfe des Elektrons führt.

Für eine gleichzeitige Bestimmung des Ortes und des Impulses für Photonen und Elektronen gelten also die gleichen Beschränkungen, die durch die Heisenberg'sche Unschärferelation gegeben sind. Dies ist aber noch nicht ausreichend, um den Wellencharakter des Elektrons erklären zu können.

Hier beginnt die Deutung der Unschärferelation. Und an diesem Punkt scheiden sich auch die Geister. Die von den meisten Physikern akzeptierte Interpretation ist die sogenannte Kopenhagener Interpretation. Sie wurde von Bohr, Heisenberg und Pauli vertreten. Der Inhalt dieser Interpretation ist der folgende: Es ist *prinzipiell unmöglich* den Ort und Impuls gleichzeitig besser zu messen als durch die Unschärferelation gegeben. Und was man prinzipiell nicht messen kann, gibt es nicht. Ganz im positivistischen Sinne Machs. Ob er sich darüber freuen würde, ist nicht klar. Er hatte auch die Existenz der Atome nicht akzeptiert.

Nicht alle sind damit einverstanden, dass die Unschärferelation eine Eigenschaft der Natur ist. Der prominenteste Gegner der Kopenhagener Deutung war Einstein. Der wesentliche Einwand gegen die Kopenhagener Deutung ist, dass man damit die deterministische Beschreibung der Physik vollkommen unmöglich werden lässt. Das wurde sehr

deutlich durch den berühmten Satz von Einstein ausgedrückt:

Gott würfelt nicht

Die Antwort von Bohr:

Aber es kann doch nicht unsere Aufgabe sein, Gott vorzuschreiben, wie Er die Welt regieren soll.

Die beiden Herrn, Einstein und Bohr, haben Gott in die Diskussion des Determinismus involviert. Laplace war besccheidener. Ihm war schon ein Dämon, der die Koordinaten und die Impulse aller unzähliger Quarks und Leptonen unendlich genau messen kann, für seine Aussagen ausreichend. Wohl gemerkt, unendlich ist keine physikalische Größe. Jedenfalls gilt, wenn entweder Ort oder Impuls eine endliche Ungenauigkeit haben, gibt es kein Determinismus mehr. Mit der Zeit nehmen die Ungenauigkeiten exponentiell zu! Vielleicht haben doch die beiden Herrn Recht – Determinismus ist eine göttliche Angelegenheit.

Aus dem Ringen um die „richtige Deutung“ der Unschärferelation zwischen Einstein einerseits und Bohr, Heisenberg, Pauli anderseits sind noch viele geistreiche Sprüche hervorgegangen. Im Buch von Honerkamp [Hon10] sind einige davon zitiert.

Was Einstein mit seinem Spruch meinte, war, dass unsere Experimente unzureichend seien, um die ganze Physik der Quantensysteme zu entdecken. Alternative Beschreibungen der Quantensysteme ohne einen Verzicht auf Determinismus sind möglich, aber umständlich und führen letztend-

lich zu den gleichen Resultaten wie die Standardbeschreibung.

Dass der Ort und der Impuls zusammen betrachtet werden müssen, wenn man eine deterministische Beschreibung anstrebt, ist leicht einzusehen. Aber auch die Zeit und die Energie hängen zusammen, wie wir gleich sehen werden.

Betrachten wir zunächst die Photonen. Wenn man die Photonenergie messen will, braucht man Zeit. Die Energie des Photons ist bekanntlich $\hbar\nu$. Wenn man die Energie des Photons messen will, muss man also seine Frequenz bestimmen. Um die Frequenz zu bestimmen, muss man einige Amplituden zählen. Je länger man misst, desto genauer wird die Frequenz bestimmt.

Diese Weisheit ist nichts Neues. Musiker kennen sie, bewusst oder auch nicht, schon lange. Um einen sauberen Klang zu hören, muss der Ton ausreichend lange anhalten. Je kürzer ein Ton andauert, desto verschmierter klingt er. Zum Beispiel sind die Frequenzen der hohen Töne einer Sopranistin und der tiefsten der Bässe fast einen Faktor zehn auseinander. Die Sopranistinnen können die Höhen ihrer Stimmen schnell ändern, die Bässe müssen zehnmal länger die gleiche Tonhöhe halten, wenn wir das registrieren sollen.

Heisenberg hat sich die folgende Frage gestellt: Wie kurz muss ein Zeitintervall sein, damit die Energie nicht mehr messbar wird. Die Relation für die Energie-Zeit-Unschärfe sieht ähnlich aus, wie die Orts-Impuls-Unschärfe. Statt Ortsunschärfe steht die Energieunschärfe, statt Impulsunschärfe die Zeitunschärfe. Auch die Energie-Zeit-Unschärfe ist prinzipieller Natur. Dies geht soweit, dass innerhalb einer Zeitspanne Δt die Energieerhaltung um die Größ ΔE

verletzt werden kann, solange das Produkt der beiden die Unschärferelation $\Delta t \cdot \Delta E = \hbar$ erfüllt!

2.8 Quantenelektrodynamik – Pingpong mit virtuellen Teilchen

1785 hat der französische Physiker Charles Augustin de Coulomb (1738–1806) die Resultate seiner Messungen der Kräfte zwischen zwei elektrischen Ladungen veröffentlicht. Die Kraft, also die Anziehung zwischen einer positiven und einer negativen Ladung nimmt mit dem Quadrat ihres Abstandes ab, genauso wie auch die gravitative Anziehung zweier Massenkörper. Die Bindungsenergie, sowohl für die Ladungen als auch für die Massen, nimmt also quadratisch mit dem Abstand ab. Die „Fernwirkung“ der Gravitation wurde von Einstein mit einer Krümmung der Raumzeit erklärt. Ausgangspunkt dieser Deutung war die Beobachtung, dass die schwere und die träge Masse gleich sind, sodass die Beschleunigung unabhängig von der Masse ist, solange die Kraft ihre Ursache in der Gravitation hat. Das ist aber nicht der Fall bei der elektromagnetischen Wechselwirkung. Die elektrische Kraft zwischen zwei geladenen Objekten ist abhängig von ihren Ladungen. Die Beschleunigung jedoch, als Folge der Kraft, hängt von deren Massen ab. Es gilt hier also kein Äquivalenzprinzip, wie es in der Gravitation der Fall ist. Die elektrische Kraft lässt sich damit auch nicht geometrisch deuten.

Die Fernwirkung zwischen elektrischen Ladungen beschreibt man mit einem elektrischen Feld. Als Beispiel: Ein

Proton mit der positiven Ladung erzeugt um sich ein radiales Feld. Ein negativ geladenes Elektron fühlt in diesem Feld eine Anziehung, deren Stärke mit dem Quadrat des Abstandes zum Proton abnimmt. Eine nützliche und konsistente Beschreibung der Fernwirkung, wie es zu diesem Feld kommt und wie stark das Feld bei gegebener Entfernung sein muss, beantwortet dieses Bild der Fernwirkung nicht. Die quantenmechanische Deutung der Fernwirkung gibt dem Bild des Feldes eine physikalische Interpretation.

Die zwei Cartoons in Abb. 2.15 sollen in einer etwas saloppen Art die quantenmechanische Interpretation der Wechselwirkung zwischen elektrisch geladenen Teilchen darstellen. Statt Bällen und Bumerangs emittieren die Ladungen sogenannte virtuelle Photonen und tauschen sie miteinander aus. Die virtuellen Photonen sind jedoch keine freien Photonen wie beispielsweise das Licht, für welche die Relation $E = h\nu$ gelten würde. Sie können sich nur für kurze Zeit zur nächsten Ladung ausbreiten und so ihre „ausgeliehene“ Energie transportieren. Die virtuellen Photonen, ebenso wie auch die reellen Photonen, breiten sich mit der Lichtgeschwindigkeit c aus. In der von der Energie-Zeit-Unschärferelation erlaubten Zeit Δt kann das Photon die Energie ΔE auf einer Strecke $\Delta s = c \cdot \Delta t$ transportieren. Dies entspricht in seiner Aussage dem Coulomb-Gesetz, da hohe Abstände Δs großen Werten von Δt entsprechen, die wegen der Unschärferelation wiederum mit kleinerer Energie verknüpft sind. Die Bindungsenergie des Elektrons um den Kern nimmt damit umgekehrt proportional mit dem Abstand ab.

Mit dem Konzept der virtuellen Photonen hat man die quantenmechanische Interpretation der elektrischen Kraft

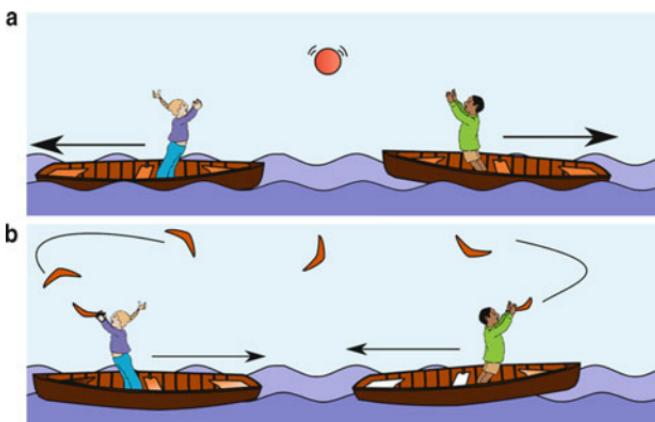


Abb. 2.15 Abstoßung und Anziehung in der klassischen Mechanik durch den Austausch von Bällen (a) und Bumerangs (b). Im klassischen Fall ist die Energie während des ganzen Austausches erhalten. In der Quantenmechanik ist sie nur durch die Unschärferelation begrenzt

gefunden (Abb. 2.15). Die Heisenberg'sche Energie-Zeit-Uncertainty ermöglichte so eine quantenmechanische Deutung der Kräfte zwischen zwei Teilchen. Nicht nur das, mit Hilfe der virtuellen Photonen können auch die bis heute präzisesten Berechnungen in der Welt der Atome durchgeführt werden. Alle Vorhersagen dieser Theorie konnten im Labor durch Experimente genau verifiziert werden. Richard Feynman (1918–1988), einer der drei, die den Nobelpreis für die Entwicklung der Quantenelektrodynamik erhalten haben, hat eine anschauliche Darstellung der quantenelektrodynamischen Wechselwirkung erfunden, die sogenannten Feynman-Diagramme (Abb. 2.16).

Die schönste Charakterisierung dieser Feynman-Grafen hat sein Kollege Murray Gell-Mann gegeben [GM80]:

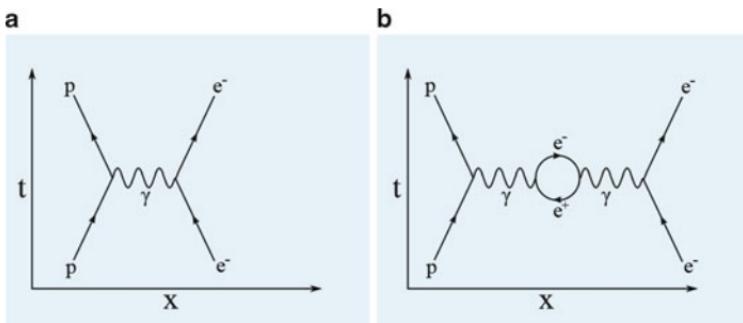


Abb. 2.16 Wechselwirkung von einem Elektron mit einem Proton, dargestellt in Feynman-Diagrammen. In a tauscht das Proton ein virtuelles Photon mit dem Elektron aus. In b geht das Photon in ein virtuelles Elektron-Positron-Paar über. Die positive Ladung des Protons zieht das virtuelle Elektron an sich und stößt das positive Positron weg. Die positive Ladung des Protons wird dadurch verschmiert. Diesen Effekt nennt man Vakuum polarisation

In quantum electrodynamics, as in other field theories we can use the little pictures invented by my colleague Richard Feynman, which are supposed to give the illusion of understanding what is going on in the quantum field theory.

Zu Deutsch: In der Quantenelektrodynamik, wie auch in anderen Feldtheorien, können wir die kleinen, von meinem Kollegen Richard Feynman erfundenen Bilder benutzen. Sie sollen uns glauben machen, dass wir verstehen was in der Quantenfeldtheorie vorgeht.

In Abb. 2.16 ist die elementare Wechselwirkung zweier Ladungen gezeigt, ein Photonenaustausch. Die Anziehung zwischen Elektron und Proton wird dann mit einem dauerhaften Photonenaustausch zwischen den beiden geladenen Teilchen erklärt. Berechnet man unter Annahme dieses

Photonenaustausches die Anziehung zwischen zwei geladenen Teilchen, bekommt man das Coulomb'sche Gesetz. Kein vernünftiger Mensch würde die atomaren Niveaus mit Feynman-Diagrammen ausrechnen, sondern mit dem Coulomb'schen Gesetz. Aber die Finessen, sogenannte Korrekturen zum Coulomb'schen Gesetz, wie beispielsweise die im rechten Bild gezeigte Vakuumpolarisation, werden mithilfe von Feynman-Diagrammen bestimmt. Die Vakuumpolarisation führt zur Abschirmung der Ladungen. Die positive Ladung zieht die Elektronen des virtuellen Elektron-Positron-Paares an und dadurch wird die Ladung verschmiert. Aus einer punktförmigen entsteht durch die Vakuumpolarisation eine diffuse Ladung.

Die Vakuumpolarisation haben wir gewählt, weil wir sie mit der Vakuumpolarisation von Quarks und Gluonen vergleichen wollen (siehe Kap. 5). Im Falle der starken Wechselwirkung führt die Vakuumpolarisation zu einer ewigen Gefangenschaft der Quarks in den Kernbausteinen.

Die Äquivalenz des klassischen Begriffes des elektrischen Feldes und des Quantenbildes der elektrischen Wechselwirkung kann man mit der Bremsstrahlung demonstrieren. Im Bild der klassischen Elektrodynamik entsteht die Bremsstrahlung durch die Emission der elektromagnetischen Wellen während das Elektron im Coulombfeld des Kerns abgelenkt wird (Abb. 2.2). Im Quantenbild stößt ein Elektron mit einem virtuellen Photon und gibt einen Teil seiner Energie an das Photon ab, sodass es zu einem reellen befördert wird (Abb. 2.17). Das Bild der charakteristischen Röntgenstrahlung und der Bremsstrahlung ist im Quantenbild vereinheitlicht. Einmal stößt das Elektron mit einem

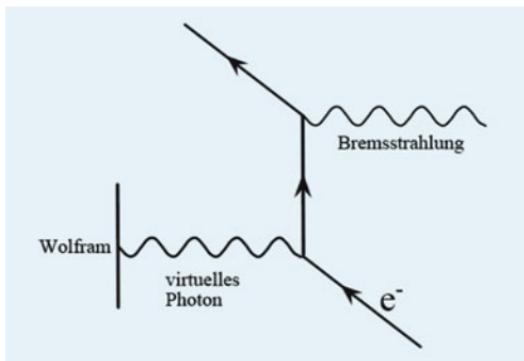


Abb. 2.17 Ein Wolframkern sendet virtuelle Photonen aus. Ein vorbeifliegendes Elektron stößt mit einem virtuellen Photon, gibt ihm ein Teil seiner Energie, sodass aus dem virtuellen ein reelles Photon wird

Elektron der Atomschale und einmal mit einem virtuellen Photon des Coulombfeldes.

2.9 Atome direkt beobachten – der Laser als Kühlmittel

Über Atome zu schreiben ohne den Laser zu erwähnen geht heutzutage nicht mehr. In den fünfziger Jahren glaubte man, dass es nichts Neues mehr in der Atomphysik zu entdecken gibt. In den sechziger Jahren wurde der erste Laser entwickelt und seitdem hat die Atomphysik eine Renaissance erlebt. Dazu kam auch die Entdeckung, dass man Atome und Ionen in Fallen speichern kann. Beispielsweise können Ionen mithilfe elektrischer Wechselfelder eingefangen werden. Um genaue Messungen mit einzelnen

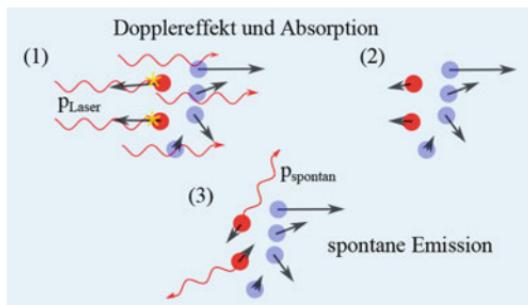


Abb. 2.18 Prinzip der Laserkühlung. Im ersten Schritt wird der Dopplereffekt ausgenutzt, sodass nur diejenigen Atome das Laserlicht absorbieren, die sich der Strahlrichtung entgegen bewegen. Durch Absorption eines Photons mit dem Impuls p_{Laser} bekommen diese Atome einen Stoß nach rechts, was in Schritt zwei sichtbar ist. Die Länge der Pfeile geben dabei die Größe des Impulses an. Im dritten Schritt strahlen die angeregten Atome durch spontane Emission die gespeicherten Photonen wieder ab, diesmal allerdings in zufälliger Richtung. Dadurch erhält das Atom wieder einen Stoß in entgegengesetzter Richtung. Im Mittel sind die Impulse der Atome nach links kleiner geworden. Bestraht man die Atome auch von den anderen Raumrichtungen mit Laserlicht, werden sie auch in anderen Richtungen gekühlt

Ionen durchzuführen, müssen die Ionen auf möglichst tiefe Temperaturen heruntergekühlt werden. Hätten sie hohe Temperaturen, würde aufgrund ihrer ständigen Zitterbewegung eine Unschärfe in Energiemessungen auftreten. Eine entscheidende Anwendung von Lasern in der Atomphysik ist ihre Fähigkeit, Atome zu kühlen. Dies klingt zunächst einmal etwas unintuitiv – wieso sollte man Laser, die in der Industrie sogar zum Schweißen benutzt werden, zur effektiven Kühlung einzelner Atome nutzen? Die Erklärung dazu gibt die Absorption und spontane Emission von Photonen, wie in Abb. 2.18 skizziert. Einzelne Photonen

werden vom Atom absorbiert, wodurch sie den Impuls des Photons aufnehmen und einen Stoß in Richtung des Laserstrahls erfahren. Anschließend strahlt das angeregte Atom das Photon wieder in der spontanen Emission (man spricht auch von Fluoreszenz) ab und bekommt somit erneut einen Stoß, diesmal jedoch in zufälliger Richtung. Im Mittel überwiegen daher Stöße in Richtung des Laserstrahls. Dies kann entweder zu einer Aufheizung oder zu einer Kühlung führen. Zu einer Kühlung kommt es dann, wenn nur die Atome den Laser sehen, die sich ihm entgegen bewegen. Physiker behelfen sich dabei mit einem Trick und nutzen den sogenannten Dopplereffekt aus. Dieser sorgt für eine Änderung der Wellenfrequenz je nach der Geschwindigkeit zwischen Quelle und Empfänger und ist jedem von uns schon einmal begegnet, nämlich wenn ein Krankenwagen mit eingeschaltetem Martinshorn an uns vorbeifährt. Umso schneller das Fahrzeug auf uns zufährt, desto heller klingt die Sirene. Wenn es sich dann wieder von uns entfernt, wird der Klang dunkler. Das liegt daran, dass die Schallwellen eines bewegten Senders, der auf einen ruhenden Empfänger zufährt, als kürzer wahrgenommen werden, als sie eigentlich sind. Wir nehmen somit eine höhere Frequenz wahr. Die Frequenz des Lasers wird nun so eingestellt, dass sie etwas unterhalb der Absorptionsfrequenz des Atoms liegt. Bewegt sich nun das Atom oder das Ion auf den Laser zu, sieht es eine höhere Frequenz, welche der Absorptionsfrequenz entspricht, sodass der oben beschriebene Prozess eintritt. Sobald das Atom kühl ist, sieht es den Laser nicht mehr und bleibt gekühlt. Ein einzelnes, mit einem Laser gekühltes Ion ist in Abb. 2.19 zu sehen. Das Ion leuchtet

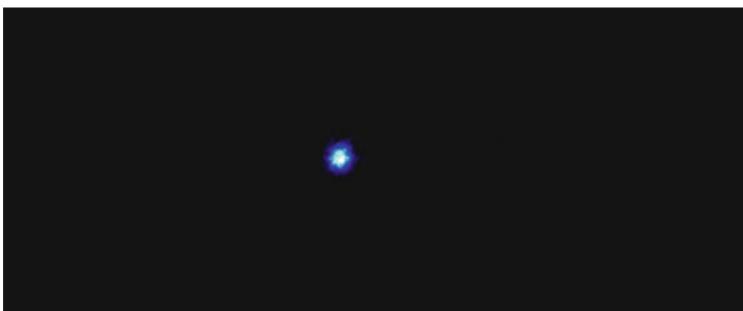


Abb. 2.19 Aufnahme eines einzelnen fluoreszierenden Ions, welches mit einem Laser gekühlt wurde. Achtung: Die Größe des Lichtpunktes entspricht nicht der Größe des Ions, sondern spiegelt lediglich den gesamten Bereich wieder, in dem sich das leuchtende Ion während der Belichtungszeit befand. Das Ion ist um viele Größenordnungen kleiner, als dass man es mit einer Kamera direkt sehen und vermessen könnte. Mit freundlicher Genehmigung des Max-Planck-Instituts für Kernphysik, Heidelberg

aufgrund der spontanen Emission und kann dadurch mit einer Kamera indirekt sichtbar gemacht werden.

2.10 Zusammenfassung

Mit der Quantenmechanik kann die atomare Struktur quantitativ beschrieben werden. Auch die elektromagnetische Welle unterliegt den Quantenregeln. Mit dem Photon bezeichnet man die Quanteneffekte der elektromagnetischen Wechselwirkung.

Die Grundlage der Quantenmechanik ist durch die Heisenberg'sche Unschärferelation gegeben. Die Energie-Zeit-Uncertainty ist die Grundlage des quantenmechanischen Bil-

des der Kraft. Eine Ladung emittiert virtuelle Photonen, ihre Reichweite hängt von dem Grad der Energieverletzung ab. Die virtuellen Photonen entsprechen in der klassischen Elektrodynamik dem elektrischen Feld.

3

Atomkerne – was Protonen und Neutronen zusammenhält und spaltet

Der Inhalt der Physik geht die Physiker an, die Auswirkung alle Menschen.

Friedrich Dürrenmatt

Von oben erwärmt uns die Sonne, von unten das heiße Innere der Erde. Die Sonne erzeugt die Wärme durch die Fusion von Wasserstoffkernen. Die innere Energie der Erde entspringt dem radioaktiven Zerfall schwerer Elemente. In Sternen, die massereicher als unsere Sonne sind, werden schwere Elemente aus Wasserstoff und **Helium** aufgebaut. Kernreaktionen in Sternen und der radioaktive Zerfall instabiler **Isotope** sind ideale Beispiele der sogenannten starken und schwachen Wechselwirkung.

Wie die Welt ohne starke und schwache Wechselwirkung aussähe, also ohne Kernenergie und radioaktiven Zerfall, illustriert die folgende Kontroverse zwischen Physikern, Biologen und Geologen im 19. Jahrhundert.

Als erster hat Helmholtz vorgeschlagen, dass die Sonne ihre Energie aus der Gravitation bezieht. William Thomson, der spätere Lord Kelvin (1824–1907), hat die erste Berechnung des Alters der Sonne und der Erde durchgeführt. Kelvin war ein sehr bedeutender theoretischer Physiker des 19. Jahrhunderts. Er hat wichtige Beiträge zur Thermodynamik und Elektrizität geleistet. Für seine Leistungen wurde er geadelt und die absolute Temperaturskala, beginnend bei 0 Kelvin, gleich -273°C , wurde nach ihm benannt.

Kelvin konnte seine Altersbestimmung nur aufgrund damals bekannter Energiequellen machen. Deshalb hat er angenommen, dass die Gesamtenergie des Systems Sonne-Erde von der Gravitationsenergie während der Kontraktion der Sonne und der Erde aus dem interstellaren Gas kam. Mit dieser Annahme kam er zu dem Schluss, dass die Sonne seit 30 Millionen Jahre leuchten müsse. Das Alter der Erde bestimmte er auf 24 Millionen Jahre. Keine schlechte Abschätzung, wenn es nicht die Kernenergie gäbe. Heute wissen wir, dass die Gravitationsenergie die Sonne so weit aufgeheizt hat, dass Kernreaktionen in ihr möglich sind, und dass die Erde schon längst kalt sein würde, wenn es nicht den radioaktiven Zerfall im Inneren der Erde gäbe.

Kelvin stand im Konflikt mit den Geologen, die durch die Erosion des Gesteins die Erde auf 700 Millionen Jahre geschätzt hatten. Noch bekannter in der Wissenschaftsgeschichte ist aber der Konflikt mit Charles Robert Darwin (1809–1882). Seine Evolutionstheorie benötigte etwa 700

Millionen Jahre für die Entwicklung der heutigen Artenvielfalt. Kelvin hat, in der für Physiker typischen überheblichen Art, die Geologie und die Biologie als „weiche Wissenschaft“ abgetan. Besonders seine Geringschätzung der Evolutionstheorie hat seinem posthumen Ruhm geschadet.

3.1 Nukleonen und Kerne – zusammen ist es leichter

Die Nukleonen sind die Bestandteile des Atomkerns. Der Kern des Wasserstoffatoms ist das positiv geladene Proton. Der zweite Bestandteil des Kerns, das Neutron, wurde 1932 von dem englischen Physiker James Chadwick (1891–1974) entdeckt. Das Neutron ist, wie der Name schon andeutet, ladungsneutral. Lange hat man geglaubt, dass das Proton und das Neutron Elementarteilchen und dass die Kräfte zwischen den Nukleonen die fundamentalen Kräfte der starken Wechselwirkung seien. Kein Wunder, die Protonen und Neutronen sind aus Quarks aufgebaut, die aber so stark gebunden sind, dass sie nicht als freie Teilchen erscheinen. Auch die Kraft zwischen den Nukleonen kann man beschreiben ohne explizit Quarks zu erwähnen. Kurz gefasst, Nukleonen sind die „Atome“ und Kerne die „Moleküle“ der starken Wechselwirkung. 1934 hat der japanische Physiker Hideki Yukawa (1907–1981) die Existenz eines Teilchens vorausgesagt, das die Kernkraft vermittelt. Dieses Teilchen wurde später auch gefunden und Pion (π) getauft. Es soll eine ähnliche Rolle für den Zusammenhalt der Kerne

spielen, wie das Photon für die Anziehung und Abstoßung zwischen geladenen Teilchen.

So wie zwischen Atomen molekulare Kräfte elektromagnetischer Natur die Atome zu Molekülen binden, so wirken zwischen den Nukleonen die Kernkräfte, die sie zu den Kernen binden. Zwar gibt es nur 92 natürlich vorkommende Elemente, aber die Kerne einer Atomsorte können unterschiedlich viele Neutronen beherbergen. Solche Atome nennt man Isotope. Während die Zahl der unterschiedlichen chemischen Verbindungen durch die Geschicklichkeit der Chemiker stetig zunimmt, bleibt die Zahl unterschiedlicher Kombinationen von Protonen und Neutronen begrenzt auf etwas mehr als dreihundert Atomkerne. Fazit: Kernphysik ist viel, viel einfacher als Chemie. Auch die Bindung zwischen den Nukleonen ist einfacher als die Bindung der Atome in Molekülen. Da die Quarks in den Nukleonen fest gebunden sind, passiert die Bindung durch den Austausch von *Mesonen*, vor allem der *Pionen* (Abb. 3.1). Pionen sind genauso wie die Protonen und Neutronen keine Elementarteilchen. Sie sind aus einem Quark und einem Antiquark aufgebaut.

Die Kraft, die die Bestandteile des Kerns zusammenhält, wird durch Pionen (π^+ , π^0 , π^-) vermittelt. Sie treten in der Wechselwirkung einzeln, zu zweit oder zu mehreren auf. In unserem quantenmechanischen Bild entsteht die Kraft zwischen den Nukleonen durch den Austausch von Pionen. Nach der Heisenberg'schen Unschärferelation können sich die Nukleonen für kurze Zeit die Energie borgen, um Pionen zu anderen Nukleonen zu schicken. Da die Pionen eine Masse haben, muss man sich auch für diese Masse Ener-

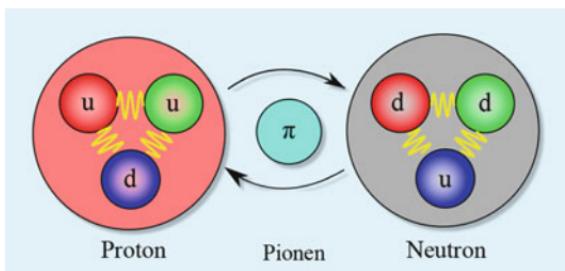


Abb. 3.1 Zwei Nukleonen mit jeweils drei Quarks. Die stark gebundenen Quarks können nicht direkt miteinander wechselwirken, sondern nur indirekt über den Austausch von Pionen

gie borgen, wodurch die Reichweite des Austauschteilchens stark eingeschränkt ist.

Freie Neutronen sind nicht stabil. Sie zerfallen in ein Proton durch die Emission von einem Elektron und einem Antineutrino. Wenn es in Kernen einen Überschuß von Protonen gibt, dann zerfällt ein Proton in ein Neutron unter Emission eines Positrons und eines Neutrinos. Diesen Zerfall nennt man Betazerfall. Er sorgt dafür, dass nur ein schmaler Bereich möglicher Kernzusammensetzungen mit einer ungefähr gleichen Zahl von Protonen und Neutronen stabil ist.

Die grundlegenden Eigenschaften der Kerne lassen sich schon anhand der Kenntnisse ihrer Massen erklären. Die Methoden, die zur Vermessung der Massen benutzt werden, fasst man unter den Begriff der *Massenspektroskopie* zusammen. Die Grundlagen der modernen Massenspektroskopie wurden in den zwanziger Jahren des vorigen Jahrhunderts gelegt. Ein einfaches Exemplar eines Massenspektrometers ist in Abb. 3.2 gezeigt: In einer Ionenquelle

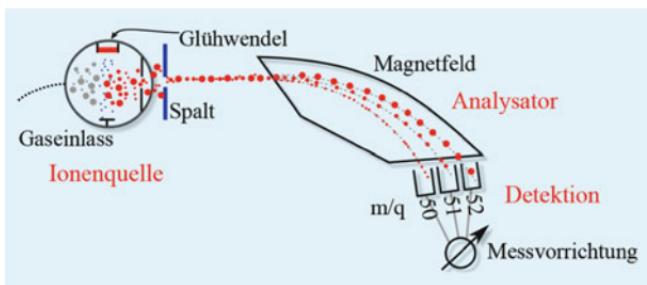


Abb. 3.2 Dargestellt ist ein einfaches Massenspektrometer. In der Ionenquelle wird das atomare Gas ionisiert und beschleunigt. Im Analysator werden die Ionen je nach Masse-zu-Ladung-Verhältnis (m/q) räumlich getrennt. Die aufgetrennten Ionenstrahlen werden im Detektor analysiert und erlauben somit Rückschlüsse auf die Zusammensetzung des ursprünglich eingelassenen Gases

werden die gasförmigen Atome durch Beschuss mit Elektronen ionisiert und nachher in einem elektrischen Feld mit einigen tausend Volt beschleunigt. Die so erzeugten Ionen werden durch einen Spalt zu einem Strahl geformt und passieren im Analysator ein senkrecht zum Strahl stehendes Magnetfeld. Durch das Magnetfeld werden die Ionen sauber nach ihrer Ladung und Masse getrennt. Der positionsempfindliche Detektor detektiert somit immer nur Ionen mit einem definierten Masse-zu-Ladung-Verhältnis. Die Entwicklung des ersten Massenspektrometers wurde von Francis William Aston (1877–1945) im Jahre 1918 abgeschlossen.

Die verschiedenen Kerne charakterisieren wir durch die Zahl ihrer Protonen und Neutronen. Die Zahl der Protonen im Kern bezeichnen wir mit Z . Da die Protonen einfach positiv geladen sind, definiert Z die Gesamtladung des Kerns.

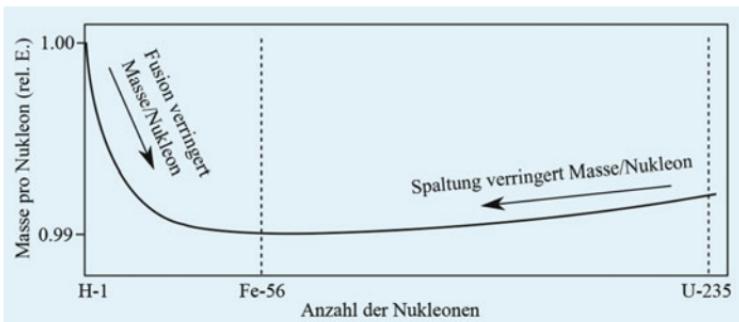


Abb. 3.3 Dargestellt ist die Masse pro Nukleon gegen die Anzahl der Protonen und Neutronen A . Das Isotop ^{56}Fe weist dabei den kleinsten Wert auf. Für leichtere und schwerere Isotope steigt er wieder an

Wir nennen Z daher die **Kernladungszahl**. Die Neutronen sind ladungsneutral und tragen damit nur zur Kernmasse bei. Die Zahl von Protonen und Neutronen zusammen wird mit der sogenannten **Massenzahl A** angegeben. Da wir die Massen von Protonen und Neutronen kennen, müssten wir in der Lage sein, die Massen der Kerne vorherzusagen. Weit gefehlt, wie wir der Abb. 3.3 entnehmen können. Dort sind auf der x -Achse die Gesamtzahl der Nukleonen A aufgetragen. Auf der y -Achse sehen wir (qualitativ) den Wert, der sich ergibt, wenn man die Gesamtmasse des Kernes durch die Anzahl der Nukleonen teilt. Eigentlich erwarten wir immer einen Wert von etwa 1, eine Nukleonmasse. Dieser Wert tritt allerdings nur einmal auf, und zwar beim Isotop ^1H , also dem herkömmlichen Wasserstoffkern, der nur aus einem Proton besteht. Die hochgestellte Eins vor dem Wasserstoffsymbol benennt in dieser Schreibweise die Nukleonenanzahl des Kerns. Für steigende Nukleonenanzahl sinkt die

Masse pro Nukleon bis das Isotop ^{56}Fe erreicht ist. Die Masse des Eisenkerns ist um fast 0,9 % kleiner als die Summe der 56 Massen der getrennten Nukleonen im Eisen. Schwere Nuklide haben im Schnitt wieder eine höhere Masse pro Nukleon. Den Unterschied zwischen der Masse des gebundenen Kerns und der Summe der einzelnen, nicht gebundenen Nukleonen bezeichnen wir als *Massendefekt*, weil fast ein Prozent der Masse durch die Bindung verschwindet. Dies hat folgenden Grund: Bei der Verschmelzung der Protonen und Neutronen zum Atomkern wird Energie freigegeben. Für die frei werdende Energie gilt die berühmte Beziehung $E = mc^2$. Dabei entspricht m dem gemessenen Massendefekt. Die Äquivalenz zwischen Masse und Energie wurde historisch nicht zuerst in der Elektron-Positron-Paarerzeugung beobachtet, sondern direkt bei der Kernbindung. Es gibt den Massendefekt aber auch bei der chemischen Bindung, allerdings sind die dabei auftretenden Energien so klein, dass er nicht leicht zu messen ist.

Um ein Gefühl zu entwickeln, wie groß der Unterschied zwischen den chemischen und nuklearen Massendefekten ist, betrachten wir ein konkretes Beispiel: Zwölf Kilogramm Kohlenstoff verbrennen zusammen mit 32 Kilogramm Sauerstoff zu 44 Kilogramm Kohlendioxid. Dabei wird eine thermische Energie von etwa 144 Kilowattstunden erzeugt. Diese Energiegewinnung aus Kohlenstoff und Sauerstoff vergleichen wir nun mit der Fusion von Wasserstoff zu Helium, wie es ständig in der Sonne passiert. Dafür nehmen wir 4 Kilogramm Wasserstoff. Diese Menge ist so gewählt, dass am Ende genau so viele Heliumatome wie Kohlendioxidatome entstehen. Der Unterschied der Energiegewinnung

ist aber gewaltig. Die Wasserstoffverbrennung erzeugt eine Energiemenge von 112 Millionen Kilowattstunden, also etwa eine Millionen mal so viel wie eine chemische Verbrennungsreaktion. Den Unterschied bemerkt man auch im Massenverlust. Das entstandene Helium wiegt nur noch 3,72 Kilogramm. Im chemischen Beispiel wird das entstandene Kohlendioxid nur um etwa 4 Mikrogramm (der 250ste Teil eines Milligramms) leichter sein als die Anfangsstoffe. Damit ist auch die Frage geklärt, wie die Sonne die Energie erzeugt. Es muss die Kernenergie sein, die die Sonne heizt.

Aus dem Verlauf der Bindungsenergien in Abb. 3.3 sieht man, dass der stabilste Kern der Eisenkern ist, da dieser die leichteste Masse pro Nukleon hat. Da die Kerne durch die Protonen positiv geladen sind, stoßen sie sich gegenseitig ab. Wenn sich aber die Kerne im Stern durch die gewaltigen Gravitationskräfte stark erwärmen, können die Kerne miteinander verschmelzen. Dabei wird durch den dabei entstehenden Massendefekt Energie frei, die eine weitere Verschmelzung begünstigt, und nach und nach verschmelzen die so entstandenen Kerne weiter, bis hin zu Eisen. Die Kerne schwerer als Eisen versuchen wiederum ihre Energie durch den radioaktiven Zerfall abzugeben. Die Verschmelzung der Kerne oberhalb von Eisen würde mehr Energie kosten als einbringen, da der Massendefekt wieder abnehmen würde. Alle Kerne schwerer als Blei sind radioaktiv. Sie zerfallen entweder durch den sogenannten Alpha- oder den Betazerfall. Im Jahr 1938 wurde ein neuartiger Zerfall des Urankerns entdeckt, die Kernspaltung.

3.2 Fusion – warum die Sonne scheint

1920 schlug der Astrophysiker Sir Arthur Stanley Eddington (1882–1944) aufgrund von Astons genauen Messungen der Kernmassen vor, dass die Fusion der Kerne die wahrscheinliche Quelle der Sonnenenergie sei. Die umfassende Analyse der möglichen Kernreaktionen in der Sonne hat Hans Bethe (1906–2005) kurz vor Beginn des Zweiten Weltkrieges im Jahre 1938 veröffentlicht.

Das Leben der Sonne fing zunächst so an, wie Kelvin es sich vorgestellt hatte. Die Gravitation komprimiert die Gase, aus denen die Sonne besteht. Dabei steigen im Sonnenkern sowohl die Temperatur als auch der Druck, welcher der Gravitation entgegenwirkt. Wenn die Temperatur etwa 20 Millionen Kelvin erreicht, startet die Kernreaktion. Mit höher werdender Temperatur steigt auch der Druck immer weiter an bis dieser mit der Gravitation im Gleichgewicht steht.

Für die Verbrennungsreaktionen der Kerne in Sternen ist nicht nur der Massendefekt entscheidend. Die Frage ist vor allem, wie schnell die Kerne verschmelzen. Dazu müssen die sogenannten Wirkungsquerschnitte, also die Wahrscheinlichkeiten, dass die Kerne bei einer Kollision miteinander verschmelzen, bestimmt werden. In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts haben die Experimentalphysiker an unzähligen kleinen Beschleunigern alle denkbaren Kernreaktionen, die für die Fusion in Sternen infrage kämen, vermessen. Der dabei am häufigsten benutzte Beschleuniger war der Van-de-Graaff-Generator (Abb. 3.4), den der amerikanische Physiker Robert J. Van de Graaff 1929 vorgestellt

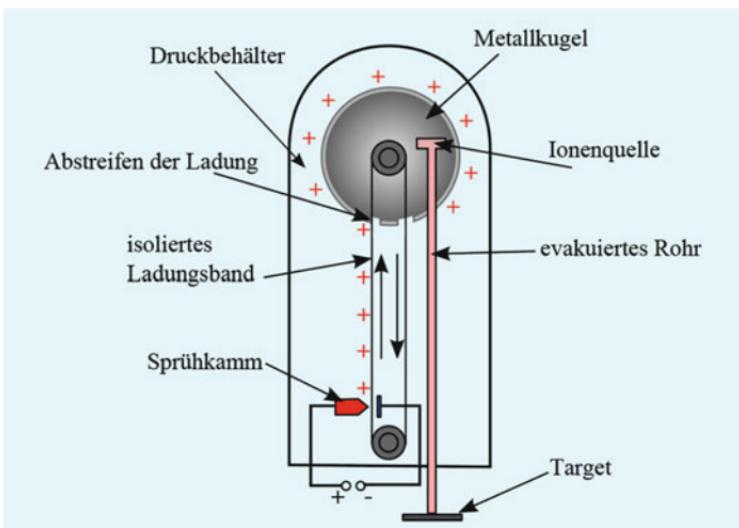


Abb. 3.4 Dargestellt ist ein Van-de-Graaff-Beschleuniger. Dabei wird über den Sprühkamm positive Ladung auf ein isoliertes Band übertragen. Diese Ladung wird durch die Bewegung des Bandes auf eine Metallkugel abgestreift, wodurch sich diese immer weiter auflädt. Innerhalb der Metallkugel befindet sich eine Quelle positiv geladener Teilchen, die aufgrund des starken elektrischen Feldes zwischen positiver Kugel und neutralem Target zum Target hin beschleunigt wird

hat. Die Verwandtschaft des Van-de-Graaff-Generators mit der Kathodenstrahlröhre ist nicht zu übersehen. Der wesentliche Unterschied besteht in der Erzeugung der Spannung in der Röhre, welche die Protonen durchlaufen. Die Spannung am Beginn der Röhre von vielen Millionen Volt wird durch den Transport von positiven Ladungen mit einem Band aus einem Isolationsmaterial erzeugt.

Nicht alle wichtigen Reaktionen in Sternen können im Labor nachgemessen werden. Eine davon, und gleichzeitig

auch die bedeutendste für die Verbrennung des Wasserstoffs in der Sonne, ist die Verschmelzung zweier Wasserstoffkerne zu einem Deuteriumkern (^2H). Das Problem ist nämlich, dass diese Verschmelzung nicht durch die starke Wechselwirkung, sondern durch die schwache verläuft. Das bedeutet, dass sich die zwei Protonen beim Stoß miteinander so nahe kommen müssen, dass sich die schwache Wechselwirkung einschalten kann und ein Proton in ein Neutron umgewandelt wird. Der Stoß verläuft jedoch so schnell, dass die schwache Wechselwirkung kaum Zeit zum Wirken hat. Diese Umstände sind der Grund dafür, dass die Verschmelzung des Wasserstoffs in der Sonne so langsam verläuft und damit ihr Leben so lang ist, dass sich auf unserem Planeten letztendlich das biologische Leben entwickeln konnte. Die Kernreaktionen in der Sonne und deren zeitlicher Verlauf sind in Abb. 3.5 dargestellt. Aus zwei Protonen entstehen ein Deuteron, ein Positron (das Antiteilchen des Elektrons) und ein **Neutrino**. Das Deuteron besteht aus einem Proton und einem Neutron und ist damit der leichteste zusammengesetzte Kern. Dabei hat sich ein Proton durch die schwache Wechselwirkung in ein Neutron umgewandelt. Alle weiteren Reaktionen von Wasserstoff zu Helium erfolgen durch die starke Wechselwirkung und damit viel schneller.

Mit der Zeit aber wird der Wasserstoff im Sonnenkern verbraucht und die Konzentration des Heliums steigt an. Um dem Gravitationsdruck zu widerstehen, arbeitet der Sonnenkern nun bei höheren Temperaturen. Die Verschmelzung des Wasserstoffs passiert damit schneller, sodass selbst bei kleineren Wasserstoffkonzentrationen ausreichend Energie produziert wird. Bei höheren Temperaturen des Sonnenkerns erhöht sich auch die abgestrahlte Energie

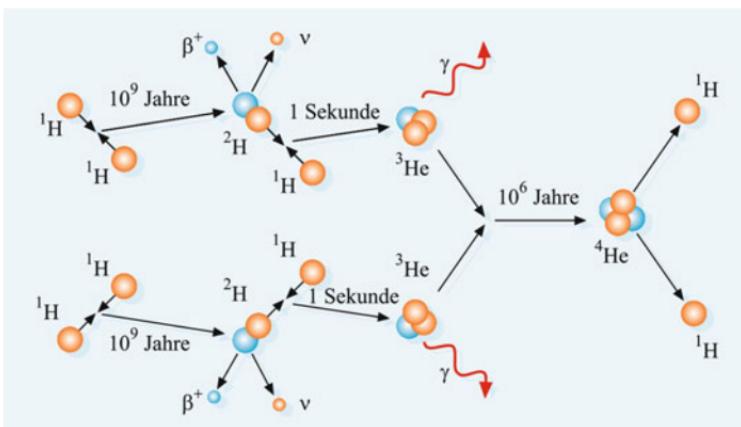


Abb. 3.5 Darstellung der Kernreaktionen in der Sonne. Zunächst verschmelzen zwei Protonen zum Deuteron. Dieser Vorgang passiert sehr selten, nämlich alle 10^9 Jahre pro Atomkern. Damit verbraucht die Sonne im Mittel eigentlich relativ wenig ihres Rohstoffs und erhält damit ihre lange Lebensdauer. Sobald ein Deuteron entstanden ist, verschmilzt dieses innerhalb einer Sekunde zu ^3H . Dieses braucht relativ lange, um ein anderes ^3H zu finden, mit dem es unter Abgabe zweier Protonen zu ^4H verschmilzt. Alle diese Angaben beziehen sich auf die Verhältnisse in der Sonne, bei deren Geburt der Sonnenkern aus etwa 75 % Wasserstoff, 24 % Helium und 1 % schwerer Elemente bestand. Quelle: G. Bothum, University of Oregon

der Sonne. Heutzutage gibt es gute Computersimulationen vom Inneren der Sonne. Die Vorgänge im Inneren der Sonne bestätigen aber auch Experimente. Bei jeder Verschmelzung der vier Wasserstoffatome entstehen zwei Neutrinos. Diese Neutrinos gehen durch die Materie fast ungehindert hindurch. Das ist gut so, denn sie kommen damit fast verlustfrei aus der Mitte der Sonne, und nur dort werden sie erzeugt (siehe Abschn. 3.5). Sie können

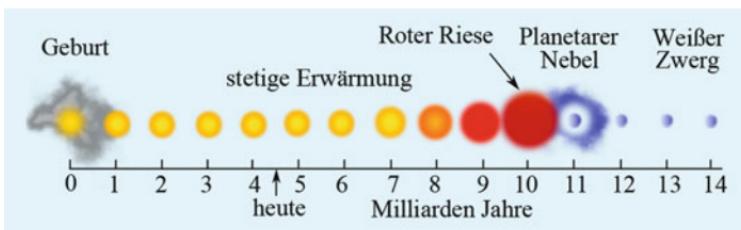


Abb. 3.6 Der Lebenszyklus der Sonne. Er beginnt mit der Kompression des stellaren Nebels zum Stern. Dem oberen Pfad folgt unsere Sonne als durchschnittlich schwerer Stern. Nachdem der Großteil des Wasserstoffs in der Sonne verbrannt ist, wird die Sonne zum roten Riesen und dehnt sich dabei aus. Schließlich endet sie als planetarer Nebel und verbleibt als weißer Zwerg

auf der Erde durch riesige (und teure) Neutrinospektrometern nachgewiesen werden.

Eine Veranschaulichung des Lebens der Sonne ist in Abb. 3.6 dargestellt. Die Sonne als durchschnittlicher Stern befindet sich demnach in der Mitte ihres Lebens. Für das Leben auf der Erde ist aber die Hälfte ihrer nützlichen Periode bereits weit überschritten (siehe Abb. 3.6). Schon in etwa 900 Millionen Jahren wird sich die Abstrahlung der Sonne so weit erhöhen, dass die mittlere Temperatur auf der Erde auf 30°C steigt. Zum Vergleich: Die mittlere Temperatur der Erde im Jahre 2012 betrug lediglich $14,6^{\circ}\text{C}$. Noch zwei weitere Vergleiche: Die Erde ist etwa 4,5 Milliarden Jahre alt. Das erste Leben auf der Erde erschien vor etwa 3,6 Milliarden Jahren, der Homo Sapiens vor etwa 200.000 Jahren und die Anfänge der modernen Zivilisation kann man vor etwa 10.000 Jahren annehmen. Der zivilierte Mensch hat seine Zukunft also noch vor sich!

3.3 Synthese schwerer Elemente – wir sind Sternenstaub

Nach dem großen Erfolg der Physiker, die Energiequelle der Sonne quantitativ erklären zu können, folgte eine längere Pause in der astronomischen Forschung. Verantwortlich dafür war einerseits die Beschäftigung der Physiker mit dem Bau der Atombomben und Kernreaktoren. Andererseits wusste man nicht, was man mit der Kernphysik in Sternen machen könnte. Die Sterne bestehen im Wesentlichen aus Wasserstoff und Helium. Mit der Wasserstoffverbrennung kommt man nicht weiter als bis zu Helium. Auch andere mögliche Kernreaktionen mit dem Wasserstoff enden alle beim Helium. Das liegt darin begründet, dass es keine Möglichkeit gibt stabile Kerne aus fünf oder acht Nukleonen herzustellen. Das ist experimentell belegt. Mit der Addition von Wasserstoff und Helium kommt man deshalb nicht weiter.

Die Sterne, die massereicher als unsere Sonne sind, leben auch nach dem Verbrauch des Wasserstoffs in ihren Kernen weiter. 1955 hat Fred Hoyle (1915–2001) als einzigen Ausweg die direkte Produktion von Kohlenstoff durch die Fusion von drei Heliumkernen vorgeschlagen, wie in Abb. 3.7 skizziert ist. Die Reaktion kann tatsächlich zur Produktion von Kohlenstoff führen, sofern sich der Sternkern genügend erhitzt und es einen Kernzustand im Kohlenstoff gibt, der eine passende Energie besitzt. Dieser Zustand ist gefunden worden und kann bei Temperaturen von hundert Millionen Grad erzeugt werden.

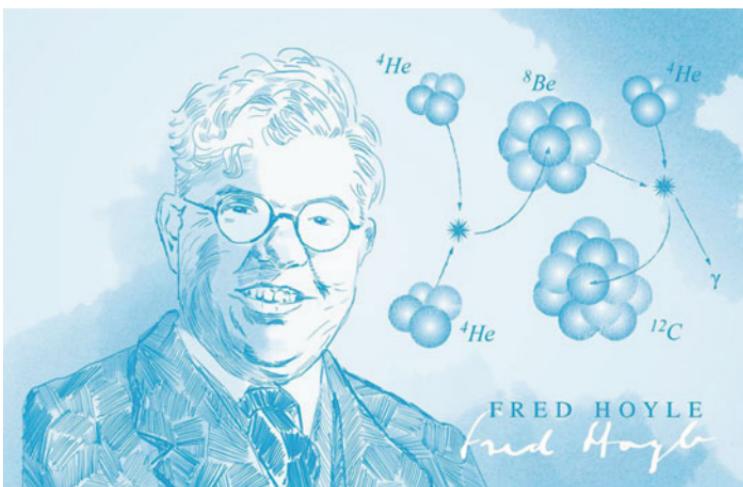


Abb. 3.7 Fred Hoyle und die von ihm vorgeschlagene Kernreaktion, bei der drei Heliumkerne zu einem Kohlenstoffkern verschmelzen. Zeichnung Jakob Piest, Springer-Verlag Berlin Heidelberg

Diese Verschmelzung dreier Heliumkerne findet in astronomischen Zeitskalen auch tatsächlich ausreichend schnell statt, sodass sie für die Sternentwicklung wichtig ist. Der passende Übergang ist demnach gefunden und die Entstehung schwerer Elemente aus Helium erklärt worden. Weil sich die Temperatur des Sternkernes erhöht hat, vergrößert sich die abgegebene Strahlung, die ihrerseits wiederum einen erhöhten Strahlungsdruck auf den Sternmantel ausübt. Dieser expandiert in der Folge. Die Sterne, die Wasserstoff verbrennen, erscheinen je nach ihrer Masse gelb wie die Sonne bis blau bei Sternen mit einem Vielfachen der Sonnenmasse. Nachdem sich aber die Oberfläche um einiges vergrößert hat, ist sie auch kühler geworden, wodurch der

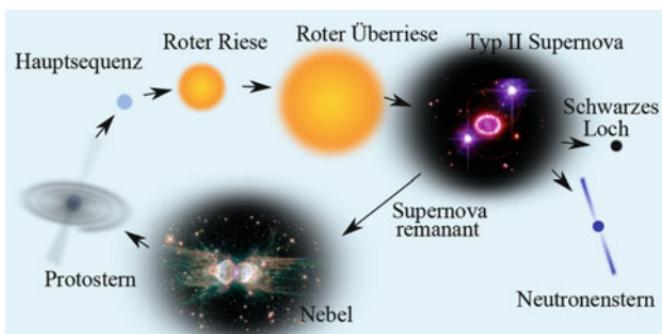


Abb. 3.8 Der Lebenszyklus der Sterne. Er beginnt mit der Kompression des stellaren Nebels zum Stern. Dem oberen Pfad folgt unsere Sonne als durchschnittlich schwerer Stern. Nachdem der Großteil des Wasserstoffs in der Sonne verbrannt ist, wird die Sonne zum roten Riesen und dehnt sich dabei aus. Schließlich endet sie als planetarer Nebel und verbleibt als weißer Zwerg. Ein anderes Schicksal blüht den massereichen Sternen. Sie werden zum roten Superriesen und explodieren letztendlich in einer Supernova und verbleiben als Neutronenstern oder schwarzes Loch

Stern rötlich leuchtet. Sterne in diesem Stadium bezeichnen wir als *rote Riesen*.

Der Grund der immensen Wichtigkeit dieser beiden Reaktionen, also der Verschmelzung zweier Protonen zu Deuterium und der Verschmelzung dreier Heliumkerne zu Kohlenstoff, ist der, dass diese Reaktionen die Zeitskala der Entwicklung des Universums definieren. Die erste Reaktion gibt die Lebensdauer der langlebigen Sterne an, zu denen auch unsere Sonne gehört. Die zweite ermöglicht die Synthese der schweren Elemente, ohne die es keine Erde in dieser Form geben könnte.

Nachdem der Kohlenstoff in den Sternen entstanden ist und die Temperatur sich wegen der Gravitation erhöht

hat, sind viele weitere Kernreaktionen möglich, die alle zu schwereren Kernen führen bis hin zum Eisenkern. Schwere Kerne haben mehr Protonen als Neutronen. Es gibt viele Kernreaktionen, bei denen Neutronen entstehen, die sich an die vorhandenen Kerne anlagern.

Ein regelrechter Neutronenregen aber findet in der letzten Phase der massereichen Sterne statt: Wenn im Zentrum des Sterns nur noch Eisenkerne vorhanden sind, wird keine weitere Energie mehr produziert, weil eine weitere Fusion Energie kosten würde. In Abb. 3.3 sieht man deutlich, dass bei Kernen schwerer als Eisen die Bindungsenergie pro Nucléon abnimmt.

Der Kern kann dem gewaltigen Gravitationsdruck keine weiteren Fusionsreaktionen entgegensetzen, wodurch der Stern kollabiert. Dieser Kollaps ist dramatisch. Der Eisenkern stellt eine Energiesenke dar. Die Eisenkerne brechen in Heliumkerne auf, wofür ein großer Teil der Gravitationsenergie verbraucht wird. Letztendlich erhitzt jedoch die kollabierende Materie den Sternkern auf wesentlich höhere Temperaturen als die des alten und durch den erhöhten Strahlungsdruck bläht sich der Außenmantel des Sterns auf. Da die Sternoberfläche vergrößert wird, erniedrigt sich die Temperatur der Oberfläche und der Stern erscheint rot.

Den Kollaps der massivsten Sterne bezeichnet man als Supernova-Explosion. Das meiste Material des Sterns wird in die planetaren Nebel injiziert. Der Kern selbst wird zu einem Neutronenstern oder zu einem kleinen schwarzen Loch. Das dadurch verteilte Material steht wieder für die Bildung neuer Sterne und Planeten zur Verfügung.

Beim Zerfall des Eisens während des Sternkollapses entsteht ein dichter Fluss von Neutronen, der sich an die

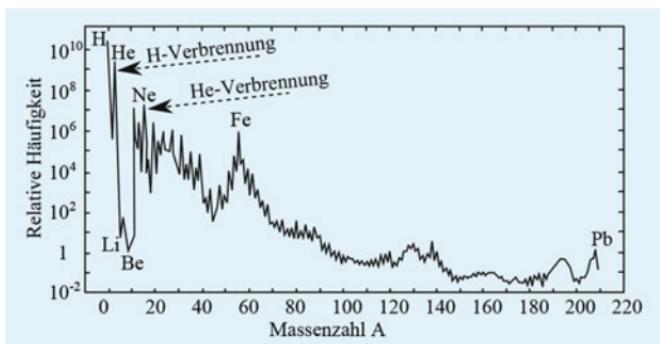


Abb. 3.9 Die Elementenhäufigkeit des Sonnensystems

Atomkerne am Sternmantel anlagert. In dieser Phase der Sternentwicklung werden Kerne schwerer als Eisen gebildet, bis hin zu Uran. Die Häufigkeit der Elemente im Sonnensystem ist gut bekannt. Nach dieser Häufigkeit beurteilend müsste das Material des Sonnensystems bereits dreimal durch eine Supernova-Explosion gegangen sein (Abb. 3.9).

In der berühmten Veröffentlichung „Synthesis of the Elements in the Stars“ 1957 von Margaret Burbidge, Geoffrey Burbidge, William Fowler und Fred Hoyle unter Leitung von Hoyle ist die Verteilung der Elemente mit den Kernreaktionen und den Bedingungen in Sternen belegt. William Alfred Fowler (1911–1995) hat auch nach dieser Veröffentlichung fleißig die kernphysikalischen Daten gesammelt und den Zusammenhang zwischen der Kernphysik und Astronomie vervollständigt. 1983 bekam er den Nobelpreis für die Synthese der Elemente in Sternen. Warum Hoyle nicht den Preis mit Fowler zusammen bekam, bleibt ein Rätsel bis 2033, wenn die Unterlagen des Nobelpreiskomitees, 50 Jahre nach der Preisverleihung, freigegeben werden.

3.4 Radioaktiver Zerfall – wie aus Großem Kleines wird

Im Jahre 1896 hat Henri Becquerel (1852–1908) die Radioaktivität entdeckt. Er war eigentlich an der Fluoreszenz interessiert, weil man vermutet hatte, dass die Röntgenstrahlen eine Art von Fluoreszenz seien. Auch ein fluoreszierendes Uransalz war bei seinen Untersuchungen dabei. In einer Experimentierpause hat er diesen Kristall zum Trocknen unabsichtlich auf eine noch nicht entwickelte Photoplatte gestellt, da schlechtes Wetter herrschte und der Kristall nicht in die Sonne gelegt werden konnte. Nach einigen Tagen bemerkte er, dass die Photoplatte geschwärzt war und die Form des Kristalls zeigte. Diese Entdeckung, mit der Becquerel nicht gerechnet hatte, ist ein Jahr nach der ähnlich zufälligen Entdeckung der Röntgenstrahlen passiert. Eine glückliche Zeit für Physiker – man musste nur eine Photoplatte an der falschen Stelle abstellen und machte danach mit etwas Glück noch eine große Entdeckung.

Die Strahlen aus dem Uransalz schienen genauso durchdringend wie die X-Strahlen zu sein, aber ein Zusammenhang zwischen den beiden Strahlen ließ sich damals nicht finden. Kein Wunder: Weder wusste man, wie die Röntgentränen entstehen, noch hatte man eine Ahnung von den Strahlungsübergängen in Kernen. Becquerel hatte bald daraufhin das Interesse an seiner Entdeckung verloren. Als Entdecker dessen, was später mit der Radioaktivität bezeichnet wurde, bekam er 1903 gemeinsam mit Marie und Pierre Curie den Nobelpreis verliehen. Auch die kleinste mögliche

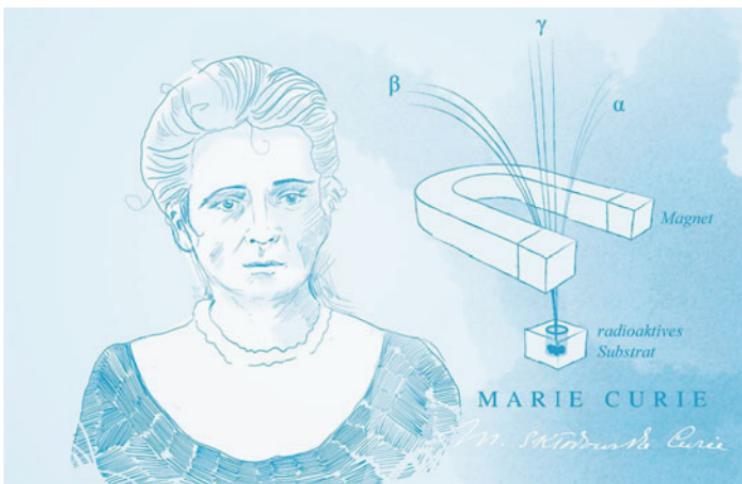


Abb. 3.10 Marie Skłodowska Curie mit einer α , β , γ radioaktiven Quelle. Zeichnung Jakob Piest, Springer-Verlag Berlin Heidelberg

Einheit der Radioaktivität, ein Zerfall pro Sekunde, wurde nach Becquerel benannt und wird mit Bq abgekürzt.

Eine systematische Untersuchung der Radioaktivität wurde von Marie Skłodowska-Curie (1867–1934, Abb. 3.10) und ihrem Mann Pierre Curie durchgeführt. Es gab damals keine Vorstellung, woher diese Strahlung kommen könnte. Durch die chemische Analyse der Zerfallsprodukte des Urans konnten die Curies zeigen, dass die Radioaktivität einzelnen chemischen Elementen zugeordnet werden kann. Gleichzeitig konnte Marie Curie neue Elemente in den Zerfallsprodukten des Urans entdecken, wie etwa Polonium, das nach ihrer ursprünglichen Heimat Polen benannt wurde, oder Radon, nach dem Lateinischen Radius/Strahl. Auch das Wort Radioaktivität stammt von den Curies. 1911 hat

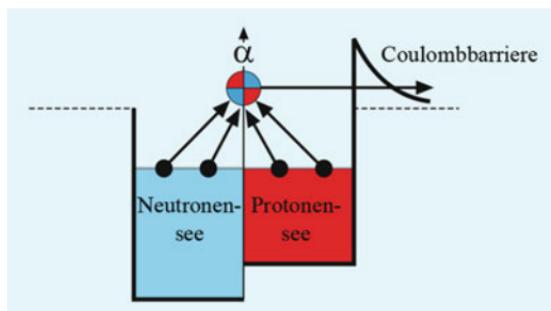


Abb. 3.11 Wenn sich zwei Protonen und zwei Neutronen zusammensetzen und ein Alphateilchen bilden, geht die Bindungsenergie in kinetische Energie über. Wenn dieser Gewinn an der Energie ausreichend ist, kann das Alphateilchen mit viel Glück den Kern verlassen

Marie Curie ihren zweiten Nobelpreis in Chemie für die Entdeckung neuer Elemente erhalten.

Schon Madame Curie hat festgestellt, dass die Strahlen radioaktiver Substanzen Körperzellen zerstören, die Krebszellen jedoch effektiver als die gesunden. Doch da war es schon zu spät. Sie selbst war Opfer unvorsichtigen Umgehens mit radioaktiven Präparaten. Sie ist an den Folgen der Strahlenschäden gestorben.

Die Theorie der radioaktiven Zerfälle folgte erst in den zwanziger Jahren des letzten Jahrhunderts. 1928 hat George Gamow (1904–1968), geboren als Georgly Antonovich Gamow, den Alphazerfall erklärt.

Die schweren Kerne, wie beispielsweise Uran, können nicht durch die Emission einzelner Protonen oder Neutronen zerfallen (Abb. 3.11). Dafür sind diese zu stark gebunden. Wenn sich aber zwei Protonen und zwei Neutronen

im Kern zu einem Alphateilchen verbinden, gewinnen sie Bindungsenergie, die als kinetische Energie freigesetzt wird. Das Partikel hat somit ausreichend kinetische Energie, um den Kern unter Erhaltung der Energie als freies Teilchen verlassen zu können. Damit es allerdings dem Kern entfliehen kann, muss es noch die Hürde der anziehenden Kernkraft überwinden. Es spürt die volle Anziehung des Kerns, was man mit einer Potentialbarriere beschreibt. Auch wenn es sich außerhalb des Kerns als freies Teilchen bewegen könnte, fehlt ihm die Energie über diese Barriere zu klettern. Die Quantenmechanik erlaubt es allerdings dem Alphateilchen sich für kurze Zeit Energie zu borgen. Dadurch kann es durch den Potentialwall durchtunneln. Je höher der Wall ist, desto kleiner ist die Wahrscheinlichkeit zu tunneln. Die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein Alphazerfall stattfindet, ist gegeben durch das Produkt zweier kleiner Wahrscheinlichkeiten: Der Wahrscheinlichkeit, dass sich zwei Protonen und zwei Neutronen für kurze Zeit zu einem α -Teilchen zusammenfinden und der Wahrscheinlichkeit, dass es ihm gelingt, innerhalb dieser Zeitspanne aus dem Kern zu tunneln. Eine wichtige Kenngröße radioaktiver Kerne ist die Halbwertszeit, also die Zeitspanne, nach der die Hälfte der ursprünglich vorhandenen Kerne zerfallen sind. Die **Halbwertszeit** von Uran-238 beträgt 4,468 Milliarden Jahre. Etwa die Hälfte des ursprünglich vorhandenen Uran-238 ist also seit der Entstehung des Sonnensystems schon zerfallen.

Nach dem Alphazerfall des Urans oder anderer radioaktiven Kerne entstehen als Produkte erneut Kerne, die nicht stabil sind. Sie haben zu viele Neutronen. Die überschüssigen Neutronen zerfallen durch Betazerfall in Protonen und emittieren dabei ein Elektron und ein Antineutrino.

3.5 Neutrinos – Boten aus der Sonne und der Erde

Der Betazerfall war noch lange nach seiner Entdeckung ein Rätsel für die Physiker. Die Elektronen bzw. Positronen, die vom radioaktiven Kern emittiert werden, haben keine fest definierte kinetische Energie. Sie reicht von null bis zur maximal möglichen Energie, die sich aus dem Energieunterschied zwischen emittierendem und neuem Kern ergibt. Dieses Verhalten widerspricht der Energieerhaltung, denn eigentlich müssten die emittierten Elektronen exakt diesen Energieunterschied mit sich tragen. Um die Energieerhaltung zu retten, hat Wolfgang Pauli (1900–1958) 1930 die Existenz eines neuen Teilchens vorgeschlagen. Er wollte dem neuen und bis dahin fiktiven Teilchen den Namen Neutron geben. Zwei Jahre später aber fand Chadwick das neutrale Nukleon, auf den der Name Neutron besser passte. Der Name Neutrino soll zeigen, dass das Teilchen einerseits wie auch das Neutron ladungsneutral ist, andererseits aber eine sehr viel kleinere Masse hat. Lange hat man geglaubt, dass seine Masse null ist. Inzwischen konnte man aber zeigen, dass das Neutrino eine endliche Masse hat. Die genauen Werte sind nicht bekannt, sie ist aber mindestens einige hunderttausendmal kleiner als die Masse des Elektrons. In Abb. 3.12 zeigen wir, wie der **Betazerfall** dafür sorgt, dass die Kerne in der energetisch günstigsten Lage enden.

Aus Abb. 3.12 lernt man, dass schwere Kerne mit einem deutlichen Überschuss an Neutronen durch Betazerfall ihre Neutronen in Protonen umwandeln. Dieser Prozess ver-

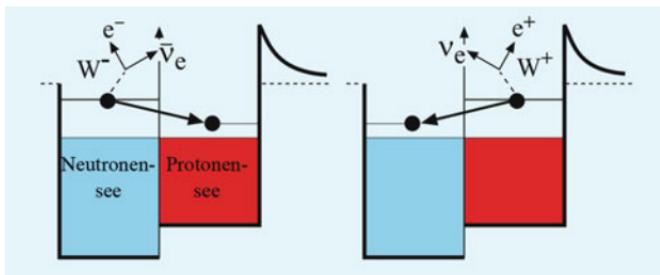


Abb. 3.12 Wenn es im Kern einen Überschuss von Neutronen gibt, emittiert ein Neutron ein Elektron und ein Antineutrino. Dabei entsteht ein Proton. Umgekehrt, wenn es in Kernen einen Überschuss an Protonen gibt, emittiert das Proton ein Positron und ein Neutrino und wird zum Neutron

läuft beispielsweise im Kern der Erde, wo es viele schwere Kerne gibt, wobei Antineutrinos erzeugt werden. Der umgekehrte Prozess passiert in der Sonne, wenn zwei leichte Kerne miteinander fusionieren und dann zu viele Protonen haben. Diese werden in Neutronen umgewandelt, wobei Neutrinos erzeugt werden. Sowohl Neutrinos als auch Antineutrinos lassen sich prinzipiell nachweisen. Dabei sind verschiedene Detektoren notwendig. Die Sonnenneutrinos lassen sich gut nachweisen: Trotz des kleinen Wirkungsquerschnitts der Neutrinos kann man sie aufgrund ihrer schieren Menge nachweisen. Pro Quadratzentimeter und Sekunde kommen bei uns etwa 60 Milliarden Sonnenneutrinos an! Da die Neutrinos fast ungehindert aus dem Kern der Sonne kommen, wissen wir heute sehr genau, wie die Sonne in ihrem Inneren funktioniert.

Vor Kurzem gelang es Antineutrinos aus der Erde nachzuweisen. Vom Inneren der Erde haben wir paradoixerweise

nicht so genaue Daten wie vom Sonneninneren. Das liegt daran, dass die Zahl der Antineutrinos aus der Erde geringer ist als die Zahl der Neutrinos aus der Sonne. Es konnte aber anhand der detektierter Antineutrinos bestätigt werden, dass die Hauptquelle der Erdenergie vom radioaktiven Zerfall stammt. Eine weitere Quelle von Antineutrinos sind die von uns betriebenen Kernreaktoren. Ebenso wie die Wärme im Inneren der Erde vom Zerfall schwerer Kerne stammt, wird auch die Wärme in Kernreaktoren erzeugt. Es gibt noch eine weitere interessante Quelle von Neutrinos. Diese Neutrinos stammen aus der Geburtsphase des Universums. Pro Kubikzentimeter des Universums schwirren daher noch etwa 330 Neutrinos umher. Umgerechnet auf den Menschen beheimaten wir etwa 25 Millionen Neutrinos aus dem frühen Universum.

3.6 Kernspaltung – wie gewaltige Energien freigesetzt werden

Madame Curie hat die Radioaktivität mit chemischen Methoden untersucht, genauer gesagt die Zerfallsprodukte des Urans identifiziert. Auch nach ihr blieb die Untersuchung der radioaktiven Elemente eine Domäne der Chemiker. Eine Ausnahme war Enrico Fermi (1901–1954), ein Physiker und, wie sich später gezeigt hat, einer der bedeutendsten Kernphysiker des 20. Jahrhunderts, ein exzelterner Theoretiker und Experimentator. Seine Karriere begann dabei als Theoretiker.

Elektronen und die meisten anderen Elementarteilchen haben einen Eigendrehimpuls (den **Spin**) der Größe $\frac{1}{2}\hbar$. Teilchen mit diesem halbzahligen Spin verhalten sich anders als Teilchen mit ganzzahligem Spin \hbar . Fermi war der erste, der die Eigenschaft von Teilchen mit halbzahligem Spin untersucht hat. Ihm zu Ehren nennen wir diese Teilchen deshalb **Fermionen**. Die wichtigste Eigenschaft der Fermionen ist, dass für sie das **Pauliprinzip** gültig ist. Es ist demnach nicht möglich zwei Fermionen in den gleichen Quantenzustand zu bringen.

Umgekehrt gilt dieses Prinzip nicht für Teilchen mit ganzzahligem Spin, **Bosonen** genannt. Von diesen Teilchen können beliebig viele im selben Quantenzustand existieren. Das **Photon**, die Träger der schwachen Wechselwirkung W^+ , Z^0 und W^- und die Gluonen gehören zu den fundamentalen Bosonen. Auf die Gluonen und die Träger der schwachen Wechselwirkung gehen wir in Kap. 5 genauer ein. Der Name Boson ist dem indischen Physiker Satyendranath Bose (1894–1974) gewidmet, der als erster die Eigenschaft dieser Teilchen untersucht hat.

Doch erst mal zurück zu Fermi. Als er 1932 von der Entdeckung des Neutrons erfahren hatte, damals als Professor in Rom, hat er mit seiner Gruppe die induzierte Radioaktivität des Urans nach der Bestrahlung mit Neutronen untersucht. Im Unterschied zu den damals üblichen chemischen Methoden, hat er die neuen Elemente durch den radioaktiven Zerfall und durch dessen Halbwertszeiten bestimmt. Er glaubte, durch die Bestrahlung von Uran mit Neutronen das erste Transuranelement mit der Ladungszahl $Z = 93$ erzeugt zu haben. Für diese Arbeit, die er 1934 ge-

macht hatte, bekam er vier Jahre später den Nobelpreis. Die erste Theorie des Betazerfalls stammt auch von Fermi.

Ida Noddack (1896–1978), geborene Tacke, hat in einer Veröffentlichung die Arbeit von Fermi kritisiert. Zu Recht! Sie glaubte, dass das Element, das Fermi als Transuran identifiziert hatte, ein Produkt eines geplatzten Kerns war, was später auch experimentell gezeigt wurde. Die publizierte Arbeit von Ida Noddack ist die erste, in der die Kernspaltung als neue Art der Radioaktivität vorgeschlagen wurde. Diese Arbeit wurde allerdings, bewusst oder unbewusst, ignoriert. Dabei war sie keine unbekannte Chemikerin. Sie wurde dreimal für den Nobelpreis vorgeschlagen, was ihren Ruf als exzellente Chemikerin untermauert. Jahre später, als man versucht hatte die Gründe zu finden, weshalb man nicht auf die Kritik von Ida Noddack reagiert hatte, erklärte Emilio Segrè, ein Mitarbeiter und Schüler Fermis: Mit den Bindungsenergien, die ihnen damals bekannt waren, wäre die Spaltung von Uran nicht möglich gewesen. Das bedeutet, dass Uran aus Gründen der Energieerhaltung nicht in zwei mittelschwere Kerne zerfallen kann. Segrè hat 1959 den Nobelpreis für die Entdeckung des Antiprotons bekommen.

Jedenfalls gab es keine gezielte Suche nach der Kernspaltung. Die Entdeckung war wieder ein Zufallstreffer.

Zwei Gruppen haben sich damals mit der chemischen Analyse der Zerfallsprodukte von Uran nach der Bestrahlung mit Neutronen beschäftigt. In Paris waren Irene Joliot-Curie, die Tochter von Pierre und Marie Curie, mit ihrem Assistenen Pavel Savić sehr nahe an der Entdeckung der Spaltung. Sie konnten jedoch nicht ausschließen, dass die neuen radioaktiven Elemente zu den Transuranen gehören.

In Berlin haben Otto Hahn (1879–1968) und Fritz Strassmann (1902–1980) im Kaiser-Wilhelm-Institut für Chemie das Experiment von Irene wiederholt und eindeutig das Element Barium nachgewiesen. Diesen Erfolg verdanken sie der exzellenten Chemie, die in dieser Zeit konkurrenzlos war.

Nach seiner Promotion 1901 hat der junge Hahn zunächst in Frankfurt und dann in London beim berühmten Sir William Ramsay, dem Entdecker der [Edelgase](#), mit der Forschung angefangen. Sein Interesse galt dabei der Radiochemie. Einer Empfehlung Ramsays folgend ging er 1905 nach Montreal zu Rutherford, den er als seinen Lehrer und später als seinen Freund betrachtete. In dieser Zeit hat er sich auch mit der chemischen Separation von Barium und Uran vertraut gemacht. Hahn galt als führender Radiochemiker dieser Zeit.

Hahn hat die Resultate seiner Messungen seiner Kollegin Lise Meitner in Stockholm mitgeteilt. Meitner musste als Jüdin das dritte Reich verlassen und hat eine Professur in Stockholm bekommen. Zu klären war, woher die mittelschweren Kerne als Produkt der Reaktionen von Neutronen mit Uran stammen. Meitner und ihr Neffe Otto Frisch veröffentlichten die theoretische Erklärung der Kernspaltung, die in Abb. [3.13](#) veranschaulicht ist.

Otto Hahn hat 1944 den Chemie-Nobelpreis für die Entdeckung der Kernspaltung erhalten. Dieser wurde ihm erst nach dem Krieg im Jahre 1946 übergeben.

Ida Noddack gebührt aus heutiger Sicht ebenfalls die Anerkennung für die Entdeckung der Kernspaltung.

Für die weitere Geschichte der Kernspaltung sind drei Dinge von Bedeutung.

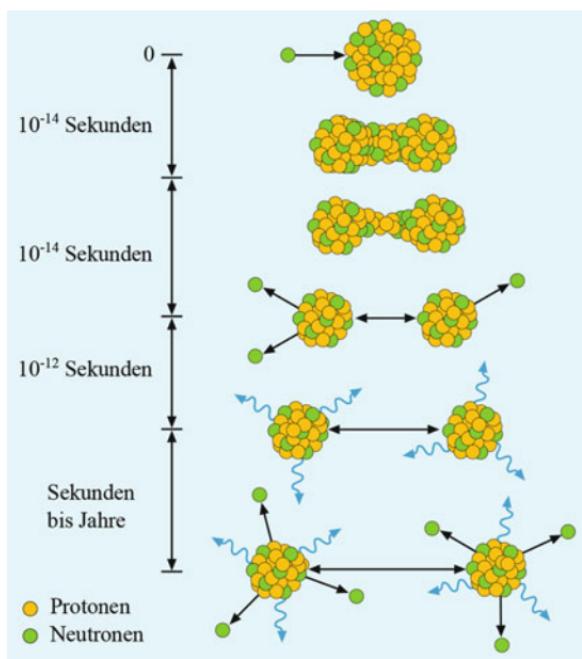


Abb. 3.13 Dargestellt sind die einzelnen Phasen einer induzierten Kernspaltung. Ein Neutron wird von Uran 235 absorbiert. Der neue Kern ist instabil, deformiert sich und zerfällt in zwei mittelschwere Kerne und zwei bis drei Neutronen. Die Spaltprodukte sind neutronenreiche, radioaktive Kerne, die in der Folge im Betazerfall weiter zerfallen

Zum Ersten ist die Energie, die bei der Spaltung frei wird, gewaltig. Diese Energie wird beim Aufbau der Elemente schwerer als Eisen in späten Phasen der Sternentwicklung langsam in die Bindungsenergie der schweren Kerne gespeichert. Bei der Spaltung wird diese Bindungsenergie auf einmal frei.

Zweitens entstehen bei jeder Kernspaltung etwa zwei bis drei Neutronen. Dies ermöglicht eine Kettenreaktion, da nun eine Spaltung zwei bis drei weitere Spaltungen auslösen kann, sofern die entstandenen Neutronen eine geeignete Energie aufweisen und ein passender Zielkern vorhanden ist.

Drittens entstehen bei der Spaltung radioaktive Kerne, die nach einigen Sekunden zerfallen. Die Zerfälle gehen mit einer verzögerten Neutronenemission einher. Diese Neutronen bieten die Möglichkeit den Ablauf der Spaltung zu kontrollieren.

Fermi gelang schon 1942 in Chicago der Bau des ersten Kernreaktors, mit dem er demonstrieren konnte, dass mit den verzögerten Neutronen die Spaltung kontrollierbar und für die Energiegewinnung geeignet ist. Die Kernenergie ist die effizienteste Energiequelle, die wir zur Verfügung haben.

Am 6. August 1945 explodierte die erste Atombombe über einer bewohnten Stadt: Eine Kettenreaktion ist möglich, sobald die Menge des spaltbaren Materials groß genug ist.

3.7 Neutronensterne – riesige Transurane

Uran ist mit 92 Protonen (Ordnungszahl $Z = 92$) und 146 Neutronen das schwerste Element, welches in beträchtlichen Mengen auf der Erde vorhanden ist. Plutonium, Ordnungszahl $Z = 94$, findet man in alten Mineralen als Spuren element. Kernphysiker haben es geschafft, Elemente bis

hin zur Ordnungszahl $Z = 114$ in kleinen Mengen von ein bis zwei Atomen mit Halbwertszeiten von wenigen Mikrosekunden zu erzeugen.

Ab der Ordnungszahl $Z = 100$ ist die Abstoßung der positiv geladenen Protonen etwa genauso groß wie die Kernanziehung und die Kerne spalten spontan.

Die schwersten „Kerne“ findet man allerdings ganz woanders: Neutronensterne entstehen, wenn nach einer Supernova-Explosion die übrig gebliebene Masse ($M < 3$ Sonnenmassen) nicht ausreicht, um zu einem schwarzen Loch zu kollabieren, aber zu groß ($M > 1,4$ Sonnenmassen) ist, um als weißer Zwerg zu enden. Die Gravitation ist dann so stark, dass sie versucht die Atome zu zerquetschen. Dadurch geschieht der sogenannte Elektroneneinfang: Protonen absorbieren die Elektronen und wandeln sich unter Emission von Neutrinos in Neutronen um. Dabei schrumpft der Stern zu einer kompakten Kugel mit einem Radius von etwa 10 Kilometern zusammen. Die Dichte der Neutronensterne ist dann in etwa mit der Dichte eines Atomkerns vergleichbar.

3.8 Strahlenbelastung – Radioaktivität gehört zu unserer Welt

Unser Verhältnis zur Radioaktivität ist leicht neurotisch. Nach der Entdeckung der Radioaktivität kamen die radioaktiven Bäder in Mode. An einigen der ersten Elektronenbeschleuniger haben sich die Leute bestrahlen lassen in dem Glauben, dass die Strahlen gut für die Gesundheit seien.

Allerdings hatte schon Marie Curie herausgefunden, dass radioaktive Strahlung die menschlichen Zellen zerstören kann. Diese Erkenntnis kam für sie zu spät. Sie ist an den Folgen der Bestrahlung bei ihrer Arbeit mit radioaktiven Erzen gestorben. Auch die Entdeckung, dass Krebszellen viel effektiver von der Strahlung vernichtet werden als die gesunden, stammt von Marie Curie. Auf dieser Erkenntnis beruht die Strahlentherapie zur Behandlung von Krebserkrankungen.

Die Geschichte der Erde und auch die Gegenwart sind eng mit der Radioaktivität verbunden. Da die radioaktiven Elemente, die in Supernovae produziert wurden, mit Ausnahme eines Kaliumisotops nur schwere Elemente sind, sind die meisten davon in das Zentrum der Erde migriert. Die Entwicklung der Erde, ihres Klimas und die Entstehung der Biosphäre sind ohne Vulkanismus unvorstellbar. Nach den beiden Unglücken der Kernreaktoren in Tschernobyl und Fukushima ist die Angst vor Radioaktivität irrational.

Deswegen sollten wir uns einen Überblick über die wichtigsten Strahlungsquellen verschaffen, die zur Strahlungsbelastung des Menschen beitragen. In Abb. 3.14 ist eine Verteilung der radioaktiven Belastung gezeigt. Sie zeigt, dass im Schnitt die meiste Bestrahlung durch Gebäude und Böden und durch unser Essen zustande kommt. Danach folgt die Strahlenbelastung bei Arztbesuchen.

Radon ist ein radioaktives Edelgas mit einer Halbwertzeit von 3,8 Tagen. Es entsteht als Produkt radioaktiver Isotope nach dem Zerfall von Uran. Uran ist sehr homogen über die Erde verteilt und man findet es überall im Sand. So gibt es Uran und seine Zerfallsprodukte auch in Wänden von Häusern. Die Radonatome diffundieren aus den Wänden

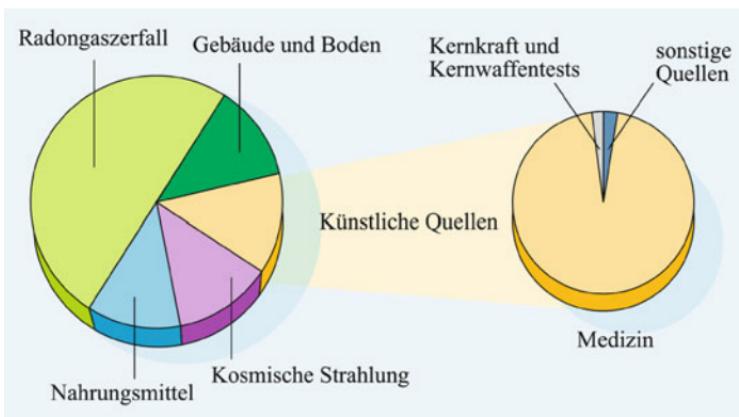


Abb. 3.14 Die durchschnittliche radioaktive Belastung des Menschen. Der Hauptanteil stammt aus natürlichen radioaktiven Quellen. Der Anteil durch die künstlichen Quellen beträgt etwa 15 %, davon hauptsächlich von medizinischen Untersuchungen

und schweben in der Luft. Beim Einatmen bleiben sie in der Lunge stecken und kommen als schweres Edelgas nicht so schnell aus der Lunge. Die hohe Belastung durch das Radon ist nicht nur Folge der großen Zahl an Radon-Atomen, sondern eher ihrer biologischen Wirkung. Radon zerfällt durch den Alphazerfall. Die Alphateilchen beschädigen das Gewebe wesentlich stärker als andere Strahlen. Die Schädlichkeitswirkung von **Alphateilchen** ist etwa 20-mal so hoch wie die von Beta- oder **Gammastrahlung**.

Das einzige langlebige Isotop der leichten Kerne ist Kalium 40, Begleiter des Hauptisotops Kalium 39. Sein Ursprung liegt ähnlich wie von Uran in der Supernova-Explosion. Die Halbwertzeit von Kalium 40 ist 1,251 Milliarden Jahre. Der Anteil des Kalium 40 im naturvor-

kömmlichen Kalium beträgt 0,012 %. Bei der Entstehung der Erde war sein Anteil 30-mal höher. Die Radioaktivität eines 75 Kilogramm schweren Menschen beträgt etwa 5000 Kalium-40-Zerfälle pro Sekunde oder 5000 Becquerel. Interessanter als diese Zahl ist die Angabe der Radioaktivität pro Kilogramm. Bei Menschen beträgt sie etwa 70 Becquerel pro Kilogramm. Nach dem Reaktorunglück von Tschernobyl gab es Aufregung, die Pilze hätten erhöhte Strahlungswerte, jedoch wesentlich kleiner als unsere natürliche Radioaktivität.

Nicht nur Radon kommt aus den Wänden unserer Häuser. Uran und seine Töchter emittieren auch Gammastrahlen. Es werden dabei zwar viel mehr Gammaphotonen als Alphateilchen ausgesendet, aber ihre Wirkung ist 20-mal schwächer als die der Alphateilchen.

Die kosmische Strahlen sind, mit wenigen Ausnahmen, Myonen. Ihre Energien sind ausreichend groß, dass sie durch den menschlichen Körper fliegen und auf ihrem Wege fleißig ionisieren.

3.9 Zusammenfassung

Die Radioaktivität wurde vor etwas mehr als 100 Jahren entdeckt. Heute wissen wir, dass die Sterne, die am Himmel leuchten, Energie aus Kernreaktionen gewinnen, so auch unsere Sonne. Nicht unbedeutend für die Erde ist auch die Wärme, die durch den radioaktiven Zerfall im Inneren der Erde entsteht.

Drei Minuten nach dem Urknall gab es nur Wasserstoff und Helium im Universum. Die Elemente des Sonnensys-

tems sind durch die Kernreaktionen in Supernovae entstanden. Dreimal musste die Materie durch die Supernovae-Explosionen gehen, bis die Zusammensetzung der Elemente des Sonnensystems entstanden ist.

4

Unser Planet – wie ein Wohnort im All entsteht

*Staub bist du, und zum Staub wirst
du zurückkehren*

1 Mo. 2,7

Unsere Erde unterscheidet sich vom Rest des uns bekannten Universums dadurch, dass die klimatischen Verhältnisse auf ihr das Leben gedeihen lassen. Diese Verhältnisse sind in viereinhalb Milliarden Jahren andauernder Entwicklung unter Mitwirkung physikalischer, chemischer und biologischer Faktoren entstanden.

Im 19. Jahrhundert hat man die Grundregeln der Thermodynamik gefunden. Es gibt verschiedene Formen der Energie wie zum Beispiel die mechanische, chemische, elektrische, magnetische, die Gravitationsenergie und die Kernenergie. Man kann Energie aus einer Form in die andere umwandeln. Dabei bleibt die Gesamtenergie in einem idealisierten, thermisch abgeschlossenen System erhalten. Je nachdem wie effektiv man eine Energieform

in andere umwandeln kann, bekommen die verschiedenen Energieformen ein Gütezeichen. Die Regel ist einfach: Letztendlich endet die Gesamtenergie in der ungünstigsten Form, der Wärme.

Natürlich hatte man sich damals bemüht auch die Thermodynamik nach dem Vorbild der Mechanik und des Elektromagnetismus in ein mathematisches Korsett zu zwingen. Das geht aber nur, solange man sich auf idealisierte Bedingungen beschränkt. Ein thermodynamisches System, wie zum Beispiel ein Gas in einem thermisch isolierten Volumen V mit einer Temperatur T unter dem Druck p , wird untersucht. Ändert man die Temperatur, dann ändern sich auch der Druck und das Volumen. Mathematisch kann man das nur beschreiben, wenn kleine Änderungen gemacht werden, sodass auch die Konsequenzen klein sind. Bringt man die Temperatur wieder auf den alten Wert, dann kommt auch das System zurück in den alten Zustand, weshalb der Prozess *reversibel*, also umkehrbar, genannt wird.

Unter diesen Bedingungen können thermodynamische Systeme mit den Methoden der Differentialrechnung behandelt werden. Energie, Druck und Volumen können dann als analytische Funktionen der Temperatur betrachtet werden.

Man wusste, dass die Welt nicht so ideal ist, wie die mathematische Beschreibung es verlangt. Etwaige Verluste müssen also in Kauf genommen werden, was aber nicht weiter schlimm ist: Die verlorene Energie taucht im Zweifelsfall wieder als Wärme irgendwo anders auf. Schlimmer ist, dass unter den Bedingungen der reversiblen Thermodynamik nichts Neues entstehen kann. Im besten Fall bleibt

alles beim Alten. Es gäbe weder uns noch überhaupt eine bewohnbare Erde.

Aber was passiert, wenn ein System, so wie unsere Erde, reichlich von der Sonne mit Energie versorgt wird? Dieser Aspekt der Thermodynamik wurde nicht von Physikern angegangen, sondern von Naturforschern, welche die Welt globaler betrachtet haben. Vor allem war es Darwin, der als erster eine fundierte Evolutionstheorie der Biosphäre formuliert hat. Doch um die Physik der Erde zu verstehen, müssen wir zunächst die Geschichte des Sonnensystems kennenlernen.

4.1 Entstehung des Sonnensystems – aus Chaos wird Ordnung

Die heutige Vorstellung von der Entstehung des Sonnensystems ist, dass das System am Anfang chaotisch war. Nachdem die Sonne entstanden ist, bildeten sich aus Staub und Gas Planetoiden, die sich anfänglich nur wenig störten und so unbeeinflusst um die Sonne kreisten. Im inneren Bereich des Sonnensystems war die Temperatur so hoch, dass Wasser und andere flüchtige Substanzen nicht kondensieren konnten. Hier konnten sich nur Planeten ohne flüchtige Substanzen bilden. Im Außenbereich sammelte der heutige Jupiter Wasser und andere flüchtige Substanzen und wurde zu einem Gasriesen von etwa 300 Erdmassen. Unter dem Einfluss der Gravitation der Sonne und des Jupiters gerieten die Planetoiden in eine chaotische Bewegung. Sie stießen aneinander, verschmolzen oder zerstörten sich. Die meiste

Materie endete in der Sonne, im Jupiter oder wurde aus dem Sonnensystem geschleudert. Die heutigen erdähnlichen Planeten sind verschmolzene [Planetoide](#), die eine der stabilen Bahnen um die Sonne, die von Jupiter verschont geblieben sind, gefunden haben [[uWB06](#)].

Die Erde wurde, teilweise durch die Gravitationsenergie bei der Kontraktion und teilweise durch die Kollision der Erde mit Asteroiden, zum großen Teil aufgeschmolzen. In dieser Zeit, etwa 200 bis 300 Millionen Jahre nach der Geburt des Sonnensystems, kam es zu einer Kollision der Erde mit einem Planetoiden von der Größe des heutigen Mars. Dabei entstand der Erdmond.

Wie intolerant die Sonne und Jupiter gegenüber Asteroiden sind, die noch keine stabile Bahn gefunden haben, kann man noch heute am Asteroidengürtel zwischen Mars und Jupiter beobachten. Der gesamte Gürtel enthält nur etwa 2 % der Masse, die man in diesem Bereich erwarten würde. Das meiste Material des Asteroidengürtels ist durch die Einflüsse des Jupiters als Meteoriten auf dem Jupiter und teilweise auch auf der Erde gelandet.

Die Sonne trägt etwa 99 % der Gesamtmasse des Sonnensystems. Dementsprechend beziehen sich die in Abb. [3.9](#) dargestellten Elementenhäufigkeiten wirklich auf die Sonne. Verglichen mit der Elementenhäufigkeit der Sonne mangelt es in unserer Erde vor allem an Wasserstoff und Helium. Die Uratmosphäre bestand zwar im Wesentlichen aus Wasserstoff und Helium. Diese beiden leichtesten Gase haben bei der heutigen Erdtemperatur aber so hohe Geschwindigkeiten, dass sie der Gravitation der Erde entweichen können. In der frühen Erdphase, als die Temperatur wesentlich höher war als heute, verlief die Diffusion

der beiden Gase durch die Atmosphäre der Erde in den gravitationsfreien Raum, gemessen an der geologischen Zeitskala, recht schnell. Die Oberfläche unseres Planeten ist aber auch an schweren Elementen recht arm, wenn man die Elementenhäufigkeiten der Sonne zum Vergleich heranzieht. In der heißen Phase der Erdgeschichte sind die schweren Elemente in den Erdkern gesunken. Später war die Aktivität der Vulkane hauptsächlich dafür verantwortlich, dass sich die chemische und die kristalline Zusammensetzung der Elemente an der Erdoberfläche von der ursprünglichen noch weiter entfernte. Dies erklärt auch, weshalb sich das Eisen, welches für das Magnetfeld der Erde verantwortlich ist, und auch die radioaktiven Elemente schwerer als Blei tief im Erdkern befinden. Der radioaktive Zerfall dieser Elemente ist die Hauptquelle der Energieproduktion im Inneren der Erde.

Aus welchen ursprünglichen Mineralien und organischen Verbindungen die Erde entstand, kann man aus heutigen Untersuchungen der Erdoberfläche nicht mehr herausfinden. Die einzige Quelle für diese Informationen in der Geschichte der Erde sind Meteoriten, die keinen großen Temperaturschwankungen ausgesetzt waren. Neuerdings kommt zur Meteoritenforschung auch die Sammlung der interplanetaren Materie mithilfe von Sonden innerhalb des Sonnensystems dazu.

Für die Biosphäre der Erde ist die Frage des Ursprungs des Wassers und des Sauerstoffs sehr wichtig. Das Wasser bedeckt 71 % der Erdoberfläche, beträgt aber nur 0,02 % der Erdmasse, ein winziger Bruchteil.

Nachdem die leichten Gase Wasserstoff und Helium die Atmosphäre verlassen konnten, bestand sie hauptsächlich

aus Kohlenstoffdioxid und Wasserdampf, beides Produkte von Vulkanismus. Sauerstoff ist in der Verteilung der Elemente in der Sonne sehr stark vertreten. Reiner Sauerstoff ist chemisch jedoch sehr reaktiv und oxidiert schnell mit Metallen und war deshalb in der frühen Atmosphäre noch nicht vorhanden.

Durch die Abkühlung der Erde kondensierte der Wasserdampf und es bildete sich der Urozean. Die Kondensation des Wasserdampfs hatte zwei wichtige Folgen für das Erdklima. Zunächst wurde der Wasserdampf, das wichtigste Treibhausgas, aus der Atmosphäre entfernt und das entstandene Wasser spülte Kohlendioxid ins Meer. Kohlensäure (die Verbindung zwischen Kohlenstoffdioxid und Wasser) band sich an Kalzium und lagerte sich als Kalk auf dem Meeresboden ab. Vor etwa 3,5 Milliarden Jahren entstanden so im Urozean die ersten Organismen, Bakterien und Einzeller. Es gab keinen Sauerstoff – die ersten Organismen konnten ganz ohne Sauerstoff vegetieren. Deswegen nennt man diese Organismen *anaerob*. Die Energiequelle der anaeroben Organismen ist die Gärung der Milchsäure. Eine sehr ineffiziente Energiequelle, die keineswegs zu höheren Lebensformen führt.

Vor 2,5 Milliarden Jahren fand eine Revolution in der Biosphäre statt: Durch Mutation erscheinen neue Organismen, Blaualgen (Cyanobakterien), die mithilfe der Fotosynthese freien Sauerstoff im Wasser und in der Atmosphäre produzierten. Dadurch entstand für das Leben eine neue effektive Energiequelle, die Verbrennung von Kohlenhydraten mit Sauerstoff zu Kohlenstoffdioxid und Wasser. Die Pflanzen produzieren den Sauerstoff aus Kohlenstoffdioxid und Wasser durch die Fotosynthese. Die Tiere bekommen

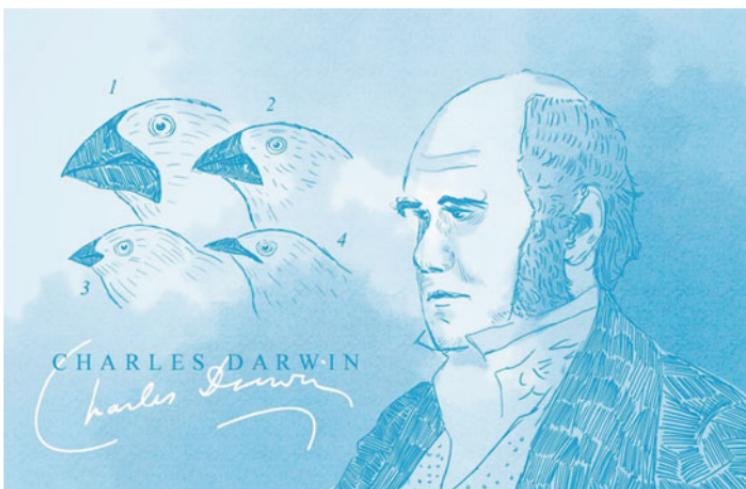


Abb. 4.1 Charles Darwin gehört zu den bedeutendsten Naturforschern der Geschichte. Die Evolutionstheorie der Lebewesen hat in vielen anderen Gebieten der Naturforschung, nicht zuletzt auch in der Physik, eine neue Betrachtung der Gegenwart initiiert. Zeichnung Jakob Piest, Springer-Verlag Berlin Heidelberg

ihre Energie aus der Verbrennung von Kohlenstoff und Sauerstoff zu Kohlenstoffdioxid und Wasser.

Dass die Vielfalt der heutigen biologischen Organismen durch die Evolution entstand, wurde schon im 18. Jahrhundert vermutet. Es gab aber keine solide Theorie der Evolution. Die ersten, die einen fundierten Mechanismus der Evolution, die natürliche Selektion, vorgeschlagen hatten, waren Charles Robert Darwin (1809–1882, Abb. 4.1) und Alfred Russel Wallace (1823–1913) in ihrer gemeinsamen Veröffentlichung im Jahre 1858. Ein Jahr später erschien das berühmte Buch Darwins, *On the Origin of Species*. Nach

Darwin stammen die heute existierenden Organismen, Tiere und Pflanzen von gemeinsamen Vorfahren ab.

Die Frage nach der Entstehung des Lebens hat er explizit nicht erwähnt. Hat er sich diese Frage überhaupt nicht gestellt? War sie auch für Darwin in damaliger Zeit nicht vorstellbar? Vielleicht wollte er nicht die schon sowieso revolutionäre Evolutionstheorie mit der ketzerischen Frage der Entstehung des Lebens belasten.

Das Sonnensystem ist ein Beispiel dafür, wie aus Chaos (zumindest zeitbegrenzt) Ordnung entstehen kann. Das Zeitintermezzo zwischen dem Anfangschaos und der ungewissen Zukunft des Sonnensystems hat Laplace zu seinen Überlegungen geführt, dass die Welt deterministisch sein könnte (Kap. 1.6). Unsere Erde ist ein Beispiel dafür, wie aus einem heißen steinigen Planet ein bewohnbarer Planet entstehen kann.

4.2 Thermodynamik – Energie gibt es nicht geschenkt

Nicolas Carnot (1796–1832), französischer Ingenieur und Physiker, wird in der Geschichte der Physik als Gründer der Thermodynamik betrachtet. Nach einem abgebrochenem Studium an der Eliteschule École Polytechnique in Paris war er als Ingenieursoffizier in einer technischen Militäreinheit angestellt. Aufgrund seiner republikanischen Überzeugung für das Militär ungeeignet quittierte er aber schließlich die Stelle, um sich voll und ganz den Naturwissenschaften zu widmen. Seine einzige, jedoch berühmte Arbeit über die maximale Energieausbeute aus Dampfmaschinen, *Réflexions*

sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance (1824), wird noch heute in Lehrbüchern zur Berechnung des theoretisch bestmöglichen Wirkungsgrades einer Wärmekraftmaschine angeführt.

Eine idealisierte Dampfmaschine wird im sogenannten Carnot-Zyklus beschrieben. In dieser Beschreibung besteht die Dampfmaschine aus zwei Wärmereservoirs auf zwei unterschiedlichen Temperaturen, der höheren T_1 und der niedrigeren T_2 . Nur ein Bruchteil der Wärmeenergie des Reservoirs mit der höheren Temperatur kann in mechanische Energie umgewandelt werden. Die maximale Ausbeute einer Dampfmaschine, der sogenannte Wirkungsgrad, ist durch die Differenz der beiden Temperaturen, $T_1 - T_2$, dividiert durch die höhere Temperatur T_1 gegeben. Die Thermodynamik ist viel einfacher zu verstehen, wenn man sich die Phänomene sofort im atomaren Bild klar macht. Die Wärmeenergie ist dann die Summe aller kinetischen Energien der Atome bzw. Moleküle. Und die mittlere kinetische Energie der Moleküle ist direkt proportional zur Temperatur. Die Carnot-Berechnung des Wirkungsgrades einer Dampfmaschine bedeutet nichts anderes als die Erhaltung der kinetischen Energie. Die Summe aller kinetischen Energien bei der höheren Temperatur minus die Summe der kinetischen Energien der Teilchen bei der niedrigeren Temperatur ergibt die maximale Arbeit, die die Dampfmaschine im idealen Fall leisten könnte.

Explizit aber hat Robert Mayer (1814–1878) als erster die Energieerhaltung formuliert. Sein Hauptberuf war Arzt, aber er hat sich sehr ernst mit der Physik befasst. Da ihm aber der Physiker-Jargon gefehlt hatte, war er zu seiner Zeit von den anderen Physikern nicht ganz anerkannt. Trotzdem

war er der erste, der das mechanische Wärmeäquivalent experimentell bestimmt und den Erhaltungssatz der Energie auf alle Energieformen erweitert hatte.

Der moderne Begriff der Energie und ihrer Erhaltung hat sich in der Mitte des 19. Jahrhunderts nur langsam außerhalb der Physikergemeinschaft verbreitet. Es ist daher nicht überraschend, dass es im 19. und sogar noch Anfang des 20. Jahrhunderts viele Erfinder sogenannter *Perpetua mobilia* gab, also Maschinen, die den Hauptsätzen der Thermodynamik widersprechen. Die primitivsten Perpetua mobilia waren solche, die schlicht die Energieerhaltung verletzten, Perpetua mobilia erster Art. Leonardo da Vinci hat ein Perpetuum mobile gezeichnet (Abb. 4.2), das nicht unbedingt primitiv aber vielmehr verwirrend wirkt. Der Denkfehler aller Vorschläge der Perpetua mobilia beruht auf der Verwechslung der Kraft bzw. des Drehmoments mit der Energie. Nach der Überlieferung hat Leonardo da Vinci selbst nicht an Perpetua mobilia geglaubt.

Die etwas subtileren Perpetua mobilia zweiter Art beziehen die Energie aus einem einzelnen Wärmereservoir. „Subtiler“, da sie nicht die Energieerhaltung verletzen, sondern nur den sogenannten zweiten Hauptsatz der Thermodynamik. Dieser besagt, dass man keine Arbeit aus Wärmeenergie beziehen kann, solange man nicht die Wärmeenergie aus einem Reservoir hoher Temperatur bezieht und in ein Reservoir niedrigerer Temperatur überführt. Heutzutage kann man mit Perpetua mobila zweiter Art nur als Spielzeug getarnt Geld verdienen. Abb. 4.3 zeigt eine trinkende Ente. Die Ente kann sich stundenlang rauf und runter bewegen. Warum ist die trinkende Ente doch kein Perpetuum mobile?

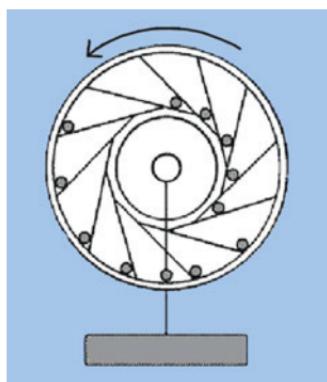


Abb. 4.2 Eine Zeichnung, die wahrscheinlich von Leonardo da Vinci stammt: Das Rad würde sich drehen, wenn *links* das Drehmoment größer wäre als *rechts*. Das ist aber nicht der Fall. Der Hebelarm *links* ist größer als *rechts*, aber die Zahl der Kugeln kleiner. Die beiden Drehmomente halten sich im Gleichgewicht

Der Energieerhaltungssatz bedeutet nur, dass die Summe aller Energien eines abgeschlossenen Systems, unabhängig von ihren jeweiligen Formen, erhalten bleibt. Allerdings ist Energie nicht gleich Energie, wenn man nach deren Umwandlungsfähigkeiten fragt. Innerhalb der Wärmeenergien gibt es eine klare Rangfolge: Je höher die Temperatur einer Wärmemenge ist, desto höher ist ihr Rang. Eine physikalische Bewertung der Qualität von Wärme hat Rudolf Clausius (1822–1888) eingeführt. Bei der Wärme sind zwei Informationen wichtig, die Energie und die **Entropie**. Im 19. Jahrhundert waren auch Physiker humanistisch gebildet und haben sich bemüht für die neuen Begriffe Namen aus dem Griechischen oder dem Lateinischen zu kreieren. Während die Energie aus dem Altgriechischen *ἐνέργεια* (Aktivität)

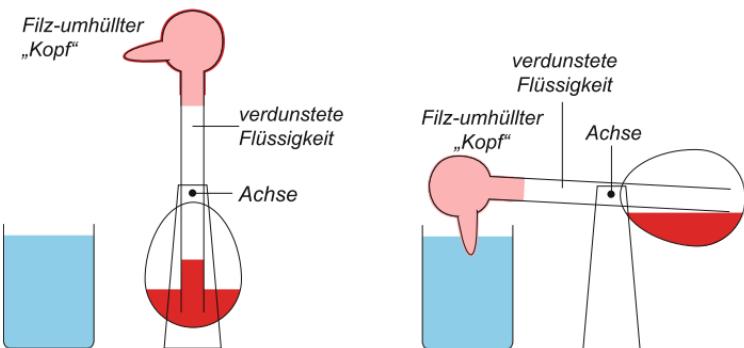


Abb. 4.3 Der Kopf der Ente ist mit einer dünnen Schicht von Filz überzogen. Das Innere der Ente ist mit einer flüchtigen Flüssigkeit zur Hälfte gefüllt. Wenn der Kopf trocken ist, hat die Flüssigkeit Zimmertemperatur. Sie flüchtet in den oberen Teil der Ente und ihren Kopf. Das Gewicht des Kopfs überwiegt das Gewicht des hinteren Teils und die Ente kippt nach vorne. Der Filz saugt das Wasser auf. Durch die Verdampfung des Wassers kühlte sich der Kopf ab und die Flüssigkeit fließt in den hinteren Teil der Ente. Sie richtet sich auf. Zeichnung nach „Trinkvogel“ – Lehramtsstudium Physik, Uni Göttingen

tät, Wirksamkeit) übernommen wurde, ist die Entropie von Clausius neu kreiert worden. Der neue Begriff sollte ähnlich wie Energie klingen und so etwas wie „in Wendung“ bedeuten. An dem Beispiel der Wärmemaschine sieht man, dass die Wärmeenergie aus einem Reservoir hoher Temperatur zu einem Reservoir niedriger Temperatur strebt. Diese Eigenschaft soll durch den Begriff der Entropie quantifiziert werden.

Konzeptionell ist die Thermodynamik in Form der statistischen Mechanik, wie sie von Ludwig Boltzmann (1844–1906, Abb. 4.4) entwickelt wurde, viel einfacher zu verstehen, als die klassische Thermodynamik. Das bedeutet je-

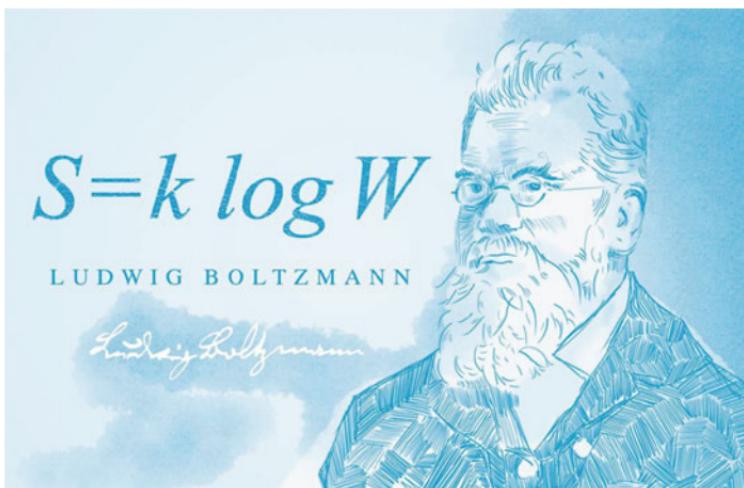


Abb. 4.4 Ludwig Boltzmann ist der Begründer der Thermodynamik in Form der statistischen Mechanik. Auf seinem Grabstein steht der berühmte Ausdruck für die Entropie. Zeichnung Jakob Piest, Springer-Verlag Berlin Heidelberg

doch nicht unbedingt, dass die statistische Mechanik rechnerisch genauso leicht zugänglich ist wie die klassische Thermodynamik.

In der Boltzmann'schen Sprache ist die Entropie ein mathematisch definiertes Maß für die Unordnung eines Systems. Die Entropie hängt mit der Anzahl an Kombinationsmöglichkeiten der einzelnen Bausteine eines Systems sich anordnen zu können zusammen. In einem makroskopischen System mit hoher Entropie gibt es auch viele Kombinationsmöglichkeiten für die Bausteine sich anzuordnen. Deswegen werden diese statistisch häufiger eintreten als ein makroskopisches System niedriger Entropie bzw. höherer Ordnung. Ein sich selbst überlassenes System tendiert da-

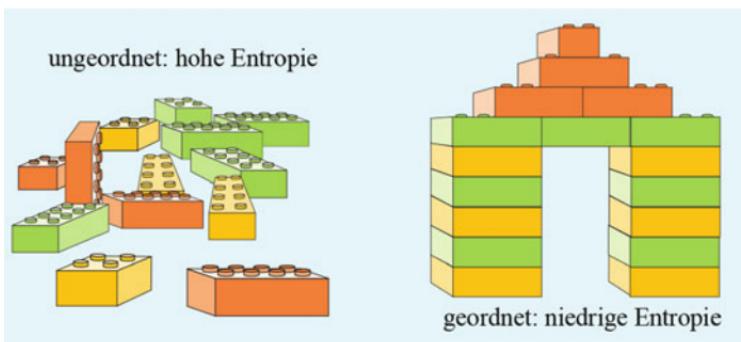


Abb. 4.5 Die Zeichnung verdeutlicht die bekannte Tatsache, dass Ordnung nur durch Arbeit, also unter Anwendung von Energie, geschaffen wird. Links liegen die Legobausteine ungeordnet auf einem Haufen, während sie rechts zu einem Tor ordentlich zusammengesetzt sind. Im Haufen können die Bausteine ohne Änderung der Form in wesentlich mehr Variationen angeordnet werden als im Tor, wo jeder Legostein seinen festen Platz hat. Nach Boltzmann schreiben wir daher dem Haufen eine höhere Entropie zu als dem Tor. Um die Ordnung des Tores zu erreichen, müsste Arbeit geleistet werden

her zur Unordnung. Jede Störung der Ordnung führt zu Unordnung, die man nur durch Arbeit reparieren kann, was wir in Abb. 4.5 zeigen.

4.3 Erdklima – wir leben in einem Treibhaus

Die Thermodynamik der abgeschlossenen Systeme braucht man, wenn man die Begriffe Energie und Entropie klar definieren möchte. Unsere Erde ist aber thermodynamisch betrachtet kein abgeschlossenes System und keineswegs in ei-

nem thermischen Gleichgewicht. Und in so einem System passieren allerhand mehr Dinge als in einem abgeschlossenen und statischen System im thermischen Gleichgewicht.

Das lebensfreundliche Erdklima funktioniert nur aufgrund des **Treibhauseffekts**. Ein herkömmliches Treibhaus ist eine mit Glas überdachte Fläche, die eine Steuerung des Klimas und somit das Kultivieren verschiedenster Pflanzen ermöglicht. Das Glas lässt das Sonnenlicht durch. Das Licht erwärmt die Erde, wonach die aufgewärmte Erde wiederum elektromagnetische Strahlung im tiefinfraroten Bereich aussendet. Für diese Strahlen aber ist das Glas undurchsichtig. Die Wärmestrahlen bleiben somit im Treibhaus gefangen.

In Abb. 4.6 ist die dazu analoge Situation des Treibhauses Erde dargestellt. Das Dach besteht aus einer Atmosphäre, die für das Sonnenlicht durchlässig ist, für die vom Erdboden emittierte Wärmestrahlung hingegen stark absorbiert. Wie stark sie absorbiert, hängt von der Konzentration der sogenannten Treibhausgase, vor allem von Wasserdampf, Kohlenstoffdioxid, Methan und Ozon ab.

Ohne die Atmosphäre mit der heutigen Konzentration der Treibhausgase wäre die mittlere Bodentemperatur der Erde -18°C . Die tatsächlich gemessene mittlere Bodentemperatur beträgt aber $+15^{\circ}\text{C}$.

Das Treibhaus Erde ist im Prinzip eine geniale Erfindung der Natur, um die Erdtemperatur konstant zu halten. Die Erde gibt die Wärme mit der vierten Potenz der Temperatur ab. Das bedeutet, dass jede kleine Temperaturänderung der Erde durch die Strahlung gedämpft wird. Erhöht sich die mittlere Erdtemperatur um 1 % der aktuellen absoluten Temperatur, emittiert die Erde 4 % mehr Energie nach außen. Umgekehrt gilt auch, wenn sich die Temperatur um

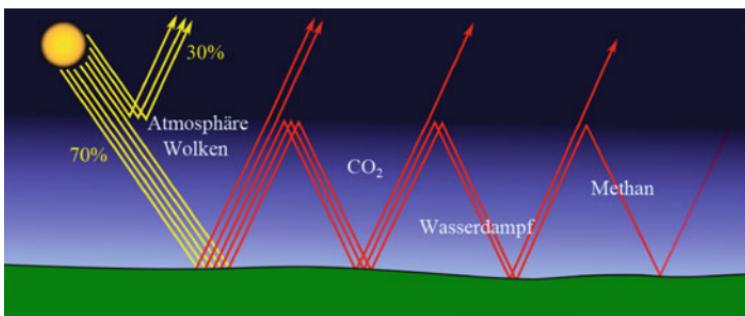


Abb. 4.6 Das Treibhaus Erde: Etwa 30 % der eingestrahlten Sonnenenergie wird sofort von den oberen Schichten der Atmosphäre reflektiert. Die restlichen 70 % gelangen zur Erdoberfläche. Davon werden 14 % gleich reflektiert und 86 % von der Erde absorbiert. Der warme Boden der Erde emittiert wieder elektromagnetische Strahlung im langwelligen infraroten Bereich. Diese bleibt in der Atmosphäre gefangen und wird nur langsam von den oberen Schichten der Atmosphäre weg von der Erde abgestrahlt

ein Prozent der absoluten Temperatur erniedrigt, wird 4 % weniger Energie abgestrahlt. Diese Überlegung gilt nur bei einer konstanten Treibhausgaskonzentration.

Es ist interessant, die Verteilung der Sonnenenergie an die unterschiedlichen Verbrauchszeige der Erde, angegeben in Prozent der gesamten eingestrahlten Sonnenenergie, zu betrachten. Der menschliche Verbrauch, im Wesentlichen sind dies die fossilen Brennstoffe, beträgt etwa 0,007 %. Die fossilen Brennstoffe sind die gespeicherte Sonnenenergie, die mit Verspätung in das All abgestrahlt wird. Die 0,007 % der Sonnenenergie entspricht einer Leistung von 2,2 kW pro Weltbewohner. Dieser Verbrauch ist nicht weltweit gleichmäßig verteilt. In Deutschland rechnet man mit 5,2 kW Energieverbrauch pro Einwohner und

Sekunde. Der Mensch braucht für seine physische Existenz, im Fachjargon *Grundsatzbedarf*, etwa 100 Watt, die er durch Ernährung bekommt. Diese Energie gibt er durch den direkten Kontakt mit der kühlen Umgebung und der Abstrahlung langwelliger elektromagnetischer Strahlung wieder ab. Der Mensch heizt die Umgebung etwa so stark auf wie eine almodische 100-Watt-Glühbirne. Mit diesen Zahlen ist es leicht auszurechnen. Die Energie, die Erdbewohner verspeisen, beträgt etwa 5 % des menschlichen Gesamtverbrauchs.

Etwa 1 % der Sonnenenergie wird für die Erzeugung der Winde, der Meereswellen und Meereströme benötigt. Ein Prozent der Sonnenenergie klingt viel, aber der Wind, die Wellen und die Strömungen toben sich weit entfernt im offenen Meer aus und können nicht überall als Energiequelle genutzt werden und sind global betrachtet wahrscheinlich nicht die Lösung der Energieversorgung. In Deutschland können sie aber einen Teil des Energieverbrauchs decken.

Von besonderem Interesse ist der Energieverbrauch der Photosynthese. Sie verwertet etwa 0,023 % der eingestrahlten Sonnenenergie. Die Fotosynthese ermöglicht die Erzeugung von Sauerstoff aus Kohlenstoffdioxid. Sie verbraucht etwa dreimal so viel Energie wie der jetzige gesamte Energieverbrauch des Menschen, dem wohl wichtigsten Erzeuger von Kohlenstoffdioxid. Offensichtlich kann die Photosynthese das Gleichgewicht zwischen Sauerstoff und Kohlenstoffdioxid zur Zeit nicht mehr halten. Deswegen haben die Ökologen leider Recht, wenn sie sagen, dass das Ökosystem der Erde schon seit Langem aus dem Gleichgewicht geraten ist.

4.4 Selbstorganisation – wie wir zu verstehen lernen

Das Wort *self organization* wurde 1947 von W. Ross Ashby, von Beruf Psychiater und Ingenieur, kreiert und ist inzwischen zum Modewort geworden. Es wird in allen denkbaren Bereichen, von den Naturwissenschaften bis hin zu den Gesellschaftswissenschaften, weil es dort das jeweilige Geschehen zutreffend beschreibt, benutzt.

Selbstorganisation ist ein Prozess eines offenen Systems, in dem aus Chaos durch Wechselwirkung der Komponenten untereinander spontan eine Art von Ordnung entstehen kann. In einem offenen System können Energie und Materie mit der Umgebung ausgetauscht werden. Unsere Erde mit uns Menschen ist das Paradebeispiel eines offenen Systems, das sich mehr oder weniger organisiert hat.

In der Physik bringt das Wort keine neuen physikalischen Erkenntnisse, aber es führte zu einer neuen Betrachtungsweise vertrauter Phänomene. So wurde der Phasenübergang, der zu einem Kristall führt, in *spontane Selbstorganisation* umbenannt.

Am Beispiel von Schneeflocken lässt sich das Prinzip der Selbstorganisation gut beschreiben. In der unterkühlten Atmosphäre scheiden die Wassermoleküle aus der Gasphase aus und binden sich mit anderen Molekülen und bilden eine zufällige Struktur (Abb. 4.7). Die nachhinein bindenden Moleküle wiederholen die vorgegebene Struktur, die zu vielen verschiedenen Formen von Schneeflocken führen (Abb. 4.8). Die erwachsenen Schneeflocken zeigen die Symmetrie der ersten Molekülverbunde.

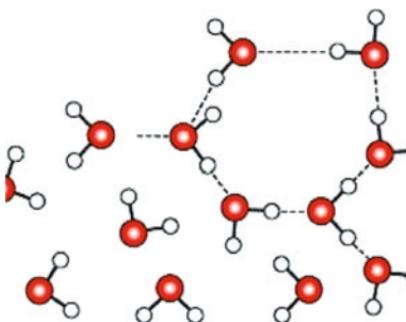


Abb. 4.7 Wasserstoffmoleküle binden sich miteinander durch die Wasserstoffbindung. Zwei Sauerstoffatome werden durch ein gemeinsames Wasserstoffatom verbunden. In der unterkühlten Atmosphäre scheiden die Wassermoleküle aus der Gasphase aus und binden sich mit anderen Molekülen. Dabei entsteht ein Zufallsgebilde, meistens mit einem Loch in der Mitte. Die weiteren Moleküle fügen sich der vorgelegten Struktur

Die Evolution des Universums nach dem Urknall ist reich an Phasenübergängen, die zu seiner heutigen Struktur geführt haben. Im letzten Kapitel, Kosmologie, werden wir ausführlich auf die Entstehung der Strukturen im Universum eingehen. Unabhängig davon, wie eindrucksvoll das Spektakel ist, welches uns das Universum bietet, die momentane Endstation der Erdbiosphäre, unser Gehirn, ist weit eindrucksvoller. Die Komplexität des Gehirns ist in dem von uns überschaubaren Teil des Universums konkurrenzlos. Unser Gehirn ist eine Matrix von zehn Milliarden Neuronen, die mit bis zu eintausend Verbindungen mit anderen Neuronen kommunizieren. Jedes Neuron beinhaltet bis zu eine Milliarde Zellen mit genetischem Code, der tausendmal mehr digitalisierte Informationen beinhaltet als unsere Laptops. Die Frage, inwieweit man das menschliche

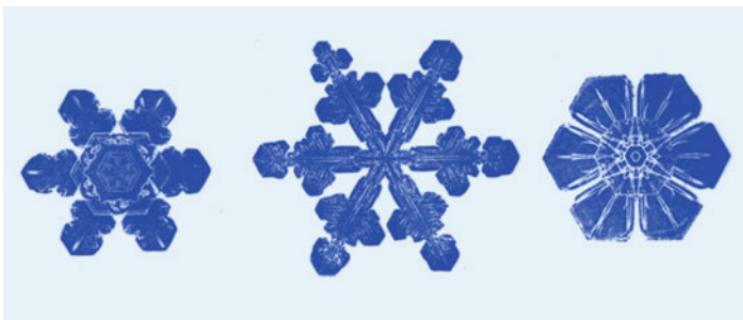


Abb. 4.8 Schneeflocken sind schöne Beispiele der Selbstorganisation. Die ersten eingefrorenen Wassermoleküle legen das Gesamtmuster der Flocken fest. Die Wasserstoffmoleküle können sich in vielseitigen Formen miteinander verbinden

Gehirn mit einem (egal wie großen) Rechner vergleichen kann, ist noch unbeantwortet.

Noch viel interessanter ist die Frage, wie gut unser Gehirn geeignet ist, um den Mikrokosmos und das Weltall zu verstehen. In seinem Buch *Der blinde Uhrmacher* argumentiert Richard Dawkins überzeugend, dass sich unser Gehirn auf die Lösung existentieller Probleme und der Selbsterhaltung spezialisiert hat [Daw06]. Die Physik des Mikrokosmos und des Universums spielten dabei während der Evolution von den anaeroben Bakterien hin zum modernen Menschen keine Rolle. Es ist ein Leichtes, sich davon überzeugen zu lassen, dass unsere Fähigkeiten, Sprachen zu lernen, wesentlich besser ausgeprägt sind als beispielsweise Physik zu verstehen.

Ein Beispiel für unseren Geschäftssinn, der wahrscheinlich schon genetisch vorhanden ist, ist die Eroberung der Welt durch die Radiowellen. Maxwell hat seine berühmten

Gleichungen 1864 veröffentlicht. Heinrich Hertz (1857–1894) hat die **elektromagnetischen Wellen** als Erster so gut verstanden, dass er sie experimentell bestätigen konnte. Zweiundzwanzig Jahre nach Maxwell hat er sie von einem Sender zu einem Empfänger übertragen. Nur wenige Jahre später begannen findige Geschäftsleute, die Ergebnisse der Hertz'schen Arbeiten zu nutzen, um Geld damit zu verdienen.

Noch Anfang des 20. Jahrhunderts haben sich Physikstudenten viele Semester lang mit den Maxwell'schen Gleichungen gequält. Heute werden diese Gleichungen in den Anfängervorlesungen des ersten Semesters in wenigen Stunden abgehandelt. Das liegt allerdings nicht daran, dass sich unsere Gehirne durch die Evolution für ein tieferes Verständnis der Physik weiterentwickelt hätten. Viel mehr haben wir in hundert Jahren gelernt, die Physik für unser Gehirn leichter verständlich zu vermitteln.

Seit Galilei glauben wir, dass unsere Aussagen über Natur nur durch das Experiment begründet werden können. Aber das Experiment allein ist noch keine Physik. Erst wenn die Ergebnisse des Experiments innerhalb eines Modells oder einer Theorie in einen logischen Rahmen eingebaut werden können, reden wir von Physik. Wir benutzen unser Gehirn, um ein Experiment zu entwerfen und durchzuführen und um die Resultate des Experiments im Rahmen einer Theorie zu interpretieren. Das Bild der Natur entsteht in unserem Gehirn.

Diese kurze Diskussion schließen wir mit einem Zitat von Niels Bohr, zu dem ich mich voll bekenne:

Es ist falsch zu denken, es wäre Aufgabe der Physik herauszufinden, wie die Natur beschaffen ist. Aufgabe ist vielmehr, herauszufinden, was wir über die Natur sagen können.

4.5 Exoplaneten – sind wir allein?

Das Interesse an Planeten außerhalb unseres Sonnensystems war seit jeher groß. Die Evolution der Biosphäre auf der Erde ist gut verstanden und belegt. Die Frage ist, ob das Leben immer dann entsteht, wenn geeignete Lebensbedingungen vorherrschen, oder sind noch weitere glückliche Zufälle notwendig, damit eine Biosphäre auf einem Planeten entsteht? Man vermutet, dass das Leben durch selbstorganisierte Aminosäuren entstanden ist. Im Labor die Entstehung des Lebens aus Aminosäuren nachzuweisen, ist wahrscheinlich nicht möglich. Die Erde hatte große Mengen an Material und die Sonnenenergie zur Verfügung und Millionen Jahre Zeit zu warten, bis das Leben spontan entstand. Deswegen ist die erste interessante Frage, ob es noch weitere bewohnbare Planeten gibt und ob sich auch dort Leben entwickelt hat. Entsteht das Leben immer dann, wenn die erdähnliche Entwicklung vorhanden ist?

2009 ist das Weltraumteleskop *Kepler* der NASA in eine Bahn um die Sonne gebracht worden mit dem Ziel, in einem schmalen Himmelbereich von etwa 190.000 Sternen im Sternbild Schwan nach Kandidaten für bewohnbare Planeten zu suchen.

Das Licht der einzelnen Sterne, welches das Keplerteleskop sammelt, wird von einem Fotometer gemessen. Wenn ein Planet die Sichtachse zwischen Stern und Fotometer

durchquert, vermindert sich kaum merklich die Leuchtkraft des Sterns. Ein Planet von der Größe des Jupiters würde die Leuchtkraft um 1 % vermindern. Ein Planet der Erdgröße ändert die Leuchtkraft des Sterns nur um 0,005 %. Wenn *Kepler* eine Verminderung der Leuchtkraft in einer sich wiederholenden Periode misst, betrachtet man dies als Beweis eines Exoplaneten. Die Masse des zentralen Sterns wird aus seiner Leuchtkraft entnommen. Die Beziehung zwischen der Leuchtkraft und der Masse eines Sterns ist gut bekannt. Aus der Periodizität der sich ändernden Leuchtkraft lässt sich der Abstand des Planeten vom Zentralgestirn nach den Kepler'schen Gesetzen bestimmen.

Mit *Kepler* hat man bereits mehr als 2000 Exoplaneten entdeckt. Einige von ihnen befinden sich in der sogenannten bewohnbaren Zone. Mit der bewohnbaren Zone bezeichnet man den Bereich um einen Stern, in dem ein Planet eine Biosphäre entwickeln kann. Der bisher interessanteste Exoplanet ist „Kepler-452b“. Er ist unserer Erde sehr sehr ähnlich. Der Stern, „Kepler-452“, den „Kepler-452b“ umkreist, ähnelt unserer Sonne. Dementsprechend beträgt auch das Jahr des Planeten 385 Tage, wohl bemerkt unserer Tageslänge.

Wenn man diese Zahl der gefundenen Planeten in einer bewohnbaren Zone auf die gesamte Milchstraße extrapoliert, erwartet man etwa eine Milliarde sonnenähnliche Systeme in unserer Galaxie.

Weitere Weltraumteleskope mit einem erweiterten Programm sind für 2017 und 2020 geplant. Die Suche nach dem Leben wird dabei nur indirekt verlaufen. Man wird erst versuchen, die Existenz einer Atmosphäre nachzuweisen und später die chemische Zusammensetzung erforschen.

Aus der Zusammensetzung der Atmosphäre kann man auf die Existenz von Wasser auf dem Planeten und auf das Leben schließen. Ähnlich wie auf der Erde erwartet man auch auf Exoplaneten, dass die Biosphäre entscheidend die Zusammensetzung der Atmosphäre prägt.

Ist erstmal die Frage nach der bloßen Existenz von Lebewesen auf Exoplaneten und seine Häufigkeit beantwortet, lässt sich auch die Frage nach der Existenz mit uns vergleichbar entwickelter Lebensformen leichter beantworten.

Der lange Weg von den ersten Einzellern vor 3,5 Milliarden Jahren hin zum heutigen Menschen ist gut belegt. Dieser Weg verlief keinesfalls geradlinig und ohne große Hürden. Waren die Bedingungen auf der Erde für die Evolution zum Menschen günstig oder nicht?

Was die Planetologen von unserer Erde denken: Es ist nicht alles schlecht, was die Erde der Biosphäre bietet. Sie ist ausreichend groß, um eine Atmosphäre zu haben und um genügend Radioaktivität gesammelt zu haben, sodass die innere Wärme das Leben auf der Erde unterstützt. Auch erzeugt der Eisenkern der Erde das Magnetfeld, welches die Erde vor kosmischer Strahlung schützt.

Als Nachteil für das Leben auf der Erde wird die für die biologische Evolution kurze Zeit ihrer Bewohnbarkeit betrachtet. Der Homo Sapiens erschien erst nach der Hälfte des aktiven Sonnenlebens, aber aufgrund der steigenden Sonnentemperatur wird die Erde „bald“, wahrscheinlich in weniger als einer Milliarde Jahren, unbewohnbar sein.

Die ideale Erde würde um eine Sonne mit einer etwas niedrigeren Temperatur kreisen. Eine solche Sonne würde wesentlich länger leben und damit der Evolution der Biosphäre mehr Zeit zur Verfügung stellen. Es wäre auch vor-

teilhaft, wenn die Erde eine etwas größere Masse hätte, sagen wir etwa eine doppelt so große. Die Erdanziehung wäre nur geringfügig größer als unsere, und der Mensch wäre ähnlich groß. Die Dichte der Luft wäre dann angenehm erhöht, die Berge etwas kleiner und mehr Land zum Leben vorhanden. Das Land und das Meer wären auch etwas gleichmäßiger verteilt – insgesamt also eine wahre Galapagoslandschaft, ein Paradies.

Ob es in einem Paradies noch eine Evolution gäbe, ist jedoch fraglich. Aus der Erdgeschichte kann man entnehmen, dass es gerade nach den Katastrophen Sprünge in der Evolution des Lebens gab.

4.6 Zusammenfassung

Noch vor 500 Jahren hielten wir die Erde für flach und glaubten, sie befände sich im Zentrum des Universums. Heute ist uns klar: Wir bewohnen einen Planeten, der um einen Stern mittlerer Größe an der Peripherie der Milchstraße kreist. Voraussichtlich wird die Sonne noch eine Milliarde Jahre die Erde mit der richtigen Menge an Energie versorgen. Der Sonne verdanken wir auch, dass sie die Selbstorganisation ermöglicht und dadurch die Erde bewohnbar gemacht hat.

5

Quarks und Leptonen – der Blick tief in die Materie

*Wenn ich mir die Namen all dieser
Teilchen merken könnte, wäre ich ein
Botaniker.*

Enrico Fermi

Materie besteht aus Quarks und Leptonen. Die starke Wechselwirkung bindet die Quarks in die Protonen und Neutronen und letztlich in die Kerne. Die elektromagnetische Kraft ist verantwortlich für den Aufbau der Atome und aller aus Atomen zusammengesetzten Körper.

Anfang der fünfziger Jahre des 20. Jahrhunderts konnte man fast glauben, dass man alle Bausteine der Materie kenne. Die Atomkerne bestanden aus positiv geladenen Protonen und neutralen Neutronen. Sie wurden von negativ geladenen Elektronen umkreist. Aus dem Betazerfall wusste man, dass es noch ein neutrales Teilchen, das Neutrino, gibt, welches dabei entsteht. Weiterhin glaubte man zu wissen, dass es eine Symmetrie zwischen Materie und Antimaterie gibt.

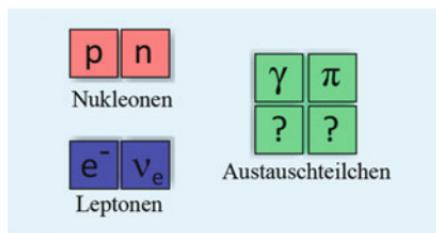


Abb. 5.1 Die Bausteine der Materie, wie man sie in den fünfziger Jahren vermutete: Proton, Neutron, Elektron und Neutrino. Jedes dieser Teilchen hat ein Antiteilchen, also Antiproton, Antineutron, Positron und Antineutrino. Photonen vermitteln die elektromagnetische Kraft, Pionen die Kernkraft, der Betazerfall war noch ein Rätsel, weshalb dessen Austauschteilchen noch unbekannt waren

Das Positron, als das Antiteilchen des Elektrons, war bekannt. Auch alle anderen Teilchen sollten ihre Antiteilchen haben. Aus theoretischen Gründen wäre die gegenteilige Annahme, dass es so etwas nicht gäbe, kaum vorstellbar. In Abb. 5.1 zeigen wir das entsprechende Bild der Bausteine der Materie, wenn es nichts anderes als Protonen, Neutronen, Elektronen, Neutrinos und ihre Antiteilchen gäbe. Die Kraft zwischen den geladenen Teilchen vermitteln die virtuellen Photonen, zwischen den Nukleonen (das Sammelwort für Protonen und Neutronen) die virtuellen **Pionen**. Die schwache Kraft, die den Betazerfall verursacht, hatte noch keinen Vermittler.

Es gab aber doch Zweifel daran, dass die Protonen und Neutronen wirklich echte Elementarteilchen sind und man hat vermutet, dass sie doch eine innere Struktur haben. Für das Elektron und sein Antiteilchen, das Positron, glaubte man, dass sie Elementarteilchen sind. Ihre Eigenschaften konnte man aus der Diracgleichung, einer relativistischen

Variante der Schrödinger-Gleichung, entnehmen. Die Dirac-Gleichung, so die damals vorherrschende Lehrmeinung, sei die ultimative Gleichung für Elementarteilchen mit Eigendrehimpuls von $\frac{1}{2}\hbar$. Proton und Neutron haben zwar den Eigendrehimpuls $\frac{1}{2}\hbar$, sonst aber Eigenschaften, die mit denen des Elektrons nicht übereinstimmen.

Dazu kam noch eine weitere Irritation: Noch vor den Pionen hatte man in der kosmischen Strahlung langlebige Myonen gefunden. Symbolisch bezeichnet man sie mit dem griechischen Buchstaben μ . Myonen haben haargenaugleichene Eigenschaften wie die Elektronen, nur ihre Masse ist um einen Faktor 200 größer. Später fand man noch ein Teilchen, das dem Elektron und dem Myon ähnlich ist, aber mit einer noch größeren Masse als die beiden. Es wurde mit dem Namen Tauon, kurz τ , getauft. Mit dem dritten elektronenähnlichen Teilchen ist aber die Reihe abgeschlossen. Elektronen und Neutrinos sind viel leichter als die Nukleonen. Im Gegensatz zu den schweren Nukleonen werden alle Teilchen, welche gleiche Eigenschaften wie die Elektronen und Neutrinos haben, als Leptonen bezeichnet. **Lepton** kommt aus dem Griechischen, $\lambda\epsilon\pi\tau\circ\varsigma$, und bedeutet fein, klein. Es gibt auch drei Neutrinos, die dem Elektron, Myon und Tau-Teilchen zugeordnet sind und sich ähnlich nur in der Masse voneinander unterscheiden. Lange hat man geglaubt, dass die Neutrinos, wie die Photonen, die Masse Null hätten. Experimentell ist aber eindeutig gezeigt worden, dass die drei Neutrinos verschiedene und endliche Massen haben. Die Neutrino-Massen sind mehr als einen Faktor Million kleiner als die Masse des Elektrons.

Die Entdeckung des Elektrons und des Myons war verhältnismäßig einfach. Die Elektronen wurden mit dem kleinsten Beschleuniger, der Kathodenstrahlröhre entdeckt, die Myonen regnen laufend vom Himmel herunter und wurden in der kosmischen Strahlung bemerkt.

Die Entdeckung der Quarks war langwieriger und kostspieliger. Ende der vierziger und Anfang der fünfziger Jahre war die kosmische Strahlung die Quelle neuer Teilchen. Energetisch betrachtet keine schlechte Quelle: Noch heute gibt es in der kosmischen Strahlung Teilchen mit kinetischen Energien, die sich weit oberhalb dessen befinden, was mit modernen Teilchenbeschleunigern erzeugt werden kann. Die Anzahl an wirklich interessanten Teilchen ist in der kosmischen Strahlung allerdings zu klein, um damit systematische Studien durchführen zu können.

Die Hauptkomponente der kosmischen Strahlung sind Protonen (Abb. 5.2), die im Magnetfeld der Milchstraße kreisen und stochastisch beschleunigt werden. Wenn sie auf die Erdatmosphäre treffen, wechselwirken sie mit den Atomkernen der Luft, wodurch unzählige neue Teilchen entstehen, die in Schauern in Richtung Erde regnen. Die meisten, die davon die Erdoberfläche erreichen, sind die langlebigen Myonen, Zerfallsprodukte schwerer Teilchen, die in den Reaktionen entstehen. Etwa 100 Myonen pro Sekunde und Quadratmeter erreichen die Erdoberfläche. Die Zahl der Myonen, die dabei unsere Körper durchqueren, beträgt etwa dreißig pro Sekunde! Diese Myonen zählen zu der Strahlenbelastung wie die Strahlung aus dem Zerfall radioaktiver Kerne.

Die Erfolgsbilanz von Experimenten mit kosmischer Strahlung war beträchtlich. Dazu zählen die Entdeckung

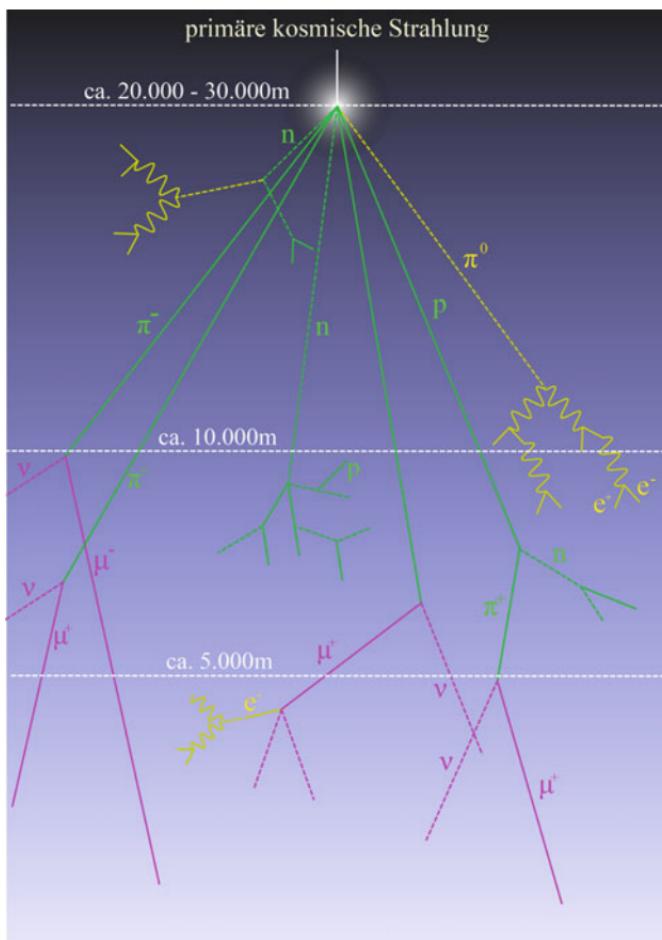


Abb. 5.2 Hochenergetische Protonen treffen auf die obere Schicht der Atmosphäre und wechselwirken mit Kernen. Die erste Generation der produzierten Teilchen zerfällt in Pionen, bei Emission von Gammastrahlen. Pionen zerfallen durch die schwache Wechselwirkung in Myonen und Neutrinos

des Positrons, dem Antiteilchen des Elektrons, sowie die Entdeckung der Myonen und Pionen. Und kurz vor der Ära der Hochenergieteilchenbeschleuniger kam die Entdeckung der seltsamen Teilchen hinzu. Seltsam deswegen, weil ihre Lebensdauer viel länger ist, als die der bis dahin bekannten Teilchen aus der Familie der Nukleonen. Sie müssen aus einem anderem Stoff als die Nukleonen aufgebaut sein, da sie nur durch die schwache Wechselwirkung in Nukleonen zerfallen. Die Entdeckung der seltsamen Teilchen war die erste Indikation, dass es neben dem Proton und dem Neutron noch weitere Teilchenfamilien geben muss.

5.1 Ära der Beschleuniger – Mikroskope, die Unteilbares zerlegen

In den fünfziger Jahren des letzten Jahrhunderts beginnt in der Teilchenphysik die Ära der Beschleuniger. Die Beschleunigung in statischen elektrischen Feldern geht, wie bei den Kathodenstrahlröhren, nur bis zu einer Grenze von einigen Millionen Volt. Um noch höhere Energien zu erreichen, muss man die Teilchen wiederholt durch das elektrische Feld leiten, was durch eine Kreisbahn der Teilchen erreicht werden kann. Abb. 5.3 zeigt symbolisch eine Beschleunigeranordnung mit drei Grundkomponenten. Die Magnete halten den Strahl auf einer Kreisbahn. In den Beschleunigungselementen werden die Teilchen durch eine elektrische Wanderwelle, die synchron mit den Teilchen

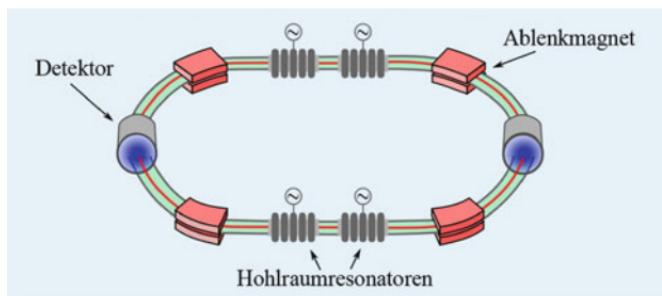


Abb. 5.3 Schematische Zeichnung eines Speicherringes mit drei Komponenten: die Ablenkagneten, die Hohlraumresonatoren zur Beschleunigung und die Detektoren

läuft, beschleunigt. Diese Elemente nennt man Hohlraumresonatoren. Die modernen Beschleuniger sind gleichzeitig auch Speicherringe. Das bedeutet, dass in dem selben Ring, in dem man beschleunigt, der Strahl gespeichert wird. Eine Sonderform der Speicher sind sogenannte Collider. Sie bestehen aus zwei Ringen mit gegenläufigen Strahlen, die sich in einigen Stellen kreuzen. An den Schnittpunkten der Strahlen stehen Detektoren.

Mit den Beschleunigern, deren Bau und Betrieb sehr teuer ist, geht die Hoffnung der Experimentalphysiker, dass sie mit etwas Glück, so wie es noch Röntgen und Bequerel gehabt haben, auf eine Goldader zu stoßen, verloren. Um heutzutage Gelder für einen neuen Beschleuniger inklusive Labor einzutreiben, muss bereits im Vorfeld gesagt werden, was damit entdeckt werden soll. Sicher, auch heute schwingt stets die Hoffnung mit, dass man nicht nur das, was man vorgeschlagen hat, aber auch etwas Unerwartetes

findet, wenn die Materie mit immer höheren Energien angeregt wird.

1954 wurde in der *University of California* Berkeley der Beschleuniger *Bevatron* in Betrieb genommen. Dieser sollte nachweisen, dass auch Protonen und Neutronen Antiteilchen haben.

Der Bevatron war ein Protonenbeschleuniger mit genau ausreichender Energie, um Antiprotonen und Antineutronen zu erzeugen. Ein Antiteilchen im Falle der Nukleonen zu erzeugen funktioniert nur dann, wenn gleichzeitig auch das Teilchen erzeugt wird. Konkret bedeutet dies, dass die beschleunigten Protonen vor ihrem Zusammenstoß mit dem Kern des Targets mindestens die Energie aufweisen müssen, welche zur Erzeugung des Proton-Antiproton-Paares benötigt wird.

Es war keine allzu große Überraschung, als 1955 sowohl das Antiproton als auch das Antineutron gefunden wurden. Der Nachweis der beiden war schließlich eine weitere Unterstützung der Hypothese, dass es eine grundlegende Symmetrie zwischen Teilchen und Antiteilchen in der Natur gibt. Zu jedem Teilchen gibt es ein Antiteilchen mit gleicher Masse aber entgegengesetzter Ladung.

Mit dem Beschleuniger hat man nicht nur die Antinukleonen gefunden, sondern auch eine Reihe anderer seltsamer Teilchen. Die Materie, die uns umgibt, besteht nur aus Protonen, Neutronen und Elektronen. Bei den seltsamen Teilchen gab es solche, die den Nukleonen ähneln, dabei aber nicht so stabil sind und in die bekannten Nukleonen zerfallen. Die Zerfallsdauer war dabei in etwa so langsam wie die des uns bekannten Betazerfalls.

Man hat nicht nur einfache seltsame Teilchen gefunden. Auch sogenannte doppelt seltsame oder dreifach seltsame Teilchen wurden gefunden. Weiterhin fand man, dass die dreifach seltsamen Teilchen zunächst in doppelt seltsame und anschließend in einfach seltsame Teilchen zerfallen und diese dann letztendlich in die Nukleonen. Alle Zerfälle können der sogenannten schwachen Wechselwirkung zugeschrieben werden.

1964 haben Murray Gell-Mann (*1929) und George Zweig (*1937) unabhängig voneinander vorgeschlagen, dass die Nukleonen, wie auch ihre seltsamen Verwandten, aus jeweils drei Konstituenten aufgebaut sind. Der Name dieser Konstituenten wurde nach einem Vorschlag von Gell-Mann **Quarks** genannt. Gell-Mann hat den Namen von James Joyce entliehen. Joyce hat bei einem Besuch einer landwirtschaftlichen Ausstellung in Deutschland eine Reklame mit der Aufschrift *Drei Mark für Musterquark* gesehen. Joyce spielte gerne mit Worten. So entstand in seinem *Finnegans Wake* der Passus:

Three quarks for Muster Mark Sure he has not got much of a bark And sure he has it's all beside the mark

Die dreifach seltsamen Teilchen bestehen aus drei seltsamen Quarks, Strange-Quarks genannt. Die doppelt seltsamen Teilchen aus zwei Strange-Quarks und einem gewöhnlichen Quark. Die einfach seltsamen haben nur ein Strange-Quark und zwei gewöhnliche. Das Proton und das Neutron haben jeweils drei Quarks, die mit Up und Down bezeichnet werden.

Der Betazerfall ist nur ein besonderer Fall der schwachen Wechselwirkung. Eine vorläufige phänomenologische Theorie des Betazerfalls, nach der bei Umwandlung von Neutron in Proton einfach ein Elektron und ein Antineutrinio emittiert werden, entspricht nach den Vorstellungen der Physiker nicht den „ästhetischen Kriterien“ der Natur. Die Quantenelektrodynamik ist das Vorbild einer Wechselwirkung! Man fragt sich, wo sich das „Photon“ der schwachen Wechselwirkung befindet. Die Suche nach den Vermittlern der schwachen Wechselwirkung stellt eine Zusammenarbeit der Experimentalphysiker und Theoretiker dar. Man hat vermutet, dass die Vermittler der schwachen Wechselwirkung durchaus eine große Masse haben. Um sie zu finden, musste man neue experimentelle Methoden entwickeln. Man schießt nicht mehr mit den hochenergetischen Teilchen auf ein Target, sondern lässt lieber zwei hochenergetische Teilchen miteinander kollidieren. Bei einer Kollision zweier Teilchen mit gleicher Energie geht die gesamte Energie der beiden Teilchen in die Reaktion. Anderseits, wenn bei den relativistischen Energien ein Teilchen auf ein ruhendes trifft, verbleibt die meiste Energie in Form von kinetischen Energie und nur ein kleiner Teil geht in die Reaktion.

Die Vermittler der schwachen Wechselwirkung, fachlich die *Bosonen* der schwachen Wechselwirkung, wurden in einem Proton-Antiproton-Speicherring entdeckt. Anschließend hat man ihre Eigenschaften in einem Elektron-Positron-Speicherring vermessen.

Was in der Elektrodynamik das Photon ist, sind in der schwachen Wechselwirkung gleich drei Bosonen, W^+ , W^- und Z^0 . Sie sind allerdings nicht masselos wie das Photon,

sondern ziemlich schwer. Die W's haben etwa 80 % der Protonmasse, das Z sogar 90 %. Die W's sind geladen, Z^0 nicht. Die große Masse dieser Bosonen erklärt, warum die schwache Wechselwirkung so schwach erscheint. Die schweren Bosonen können sich kaum von dem Lepton oder Quark entfernen – wegen der Energie-Zeit-Unschärfe haben sie dazu einfach keine Zeit und können kaum wechselwirken. Der Umkreis der Wirkung, ihre Reichweite, beträgt nur ein Tausendstel des Protonenradius.

In der Thermodynamik haben wir gesehen, dass jede Art der Energie letztendlich in Wärme endet. Die kinetische Energie eines Körpers verbraucht sich beispielsweise aufgrund der Reibung. Bei der Reibung verteilt sich die kinetische Energie der bewegenden Körper auf die Moleküle, der Körper wird wärmer. Bei der elektrischen Energie endet alles, was nicht für die Arbeit benötigt wird aufgrund des elektrischen Widerstands der Leitungen und Bauteile in Wärme. Die heißen Körper geben schließlich ihre Wärme an die Umgebung ab, solange es Temperaturunterschiede gibt.

Manchmal entsteht der Eindruck, dass es in Quantensystemen keine Reibung gibt. In Quantensystemen entspricht die abgesendete Strahlung der Reibung: Beispielsweise strahlen angeregte Atome solange Photonen aus, solange sie noch nicht im Grundzustand angekommen sind. Angelegte Kerne strahlen Gammastrahlen. Sie können aber auch Nukleonen abgeben, um die überschüssige Energie loszuwerden. Die schwache Wechselwirkung wandelt Quarks und Leptonen solange um, bis die Quarks in einem Proton oder Neutron enden. Die Myonen und Tau-Leptonen zerfallen entsprechend in Elektronen und Neutrinos.

5.2 DESY – Quarks kann man beobachten

Nach dem Vorschlag von Gell-Mann und Zweig wusste man noch nicht, ob die hypothetischen Quarks echte Teilchen sind oder nur eine mathematische Konstruktion, um die Struktur der Nukleonen und ihrer schweren Geschwister zu erklären. Diese Frage erinnert an die Diskussion zwischen Mach und Boltzmann, ob Atome echte oder nur fiktive Objekte sind, die eine alternative Beschreibung der Thermodynamik ermöglichen.

Die ersten erfolgreichen Experimente zum Nachweis der Quarks sind Ende der 1960er und Anfang der 1970er Jahre mit hochenergetischen Elektronen in Stanford durchgeführt worden. In diesen ersten Experimenten zur Quarkstruktur wurden nur die gestreuten Elektronen gemessen, den Rest musste man der Interpretation überlassen. J. I. Friedman und R. E. Taylor haben für den Nachweis, dass Quarks echte Teilchen sind, 1990 den Nobelpreis für Physik bekommen.

Die ausführlichsten Untersuchungen zur Quarkstruktur des Protons sind in Hamburg im Forschungslabor DESY durchgeführt worden. Allein dieser Aufgabe gewidmet, wurde ein Elektron-Proton-Speicherring für die Beschleunigung auf höchste Energien gebaut. Was man bei diesem Versuch beobachtet hat, kann man der Abb. 5.4 entnehmen. Bei der Proton-Elektron-Kollision sieht man das gestreute Elektron, das nach unten abgelenkt wird. Ein Bündel von geladenen Teilchen, meistens Pionen, fliegt nach oben. Zusammengezählt tragen diese Pionen genau den Impuls, den

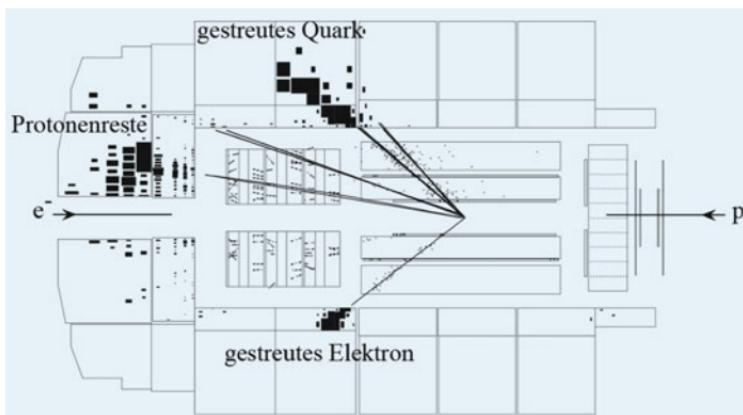


Abb. 5.4 Ein hochenergetisches Elektron kollidiert mit einem hochenergetischen Proton, das sich in entgegengesetzter Richtung bewegt. Längs um den inneren Teil des Detektor befindet sich eine supraleitende Spule. Die geladenen Teilchen, die bei der Kollision entstehen, hinterlassen Spuren im Detektor. Aus der Krümmung der Spuren im Magnetfeld bestimmt man die Impulse der Teilchen. Außerhalb der Spule befinden sich die sogenannten Kalorimeter, dass sind die Detektoren, in denen die Teilchen ihre ganze Energie abgeben. Aus den gemessenen Impulsen und Energien kann die gesamte Reaktion rekonstruiert werden

das Elektron an das Proton abgegeben hat. In der intuitiven Erklärung hat das Elektron das Quark aus dem Proton katapultiert. Ein freies Quark als solches kann jedoch nicht bestehen. Das aus dem Proton katapulierte Quark verbindet sich prompt mit Quarks und Antiquarks, bis alle in der Reaktion entstandenen Quarks als ein **Meson** oder **Nukleon** enden.

Wenn ein Elektron aus einem Atom herausgeschlagen wird, wandert es eine Weile, aber sobald es auf ein positives Ion trifft, neutralisiert es sich mit ihm. Genauso verhält

es sich mit den Quarks, denn auch sie haben eine Ladung, die sogenannte starke Ladung. Sie ist so stark, dass sie aus dem Vakuum Quark-Antiquark-Paare an sich ziehen und sich neutralisieren kann. Auch das, was von dem Proton übrig geblieben ist, hat die starke Ladung und so wie das Quark neutralisiert es sich prompt. All dies ist in der Theorie der Quantenchromodynamik, die nach dem Vorbild der Quantenelektrodynamik aufgebaut ist, erfasst.

5.3 Quantenchromodynamik – warum Quarks unzertrennlich sind

Die Nukleonen und ihre schwereren Geschwister, die zusammen als **Baryonen** bezeichnet werden, sind aus drei Quarks aufgebaut, denn diese besitzen drei starke Ladungen. Die Benennung stammt aus der Farbenlehre. Mit den drei Farben Blau, Grün und Rot kann man alle Farbvarianten zusammensetzen. Noch wichtiger ist, dass alle drei zusammen die Farbe Weiß ergeben. Da man die einzelnen Farben nicht mehr sehen kann, sagen wir lieber farbneutral. Aus dem in Abb. 5.4 dargestellten Experiment haben wir gelernt, dass die einzelnen Quarks nicht als freie Teilchen existieren können. Ihre Ladung ist so stark, dass sie sich sofort mit anderen Quarks zu einem farbneutralen Teilchen verbinden.

Der Name Baryon entstand zu der Zeit, als die Nukleonen als die schwersten Bausteine der Materie galten. Das Pi-
on liegt mit seiner Masse zwischen Nukleon und Elektron, weshalb es mit **Meson** bezeichnet wurde. Heute bezeichnet

Quarks			Antiquarks		
Up	Charm	Top	Antitop	Anticharm	Antiup
u 2/3e	c 2/3e	t 2/3e	̄t -2/3e	̄c -2/3e	̄u -2/3e
d -1/3e	s -1/3e	b -1/3e	̄b 1/3e	̄s 1/3e	̄d 1/3e
Down	Strange	Bottom	Antidown	Antistrange	Antibottom

Abb. 5.5 Die Farbladungen von den Quarks sind Blau, Grün und Rot, von den Antiquarks Gelb, Magenta und Cyan. Die elektrische Ladung von den Up-, Charm- und Top-Quarks ist $+2/3$, von deren Antiquarks $-2/3$. Die elektrische Ladung von Down-, Strange-, Bottom-Quarks ist $-1/3$ und von deren Antiquarks $+1/3$

man die Teilchen, die sich aus drei Quarks zusammensetzen, als *Baryonen*. Die Teilchen, die aus einem Quark und einem Anti-Quark bestehen, werden *Mesonen* genannt. Neben den Pionen gibt es eine Fülle weiterer Mesonen. Die Gruppe der Baryonen und Mesonen, also alle Teilchen, die aus Quarks bestehen, nennen wir *Hadronen*.

Auch die Mesonen sind in der Sprache der starken Wechselwirkung farbneutral. Quark und Antiquark haben entgegengesetzte Eigenschaften. Die starke Ladung eines Quarks ist seine Farbe, die starke Ladung des Antiquarks ist die Antifarbe, also Antiblau, Antigrün und Antirot (Farbe griech. $\chiρώμα$).

In Abb. 5.5 sind die Eigenschaften aller Quarks und Antiquarks farblich dargestellt. Die Quarks und die Antiquarks haben entgegengesetzte starke Ladungen (Farben) und entgegengesetzte elektrische Ladungen. Es ist eindrucksvoll zu

sehen, wie die alte Farblehre – wohlgemerkt nicht die von Goethe – die Eigenschaften der Quarks wiedergeben. Die Quarkladungen sind Blau, Grün, Rot. Die Summe der drei-en ist weiß, farbneutral. Da nur farbneutrale Teilchen in der Natur vorkommen, müssen sie aus drei Quarks aufgebaut werden. Das sind die Protonen und Neutronen und andere Baryonen, die alle aus drei Quarks aufgebaut sind. Wenn die Summe aller drei Farben farbneutral ist, dann ist die Summe zweier Farben die Antifarbe der dritten. Die Antifarbe von Blau ist Gelb (Rot + Grün), die von Grün ist Magenta (Rot + Blau) und die von Rot ist Cyan (Grün + Blau). Die Summe der Farbe und der Antifarbe ist farbneutral. Deswegen kann man aus den Quarks und den Antiquarks wieder farbneutrale Teilchen aufbauen. Das sind die Mesonen. Die leben nicht ewig, aber lange genug, dass man über ihre Struktur vieles erfahren kann.

Die Farbtheorie, die man für die starke Ladung benutzt, ist keine physikalische, aber physiologische Theorie. Das menschliche Auge hat ein für die elektromagnetische Strahlung der Sonne durchlässiges Fenster, drei Rezeptoren, entwickelt. Die Farbempfindung wird durch Außenreize im Gehirn gemacht. Erstaunlicherweise beschreibt das Dreirezeptoren-Modell der Farbempfindung exzellent die Eigenschaften der starken Ladungen.

Wie man aus Abb. 5.5 sieht, haben die Quarks auch elektrische Ladungen. Jedoch nicht ganzzahlige Elementarladungen, sondern $2/3$ oder $1/3$ der Elementarladung. Die, in der Natur vorkommende Gebilde aus den Quarks haben nur ganzzahlige Elementarladungen.

Im Namen Quantenchromodynamik schwingt mit, dass die Theorie wieder eine ähnliche Struktur hat wie die Quan-

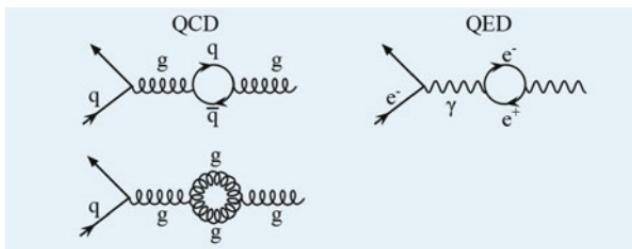


Abb. 5.6 Im Unterschied zu den elektrisch ladungsneutralen virtuellen Photonen tragen die Gluonen die starke Ladungen nach außen. Je weiter sich das virtuelle Gluon von dem Quark entfernt, desto mehr Ladungen hat es transportiert, desto stärker ist die Kraft zwischen den Quarks

tenelektrodynamik. Die Quantenelektrodynamik ist die Theorie der Wechselwirkung zwischen elektrischen Ladungen, die Quantenchromodynamik die zwischen den Farbladungen.

In der Quantenchromodynamik spielt das **Gluon** die Rolle des Photons. Dies ist für die starke Wechselwirkung fatal. Die Gluonen sind nämlich nicht wie die Photonen ladungsneutral, sondern farbig. Da auch sie die starke Ladung tragen, wechselwirken sie miteinander, wie in Abb. 5.6 gezeigt wird. Die Folgen sind schwerwiegend.

Ein Photon, wie auch das virtuelle Photon, ist elektrisch ladungsneutral. Es transportiert also keine elektrische Ladung. Virtuelle Photonen können jedoch für eine kurze, von der Unschärferelation erlaubte Zeit in ein virtuelles Elektron-Positron-Paar übergehen. Wenn ein virtuelles Photon in ein Elektron-Positron-Paar übergeht, wird es durch die ausgesendete Ladung polarisiert. Das virtuelle Positron wird beispielsweise abgestoßen, das virtuelle

Elektron angezogen. Dadurch wird die Ladung räumlich verschmiert. Man spricht auch von der Abschirmung der Ladung, da im Inneren das elektrische Feld weiterhin steigt, wie es das Coulombgesetz vorhersagt. Dieser Effekt, *Vakuum-polarisation* genannt, ist nur in der Nähe einer Ladung bedeutend.

Auch ein Gluon kann in ein virtuelles Quark-Antiquark-Paar übergehen. Die Folgen sind die gleichen wie im Falle des Photons: Die starke Ladung wird abgeschirmt.

Ganz anders sieht es jedoch aus, wenn sich das Gluon in zwei virtuelle Gluonen aufspaltet. Die Gluonen tragen somit die starke Ladung weg von ihrer ursprünglichen Ladung. Glaubt man David Gross, David Politzer und Frank Wilczek, überwiegt die Fortpflanzung der starken Ladung durch die Spaltung in virtuelle Gluonen bei Weitem der Abschirmung der starken Ladung durch die Aufspaltung der Gluonen in virtuelle Quark-Antiquark-Paare. Die Anziehung zwischen den Quarks nimmt somit mit dem Abstand zu! Sie wirkt wie eine elastische Feder. Bei kleinen Abständen ist sie schwach, mit zunehmenden Abständen nimmt sie immer weiter zu. Es hätte Hooke sicher gefreut, dass sein Federgesetz auch bei Quarks angewendet werden kann. Für diese Erklärung der starken Kraft haben Gross, Polizier und Wilczek den Nobelpreis bekommen. Sie fanden auch treffende Worte für ihre Erklärung. Die Bezeichnung *Confinement*, also die Unmöglichkeit Quarks als freie Teilchen zu beobachten, ist schon früher kreiert worden. Aber die Tatsache, dass sich die Quarks bei kleinen Abständen, die man nur in Stößen mit hohen Energien erreicht, fast wie freie Teilchen benehmen, haben sie *Asymptotic Freedom – Asymptotische Freiheit* benannt.

Kehren wir wieder zum experimentellen Nachweis der Quarks (Abb. 5.4) zurück. In der Kollision von Elektron und Proton übergab das Elektron so viel Energie an ein Quark, dass es die Quarkbindung zerrissen hat und sich das Quark vom Proton gelöst hat. Da aber beide, das Quark und das, was vom Proton übrig geblieben ist, eine starke Ladung besitzen, umhüllen sich die beiden Überreste so lange mit Quarks und Antiquarks, bis sie farbneutral sind. Offensichtlich erzeugen sie mehr Quarks und Antiquarks als sie für sich brauchen, sodass sich ein ganzer Schauer von Teilchen bildet. Das ist aber nicht weiter schlimm. Wenn man die Energien und die Impulse des Schauers addiert, bekommt man genau die Energie und den Impuls des gestoßenen Quarks und des Restprotons.

5.4 GUT – die Vereinheitlichung der Kräfte

In der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts kannte man vier Kräfte, die man damals als fundamentale Kräfte betrachtete: Die Gravitation, die elektrische Kraft, die magnetische Kraft und die Kohäsionskraft. Letztere war für das Zusammenhalten der Materie verantwortlich. Wohlgemerkt, man wusste damals noch nichts über Atome und hielt die Materie für ein strukturloses Kontinuum. Faraday hat in seinen Experimenten gezeigt, dass der elektrische Strom Magnetfelder und das magnetische Wechselfeld einen Strom erzeugen kann. Maxwell hat mit seinen berühmten Gleichungen gezeigt, dass bei Lichtgeschwindigkeit die elektrischen und magne-

tischen Felder ineinander übergehen und als eine Einheit, die elektromagnetische Welle erscheinen. Zwei Wechselwirkungen, die elektrische Wechselwirkung der ruhenden Ladungen und die magnetische Wechselwirkung der permanenten Magneten sind nur zwei Facetten ein und derselben elektromagnetischen Wechselwirkung.

Diese erste Vereinheitlichung zweier Wechselwirkungen hat die Physiker seitdem sehr beeinflusst. Die Physiker glauben, dass die Natur so geschaffen ist, dass sich die Kräfte und die Bausteine immer weiter reduzieren und vereinheitlichen lassen.

Es gibt noch einen weiteren Grund, um die Vereinheitlichung der Kräfte voranzutreiben. Wenn das Universum als eine kleine Raumzeit mit nichts anderem als mit Energie zu wachsen angefangen hat, dann haben sich alle Teilchen und Kräfte aus dieser Energie entwickelt.

Einige sind der Ansicht, schon die Vorstellung der Newton'schen Gravitation sei eine Art Vereinheitlichung von Kräften gewesen. Newton hat aber nur erkannt, dass der freie Fall auf dem Erdboden und der freie Fall des Mondes auf seiner Bahn um die Erde dieselbe Ursache haben, die Anziehung der Erde.

Mittlerweile spricht man von *vier fundamentalen Wechselwirkungen*. Der Gravitation, der elektromagnetischen, der schwachen und der starken Wechselwirkung. Die schwache Wechselwirkung und die elektromagnetische Wechselwirkung lassen sich zur elektroschwachen Wechselwirkung vereinheitlichen. Dies funktioniert sowohl theoretisch wie auch im Experiment. Die weitere Vereinheitlichung der elektroschwachen Wechselwirkung mit der starken Wech-

selwirkung funktioniert soweit nur theoretisch – wir werden die Vereinheitlichung nun plausibel machen.

Elektroschwache Vereinheitlichung Die Reichweite des Z^0 -Bosons beträgt, wie schon erwähnt, etwa ein Tausendstel des Protonenradius. Diese kurze Reichweite des Z^0 -Bosons ist verantwortlich dafür, dass die Teilchenzerfälle, die durch die schwache Wechselwirkung stattfinden, langsam verlaufen. Aber wenn sich zwei geladene Teilchen näher kommen als ein Tausendstel des Protonenradius, dann kann Z^0 genauso leicht zwischen den Teilchen springen, wie das Photon. Die elektromagnetische und die schwache Wechselwirkungen werden damit gleichberechtigt und verschmelzen zur elektroschwachen Wechselwirkung. Experimentell ist die Vereinheitlichung der beiden Wechselwirkungen exzellent bestätigt worden. Kommen sich die Teilchen näher als ein Tausendstel des Protonradius, dann kann man nicht mehr von zwei verschiedenen Wechselwirkungen reden, sondern nur von der elektroschwachen. Die formale Theorie der elektroschwachen Vereinheitlichung haben die drei Herren Sheldon Glashow, Steven Weinberg und Abdus Salam kreiert. Für diese Arbeit haben sie 1979 den Nobelpreis bekommen.

Große Vereinheitlichte Theorie Wenn sich zwei Quarks noch näher kommen als die Reichweite der elektroschwachen Wechselwirkung, wird diese noch stärker. Genau das Gegenteil gilt für die starke Kraft: Aufgrund der Selbstkoppelung von Gluonen nimmt die Stärke der Kraft mit dem zunehmenden Abstand zu und mit dem abnehmenden ab. Wenn man den Abstand der beiden Quarks so weit ver-

kleinert, dass die elektroschwachen und die starken Kräfte gleich groß sind, kann es zu einer weiteren Vereinheitlichung der Kräfte kommen – zumindest theoretisch. Der Grund ist der folgende: Alle drei, Photon, Z^0 und Gluon, haben trotz ihrer scheinbaren Unterschiede, mathematisch eine ähnliche Struktur. So können sie in eine übergeordnete Struktur verschmelzen.

Gravitation Schon Einstein versuchte, seine Gravitationsgleichungen (Abb. 1.20 oben) und die Maxwell'schen Gleichungen unter ein Dach zu bringen. Konkret versuchte er, übergeordnete Gleichungen zu finden, die seine Feldgleichungen und die Maxwell'schen Gleichungen als Spezialfall enthalten. Aber die beiden Theorien sind so verschieden, dass alle Versuche Einsteins vergeblich waren.

Der Erfolg der Vereinheitlichung der elektromagnetischen, schwachen und starken Kräfte wurde möglich, weil sich Photon, Z^0 und Gluon in einem übergeordneten Kräftevermittler vereinigen lassen. Die Einstein'sche Gravitation ist allerdings eine rein klassische Theorie. Die Gravitation wird durch die Krümmung der Raumzeit vermittelt und nicht durch den Austausch eines Vermittlungsbosons. Und die Entdeckung der Gravitationswellen verstärkt unsere Vorstellung, dass sich die Gravitationswellen durch die Verformung der Raumzeit ausbreiten und nicht durch ein Teilchen wie das Photon.

Und darin steckt das Problem der Vereinigung der Gravitation mit den anderen dreien Wechselwirkungen. Es scheint absurd, dass die im alltäglichen Leben am besten bekannte Kraft, die Gravitation, uns theoretisch fremd bleibt. Andererseits die elektromagnetische, starke und schwache

Wechselwirkungen, deren Struktur sich erst mit der Quantenmechanik offenbaren, theoretisch gut verstanden sind.

Man sollte sich fragen, ob man wirklich alles vereinigen muss? Warum sollte die Gravitation einfach nicht nur für das All gelten und die anderen Kräfte für den Mikrokosmos? Es gibt zwei Fälle, bei denen die Gravitation in das Quantenkorsett gezwungen werden muss: Bei der Geburt des Kosmos und beim Verschwinden der Sterne im Schwarzen Loch.

5.5 Der Higgs-Mechanismus – wie alles Masse bekommt

Eine Vorstellung darüber, was die Masse eines Körpers bedeutet, haben wir. Die Masse hängt von der Größe und der Dichte eines Körpers ab. Mit einer Waage kann man die Masse auch bestimmen. Etwa präziser würde man die Masse eines Körpers definieren als die Summe aller Atommassen in dem Körper. Und die Atome bestehen aus den Kernen, die die meiste Masse haben und Elektronen, die weniger als eine halbe Promille der Atommasse beisteuern. Die Kerne bestehen aus Protonen und Neutronen, die wieder aus Quarks aufgebaut sind. Die Frage, was die Masse ausmacht, muss die Elementarteilchenphysik beantworten. Die Elementarteilchen, Elektronen und Quarks, sind sehr klein, vielleicht sogar mit einer verschwindenden Ausdehnung. Experimentell kann man die Massen der Teilchen bestimmen, aber woher kommt die Trägheit und die Schwere der Teilchen her?

Die Vorstellung ist, die Teilchen bekommen die Masse von einem Feld, Higgsfeld genannt. Dieses Feld muss ein Energiefeld sein, da die Masse und die Energie äquivalent sind. Die Masse eines Teilchens ist umso größer je mehr Energie es von dem Higgsfeld bekommt.

Der Vorschlag des Higgsfeldes als den Massen-Geber der Teilchen kommt aus der Physik der Supraleitung und ist ursprünglich von Philip Warren Anderson (*1923) gemacht worden. In der Physik spielt die Anknüpfung neuer an alte Gebiete eine wichtige Rolle. So hat Nils Bohr das Bild des Sonnensystems sicher geholfen, sein erstes Modell des Atoms zu entwickeln. Auch die Vorstellung der Wechselwirkung als der Austausch von Austauschteilchen geht zurück auf die Spiele mit den Bällen und Bumerangs. Das Neue zu dem klassischen Bild der Wechselwirkung ist die Berücksichtigung der Unschärferelation, wobei die Bälle und die Bumerangs durch die virtuellen Bosonen ersetzt werden.

Die Theorie der Elementarteilchenphysik profitiert viel von der Thermodynamik. Das ist besonders der Fall für die Elementarteilchenphysik bei der Geburt des Universums, als sich das Universum schnell abkühlte und sich aus der formlosen Energie heutige Teilchen entwickelt haben. Aber auch die Thermodynamik bei tiefen Temperaturen ist durch viele Phänomene für die Teilchenphysik ein sehr interessanter Fund der analogen Phänomene. Das ist insbesondere der Fall für die Supraleitung.

Bei einigen Metallen binden sich bei tiefen Temperaturen die Elektronen in Paare. Als gebundene Elektronpaare unterliegen sie nicht mehr dem Pauli-Prinzip und bilden eine ideale Flüssigkeit. Einige der Eigenschaften der Supraleitung kann man als Entstehung der Masse interpretieren.

Die Physik der Supraleitung kann man mit nichtrelativistischer Quantenmechanik beschreiben. Das geht in der Teilchenphysik nicht. Sechs Herren (in drei voneinander unabhängigen Gruppen) haben das nichtrelativistische Modell der Massenerzeugung in das relativistische verallgemeinert und 1964 fast gleichzeitig publiziert. Peter Higgs alleine, François Englert und Robert Brout zusammen mit Gerald Guralik, Carl Richard Hagen und Tom Kibble, auch zusammen. Die letzten fünf haben für ihre Arbeiten den angesehenen Sakurai-Preis bekommen. Peter Higgs und François Englert haben 2013 Nobelpreis bekommen.

Der *Higgs-Mechanismus* bietet eine mathematisch schöne Erklärung, woher die Massen kommen, aber er ist auch ausreichend exotisch, um ohne eine experimentelle Bestätigung akzeptiert zu werden. Wenn die H-Felder existieren, muss man sie auch nachweisen können. Higgs war der einzige, der auch einen experimentellen Test vorgeschlagen hat.

Das ist auch der Grund, warum das neue Teilchen, nachdem es gefunden wurde, den Namen von Higgs bekam. Der zweite Grund ist, dass der Name in Verbindung mit dem Boson und dem Mechanismus sehr flüssig ausgesprochen werden kann.

Den Begriff des Feldes in der Physik und seiner quantenmechanischen Interpretation haben wir am Beispiel vom elektrischen Feld besprochen. Ein elektrisches Feld ist quantenmechanisch die Versammlung von virtuellen Photonen, die die Ladung sendet. Die Photonen vermitteln die elektrischen und die magnetischen Kräfte. Wenn es keine Ladung gibt, gibt es auch kein Feld mehr, die virtuellen Photonen sind an die Ladung gebunden.

Das Higgsfeld unterscheidet sich in zwei Eigenschaften vom elektrischen Feld. Das Higgsfeld ist nicht an eine Quelle gebunden, das ganze Universum ist mit dem Higgsfeld gefüllt. Und weiterhin vermittelt es nicht, so wie das elektrische Feld, eine Kraft, gibt aber den Teilchen die Masse.

Die wichtigste Eigenschaft eines physikalischen Feldes ist, dass es aus virtuellen Bosonen besteht. Und die kann man zu reellen Bosonen machen, wenn man ihnen ausreichende Energie gibt. Die Bremsstrahlung ist ein Beispiel, wie aus energetischen Elektronen beim Stoß mit virtuellen Photonen reelle Photonen entstehen. Peter Higgs war der einzige, der diese, heute würde man sie als selbstverständlich ansehen, Eigenschaft des Feldes erkannt und zur Falsifizierung des gesamten Higgs-Mechanismus vorgeschlagen hat.

Vollständigkeitshalber muss man erwähnen, dass der Vorschlag, die Existenz des Feldes durch die Anregung der Bosonen des Feldes, erst unter Mitwirkung von Gutachtern der angesehenen Zeitschrift, Physical Review Letters zustande kam. Die erste Veröffentlichung von Higgs wurde von der Zeitschrift abgelehnt. In der zweiten, verbesserten Version mit dem Vorschlag des experimentellen Nachweises des Bosons, wurde die Veröffentlichung angenommen. Die Erklärung, wie die Teilchen ihre Massen mit dem Higgs-Mechanismus bekommen, ist ausreichend exotisch, dass sie erst mit dem Vorschlag, wie man sie experimentell nachprüfen kann, relevant wird.

Die Suche nach dem Higgs-Boson war die wichtigste Motivation für den Bau des Large-Hadron-Colliders (LHC). Es gibt noch weitere Fragen, die man mit dem LHC zu lösen hofft. Beim Higgs-Boson wusste man, wo man suchen musste.

5.6 Large Hadron Collider – gebaut für die Suche nach Higgs

Vor 500 Jahren hat Galilei sein berühmtes Experiment mit einer schiefen Ebene, einem Pendel und wenigen Kugeln durchgeführt. Er fand die erste Beziehung zwischen der Masse und der Beschleunigung. Jetzt soll der Large Hadron Collider (LHC) klären, woher die Masse der Elementarteilchen kommt.

Nur einige Zahlen um zu illustrieren, wie viel Aufwand betrieben wird, um das Higgs-Boson zu finden.

Die Planung des Speicherrings LHC geht zurück in die 1980er Jahre. An der Planung waren 10.000 Wissenschaftler und Techniker aus mehr als 100 Ländern beteiligt. Der 26,7 Kilometer lange Tunnel des Forschungszentrums CERN in der Nähe der Stadt Genf wurde von dem Vorgängerbeschleuniger übernommen. Der Tunnel für den Vorgängerbeschleuniger, Large-Electron-Positron Speicher-Ring (LEP) ist schon in Hinblick auf den LHC gebaut worden. LEP lief bis 2000 und hat präzise Daten über die Eigenschaften von Z^0 und der W's gesammelt.

Der LHC musste neu gebaut werden. Er besteht aus zwei Röhren, in denen sich Protonen in der entgegengesetzten Richtung mit 99,999998 % der Lichtgeschwindigkeit bewegen. Die Kollisionen werden in vier Detektoren nachgewiesen, die von etwa 8000 Wissenschaftlern bedient werden. An den Experimenten sind Hunderte Institute aus der ganzen Welt beteiligt.

Abb. 5.7 zeigt ein schönes Bild eines Kandidaten für das Higgs-Boson. Besser gesagt, aus dem Zerfall des Teilchens

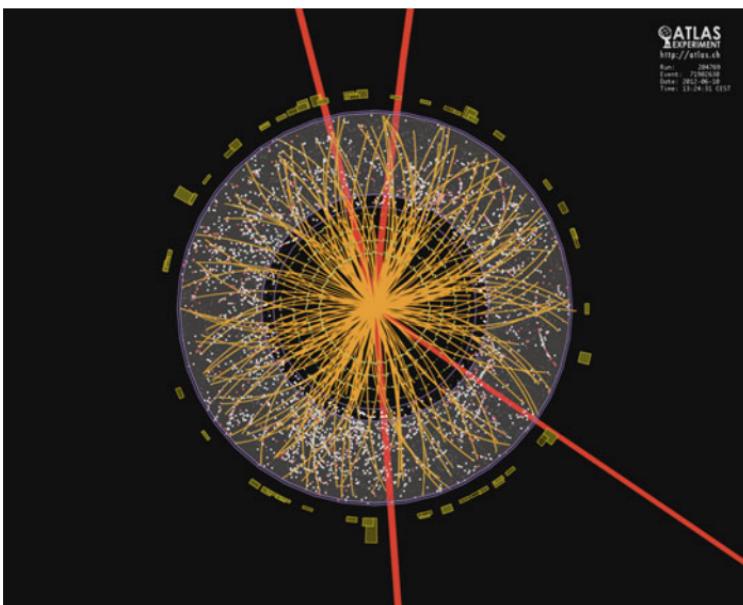


Abb. 5.7 Eine Kollision zweier Protonen im Detektor Atlas am Speicherring LHC. Der Detektor ist aus koaxial angeordneten Kammern aufgebaut. Die niederenergetischen Teilchen werden in den inneren Kammern des Detektors vollständig absorbiert, die hochenergetischen und durchdringendsten werden erst in äußereren Kammern nachgewiesen. Die roten Spuren sind die Projektionen der vier Myonen, die in die Vorwärtsrichtung geflogen sind. Aus der Rekonstruktion des Zerfalls in vier Myonen schließt man, dass dieses Ereignis ein Kandidat für das Higgs-Boson sein könnte. Mit freundlicher Genehmigung des CERN

schließt man, dass das Teilchen ein Higgs-Boson war. Der experimentelle Nachweis des Higgs-Bosons wurde dadurch erleichtert, dass sich Higgs-Bosonen proportional zu ihren Massen an die Teilchen koppeln. Das Ereignis in Abb. 5.7, ein schönes Beispiel von dem Nachweis des Higgs-Bosons, erfüllt dieses Merkmal. Der Zerfall geht über zwei mög-

lichst massive Bosonen, zwei Z^0 . Das Higgs-Boson hat eine Masse von etwa 125 Protonenmassen. Für den Zerfall des Bosons kommt Z^0 mit etwa 90 Protonenmassen gut infrage. Ähnlich wie das Neutron ein virtuelles W^- emittiert, das anschließend in ein Elektron und ein Antineutrino zerfällt, so kann das Higgs-Boson in zwei virtuelle Z^0 übergehen, die dann je in ein positives und ein negatives Myon zerfallen. Es gibt ausreichend ähnlich schöne Ereignisse des Higgs-Boson-Zerfalls, die an seine Existenz glauben lassen.

5.7 Zusammenfassung – Standardmodell der Elementarteilchen

1985 ist auch die Existenz des sechsten Quarks, des Top-Quarks, experimentell nachgewiesen worden. Die sechs Leptonen waren schon länger bekannt.

In Abb. 5.8 wird die Anordnung der bekannten Quarks und Leptonen gezeigt. Die sechs Quarks sind in drei Familien, jeweils zu zweit, einzuordnen. Den drei Quarkfamilien entsprechen drei Leptonenfamilien. Jede Familie hat zwei Leptonen, ein geladenes und ein Neutrino. Das erst kürzlich nachgewiesene Higgs-Boson bürgt für die Existenz des Higgsfeldes, das den Teilchen die Masse gibt. Rechts im Bild sind die Vermittler der drei Wechselwirkungen aufgeführt.

Das Standardmodell liefert perfekte Voraussagen aller Eigenschaften der Elementarteilchen und ihrer Wechselwirkungen. Bisher konnte man noch keine Abweichung finden. Es ist eine scheinbar paradoxe Situation entstanden: Statt sich zu freuen, hofft man doch noch irgendwo eine Unge-

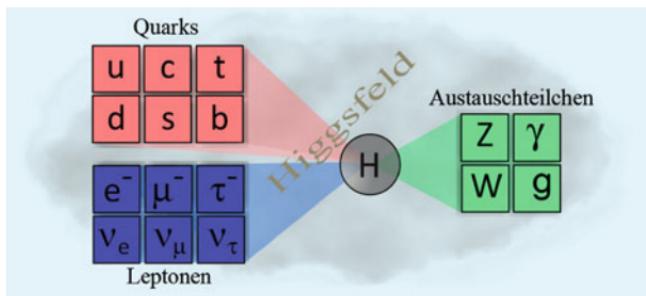


Abb. 5.8 Standardmodell der Elementarteilchen

reimtheit im Modell zu finden. Mit recht, wenn man keine Schwäche des Standardmodells findet, kommt man nicht weiter. Und wir wissen, dass es in der Welt noch viel mehr gibt, als das Standardmodell voraussagt. Die Energie des LHC ist ausreichend hoch, um auf die Physik, die nicht mit dem Standardmodell erklärt ist, zu stoßen.

Es bleiben noch genügend offene Fragen, die man mit der Physik außerhalb des Standardmodells zu beantworten hofft. Der Higgs-Mechanismus erklärt, wie sich ein Teilchen mit Masse m seiner Trägheit und Schwere entsprechend beminimt. Es wird aber nicht erklärt, wie die Größen der Massen entstanden sind. Ähnlich ist die Situation mit den Wechselwirkungen. Die Welt, die wir sehen, hängt sehr empfindlich von den Stärken der starken, elektromagnetischen und schwachen Wechselwirkungen ab. Sind diese Massen und Wechselwirkungen nur Zufallsgrößen? Es besteht die Möglichkeit, dass alle diese Größen der Massen und der Wechselwirkungen, die man zur Zeit aus Experimenten entnehmen muss, einen tieferen Grund haben, der sich in einer Theorie erklären lässt.

6

Expandierendes Universum – die Raumzeit dehnt sich

*Am Anfang war das Nichts – und das
ist dann explodiert.*

Sir Terry Pratchett

Mit der Entdeckung, dass sich das Universum ausdehnt, bekam die Kosmologie neue Bedeutung. Je tiefer wir in den Kosmos hineinschauen, desto mehr erfahren wir über seine Vergangenheit. Die Geschichte des Kosmos versucht man, so lange es geht, mit unserer irdischen Physik zu deuten.

Die erste Anwendung der Physik in der Kosmologie wird Kepler zugeschrieben. Aus der Tatsache, dass der Himmel nachts dunkel ist, kam er zu der Meinung, dass das Universum endlich sein müsse. Im 18. und 19. Jahrhundert überwog die Meinung, dass das Universum unendlich sei. Dann aber erkannte man ein Problem mit dem dunklen Himmel, das in die Geschichte als Olbers Paradoxon einging. Die Intensität des Lichts nimmt mit dem Quadrat des Abstands der Sterne ab. Aber in einem unendlichen homo-

genen Universum nimmt die Zahl der Sterne, deren Licht auf der Erde ankommt, mit dem Quadrat des Abstands zu. Der Himmel müsste tags und nachts gleich hell sein. Die Keppler'sche Lösung des später formulierten Olbers Paradoxon ist sicher eine der möglichen Erklärungen. Heute heißt die Lösung das expandierende Universum. Anfang des 20. Jahrhunderts glaubte man, dass die Milchstraße das ganze Universum sei. Man hatte zwar schon Galaxien beobachtet, hat sie zu vielen anderen diffusen Objekten, Nebulae, gezählt. Das hat sich aber geändert mit der Fertigstellung des damals größten Teleskops, dem 100-Zoll-Hooker-Teleskop, am *Mount Wilson Observatory* in Kalifornien. Mit dem neuen Teleskop konnte man weit in die Tiefen des Universums schauen. Gleichzeitig mit der Inbetriebnahme des Teleskops im Jahr 1919 hat Edwin Hubble (1889–1953) das Angebot einer Stelle an dem Observatorium angenommen. Diese hat er bis zu seinem Tod 1953 behalten (Abb. 6.1).

Hubble hat erst Mathematik und Astronomie in Chicago studiert. Nach seinem Bachelor ist er dem Wunsch seines Vaters gefolgt und hat noch das Jurastudium abgeschlossen. Mit wenig Begeisterung war er einige Jahre als Anwalt tätig. Seine Begeisterung für die Astronomie hat dann doch gewonnen, und er hat das Studium der Astronomie mit der Promotion 1917 abgeschlossen. Als sich die Vereinigten Staaten auch am Ersten Weltkrieg beteiligt haben, hat sich Hubble zum Wehrdienst gemeldet und zwei Jahre gedient. Noch mehr, er hat sich auch im Zweiten Weltkrieg, schon als weltweit anerkannter Astronom, zum Wehrdienst gemeldet.

Die erste große Tat von Hubble war, dass er in den Jahren 1922–1923 eindeutig zeigen konnte, dass einige der Nebu-



Abb. 6.1 Edwin Hubble war einer der bedeutendsten Astronomen des 20. Jahrhunderts und Begründer der modernen Kosmologie. Unser Bild des Universums mit Galaxien im expandierenden Universum stammt von ihm. Zeichnung Jakob Piest, Springer-Verlag Berlin Heidelberg

lae, die man bis zu dieser Zeit zur Milchstraße gezählt hatte, weit von dieser entfernt sind und so wie die Milchstraße zu den Galaxien zu zählen sind.

Große neue Entdeckungen haben nicht nur Befürworter, sondern auch einflussreiche Gegner. Im Falle von Hubble waren die Gegner die Astronomen der berühmten Harvard University. Sie wollten ihre Vorstellung, dass die Milchstraße das ganze Universum sei, nicht aufgeben.

Hubble war nicht nur ein genialer Astronom, er konnte seine Entdeckungen auch gut verkaufen. Die erste Publikation seiner Entdeckung der Galaxien fand in der *New York Times* im November 1924 statt. Die Gepflogenheit ameri-

kanischer Wissenschaftler, ihre neuesten Erkenntnisse zuerst in der *New York Times* zu publizieren, um sie möglichst schnell bekannt zu machen, hat sich bis heute bewährt.

6.1 Rotverschiebung – wie groß ist das Universum?

Die Dopplerverschiebung beim Schall ist den meisten am ehesten bekannt. Eingeschaltete Sirenen von Feuerwehrautos, die sich uns nähern, hören wir mit höheren Frequenzen als die, die sich von uns entfernen. Die bekannten Spektrallinien von Wasserstoff, gemessen im Labor, und die gemessen im Licht von Galaxien, unterscheiden sich, wenn sich die Galaxien von uns entfernen oder sich uns nähern. Wenn sie sich uns nähern, werden die Linien zu höheren Frequenzen verschoben, man sagt zu Blau verschoben. Umgekehrt sind die Spektrallinien der Galaxien, die sich von uns entfernen, zu Rot verschoben. Hubble hat eine Asymmetrie in der Verschiebung beobachtet. Wenn man die Galaxien aus unserer Nachbarschaft ausnimmt, zeigen fast alle Galaxien eine Rotverschiebung. Im Jahr 1929 konnte Hubble die Rotverschiebung quantifizieren. Diese Leistung gilt bis heute als seine größte Errungenschaft. Es gibt eine lineare Abhängigkeit zwischen der Stärke der Rotverschiebung und dem Abstand der Galaxien von uns.

Heutzutage dient die Rotverschiebung als Maß für die Geschwindigkeit der Galaxien, die sich von uns entfernen. Die expandierende vierdimensionale Raumzeit kann man nicht zeichnen. Die Veranschaulichung in einem dreidi-

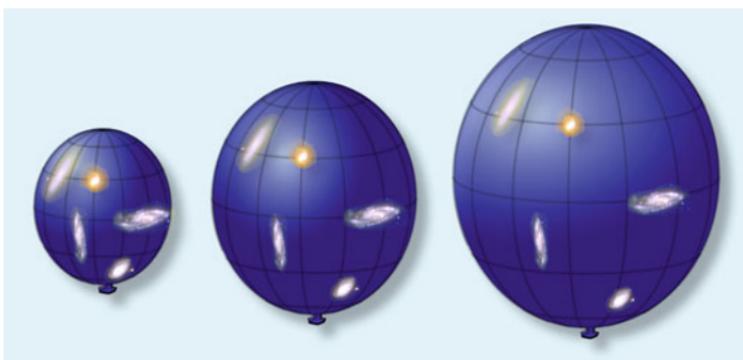


Abb. 6.2 Ein Universum mit zwei räumlichen Dimensionen und der Zeit kann man an einem Ballon verdeutlichen. Die Oberfläche des Ballons stellt die zwei räumlichen Dimensionen dar, der Radius des Ballons ist die Zeitkoordinate des expandierenden Universums

dimensionalen Raum mit zwei Raumdimensionen und einer Zeitdimension geht aber gut. In Abb. 6.2 ist das Universum mit zwei räumlichen Dimensionen des Universums auf einer Oberfläche eines Ballons abgebildet. Die Zeitorordinate ist der Ballonradius, dessen Länge dem Alter des Universums entspricht. Alle Abstände zwischen den Galaxien nehmen mit zunehmendem Radius zu. Genauso nehmen die Geschwindigkeiten proportional zum Abstand zwischen den Galaxien zu.

Hubble hat immer nur von der Rotverschiebung gesprochen. Er hat sich, in vornehmer Art eines Experimentalisten, nur auf den Bericht der gemessenen Daten beschränkt, aber keine Interpretation der Resultate seiner Messungen in einem Modell vorgeschlagen.

Im Jahr 1929, als Hubble die Rotverschiebung veröffentlicht hat, waren schon zwei theoretische Arbeiten veröf-

fentlicht, die ein expandierendes Universum vorschlugen. In dieser Zeit hat die Kommunikation der wissenschaftlichen Resultate schlecht funktioniert, und Hubble hat diese theoretischen Arbeiten nicht gekannt.

Hubble war sich über die Tragweite seiner Entdeckung im Klaren. Seine Hoffnung, den Nobelpreis zu bekommen, ist nicht in Erfüllung gegangen. Damals legte das Nobelpreiskomitee den Bereich der Physik wesentlich enger aus als heute. Astronomie gehörte, ganz anders als heute, nicht zur Physik.

6.2 Einstein, Friedmann, Lemaître – auf dem Weg zum Uratom

Einstein war der erste, der erkannt hat, dass seine Gravitationsformel auf das Universum angewendet werden kann. Es hat ihn aber gestört, dass es mit seiner Formel nur ein expandierendes oder ein kollabierendes Universum geben kann. Dies haben wir schon am Ende des ersten Kapitels beschrieben. Wenn es im Universum nur reine Gravitation gibt, entsteht ein stabiles System nur, wenn die Anziehung durch eine Kreisbewegung kompensiert wird. Die Drehung der Erde um die Sonne, oder die Drehung des Sonnensystems in der Milchstraße können gemessen werden. Letztere ist schon wegen ihrer Form offensichtlich. Die Spiralen entstehen, weil die Sterne am Rande der Galaxie in Bezug auf das Universum langsamer rotieren. Aber das Universum als Ganzes kann sich nicht drehen. Relativ zu was könnte sich denn das Universum als Ganzes drehen? Und was man nicht messen kann, gibt es nicht.

Um ein statisches Universum zu bekommen, muss man die Gravitationsgleichungen erweitern. Das bedeutet nichts anderes, als dass man neben der Gravitation noch eine abstoßende Kraft einführt. Einstein hatte dafür seine Gleichungen um eine sogenannte kosmische Konstante Λ erweitert, sodass eine Lösung für ein statisches Universum möglich war. Als Einstein von der Arbeit von Hubble erfahren hatte, hat er seinen Versuch, die Gravitationsgleichung mit der kosmischen Konstante zu erweitern, als seine „größte Eselei“ bezeichnet.

Der erste, der die Einstein'sche Gleichung richtig gelöst hat, war Alexander Alexandrowitsch Friedmann (1888–1925). Er hat gezeigt, dass die Einstein'sche Gleichung für ein homogenes Universum nur entweder expandierende oder kollabierende Lösungen erlaubt. Ein homogenes Universum bedeutet nur, dass die Dichte von Galaxien im Universum überall gleich ist. Er hat seine Resultate 1922 in der Zeitschrift für Physik veröffentlicht. Einstein hat sofort auf die Veröffentlichung reagiert und sie als falsch abgetan. Erst Jahre später konnte man Einstein überzeugen, dass Friedmann doch recht gehabt hatte. Die Friedmann'sche Arbeit wurde in einer der damals bedeutendsten wissenschaftlichen Zeitschriften publiziert, hatte aber keinen Einfluss auf die damalige Kosmologie. Erst später wurde die Arbeit neu entdeckt und Friedmann kam posthum zu verdienten Ehren. Er starb zu früh, um von der Hubble'schen Entdeckung zu erfahren.

Sieben Jahre später veröffentlichte George Lemaître (1894–1966) in einer nicht besonders bekannten belgischen Zeitschrift die gleichen Lösungen der Einstein'schen Gleichungen wie Friedmann. Auch Lemaître hatte Pro-

bleme mit Einstein gehabt. Diese jedoch nur so lange bis Einstein von der Hubble'schen Entdeckung erfahren hat.

Lemaître ging mit seiner Interpretation der Lösungen der Einstein'schen Gleichungen weiter als Friedmann. Wenn sich die Galaxien von uns mit Geschwindigkeiten proportional zu deren Abstand entfernen, kann man aus der Proportionalitätskonstante, Hubble'sche Konstante genannt, das Alter des Universums bestimmen. Das aus der Hubble'schen Konstante berechnete Alter des Universums beträgt nach heutigen Erkenntnissen 13,8 Milliarden Jahre.

Lemaître nannte den Anfang des Universums das Uratom, aus dem sich das ganze Universum entwickelte.

Lemaître war ein belgischer Jesuit und Physiker. Er hat sich auch mit der Verträglichkeit des kosmologischen Modells des expandierenden Universums mit der katholischen Lehre befasst. Aufgrund seiner Verdienste wurde er 1940 in die Vatikanische Akademie der Wissenschaften aufgenommen und 1960 zu ihrem Präsidenten berufen.

Das Modell des expandierenden Universums wird heute das Friedmann-Lemaître-Modell genannt.

6.3 Der Anfang – Steady State gegen Big Bang

Trotz der Hubble'schen Entdeckung, dass sich die Galaxien mit zunehmendem Abstand schneller und schneller entfernen, wurde die Kosmologie mit der Annahme, dass sich das Universum von einem Punkt entwickelt hat, nicht von allen Kosmologen akzeptiert. Der bedeutendste Gegner des

Urknallmodells war Fred Hoyle. In seinem Modell entfernen sich die Galaxien auch, aber die Dichte des Universums bleibt unverändert. Wasserstoffatome entstehen spontan im gleichen Tempo wie die Materie hinter dem Horizont verschwindet. So wie in einem Schwimmbad mit zirkulierendem Wasser das Wasser, das über die Ränder ausläuft, wieder zurückgeführt wird. Die Entstehungsrate der Wasserstoffatome sei aber so winzig, dass man sie experimentell nicht nachweisen könne.

Hoyle war bekannt dafür, dass er sich gerne über Andersdenkende lustig machte. Um die Anhänger des Urknallmodells zu verspotten, wollte er den Anfang des Universums mit „Big Bang“ lächerlich machen. Die Rechnung ging nicht auf. So entstand die englische Bezeichnung des Urknalls. Die Bezeichnung des Anfangs des Alls mit Big Bang ist sicher irreführend und führt zu falschen Vorstellungen vom Anfang des Kosmos. Die Befürworter des Urknallmodells haben aber sofort erkannt, dass man keinen besseren Namen finden konnte. Big Bang lässt zu, dass der gebildete Laie seine Fantasie frei entfalten kann.

Heute versteht man unter dem Urknall, dass sich ab diesem Zeitpunkt der Raum anfang auszudehnen. Die Zeit selbst läuft unabhängig von dem Raum, sie ist der Parameter des Urknallmodells, sie misst das Alter des Universums. Diese Zeit entspricht der Raum- und Zeit-Vorstellung von Newton mit dem dreidimensionalen Raum und unabhängig fortschreitender Zeit. Wenn man aber von der Struktur des Universums redet, ist die Zeit kein unabhängiger Parameter, sondern eine Koordinate der vierdimensionalen Raumzeit.

Der bedeutendste Vertreter des Urknallmodells in den 1950er Jahren war George Gamow. Gamow war schon bekannt für seine Erklärung des Alphazerfalls und seiner Beiträge zum Betazerfall. Vor der Emigration aus Russland studierte er in Petersburg bei Alexander Friedmann und hat sich offensichtlich schon als Student für das Urknallmodell begeistert. Sein wichtigster Beitrag zum Urknallmodell war seine Voraussage der Existenz der kosmischen Hintergrundstrahlung.

In der Phase der Abkühlung des Universums, als die Temperatur noch so hoch war, dass die Atome Wasserstoff und Helium voll ionisiert waren, gab es Protonen, Heliumkerne, Elektronen und eine Menge elektromagnetischer Strahlung. Die Dichte der Strahlung war so hoch, dass die Elektronen, die versucht haben, sich an die Kerne zu binden, sofort wieder ionisiert wurden. Diesen Zustand der Materie bezeichnet man als Plasma. Im Plasma kann sich die elektromagnetische Strahlung nicht ausbreiten. Sie wird dauernd absorbiert, gestreut und wieder emittiert. Durch das Plasma kann man nicht hindurchsehen, das Universum war opak.

Bei der weiteren Expansion kühlte sich das Universum ab, und die Energie der Strahlung wurde auf einmal zu niedrig, um Atome zu ionisieren. Die Elektronen blieben an die Kerne gebunden. Das Universum wurde transparent. Die elektromagnetische Strahlung, die damit beschäftigt war, die Atome zu ionisieren, wurde frei. Sie breitet sich seitdem im expandierenden Universum aus. Die freien Photonen verhalten sich wie ein Gas, das sich bei Expansion abkühlt.

In der Analogie zur Thermodynamik bezeichnet man den Übergang von Materie aus dem Zustand des elektromagne-

tischen Plasmas in den Zustand mit neutralen Atomen und frei beweglichen Photonen als einen *Phasenübergang*.

1948 veröffentlichte Gamow mit seiner Arbeitsgruppe seine Voraussage der Existenz der kosmischen Hintergrundstrahlung. Die Voraussage war auch quantitativ sehr gut. Nach seinen Berechnungen sollte die jetzige Temperatur der kosmischen Hintergrundstrahlung etwa 5 Kelvin, fünf Grad oberhalb des absoluten Nullpunkts, betragen. Die gemessene Temperatur beträgt 2,7 Kelvin. Es ist ziemlich kalt in diesem unseren Universum. Der Unterschied zwischen dem gemessenen Wert und der Gamow'schen Voraussage liegt nur darin, dass er den damals bekannten Wert der Hubble'schen Konstante benutzt hat. Seine damalige Rechnung mit dem heutigen Wert der Hubble'schen Konstante ergibt die richtige Temperatur.

Wie es in der Kosmologie damals oft passierte, blieb die Arbeit von Gamow unbemerkt. So kamen die Physiker Arno Penzias (*1933) und der Astronom Robert Woodrow Wilson (*1936) zu der Ehre, die kosmische Hintergrundstrahlung entdeckt zu haben.

Penzias und Wilson fanden beim Testen einer neuen empfindlichen Antenne für die Erdsatelliten ein störendes Hintergrundgeräusch. Nach vergeblichen Versuchen die Störung loszuwerden, fanden sie heraus, dass diese Störung nicht von ihrer Elektronik, sondern von einer Strahlungsquelle außerhalb der Erde kam.

Mit einem Fernsehgerät, das an eine Satellitenantenne angeschlossen ist, kann man die kosmische Hintergrundstrahlung mindestens so gut beobachten wie Penzias und Wilson. Man stellt die Frequenz weg von einem Sender. Das

Flimmern auf dem Schirm ist teilweise die kosmische Hintergrundstrahlung.

Penzias und Wilson haben sich an viele Astronomen und Physiker gewandt mit der Bitte eine Erklärung für ihre Beobachtung zu liefern. Lange ohne Erfolg. Endlich haben sie auch bei Robert Henry Dicke nachgefragt. Dicke hat die Veröffentlichung von Gamow gekannt und mit seiner Gruppe bei der Princeton University nach der kosmischen Hintergrundstrahlung gesucht. Er hat sofort verstanden, dass die beiden, Penzias und Wilson, die von Gamow vorausgesagte Strahlung gefunden haben.

1964 wurde im Astrophysical Journal das Experiment zur Entdeckung der Hintergrundstrahlung von Penzias und Wilson veröffentlicht wie auch der Beitrag von Dicke mit der theoretischen Interpretation der Entdeckung.

Penzias und Wilson erhielten 1978 den Nobelpreis für die Entdeckung der kosmischen Hintergrundstrahlung.

Mit der Entdeckung der kosmischen Hintergrundstrahlung hatte das Steady-State-Modell das Rennen gegen das Urknallmodell verloren. Hoyle hat noch Jahre nach der Entdeckung der kosmischen Hintergrundstrahlung nach einem Ausweg für sein Modell gesucht. Erst kurz vor seinem Tod hat er zugegeben, dass er keine gefunden hat und auch nicht auf eine hofft.

6.4 Hintergrundstrahlung – die Babyfotos des Universums

Das Bild des Universums, das Penzias und Wilson gesehen haben, war noch formlos. Das Intensitätsspektrum der Hintergrundstrahlung zeigte überall die gleiche Frequenzabhängigkeit des Planck'schen Strahlungsgesetzes eines schwarzen Körpers. Die jetzige Temperatur des Universums ist 2,7 Kelvin. Mit der Kenntnis der Hubble'schen Konstante können wir bestimmen, wann sich die Strahlung von der Materie entkoppelt hat. Das war vor mehr als 13 Milliarden Jahren, oder besser, etwa 380.000 Jahre nach dem Urknall. Die Temperatur des Universums betrug damals etwa 3000 Kelvin.

Weil die Hintergrundstrahlung das älteste Bild des Universums ist, versucht man sie gründlich zu analysieren. Mit drei Raumsonden (Abb. 6.3) hat man die Finessen der Hintergrundstrahlung bis heute untersucht. Eine interessante Information ist, dass sich unser Sonnensystem mit etwa 10 % der Lichtgeschwindigkeit im Universum bewegt, wenn man annimmt, dass die kosmische Hintergrundstrahlung das Ruhesystem des Universums angibt. In der Richtung, in der wir uns bewegen, ist wegen der Dopplerverschiebung die Temperatur um 3 Millikelvin höher als die mittlere Temperatur der Strahlung von 2,7 Kelvin.

Die drei Raumsonden haben die Temperaturschwankungen mit einer hohen Präzision vermessen. Die tiefsten Temperaturunterschiede betragen bis zu 100 Mikrokelvin. Der große Erfolg der Analyse war es, dass man die statistische

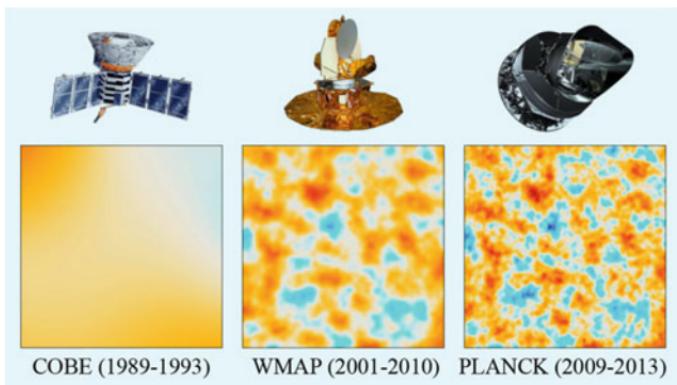


Abb. 6.3 Messungen der Temperatur der kosmischen Hintergrundstrahlung. Alle drei Messungen zeigen denselben Ausschnitt verschiedener Weltraummissionen im Vergleich und die Verbesserung der Auflösung. Es treten Regionen auf, die etwas wärmer oder kälter sind als die Durchschnittstemperatur, die bei etwa 2,7 Kelvin liegt. Mit freundlicher Genehmigung der NASA

Verteilung der Temperaturschwankungen quantitativ erklären kann.

Wenn man die Zeit in der Expansion des Universums umdreht, kontrahiert es gleichmäßig zu einem mathematischen Punkt. Ob man das als schön empfindet ist fraglich. Physiker lieben Unendlichkeiten nicht besonders, weder unendlich klein wie ein mathematischer Punkt, noch unendlich groß wie die Dichte des neugeborenen Universums. Aber eine gleichmäßige Entwicklung des Universums aus einem Punkt ist nicht nur unästhetisch, sondern widerspricht den Beobachtungen. Vor allem würde uns das Licht aus allen Ecken des Universums schon erreicht haben, was nicht der Fall ist.

Noch ein Spruch von Eistein über die Unendlichkeit:

Zwei Dinge sind unendlich: Das Universum und die menschliche Dummheit. Aber bei dem Universum bin ich mir noch nicht sicher.

1981 hat Alan H. Guth ein Szenario vorgeschlagen, nach dem einige Beobachtungen aus dem frühen Universum erklärt werden. Dieses Szenario heißt *inflationäre Expansion* oder einfach *Inflation*. Nach diesem Szenario expandierte das neugeborene Universum, die Raumzeit, von Quantengröße um einen Faktor von 50 Zehnerpotenzen auf die makroskopische Größe. Die Temperaturschwankungen in der Hintergrundstrahlung entsprechen den Dichteschwankungen des neugeborenen Universums. Eine ausführliche, aber populäre Abhandlung der Analyse der Hintergrundstrahlung findet man in „Unser mathematisches Universum“ von Max Tegmark [TM15]. Nach dieser explosiven Expansion fängt dann erst die langsame und stetige Expansion an.

Die Inflation erklärt einige Eigenschaften des frühen Universums. Die explosive Ausdehnung hat die Folge, dass das Universum in den großen Dimensionen sehr homogen ist und dass man zurzeit nur einen Teil des Universums sieht. Das Bild der Hintergrundstrahlung ist einfach die Projektion des Quantenuniversums auf die kosmische Dimension. Die Temperaturschwankungen, die man in der kosmischen Hintergrundstrahlung beobachtet, kann man mit den Quantenfluktuationen erklären.

6.5 Indizienkosmologie – indirekte Bestätigung des Urknalls

Die kosmische Hintergrundstrahlung ist das letzte Ereignis in der Geschichte des Universums, das man direkt beobachten und vermessen kann. Mit Teleskopen können wir 13 Milliarden Jahre in die Vergangenheit sehen. Was vor dieser Zeit geschah, bis etwa 400.000 Jahre nach dem Urknall, müssen wir versuchen aus der Vorgeschichte, die zur Hintergrundstrahlung geführt hat, und aus den Relikten, die aus dieser Zeit stammen, zu rekonstruieren. Das Entstehen der Relikte müssen wir jedoch mit physikalischen Erkenntnissen, die wir im Labor gewonnen haben, glaubhaft machen.

Verschwinden der Antimaterie Das wertvollste Relikt des Urknalls ist sicher die Materie, aus der auch unsere Erde besteht. Wenn der Anfang des Universums mit der Entstehung der Raumzeit voll gestopft mit Energie war, dann müsste sich alles aus dieser Energie entwickelt haben. Da es eine Symmetrie zwischen Teilchen und Antiteilchen gibt, gab es genauso viele Quarks und Antiquarks, wie auch genauso viele Leptonen und Antileptonen in dem Uruniversum. So lange die Temperatur des Universums gereicht hat, war die Annihilation von Teilchen und Antiteilchen im Gleichgewicht mit der Paarproduktion der Teilchen und Antiteilchen aus der Strahlung. Nachdem sich das Universum abgekühlt hat und die Energie der Strahlung nicht mehr ausreichte, um die Teilchen-Antiteilchen-Paare zu erzeugen, vernichteten sie sich. Bei einer exakten Teilchen-Antiteilchen-Symmetrie

gäbe es im Universum keine hadronische Materie, sondern nur noch kosmische Hintergrundstrahlung.

Diese große Vernichtung der Materie wäre fast gelungen. Nur ein Quark bzw. Lepton von 10 Milliarden vorhandenen hat die Vernichtung überlebt. Die Strahlung, die dabei entstanden ist, ist die heutige Hintergrundstrahlung. Das Problem ist aber, dass man bis jetzt im Labor noch keine Spur von einer Teilchen-Antiteilchen-Asymmetrie gefunden hat. Da wir nicht an unserer Existenz zweifeln, muss eine Asymmetrie gefunden werden, oder es ist etwas mit unserem Urknallmodell nicht in Ordnung. Im CERN am Large Hadron Collider ist eines der Experimente der Suche nach einer Teilchen-Antiteilchen-Asymmetrie gewidmet.

Primordiale Kernsynthese Nach der großen Vernichtung der Antimaterie gab es nur die uns bekannten Teilchen Quarks und Leptonen, die in einer Suppe von Gluonen und Photonen schwammen. Diesen Zustand der Materie bezeichnet man mit Quark-Gluon-Plasma. Eine Mikrosekunde nach dem Urknall war die Temperatur zu niedrig, um die Quarks und Gluonen frei zu halten. Die farbigen Quarks banden sich in die farblosen Nukleonen und es entstanden genauso viele Protonen wie Neutronen. Wieder ein Phasenübergang, diesmal aus dem Quark-Gluon-Plasma in normale Materie.

Es ist aber ein großer Unterschied zwischen dem Phasenübergang aus elektromagnetischem Plasma in gebundene Atome und dem Phasenübergang zwischen Quark-Gluon-Plasma in die gebundenen Nukleonen. Während nach dem Phasenübergang des elektromagnetischen Plasmas die Photonen frei werden, bleiben die Gluonen als Träger der

starken Ladungen an Quarks gebunden. Die Quarks von den Nukleonen sind nicht die nackten Quarks, sondern mit Gluonen bekleidet.

Protonen sind stabil, Neutronen aber zerfallen mit einer Lebensdauer von etwa 1000 Sekunden. Einige der Neutronen retten sich, indem sie sich durch Bindung mit Protonen zu Deuterium zusammenschließen. Die Temperatur des Universums ist noch ausreichend hoch, dass sich Deuterium weiter zu Helium verbinden kann. Nach drei Minuten ist die Temperatur des Universums zu niedrig für die Kernreaktionen und die primordiale Kernsynthese ist abgeschlossen. Das Universum besteht aus Protonen, Heliumpartikeln, Elektronen, Neutrinos, einer Menge Photonen, dunkler Materie und dunkler Energie.

Beschleunigte Expansion Friedmann und Lemaître haben gezeigt, dass das beobachtete expandierende Universum im Einklang mit der Einstein'schen Gravitationstheorie steht. Aber diese Expansion ist nicht die ganze Geschichte. Es gibt zwei abweichende Fälle, ein experimentell nachgewiesener und ein hypothetischer, mit dem man viele kosmologische Beobachtungen deuten kann. In den 1980er Jahren haben drei Gruppen von Astronomen die Expansion des Universums unter die Lupe genommen. Man hatte erwartet, dass sich die Expansion unter dem Einfluss der Gravitation verlangsamt. Die neuen Daten der Geschwindigkeiten der Galaxien, die am weitesten weg von uns entfernt sind, wurden 1988 veröffentlicht (Abb. 6.4). Die Expansion verlangsamt sich nicht so wie erwartet. Das Universum expandiert seit 5 Milliarden Jahren nicht mehr gleichmäßig, sondern beschleunigt!

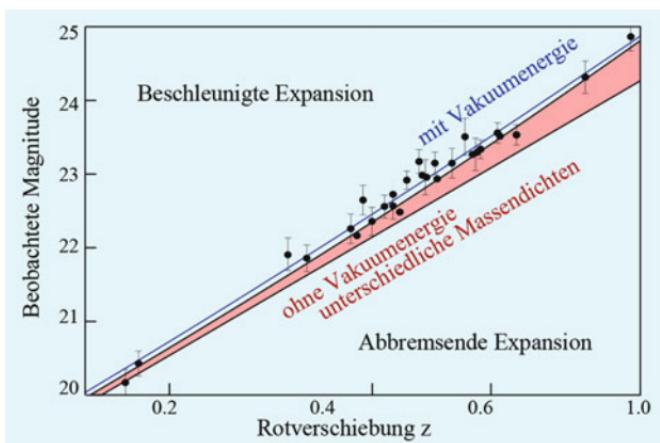


Abb. 6.4 Messungen der Helligkeiten unterschiedlich weit entfernter Supernovae. Rot hinterlegt ist der erwartete Kurvenverlauf für ein Universum ohne dunkle Energie und unterschiedlichen Massendichten. Am besten passt ein Modell mit dunkler Energie und einer kleineren Massendichte (blaue Kurve). Die Daten stammen von [Ada98, Sau99]

Um diese beschleunigte Expansion zu erklären, muss es neben der Anziehung der uns bekannten Materie und der dunklen Materie noch eine zusätzliche Energie im Universum geben, die zu einer abstoßenden Kraft führt. Diese Energie, die man bisher nur durch die beschleunigte Expansion beobachtet, nennt man in Analogie zur dunklen Materie, die man bisher auch nur durch die Gravitation nachweist, dunkle Energie. Was die dunkle Energie ist, weiß man nicht. Aber in der Kosmologie geht man mit der Energie etwas großzügiger um, als wir auf der Erde. Aber die Rolle der dunklen Energie im Universum ist bedeutend, betrachtet man die Energiedichte des Universums, die sich

aus der Dichte unserer hadronischen Materie, der Dichte der etwas rätselhafteren dunklen Materie und der Dichte der noch rätselhafteren dunklen Energie zusammensetzt. Die Zusammensetzung: dunkle Energie 70 %, dunkle Materie 25 %, unsere hadronische Materie 5 %. Dieses Resultat klingt exotisch, aber die meisten Kosmologen sind mit ihm zufrieden. Der Grund ist, die Summe aller drei entspricht der sogenannten kritischen Dichte, in der Literatur mit Omega gleich eins ($\Omega = 1$) bezeichnet.

Die kritische Energiedichte bedeutet, dass die Dichte gemittelt über viele Galaxien den Wert $\Omega = 1$ hat. Und für $\Omega = 1$ ist der dreidimensionale Raum flach, das Licht ändert bei seinem Durchgang die Richtung nicht. Beim Betrachten der Tiefe des Universums sind die Bilder nicht verzerrt.

6.6 Zusammenfassung – das Urknallmodell

Mit dem Urknall bezeichnet man den Anfang des Universums, die Entstehung des Raums und der Zeit als Raumzeit. Man fragt sich nicht warum und woher kam das Ganze. Das Urknallmodell versucht die Frühgeschichte des Universums mit den Relikten des Urknalls in Einklang zu bringen. Mit der Zeit, wie schon erwähnt, gibt man das Alter des Universums an. Und das Alter des Universums ist unabhängig vom Ort im Universum. Das ist die gute, alte Zeit, so wie sie von Newton konzipiert wurde. Redet man von räumlichen und zeitlichen Verhältnissen innerhalb des Uni-

versums, muss man die Vorstellung der Raumzeit benutzen. Die Geschichte des Universums läuft so, wie man es von einem abkühlenden thermodynamischen System erwartet. Zum Beispiel dem heißen Wasserdampf: Der Dampf expandiert, kühlt sich ab und kondensiert zu Wasser. Aus einer Gasphase geht der Dampf in die flüssige Phase über. Bei noch niedrigeren Temperaturen findet ein neuer Phasenübergang, aus der flüssigen Phase in die feste, in das Eis statt.

Die Phasenübergänge im Universum sind selbstverständlich etwas exotischer als beim Wasser (Abb. 6.5). Am Anfang war alles vereinheitlicht, Energie, Materie und die Kräfte. Das Universum expandierte explosiv aus einem Quantenzustand auf die kosmische Dimension durch die Inflationsphase. Energie und Materie haben sich getrennt, die Gravitation trennte sich von den noch vereinheitlichen starken, elektromagnetischen und schwachen Wechselwirkungen. Dann folgte die Trennung der starken, elektromagnetischen und schwachen Wechselwirkung. Das Universum ging durch die Phase des Quark-Gluon-Plasmas, das in einer Mikrosekunde abgeschlossen wurde. Drei Minuten dauerte die primordiale Kernsynthese, die zu der heutigen Zusammensetzung der zwei Elemente Wasserstoff und Helium geführt hat. Bis etwa 380.000 Jahre nach dem Urknall bestand das Universum aus dem Plasma der Kerne von Wasserstoff- und Helium-Atomen, Elektronen und Positronen und der Unmenge an Photonen, die bei der großen Teilchen-Antiteilchen-Vernichtung entstanden sind. Nachdem sich die Elektronen an die Kerne gebunden hatten, wurde das Universum transparent.

Die Dichteschwankungen, die auch die Folge der Quantenfluktuationen waren, führten zu Gravitationsinstabilitä-

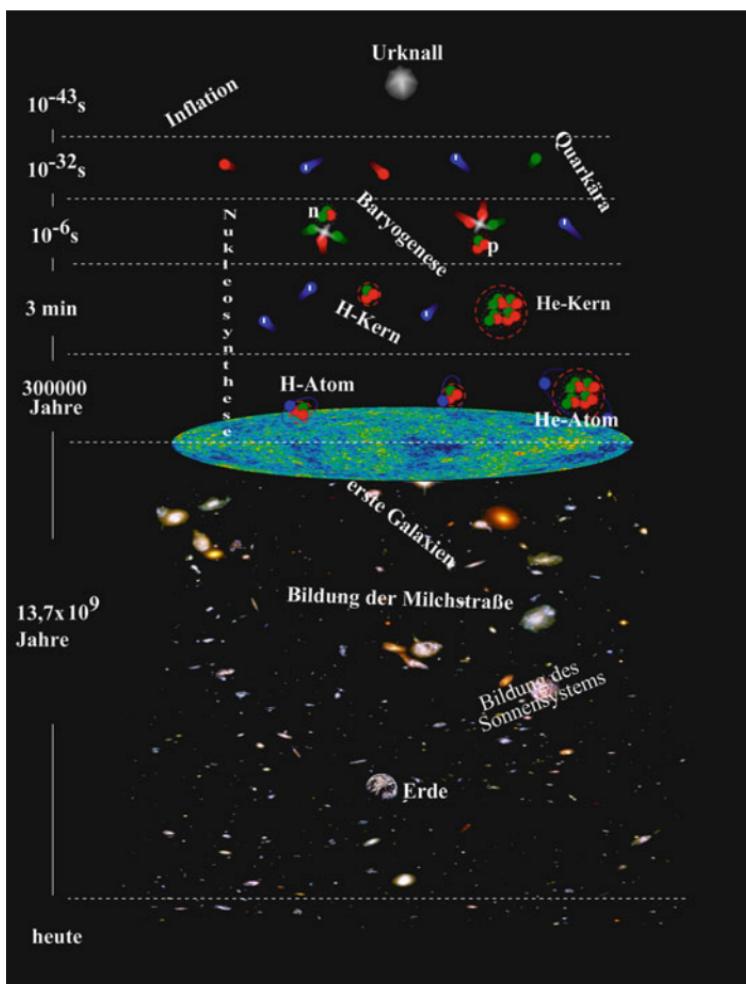


Abb. 6.5 Urknallmodell

ten, diese weiter zu der Entstehung der Galaxien. Die Modelle der Entstehung der Galaxien deuten darauf hin, dass nicht nur die Gravitation der hadronischen Materie, sondern auch die der dunklen Materie an der Entstehung der Galaxien beteiligt war.

Vor etwa 5 Milliarden Jahren entstanden das Sonnensystem und die Erde.

Die Vorstellung von einem expandierenden Universum ermöglicht es, seine Geschichte fast bis zu seiner Geburt zu erforschen. Für die Physiker ist die Physik des Universums in der ersten Mikrosekunde nach dem Urknall von besonderem Interesse. In dieser Zeit ging das Universum durch mehrere Phasenübergänge und aus einem strukturlosen Zustand bekam es die heutige Struktur: Quarks, Leptonen und die vier Kräfte. Verstünde man die Entwicklung aus dem strukturlosen Zustand zu der heutigen Struktur des Universums, hätte man das, was man die [Weltformel](#) nennt, oder im Englischen „[Theory of Everything](#)“ heißt [GK15].

7

Epilog

Es spielt keine Rolle, wie schön deine Theorie ist, es ist egal, wie intelligent du bist. Wenn sie nicht mit dem Experiment übereinstimmt, ist sie falsch.

Richard Feynman

Im Altertum war die Naturforschung auf die Beobachtung beschränkt. Die Alexandriner haben die Erde und das Sonnensystem sehr gut vermessen. Als Längenmaßstab haben sie die Länge ihrer Stadien benutzt. Die Mathematik, mit der sie ihre Messungen ausgewertet haben, war die von Griechen entwickelte Geometrie. Für die Dynamik des Geschehens gab es keine geeigneten Uhren. Die Zeiteinheit war die von der Jahreszeit abhängige, veränderliche Tageslänge.

Erst die erste moderne Uhr, das von Galilei erfundene Sekundenpendel, ermöglichte die Vermessung des freien Falls. Die zwei Resultate dieser Messungen, die gleichmäßig beschleunigte Bewegung unter der Wirkung einer Kraft und die Gleichheit der schweren und der trügen Masse sind die Grundlagen der Newton'schen und der Einstein'schen Gravitationstheorien.

Die Entdeckung der elektrischen Spannungsquellen und des elektrischen Stroms ermöglichen Faraday mit wenigen eleganten Experimenten den Zusammenhang zwischen den elektrischen und magnetischen Phänomenen zu zeigen. Maxwell hat die Faraday'schen Experimente in eine vorbildlich schöne Theorie gefasst.

Mit der Streuung von Alphateilchen an Atomen entsteht das moderne Bild des Atoms mit dem schweren Kern in der Mitte, umgeben von einer Elektronenhülle. Die Zerlegung des Lichts nach Wellenlängen und das Spielen mit der Gasentladung unter hohen Spannungen lieferten die notwendigen Daten, auf denen die atomare Struktur und die zugehörige Quantenmechanik aufgebaut wurden.

Auf einer Fotoplatte aufbewahrtes Uranerz, das die Platte schwärzte, war die erste Beobachtung der Radioaktivität. Der radioaktive Zerfall und die Kernreaktionen an den ersten Teilchenbeschleunigern haben der Astronomie einen neuen Impuls gegeben. Die Kernreaktionen liefern den Sternen die Lebensenergie und produzieren die Elemente, aus denen die Erde und wir sind.

Die Energieerhaltung in der Himmelsmechanik war seit Newton bekannt, jedoch unter dem Namen „Goldene Regel“. Eine allgemeine Energieerhaltung kam erst mit der Erkenntnis der Zusammenhänge zwischen den mechanischen, chemischen, elektrischen und thermischen Phänomenen zustande. Die Energieerhaltung wurde zum Heiligtum der Physik erhoben, das sogar die Kosmologen zu respektieren versuchen.

Mit der Entdeckung der Atome und der Quantenmechanik hat sich die Forschung in der Physik weitgehend verzweigt. In den meisten Zweigen untersucht man das Ver-

halten unserer terrestrischen Materie, die durchaus zu sehr fantasievollen Phänomenen fähig ist. Diese Forschung läuft wie üblich ab. Man überlegt sich etwas, dann misst man es und interpretiert die Messung innerhalb eines Modells oder einer Theorie. Man sieht keine Grenzen der Erforschung des Reichtums der physikalischen Phänomene. Anders liegt der Fall in der Teilchenphysik und der mit ihr liierten Kosmologie.

Die Jagd nach den ultimativen Elementarteilchen wurde durch die technologische Entwicklung, sowohl dem Bau der Beschleuniger wie auch der Teilchendetektoren, ermöglicht.

Mit immer größeren Teleskopen ist die Sicht immer tiefer in das Universum ermöglicht worden. Die bedeutendste Entdeckung mit den neuen Teleskopen war die genaue Vermessung der Expansion des Universums. Und das brachte die Kosmologie und die Teilchenphysik zusammen. Das frühe Universum musste durch die Phasen mit hohen Temperaturen und hohen Dichten gegangen sein. Und die Physik bei hohen Dichten und Temperaturen kann man mit hohen Teilchenenergien im Labor untersuchen. Glaubt man dem Standardmodell des Urknalls, dann verfolgt man die Physik des Universums in die Zeit von einem hundertmillionsten Teil der ersten Sekunde nach dem Urknall. Klingt ausgesprochen gut, so kurze Zeiten entziehen sich aber unseren Vorstellungen.

Aber die Ereignisse, die uns interessieren, finden bei noch wesentlich höheren Energien statt als jene, die bis jetzt erreicht worden sind. Und wesentlich höhere Energien erreichen wir im Labor nicht. Anderseits, ein so gewaltiges Ereignis wie der Urknall muss ausreichend Spuren hinterlassen haben, um das Ereignis reproduzieren zu können.

Die Erfahrung mit der kosmischen Hintergrundstrahlung ist sehr stimulierend. Die Analyse der kosmischen Hintergrundstrahlung zeigt, wie reich an Informationen die Beobachtungen des jungen Universums sind. Und die Beobachtungen werden immer besser, sowohl mit den terrestrischen wie auch mit den Observatorien auf Satelliten. Mit etwas Glück findet man doch noch neue Spuren des Urknalls.

Es gibt fünfmal mehr dunkle Materie als die von uns bekannte Materie in unserem Universum. Glaubt man an das Urknallmodell, dann müsste sich die dunkle Materie sehr früh von unserer getrennt haben. Die Suche nach der dunklen Materie hat sich als sehr schwierig erwiesen. Sie stellt zurzeit die größte Herausforderung für die Experimentalphysik dar.

In der ersten Phase des Urknalls, als der Gesamtkosmos noch ein Quantensystem war, musste auch die Gravitation den Quantenregeln gehorchen. Ob man die Quantengravitation im Labor untersuchen können wird, ist zweifelhaft. Aber die schwarzen Löcher sind Quantensysteme der Gravitation, und die gibt es in ausreichender Anzahl im Universum. Hoffen wir auf die erforderlichen Experimentalisten, die sich an die Erforschung der Quantengravitation mit den schwarzen Löchern wagen.

Mit der Entdeckung der atomaren Struktur wurde es klar, dass alle chemischen und biochemischen Eigenschaften der uns umgebenden Welt eng mit der Struktur der Atome verbunden sind. Die Massen der Nukleonen und der Elektronen einerseits und die Stärke der elektrischen und magnetischen Kräfte zwischen ihnen anderseits bestimmen die Eigenschaften der Atome. Diese enthalten Zahlenparameter, die aus dem Experiment gewonnen werden. Nur genau die-

se führen erst zu der Fähigkeit chemischer Bindung und damit zu den komplexen Strukturen, die wir Menschen sind. Diese Parameter der Atome müssen also sehr fein eingestellt werden, um das komplexe Leben, also uns Menschen, zu ermöglichen. Die große Frage ist nur: Wie werden diese Parameter eingestellt?

Aber es reicht nicht nur die kalten Atome zu ermöglichen. Wir müssen auch Wärme, also Bewegungsenergie dieser Bausteine, die sich in der Temperatur der komplexen Systeme manifestiert, hinzufügen, damit chemische Reaktionen stattfinden können. Die Temperatur wird durch mannigfache Einflüsse, Sonneneinstrahlung, molekulare Zusammensetzung der Atmosphäre der Erde, die Existenz von Wasser, Absorption der Sonnenenergie durch Materie und vieles mehr bestimmt. Alle diese Eigenschaften unserer Umwelt hängen an den Atomen und damit den physikalischen Gesetzen mit ihren Parametern. Am schlendsten wird uns bewusst in welchem engen Bereich der Parameter menschliches Leben erst möglich ist, wenn wir uns erinnern, dass unsere Biochemie nur in dem sehr engen Temperaturbereich von 37 plus 7 und minus 10 Grad funktioniert.

Diese und ähnliche Überlegungen führten in den siebziger Jahren zu der Formulierung des sogenannten anthropischen Prinzips. Es gibt mehrere Versionen dieses Prinzips, die alle einen tautologischen Charakter haben. In seiner starken Form sagt es: „Das Universum (und deswegen die fundamentalen Parameter, von welchen es abhängt) muss so sein, dass es die Entstehung von Beobachtern in manchen Phasen seiner Entwicklung erlaubt“. Dennoch ist das Prinzip nützlich um uns bewusst zu machen, dass wir nicht

nur notwendig sind um uns das – menschliche – Bild von der Welt zu machen, sondern dass wir auch gerade aus den Bausteinen dieser Welt bestehen. Wir werden durch unsere Vorstellungen der uns umgebenden Welt auf uns selbst zurückgeworfen. Man nennt das „selbst-reflektiv“ und die Mathematik hat gezeigt, dass solche Aussagen „unentscheidbar“ sind. Wir stoßen also mit dem anthropischen Prinzip an eine Erkenntnisgrenze des menschlichen Geistes.

Wo die Grenze ist, wissen wir nicht wirklich, aber es gibt sie. Bei der erfolgreichen Rekonstruktion der Geschichte des Universums,sind wir auf zwei physikalische Gesetze (Theorien) gestossen, die Quantenmechanik und die allgemeine Relativitätstheorie, mit der wir fast die ganze Entwicklung des Universums rekonstruieren können. Das hieraus konstruierte Modell unseres Universums wird *Standard-Modell* von den Teilchenphysikern und *Konkordanz-Modell* von den Astrophysikern genannt. Es bleiben aber die vielen Parameter in diesen Modellen, die wir nicht auf Elementares zurückführen können. Dazu gehören die Massen der elementaren Teilchen, wie der Quarks und Elektronen, die Stärke der elementaren Kräfte und vieles mehr. Wenn wir eine Theorie hätten, die auch noch das erklären könnte, dann hätten wir eine *Theory of Everything* (ToE). Die jüngst entdeckten Higgs-Teilchen gehen schon ein Stück in diese Richtung. Sie werden als Ursache für die Erzeugung der Massen der elementaren Teilchen interpretiert, aber die vielen verschiedenen Massen dieser Teilchen können sie noch nicht erklären.

Wir erhoffen, dass in einer solchen Theorie alles bestimmt wird und wir keine zusätzliche Information brauchen um die Welt zu konstruieren, Heisenbergs Konzept

der *Weltformel*. Es erscheint plausibel, dass die heute experimentell wohl geprüften Theorien in der ToE enthalten sein müssen. Ein Hinweis was wir machen müssen um die ToE zu konstruieren hat schon Max Planck im Jahre 1899 gegeben. Man kann aus dem fundamentalen Parameter der Quantenmechanik, Plancks Konstante \hbar , der Gravitationskonstante, die die Stärke der Gravitation angibt, und der endlichen Lichtgeschwindigkeit eine Länge ausrechnen die $l_{\text{Planck}} = 1,6 \cdot 10^{-33}$ cm ist. Wie wir heute wissen ist das die kleinste Länge, die wir aus den physikalischen Parametern bilden können. Dass es so eine kleinste Länge gibt, ist sehr willkommen, denn in der Physik hat sich immer gezeigt, dass man etwas Neues findet, wenn Parameter nicht Null oder Unendlich sind. Beispiel sind das Plancksche Wirkungsquantum $\hbar \neq 0$ und die Lichtgeschwindigkeit $c \neq \infty$. Mit den kleinsten Längen, die sich wie *Strings*, kurze gespannte Saiten, verhalten, kann man eine Theorie formulieren, die viele Eigenschaften hat, die man für eine ToE braucht. In dieser *String-Theory* genannten Theorie sind die Strings vieldimensional, die in kleine nicht beobachtbaren Bereichen aufgerollt sind und in unserer vierdimensionalen Welt, drei Raum- und eine Zeitkoordinate, residieren. Diese Vorstellung ist noch nicht allgemein anerkannt, weil sie bisher keine direkte experimentelle Überprüfung zulässt, aber sie hat eine Eigenschaft, die wir oben skizziert haben. Sie lässt viele, sehr viele Welten, ja sagenhafte 10^{1500} , eine 1 mit 1500 Nullen, Welten zu. Das ist gerade, die Voraussetzung um so viele Versuche zu haben, um das anthropische Prinzip zum Tragen bringen zu können. Diese vielen Welten sind die in der Einleitung

erwähnten *Multiverse*. Wir leben in dem, in dem wir möglich sind.

Das Multiverse ist eine der möglichen Ideen um über das Standard-Modell hinaus zu kommen. In der Zukunft mag es noch andere geben, aber diese Ideen zeigen, dass wir noch nicht am Ende sind. Unser Warum-Trieb die Welt zu verstehen führt uns zu immer vielfältigeren Ideen, die aber Vorhersagen aus einfachen Annahmen erlauben und eine innere Konsistenz und Überzeugungskraft haben, die wegen ihrer Ästhetik verblüffen.

Glossar

Alphateilchen Positiv geladene Heliumkerne entstehen beim Alphazerfall

Allgemeine Relativitätstheorie Einsteins Gravitationstheorie. Sie interpretiert die Gravitation als eine Krümmung der Raumzeit und beinhaltet als Spezialfall die spezielle Relativitätstheorie

Bahndrehimpuls Siehe Drehimpuls

Baryon Hadron, das auch drei Quarks besteht

Betazerfall Kerne mit zu vielen Protonen oder Neutronen zerfallen im Betazerfall, wobei Neutronen in Protonen und umgekehrt umgewandelt werden. Dabei werden Neutrinos und Elektronen bzw. Positronen erzeugt, was als Betastrahlung bezeichnet wird

Beugung Beschreibt die Ablenkung von Wellen durch ein Hindernis

Bindungsenergie Der Energiebetrag, um welchen sich ein gebundener Zustand von den einzelnen ungebundenen Bestandteilen unterscheidet

Boson Teilchen mit ganzzahligem Spin

Determinismus Alle Ereignisse sind durch bekannte Voraussetzungen bis in alle Zukunft und Vergangenheit vorhersehbar bzw. rekonstruierbar

Differentialrechnung Von Leibniz und Newton entwickeltes Teilgebiet der Mathematik. Beschreibt die Steigung von Funktionen

Drehimpuls Das Produkt aus Impuls und Abstand zum Ursprung. Der Gesamtdrehimpuls eines abgeschlossenen Systems ist erhalten (Drehimpulserhaltung)

Edelgas Atome mit abgeschlossener Schale, sodass diese chemisch besonders stabil sind und nicht reagieren. Zu den Edelgasen zählen Helium, Neon, Argon, Krypton, Xenon und Radon

elektromagnetische Welle Träger des Lichts. Besteht aus elektrischen und magnetischen Wechselfeldern, wie es von den Maxwell'schen Gleichungen beschrieben wird

elektromagnetisches Spektrum Gesamtheit aller elektromagnetischen Wellen verschiedener Wellenlängen

Elektron Negativ geladenes Elementarteilchen. Bildet die Elektronenhülle von Atomen

Elektronenvolt Energieeinheit der Atomphysik. Ein eV ist die kinetische Energie, die ein Elektron besitzt, welches mit einer Spannung von 1 Volt beschleunigt wird

Entropie Kombinatorisches Maß für die Unordnung eines Systems. Wichtige Größe der Thermodynamik und der statistischen Physik

Erdbeschleunigung Die Beschleunigung, mit der ein frei fallender Körper Richtung Erde beschleunigt wird

Fermion Teilchen mit halbzahligem Spin. Für Fermionen gilt das Pauli-Prinzip

Gammastrahlung Hochenergetische elektromagnetische Wellen. Das Licht, welches im Atomkern entsteht, wenn er sich in einen energetisch günstigeren Zustand umwandelt

geozentrisch Beschreibt ein Weltbild, in dem die Erde den Mittelpunkt des Universums bildet

Gluon Austauschteilchen der starken Wechselwirkung

Gravitationswellen Werden von der allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagt. Wellen, welche sich in der Raumzeit mit Lichtgeschwindigkeit fortbewegen und diese dehnen und stauchen

Hadron Teilchen, die von starken Wechselwirkung zusammengehalten werden

Halbwertszeit Die Zeit, die verstreicht, bis die Hälfte eines radioaktiven Präparats zerfallen ist

Heisenberg'sches Unschärfeprinzip Besagt, dass Ort und Impuls eines Teilchens niemals gleichzeitig exakt bestimmt werden können. Diese Eigenschaft macht sich in der uns bekannten Umwelt nicht bemerkbar, dafür aber umso mehr in der Quantenmechanik

heliozentrisch Beschreibt ein Weltbild, in dem alle Planeten um die Sonne kreisen

Helium Nach Wasserstoff das zweitleichteste Element. Seine Atomhülle enthält zwei Elektronen. Der aus zwei Protonen bestehende Heliumkern entsteht beispielsweise durch Fusion zweier Wasserstoffkerne im Sterninneren

Impuls In der Mechanik das Produkt aus Geschwindigkeit und Masse eines Teilchens. Im Falle von Photonen hängt der Impuls von der Wellenlänge des Lichts ab. Der Gesamtimpuls in einem abgeschlossenen System ist konstant (Impulserhaltung)

Interferenz Additive Überlagerung der Amplituden mehrerer Wellen. Je nach den Auslenkungen der einzelnen Wellen können sie sich im Extremfall gegenseitig auslöschen oder verstärken

Interferometer Präzise Messinstrumente, welche auf der Überlagerung kohärenter Wellen beruhen. Dabei entstehen Interferenzmuster, aus denen Rückschlüsse auf die Messgrößen gezogen werden können

Isotop Kerne mit unterschiedlicher Anzahl von Neutronen, aber gleicher Anzahl von Protonen bilden die Isotope eines Elements. Chemisch verhalten sich verschiedene Isotope nahezu gleich

Kepler'sche Gesetze Drei empirisch gefundene Gesetze, welche die Ellipsenbahnen von Himmelskörpern um die Sonne beschreiben. Können durch die Newton'schen Gesetze exakt hergeleitet werden

Kernfusion Die Verschmelzung zweier Atomkerne zu einem neuen, schwereren Kern. Ist der erzeugte Kern leichter als Eisen, wird dabei Energie frei

Kernladungszahl Gibt die positive Gesamtladung eines Atomkerns an. Entspricht der Anzahl an Protonen im Atomkern

Lepton Klasse von Elementarteilchen, zu denen das Elektron, das Myon, das Tauon und deren Neutrinos zählen. Anders als die Quarks unterliegen sie nicht der starken Wechselwirkung

Lichtjahr Strecke, die Licht in einem Jahr zurücklegt. Das entspricht etwa 9.5 Billionen Kilometern

Lorentzkontraktion Effekt der speziellen Relativitätstheorie. Relativ zum Beobachter bewegte Objekte werden in Bewegungsrichtung gestaucht

Massenzahl Gibt die Anzahl an Protonen und Neutronen in einem Atomkern an. Weil Protonen und Neutronen etwa gleiche Massen besitzen, entspricht die Massenzahl auch in guter Näherung der Masse des Atomkerns in der Einheit der Protonenmasse

Meson Hadron, dass aus einem Quark-Antiquark-Paar gebildet wird

Milchstraße Die (Spiral-)Galaxie, zu der unser Sonnensystem gehört

Multiverse Ein hypothetischer Satz von möglichen Universen, die als Lösungen der Theorien, die als „Theory of Everything“ vorgeschlagen wurden, existieren könnten

Myon Negativ geladenes Elementarteilchen. Zerfällt in wenigen Mikrosekunden in ein Elektron und ein Antineutrino

Neutrino Ungeladenes Elementarteilchen mit sehr geringer Masse. Gehört zur Klasse der Fermionen

Neutron Ungeladener Bestandteil des Atomkerns. Besteht aus einem Up- und zwei Down-Quarks

Newton'sche Axiome Die drei von Newton gefundenen Gesetze, welche die Bewegung eines beliebigen Körpers beschreiben

Nukleon Bausteine der Atomkerne. Dazu zählen Protonen und Neutronen

Pauli-Prinzip Besagt, dass keine zwei Teilchen denselben Quantenzustand belegen können. Gilt nur für Teilchen mit halbzahligem Spin

Perpetuum mobile Gerät, dass nach einmaligem Anwerfen ohne weitere Energiezufuhr ewig weiter läuft

Photon Masseloses Teilchen, das sich mit Lichtgeschwindigkeit fortbewegt. Vermittelt die elektromagnetische Kraft

Pion Aus zwei Quarks zusammengesetztes Teilchen, das damit zur Klasse der Mesonen gehört. Vermittelt die Kernkraft

Planetoid Asteroid. Himmelskörper, der ebenso wie ein Planet die Sonne umrundet, aber viel kleiner ist

Positron Antiteilchen des Elektrons

Quark Elementarteilchen, aus denen Hadronen zusammengesetzt sind

Radiowellen Langwellige elektromagnetische Wellen mit Wellenlängen im Bereich von zehn Zentimetern bis etwa hundert Kilometern

Raumwinkel Dreidimensionales Gegenstück des herkömmlichen Winkels. Der volle Raumwinkel beträgt 4π

Raumzeit Das formale Gleichsetzen der drei Raumdimensionen mit der Zeitdimension. Konzept der Relativitätstheorie

Spin Der Eigendrehimpuls eines Teilchens. Der Spin hat kein klassisches Analogon, ist also ein rein quantenmechanisches Phänomen

String-Theorie Eine noch nicht experimentell überprüfte Theorie, die alle bekannten Wechselwirkungen vereinheitlicht. Die punktförmigen Elementarteilchen werden durch vieldimensionale Strings (Saiten) ersetzt

Theory of Everything Beschreibt die Entwicklung von dem strukturlosen Universum zu der heutigen Struktur mit allen Teilchen und Wechselwirkungen

Treibhauseffekt Absorption der langwelligen Wärmestrahlung der Erde durch Treibhausgase in der Atmosphäre, wodurch sich die Erde erwärmt. Wichtige Treibhausgase sind Wasserdampf und Kohlendioxid

Vektor (Physikalische) Größe mit einem Betrag und einer Richtung. Beispiele sind Geschwindigkeit, Ort, Impuls und Beschleunigung

Wasserstoffatom Das einfachste Atom, bestehend aus einem Proton und einem Elektron. Mit Hilfe der Schrödinger-Gleichung können die physikalischen Eigenschaften des Wasserstoffatoms berechnet werden

Wechselwirkung Die Kraft, die zwei Körper oder Teilchen aufeinander ausüben. Die fundamentalen Wechselwirkungen sind die starke, schwache, elektromagnetische und gravitative Wechselwirkung

Weltformel Heisenberg hat den Brief 1958 eingeführt. Heute wird dafür meistens nur das englische Wort „Theory of Everything“ benutzt

Zeitdilatation Effekt der speziellen Relativitätstheorie. Die Zeit in Objekten, die sich relativ zum Beobachter bewegen, verläuft langsamer

Literatur

- [Ada98] Adam Riess et al. *Astron. J.*, 116(1009), 1998.
- [Daw06] Richard Dawkins. *The Blind Watchmaker*. W.W. Norton & Company, Inc., 2006.
- [GK15] B. Greene and H. Kober. *Das elegante Universum: Superstrings, verborgene Dimensionen und die Suche nach der Weltformel*. Siedler Verlag, 2015.
- [GM80] M. Gell-Mann. *The Nature of Matter, Wolfson College Lectures*. Carendon Press, Oxford, 1980.
- [Hon10] Josef Honerkamp. *Die Entdeckung des Unvorstellbaren*. Springer, Heidelberg, 2010.
- [Lel10] Dieter Lelgemann. *Die Erfindung der Messkunst*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 2010.
- [Sau99] Saul Perlmutter et. al. *Astrophys. J.*, 517(565), 1999.
- [Seg90a] Emilio Segre. *Die großen Physiker und ihre Entdeckungen. Bd. 1 Von den fallenden Körpern zu den elektromagnetischen Wellen*. Verlag Piper, 1990.
- [Seg90b] Emilio Segre. *Die großen Physiker und ihre Entdeckungen. Bd. 2 Von den Röntgenstrahlen zu den Quarks*. Verlag Piper, 1990.
- [TM15] M. Tegmark and H. Mania. *Unser mathematisches Universum: Auf der Suche nach dem Wesen der Wirklichkeit*. Ullstein eBooks, 2015.

- [uWB06] Ed. H. Klahr und W. Brander. *Planet Formation, Theory, Observation and Experiments.* Cambridge University Press, 2006.
- [VC09] Roberto Vergara Caffarelli. *Galileo Galilei and Motion.* Springer, Heidelberg, 2009.

Namens- und Sachverzeichnis

A

- Aktionsprinzip 13
anaerob 162
Anderson, Philip Warren 206
Aristarchos von Samos 5, 6
Aristoteles 9
Ashby, William Ross 174
Aston, Francis William 126
Asymptotische Freiheit 200
Atome 71
Axiome, Newtonsche 13

B

- Balmer, Johann Jakob 88
Becquerel, Antoine Henri 140
Bethe, Hans Albrecht 130
Bohr, Niels Henrik David 89
Bohradius 90
Boltzmann, Ludwig 72, 168
Bose, Satyendranath 147
Boson
W-Boson 147

- Brahe, Tycho 6
Bremsstrahlung 78
Brout, Robert 207
Bruno, Giordano 8
Burbidge, Geoffrey 139
Burbidge, Margeret 139

C

- Carnot, Nicolas Le'onard Sadi 164
Carnot-Zyklus 165
Chadwick, James 123
Charakteristische Röntgenstrahlung 79
Clausius, Rudolf 167
Confinement 200
Crookes, William 77, 79

D

- Darwin, Charles Robert 122, 163
Davisson, Clinton Joseph 93
De Broglie, Louis-Victor 92

- De Coulomb, Charles
 Augustin 110
- Debye, Peter 95
- Demokrit 72
- Determinismus 36
 deterministisches
 Chaos 36
- Laplace'scher Dämon 37
- Dicke, Robert Henry 224
- Diracgleichung 184
- Doppelspalt 103
- Dunkle Energie 65
- Dunkle Materie 65
- E**
- Eddington, Sir Arthur
 Stanley 130
- Einzelspalt 103
- Elektron 75
- Energie 157
- Englert, François 207
- Eratosthenes von Kyrene 5
- Erdanziehung 9
- Erde 157
- Exoplaneten 178
- F**
- Faraday, Michael 39
- Fermat, Pierre de 21
- Fermi, Enrico 146
- Feyman, Richard
 Phillip 112
- Fowler, William 139
- Friedman, J. I. 194
- Friedmann, Alexander
 Alexandrowitsch 222
- Friedmann, Alexander
 Alexandrowitsch 219
- Frisch, Otto 149
- Fundamentalkräfte 202
- G**
- Galilei, Galileo 6
- Gamow, George 142, 222
- Geiger, Johannes
 Wilhelm 85
- Gell-Mann, Murray 191
- Gewichtskraft 13
- Glashow, Sheldon 203
- Global Positioning System
 (GPS) 58
- Gluon 147
- Graaff, Robert J. 131
- Gravitation 1
 Drittes Kepler'sches
 Gesetz 27
- Erstes Kepler'sches
 Gesetz 22
- Milchstraße 30
- Schwarzes Loch 32, 63
- Sonnensystem 22
- Zweites Kepler'sches
 Gesetz 23
- Gross, David 200
- Guralik, Gerald 207
- H**
- Hagen, Carl Richard 207

- Hahn, Otto 149
Heisenberg, Werner 106
Helmholtz, Hermann von 122
Hertz, Heinrich 177
Higgs, Peter 207
Higgs-Mechanismus 205
Hilbert, David 56
Hittorf, Johann 79
Hooke, Robert 21
Hoyle, Fred 135, 139
Hubble, Edwin 214
Hulse, Russell Alan 60
Huygens, Christian 101
- I
- Inflation 227
Interferometer 44
- J
- Joliot-Curie, Irene 148
- K
- Kelvin, Lord, William Thomson 122
Kepler, Johannes 6
Keplerteleskop 178
Kerne 121
Kibble, Tom 207
Konkordanz-Modell 242
Konstante
 Hubble'sche 220
Kopernikus, Nikolaus 6
- L
- Längenkontraktion 49
Laplace, Pierre-Simon 37
Laplace'sche Dämon 38
Leibniz, Gottfried Wilhelm 20
Lemaître, George 219
Lenard, Philipp 77, 79
lokale Blase 39
Lorentz-Transformation 45
- M
- Mach, Ernst 45, 72
Marsden, Ernest 85
Massenspektroskopie 125
Max von Laue 77
Maxwell, James Clark 40
Mayer, Julius Robert von 165
Mechanische Arbeit, kinetische- und potentielle Energie 27
Meitner, Lise 149
Mendeleev, Dimitri 72
Mesonen 124
Michelson, Albert Abraham 42
Morley, Edward 43
Multiverse 244
- N
- Newton, Isaac 12
Noddack, Ida 148

- P**
- Paradoxon
 - Olbers 213
 - Pauli, Wolfgang 144
 - Pauli-Prinzip 98
 - Penzias, Arno 223
 - Periodensystem der Elemente 72
 - Perpetuum mobile
 - erster Art 166
 - zweiter Art 166
 - Photon
 - virtuelles 111
 - Pionen 124
 - Planck, Max 54, 82
 - Politzer, David 200
 - Positronium 54
- Q**
- Quantendämon 38
- R**
- Radioaktivität 140
 - Ramsay, William 149
 - Raumzeit 39, 49
 - Reaktionsprinzip 15
 - Relativitätstheorie
 - allgemeine 56
 - spezielle 46
 - reversibel 158
 - Röntgen, Wilhelm 76
 - Rosinenkuchenmodell 80
 - Roter Riese 137
 - Russel Bertrand 9
- R**
- Rutherford, Ernest 85
 - Rydberg, Johannes 88
- S**
- Salam, Abdus 203
 - Satellit 33
 - Savić, Pavel 148
 - Schrödinger, Erwin 94
 - Schwarzkörperstrahlung 81
 - Schwarzschild, Karl 63
 - schwere Masse 18
 - Segre, Emilio 148
 - Selbstorganisation 174
 - Sommerfeld, Arnold Johannes Wilhelm 91
 - Speicherring 52
 - Standard-Modell 242
 - Statistische Mechanik 73
 - Stefan, Josef 81
 - Stefan-Boltzmann Gesetz 81
 - Störungsrechnung 37
 - Strassmann, Fritz 149
 - String-Theory 243
 - Supernova 138
- T**
- Tauon 185
 - Taylor, Joseph 60
 - Taylor, R. E. 194
 - Thales von Milet 3
 - Theory of Everything 242
 - Thomson, George Paget 80, 93

- Thomson, Joseph John 79
Träge Masse 13, 18
Trägheitsprinzip 13
- U**
- Unschärferelation 104
Urknall 213
- V**
- Vakuumpolarisation 200
Vinci, Leonardo da 166
- W**
- Wallace, Alfred Russel 163
Wasserstoffatom 88
Wasserstoffbrückenbindung 174
- Weiberg, Steven 203
Weltformel 243
Wilczek, Frank 200
Wilson, Robert
Woodrow 223
- Wirkungsquantum,
Planck'sches 55
- Wirkungsquerschnitt 130
- Y**
- Yukawa, Hideki 123
- Z**
- Zeitdilatation 48
Zweig, George 191
Zwicky, Fritz 65