

Quantenphysik



Spektrum
AKADEMISCHER VERLAG

Sachbuch

Joanne Baker

50 schlüssel
ideen

Joanne Baker

50 Schlüsselideen

Quantenphysik



Aus dem Englischen übersetzt von Bernhard Gerl



Springer Spektrum

Inhalt

Einleitung 3

VON LICHT ...

- 01 Energieerhaltung 4
- 02 Das Planck'sche Strahlungsgesetz 8
- 03 Elektromagnetismus 12
- 04 Doppelspaltexperiment von Young 16
- 05 Die Lichtgeschwindigkeit 20
- 06 Der photoelektrische Effekt 24

... UND ELEKTRONEN

- 07 Welle-Teilchen-Dualität 28
- 08 Rutherfords Atommodell 32
- 09 Quantensprünge 36
- 10 Fraunhofer-Linien 40
- 11 Zeeman-Effekt 44
- 12 Das Pauli-Prinzip 48

QUANTENMECHANIK

- 13 Matrizenmechanik 52
- 14 Die Schrödinger-Gleichung 56
- 15 Die Heisenberg'sche Unschärferelation 60
- 16 Die Kopenhagener Deutung der Quantentheorie 64
- 17 Schrödingers Katze 68
- 18 Das EPR-Paradoxon 72
- 19 Der Tunneleffekt 76
- 20 Kernspaltung 80
- 21 Antimaterie 84

QUANTENFELDER

- 22 Quantenfeldtheorie 88
- 23 Die Lamb-Verschiebung 92

- 24 Quantenelektrodynamik 96
- 25 Der Betazerfall 100
- 26 Schwache Wechselwirkung 104
- 27 Quarks 108
- 28 Tiefinelastische Streuung 112
- 29 Quantenchromodynamik 116
- 30 Das Standardmodell 120

QUANTENKOSMOS

- 31 Symmetriebrechung 124
- 32 Das Higgs-Boson 128
- 33 Supersymmetrie 132
- 34 Quantengravitation 136
- 35 Hawking-Strahlung 140
- 36 Quantenkosmologie 144
- 37 Stringtheorie 148

IRREALE QUANTENWELT

- 38 Die Viele-Welten-Hypothese 152
- 39 Verborgene Variablen 156
- 40 Die Bell'sche Ungleichung 160
- 41 Aspect-Experimente 164
- 42 Quantenradierer 168

QUANTENANWENDUNGEN

- 43 Dekohärenz 172
- 44 Qubits 176
- 45 Quantenkryptografie 180
- 46 Quantenpunkte 184
- 47 Supraleitung 188
- 48 Bose-Einstein-Kondensate 192
- 49 Quantenbiologie 196
- 50 Quantenbewusstsein 200

- Glossar 204
- Index 206

Einleitung

In der Geschichte der Quantenphysik gibt es so viele unerwartete Wendungen, wie es in ihr seltsame Phänomene gibt. Viele einfallsreiche Charaktere – von Albert Einstein bis Richard Feynman – haben sich im Laufe der letzten hundert Jahre Gedanken über das Innere von Atomen und die Natur der in ihnen herrschenden Kräfte gemacht. Doch die Physik hat sogar ihre kühnsten Vorstellungen übertroffen.

Die Quantenwelt beschäftigt sich mit der Physik des sehr Kleinen. Doch die subatomaren Vorgänge laufen nur selten so ab, wie man es erwarten würde, ja, sie sind oft wirklich rätselhaft. Elementarteilchen tauchen plötzlich aus dem Nichts auf und verschwinden wieder, und nicht einmal so vertraute Dinge wie das Licht kann man so richtig festmachen: In einer Situation verhält es sich wie Wellen, in einer anderen wie ein Strom aus einzelnen Teilchen.

Je mehr wir verstanden haben, desto seltsamer wurde das Universum der Quanten. Information kann zwischen Teilchen „verschränkt“ sein, es ist ungefähr so, als ob alles durch unsichtbare Fäden verbunden sei. So können weitentfernte Quantenzustände ohne Zeitverzögerungen korrespondieren, was eigentlich nicht möglich sein sollte, da nichts schneller als das Licht sein kann.

Die Quantenphysik ist also alles andere als intuitiv zu verstehen – die subatomare Welt verhält sich ganz anders als die klassische, die wir gewohnt sind. Am besten versteht man sie noch, wenn man nachvollzieht, wie diese Wissenschaft entstanden ist, und sich selbst den Kopf über die Probleme zerbricht, mit denen auch die Pioniere der Quantenphysik zu kämpfen hatten.

Die ersten Kapitel fassen deshalb auch zusammen, wie das Gebiet Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts entstanden ist, als die Physiker damit begonnen hatten, das Atom zu zerlegen und die Natur des Lichts zu begreifen. Max Planck hat den Begriff „Quant“ eingeführt. Er behauptete, dass Energie nur in kleinen Paketen, nicht als Kontinuum mit Materie wechselwirken kann. Diese Idee wurde dann auf die Struktur des Atoms übertragen, wo Elektronen einen festen Kern auf Schalen umkreisen.

Aus diesen Arbeiten wuchs die Quantenmechanik mit all ihren Paradoxien. Als die Teilchenphysik immer mehr Erkenntnisse lieferte, entstanden Quantenfeldtheorien und das Standardmodell, um sie zu erklären. Am Ende wird sich dieses Buch mit einigen der Konsequenzen auf die Quantenkosmologie und das Konzept der Realität beschäftigen und die neuesten technologischen Entwicklungen zeigen, wie Quantenpunkte und Quantencomputer.

01 Energieerhaltung

Energie treibt Bewegungen und Veränderungen an. Sie ist eine Gestaltwandlerin, die viele Formen annehmen kann, angefangen bei der Hitze, die von brennendem Holz abgegeben wird, bis hin zur Fließgeschwindigkeit von Wasser, das immer schneller den Hügel hinabrauscht. Energie kann zwar von einer Art zur nächsten wechseln, aber niemals erzeugt oder vernichtet werden. Insgesamt bleibt sie immer erhalten.

Die Idee, dass die Energie der Grund für Veränderungen ist, hatten schon die alten Griechen – ἐνέργεια (*energeia*) ist die Möglichkeit oder Fähigkeit, etwas zu bewirken. Wir wissen heute zum Beispiel, dass man umso mehr Energie aufgewendet hat, je stärker und je weiter man ein Objekt geschoben hat, was sich in der einfachen Formel Kraft mal Weg zusammenfassen lässt. Trotzdem ist die Energie für Wissenschaftler immer noch ein nur schwer greifbares Konzept. Die Quantenphysik entstand unter anderem auch, weil Physiker die Natur der Energie genauer beschreiben und verstehen wollten.

Wenn wir einen Einkaufswagen vor uns herschieben, rollt er dahin, weil wir ihm Energie zugeführt haben. Er wird also von den Chemikalien angetrieben, die unser Körper verbrannt hat, sodass unsere Muskeln Kraft aufbringen können. Auch wenn wir einen Ball werfen, verwandeln wir chemische Energie in Bewegungsenergie. Die Wärme der Sonne hat ihren Ursprung in Kernfusionsprozessen, bei denen Atomkerne verschmelzen, die in ihr zusammenstoßen, wobei Energie frei wird.

Energie hat viele Erscheinungsformen: von fliegenden Kanonenkugeln bis hin zu Blitzen in Gewittern. Aber ihr Ursprung kann immer auf eine andere Art zurückgeführt werden. Schießpulver verursacht die Bewegung einer Kanonenkugel. Kleine Moleküle, die sich in Wolken bewegen, trennen elektrische Ladungen, und die dadurch aufgestaute elektrische Spannung entlädt sich dann in einem riesigen Funken, dem Blitz. Immer wenn Energie ihre Form verändert, bewegt oder verändert sich Materie.

Zeitleiste

ca. 600 v. Chr.

Thales von Milet erkennt, dass Materie ihre Form ändern kann

1638 n. Chr.

Galilei bemerkt die Energieumwandlung in einem Pendel

1676

Leibniz nennt Energie *vis viva*

1807

Young führt den Begriff „Energie“ ein

Weil sie immer nur ihre Form ändert, wird Energie niemals erzeugt oder vernichtet. Sie bleibt erhalten: Der Gesamtbetrag der Energie im Universum oder in jedem vollständig abgeschlossenen System bleibt immer gleich.

Erhaltung Schon im antiken Griechenland erkannte Aristoteles, dass Energie scheinbar erhalten bleibt, doch er hatte keine Möglichkeiten, dies nachzuweisen. Die ersten Wissenschaftler (die sich damals Naturphilosophen nannten) benötigten Hunderte von Jahren, um die verschiedenen einzelnen Energieformen zu verstehen und miteinander in Beziehung zu setzen.

Anfang des 17. Jahrhunderts experimentierte Galileo Galilei mit einem Pendel. Er erkannte, dass es einen Zusammenhang gab zwischen der Geschwindigkeit, mit der sich das Pendel am tiefsten Punkt bewegt, und wie hoch es schwingt. Je weiter man das Pendel am Anfang auslenkte, desto größer war die Geschwindigkeit in der Mitte – und es kam auf der anderen Seite wieder genauso hoch. Während des gesamten Zyklus wird die Energie immer zwischen potenzieller (die mit der Höhe über dem Boden in Verbindung steht) und kinetischer Energie (Geschwindigkeit) ausgetauscht.

Im 17. Jahrhundert bezeichnete der Mathematiker Gottfried Leibniz die Energie als *vis viva* oder Lebenskraft. Erst der Physiker und Universalgelehrte Thomas Young führte Anfang des 19. Jahrhunderts den Begriff Energie in dem Sinne ein, den wir heute kennen. Was aber Energie genau ist, bleibt immer noch schwer fassbar.

Sie wirkt zwar auf riesige Körper wie Sterne oder sogar auf das gesamte Universum, doch im Wesentlichen handelt es sich um ein Phänomen, das sich auf kleinen Skalen abspielt. Chemische Energie entsteht, wenn sich im Laufe von Reaktionen die Struktur der Anordnung von Atomen und Molekülen ändert. Licht und andere Formen von elektromagnetischer Energie werden als Wellen übertragen, die mit Atomen wechselwirken. Wärme spiegelt die Bewegung von Molekülen wider und eine zusammengedrückte Stahlfeder hält elastische Energie in ihrer Struktur fest.

Energie ist eng mit der Natur von Materie selbst verbunden. 1905 entdeckte Albert Einstein, dass Masse und Energie äquivalent sind. Seine berühmte Formel $E = mc^2$ bringt zum Ausdruck, dass die Energie E , die durch die Vernich-

1850

Rudolf Clausius definiert die Entropie und den zweiten Hauptsatz

1860

Maxwell postuliert seinen Dämon

1901

Max Planck beschreibt Energiequanten

1905

Einstein zeigt die Äquivalenz von Masse und Energie

tung einer Masse m frei wird, gleich dem Produkt dieser Masse mal dem Quadrat der Lichtgeschwindigkeit c ist. Weil Licht sich im Vakuum mit 300.000 Kilometern pro Stunde ausbreitet, sind die mit der Energieumwandlung verbundenen Massen im Alltag unmessbar klein. Erst bei Kernspaltung und Kernfusion machen sie sich bemerkbar.

Weitere Gesetzmäßigkeiten Auch andere Eigenschaften, die mit der Energie in Verbindung stehen, sind Erhaltungsgrößen, etwa der Impuls, also das Produkt aus Masse und Geschwindigkeit. Er ist ein Maß dafür, wie schwer es ist, einen Körper abzubremesen, der sich bewegt. Ein vollbeladener rollender Einkaufswagen hat offensichtlich einen größeren Impuls als ein leerer, deshalb braucht man auch mehr Kraft, um ihn zum Stehen zu bringen. Der Impuls hat nicht nur einen Betrag, sondern auch eine Richtung, beide Aspekte bleiben erhalten. Beim Billardspielen kann man das gut beobachten – wenn eine Kugel, die sich bewegt, auf eine ruhende stößt, rollen danach beide weiter. Man kann zeigen, dass die Summe der Impulse der Kugeln nach dem Stoß (unter Berücksichtigung von Betrag und Richtung) genauso groß ist wie der Impuls der ersten Kugel.

Auch der Impuls sich drehender oder kreisender Objekte ist eine Erhaltungsgröße. Dieser Drehimpuls ist definiert als das Produkt des linearen Impulses eines Objekts, das um einen Punkt kreist, mit seinem Abstand zu dem Punkt. Das machen sich Eiskunstläufer bei Pirouetten zunutze: Wenn sie ihre Arme und Beine weit von sich strecken, drehen sie sich langsam, aber sie werden immer schneller, je enger sie ihre Gliedmaßen an sich ziehen.

Ein anderes Gesetz sagt, dass sich Wärme immer von heißen zu kalten Körpern ausbreitet. Das ist die Aussage des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik. Wärme ist ein Maß für die Bewegung von Atomen, das heißt, Atome in warmen Körpern zittern mehr und sind ungeordneter als in kalten. Die Physiker nennen das Maß für diese Unordnung bzw. die Zufälligkeit „Entropie“. Der zweite Hauptsatz bringt zum Ausdruck, dass die Entropie in einem geschlossenen System ohne äußere Einflüsse immer nur zunehmen kann.

Ach! Und wie funktioniert dann ein Kühlschrank? Die Antwort ist, dass dieser Wärme als Abfallprodukt erzeugt – Sie können das fühlen, wenn Sie Ihre Hand auf die Rückseite legen. Kühlschränke verletzen nicht den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik, sondern arbeiten damit; sie erzeugen eine höhere Entropie, indem sie die Luft um das Gerät herum aufwärmen. Wenn man das Innere und die Umgebung des Kühlschranks zusammennimmt, steigt die Entropie.

Viele Erfinder und Physiker haben versucht, einen Weg zu finden, den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik auszu-tricksen, doch keinem ist es gelungen. Es gab unzählige Entwürfe für Perpetuum mobiles: Da gab es Tassen, die sich selbst leerten und wieder auffüllten, und Räder, die ihre eigene Rotation antrieben, indem sie Gewichte entlang von Speichen fallen ließen. Aber wenn man genauer hinsah, gab es immer Lecks, durch die Energie verloren ging – etwa als Wärme oder Schall.

Der schottische Physiker James Clerk Maxwell hat in den 1860er-Jahren ein Gedankenexperiment ausgetüftelt, bei dem Wärme ohne Anstieg der Entropie erzeugt werden könnte – aber ohne externe Energiezufuhr konnte es bisher nicht gebaut werden. Maxwell stellte sich zwei mit Gas gefüllte Gefäße mit gleicher Temperatur vor, die eng beieinanderstanden und durch ein kleines Loch verbunden waren. Wenn eines der Gefäße erhitzt wird, bewegen sich die Teilchen darin schneller. Normalerweise würden einige davon durch das Loch in das andere Gefäß fliegen, sodass sich die Temperaturen allmählich angleichen.

Aber Maxwell vertrat die Ansicht, dass auch das Umgekehrte der Fall sein könnte, zumindest, wenn es einen Mechanismus gibt, der die Teilchen sortiert. Er stellte sich einen kleinen Geist vor, der das übernahm, den Maxwell'schen Dämon. Wenn ein Mechanismus konstruiert werden könnte, der nur die schnellen Teilchen aus der kalten Seite in die heiße durchlassen würde, wäre der zweite Hauptsatz der Thermodynamik verletzt. Doch bisher ist das noch nicht gelungen, deshalb gilt dieses Gesetz immer noch.

Ideen und Gesetze, wie Energie übertragen und verteilt werden kann, und ein wachsendes Wissen über den Aufbau von Atomen führten Anfang des 20. Jahrhunderts zur Geburt der Quantenmechanik.

Es ist schon seltsam: Wir können einen Wert berechnen, und wenn wir dann etwas warten, bis die Natur mit ihren Tricks fertig ist, und wir dann den Wert nochmal berechnen, ist er gleich geblieben.

Richard Feynman

in Vorlesungen über Physik, 1961

02 Das Planck'sche Strahlungsgesetz

Der deutsche Physiker Max Planck löste das Problem, warum Kohlen rot und nicht blau glühen und gab damit den Startschuss für eine Revolution, die zur Geburt der Quantenphysik führte. Als er versuchte, mit seinen Gleichungen sowohl Licht als auch Wärme zu beschreiben, kam er auf die Idee, Energie in kleine Pakete, oder Quanten, aufzuteilen. Auf diese Weise konnte er erklären, warum heiße Körper so wenig ultraviolette Strahlung abgeben.

Wenn es Winter ist und Sie frieren, was ist dann gemütlicher als ein knisterndes wärmendes Feuer mit seinen roten Kohlen und den gelben Flammen? Aber warum glühen die Kohlen rot? Und warum wird die Spitze eines Schürhakens, die in diesem Feuer liegt, ebenfalls rot?

Brennende Kohlen werden einige hundert Grad Celsius heiß. Vulkanische Lava ist noch heißer; sie erreicht bis zu 1200 °C und leuchtet intensiver in Orange- oder gar Gelbtönen, genau wie geschmolzener Stahl bei ähnlichen Temperaturen. Der Wolframdraht in einer altmodischen Glühlampe wird sogar noch heißer. Bei Temperaturen von einigen tausend Grad, wie auf der Oberfläche von Sternen, leuchtet er weiß.

Schwarzkörperstrahlung Wenn Körper erhitzt werden, geben sie Strahlung mit immer höheren Frequenzen ab. Das gilt vor allem für dunkle Körper wie Kohle und Eisen – die sehr effizient Wärme aufnehmen und abgeben können. Die Verteilung der Frequenzen, die bei einer bestimmten Temperatur abgegeben werden, hat immer dieselbe Form; sie wird Schwarzkörperstrahlung genannt.

Das meiste Licht wird um eine Scheitelfrequenz abgegeben, die von rot bis blau umso höher liegt, je heißer der Körper wird. Aber auch daneben wird Strahlung abgegeben, wenn auch immer weniger, je weiter die Frequenzen von

Zeitleiste

1860

Kirchhoff benutzt den Begriff „schwarzer Strahler“

1896

Wien führt sein Gesetz für hochfrequente Strahlung vor

1900

Rayleigh zeigt sein Gesetz für die Ultraviolett-Katastrophe

1901

Planck veröffentlicht sein Gesetz für die Schwarzkörperstrahlung

dem Scheitelpunkt entfernt liegen. Insgesamt ergibt sich das typische asymmetrische „hügelförmige“ Spektrum des schwarzen Strahlers.

Eine glühende Kohle gibt den größten Teil ihrer Strahlung im infraroten, also unsichtbaren Bereich ab, aber auch noch rotes und etwas gelbes Licht bei höheren Frequenzen, jedoch praktisch kein blaues. Bei noch heißerem, geschmolzenem Stahl ist dieses Muster in den Frequenzen verschoben, die Anteile an gelbem und grünem Licht nehmen zu, sodass das Licht weißer aussieht.

Farbtemperatur

Die Farbe eines Sterns verrät seine Temperatur. Die Sonne mit ihren 6000 Kelvin leuchtet weiß, sie hat ihr Strahlungsmaximum im grünen Bereich, während die kühlere Oberfläche des roten Riesen Beteigeuze (im Sternbild Orion) nur halb so heiß ist. Die sengende Oberfläche von Sirius, dem hellsten, blau-weiß strahlenden Stern des Nachthimmels, erreicht 30.000 Kelvin.

Die Ultraviolett-Katastrophe Ende des 19. Jahrhunderts kannten die Physiker die Strahlung eines schwarzen Körpers und ihre Frequenzverteilung, doch sie konnten sie nicht erklären. Es gab zwei widersprüchliche Theorien, die jeweils nur für einen Teile des Spektrums zu richtigen Werten führten. Wilhelm Wien tüftelte eine Gleichung aus, die den schnellen Abfall bei hohen Frequenzen wiedergab, während Lord Rayleigh und James Jeans den roten Teil des Spektrums erklären konnten. Doch keine der Formeln konnte beide Enden beschreiben.

Vor allem die Lösung von Rayleigh und Jeans für den ansteigenden Teil war problematisch. Ohne einen Mechanismus, der den Anstieg bremste, sagte ihre Theorie eine unendliche Abgabe von Energie bei ultravioletten, das heißt kürzeren Wellenlängen voraus. Man nannte das Problem die Ultraviolett-Katastrophe.

Die Lösung kam von dem deutschen Physiker Max Planck, der versuchte, die Physik der Wärme mit der des Lichts zusammenzuführen. Planck ging Probleme gerne von Grund auf mathematisch an. Er war von den Grundgesetzen der Physik fasziniert, vor allem von dem zweiten Hauptsatz der

Wissenschaftliche Entdeckungen und wissenschaftliche Erkenntnisse wurden immer nur von denen gewonnen, die ohne praktische Anwendung im Blick danach gesucht haben.

Max Planck, 1959

1905

Einstein identifiziert das Photon und widerlegt die Ultraviolett-Katastrophe

1918

Max Planck erhält den Nobelpreis

1994

Das COBE-Team veröffentlicht das Spektrum der kosmischen Hintergrundstrahlung

2009–2013

Das Planck-Teleskop vermisst den Mikrowellenhintergrund extrem genau

Max Planck (1858–1947)

In seiner Schule in München war Musik die erste große Liebe von Planck. Als er einen Musiker fragte, ob er Musik studieren sollte, meinte dieser, er solle lieber etwas anderes tun, wenn er sich diese Frage überhaupt stelle. Deshalb wandte er sich der Physik zu, doch ein Professor beklagte sich darüber, dass die Physik beinahe abgeschlossen sei, es gebe nichts mehr herauszufinden. Zum Glück ignorierte Planck diese Warnung und entwickelte schließlich das Konzept der Quanten. Planck musste den Tod seiner ersten Frau und seiner vier Kinder ertragen – sein Sohn Erwin wurde wegen seiner Beteiligung am Aufstand vom 20. Juli 1944 hingerichtet. Planck selbst blieb in Deutschland und half nach dem zweiten Weltkrieg die physikalische Forschung wieder aufzubauen. Heute trägt die renommierte Max-Planck-Gesellschaft seinen Namen.

Thermodynamik und den Maxwell-Gleichungen des Elektromagnetismus, deshalb machte er sich daran, herauszufinden, wie sie zusammenhängen.

Quanten Planck formte also vertrauensvoll diese Gleichungen um, ohne sich groß Gedanken darüber zu machen, was seine Rechenschritte im echten Leben bedeuten könnten. Um die Mathematik einfacher zu machen, wandte er einen schlaun Trick an. Ein Teil des Problems rührt daher, dass der Elektromagnetismus in Form von Wellen beschrieben wird. Die Temperatur dagegen ist ein statistisches Phänomen, bei dem die Wärmeenergie zwischen einer Unzahl von Atomen und Molekülen geteilt wird. Deshalb entschloss sich Planck, den Elektromagnetismus genauso zu behandeln wie die Thermodynamik. Statt Atomen

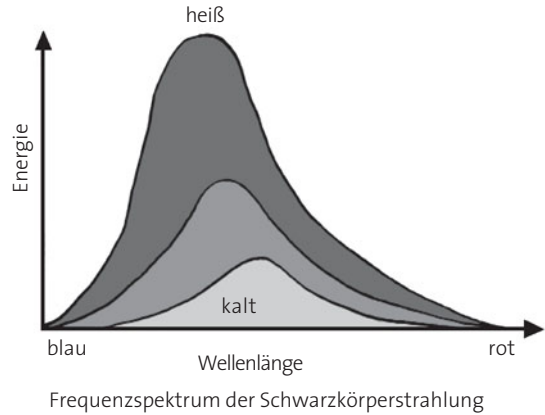
stellte er sich elektromagnetische Felder vor, die von winzigen Oszillatoren übertragen wurden. Jeder davon konnte einen bestimmten Teil der elektromagnetischen Energie tragen, die aber insgesamt auf sehr viele dieser elementaren Einheiten aufgeteilt wird.

Nach Planck trägt jeder dieser Träger umso mehr Energie, je höher seine Frequenz ist, sodass $E=h\nu$ gilt, wobei E die Energie, ν die Frequenz des Lichts und h eine Konstante sind. Letztere wird heute als Planck-Konstante bezeichnet. Diese Energieeinheiten nannte Planck Quanten vom lateinischen Wort für „wie viel“.

In Plancks Gleichung haben Quanten, die für Strahlung mit hoher Frequenz stehen, entsprechend hohe Energien. Weil die Gesamtmenge an zur Verfügung stehender Energie beschränkt ist, kann es nicht sehr viele Quanten mit sehr hohen Energien in einem System geben. Es ist wie im echten Leben. Wenn Sie 95 Euro in Ihrer Geldbörse haben, sind darunter wahrscheinlich mehr Scheine mit kleinerem Wert als große. Sie können fünf Fünfeuroscheine, zwei Zehneuroscheine, aber nie mehr als einen Fünfeuroschein dabei haben. Genauso selten sind Quanten mit sehr hohen Energien.

Planck berechnete die wahrscheinlichste Energieverteilung für eine bestimmte Menge elektromagnetischer Quanten. Im Mittel gab es davon am meisten mit einer mittleren Energie – was den Scheitelpunkt beim Spektrum der Schwarzkörperstrahlung erklärte. Planck veröffentlichte sein Gesetz 1901. Es wurde begeistert aufgenommen, weil es die lästige Ultraviolett-Katastrophe löste.

Das Planck'sche Konzept der Quanten war ausschließlich als Gedankengebäude gedacht – er hatte nicht die Ansicht vertreten, dass es diese Oszillatoren tatsächlich in der Natur geben müsse. Sie waren lediglich eine mathematische Konstruktion, um Wellen und Wärme zusammenzubringen. Doch weil sie zu Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts entstand, einer Zeit, in der unser Verständnis von Licht und den Atomen sehr rasch zunahm, hatte Plancks Idee Auswirkungen, an die er nicht im Traum gedacht hätte. Sie wurde zur Grundlage der Quantenphysik.



Plancks Erbe im Weltall Die genaueste Schwarzkörperstrahlung kommt aus dem Weltall. Ein schwaches Mikrowellenglühen mit einer Temperatur von exakt 2,73 Kelvin kommt aus allen Himmelsrichtungen auf uns zu. Ihr Ursprung liegt im frühen Universum, hunderttausend Jahre nach dem Urknall, als sich die ersten Wasserstoffatome gebildet hatten. Die Temperatur aus dieser Zeit hat sich seitdem mit der Ausdehnung des Universums abgekühlt und liegt nun im Mikrowellenbereich des elektromagnetischen Spektrums, wo sie dem Gesetz des schwarzen Körpers entspricht. Diese kosmische Mikrowellenhintergrundstrahlung wurde in den 1960er-Jahren entdeckt und in den 1990er-Jahren zum ersten Mal vom NASA-Satelliten COBE (Cosmic Background Explorer) kartiert. 2009 startete auch die ESA ein Weltraumteleskop, das bis Ende 2013 die Hintergrundstrahlung mit einer weit genaueren Auflösung aufgezeichnet hat; es trug den Namen Planck.

03 Elektromagnetismus

Licht ist eine elektromagnetische Welle. Abgesehen vom vertrauten Spektrum des sichtbaren Lichts gibt es elektromagnetische Schwingungen in einem Bereich, der von den Radiowellen bis hin zu Gammastrahlen reicht. Inzwischen weiß man, dass im Elektromagnetismus die Elektrizität und der Magnetismus in einer Fundamentalkraft vereint sind. Im Wesentlichen war diese Erkenntnis sowohl ein Auslöser für die Relativitätstheorie als auch für die Quantenphysik.

Licht ist für uns etwas ganz Selbstverständliches, doch es gibt immer noch vieles, was wir daran nicht verstehen. Wir sehen Schatten und Reflexionen – es dringt also nicht durch undurchsichtige Materialien und wird von spiegelnden zurückgeworfen. Und wir wissen, dass es sich in das vertraute Regenbogenspektrum zerlegen lässt, wenn es durch Glas oder Regentropfen dringt. Aber was ist Licht wirklich?

Viele Wissenschaftler haben versucht, diese Frage zu beantworten. Im 17. Jahrhundert zeigte Isaac Newton durch Versuche mit Prismen und Linsen, dass jede Farbe eines Regenbogens – Rot, Orange, Gelb, Grün, Blau, Indigo und Violett – ein Grundbaustein des Lichts ist. Er mischte sie zusammen und erzeugte zwischenliegende Farbtöne, wie Zyan, und vereinigte sie alle zu weißem Licht. Doch mit der Ausrüstung, die ihm zur Verfügung stand, konnte er das Spektrum nicht noch weiter zerlegen. Newton glaubte anfangs, dass Licht durch Teilchen übertragen wird, bemerkte aber auch, dass es sich wie eine Welle verhalten kann – es wird um Hindernisse herum gebeugt und verstärkt oder ausgelöscht, wenn sich Wellen überlagern. Deshalb fasste Newton eine Lichtwelle analog zu Wasserwellen als kollektive Bewegung winziger Lichtteilchen, Korpuskeln subatomarer Dimension auf.

Heute wissen wir, dass das nicht ganz richtig ist. Licht ist eine elektromagnetische Welle, die aus gekoppelten elektrischen und magnetischen Feldern besteht. Aber das ist noch nicht das Ende der Geschichte. Anfang des 20. Jahr-

Zeitleiste

1600

William Gilbert untersucht Elektrizität und Magnetismus

1672

Newton erklärt den Regenbogen

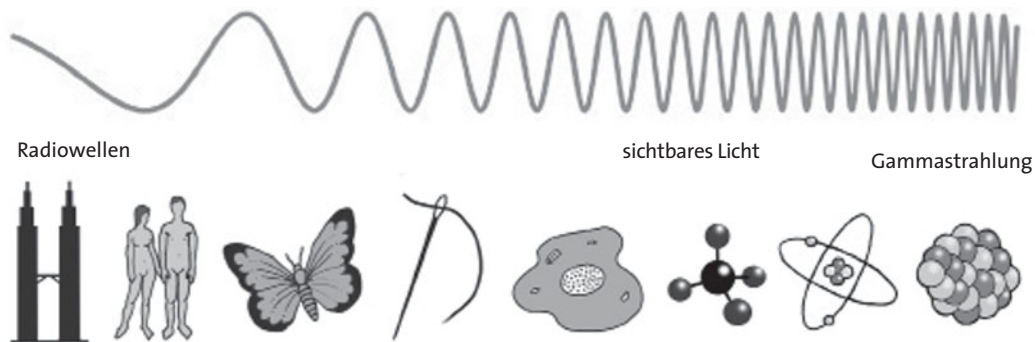
1752

Benjamin Franklin führt Experimente mit Blitzen durch

hunderts zeigte Albert Einstein, dass es Situationen gibt, in denen sich Licht wie ein Strom aus Teilchen verhält. Diese werden Photonen genannt. Sie tragen Energie, haben aber keine Masse. Die Natur des Lichts bleibt ein Rätsel, das entscheidend für die Entwicklungen von Relativitätstheorie und Quantenphysik war.

Das Spektrum Jede Farbe des Lichts hat eine andere Wellenlänge – das ist der Abstand zwischen zwei Wellenbergen. Blaues Licht hat eine kürzere Wellenlänge als rotes, grünes liegt dazwischen. Die Frequenz ist die Zahl der Wellenzyklen (Wellenberge) pro Sekunde. Wenn ein weißer Lichtstrahl durch ein Prisma fällt, bricht das Glas jede Farbe in einem anderen Winkel. Rotes Licht wird am wenigsten gebrochen, blaues am meisten. So verteilen sich die Farben wie in einem Regenbogen.

Aber die Farben hören hier noch nicht auf. Das sichtbare Licht ist nur ein Ausschnitt aus dem elektromagnetischen Spektrum. Es erstreckt sich von den Radiowellen, die Wellenlängen von mehreren Kilometern haben können, bis hin zu Gammastrahlen mit Wellenlängen, die viel kleiner sind als ein Atom. Das sichtbare Licht hat Wellenlängen von ungefähr einem halben Millionstel Meter, sie sind also ungefähr hundertmal so groß wie ein einfaches Molekül. Jenseits



Die Wellenlängen elektromagnetischer Strahlung reichen von tausenden von Metern bis weit unter einem Milliardstel Meter.

1820

Hans Christian Ørsted verbindet Elektrizität und Magnetismus

1831

Michael Faraday entdeckt die elektromagnetische Induktion

1865

Maxwell veröffentlicht seine vier Gleichungen

1905

Einstein veröffentlicht seine spezielle Relativitätstheorie

der Wellenlängen des roten Lichts, bei Millionsteln von Metern, liegt das Infrarot. Bei Millimetern bis Zentimetern finden wir die Mikrowellen. Kürzerwellig als das violette Licht sind die ultraviolette, die Röntgen- und die Gammastrahlung.

Maxwell-Gleichungen Elektromagnetische Wellen verbinden Elektrizität und Magnetismus. Anfang des 19. Jahrhunderts erkannten Forscher wie Michael Faraday, dass diese Felder von einer in die andere Art umgewandelt werden können. Wenn man einen Magneten in der Nähe eines Drahtes bewegt, werden Ladungsträger angeschoben, die als elektrischer Strom gemessen werden können. Ein Strom wiederum, der sich ändert und durch eine Drahtspule fließt, erzeugt ein Magnetfeld, das in einer anderen Spule einen Strom induzieren kann – das ist die Grundlage von Transformatoren, die dazu verwendet werden, Ströme und Spannungen für den Hausgebrauch anzupassen.

Um die Natur der Dinge zu verstehen, muss der Mensch nicht fragen, ob etwas gut oder böse, schädlich oder nützlich ist, sondern wie es beschaffen ist.

James Clerk Maxwell, 1870

Der große Durchbruch gelang dem schottischen Physiker James Clerk Maxwell. Er beschrieb dieses Verhalten mit nur vier Gleichungen – den Maxwell-Gleichungen. Maxwell erklärte, wie Elektrizität und Magnetismus aus einem Phänomen entstehen: den elektromagnetischen Wellen, die aus einem elektrischen Feld bestehen, das sich sinusförmig in eine Richtung ausbreitet und von einem Magnetfeld begleitet ist, das genauso schwingt, aber im rechten Winkel dazu steht.

Maxwells erste Gleichung ist auch als Gauß'sches Gesetz bekannt, nach dem Physiker Carl Friedrich Gauß aus dem 19. Jahrhundert. Sie beschreibt das elektrische Feld um ein geladenes Objekt und wie – genauso wie bei der Schwerkraft – die Stärke des Feldes mit dem Quadrat des Abstands zu ihm abfällt. Wenn man sich also zweimal so weit weg bewegt, wird die Kraft um einen Faktor Vier geringer.

Die zweite Gleichung macht das Gleiche für das magnetische Feld. Magnetische (und elektrische) Felder werden oft visualisiert, indem man die Konturen ihrer Feldstärke oder tangentielle Linien zu ihrer Kraft zeichnet. Das zweite Gesetz bringt zum Ausdruck, dass diese magnetischen Feldlinien immer geschlossen sind und vom Nord- zum Südpol verlaufen. Mit anderen Worten: Alle Magnetfeldlinien müssen irgendwo beginnen und irgendwo enden, und alle Magnete benötigen einen Nord- und einen Südpol – es gibt keine magnetischen Monopole. Wenn man einen Stabmagneten in zwei Teile bricht, entstehen immer zwei Magnete, die beide einen Nord- und einen Südpol haben. Und das

ist unabhängig davon, wie oft man den Magneten zerteilt.

Die dritte und vierte Maxwell-Gleichung beschreiben die elektromagnetische Induktion und die Wechselwirkung von elektrischen und magnetischen Kräften, die durch Drahtspulen fließen. Die dritte Gleichung verrät uns, wie zeitlich veränderliche Ströme Magnetfelder, und die vierte umgekehrt, wie zeitlich veränderliche Magnetfelder elektrische Ströme erzeugen. Maxwell zeigte auch, dass sich Licht- und alle elektromagnetischen Wellen im Vakuum mit einer konstanten Geschwindigkeit von etwa 300 Millionen Metern pro Sekunde ausbreiten.

So viele Phänomene mit nur so wenigen einfachen Gleichungen zu beschreiben, war ein großes Kunststück, das Einstein dazu brachte, Maxwells Leistungen mit denen von Newton zu vergleichen. Einstein baute Maxwells Ideen in seine Relativitätstheorien ein. In den Einstein'schen Gleichungen sind Magnetismus und Elektrizität Ausprägungen ein und desselben Phänomens, die von einem Beobachter aus verschiedenen Bezugssystemen gesehen werden: Ein elektrisches Feld in einem sich bewegenden Bezugssystem kann von einem anderen aus als Magnetfeld gesehen werden. Aber Einstein machte hier noch nicht Halt. Er zeigte auch, dass Licht nicht immer eine Welle ist – manchmal kann es sich auch wie ein Teilchen verhalten.

James Clerk Maxwell (1831–1879)

James Clerk Maxwell wurde im schottischen Edinburgh geboren. Er wuchs auf dem Land auf und begann sich dort für die Natur zu interessieren. In der Schule erhielt er den Spitznamen „Dafty“ (Blödmann), weil er sich nur mit dem Lernen befasste. Als Student in Edinburgh und später in Cambridge galt Maxwell als klug, aber unorganisiert.

Nach seiner Promotion setzte er Michael Faradays Arbeiten über Elektrizität und Magnetismus fort und formulierte die Ergebnisse in vier Gleichungen. Um 1862 berechnete er, dass die Geschwindigkeit von elektromagnetischen Wellen und Licht gleich ist. Drei Jahre später veröffentlichte er seine vier Gleichungen des Elektromagnetismus.

04 Doppelspaltexperiment von Young

Wenn ein Lichtstrahl geteilt und nach unterschiedlichen Laufwegen wieder vereint wird, können sich wie bei Wasserwellen seine Signale verstärken oder auslöschen: Wo die Maxima zusammentreffen, erscheinen helle Streifen, wo Wellental auf Wellenberg trifft, bleibt es dunkel. Dieses Verhalten, das Interferenz genannt wird, beweist, dass sich Licht wie eine Welle verhält.

1801 ließ der Physiker Thomas Young einen Sonnenstrahl durch zwei sehr dünne Schlitze fallen, die er in einen Karton geritzt hatte. Das Licht spaltete sich in die Farben auf, aus denen es zusammengesetzt war. Doch es bildete sich nicht ein klassischer Regenbogen, auch nicht zwei. Zu seiner Überraschung erschien auf einem Schirm eine Reihe von Regenbogenstreifen. Dieses Young'sche Doppelspaltexperiment war eine bahnbrechende Entdeckung.

Was war passiert? Wenn Young einen der Spalte zudeckte, tauchte in der Mitte ein heller Fleck und daneben zwei einzelne Regenbogen auf, etwa so, wie man es erwartete, wenn man Licht durch ein Prisma fallen lässt. Wenn er den Spalt wieder öffnete, tauchten wieder deutlich erkennbare Muster aus Bändern auf.

Young erkannte, dass sich Licht genau wie Wasserwellen verhielt. Mithilfe von Glasbehältern, die mit Wasser gefüllt waren, untersuchte er, wie sich Wasserwellen verhalten, wenn sie um Hindernisse oder durch Verengungen laufen müssen. Wenn eine Reihe paralleler Wellen durch eine Öffnung dringt, etwa eine Hafeneinfahrt in einer Schutzmauer, gehen einige davon gerade durch. Doch die Wellen, die auf die Ecken der Wand treffen, werden abgelenkt – oder gebeugt – und bilden Bögen, sodass sich die Energie der Wellen auf beide Seiten der Lücke ausbreiten kann. Dieses Verhalten konnte das Muster bei einem

Zeitleiste

1672

Newton vertritt die Ansicht, Licht bestehe aus Korpuskeln

1678

Huygens entwickelt sein Prinzip der Wellenausbreitung

1801

Young führt sein Doppelspaltexperiment durch

einfachen Spalt erklären. Doch was geschah beim Doppelspalt?

Wenn man Steine in einen See wirft, entstehen Wellen, die sich ringförmig ausbreiten. Wenn man einen weiteren Stein in die Nähe des ersten wirft, überlappen sich die beiden Wellenkreise. Wo sich zwei Wellenberge treffen, verbinden sie sich und werden größer, trifft Wellenberg auf Wellental, löschen sich beide aus. Das Ergebnis ist ein kompliziertes Muster von Wellentälern und Wellenbergen, das auf einer glatten Wasseroberfläche wie auf Speichen angeordnet ist.

Dieser Effekt ist als Interferenz bekannt. Wenn sich Wellen verstärken, nennt man das konstruktive Interferenz, löschen sie sich aus, spricht man von destruktiver Interferenz. Die Auslenkung der Welle an einem bestimmten Punkt hängt vom Unterschied in der „Phase“ der beiden interferierenden Wellen ab, das heißt vom relativen Abstand zwischen den jeweiligen Wellenbergen. Dies gilt für alle Wellen, auch für die des Sonnenlichts.

Indem er zwei Spalte verwendete, hatte Young zwei Pfade für das Licht erzeugt – jeweils einen pro Spalt – die dann interferierten. Die relativen Phasen der Lichtstrahlen hingen davon ab, wie weit jeweils die Strecken vom Karton zum Schirm waren. Wo sie konstruktiv interferierten, tauchten helle Streifen auf, wo die Interferenz destruktiv war, blieb es dunkel.

Thomas Young (1773–1829)

Thomas Young wurde 1773 als erstes von zehn Kindern einer Quäker-Familie im englischen Somerset geboren. In der Schule war er besonders gut in Sprachen. Er kannte mehr als ein Dutzend, von Persisch und Türkisch bis Griechisch und Latein. Young studierte in London und Edinburgh Medizin, promovierte dann aber 1796 in Göttingen in Physik. Zurück in England erhielt er ein großes Erbe, das ihn reich und unabhängig machte. Er praktizierte in Medizin, führte wissenschaftliche Experimente durch und interessierte sich auch für Ägyptologie. So half er nicht nur, die Hieroglyphen auf dem Stein von Rosetta zu entziffern, sondern führte auch den Begriff „Energie“ und die Wellentheorie des Lichts ein.

Das Huygens'sche Prinzip Im 17. Jahrhundert hat sich der holländische Physiker Christiaan Huygens eine praktische Faustregel überlegt – bekannt als das Huygens'sche Prinzip – mit dem man die Ausbreitung einer Welle vorhersagen konnte. Stellen Sie sich vor, sie könnten die kreisförmigen Wellen, die sich bilden, wenn Sie einen Stein ins Wasser werfen, einen Augenblick lang einfrie-

1818

Fresnel passt das Huygens'sche Prinzip auf Spalte und Hindernisse an

1873

Die Maxwell-Gleichungen beschreiben Licht als elektromagnetische Welle

1905

Einstein zeigt, dass sich Licht wie Teilchen verhalten kann

„All die Anerkennung, die ich von Arago, Laplace und Biot bekommen habe, hat mir nicht so viel Freude bereitet, wie die Entdeckung einer theoretischen Wahrheit oder die Bestätigung einer Berechnung durch ein Experiment.“

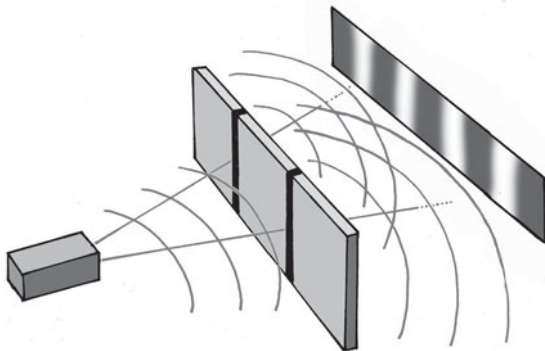
Fresnel in einem Brief an Young, 1824

ren. Jeder Punkt eines der Kreise ist seinerseits Ausgangspunkt einer kleinen, kreisförmigen Welle. Und jede dieser Wellen trägt wieder eine Menge von Quellen für neue Wellen. Wenn man dies immer weiterdenkt, kann man das Fortschreiten der Welle verfolgen.

Alles, was man braucht, um eine Welle zu verfolgen, sind Stift, Papier und einen Zirkel. Man beginnt damit, die erste Wellenfront zu zeichnen, dann zeichnet man mit dem Zirkel entlang dieser Front weitere Kreise. Die nächste Wellenfront findet man, indem man an die neu entstandene Außenfront eine Linie anschmiegt. Dies kann man immer wieder wiederholen.

Diese einfache Technik kann man verwenden, um die Ausbreitung von Wellen zu verfolgen. Anfang des 19. Jahrhunderts weitete der französische Physiker Augustin-Jean Fresnel das Huygens'sche Prinzip auf komplexere Verhältnisse aus, zum Beispiel auf Wellen, die durch Lücken laufen, die auf Hindernisse treffen oder die Pfade andere Wellen kreuzen.

Wenn Wellen durch schmale Lücken treten, breitet sich ihre Energie auf beiden Seiten aus – durch einen Vorgang, der Beugung genannt wird. Verwendet man das Huygens'sche Prinzip, erkennt man, dass die Wellen an der Kante neue kreisförmige Wellen aussenden, sodass die Welle hinter dem Durchlass fast halbkreisförmig aussieht. Auf diese Art und Weise gelangen Wellen auch um die Ecke.



Lichtwellen verstärken sich oder löschen einander aus, wenn sie durch zwei Spalte treten.

Youngs Experiment Als Young Licht durch einen einzelnen Spalt fallen ließ, gelangten die meisten Wellen einfach gerade durch, doch aufgrund der Beugung an den Kanten des Spalts entstanden zwei benachbarte kreisförmige Wellen, die interferierten und schwache Extralines neben der Hauptlinie erzeugten.

Wie stark die Wellen gebeugt werden, hängt ab von der Spaltbreite relativ zur Wellenlänge des Lichts, das durch ihn fällt. Die Abstände zwischen den Seitenstreifen sind proportional zur Wellenlänge und

umgekehrt proportional zur Spaltbreite. Es führen also engere Spalte zu größeren Abständen zwischen den Zusatzlinien, und rotes Licht wird weiter gebeugt als blaues.

Bringt man einen weiteren Spalt ins Spiel, entsteht eine Kombination des obigen Streifenbildes und eines zweiten Beugungsmusters aus der Interferenz der Wellen von beiden Spalten. Weil der Abstand der beiden Spalte viel größer ist als die Breite jedes einzelnen, liegen die Linien viel enger beieinander.

Und genau das beobachtete Young – viele dünne Streifen aufgrund der Interferenzen der Wellen aus den beiden Spalten, die überlagert wurden von einem breiten Beugungsmuster aufgrund der Beugung an jedem einzelnen Spalt.

Youngs Entdeckung war damals sehr wichtig, denn sie widersprach der früheren Vorstellung von Newton, dass Licht aus Teilchen – oder Korpuskeln – besteht. Young zeigte damit, dass Lichtstrahlen interferieren können, dass Licht eine Welle ist. Teilchen wären gerade durch den Karton geflogen und hätten auf dem Schirm nur zwei Streifen ergeben.

Aber so einfach ist es nicht. Seit dieser Zeit haben Physiker nachgewiesen, dass Licht wankelmütig ist: unter bestimmten Umständen verhält es sich wie ein Teilchen, unter anderen wie eine Welle. Abwandlungen von Youngs Doppelspaltexperiment, in denen sehr schwache Lichtstrahlen verwendet werden, oder bei denen die Spalte schnell geöffnet und geschlossen werden, wenn Licht durchgekommen ist, sind immer noch sehr wichtig, wenn man die Natur des Lichts untersuchen will. Mit einigen der verrücktesten Ergebnisse konnte die Quantentheorie getestet werden.

„Jedes Mal, wenn ein Mensch für ein Ideal eintritt ... sendet er eine kleine Welle der Hoffnung aus. Wenn sich solche kleinen Wellen aus Millionen Quellen von Energie und Wagemut überschneiden, bilden sie eine Front, die die mächtigsten Mauern des Widerstands und der Unterdrückung hinwegspülen kann.“

Robert Kennedy, 1966

05 Die Lichtgeschwindigkeit

Bemerkenswerterweise breitet sich Licht immer mit der gleichen Geschwindigkeit aus, ganz gleich, ob es von einer Lampe auf einem Fahrrad, einem ICE oder einem Überschallflugzeug abgestrahlt wird. Albert Einstein zeigte 1905, dass nichts schneller sein kann als das Licht. Raum und Zeit werden verzerrt, wenn man sich dieser universellen Geschwindigkeitsgrenze nähert. In ihrer Nähe werden Objekte schwerer und kürzer, und die Zeit läuft langsamer ab.

Wenn man ein Gewitter beobachtet, kommt der Donner immer erst nach dem Blitz. Je weiter das Gewitter weg ist, desto größer ist die Verzögerung des Donners. Das kommt einfach daher, dass Schall viel langsamer ist als Licht. Schall besteht aus Luftdruckschwankungen, die mehrere Sekunden benötigen, um sich einen Kilometer weit auszubreiten. Licht dagegen ist ein elektromagnetisches Phänomen und unheimlich schnell. Aber durch welches Medium breitet es sich aus?

Ende des 19. Jahrhunderts dachten Physiker, dass der Raum mit einer Art Trägermedium – dem sogenannten Äther – ausgefüllt sei, durch den sich das Licht ausbreitet. Doch 1881 zeigte ein berühmtes Experiment, dass es dieses Medium gar nicht gibt. Albert Michelson und Edward Morley hatten sich eine geniale Vorrichtung ausgedacht, mit der es möglich war, die Bewegung der Erde auf ihrem Weg um die Sonne gegen den als fest gedachten Äther zu vermessen.

In ihrem Labor ließen sie zwei Lichtstrahlen miteinander interferieren, die sie zuerst mit einem Strahlteiler auf zwei exakt gleichlange senkrecht aufeinander stehende Wegstrecken geschickt hatten. Die Strahlen trafen auf einem Schirm wieder aufeinander, sodass sich Interferenzringe bildeten. Würde sich die Erde in die Richtung eines der Strahlen bewegen, sollte sich ihre Geschwindigkeit

Zeitleiste

1881

Michelson und Morley zeigen, dass es keinen Äther gibt

1901

Max Planck schlägt Energiequanten vor

1905

Einstein veröffentlicht seine spezielle Relativitätstheorie

zur Lichtgeschwindigkeit gegen den Äther addieren oder davon abziehen. Deshalb sollte das Licht in den beiden Armen unterschiedlich lange brauchen, um die Strecke bis zum Schirm zurückzulegen, genau wie ein Schwimmer unterschiedlich lange braucht, wenn er in einem Fluss ein Stück weit mit oder gegen den Strom schwimmt. Aus diesem Grund sollten sich die Interferenzringe im Verlauf eines Jahres ein wenig verändern.

Doch die Interferenzringe veränderten sich nicht. Die Lichtstrahlen kamen immer zur gleichen Zeit am Schirm an. Ganz egal wie und wo sich die Erde im Weltall bewegte, die Lichtgeschwindigkeit blieb unverändert. Es gab also keinen Äther.

Licht breitet sich – im Vakuum – immer mit der gleichen Geschwindigkeit aus: 300 Millionen Meter pro Sekunde. Dieses Verhalten ist sehr seltsam, wenn man es mit dem von Wasser- und Schallwellen vergleicht, bei denen die Ausbreitungsgeschwindigkeit von der Bewegung des Mediums abhängt. Außerdem addieren oder subtrahieren sich Geschwindigkeiten unserer Erfahrung nach – ein Auto, das uns überholt, scheint sich nur sehr langsam fortzubewegen. Wenn man mit einer Taschenlampe zum anderen Fahrer hinüberleuchten würde, wäre das Licht immer gleich schnell, unabhängig davon, wie schnell man selbst fährt. Das stimmt auch noch in einem schnellen Zug oder einem Flugzeug.

Einstein und die Relativität Warum ist die Lichtgeschwindigkeit derart festgelegt? Diese Frage brachte Albert Einstein im Jahr 1905 dazu, seine spezielle Relativitätstheorie

Das Zwillings-Paradoxon

Weil Uhren, die sich bewegen, langsamer laufen, sollten Astronauten in einem schnellen Raumschiff langsamer altern als ihre Partner auf der Erde. Wenn man etwa einen von zwei Zwillingen mit einem sehr schnellen Schiff zum nächsten Stern schickt, würde die Zeit für ihn langsamer vergehen. Deshalb würde er bei seiner Rückkehr zur Erde immer noch jung sein, während sein Zwilling Bruder gebrechlich und alt wäre. Das führt aber scheinbar zu einem Widerspruch, denn die Reise kann vom Standpunkt jedes einzelnen Zwilling als Relativbewegung des anderen betrachtet werden. Also wäre es egal, ob sich A von B entfernt oder umgekehrt. Doch der Astronaut würde im Laufe seiner Reise starken Beschleunigungskräften unterworfen sein. Dies führt zu einem Unterschied in der Berechnung zwischen den Zwillingen.

Der Raum ist nicht ein Haufen von Punkten, die nahe beieinanderliegen; es ist ein Haufen von Abständen, die miteinander verbunden sind.

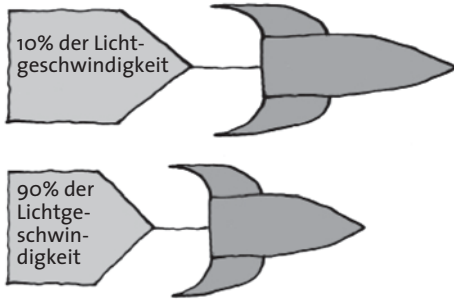
Sir Arthur Stanley Eddington, 1923

1915

Einstein veröffentlicht seine allgemeine Relativitätstheorie

1971

Die Zeitdilatation wird mit Uhren, die in Flugzeugen mitfliegen, nachgewiesen



Bei Reisen nahe der Lichtgeschwindigkeit, werden Längen kürzer.

Die Lichtgeschwindigkeit ist für die Relativitätstheorie das, was das Wirkungsquantum für die Quantenmechanik ist: Sie ist das absolute Herzstück.

Albert Einstein, 1905

zu entwickeln. Einstein arbeitete damals als Beamter am Schweizer Patentamt in Bern und beschäftigte sich in seiner Freizeit mit Physik. Er versuchte, sich vorzustellen, was zwei Menschen sehen, wenn sie sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten bewegten und einander mit einer Taschenlampe anstrahlten. Wenn sich die Lichtgeschwindigkeit nicht ändern konnte, dann, so überlegte sich Einstein, musste sich etwas anderes ändern, um das auszugleichen.

Was sich ändert, sind Raum und Zeit. Einstein griff Ideen auf, die Hendrik Lorentz, George Fitzgerald und Henri Poincaré entwickelt hatten, und zeigte, dass Raum und Zeit gekrümmt sein müssen, um den unterschiedlichen Blickwinkeln von Beobachtern, die sich nahe der Lichtgeschwindigkeit bewegten, Rechnung zu tragen. Er fasste die drei Dimensionen des Raums und die Zeit zu einer vierdimensionalen Raumzeit zusammen. Geschwindigkeit ist Weg geteilt durch Zeit; damit die Lichtgeschwindigkeit nicht überschritten werden kann, müssen Wege schrumpfen und die Zeit langsamer vergehen. Eine Rakete, die sich fast mit Lichtgeschwindigkeit von uns wegbewegt, nehmen wir als kürzer wahr, als wenn sie ruht; für ihre Insassen vergeht die Zeit langsamer als für uns.

Einsteins Theorie brachte zum Ausdruck, dass jede Bewegung relativ ist: Es gibt keinen ausgezeichneten Standpunkt. Wenn man in einem Zug sitzt und einen anderen Zug sieht, der sich bewegt, kann man nicht herausfinden, welcher stillsteht und welcher aus dem Bahnhof fährt. Ganz ähnlich ist es mit der Erde: Sie bewegt sich zwar um die Sonne und mit unserer Galaxie, aber wir nehmen diese Bewegung nicht wahr. Alles was wir wahrnehmen können, sind Relativbewegungen.

Die fliegenden Uhren Einstein sagte voraus, dass die Zeit in der Nähe der Lichtgeschwindigkeit langsamer vergeht. Bewegte Uhren laufen also mit einer anderen Geschwindigkeit. Diese überraschende Tatsache wurde 1971 nachgewiesen. Damals wurden vier identische Atomuhren zweimal um die Welt geflogen, zwei in Richtung Osten, zwei in Richtung Westen. Als sie wieder an ihrem Ursprungsort angekommen waren, wurden ihre Zeitangaben mit denen von

Albert Abraham Michelson (1852–1931)

Michelson wurde in Strelno (Provinz Posen) geboren, wanderte aber 1855 mit seinen Eltern in die USA aus. Er wurde an der US-Marineakademie ausgebildet und unterrichtete dort schließlich Optik, Wärme und Klimatologie. Nachdem er mehrere Jahre lang in Deutschland und Frankreich die Physik des Lichts untersucht hatte, kehrte er in die USA zurück und wurde Physikprofessor an der Case Western University in Cleveland, Ohio.

Hier führte er mit Morley seine Versuche mit dem Interferometer durch, die zeigten, dass es keinen Äther gibt. Später ging Michelson an die University of Chicago und entwickelte Interferometer für astronomische Untersuchungen, etwa zur Messung der Größen und Abstände von Sternen. 1907 wurde er als erster Amerikaner mit dem Nobelpreis ausgezeichnet.

identischen Uhren verglichen, die am Boden geblieben waren. Die bewegten Uhren gingen gegenüber den stationären um Bruchteile einer Sekunde nach. Genau wie es Einstein in seiner speziellen Relativitätstheorie vorhergesagt hatte.

In der Nähe der Lichtgeschwindigkeit werden Objekte außerdem schwerer, entsprechend der Formel $E = mc^2$ (Energie ist gleich der Masse mal dem Quadrat der Lichtgeschwindigkeit). Bei geringen Geschwindigkeiten ist dieser Gewichtszuwachs winzig. Er wäre aber unendlich groß bei der Lichtgeschwindigkeit, sodass eine weitere Beschleunigung unmöglich wäre. Auch aus diesem Grund kann nichts schneller werden als das Licht, ja nichts, was eine Masse hat, wird je die Lichtgeschwindigkeit erreichen können. Denn mit zunehmender Masse wird für eine weitere Beschleunigung eine immer größere Kraft benötigt. Licht selbst besteht aus Photonen, die keine Masse haben, und ist deshalb davon nicht betroffen.

Viele waren über Einsteins spezielle Relativitätstheorie fassungslos, sodass es Jahrzehnte dauerte, bis sie allgemein anerkannt wurde. Die logischen Folgerungen aus ihr, etwa die Äquivalenz von Masse und Energie, die Zeitdilatation und Längenkontraktion, waren so grundlegend anders als alles, was man sich bisher vorgestellt hatte. Vielleicht war der entscheidende Grund dafür, dass die Relativitätstheorie überhaupt Beachtung fand, dass Max Planck von ihr hörte und fasziniert davon war. Die Tatsache, dass Planck ein Verfechter der allgemeinen Relativitätstheorie war, katapultierte Einstein in den akademischen Mainstream und brachte ihm schließlich auch öffentliche Aufmerksamkeit.

06 Der photoelektrische Effekt

Eine Reihe verwirrender Experimenten zeigte im 19. Jahrhundert, dass die Wellentheorie des Lichts nicht richtig sein konnte oder zumindest nicht vollständig war. Bestrahlte man eine Metalloberfläche mit Licht, setzte es Elektronen frei, deren Energien nur erklärt werden konnten, wenn Licht aus einzelnen kugelartigen Photonen und nicht aus Wellen bestand.

1887 spielte der deutsche Physiker Heinrich Hertz mit Funken herum, während er zu zeigen versuchte, dass elektrische Felder übertragen werden können. Schickte man einen knisternden Strom zwischen zwei Metallkugeln, die als Sender dienten, löste das weitere Funken in einem zweiten Kugelpaar aus, die den Empfänger darstellten – so entstand ein Gerät, das Funkenstreckensender genannt wurde.

Hertz fand heraus, dass die Funken leichter überschlugen, wenn man die Metallkugeln näher zusammenbrachte – üblicherweise bis auf einen Millimeter Abstand. Doch seltsamerweise bildeten sich die Funken auch schneller, wenn der ganze Apparat in ultraviolettes Licht gebadet wurde.

Das war damals nicht verständlich. Man hielt ja Licht für eine elektromagnetische Welle. Deren Energie könnte zwar auf die Elektronen in der Oberflächenschicht des Metalls übertragen werden, sodass sie losgelöst werden, um als Strom zu fließen. Doch weitere Untersuchungen zeigten, dass diese einfache Vorstellung nicht zu halten war.

Philipp Lenard, ein Assistent von Hertz, untersuchte die Sache in seinem Labor noch etwas genauer. Er baute einen Funkenstreckengenerator, der nur aus den entscheidenden Elementen aufgebaut war: zwei Metalloberflächen in einem luftleeren Glasbehälter. Zwischen den Metallplatten war ein Abstand, doch außen waren sie leitend über Drähte und ein Strommessgerät verbunden. Lenard

Zeitleiste

1839

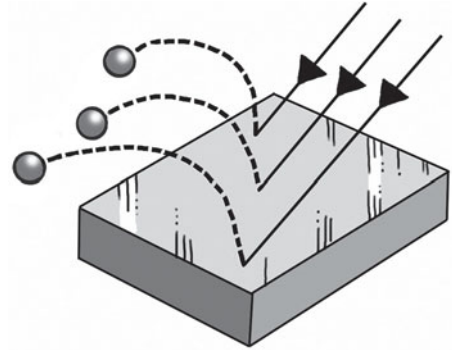
Alexandre Becquerel beobachtet zum ersten Mal den photoelektrischen Effekt

1887

Hertz bemerkt Funken über Lücken, die mit UV-Licht bestrahlt wurden

beleuchtet eine der Platten mit Licht unterschiedlicher Intensität, während er die andere dunkel hielt. Immer wenn Elektronen aus der beleuchteten Platte freigeschlagen wurden, konnten sie die andere erreichen, sodass ein kleiner Strom floss.

Lenard fand heraus, dass helles Licht mehr Elektronen freisetzte als schwächeres. Das war zu erwarten, weil auch mehr Energie auf die Platte übertragen wurde. Doch gleichzeitig hatten unterschiedliche Intensitäten kaum einen Effekt auf die Geschwindigkeit der herausgeschlagenen Elektronen. Intensives und weniger intensives Licht erzeugte Elektronen mit der gleichen Energie, was er messen konnte, indem er eine Spannung an die Platten legte, die sie abbremste. Das war überraschend – er erwartete, dass aufgrund des höheren Energieeintrags durch das intensivere Licht auch die Elektronen schneller werden sollten.



Blaues Licht schlägt Elektronen aus Metallen.

Die Farbe des Lichts Nun beschäftigten sich auch andere Physiker mit diesem Problem, unter anderem der Amerikaner Robert Millikan. Er machte den gleichen Versuch mit Licht unterschiedlicher Farben und fand heraus, dass rotes Licht überhaupt keine Elektronen freisetzen konnte, ganz egal, wie intensiv die Lichtquelle war. Doch mit blauem und ultraviolettem Licht funktionierte es gut. Verschiedene Metalle hatten unterschiedliche Grenzfrequenzen für das Licht, unter denen keine Elektronen herausgeschlagen wurden. Die Energie (das heißt die Geschwindigkeit) der Elektronen, die freigesetzt werden, steigt linear mit der Frequenz des Lichts. Die Steigung dieser Gerade nennt man die Planck'sche Konstante.

Dieses Verhalten war verblüffend: Nach den damaligen Vorstellungen hätte sich Licht genau andersherum verhalten sollen. Elektromagnetische Wellen, die auf die Metallober-

„Ich habe fünfzig Jahre über die Frage nachgedacht, was Lichtquanten eigentlich sind, und bin trotzdem der Antwort nicht näher gekommen. Natürlich glaubt heute jeder Lausebengel, die Antwort zu kennen, aber er irrt sich.“

Albert Einstein, 1954

1899

J. J. Thomson bestätigt, dass durch einfallendes Licht Elektronen erzeugt werden können

1901

Planck führt sein Konzept der Energiequanten ein

1905

Einstein schlägt sein Konzept der Lichtquanten – Photonen – vor

„Mir scheint, dass die Beobachtungen, die mit der Schwarzkörperstrahlung, der Fluoreszenz, dem photoelektrischen Effekt und anderen Phänomenen, die im Zusammenhang mit der Emission und Umwandlung von Licht stehen, leichter verstanden werden können, wenn man annimmt, dass die Energie von Licht im Raum nicht kontinuierlich verteilt ist.“

Albert Einstein, 1905

fläche treffen, hätten langsam Elektronen verdampfen sollen. Genau wie die Wellen in einem Sturm mehr Energie in sich tragen als die leichten Kräuselungen, hätte das intensivere Licht energiereicher sein und deshalb umso mehr Elektronen freischiessen sollen.

Auch die Frequenz sollte eigentlich keinen Einfluss haben – was die Energie betrifft, die ein Elektron im Metall aufnehmen kann, sollte kaum ein Unterschied sein, ob es von langen oder kurzen Wellen getroffen wird. Doch die kurzen Wellenlängen waren in der Lage, Elektronen freizusetzen, während die langen sie unbeeindruckt ließen, ganz egal wie „hoch“ sie waren.

Ein weiteres Rätsel stellte die Tatsache dar, dass die Elektronen zu schnell freigesetzt wurden. Es hätte eigentlich einige Zeit dauern sollen, bis genug Lichtenergie absorbiert war, doch schon bei sehr schwachem Licht hüpfen die Elektronen sofort aus dem Metall. Eine winzige Welle reichte also, sie herauszuschlagen. Insgesamt musste also etwas mit der einfachen Vorstellung von elektromagnetischen Wellen nicht stimmen.

Millikans Öltröpfchenversuch

1909 bestimmten Robert Millikan und Harvey Fletcher mit Öltröpfchen die elektrische Ladung des Elektrons. Sie sprühten geladene Öltröpfchen zwischen zwei geladene Metallplatten und bestimmten die Kraft, die notwendig war, sie in einem Schwebezustand zu halten. Es zeigte sich, dass das Öltröpfchen ein ganzzahliges Vielfaches einer bestimmten Ladung tragen musste, nämlich $1,6 \cdot 10^{-19}$ Coulomb. Dies musste die Ladung eines einzelnen Elektrons sein.

Einsteins Photonen-Geschosse

1905 erklärte Albert Einstein die verrückten Eigenschaften des photoelektrischen Effekts mit einer radikalen Idee. Dafür wurde ihm 1921 der Nobelpreis verliehen, nicht für seine Relativitätstheorie. Einstein griff Max Plancks Idee der Energiequanten auf und behauptete, dass Licht aus kleinen Energiepaketen besteht. Diese Quanten erhielten später den Namen Photonen. Einstein schlug vor, dass jeweils einzelne Photonen wie Geschosse die Elektronen aus dem

Metall herausschlagen sollten. Sie besaßen zwar keine Masse, doch trug jedes Photon einen bestimmten Energiebetrag mit sich, der proportional zu seiner Frequenz war. Blaue und ultraviolette Photonen trugen daher mehr Energie in sich als rote. Dies erklärte, warum die Energie der freigesetzten Elektronen mit der Frequenz des Lichts stieg und nicht mit der Intensität.

Ein rotes Photon konnte keine Elektronen freisetzen, denn dazu trug es nicht genug Energie in sich, ganz anders ein blaues. Ein ultraviolettes Photon hatte noch mehr Energie und erzeugte deshalb noch schnellere Elektronen. Veränderungen in der Helligkeit hatten dagegen keinen Einfluss. Genauso wie eine Fensterscheibe auch nicht von ganz vielen gespukten Kirschkernen durchschlagen wird, weil ihre jeweilige Energie zu klein ist, so wurden Elektronen auch dann nicht in Bewegung gesetzt, wenn man sie mit einer größeren Zahl zu schwacher roter Photonen beschoss. Auch das sofortige Einsetzen des Effekts wurde so klar: Photonen fliegen mit Lichtgeschwindigkeit, und es ist nur ein einziges nötig, um ein Elektron freizusetzen.

Einsteins Idee der Lichtquanten hob anfangs ab wie ein Luftballon aus Blei. Sie gefiel den Physikern ganz und gar nicht, denn sie liebten die Wellenschreibung des Lichts, die von den Maxwell-Gleichungen so schön zusammengefasst wurde. Aber eine wahre Flut von Experimenten bestätigte, dass die Energien der freigesetzten Elektronen linear mit der Lichtfrequenz stiegen und so wurde die Idee bald als richtig anerkannt.

Albert Einstein (1879–1955)

1905 war ein wunderbares Jahr für den in Deutschland geborenen Teilzeitphysiker Albert Einstein, der als Beamter im Schweizer Patentamt arbeitete. Albert Einstein veröffentlichte in der deutschen Zeitschrift *Annalen der Physik* drei physikalische Artikel. Sie erklärten die Brown'sche Bewegung und den photoelektrischen Effekt. Im dritten stellt er die spezielle Relativität auf, alle drei stellten durchbrechende Arbeiten dar. Einsteins Ansehen wuchs bis er 1915 seine allgemeine Relativitätstheorie veröffentlichte, die ihn zu einem der größten Physiker aller Zeiten machte. Vier Jahre später bestätigten Beobachtungen an einer Sonnenfinsternis seine allgemeine Relativitätstheorie, und er wurde weltberühmt. 1921 bekam Albert Einstein den Nobelpreis für seine Arbeiten zum photoelektrischen Effekt. 1933 siedelte Einstein in die USA um. Er unterzeichnete einen berühmten Brief, der Präsident Roosevelt davor warnte, dass die Deutschen vielleicht eine Atombombe entwickeln könnten. Dieser Brief führte zur Gründung des Manhattan-Projekts und damit zur Entwicklung der amerikanischen Atombombe.

07 Welle-Teilchen-Dualität

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts brach die Vorstellung zusammen, dass Licht und Elektrizität in Form von Wellen übertragen werde und dass feste Materie aus einzelnen Teilchen bestehe. Experimente wiesen nach, dass Elektronen genau wie Photonen Beugung und Interferenzen erfahren können – so wie Wellen. Wellen und Teilchen sind zwei Seiten derselben Medaille.

Einsteins Vorstellung, dass Lichtenergie in Paketen – den Photonen – transportiert wird und nicht in kontinuierlichen Wellen, war so umstritten, dass es beinahe zwei Jahrzehnte und viele weitere Überprüfungen dauerte, bis sie allgemein anerkannt wurde. Anfangs sah es so aus, als eröffnete sie die polarisierende Debatte aus dem 17. Jahrhundert wieder neu, woraus Licht überhaupt bestehe. Doch tatsächlich verkündete sie ein vollkommen neues Verständnis des Verhältnisses von Materie und Energie.

» Jede Frage hat zwei Seiten. «

Protagoras, 5. Jh. v. Chr.

Im 17. Jahrhundert hat Newton behauptet, Licht müsse aus Teilchen bestehen, denn es breitet sich geradlinig aus und wird sauber reflektiert. Christian Huygens und später Augustin-Jean Fresnel dagegen zeigten, dass Licht eine Welle sein müsse, denn es wird um Hindernisse herum gebeugt, reflektiert und es interferiert. James Clerk Maxwell zementierte diese Wellentheorie in den 1860er-Jahren durch seine vier Gleichungen, die den Elektromagnetismus beschrieben.

Einsteins Vorschlag, dass Licht aus Teilchen bestehe, sorgte für Aufruhr. Doch abgesehen davon baute sie auch eine wenig zufriedenstellende Zweideutigkeit auf, die wir auch heute noch als störend empfinden, denn Licht ist weder Welle noch Teilchen – es ist beides. Und das trifft auch auf alle anderen elektromagnetischen Phänomene zu.

Zeitleiste

1670

Newton entwickelt seine Korpuskel-Hypothese des Lichts

1801

Young führt seinen Doppelspaltversuch durch

1873

Maxwell veröffentlicht seine Gleichungen für den Elektromagnetismus

1895

Entdeckung der Röntgenstrahlen

1897

Thomson schlägt vor, dass Elektronen die Teilchen des elektrischen Feldes sind

Das Bestreben von Licht Eine Menge von Experimenten zeigen, dass das Verhalten von Licht wankelmütig ist. Unter bestimmten Umständen verhält es sich wie ein Strom von Torpedos, etwa beim photoelektrischen Effekt, in anderen aber wie eine Welle, zum Beispiel im Doppelspaltexperiment von Young. Immer wenn wir uns etwas ausdenken, um herauszufinden, was genau es nun ist, passt das Licht sein Verhalten so an, dass der Aspekt seines Charakters zum Vorschein kommt, den wir gerade untersuchen.

Die Physiker haben sich wirklich geschickte Versuche ausgedacht, um die „wahre Natur“ des Lichts herauszufinden. Doch keines konnte sein echtes Wesen enthüllen. Varianten des Doppelspaltversuchs von Young haben die Welle-Teilchen-Dualität des Lichts bis zur äußersten Grenze eingeschränkt, aber die Doppeldeutigkeit blieb.

Verringert man die Intensität des Lichts so stark, dass einzelne Photonen durch die Spalte gehen, ergibt sich, wenn man nur lange genug wartet, das gleiche Interferenzmuster – die individuellen Photonen häufen sich also so an, dass sich die vertrauten feinen Muster ergeben. Wenn man einen Spalt abdeckt, bilden die Photonen ein breites Beugungsbild. Öffnet man den Spalt wieder, tauchen die Streifen wieder auf.

Das erweckt den Eindruck als sei ein Photon gleichzeitig an zwei Stellen, so als ob es den Status des zweiten Spalts kenne. Es ist ganz egal, wie schnell man ist, das Photon lässt sich nicht austricksen. Schließt man einen Spalt, während das Photon fliegt, sogar wenn es den Spalt bereits durchquert hat, aber bevor es auf dem Schirm angekommen ist, es verhält sich immer richtig.

Louis de Broglie (1892–1987)

Als Louis de Broglie 1909 an der Sorbonne in Paris Geschichte zu studieren begann, wollte er eigentlich Diplomat werden, doch er wechselte sehr bald zur Physik. Nachdem er im ersten Weltkrieg am Eifelturm in der Telegrafie-Truppe gedient hatte, kehrte er an die Sorbonne zurück, um mathematische Physik zu betreiben. Von den Arbeiten Max Plancks über die Schwarzkörperstrahlung inspiriert, entwickelte de Broglie 1924 seine Theorie über die Dualität von Welle und Teilchen in seiner Doktorarbeit weiter. Er erhielt dafür 1929 den Nobelpreis. Er erklärte, dass er die Idee hatte, als er mit seinem Bruder Maurice über dessen Arbeit mit Röntgenstrahlung diskutierte, aus der man schließen konnte, dass Röntgenstrahlen sowohl Wellen als auch Teilchen waren.

1905

Einstein schlägt sein Lichtquanten-Konzept vor

1912

Von Laue erkennt, dass Röntgenstrahlen von Atomen gebeugt werden

1922

Compton streut Röntgenstrahlen an Elektronen

1924

De Broglie schlägt Welle-Teilchen-Dualität vor

1927

Davisson und Germer messen Elektronenbeugung

Tiefenstruktur

Röntgenkristallografie wird oft verwendet, um die Struktur neuer Materialien zu bestimmen. Chemiker und Biologen untersuchen damit den molekularen Aufbau. 1953 fand man damit die Doppelhelixstruktur der DNA. Damals schauten sich Francis Crick und James Watson, wie jeder weiß, Bilder von Röntgen-Interferenzmustern der DNA an, die Rosalind Franklin aufgenommen hatte, und erkannten, dass die Moleküle, die diese erzeugten, in einer Doppelhelix angeordnet sein mussten.

Das Photon verhält sich so, als ginge es gleichzeitig durch beide Spalte, aber wenn man es festlegen will, etwa indem man einen Detektor in einen Spalt baut, verschwindet das Interferenzmuster seltsamerweise. Wenn man das Photon wie ein Teilchen behandelt, dann verhält es sich auch so. Wie auch immer die Physiker das Photon behandelten, die Interferenzmuster tauchten auf oder verschwanden, je nachdem.

Materiewellen Die Welle-Teilchen-Dualität gilt nicht nur für Licht. 1924 schlug Louis-Victor de Broglie vor, dass

auch Materieteilchen – sogar alle Objekte – sich wie eine Welle verhalten könnten. Er wies allen Körpern, winzig oder klein, eine charakteristische Wellenlänge zu. Je größer die Objekte sind, desto kleiner ist ihre Wellenlänge. Ein Tennisball, der über den Platz fliegt, hat eine Wellenlänge von 10^{-34} Metern, was viel kleiner ist als der Durchmesser eines Protons. Weil makroskopische Objekte also winzige Wellenlängen haben, die viel zu klein sind, um sie wahrnehmen zu können, bemerken wir nicht, dass sie sich wie Wellen verhalten.

Drei Jahre später wurde de Broglies Idee bestätigt: Man fand heraus, dass Elektronen gebeugt werden können und sie interferieren wie Licht. Man wusste seit dem späten 19. Jahrhundert, dass elektrischer Strom durch Teilchen – den Elektronen – übertragen wird. 1897 hatte J. J. Thomson gezeigt, dass elektrische Ladungen ein Vakuum durchqueren können, genau wie Licht kein Medium benötigt, in dem es sich ausbreiten kann, also war ein Teilchen notwendig, das sie überträgt. Das passte allerdings nicht ganz so zu der Ansicht, dass elektromagnetische Felder sich wie Wellen verhalten.

1927 beschossen Clinton Davisson und Lester Germer an den Bell Labs in New Jersey, einen Nickelkristall mit Elektronen. Die Elektronen wurden von den Atomschichten im Kristallgitter gestreut und die wieder austretenden Strahlen vermischten sich und bildeten ein deutlich erkennbares Interferenzmuster. Elektronen konnten also interferieren, genau wie Licht. Sie verhielten sich wie eine Welle.

Eine ähnliche Technik wurde verwendet, um die Struktur von Kristallen zu untersuchen, indem man sie mit Röntgenstrahlen beschoss – die sogenannte

Röntgenkristallografie. Als die Strahlen 1895 von Wilhelm Conrad Röntgen entdeckt wurden, war ihr Ursprung zwar unklar, doch sehr bald erkannte man, dass es sich um hochenergetische elektromagnetische Strahlung handelte.

1912 erkannte Max von Laue, dass die kurzen Wellenlängen von Röntgenstrahlen mit den kleinen Abständen zwischen den Atomen in Kristallen vergleichbar waren, deshalb wurden einfallende Röntgenstrahlen von den Kristallschichten gebeugt, und man konnte die Geometrie des Kristalls aus den Positionen der hellen Flecken berechnen. Mit der gleichen Methode wurde in den 1950er-Jahren dann auch die Doppelhelixstruktur der DNA nachgewiesen.

Ein ganz ähnliches Experiment bewies 1922 Einsteins Photonenvorstellung. Arthur Compton gelang es, Röntgenstrahlen an Elektronen zu streuen und dabei die kleine Frequenzänderung zu messen, die sich dabei ergab – heute nennt man das den Compton-Effekt. Sowohl die Photonen der Röntgenstrahlung als auch die Elektronen verhielten sich dabei wie Billardkugeln. Einstein hatte recht. Alle elektromagnetischen Phänomene verhielten sich wie Teilchen.

Heute haben Physiker Welle-Teilchen-Verhalten auch bei Neutronen und Molekülen beobachtet, sogar in so großen wie den Fußball-Molekülen, den Buckminster-Fullerenen, die aus 60 und mehr Atomen bestehen.

„Für Materie müssen wir genauso wie für Strahlung, besonders für Licht, sowohl das Korpuskel- als auch das Strahlungskonzept einführen.“

Louis de Broglie, 1929

08 Rutherfords Atommodell

Ende des 19. Jahrhunderts begannen Physiker in das Atom einzudringen. Zuerst entdeckten sie die Elektronen, dann den harten Kern aus Protonen und Neutronen. Um erklären zu können, wodurch der Kern zusammenhielt, führten sie eine neue Elementarkraft ein, die starke Wechselwirkung.

Einst nahm man an, die Atome seien die kleinsten Bausteine der Materie, doch das änderte sich vor etwas mehr als einem Jahrhundert. Physiker begannen, das Atom zu zerlegen, und zeigten, dass es aus vielen Schichten aufgebaut war, genau wie eine russische Puppe, die Matroschka. Die erste Schicht war die des Elektrons. Dem Engländer Joseph John (J. J.) Thomson gelang es 1897 Elektronen aus Atomen freizusetzen, indem er einen elektrischen Strom durch ein Gas in einem Glaskolben schickte.

Er wusste wenig darüber, wie sie in der Materie verteilt waren, und schlug deshalb das Rosinenkuchenmodell des Atoms vor. Er stellte sich vor, die negativ geladenen Elektronen seien wie Rosinen in einem positiv geladenen Teig verteilt. Die Anziehungskraft zwischen den Elektronen und den positiven Ladungen hielt das Atom zusammen, weil sie im ganzen Kuchen gleichmäßig verteilt waren.

Die tieferen Schichten erkundete man 1909 in einem Experiment. Ernest Rutherford führte damals mit seinen Kollegen Hans Geiger und Ernest Marsden einen beeindruckenden Versuch durch, um das Rosinenkuchenmodell zu überprüfen. Sie beschossen eine hauchdünne Goldfolie, die gerade einmal aus etwa 1000 Atomlagen bestand, mit den recht schweren Alphateilchen – eine Form von Strahlung, die von Radium oder Uran abgegeben wird.

Sie erwarteten, dass alle Alphateilchen mehr oder weniger gerade durchgehen würden. Stattdessen wurde ein kleiner Bruchteil der Teilchen (etwa eines von

Zeitleiste

1897

Thomson entdeckt das Elektron

1904

Thomson überlegt sich das Rosinenkuchenmodell

1909

Rutherford experimentiert mit Goldfolien

Hunderttausend) von der Folie abgelenkt – ein paar wenige sogar so stark, dass sie wieder zurückflogen, als ob sie auf etwas sehr Hartes wie einen Baseballschläger getroffen wären. Rutherford erkannte, dass es innerhalb der Goldatome, aus denen die Folie bestand, einen sehr harten massiven Kern geben musste.

Der Begriff „Kern“ Thomsons Rosinenkuchenmodell konnte dies ganz gewiss nicht erklären: Wenn ein Atom nur eine Art Paste aus positiv und negativ geladenen Teilchen war, wäre keines davon schwer genug, das massive Alphateilchen zurückzuwerfen. Deshalb mussten die Goldatome einen festen Kern haben. Rutherford nannte ihn „nucleus“ nach dem lateinischen Wort für den Kern einer Nuss. Damit war die Nuklearphysik, die Physik der Atomkerne, geboren.

Physiker und Chemiker kannten die Massen der verschiedenen Elemente des Periodensystems. 1815 hatte William Prout bemerkt, dass alle Atome in etwa ein Vielfaches der Masse des Wasserstoffatoms haben. Doch damit konnten die Gewichte der Atome nicht so einfach erklärt werden. Das zweite Element zum Beispiel, das Helium, war nicht doppelt, sondern viermal so schwer wie Wasserstoff.

Nur wenig mehr als ein Jahrhundert später, 1917, zeigte Rutherford, dass andere Elemente tatsächlich Wasserstoffkerne enthalten – diese positiv geladenen Teilchen wurden abgegeben, wenn Alphateilchen (Heliumkerne) durch gasförmigen Stickstoff flogen, wobei dieser in Sauerstoff umgewandelt wurde. Das war das erste Mal, dass es gelungen war, ein Element absichtlich in ein anderes umzuwandeln. Um Verwechslungen mit dem Wasserstoff zu vermeiden, nannte

Ernest Rutherford 1871–1937

Der Neuseeländer Rutherford war ein moderner Alchemist, dem es gelang, ein Element (Stickstoff) durch radioaktive Strahlung in ein anderes (Sauerstoff) umzuwandeln. Der vor Ideen sprühende Leiter des Cavendish Laboratory in Cambridge nahm zahlreiche zukünftige Nobelpreisträger unter seine Fittiche. Sein Spitzname „Krokodil“ findet sich heute noch im Logo seines Labors. 1910 führten seine Untersuchungen der Streuung von Alphastrahlen und der inneren Struktur des Atoms zur Entdeckung des Atomkerns.

„Es war, als hätte man eine 15-Zoll-Granate auf ein Stück Seidenpapier abgefeuert, und sie kam zurück und traf einen.“
Ernest Rutherford, 1871–1937

1911

Rutherford entwickelt sein Atomkernmodell

1918

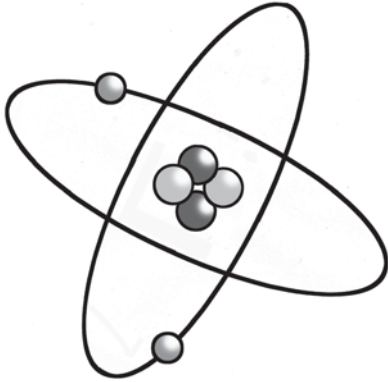
Rutherford isoliert das Proton

1932

Chadwick entdeckt das Neutron

1934

Yukawa schlägt die starke Wechselwirkung vor



Der größte Teil der Atommasse sitzt in seinem Kern.

Rutherford den bloßen Wasserstoffkern „Proton“, nach dem griechischen Wort für „das Erste“.

Bestandteile des Kerns Um die Atomgewichte zu erklären, stellte sich Rutherford vor, dass der Kern aus einer bestimmten Zahl von Protonen und einigen Elektronen bestand, die deren Ladung teilweise neutralisierten. Der Rest der Elektronen befand sich außerhalb des Kerns auf Schalen. Wasserstoff, das leichteste aller Elemente, hat einen Kern, der nur aus einem Proton bestand, der von einem Elektron umkreist wurde. Helium, so dachte er, bestand aus vier Protonen und zwei Elektronen im Kern – damit sich die doppelte positive Ladung eines Alphateilchens ergab – und zwei weitere kreis-

ten weiter außen um ihn herum.

Die Vorstellung, dass sich Elektronen im Kern befinden, stellte sich sehr schnell als falsch heraus. 1932 fand Rutherfords Mitarbeiter James Chadwick ein neues Teilchen. Es war neutral, hatte die gleiche Masse wie ein Proton und konnte Protonen aus Paraffin herausschlagen. Man nannte es Neutron, und das Atommodell musste modifiziert werden.

Die Radiokarbondatierung

Eine schwere Form des Kohlenstoffs wird dazu verwendet, mehrere tausend Jahre alte archäologische Fundstücke zu datieren, wie etwa Holz oder Kohle aus Feuerstellen. Kohlenstoff hat normalerweise ein Atomgewicht von 12 Atomeinheiten, manchmal kommt es aber auch mit 14 Atomeinheiten vor. Kohlenstoff-14 (C-14) ist instabil und zerfällt unter Abgabe eines Betateilchens. Es dauert 5730 Jahre, bis die Hälfte einer bestimmten Menge C-14 in Stickstoff-14 zerfallen ist. Weil die C-14-Menge in der Atmosphäre konstant ist und es nur von lebenden Organismen aufgenommen wird, kann man diesen langsamen Zerfall nutzen, um das Alter zu bestimmen.

Die Atomgewichte konnten nun erklärt werden, wenn man sich vorstellte, dass die Kerne aus Protonen und Neutronen aufgebaut sind. Ein Kohlenstoff-12-Atom besteht zum Beispiel aus sechs Protonen und sechs Neutronen im Kern – so ergibt sich eine Masse von 12 Atomeinheiten – und sechs Elektronen, die darum herumkreisen. Abweichende Formen der Elemente, bei denen es mehr oder weniger Neutronen im Kern gibt als üblich, werden Isotope genannt.

Der Kern eines Atoms ist winzig. Er hat nur einen Durchmesser von wenigen Femtometern (10^{-15} m, eine Zahl mit 14 Nullen hinter dem Komma). Der Atomkern ist also hunderttausendmal kleiner

als die Umlaufbahn der Elektronen, die ihn umgeben. Es ist vergleichbar mit einem Fußballfeld in der Mitte der Erde.

Der Kern ist auch sehr schwer und dicht – so gut wie die gesamte Masse des Atoms, die aus mehreren Dutzend Protonen und Neutronen bestehen kann, ist auf dieses winzige Volumen zusammengequetscht. Aber wie können all diese positiv geladenen Protonen zusammenhalten? Warum stoßen sie einander nicht ab, sodass der Kern auseinanderfällt? Die Physiker mussten eine neue Art von Elementarkraft einführen, die die Kernbausteine zusammenhält, sie nannten sie starke Wechselwirkung oder starke Kernkraft.

Die starke Wechselwirkung hat nur eine sehr kurze Reichweite, sodass sie nur im Kern wichtig ist. Außerhalb ist sie viel schwächer als die elektromagnetische Kraft. Wenn man also zwei Protonen und ein Neutron nehmen und sie zusammendrücken könnte, würde man zuerst ihre Abstoßung bemerken. Wenn man sie aber immer näher aneinanderbringt, werden sie irgendwann zusammenschnappen wie Bausteine. Wenn man versucht, sie noch weiter zusammenzupressen, würden sich die Protonen nicht bewegen. Protonen und Neutronen werden also sehr stark im kompakten und harten Kern festgehalten.

Mit der Gravitationskraft, dem Elektromagnetismus und der schwachen Wechselwirkung ist die starke Wechselwirkung eine der vier Elementarkräfte.

„Ich glaube sehr an die Einfachheit der Dinge, und wie du wahrscheinlich weißt, tendiere ich dazu, verbissen allgemeine und einfache Ideen zu bevorzugen, bis mich Beweise von etwas Besserem überzeugen.“

Ernest Rutherford, 1936

09 Quantensprünge

Elektronen umkreisen den Kern auf Schalen mit unterschiedlichen Energien wie Planeten die Sonne. Niels Bohr entwickelte die Vorstellung, dass Elektronen zwischen diesen Schalen springen können und dabei Licht mit der entsprechenden Energiedifferenz abstrahlen oder absorbieren. Diese Sprünge kennt man heute als Quantensprünge.

1913 verbesserte der dänische Physiker Niels Bohr das Atommodell von Rutherford, indem er beschrieb, wie die Elektronen um den Kern herum angeordnet sind. Bohr stellte sich vor, dass die negativ geladenen Elektronen auf bestimmten Bahnen um den positiv geladenen Kern kreisen, genau wie Planeten um die Sonne. Er erklärte auch, warum sich ihre Orbits in bestimmten Entfernungen vom Zentrum befinden, wobei er die Atomstruktur mit der Quantenphysik zusammenführte.

» Alles, was wir real nennen, ist aus etwas gemacht, was wir nicht als wirklich real betrachten können. «

Niels Bohr

Die Elektronen werden durch elektrostatische Kräfte auf ihrer Bahn um den Kern gehalten – also durch die gegenseitige Anziehung von positiven und negativen Ladungen. Aber wie er wusste, sollten beschleunigte Ladungen Energie verlieren, denn genau wie ein Wechselstrom in einem Radiosender strahlen beschleunigte Elektronen elektromagnetische Wellen ab.

Die ersten Theorien des Atoms sagten deshalb auch voraus, dass die Elektronen Energie verlieren und allmählich auf Spiralen in den Kern fallen sollten. Dabei müssten sie eigentlich elektromagnetische Wellen von immer höherer Frequenz abstrahlen – wie in einem ununterbrochenen kontinuierlich höher werdenden Kreischton. In der Realität passierte das aber offensichtlich nicht. Atome fallen nicht spontan zusammen, und man hat auch nie ein Zeichen für ein hochfrequentes Quieken gefunden.

Zeitleiste

1897

Thomson entdeckt das Elektron

1901

Planck schlägt Energiequanten vor

1904

Thomson entwickelt das Rosinenkuchenmodell

Spektrallinien Stattdessen strahlen Atome nur Licht mit genau definierten Wellenlängen ab. Jedes Element erzeugt eine charakteristische Reihe von „Spektrallinien“, eine Art von spezifischer Tonleiter, nur mit Licht. Bohr meinte, diese „Noten“ hingen mit den Energien der Elektronen in ihren Umlaufbahnen zusammen. Nur auf ganz bestimmten Schalen war das Elektron stabil und verlor keine Energie.

Bohr postulierte, dass die Elektronen zwischen diesen Schalen auf und ab springen können, wie auf den Sprossen einer Leiter. Dabei führen sie die berühmten Quantensprünge durch. Die Energiedifferenz zwischen diesen Sprossen gewinnen oder verlieren sie, indem sie Licht mit der passenden Energie absorbieren oder abgeben. Dies erzeugt die Spektrallinien.

Folglich können Elektronen nur Licht mit einem bestimmten Energiepaket aufnehmen – es ist also quantisiert, genau wie Max Planck es bei seiner Erklärung der Schwarzkörperstrahlung beschrieben hatte. Die Energieabstände zwischen den Orbits können als ganzzahliges Vielfaches der Frequenz des Lichts und einer festen Einheit – der sogenannten Planck-Konstante (h) – ausgedrückt werden.

Auch der Drehimpuls der jeweils nächsten Schale ist das ein-, zwei-, drei- oder vierfache usw. der ersten. Diese ganzen Zahlen für die verschiedenen Energiezustände der Elektronen werden als Hauptquantenzahl bezeichnet. $n = 1$ entspricht dem tiefsten Orbit, $n = 2$ dem nächsten usw.

Typen der chemischen Bindung

Kovalente Bindung: Zwei Atome teilen sich Elektronenpaare.

Ionenbindung: Ein Atom gibt ein Elektron ab, ein anderes Atom nimmt das Elektron auf. Es entstehen positiv und negativ geladene Ionen, die sich gegenseitig anziehen.

Van-der-Waals-Bindung: Polarisierte Moleküle ziehen sich durch elektrostatische Kräfte an.

Metallische Bindung: Ein Gitter aus positiv geladenen Atomrümpfen wird von einem Elektronensee umspült.

1905

Einstein schlägt sein Lichtquanten-Konzept vor

1911

Rutherford entwickelt sein Atomkernmodell

1913

Bohr entwickelt ein Modell des Atoms

1927

Schrödinger schlägt seine Wellengleichung vor

Auf diese Weise konnte Bohr die Energiezustände im Wasserstoffatom beschreiben, dem einfachsten Atom mit nur einem Elektron, das um ein einzelnes Proton kreist. Und diese Energien passten sehr gut zu den Spektrallinien des Wasserstoffs – womit ein altes Rätsel gelöst war.

Es war falsch zu denken, die Aufgabe der Physik sei es herauszufinden, wie die Natur beschaffen ist. Die Physik beschäftigt sich damit, was wir über die Natur sagen.
Niels Bohr

Bohr weitete sein Modell auf schwerere Atome mit mehr Protonen und Neutronen im Kern und entsprechend mehr Elektronen aus. Er nahm dabei an, dass jede Umlaufbahn eine bestimmte Zahl von Elektronen aufnehmen kann, und dass diese vom untersten Energieniveau beginnend aufgefüllt werden. Wenn ein Niveau voll war, sammelten sich die Elektronen in der nächst höheren Schale an.

Weil der „Blick“ der äußeren Elektronen auf den Kern von den inneren Elektronen teilweise abgeschirmt wird, fühlen diese eine schwächere Anziehungskraft, als wenn sie allein wären. Außerdem stoßen sich benachbarte Elektronen gegenseitig ab, deshalb unterscheiden sich die Energieniveaus größerer Atome von denen im Wasserstoffatom. Kompliziertere modernere Modelle leisten allerdings noch mehr als das Bohr'sche Atommodell, um diese Unterschiede zu erklären.

Die Untersuchung der Elektronenhülle Das Bohr'sche Schalenmodell erklärt die verschiedenen Atomgrößen und wie sie sich im Periodensystem ändern. Diejenigen mit nur wenigen schwach gebundenen äußeren Elektronen sind größer als solche mit vollen äußeren Schalen. Deshalb sind Elemente wie Fluor und Chlor, die im Periodensystem rechts stehen, tendenziell eher kompakter als solche auf der linken Seite wie Lithium und Natrium.

Das Modell erklärt auch, warum Edelgase inert sind – ihre äußeren Schalen sind voll und können keine Elektronen aufnehmen und nur schwer welche abgeben, um mit anderen Atomen zu reagieren. Die erste Schale ist schon mit zwei Elektronen voll. Deshalb hat Helium mit seinen zwei Protonen im Kern, der zwei Elektronen an sich gebunden hat, eine volle äußere Schale und reagiert nicht. Die zweite Schale kann acht Elektronen aufnehmen – beim nächsten Edelgas, dem Neon, ist auch sie gefüllt.

Bei der dritten und den weiteren Schalen wird es komplizierter, denn dann sind die Schalen nicht mehr kugelförmig. Die dritte Schale kann acht Elektronen aufnehmen, doch daneben gibt es eine weitere hantelförmige Konfigura-

tion, in die zehn weitere passen – damit können die Übergangselemente wie Eisen und Kupfer erklärt werden.

Die Formen der höheren Elektronenschalen gehen über das einfache Modell von Bohr hinaus und können sogar heute noch nicht so einfach berechnet werden. Doch sie bestimmen die Form von Molekülen, denn chemische Bindungen entstehen durch einen Austausch von Elektronen. Bei sehr großen Atomen, wie Eisen, funktioniert das Bohr'sche Modell nicht mehr besonders gut. Es ist auch nicht in der

Lage, die Stärke und die detaillierte Struktur der Spektrallinien zu erklären. Bohr glaubte zu der Zeit, als er sein Modell entwickelte, nicht an Photonen. Es basierte ganz auf der klassischen Theorie des Elektromagnetismus.

Bohrs Modell wurde in den späten 1920er-Jahren durch quantenmechanische Versionen abgelöst. Diese berücksichtigen die Welleneigenschaften der Elektronen und behandeln die Schalen als eine Art Wahrscheinlichkeitswolke – also eine Gegend, in der sich das Elektron mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit aufhält. Zu einem bestimmten Zeitpunkt ist es nicht möglich zu sagen, wo genau sich das Elektron gerade befindet.

Aber auch heute noch ist die Vorstellung von Bohr für die Chemie sehr nützlich, denn sie erklärt unzählige Muster, angefangen beim Periodensystem der Elemente bis hin zum Spektrum des Wasserstoffatoms.

Springende Elektronen

Elektronen können von einer Schale zur nächsten hüpfen, dabei geben sie elektromagnetische Strahlung ab – oder nehmen sie auf – deren Frequenz (ν) proportional zur Energiedifferenz (ΔE) zwischen den beiden Schalen ist, entsprechend dem Planck'schen Gesetz:

$$\Delta E = E_2 - E_1 = h\nu,$$

wobei h die Planck-Konstante ist.

10 Fraunhofer-Linien

Ein Atom kann Licht absorbieren oder abstrahlen, wenn eines seiner Elektronen von einer Schale auf eine andere springt. Weil die Elektronenschalen genau definierte Energien haben, hat das Licht nur ganz bestimmte Frequenzen und erscheint deshalb, wenn es durch ein Gitter oder ein Prisma zerlegt wird, als eine Reihe von Streifen.

Seit Isaac Newton im 17. Jahrhundert einen Lichtstrahl der Sonne durch ein Prisma fallen ließ, wissen wir, dass Licht aus einer Mischung der Farben des Regenbogens besteht. Doch wenn man genauer hinsieht, entdeckt man, dass das Sonnenspektrum viele schwarze Linien enthält – als wäre ein Barcode hineingedruckt. Diese Linien kennzeichnen bestimmte Wellenlängen des Lichts, die im Spektrum fehlen, weil sie von den Gasen der Sonnenatmosphäre absorbiert wurden.

Jede Linie gehört zu einem bestimmten chemischen Element in verschiedenen Energiezuständen. Verbreitet sind die von Wasserstoff und Helium, aus denen die Sonne vor allem besteht, und von Kohlenstoff, Sauerstoff und Stickstoff, die durch Fusion erzeugt werden. Zeichnet man dieses Linienmuster auf, kann man die chemische Zusammensetzung der Sonne bestimmen.

Die Absorptionslinien im Sonnenspektrum wurden erstmals im Jahre 1802 von dem englischen Astronomen William Hyde Wollaston beobachtet, doch genauer untersucht wurden sie erst im Jahre 1814 von dem deutschen Linsensmacher Joseph von Fraunhofer, der ihnen auch ihren Namen gab. Er konnte mehr als 500 Linien unterscheiden; mit modernerer Ausrüstung entdecken wir heute sogar mehrere Tausend davon.

Die deutschen Chemiker Gustav Kirchhoff und Robert Bunsen fanden in den 1860er-Jahren durch Laboruntersuchungen heraus, dass jedes Element sein eindeutiges Streifenmuster aus Absorptionslinien hat – jedes hat einen eigenen Barcode. Bei diesen Frequenzen können die Elemente aber auch Licht abstrah-

Zeitleiste

1672

Newton enthüllt das Spektrum des weißen Lichts

1801

Youngs Doppelspalt-Experiment

1802

Wollaston bemerkt dunkle Linien im Sonnenspektrum

len. Neonröhren geben zum Beispiel eine Reihe heller Linien ab, die den Übergängen in den Energieebenen des Neongases in der Röhre entsprechen.

Die genaue Frequenz einer Spektrallinie korrespondiert zur Energie eines Quantensprungs zwischen zwei Energieniveaus in einem bestimmten Atom. Wenn sich das Atom in einem ionisierten Gas befindet – etwa in einer Neonröhre – werden Elektronen durch Stöße zweier Neonatome auf ein höheres Energieniveau gehoben und geben diese Energie nur wenig später durch die Abstrahlung eines Photons, dessen Energie der Energiedifferenz entspricht, wieder ab.

Kalte Gase hingegen können Energie von einer hinter ihr liegenden Lichtquelle absorbieren, dabei werden ihre Elektronen auf ein höheres Energieniveau gehoben. Dies führt zu dunklen Absorptionslinien – einer Lücke – im Spektrum der Lichtquelle im Hintergrund. Die Untersuchung des Lichts, das von Elementen ausgeht, die Spektroskopie, ist ein wichtiges Werkzeug, um die Bestandteile eines Materials herauszufinden.

Beugungsgitter Statt Glasprismen, die Licht nicht stark aufspalten können und relativ unhandlich sind, kann man in einen Lichtstrahl auch eine Glasfläche einführen, in die eine Reihe enger paralleler Linien geritzt wurde. Man nennt so etwas Beugungsgitter. Fraunhofer stellte das erste Gitter aus eng beieinanderliegenden Drähten her.

Gitter sind viel nützlicher als Prismen, weil sie Licht stärker aufspalten. Die Funktionsweise der Gitter beruht auf den Welleneigenschaften des Lichts. Licht, das durch einen Spalt des Gitters fällt, wird durch Beugung abgelenkt; der Ablenkwinkel ist proportional zur Wellenlänge des

Joseph von Fraunhofer (1787–1826)

Der in Bayern geborene Joseph von Fraunhofer wurde bereits mit 11 Jahren Waise und begann wenig später eine Lehre zum Glasmacher. Als das Haus mit der Werkstatt, in der er ab 1801 arbeitete, einstürzte, wurde er von einem bayerischen Prinzen – Joseph Maximilian I – gerettet, der sich in der Folge darum kümmerte, dass von Fraunhofer studieren konnte. Von Fraunhofer erhielt eine Anstellung am Optischen Institut, dass sich durch sein Schaffen zu einem damals auf der ganzen Welt bekannten Hersteller von optischen Gläsern und Instrumenten entwickelte. Schließlich wurde er Direktor und Teilhaber des Optischen Instituts. Doch wie viele Glasmacher seiner Zeit starb er sehr jung – mit 39 Jahren – an Lungentuberkulose.

1814

Fraunhofer misst Hunderte von Linien

1860er

Kirchhoff und Bunsen finden heraus, dass die Linien von den Elementen stammen

„Alle wesentlichen Gesetze der Spektrallinien und der Atomtheorie stammen ursprünglich aus der Quantentheorie. Sie ist das geheimnisvolle Instrument, auf dem die Natur ihre Musik der Spektren spielt, und nach ihrem Rhythmus regelt sie die Struktur der Atome und Atomkerne.“

Arnold Sommerfeld, 1919

Lichts und umgekehrt proportional zur Breite des Spalts. Sehr dünne Spalte brechen das Licht also stärker, und rotes Licht wird stärker gebrochen als blaues.

Wenn zwei oder mehr Spalte ins Spiel kommen, treten Interferenzen zwischen den einzelnen Wellenzügen auf – Maxima und Minima der Lichtwellen verstärken sich oder löschen einander aus, woraus ein Muster aus hellen und dunklen Streifen auf einem Beobachtungsschirm entsteht, die sogenannten Beugungsmuster. Diese entstehen aus der Überlagerung zweier Effekte: Es entsteht ein Muster aus dem Einfachspalt, doch innerhalb dieses Streifens gibt es eine feinere Reihe von Streifen, deren Abstand umgekehrt proportional zum Abstand der Spalte ist.

Beugungsgitter sind eine größere Version von Youngs Doppelspaltexperiment. Weil es statt zwei viele Spalte gibt, sind die Beugungsmuster heller und schärfer. Jeder Streifen ist ein Minispektrum. Physiker können maßgeschneiderte Gitter bauen, um das Spektrum des Lichts mit einer immer feiner werdenden Auflösung zu zerlegen, indem sie die Dichte und die Größe der Spalte variieren. Gitter werden in der Astronomie häufig eingesetzt, um das Licht von Sternen und Galaxien zu analysieren und so herauszufinden, woraus sie bestehen.

Analysen Ein schwarzer Strahler wie unsere Sonne hat zwar ein glattes rotblau-grünes Spektrum, doch Atome emittieren nur Licht genau definierter Frequenzen. Dieser Barcode der Spektrallinien hängt mit den Energieniveaus der Elektronen in ihnen zusammen. Die Wellenlängen der Elemente wie Wasserstoff, Helium und Sauerstoff sind aus Laborexperimenten sehr genau bekannt.

Helle Emissionslinien entstehen, wenn ein Elektron aus einem höheren Energieniveau in eine tiefer liegende Schale zurückfällt und dabei ein Photon abgibt. Absorptionslinien treten auf, wenn Atome in „Licht gebadet“ werden, sodass Licht mit der richtigen Energie ein Elektron in eine höhere Schale stoßen kann.

Dann erscheint der Barcode als schwarze Streifen vor einem hellen Hintergrund.

Die genaue Frequenz der Linien hängt vom Energiezustand der Atome ab und davon, ob sie ionisiert sind oder nicht – in sehr heißen Gasen können die Elektronen abgespalten sein. Weil die Spektrallinien sehr genau sind und empfindlich auf Einflüsse reagieren, werden sie dazu verwendet, viele grundlegende Aspekte der Physik eines Gases zu untersuchen. Die Linien werden in heißen Gasen aufgrund der Bewegung der Atome breiter, woraus man auf deren Temperatur schließen kann. Die relative Stärke der verschiedenen Linien kann uns zudem verraten, wie stark ein Gas ionisiert ist.

Aber wenn man genauer hinsieht, wird alles noch komplizierter – weil es innerhalb der Spektrallinien noch eine feinere Struktur gibt, können wir Rückschlüsse auf die Natur des Elektrons selbst ziehen, sodass wir ein Instrument haben, um die Eigenschaften eines Atoms auf dem Quantenmaßstab zu untersuchen.

Rotverschiebungen

Weil die Frequenzen der Spektren genauestens bekannt sind, werden sie in der Astronomie auch dazu verwendet, Entfernungen und Geschwindigkeiten zu messen. Ganz ähnlich wie der Ton eines Martinshorns höher wird, wenn das Rettungsfahrzeug auf uns zu fährt, und dann tiefer, wenn es sich von uns entfernt – man nennt das Phänomen Doppler-Effekt – erscheinen auch Lichtwellen gestreckt, wenn sich ein Stern oder eine Galaxie von uns wegbewegt. Die Spektrallinien erreichen uns dann bei leicht höheren Wellenlängen, und der Unterschied wird Rotverschiebung genannt. Spektrallinien von Objekten, die sich auf uns zu bewegen, erscheinen bei kürzeren Wellenlängen, bekannt als Blauverschiebung. Auf einem großen Maßstab beweist die Tatsache, dass die meisten Galaxien rotverschoben sind, sie sich also von uns wegbewegen, dass sich das Universum ausdehnt.

11 Zeeman-Effekt

Wenn man Spektrallinien genauer unter die Lupe nimmt, findet man noch feinere Strukturen. In den 1920er-Jahren zeigten Experimente, dass die Ursache dafür in einer ungewöhnlichen Eigenschaft der Elektronen liegt, ihrem Spin. Elektronen verhalten sich wie geladene Kugeln, die sich drehen, deshalb verändern Wechselwirkungen mit magnetischen oder elektrischen Feldern ihre Energiezustände ein wenig.

Wenn heißes Wasserstoffgas glüht, emittiert es eine Reihe von Spektrallinien. Diese entstehen, wenn Elektronen in den Atomen einen Quantensprung machen, also von einem höheren Energieniveau auf ein niedrigeres zurückfallen und dabei Energie abgeben. Jede Linie im Wasserstoffspektrum korrespondiert mit einem bestimmten Übergang, bei dem die Energiedifferenz zwischen den beiden Elektronenzuständen in Licht mit der entsprechenden Frequenz umgewandelt wird.

Wenn ein Elektron vom zweiten Energieniveau auf das erste fällt, wird Licht mit einer Wellenlänge von 121 Nanometern abgestrahlt (ein nm ist ein Milliardstel Meter), also im ultravioletten Teil des Spektrums. Springt das Elektron vom dritten ins erste Energieniveau, ist die Wellenlänge noch kürzer, nämlich 103 nm; von der vierten sind es nur noch 97 nm. Weil die Elektronen in den äußeren Schalen immer schwächer an das Atom gebunden sind, werden die Unterschiede zwischen den Energieniveaus immer kleiner. Deswegen liegen die Linien für Sprünge auf eine gegebene Schale in Richtung des kurzwelligen Spektralbereichs immer näher zusammen.

Die Spektrallinien, die daher kommen, dass Elektronen auf ein bestimmtes Energieniveau zurückfallen, werden in „Serien“ zusammengefasst. Beim Wasserstoff, dem meistverbreiteten Element im Universum, werden die Übergänge auf die ersten Schalen nach Wissenschaftlern benannt. Die Übergänge auf die erste Schale heißen Lyman-Serie, nach Theodore Lyman, der sie zwischen 1906 und 1914 entdeckt hat. Die erste Linie des Spektrums (von Niveau 2 nach 1)

Zeitleiste

1896

Zeeman beobachtet
den Zeeman-Effekt

1908

Hale beobachtet den Zeeman-
Effekt in Sonnenflecken

1913

Johannes Stark entdeckt
den Stark-Effekt

heißt Lyman- α -Linie, die zweite (3 nach 1) Lyman- β -Linie usw.

Die Sprünge in das zweite Energieniveau werden als Balmer-Serie bezeichnet, nach Johann Balmer, der für sie 1885 eine Formel gefunden hat. Viele dieser Linien liegen im sichtbaren Bereich des Spektrums. Die Linien, die von Sprüngen auf das dritte Energieniveau kommen, werden als Paschen-Serie bezeichnet, nach Friedrich Paschen, der sie 1908 beobachtete. Sie liegen im Infraroten.

Weitere Untersuchungen zeigten, dass diese Spektrallinien nicht rein waren, sondern eine Unterstruktur aufwiesen. Mit einer sehr hohen Auflösung konnte man bemerken, dass eine Linie des Wasserstoffs nicht aus einer, sondern aus zwei Linien besteht, die sehr nahe beieinanderliegen. Die Energieniveaus der Elektronen, die sie erzeugen, müssen also in mehrere Schichten unterteilt sein.

Magnetismus in Sonnenflecken

1908 beobachtete der Astronom George Ellery Hale den Zeeman-Effekt im Licht von Sonnenflecken, den dunklen Regionen auf der Sonnenoberfläche. Im Licht von helleren Gegenden verschwand der Effekt, woraus man schließen kann, dass es in Sonnenflecken starke Magnetfelder geben muss. Indem er den Abstand der Teillinien bestimmte, konnte er auf die Stärke des Feldes zurückschließen. Er konnte außerdem zeigen, dass es Symmetrien in der magnetischen Richtung der Sonnenflecken gab, so wiesen zwei Flecken auf beiden Seiten des Sonnenäquators zum Beispiel unterschiedliche Polaritäten auf.

Silberkugeln In einem berühmt gewordenen Experiment schossen 1922 Otto Stern und Walther Gerlach einen Strahl aus Silberatomen aus einem heißen Ofen durch ein Magnetfeld. Der Strahl teilte sich in zwei auf und erzeugte zwei Punkte auf einer Fotoplatte. Stern und Gerlach hatten Silber gewählt, zum einen, weil man es mit einer Fotoemulsion aufspüren konnte, und zum anderen, weil es ein einzelnes Elektron auf der äußeren Schale besitzt. Ihr Ziel war die Untersuchung der magnetischen Eigenschaften von Elektronen.

Wenn die Silberatome mit ihren einzelnen Elektronen durch das Magnetfeld fliegen, verhalten sie sich wie kleine Stabmagnete und erfahren eine Kraft, deren Stärke proportional zum Gradienten des externen Magnetfelds ist. Stern und Gerlach erwarteten, dass das magnetische Moment von einem Bahndrehimpuls stammt und dass

Ein Elektron ist nicht mehr (und nicht weniger) hypothetisch als ein Stern.

Arthur Stanley Eddington, 1932

1922

Der Stern-Gerlach-Versuch zeigt, dass der Magnetismus von Elektronen quantisiert ist

1925

Goudsmit und Uhlenbeck schlagen vor, dass Elektronen sich drehende geladene Kugeln sind

„Es gab eine Zeit, als wir wissen wollten, was ein Elektron ist. Diese Frage wurde nie beantwortet. Es gibt keine vertrauten Vorstellungen, in die man das Elektron packen könnte. Es steht immer noch auf der Warteliste.“

Arthur Stanley Eddington, 1928

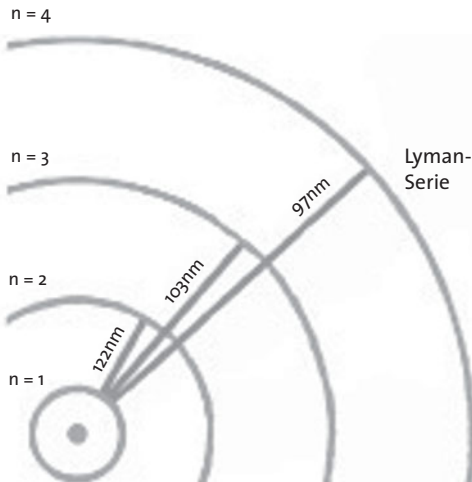
deshalb drei Kleckse auf ihrer Detektorplatte entstehen sollten. Doch der Strahl spaltete sich in zwei Einzelstrahlen auf und erzeugte zwei Punkte. Das bedeutete, dass die „Elektronenmagnete“ nur zwei Orientierungen annehmen konnten. Das war sehr ungewöhnlich.

Elektronenspin Aber wie kann das Elektron überhaupt magnetisch sein? 1925 schlugen Samuel Goudsmit und George Uhlenbeck vor, dass sich das Elektron wie eine sich drehende geladene Kugel verhalten könnte – eine Eigenschaft, die Spin des Elektrons genannt wird. Nach den Regeln des Elektromagnetismus erzeugt eine beschleunigte Ladung ein Magnetfeld. Der Strahl im

Stern-Gerlach-Versuch spaltet sich in zwei auf, weil sich das Elektron in zwei Richtungen drehen kann – diese werden mit *up* und *down* bezeichnet.

Diese beiden Orientierungen erklären anschaulich auch die feine Aufspaltung der Spektrallinien – es gibt einen kleinen Energieunterschied zwischen Elektronen, deren Magnetfeld in die gleiche Richtung zeigt wie das von außen angelegte, und solchen, deren Magnetfeld entgegengesetzt gerichtet ist.

Der quantenmechanische Spin der Elektronen ist nicht wirklich eine Bewegung, sondern eine innere Eigenschaft der Teilchen. Um zu beschreiben, ob der Spin *up* oder *down* ist, weisen die Physiker den Elektronen und anderen Teilchen eine Spinquantenzahl zu, die bei Elektronen die Werte plus oder minus $1/2$ annehmen kann.



Elektronen, die in einem Wasserstoffatom zwischen verschiedenen Energieniveaus springen, strahlen Licht mit bestimmten Wellenlängen ab. Alle Linien, die von Sprüngen auf ein bestimmtes Energieniveau herrühren werden Serien genannt.

Zwischen Elektronen mit Spin und anderen geladenen Teilchen und elektromagnetischen Phänomenen – angefangen bei der eigenen Ladung des Elektrons und der des Kerns bis hin zu externen Feldern – kann es zu vielen verschiedenen Wechselwirkungen kommen. Deshalb können Spektrallinien auf sehr komplizierte Art und Weise aufgespalten sein.

Die Aufspaltung der Linien, wenn sich die Elektronen in einem Magnetfeld befinden, kennt man heute als Zeeman-Effekt, nach dem niederländischen Physiker Pieter Zeeman. Man kann sie zum Beispiel im Licht von Sonnenflecken beobachten. Die Aufspaltung der Linien aufgrund eines elektrischen Feldes wird Stark-Effekt genannt, nach dem deutschen Physiker Johannes Stark.

Die Auswirkungen des Stern-Gerlach-Versuches waren gewaltig – es war das erste Mal, dass Quanteneigenschaften eines Teilchens im Labor gezeigt werden konnten. Es folgten sehr bald weitere Tests durch Wissenschaftler, die zum Beispiel zeigten, dass die Kerne mancher Atome einen quantisierten Drehimpuls hatten – der ebenfalls mit dem Spin der Elektronen wechselwirkt, sodass sich eine Hyperfeinstruktur ergibt, und dass der Spin der Elektronen durch Wechselfelder dazu gebracht werden kann, von einem Wert in den anderen überzugehen. Dieser Entdeckung führte zur Entwicklung der heutigen Kernspintomografen in Krankenhäusern.

Pieter Zeeman (1865–1943)

Pieter Zeeman wurde in einer niederländischen Kleinstadt geboren. Als er 1883 Polarlichter beobachtete, begann er sich für die Physik zu interessieren. Die Zeichnung und die Beschreibung des Nordlichts durch den Schüler wurde von allen gelobt und im internationalen Wissenschaftsmagazin *Nature* veröffentlicht. Zeeman studierte an der Universität Leiden bei Kamerlingh Onnes, dem Entdecker der Supraleitung, und Hendrik Lorentz, der an der Relativitätstheorie und am Elektromagnetismus forschte. Zeemans Doktorarbeit beschäftigte sich mit optischen Fragestellungen. 1896 wurde er für ein nicht genehmigtes Experiment entlassen, er entdeckte dabei die Aufspaltung der Spektrallinien durch Magnetfelder, was heute als Zeeman-Effekt bekannt ist. 1902 erhielt er dafür den Nobelpreis.

12 Das Pauli-Prinzip

Keine zwei Elektronen können gleich sein. Das Pauli-Prinzip bringt zum Ausdruck, dass jedes eine einmalige Kombination von Quanteneigenschaften haben muss, sodass man sie auseinanderhalten kann. Es zeigte sich, dass dies erklären kann, warum Atome in ihren Schalen eine bestimmte Zahl von Elektronen haben können, warum das Periodensystem der Elemente aufgebaut ist, wie wir es kennen, und warum Materie fest ist, obwohl sie doch hauptsächlich aus leerem Raum besteht.

Im Bohr'schen Atommodell von 1913 kann das tiefste Energieniveau des Wasserstoffs nur zwei Elektronen aufnehmen, das nächste acht usw. Diese Geometrie spiegelt sich im Aufbau des Periodensystems wider. Aber warum ist die Anzahl der Elektronen auf einer Schale überhaupt begrenzt? Und woher wissen die Elektronen, auf welchem Energieniveau sie sitzen dürfen?

Wolfgang Pauli suchte nach einer Erklärung. Er hatte am Zeeman-Effekt gearbeitet – der Aufspaltung von Spektrallinien, die entsteht, wenn ein Magnetfeld die Energieniveaus von Elektronen mit Spin in Atomen verändert – und bemerkte Ähnlichkeiten in den Spektren von Alkalimetallen, die nur ein äußeres Elektron haben, und Edelgasen mit vollen Schalen. Es sah so aus, als könnten Elektronen nur eine begrenzte Zahl von Zuständen annehmen.

Dies ließ sich erklären, wenn jedes Elektron einen Zustand hat, der durch vier Quantenzahlen beschrieben wird: Energie, Drehimpuls, magnetisches Moment und Spin. Mit anderen Worten: jedes Elektron hat eine einmalige Adresse.

Die Regel von Pauli – bekannt als das Pauli-Prinzip – die er 1925 formulierte, besagt, dass zwei Elektronen in einem Atom nicht in allen vier Quantenzahlen übereinstimmen können. Zwei Elektronen können nicht gleichzeitig mit den gleichen Eigenschaften am gleichen Ort sein.

Zeitleiste

1913

Bohr schlägt sein Schalenmodell für das Atom vor

1925

Pauli formuliert sein Ausschluss-Prinzip

Wie sich Elektronen organisieren Wenn man im Periodensystem zu immer schwereren Elementen geht, steigt die Zahl der Elektronen in einem Atom. Die Elektronen können nicht alle am gleichen Platz sein, und deshalb füllen sie allmählich immer höhere Schalen auf. Es ist wie mit den Plätzen in einem kleinen Kino, die von der Leinwand nach oben aufgefüllt werden.

Zwei Elektronen können den niedrigsten Energiezustand des Atoms besetzen, aber nur, wenn ihre Spins entgegengesetzt sind. In Helium können beide Elektronen mit entgegengesetztem Spin auf der niedrigsten Schale sitzen. Im Lithium muss das nächste auf die nächste Schale ausweichen.

Das Pauli-Prinzip gilt für alle Elektronen und alle anderen Teilchen, die einen halbzahligen Spin ($1/2$, $3/2$, $5/2$ usw.) haben. Dazu gehören auch das Proton und das Neutron. Derartige Teilchen heißen Fermionen nach dem italienischen Physiker Enrico Fermi.

Elektronen, Protonen und Neutronen sind alle Fermionen, deshalb gilt das Pauli-Prinzip für die atomaren Bausteine, aus denen alle Materie besteht. Erst dadurch, dass keine zwei Fermionen den gleichen Zustand einnehmen können, erhält die Materie ihre Festigkeit. Atome bestehen vor allem aus leerem Raum,

Wolfgang Pauli (1900–1958)

Als frühreifer Schüler in Wien schmuggelte Wolfgang Pauli Albert Einsteins Veröffentlichungen über die allgemeine Relativitätstheorie unter seine Schulbank und las sie heimlich. Nur wenige Monate nachdem er an die Universität von München gekommen war, veröffentlichte er seine erste Arbeit über die Relativitätstheorie. Dann wandte er sich der Quantenmechanik zu.

Werner Heisenberg beschrieb Pauli als Nachtschwärmer, der seine Nächte in Cafés verbrachte und vormittags nur selten in der

Vorlesung auftauchte. Nach dem Selbstmord seiner Mutter und einer gescheiterten ersten Ehe begann Pauli zu trinken. Er suchte Hilfe beim schweizer Psychologen Carl Jung und schickte ihm Tausende seiner Träume, einige davon veröffentlichte Jung später. Während des Zweiten Weltkriegs zog Pauli mehrere Jahre lang in die USA und mühte sich in dieser Zeit, die europäische Wissenschaft am Leben zu erhalten. 1945 kehrte er nach Zürich zurück und erhielt im selben Jahr den Nobelpreis.

1933

Das Neutron wird entdeckt und die Neutronensterne vorhergesagt

1967

Der erste Pulsar, eine Art Neutronenstern, wird entdeckt

1995

Erstmals kann ein Bose-Einstein-Kondensat aus Atomen beobachtet werden

Bosonen

Nicht alle Teilchen sind Fermionen – manche haben ganzzahligen Spin. Sie werden Bosonen genannt, nach dem indischen Physiker Satyendranath Bose, der sie erforscht hat. Photonen sind Bosonen, genau wie alle anderen Teilchen die die Elementarkräfte übertragen. Auch manche symmetrischen Kerne können sich wie Bosonen verhalten, etwa Helium, das aus zwei Protonen und zwei Neutronen besteht. Weil sie nicht dem Pauli-Prinzip unterliegen, können beliebig viele Bosonen die gleichen Quanteneigenschaften haben. Deshalb können Tausende von Bosonen zusammenwirken, was wesentlich ist für seltsame makroskopische Quantenphänomene, wie zum Beispiel Supraflüssigkeiten und Supraleitung.

trotzdem können wir sie nicht wie einen Schwamm zusammendrücken oder einen Gegenstand durch einen anderen pressen, wie Käse durch eine Reibe. Pauli hat damit eine der grundlegendsten Fragen der Physik beantwortet.

Das Leben von Sternen Auch in der Astrophysik hat das Pauli-Prinzip Auswirkungen. Neutronensterne und weiße Zwerge verdanken ihm ihre Existenz. Wenn Sterne, die größer als unsere Sonne sind, alt werden, funktioniert ihr Fusionsofen nicht mehr. Sie können nicht mehr weiter Wasserstoff in Eisen umwandeln und werden instabil. Wenn ihr Kern zusammenfällt, implodiert der Stern.

Dabei fallen ihre äußeren Schichten nach

innen, und ein Teil des Gases wird in einer Supernovaexplosion abgestoßen.

Während das Gas nach innen fällt, zieht es die Gravitationskraft immer stärker an. Die Reste ziehen sich also zusammen, und die Atome werden zusammengedrückt. Aber die festen Elektronen um jedes Atom leisten Widerstand – das Pauli-Prinzip stützt den sterbenden Stern nur durch seinen „Entartungsdruck“. Derartige Sterne nennt man weiße Zwerge, sie enthalten ungefähr die gleiche Masse wie unsere Sonne, haben aber nur das Volumen der Erde. Ein zuckerwürfelgroßes Stück eines weißen Zwerges wiegt eine Tonne.

Bei massereichen Sternen (die die sogenannte Chandrasekhar-Grenze von 1,4 Sonnenmassen überschreiten) kann der Entartungsdruck die Gravitation nicht mehr kompensieren. Die Verdichtung geht dann so weit, dass aus Elektronen und Protonen Neutronen entstehen. Der riesige Stern ist dann zu einem Neutronenstern zusammengeschrunpft.

Nun sind Neutronen auch Fermionen und unterliegen dem Pauli-Prinzip; wieder hält also ein Entartungsdruck den Stern in Form, doch diesmal stabilisiert sich das Ganze erst bei einem Radius von etwa zehn Kilometern. Die Masse der ganzen Sonne wird also auf ein Volumen mit der Querschnittsfläche der Größe Würzburgs zusammengequetscht. Neutronensterne sind so dicht, dass ein zuckerwürfelgroßes Stück mehr als 100 Millionen Tonnen wiegen würde.



Erde



weißer Zwerg



Neutronenstern

Bei den allergrößten Sternen ist die Gravitation so gewaltig, dass die Kontraktion bis zum schwarzen Loch fortschreitet.

Das Pauli-Prinzip ist also im ganzen Universum wichtig, beginnend bei den kleinsten Teilchen bis hin zum riesigen Stern.

Worum es geht
Keine zwei Fermionen sind gleich

13 Matrizenmechanik

Die Flut von Entdeckungen über Welle-Teilchen-Dualität und die Quanteneigenschaften des Atoms in den 1920er-Jahren verlangte nach neuen Theorien über das Atom, denn die bestehenden reichten nicht aus die Phänomene zu erklären. Die erste Vorlage kam vom deutschen Physiker Werner Heisenberg, der mit den Elektronenorbits aufräumte und alle beobachteten Variablen in einer Reihe von auf Matrizen basierten Gleichungen zusammenführte.

1920 eröffnete der dänische Physiker Niels Bohr ein neues Institut an der Universität von Kopenhagen. Physiker aus der ganzen Welt kamen zu ihm, um an seinen Pionierarbeiten über die Atomtheorie mitzuwirken. Das Bohr'sche Atommodell konnte mit seinen Elektronenorbits das Spektrum des Wasserstoffatoms und einige Eigenschaften des Periodensystems erklären, aber exakt passten die Eigenschaften der Spektrallinien von größeren Atomen, selbst die von Helium, nicht zu der Theorie.

Auch stellten viele weitere Entdeckungen eine Herausforderung für das Bohr'sche Atommodell dar. Es gab immer mehr Hinweise auf eine Welle-Teilchen-Dualität. Röntgen- und Elektronenstrahlen konnten gebeugt und aneinander gestreut werden, was die Hypothese von Louis de Broglie stützte, dass sich Materie wie Wellen verhalten konnte und Wellen wie Teilchen. Aber Einsteins Vorstellung der Photoneigenschaften von Licht war noch nicht von allen anerkannt.

Die meisten Physiker, auch Bohr und Planck, dachten immer noch, dass die Quantenzahlen aus regelmäßigen Strukturen innerhalb des Atoms herrührten. Nach dem Ersten Weltkrieg wurde immer deutlicher, dass ein neues Verständnis für die Quantisierung der Energie nötig war.

Der deutsche Physiker Werner Heisenberg besuchte ab 1924 Bohr regelmäßig für kurze Zeit in Kopenhagen, um mit ihm zusammenzuarbeiten. Als er versuchte, das Spektrum des Wasserstoffs zu berechnen, hatte er eine Erkenntnis.

Zeitleiste

1897

J. J. Thomson entdeckt das Elektron

1905

Einstein schlägt seine Photonenidee vor

1913

Bohr beschreibt die Elektronenorbits um den Kern

1924

De Broglie behauptet, dass sich Teilchen wie Wellen verhalten können

Weil die Physiker so wenig darüber wissen, was wirklich innerhalb der Atome vor sich geht, konnten sie nur damit arbeiten, was sie beobachteten. Er entwarf deshalb von Grund auf einen theoretischen Rahmen, der all die Quantenvariablen enthielt.

Heisenberg litt stark unter Heuschnupfen, und im Juni 1925 beschloss er mit einem geschwollenen Gesicht, seine Heimatstadt Göttingen zu verlassen und auf eine Insel zu gehen, wo es weniger Pollen in der Luft gab. Er reiste nach Helgoland, und während er sich dort aufhielt, hatte er seine Erleuchtung.

Später schrieb er, dass es fast drei Uhr morgens war, als das Ergebnis seiner Berechnungen vor ihm lag. Aufgewühlt von den grundlegenden Auswirkungen seines Durchbruchs konnte er auch den Rest der Nacht nicht mehr schlafen. Er verließ das Haus und wartete auf der Spitze eines Felsens auf den Sonnenaufgang.

Max Born (1882–1970)

Max Born wuchs in Breslau (heute Wrocław) in der damaligen preußischen Provinz Schlesien auf, studierte erst dort, dann in Heidelberg und Zürich Mathematik und kam 1904 an die Universität Göttingen. Weil er als außerordentlich guter Student anerkannt war, wurde er von vielen berühmten Mathematikern gefördert, er war auch mit Albert Einstein befreundet.

1925 formulierte er zusammen mit Werner Heisenberg und seinem Mitarbeiter Pascual Jordan die Matrixdarstellung der Quantenmechanik, einen der Meilensteine der Physik. Doch das Trio erhielt den Nobelpreis nicht zusammen. Heisenberg bekam ihn 1932 allein verliehen. Born erhielt schließlich 1954 einen. Es wurde darüber spekuliert, ob Jordans Verbindungen zur NSDAP Borns Chancen auf den Preis geschmälert hatten, obwohl er selbst Jude war und 1933 aus Deutschland nach Großbritannien ausgewandert war. Born war wie Einstein ein Pazifist und Atomwaffengegner.

Betreten Sie die Matrix Was hatte Heisenberg also entdeckt? Um die Stärke der verschiedenen Spektrallinien eines Atoms vorherzusagen, hatte er Bohrs Idee von festen Elektronenbahnen durch eine mathematische Beschreibung davon als harmonische stehende Wellen ersetzt. Es gelang ihm, ihre Eigenschaften mit den Quantensprüngen in der Energie zu verbinden, indem er mehrere Gleichungen benutzte, die äquivalent zu einer Reihe von Multiplikationen war.

Heisenberg kehrte in sein Institut nach Göttingen zurück und zeigte seine Berechnungen seinem Kollegen Max Born. Heisenberg war ganz und gar nicht so selbstsicher, erinnerte sich Born später, und bezeichnete seine Arbeiten am

1925

Heisenberg entwickelt seine Matrizenmechanik

1926

Schrödinger stellt seine Wellengleichung auf

1927

Kopenhagener Deutung der Quantenmechanik

Meer als verrückt, vage und unveröffentlichbar. Doch Born erkannte sehr schnell ihren Wert.

Born, der eine sehr gute mathematische Ausbildung besaß, bemerkte, dass die Idee von Heisenberg besser in einer Kurzform geschrieben werden konnte: als Matrix. In der Mathematik waren Matrizen wohlbekannt, wurden aber in der Physik nur wenig verwendet. Eine Matrix ist eine Tabelle mit Werten mit denen nacheinander mathematische Rechenoperationen ausgeführt werden können. In der Matrix-Notation konnten alle Multiplikationsvorschriften Heisenbergs in

einer einzigen Gleichung zusammengefasst werden. Born dampfte mit seinem ehemaligen Studenten Pascual Jordan Heisenbergs Gleichungen in das Matrixformat ein. Die Werte in der Tabelle verbanden die Energien der Elektronen mit den Spektrallinien. Born und Jordan verfassten schnell eine Veröffentlichung und publizierten ihre Arbeit; ein drittes gemeinsames Manuskript der drei Physiker folgte bald danach.

Es muss uns klar sein, dass wir bei Atomen Sprache nur in der Form von Poesie verwenden können.

Niels Bohr, 1920

(wiedergegeben von Heisenberg)

Heisenbergs Konzept war eine Novität, weil es offensichtlich nicht auf dem Bild der Elektronenorbits beruhte. Und die knappe und präzise Notation von Born und Jordan erlaubte es, dass die Mathematik um ihrer selbst willen weiterentwickelt werden konnte. Sie konnten jetzt die Theorie über alle vorgefassten Meinungen, was Atome eigentlich sind, hinaus entwickeln und neue Vorhersagen machen.

Aber die Matrizenmechanik wurde nur sehr langsam von anderen aufgegriffen und war sehr umstritten. Es handelte sich nicht nur um eine ungewohnte mathematische Sprache, mit der Physiker nicht vertraut waren, es gab auch politische Hürden zwischen den Physikern, die auf dem Feld arbeiteten, die überwunden werden mussten. Bohr mochte die Theorie – sie passte gut zu seinen Vorstellungen von Quantensprüngen. Aber Einstein gefiel sie gar nicht.

Einstein versuchte die Welle-Teilchen-Dualität zu erklären. Einstein und seine Anhänger nahmen die Idee an, die ursprünglich von de Broglie stammte, dass die Elektronenbahnen mithilfe der Formeln für stehende Wellen beschrieben werden können, und hofften immer noch, dass man die Quanteneigenschaften schließlich doch durch eine Erweiterung der Wellentheorie erklären könne. Aber Bohr und seine Anhänger gingen in eine andere Richtung. Die Forscher waren gespalten.

Alle, die die Matrizenmechanik übernahmen, brachten es weiter und konnten damit einige Quantenphänomene erklären. Wolfgang Pauli gelang es, den Stark-Effekt zu erklären – die Aufspaltung von Spektrallinien bei Atomen in einem

elektrischen Feld – aber es half ihm nicht, Gründe für das Pauli-Prinzip zu finden. Den Zeeman-Effekt und den Elektronenspin aber konnte die Theorie nicht so leicht begründen, und sie passte auch nicht zur Relativitätstheorie.

Das Unschärfeprinzip Das Matrizenbild hatte noch tiefergehende Konsequenzen. Weil es sich nur mit den Energieniveaus und Linienintensitäten beschäftigte, konnte die Theorie per definitionem nichts darüber aussagen, wo sich ein Elektron tatsächlich befand, oder wie es sich zu einer bestimmten Zeit bewegte. Es blieb auch die Frage, was die Zahlen in den Matrizen waren und was sie im wahren Leben bedeuteten. Die Matrizenmechanik schien sehr abstrakt.

Weil das Ergebnis einer Beobachtung – also die Energien der Elektronen und Spektrallinien – tatsächlich auftraten, auch wenn man noch so kluge Tricks verwendete, um die Mathematik zu verändern, musste letztlich alles Unwirkliche eigentlich herausfallen. Das Fazit war, dass die Matrizenmechanik mehrere der Eigenschaften des Atoms niemals gleichzeitig erklären konnte. Dies führte schließlich zu Heisenbergs Unschärfeprinzip.

Aber bevor dies alles genau geklärt wurde, stahl eine neue Theorie der Matrizenmechanik die Show. Der österreichische Wissenschaftler Erwin Schrödinger schlug eine konkurrierende Erklärung der Elektronenenergien vor, die von einer Wellengleichung ausging.

14 Die Schrödinger-Gleichung

1926 gelang es Erwin Schrödinger, die Energien der Elektronen in Atomen zu beschreiben, indem er sie nicht als Teilchen, sondern als Wellen behandelte. Seine Gleichung berechnet eine Wellenfunktion, die die Wahrscheinlichkeit angibt, dass sich das Elektron zu einer bestimmten Zeit an einem bestimmten Ort befindet. Sie ist eine der wichtigsten Grundlagen der Quantenmechanik

Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts wurde immer klarer, dass die Vorstellungen von Teilchen und Wellen sehr eng miteinander verbunden sind. 1905 zeigte Albert Einstein, dass Lichtwellen auch als Strom kugelartiger Photonen auftreten können, deren Energien proportional zur Frequenz des Lichts sind. Louis de Broglie behauptete 1924, dass dies für alle Materie gilt – Elektronen, Atome und alle Objekte, die daraus bestehen, können gebeugt werden und wie Wellen interferieren.

Nach der 1913 veröffentlichten Atomtheorie von Niels Bohr halten sich Elektronen in festgelegten Schalen um den Kern herum auf. Die Elektronen nehmen dabei die Form von stehenden Wellen an – wie eine Saite, die auf einer Gitarre schwingt. In einem Atom sind die Energien der Elektronen auf bestimmte Oberschwingungen begrenzt. In die Bahn des Elektrons um den Kern muss ein ganzzahliges Vielfaches seiner Wellenlänge passen.

Aber wie bewegen sich die Elektronen? Wären sie wellenartig, müssten sie vermutlich über die ganze Umlaufbahn verschmiert sein. Wären sie kompakte Teilchen, müssten sie wie Planeten auf kreisförmigen Bahnen um die Sonne laufen. Wie wären diese Umlaufbahnen wohl angeordnet? Alle Planeten bewegen sich auf einer Ebene, aber Atome haben drei Dimensionen.

Zeitleiste

1901

Planck stellt seine
Energiequanten vor

1905

Einstein schlägt das
Photon vor

1913

Bohr beschreibt
Elektronenorbits

Der österreichische Physiker Erwin Schrödinger machte sich daran, das Elektron mathematisch als dreidimensionale Welle zu beschreiben. Um endlich weiterzukommen, zog er sich im Dezember 1925 in eine einsame Hütte in den Bergen zurück – mit einer Geliebten im Schlepptau. Er hatte ständig Probleme in seiner Ehe und viele Freundinnen, von denen seine Frau wusste.

Der Durchbruch Schrödinger war ein unkonventioneller Mann – oft unordentlich und bekannt dafür, dass er immer seine Wanderstiefel und einen Rucksack dabei hatte. Ein Kollege erinnerte sich daran, dass er einmal bei einer Konferenz irrtümlich für einen Landstreicher gehalten wurde.

Während er sich in seiner Hütte aufhielt, verbesserte sich Schrödingers Laune zusehends. Er erkannte, dass er bereits große Fortschritte gemacht hatte. Er konnte veröffentlichen, was er bis dahin geschafft hatte, und erst später an den schwierigeren Aspekten weiterarbeiten – etwa die Relativität und die Zeitabhängigkeit einbeziehen.

Die Veröffentlichung von 1926, die so entstanden war, lieferte eine Gleichung, mit der man die Wahrscheinlichkeit bestimmen konnte, dass sich ein Teilchen, das sich wie eine Welle verhielt, an einem bestimmten Ort aufhielt. Man benötigte dazu nur die Physik der Wellen und etwas Wahrscheinlichkeitstheorie. Heute ist sie ein Eckstein der Quantenmechanik.

Die Mathematik der Wahrscheinlichkeit Die Schrödinger-Gleichung sagte die Wellenlängen des Wasserstoffspektrums richtig voraus. Einen Monat später reichte er eine zweite Arbeit ein, in der seine Theorie auf einfache atomare Systeme angewendet wurde, etwa ein Molekül aus zwei Atomen. In einem dritten

Elektronenorbits

Die Schrödinger-Gleichung führte zu komplizierteren Modellen von dreidimensionalen Elektronenorbitalen in Atomen. Sie beschreiben die Gegenenden, in denen sich Elektronen mit einer Wahrscheinlichkeit von 80 bis 90 Prozent aufhalten – doch es besteht auch die kleine Chance, dass sie an einem ganz anderen Ort sind. Es zeigte sich, dass diese Formen nicht alle kugelförmig sein müssen, wie Bohr es sich vorgestellt hatte. Manche haben Formen wie Hanteln oder Donuts. Heute verwenden Chemiker dieses Wissen, um Moleküle maßzuschneidern.

1924

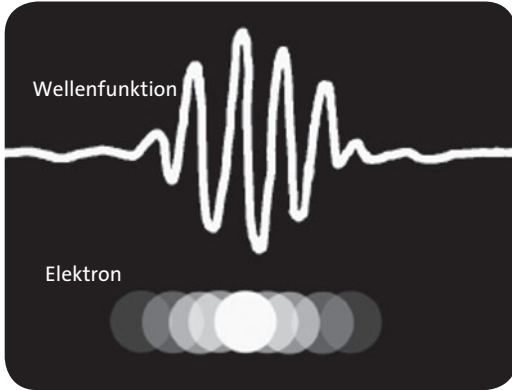
De Broglie behauptet, dass sich Teilchen wie Wellen verhalten können

1925

Heisenberg veröffentlicht seine Matrizenmechanik

1926

Schrödinger veröffentlicht seine Wellengleichung



Wellenfunktionen beschreiben die Wahrscheinlichkeit dafür, wo sich ein Elektron aufhält. Je höher die Amplitude der Wellenfunktion, desto wahrscheinlicher ist es, dass das Elektron an dem Ort ist!

Paper, wies er darauf hin, dass seine Wellenfunktion genau äquivalent zu Heisenbergs Matrizenmechanik war und die gleichen Phänomene erklären konnte. In einer vierten Veröffentlichung arbeitete er die Zeitabhängigkeit ein und zeigte, wie sich eine Wellenfunktion entwickelte.

Weil Schrödingers Erklärung von Physikern, die mit der klassischen Wellentheorie vertraut waren, sehr leicht zu verstehen war, wurde die Gleichung sehr schnell als revolutionär bejubelt und war dementsprechend sofort viel populärer als Heisenbergs Matrizenmechanik. Letztere hatte weniger Anhänger, weil sie in einer abstrakten Art von Mathematik formuliert war, mit der niemand vertraut war.

Einstein, der den Wellenansatz bevorzugte, war begeistert von Schrödingers Durchbruch. Bohr zeigte sich interessiert, neigte aber mehr zur Matrizenmechanik, die seine Quantensprünge besser beschrieb. Die Quantentheorie entwickelte sich sehr schnell, doch die Physiker waren sich immer noch nicht einig darüber, ob sie wirklich etwas über die reale Welt lernten.

» Gott regiert den Elektromagnetismus am Montag, Mittwoch und Freitag mit der Wellentheorie, und der Teufel regiert ihn am Dienstag, Donnerstag und Samstag mit der Quantentheorie. «

Sir William Bragg, 1862–1942

Wellenfunktionen Schrödinger drückte die Wahrscheinlichkeit, dass ein Teilchen zu einer bestimmten Zeit an einem bestimmten Ort ist, in Form einer Wellenfunktion aus, die alle Informationen darüber enthält, die wir über das Teilchen haben können.

Wellenfunktionen sind schwer zu verstehen, weil wir in unserer Alltagserfahrung nicht in Kontakt mit ihnen kommen. Sie sind unanschaulichen und nicht leicht zu interpretieren.

Genau wie bei Heisenbergs Matrizenmechanik gab es immer noch eine Kluft zwischen der mathematischen Beschreibung eines Welle-Teilchens und dem tatsächlichen Ding, etwa einem Elektron oder einem Photon.

In der klassischen Physik würden wir die Bewegung eines Teilchens mithilfe der Newton'schen Gesetze beschreiben. Zu jedem Zeitpunkt könnten wir dann genau sagen, wo es sich befindet und in welche Richtung es sich bewegt. In der Quantenmechanik jedoch können wir nur über die Wahrscheinlichkeit sprechen, dass das Teilchen zu einer bestimmten Zeit an einem bestimmten Ort ist.

Wie sieht eine Wellenfunktion wohl aus? Ein einzelnes Teilchen, das sich im leeren Raum bewegt, hat nach der Schrödinger-Gleichung eine sinusförmige Wellenfunktion. Die Wellenfunktion ist dort, wo sich das Teilchen nicht aufhalten kann, gleich null, etwa jenseits der Grenzen eines Atoms.

Die Amplitude der Wellenfunktion kann bestimmt werden, indem man die erlaubten Energieniveaus betrachtet oder die Energiequanten des Teilchens, die immer größer als null sein müssen. Das ist analog zu einer Saite mit einer bestimmten Länge, für die nur ganz bestimmte Oberschwingungen möglich sind. Weil die Quantentheorie nur eine begrenzte Zahl von Energieniveaus zulässt, gibt es für das Teilchen Orte mit höherer Aufenthaltswahrscheinlichkeit und Orte mit geringerer.

Kompliziertere Systeme haben Wellenfunktionen, die eine Überlagerung vieler Sinuswellen und anderer mathematischer Funktionen sind, wie der Ton eines Instruments eine Überlagerung vieler Obertöne ist.

Indem er die Idee der Welle-Teilchen-Dualität auf die Atome und alle Formen der Materie übertragen hat, verdiente sich Schrödinger einen Platz unter den Gründungsvätern der Quantenmechanik.

Die Quantenmechanik ist sehr Achtung gebietend. Aber eine innere Stimme sagt mir, dass das noch nicht der wahre Jakob ist. Die Theorie liefert viel, aber dem Geheimnis des Alten bringt sie uns kaum näher. Jedenfalls bin ich überzeugt, dass der Alte nicht würfelt.

Albert Einstein

**in einem Brief an Max Born,
4. Dezember 1926**

15 Die Heisenberg'sche Unschärferelation

1927 erkannte Werner Heisenberg, dass einige Eigenschaften der atomaren Welt von Natur aus unbestimmt sind. Wenn man den Aufenthaltsort eines Teilchens genau kennt, kann man nicht gleichzeitig wissen, wie groß sein Impuls ist. Wenn man genau weiß, zu welcher Zeit ein Teilchen etwas getan hat, lässt sich nichts über seine Energie aussagen, die es dabei hatte.

1926 begannen Werner Heisenberg und Erwin Schrödinger eine heftige Auseinandersetzung. Sie hatten innerhalb nur eines Jahres radikal unterschiedliche Ansätze vorgestellt, um die quantisierten Energiezustände von Elektronen in Atomen zu beschreiben – mit sehr unterschiedlichen Folgen.

Heisenberg hatte seine Matrizenmechanik vorgeschlagen, eine mathematische Beschreibung der Zusammenhänge zwischen den Energiezuständen von Elektronen und den Spektrallinien, die die Elektronen erzeugen, wenn sie ihre Quantensprünge zwischen den Energieniveaus machten. Sie war eine technische Meisterleistung, doch die Physiker griffen sie nur sehr zögerlich auf. Sie verstanden einfach nicht, was die Gleichungen wirklich bedeuteten – zumal sie in dieser unvertrauten Matrizenschreibweise ausgedrückt waren.

Schrödingers Alternative war da schon deutlich zugänglicher, vor allem weil sie auch noch durch die Unterstützung von Albert Einstein gefördert wurde. Die Wellenmechanik, die die Elektronenenergien als stehende Wellen oder Oberschwingungen beschrieb, verwendete vertraute Konzepte. Sie passte hervorragend zum Vorschlag von Louis de Broglie, dass sich Teilchen wie Wellen verhalten können, was inzwischen auch durch Experimente bestätigt war, die zeigten, dass Elektronen gebeugt werden und interferieren können.

Aber im Mai 1926 veröffentlichte Schrödinger eine Arbeit, die zeigte, dass die Matrizen- und die Wellenmechanik dieselben Ergebnisse lieferten – sie

Zeitleiste

1901

Planck stellt seine Energiequanten vor

1905

Einstein schlägt das Photon vor

1913

Bohr beschreibt die Elektronenorbits

1924

De Broglie behauptet, dass sich Teilchen wie Wellen verhalten können

waren mathematisch gleichwertig. Er behauptete aber, dass seine Wellentheorie besser sei als die Matrizenmechanik, was Heisenberg natürlich ärgerte. Ein Grund für Schrödingers Vorliebe war, dass ihm die Unstetigkeiten und Quantensprünge unnatürlich vorkamen, die sich aus der Matrizenmechanik ergaben. Zusammenhängende Wellen schienen ihm viel angenehmer. Doch Heisenberg und Bohr vertraten die Ansicht, dass genau diese Sprünge die Stärke ihres Modells ausmachten.

Heisenberg war ziemlich empfindlich. Er war ein junger Mann, der an einem kritischen Punkt seiner Karriere angelangt war und gerade rege nach einer Professorenstelle an einer deutschen Universität suchte. Deshalb war er ganz und gar nicht erfreut darüber, dass ein Schatten auf seine große Leistung fiel.

Je genauer man die Position des Teilchens zu messen versucht, desto ungenauer lässt sich seine Geschwindigkeit messen und umgekehrt.

Werner Heisenberg, 1927

Die Auflösung des Quanten-Patts Im Oktober 1926 kam Schrödinger nach Kopenhagen, um Niels Bohr zu besuchen. Auch Heisenberg, der mit Bohr zusammenarbeitete, war da. Die Physiker diskutierten von Angesicht zu Angesicht über die Richtigkeit ihrer Ideen, doch sie kamen nicht weiter dabei. Sie trennten sich also wieder, um über die physikalischen Interpretationen ihrer Gleichungen nachzudenken. Kurz darauf kombinierten Heisenbergs Kollege Pascual Jordan in Göttingen und Paul Dirac in Cambridge die Gleichungen bei der Beschreibungen in einer Reihe von Gleichungen – dies wurde zur Grundlage dessen, was wir heute Quantenmechanik nennen.

Die Physiker machten sich nun an den Versuch zu erklären, was diese Gleichungen in der Realität wirklich bedeuteten. Wie hingen die „klassischen Messungen“ im Labor mit dem zusammen, was im Atom vor sich ging?

Nur die Unsicherheit ist sicher Bei der Untersuchung dieser Gleichungen stieß Heisenberg auf ein grundlegendes Problem. Er erkannte, dass es unmöglich war, einige Eigenschaften exakt zu bestimmen, weil das Messgerät mit den Atomen, die vermessen werden, wechselwirkte. Die Position und der Impuls eines Teilchens konnten nicht gleichzeitig gemessen werden, genauso wenig

1915

Heisenberg veröffentlicht seine Matrizenmechanik

1926

Schrödinger stellt seine Wellengleichung auf

1927

Heisenberg veröffentlicht seine Unbestimmtheitsrelation

seine Energie zu einem ganz bestimmten Zeitpunkt. Der Grund dafür lag nicht in den mangelnden Fähigkeiten des Messenden. Die Unbestimmtheit war wesentlich für die Quantenmechanik selbst. Heisenberg schilderte seine „Unbestimmtheitsrelation“ im Februar 1927 zuerst in einem Brief an Wolfgang Pauli und später in einer Veröffentlichung.

Jede Messung ist mit einer gewissen Ungenauigkeit behaftet. Man kann zum Beispiel messen, dass ein Kind 1,20 Meter groß ist, aber dieser Wert ist nur so exakt wie der Meterstab, den man dazu verwendet, etwa auf einen Millimeter genau. Außerdem kann man sich schnell um einen Zentimeter vertun, wenn man seine Augen nicht auf gleicher Höhe mit dem Kopf des Kindes hat.

Aber die Unbestimmtheit nach Heisenberg hat mit diesem Messfehler nichts zu tun. Seine Aussage ist grundlegend anders: Es ist absolut unmöglich, Impuls und Ort gleichzeitig exakt zu messen, ganz egal, wie präzise das Instrument auch sein mag. Je genauer der eine Wert bestimmt wird, desto ungenauer wird der andere.

Ein Gedankenexperiment Heisenberg dachte sich ein Gedankenexperiment aus, um die Bewegung eines subatomaren Teilchens zu bestimmen, zum Beispiel die eines Neutrons. Ein Radar könnte die Bahn des Teilchens mit elektromagnetischen Wellen verfolgen, die von dem Teilchen zurückgeworfen werden. Um eine möglichst hohe Genauigkeit zu erreichen, würde man dazu Gammastrahlen verwenden, die eine sehr kurze Wellenlänge haben. Doch wegen der Welle-Teilchen-Dualität würden die Neutronen wie eine Folge von Photonen-Kugeln wirken. Gammastrahlen haben eine sehr hohe Frequenz und deshalb hat jedes Photon eine hohe Energie. Wenn dann ein schweres Photon das Neutron trifft, gibt es ihm einen starken Schubs, der seine Geschwindigkeit verändert. Wenn man also die Position des Neutrons zu diesem Zeitpunkt genau wissen würde, hätte sich seine Geschwindigkeit unvorhersagbar geändert.

Wenn man dagegen weichere Photonen mit weniger Energie verwenden würde, damit die Änderung der Geschwindigkeit geringer ausfällt, wären die Wellenlängen größer und deshalb würde auch die Genauigkeit der Ortsbestimmung sinken. Ganz egal, wie man das Experiment zu optimieren versucht, man wird niemals sowohl die Position des Teilchens als auch seine Geschwindigkeit gleichzeitig genau bestimmen können. Es gibt eine grundlegende Grenze für das, was wir über ein atomares System wissen können.

Heisenberg erkannte sehr schnell, dass die Auswirkungen seiner Unbestimmtheitsrelation tiefgreifend waren. Stellen Sie sich ein Teilchen vor, das sich bewegt. Wegen der grundsätzlichen Grenzen dessen, was man wissen kann,

kann man über das Verhalten des Teilchens in der Vergangenheit nichts wissen, bis man eine Messung daran durchgeführt hat. In Heisenbergs Worten: „Der Weg des Teilchens existiert erst, wenn wir es beobachten.“ Genauso wenig kann die Bahn des Teilchens in der Zukunft vorhergesagt werden, weil man ja seine Geschwindigkeit und seinen Ort nicht kennen kann. Vergangenheit und Zukunft werden verschmiert.

Newton ist überholt Eine derart unvorhersehbare Welt prallte auf die bisherigen Vorstellungen der Physiker, wie man die Realität interpretiert. Statt eines Universums, das aus konkreten Bestandteilen aufgebaut war, die unabhängig voneinander existierten und deren Bewegungen und Eigenschaften durch Experimente bestätigt werden konnten, enthüllte die Quantenmechanik eine brodelnde Masse von Wahrscheinlichkeiten, die erst durch die Handlung eines Beobachters in die Wirklichkeit gebracht werden.

Es gibt keine Ursache und Wirkung, nur Möglichkeiten. Viele Physiker fanden das schwer zu akzeptieren – Einstein tat es nie. Doch das ist es, was Experimente und die Mathematik uns sagen. Die Physik ließ die Ergebnisse, die in Labors gemacht wurden, hinter sich und betrat die Gefilde des Abstrakten.

Werner Heisenberg (1901–1976)

Werner Heisenberg wuchs in München auf und liebte die Berge. Als Teenager arbeitete er während des Ersten Weltkriegs auf einem Bauernhof, las Mathematikbücher und spielte Schach in seiner Freizeit. Er studierte theoretische Physik an der Universität München und war noch sehr jung, als er promovierte. Mit nur 25 wurde er in Leipzig Professor. Er arbeitete in München, Göttingen und Kopenhagen, wo er Niels Bohr und Albert Einstein traf. 1925 erfand er die Matrizenmechanik, wofür ihm 1932 der Nobelpreis verliehen wurde. Seine Unbestimmtheitsrelation formulierte er 1927.

Während des Zweiten Weltkriegs leitete Heisenberg ein Projekt zur Entwicklung einer Atombombe, das aber keinen Erfolg hatte. Es ist immer noch umstritten, ob er das Projekt absichtlich verzögert hat oder ob ihm nur die notwendigen Ressourcen dazu fehlten.

16 Die Kopenhagener Deutung der Quantentheorie

1927 versuchte der dänische Physiker Niels Bohr die physikalische Bedeutung der Quantenmechanik zu erklären. In der heute als Kopenhagener Deutung bezeichneten Interpretation verband er Heisenbergs Unbestimmtheitsrelation mit Schrödingers Wellengleichung, um zu erklären, warum aus der Messung eines Beobachters folgt, dass es Dinge gibt, die wir niemals wissen können.

1927 wurde zum ersten Mal der ernsthafte Versuch unternommen, die Bedeutung der Quantenmechanik zu verstehen. Die Physiker waren in zwei Lager

Wer von der Quantenmechanik nicht schockiert ist, hat sie nicht verstanden.

Niels Bohr, 1958

gespalten: Werner Heisenberg und seine Kollegen glaubten, dass die Teilchennatur von elektromagnetischen Wellen und Materie, die in seiner Matrizenmechanik beschrieben wurde, der Schlüssel zum Verständnis der Natur sei. Erwin Schrödingers Anhänger dagegen vertraten die Ansicht, dass dem Quantenverhalten die Physik von Wellen zugrunde lag.

Heisenberg hatte mit seiner Unbestimmtheitsrelation gezeigt, dass es eine grundsätzliche Grenze für unser Wissen gab. Er glaubte, dass man weder über die Vergangenheit noch über die Zukunft eines Teilchens eine Aussage treffen konnte, bevor eine Messung stattgefunden hatte, weil alle Parameter, die die Bewegung eines Quantenteilchens beschreiben, der Unbestimmtheit unterliegen.

Einer aber machte sich daran, alle vorhandenen Experimente und theoretischen Überlegungen zu einem neuen Gesamtbild zu vereinen: Niels Bohr, der ein Jahrzehnt zuvor die quantisierten Energiezustände des Elektrons in einem

Zeitleiste

1901

Planck stellt seine Energiequanten vor

1905

Einstein schlägt das Photon vor

1913

Bohr beschreibt die Elektronenorbits

1924

De Broglie behauptet, dass sich Teilchen wie Wellen verhalten können

Wasserstoffatom erklärt hatte, war Heisenbergs wissenschaftlicher Vorgesetzter an der Universität von Kopenhagen, als der 1927 seine Unbestimmtheitsrelation entwickelt hatte. Bohr kam gerade vom Skiurlaub zurück, als er Heisenbergs Entwurf für eine Veröffentlichung auf seinem Schreibtisch mit der Bitte vorfand, sie an Albert Einstein weiterzuleiten.

Bohr war fasziniert von der Idee, aber er beschwerte sich bei Einstein, dass Heisenbergs Gedankenexperiment – zu dem man ein Gammastrahlenmikroskop brauchte – nicht weiterhalf, weil es die Welleneigenschaften der Teilchen nicht berücksichtigte. Heisenberg ergänzte eine Korrektur, die auch die Streuung von Wellen umfasste und bei der die Schlussfolgerungen trotzdem noch galten. Unbestimmtheiten lagen in der Natur der Quantenmechanik. Aber was passierte wirklich?

Ein Münze, die sich immer weiterdrehte

Nach Bohrs Ansicht waren die Welle- und Teilchenaspekte eines Körpers Eigenschaften, die einander ergänzten. Sie sind zwei Seiten derselben Medaille, genau wie manche Bilder mit optischen Täuschungen arbeiten – auf denen man zum Beispiel Konturen von zwei Gesichtern oder den Umriss einer Vase erkennen kann.

Elektron, Proton oder Neutron sind nicht das eine oder das andere – sie sind beides. Ein bestimmtes Merkmal erscheint erst, wenn jemand ein Experiment durchführt und sich entscheidet, welchen Aspekt er messen möchte. Licht scheint sich wie eine elektromagnetische Welle oder ein Photon zu verhalten,

Niels Bohr (1885–1962)

Niels Bohrs Institut in Kopenhagen war das Zentrum der Entwicklung der Quantentheorie. Die besten Physiker, von Heisenberg bis Einstein, statteten ihm regelmäßig Besuche ab. Bohr baute das Institut nach einem Forschungsaufenthalt in England und seiner Promotion in Kopenhagen auf. Nachdem er in Cambridge mit J. J. Thomson, dem Entdecker des Elektrons, aneinandergeraten war und in Manchester mit dem Kernphysik-Pionier Ernest Rutherford zusammengearbeitet hatte, kehrte er 1916 nach Dänemark zurück, um sein eigenes Atommodell zu entwickeln. Für seine Arbeit erhielt er 1922 den Nobelpreis.

Nachdem Hitler 1933 in Deutschland an die Macht kam, reisten viele Physiker zu Bohr, um an seinem Institut über die Einzelheiten der Quantentheorie zu diskutieren. Als Dänemark 1943 besetzt wurde, floh Bohr mit einem Fischerboot nach Schweden und von da aus nach England, wo er die britischen Kriegsbemühungen unterstützte. Bohr reiste auch als Ratgeber für das Manhattan Projekt nach Los Alamos, obwohl er Atomwaffen eigentlich ablehnte.

1915

Heisenberg veröffentlicht seine Matrizenmechanik

1926

Schrödinger stellt seine Wellengleichung auf

1927

Heisenberg veröffentlicht seine Unbestimmtheitsrelation

1927

Bohr schlägt seine Kopenhagener Deutung vor

weil es jeweils das ist, wonach wir gerade suchen. Weil der Experimentator das ursprüngliche System stört, so argumentierte Bohr, gibt es Grenzen dafür, was wir über die Natur erfahren können. Die Beobachtung selbst erzeugt die Unsicherheiten, auf die Heisenberg hinwies. Diese Argumentation wurde als „Kopenhagener Deutung der Quantenmechanik“ bekannt.

Wenn Bohr in der Nähe ist, ist alles ein bisschen anders. Sogar der Dümme bekommt etwas von seinem Glanz ab.

Isidor I. Rabi

**in Daniel J. Kevles Buch
The Physicists, 1978**

Bohr erkannte, dass das Unbestimmtheitsprinzip, das zum Ausdruck bringt, dass man Ort und Impuls eines subatomaren Teilchens nicht gleichzeitig messen kann, entscheidend ist. Sobald eine Eigenschaft genau bestimmt wurde, weiß man nichts mehr über die andere. Heisenberg glaubte, diese Unsicherheit hänge mit der Mechanik des Messvorgangs selbst zusammen. Um eine Größe zu messen, müssen wir sie beeinflussen, etwa, wenn wir seinen Bewegungszustand herausfinden wollen, durch Photonen, die von einem Teilchen reflektiert werden. Heisenberg erkannte, dass jede Wechselwirkung das System verändert, sodass sein Zustand danach unbestimmt wird.

Der beteiligte Beobachter Bohrs Erklärung war deutlich anders: Er argumentierte, dass der Beobachter immer Teil des Systems ist, das vermessen wird. Es macht keinen Sinn, etwas ohne das Messgerät zu beschreiben. Wie können wir etwas über die Bewegung eines Teilchens allein aussagen, wenn es gleichzeitig von Photonen bombardiert wird, um es zu verfolgen. Sogar der Begriff „Beobachter“ ist eigentlich falsch, behauptete Bohr, denn es setzt etwas Außenstehendes voraus. Die Beobachtung selbst ist wie ein Schalter, der den Endzustand des Systems festlegt. Vorher können wir nur sagen, dass es eine be-

stimmte Wahrscheinlichkeit dafür gibt, dass das System in einem der für ihn möglichen Zuständen ist.

Was passiert, wenn wir eine Messung durchführen? Warum interferiert Licht, das durch zwei Spalte fällt, an einem Tag wie eine Welle, schaltet aber am nächsten Tag auf das Teilchenverhalten um, wenn wir das Photon einfangen wollen, sobald es vorbeikommt? Nach Bohr entscheiden

Das Korrespondenz-Prinzip

Um die Lücke zwischen der Quanten- und unserer Erfahrungswelt zu überbrücken, führte Bohr das Korrespondenz-Prinzip ein. Es bringt zum Ausdruck, dass das Quantenverhalten bei größeren Systemen, mit denen wir im Alltag vertraut sind, verschwinden muss, sodass die Newton'sche Beschreibung wieder angemessen ist.

wir im Voraus, wie es uns erscheint, indem wir uns festlegen, wie wir es messen wollen.

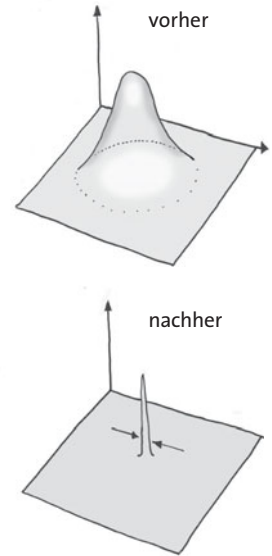
Was können wir wissen? Hier wandte sich nun Bohr Schrödingers Gleichung und seinem Konzept der Wellenfunktion zu, die alles enthält, was wir von einem Teilchen wissen können. Wenn das Wesen eines Objekts durch eine Beobachtung festgelegt wird, etwa als Teilchen oder Welle, sprechen wir vom „Kollaps der Wellenfunktion“. Dann verschwinden alle Wahrscheinlichkeiten außer einer. Nur das Ergebnis bleibt bestehen. Die Wellenfunktion eines Lichtstrahls ist eine Überlagerung von zwei Möglichkeiten: Welle oder Teilchen. Wenn wir dann das Licht nachweisen, kollabiert die Wellenfunktion und ergibt eine einzige Form, nicht weil es sein Verhalten ändert, sondern weil Licht wirklich beides ist.

Erst gefiel Heisenberg Bohrs Vorstellung gar nicht. Er hing an seinem ursprünglichen Bild von Teilchen und Energiesprüngen. Die beiden entzweiten sich. Während eines Streits mit Bohr brach Heisenberg offenbar in Tränen aus. Die Karriere des jungen Mannes stand auf dem Spiel.

Es wurde allerdings besser, als Heisenberg 1927 eine sichere Stelle an der Universität Leipzig fand. Bohr präsentierte seine Idee der Komplementarität unter großem Beifall bei einer Tagung in Italien, und viele Physiker griffen sie auf. Im Oktober sprachen Heisenberg und Max Born über die Quantenmechanik als wäre sie vollständig gelöst.

Doch nicht jeder war einverstanden, vor allem Einstein und Schrödinger, die sich für den Rest ihres Lebens von Bohrs Lehrmeinung nicht überzeugen ließen. Einstein glaubte, dass Teilchen genau vermessen werden können. Die Idee, dass echte Teilchen von Wahrscheinlichkeiten bestimmt wurden, missfiel ihm. Er glaubte, dass dies in einer besseren Theorie nicht notwendig sei. Die Quantenmechanik musste unvollständig sein.

Auch heute haben Physiker noch Probleme damit, die Quantenmechanik mit ihrer Intuition in Einklang zu bringen. Manche haben versucht, neue Erklärungen anzubieten, doch bisher konnte keine die von Bohr verdrängen. Die Kopenhagener Deutung hat den Test der Zeit bestanden, weil sie so viel erklären konnte.



Bei einer Beobachtung kollabiert die Wellenfunktion.

17 Schrödingers Katze

Um zu zeigen, wie lächerlich die Kopenhagener Deutung der Quantenmechanik war, formulierte Schrödinger ein Gedankenexperiment mit einer Katze, die eine bestimmte Zeit lang mit einer zerbrechlichen Viole tödlichen Gifts in einer Kiste eingesperrt war. Er fand, es sei nicht sinnvoll, sich ein lebendes Tier als Wahrscheinlichkeitswolke vorzustellen, nur weil wir nicht wissen, was passiert.

Als Niels Bohr 1927 seine Kopenhagener Deutung der Quantenmechanik vorschlug, waren viele Physiker begeistert, doch die Hardcore-Fans der Wellenfunktion sprangen auf diesen Zug nicht auf. Erwin Schrödinger und Albert Einstein lehnten die Vorstellung ab.

1935 versuchte Schrödinger Bohrs Idee einer unscharfen, von Wahrscheinlichkeiten bestimmten Quantenwelt ins Lächerliche zu ziehen, indem er ein hypothetisches Gedankenexperiment veröffentlichte, das zeigte, wie sehr die Natur einer kollabierenden Wellenfunktion und der Einfluss eines Beobachters der Intuition widersprachen. Ähnliches unternahm Albert Einstein mit seinem Einstein-Podolsky-Rosen-Paradoxon, das Hinweise auf eine nicht plausibel erscheinende Fernwirkung gab.

In der Kopenhagener Deutung sind Quantensysteme dunkel und unbestimmt bis ein Beobachter ins Spiel kommt, den Lichtschalter umlegt und sich entscheidet, welche Größe er mit seinem Experiment bestimmen möchte. Licht ist sowohl Welle als auch Teilchen, bis wir uns festlegen, in welcher Form wir es untersuchen wollen, dann erst nimmt es diese Eigenschaften an.

Schrödinger, der eine Wellentheorie der Atome entwickeln wollte, missfiel die Idee, dass etwas, was wir nicht sehen, in allen möglichen Formen gleichzeitig existierte. War ein Kühlschrank wirklich in einem mathematischen Dilemma, ob er zeigen sollte, dass er Schokolade und Eier enthielt, bevor man ihn öffnete und sieht, dass Käse, Sellerie und Milch darin ist?

Zeitleiste

1905

Einstein beschreibt das Photon

1924

De Broglie behauptet, dass sich Teilchen wie Wellen verhalten können

1925

Heisenberg veröffentlicht seine Matrizenmechanik

1926

Schrödinger stellt seine Wellengleichung auf

Quantenwahrscheinlichkeiten machten auf einem großen Maßstab offensichtlich wenig Sinn. Schrödinger veranschaulichte dieses Verhalten in seinem Gedankenexperiment mit einem emotional ansprechenderem Objekt – einer Katze.

Das Damoklesschwert der Quanten Schrödinger überlegte sich die folgende Situation. Eine Katze ist zusammen mit einer diabolischen Vorrichtung in einer Stahlkiste eingesperrt, nämlich einem Fläschchen hochgiftiger Blausäure, das durch den Zerfall eines radioaktiven Atoms zerschmettert werden kann. Das Schicksal der Katze hängt damit nur von der Wahrscheinlichkeit ab, ob das Atom zerfallen ist oder nicht.

„Nachdem man dieses gesamte System eine Stunde lang sich selbst überlassen hat, würde man meinen, dass die Katze immer noch lebendig ist, wenn kein Atom zerfallen ist, denn der erste Zerfall hätte sie vergiftet“, schrieb Schrödinger. Sein bedrückendes Gerät ergibt also eine Wahrscheinlichkeit von 50 zu 50, dass die Katze nach dieser Zeit entweder tot oder lebendig ist.

Der Logik der Kopenhagener Deutung der Quantenmechanik folgend existiert die Katze, solange die Kiste geschlossen ist, gleichzeitig in einer undefinierten Mischung der Zustände „lebend“ und „tot“. Ihr Schicksal wäre erst besiegelt, wenn man die Kiste öffnet, genau wie ein Photon Welle und Teilchen gleichzeitig ist, bis wir uns entscheiden es zu vermessen, sodass seine Wellenfunktion zu einer Form kollabiert.

Schrödinger fand, dass eine derart abstrakte Erklärung für ein echtes Tier wie eine Katze unsinnig ist. Sie war sicherlich entweder tot oder lebendig, keine Mischung daraus. Die Interpretation von Bohr, so fand er, kann nicht mehr sein, als eine praktische Abkürzung für etwas, was auf einer tieferen Ebene wirklich vor sich gehe. Das Universum funktioniere auf eine nicht bekannte Art und Weise, und wir können immer nur einen Teil des ganzen Bildes sehen.

Auch Einstein fand, dass das Kopenhagener Bild unsinnig war. Es warf viele neue Fragen auf. Wie bringt der Beobachter die Wellenfunktion zum Kollaps? Wer kann überhaupt zum Beobachter werden – muss es sich um einen Men-

„Ich bin überzeugt, dass die theoretische Physik eigentlich Philosophie ist.“

Max Born
in *Mein Leben*, 1975

1927

Heisenberg veröffentlicht seine Unbestimmtheitsrelation

1927

Bohr schlägt seine Kopenhagener Deutung vor

1935

Einstein, Podolsky und Rosen veröffentlichen ihr Paradoxon

1935

Schrödinger veröffentlicht sein Katzen-Gedankenexperiment

schen handeln, oder kann es jedes Wesen sein? Kann sich die Katze selbst beobachten? Ist Bewusstsein notwendig?

Kann die Katze die Wellenfunktion des zerfallenden Teilchens zum Kollaps bringen, um das Ergebnis festzulegen? Wie kann dabei überhaupt alles im Universum existieren. Wer beobachtete etwa den ersten Stern oder die erste Galaxie? Oder war alles in einem Quanten-Mischzustand bis das erste Leben entstand? Die Rätsel sind endlos.

Überzeichnet man die Logik der Kopenhagener Deutung, ist es möglich, dass im Universum überhaupt nichts als Solches existiert. Diese Ansicht erinnert an die Philosophie von George Berkeley, einem Philosophen aus dem 17. Jahrhundert und Zeitgenossen von Isaac Newton. Berkeley vertrat die Ansicht, dass die ganze Welt nur ein Teil unserer eigenen Vorstellung ist. Es gibt keine Beweise dafür, dass außerhalb von uns selbst überhaupt irgendetwas existiert – alles, was wir sehen, könnte sich nur in unserem Verstand abspielen.

Viele Welten Die philosophische Frage, inwieweit der Akt der Beobachtung über deren Ergebnis entscheidet, fand 1957 eine weitere Antwort in Form einer alternativen Deutung durch Hugh Everett. Er meinte, eine Beobachtung zerstöre keine Möglichkeiten, sondern teilt sie in eine Reihe von parallelen Universen auf.

Erwin Schrödinger (1887–1961)

Erwin Schrödinger wurde als Sohn eines Botanikers in Wien geboren. Er entschied sich für ein Studium der theoretischen Physik, obwohl er sich auch für Poesie und Philosophie interessierte. Im Ersten Weltkrieg diente er in der österreichischen Artillerie in Italien, wobei er sogar an der Front mit seinen Forschungsarbeiten weitermachte.

Nach dem Krieg kehrte er zur akademischen Forschung zurück und hatte Stellen in Zürich und Berlin. Als die Nazis an die Macht kamen, entschloss er sich, Deutschland zu verlassen und nach Oxford umzuziehen. Doch kaum war er dort angekommen, erfuhr

er, dass ihm 1933 zusammen mit Paul Dirac für seine Quantenmechanik der Nobelpreis verliehen werden sollte. 1936 kehrte er nach Graz zurück, aber die politischen Ereignisse holten ihn wieder ein. Nachdem er die Nazis kritisiert hatte, verlor er seine Stelle und zog ans Institute for Advanced Studies in Dublin um, wo er dann auch blieb, bis er nach seiner Pensionierung wieder nach Wien zurückkehrte. Schrödingers Privatleben war kompliziert; er hatte zahllose Affären, viele davon mit Kenntnis seiner Frau, und mehrere Kinder mit anderen Frauen.

„Einstein meinte, es sollte so etwas wie eine reale Welt geben, die nicht unbedingt durch eine Wellenfunktion beschreibbar ist, während Bohr betonte, dass die Wellenfunktion nicht wirklich eine reale Mikrowelt beschreibt, sondern nur Wissen, das nützlich ist, um Vorhersagen zu machen.“

Sir Roger Penrose, 1994

Nach seiner „Viele-Welten-Hypothese“ spaltet sich jedes Mal, wenn wir den Charakter eines Photons festlegen das Universum in zwei Teile auf. In der einen Welt ist das Licht eine Welle, in der anderen ein Teilchen. In einem Universum lebt die Katze, wenn wir die Kiste öffnen, in der Gegenwelt wurde sie vom Gift getötet.

In jeder anderen Beziehung sind die beiden Verzweigungen des Universums gleich. So entsteht also bei jeder Beobachtung eine neue Welt aus der weitere Verzweigungen möglich sind. In der Geschichte des Universums wären dabei ziemlich viele parallele Welten entstanden – eine unbestimmte, vielleicht unendliche Zahl.

Everetts Idee wurde zuerst ignoriert, bis einige populärwissenschaftliche Artikel und Science-Fiction-Fans, die fasziniert davon waren, sie ins Rampenlicht brachten. Heute stimmt sie mit einer modernen Variante, der sogenannten Multiversum-Theorie überein, die einige Physiker verwenden, um zu erklären, warum unser Universum so lebensfreundliche Bedingungen bietet – weil alle unwirtlichen Universen irgendwann abgespalten wurden.

18 Das EPR-Paradoxon

1935 formulierten drei Physiker – Albert Einstein, Boris Podolsky und Nathan Rosen – ein Paradoxon, das die quantenmechanischen Interpretationen infrage stellte. Der Umstand, dass eine Quanteninformation anscheinend schneller als Licht sein müsste, schien ein gewichtiges Argument gegen die Vorstellung des Kollapses von Wellenfunktionen zu sein.

Die Kopenhagener Deutung der Quantenmechanik, die Niels Bohr 1927 vorgeschlagen hatte, behauptet, dass der Akt der Messung ein Quantensystem beeinflusse und es dazu bringt, eine Eigenschaft anzunehmen, die danach gemessen wird. Wellen- und Teilcheneigenschaften des Lichts wissen, wann sie auftreten müssen, denn derjenige, der den Versuch durchführt, sagt es ihnen.

Albert Einstein fand, das sei absurd. Die Bohr'sche Vorstellung bedeutete, dass Quantensysteme in einem undefinierten Zustand seien, bis sie tatsächlich beobachtet werden. Bevor eine Messung ergibt, in welchem Zustand es ist, existiert das System in einer Überlagerung aller möglichen Zustände. Einstein fand, dass eine derartige Überlagerung unrealistisch sei. Ein Teilchen existiert, ganz egal, ob es beobachtet wird oder nicht.

Einstein glaubte, dass alles im Universum aus sich heraus existiere und dass die Unbestimmtheiten der Quantenmechanik nur zeigten, dass an der Theorie oder unserer Interpretation davon etwas falsch sei. Um diese Lücken zu verdeutlichen, überlegten sich Einstein und seine Kollegen Boris Podolsky und Nathan Rosen ein Gedankenexperiment, das sie 1935 in einer gemeinsamen Veröffentlichung beschrieben. Es ist als das Einstein-Podolsky-Rosen- oder EPR-Paradoxon bekannt.

Stellen Sie sich ein Teilchen vor, etwa einen Atomkern, der in zwei kleinere Kerne zerfällt. Wenn das ursprüngliche Teilchen in Ruhe war, müssen die bei-

Zeitleiste

1905

Einstein beschreibt das Photon

1924

De Broglie behauptet, dass sich Teilchen wie Wellen verhalten können

1925

Heisenberg veröffentlicht seine Matrizenmechanik

1926

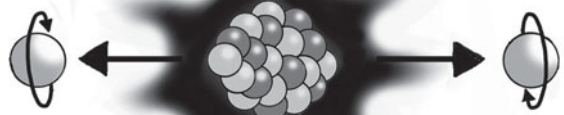
Schrödinger stellt seine Wellengleichung auf

den entstehenden Teilchen aufgrund der Energieerhaltung gleichen, aber entgegengesetzten Impuls und Drehimpuls haben. Sie fliegen also auseinander und drehen sich in entgegengesetzte Richtungen.

Auch andere Quanteneigenschaften der Teilchen sind verbunden. Wenn wir die Spinrichtung des einen messen, wissen wir sofort den Zustand des anderen: er muss entsprechend den Quantenregeln in die andere Richtung weisen. Solange keines der Teilchen mit einem anderen in Wechselwirkung tritt, was das Signal stören würde, bleibt diese Tatsache wahr, ganz egal, wie weit die Teilchen auseinander sind, und wie viel Zeit vergangen ist.

In der Sprache der Kopenhagener Deutung bedeutet das: beide Tochterteilchen existieren zuerst in einer Überlagerung aller möglichen Ergebnisse – eine Mischung aus allen verschiedenen Geschwindigkeiten und Drehrichtungen, die sie besitzen können. In dem Moment, in dem wir an einem davon eine Messung durchführen, kollabiert die Wellenfunktion der Wahrscheinlichkeiten für beide Teilchen und ergibt ein bestimmtes Ergebnis.

Einstein, Podolsky und Rosen behaupteten, dass das Unsinn sei. Einstein wusste, dass nichts schneller als Licht sein kann. Wie also kann ein Signal ohne Zeitverzögerung zu einem Teilchen kommen, das sehr weit weg sein kann, vielleicht sogar auf der anderen Seite des Universums? Die Kopenhagener Deutung musste falsch sein. Schrödinger verwendete später den Begriff „Verschränkung“, um diese verrückte Fernwirkung zu beschreiben.



Ein Atomkern zerfällt, und es entstehen zwei Teilchen mit entgegengesetztem Spin.

Die Quantentheorie enthüllt auf diese Weise eine grundlegende Einheit des Universums.

Fritjof Capra

in Das Tao der Physik, 1975

1927

Heisenberg veröffentlicht seine Unbestimmtheits-Relation

1927

Bohr schlägt seine Kopenhagener Deutung vor

1935

Einstein, Podolsky und Rosen veröffentlichen ihr Paradoxon

1935

Schrödinger veröffentlicht sein Katzen-Gedankenexperiment

Verschränkung Einstein glaubte an eine „lokale Realität“, also daran, dass alles in der Welt unabhängig von uns existiert und dass Signale Informationen nicht schneller als mit Lichtgeschwindigkeit übertragen können. Die beiden Teilchen in dem Gedankenexperiment müssen seiner Ansicht nach bereits zum Zeitpunkt der Trennung wissen, in welchem Zustand jedes von beidem ist. Sie tragen diese Information mit sich und schalten nicht weit entfernt gleichzeitig auf einen Wert um.

Aber Einstein irrte sich. Seine Idee klingt vernünftig und stimmt mit unserer Alltagserfahrung überein. Doch es wurde im Laufe der Jahrzehnte durch zahllose Quantenexperimente gezeigt, dass sie nicht richtig ist. Diese „spukhafte Fernwirkung“ tritt tatsächlich auf, und verschränkte Teilchen „sprechen“ wirklich mit Überlichtgeschwindigkeit miteinander. Physikern ist es inzwischen

sogar gelungen, die Quanteneigenschaften von mehr als zwei Teilchen miteinander zu verschränken. Sie haben zudem beobachtet, dass sie ihre Zustände über Entfernungen von Dutzenden von Kilometern zusammenpassend umschalten.

Quanten-Signalübertragungen können für die abhörsichere Kommunikation verwendet werden. Eine Nachrichtenübertragung ohne Zeitverzögerung ist leider nicht möglich, denn, um die Messung der Quantenzustände auswerten zu können, bedarf es einer zusätzlichen klassischen Informationsübertragung, die nicht schneller als das Licht sein kann. Möglicherweise werden aber einst Quantencomputer bestimmte mathematische Probleme in einem Bruchteil der heute benötigten Zeit lösen können, indem sie eine Vielzahl von Zuständen

Soweit die Gesetze der Mathematik sich auf die Realität beziehen, sind sie nicht sicher; und soweit sie sicher sind, beziehen sie sich nicht auf die Realität.

Albert Einstein

in *Sidelights on Relativity*, 1922

gleichzeitig verarbeiten können.

Die Einheiten der Quanteninformation werden als „Quantenbits“ oder kurz „Qubits“ bezeichnet. Genau wie normale Computer mit dem Binärcode Nachrichten durch lange Reihen aus Nullen und Einsen beschreiben, könnten Qubits einen von zwei Quantenzuständen annehmen. Aber besser noch: Sie könnten in einer Überlagerung der Zustände vorliegen, wodurch Berechnungen möglich wären, von denen wir heute noch träumen.

Aber die Unbestimmtheit, die die Quanten-Signalübertragung so leistungsfähig macht, bedeutet auch, dass wir nicht alle Informationen von einem Ort zum anderen übertragen können. Heisenbergs Unbestimmtheitsrelation bedeutet immer auch, dass unser Wissen nie vollständig sein kann. Deshalb ist die Teleportation von Menschen, wie wir sie aus der Science-Fiction kennen, unmöglich.

Fernwirkung Das Senden von Atomen wird zwar niemals möglich sein, aber es ist möglich mit der Quantenteleportation Quantenzustände über weite Strecken hinweg zu übertragen. Wenn zwei Menschen – Physiker nennen sie oft Alice und Bob – eines von zwei verschränkten Teilchen haben, können sie Qubits übertragen, indem sie bestimmte Messungen durchführen.

Hat Alice einen Quantenzustand und möchte diesen an Bob übertragen, dann benötigt sie dazu ein zusätzliches Paar verschränkter Teilchen, zum Beispiel zwei Photonen, von denen sie eines an Bob schickt. Alice verschränkt ihr Photon mit dem anderen Quantenzustand und führt eine Messung an dem System aus. Durch Alice' Messung wird Bobs Photon in einen bestimmten Quantenzustand gebracht. Nun muss Alice noch ihr Messergebnis auf herkömmlichem Weg zu Bob senden. Bob führt anhand von Alice' Messergebnis eine Transformation an seinem Photon durch und er erhält exakt Alice' ursprünglichen Quantenzustand. Alice und Bob müssen dazu den Quantenzustand nicht kennen, ja die Übertragung funktioniert sogar mit Zuständen, die aus quantenphysikalischen Gründen gar nicht messbar sind.

Weil dabei nichts irgendwohin reisen musste, ist es keine Teleportation von Materie im engeren Sinn. Aber wie bei der Teleportation wird ein Zustand an einer Stelle (bei Alice) vernichtet und dafür an einer anderen Stelle (bei Bob) identisch wieder hergestellt.

Auch für die Übertragung verschlüsselter Nachrichten eignen sich verschränkte Teilchen, sodass nur der richtige Empfänger in der Lage ist, sie zu lesen. Jeder Lauscher würde die Verschränkung und damit die Nachricht zerstören.

Einsteins Unbehagen bezüglich der Verschränkung war verständlich – es ist schwer vorstellbar, dass das Universum ein Netz aus Quantenverbindungen ist, in dem eine unbekannte Zahl von Teilchen mit seinem weit entfernten Zwilling spricht. Immerhin dürften die meisten Verschränkungen aber durch Wechselwirkungen inzwischen verloren gegangen sein.

19 Der Tunneleffekt

Die Radioaktivität kann nur mithilfe der Quantenmechanik erklärt werden. Ein Alphateilchen benötigt ziemlich viel Energie, um der starken Anziehung des Kerns zu entkommen, aber weil es eine kleine Wahrscheinlichkeit dafür gibt, dass das Teilchen die Energiebarriere überwinden kann, wird es ihm irgendwann gelingen. Dies ist der Tunneleffekt.

Wenn man einen Tennisball gegen eine Wand wirft, prallt er zurück; das ist keine Überraschung. Stellen Sie sich stattdessen vor, er tauche plötzlich auf der anderen Seite der Wand wieder auf. Genau das kann den Regeln der Quantenmechanik entsprechend auf atomarem Maßstab passieren.

Weil ein Teilchen, ein Molekül – oder sogar eine Katze – als Welle beschrieben werden kann, wie es Schrödingers Wellenfunktion zum Ausdruck bringt, haben Teilchen keinen bestimmten Ort, sondern sind im Raum ausgebreitet. Elektronen zum Beispiel umkreisen ihren Kern nicht wie Planeten, sie sind über die gesamte Orbitalschale verschmiert. Wenn wir es uns wie ein Teilchen vorstellen, könnte sich das Elektron mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit irgendwo in dieser Gegend aufhalten.

Beim quantenmechanischen Tunneleffekt kann ein Teilchen in der Quantenwelt eine Barriere überwinden, was im klassischen Bild unmöglich wäre. Es ist so ähnlich, wie wenn ein Pferd irgendwie auf die andere Seite einer Hecke kommen könnte, die viel zu hoch zum Überspringen ist, weil sich seine Wellenfunktion teilweise auch jenseits der Hecke ausbreitet. Die Überwindung von Energiebarrieren durch Tunneln spielt in der Kernfusion eine Rolle, die unsere Sonne und andere Sterne zum Leuchten bringt, außerdem wird sie in der Elektronik und Optik angewendet.

Radioaktiver Zerfall Die Physiker kamen auf das Tunneln, als sie zu erklären versuchten, wie radioaktive Atome zerfallen. Es ist unmöglich, den genauen Zeitpunkt vorherzusagen, in dem ein instabiler Kern auseinanderbricht und

Zeitleiste

1896

Henri Becquerel entdeckt die Radioaktivität

1926

Schrödinger stellt seine Wellengleichung auf

1926

Hund schlägt das Konzept des quantenmechanischen Tunnelns vor

Strahlung abgibt, aber wenn wir viele Kerne betrachten, können wir sagen, wie wahrscheinlich es ist. Man gibt dies üblicherweise als „Halbwertszeit“ an, das heißt die Zeit, die vergeht, bis ungefähr die Hälfte der Atome zerfallen ist. Formal ist es die Zeit, innerhalb der die Wahrscheinlichkeit, dass ein Atom zerfällt, 50 Prozent beträgt.

1926 entwickelte Friedrich Hund die Idee vom quantenmechanischen Tunneleffekt, womit sich der Alphazerfall sehr schnell erklären ließ. Ein Stück Polonium-212 zerfällt zum Beispiel mit einer Halbwertszeit von 0,3 Mikrosekunden und strahlt dabei Alphateilchen (zwei Protonen und zwei Neutronen) ab. Diese haben typische Energien von etwa 9 MeV (Millionen Elektronenvolt). Aber das Alphateilchen sollten der klassischen Physik zufolge 26 MeV benötigen, um die Bindungsenergie des Kerns überwinden zu können. Es sollte also überhaupt nicht entkommen können. Ganz offensichtlich passiert aber genau das. Was geschieht dabei?

Aufgrund der Unbestimmtheiten der Quantenmechanik gibt es die geringe Wahrscheinlichkeit, dass ein Alphateilchen aus dem Poloniumkern entkommen kann. Das Alphateilchen kann über die hohe Energiebarriere springen – oder genauer: tunneln. Die Wahrscheinlichkeit dafür kann mithilfe der Schrödingergleichung berechnet werden, denn die Wellenfunktion liefert auch eine gewisse Wahrscheinlichkeit außerhalb der Reichweite der Kernanziehungskräfte. Max Born erkannte, dass Tunneln eine generelle Möglichkeit der Quantenmechanik und nicht auf die Kernphysik beschränkt ist.

Wie können wir uns dieses quantenmechanische Tunneln vorstellen? Das Alphateilchen spürt die anziehende Kraft des Kerns und ist wie ein Ball, der in einem Vulkankrater rollt. Wenn es ein wenig Energie hat, wird es ein bisschen auf und ab rollen, aber gefangen bleiben. Wenn es irgendwie genügend Energie

Friedrich Hund (1896–1997)

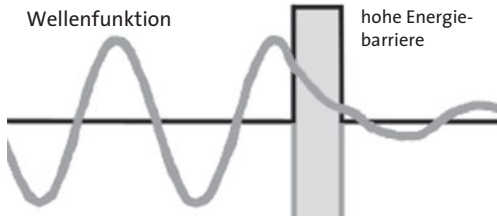
Hund wuchs in Karlsruhe auf. Er studierte Mathematik, Physik und Geografie in Marburg und Göttingen, wo er auch 1957 noch einmal eine Stelle übernahm. Hund besuchte Niels Bohr in Kopenhagen und war ein Kollege von Erwin Schrödinger und Werner Heisenberg. Er arbeitete mit Max Born an der Quanteninterpretation von Spektren zweiatomiger Moleküle, zum Beispiel von molekularem Wasserstoff. 1926 entdeckte er den Tunneleffekt. Die Hund'schen Regeln für das Auffüllen von Elektronenschalen werden in der Physik und Chemie immer noch häufig verwendet.

1928

George Gamow und andere wenden das Tunneln auf den Alphazerfall an

1957

Tunneln von Elektronen in Festkörpern wird allgemein anerkannt



Es besteht eine geringe Wahrscheinlichkeit dafür, dass die Wellenfunktion eines Teilchens durch eine Energiebarriere tunneln kann, selbst wenn sie nach den Regeln der klassischen Physik nicht genug Energie dazu hat.

dazugewinnen kann, rollt es über den Krater rand und den Vulkankegel herunter. Das ist das klassische Bild.

In der Quantenwelt hat das Alphateilchen auch wellenartige Eigenschaften. Und diese sind ausgedehnt. Nach Schrödingers Wellengleichung können die Eigenschaften des Teilchens als Wellenfunktion beschrieben werden, die grob wie eine Sinuswelle aussieht. Diese Wellenfunktion ist stetig und hat dort die größte Amplitude, wo es am wahrscheinlichsten ist, dass sich das Teilchen aufhält – in

unserem Beispiel innerhalb des Kerns. Im Bereich der Barriere ist die Wellenfunktion zwar stark gedämpft, aber sie geht nicht ganz auf null. Deswegen besteht eine kleine Wahrscheinlichkeit, dass sich das Teilchen auch jenseits der Barriere aufhalten kann.

Will man das mathematisch veranschaulichen, dann ist die Wellenfunktion innerhalb des Tals eine Sinuswelle, doch wenn sie die Flanken des Hügels erreicht, dehnt sie sich geradewegs durch diese Energiebarriere aus. Während sie durchgeht, fällt ihre Stärke ständig ab, deshalb wird es auch mit zunehmender Höhe und Dicke der Barriere schwieriger, aber niemals unmöglich, sie ganz zu durchdringen. Und auf der anderen Seite setzt die Welle ihren schlängelnden Sinuscharakter wieder fort. Indem man die Höhe der Amplitude der Sinuswelle auf der anderen Seite des Hügels mit der innerhalb des Tals in Relation setzt, kann man die Wahrscheinlichkeit berechnen, dass das Teilchen entkommen kann.

Elementarteilchen und die Atome, die sie bilden, tun Millionen von scheinbar unmöglichen Dingen gleichzeitig.

Lawrence M. Krauss, 2012

Evaneszente Wellen Aufgrund eines ganz ähnlichen Phänomens kann Licht einen Spiegel durchdringen. Ein Lichtstrahl, der unter Totalreflexion eine spiegelnde Oberfläche streift und vollständig reflektiert wird, scheint die Oberfläche nicht zu durchdringen. Nach den Maxwell'schen Gleichungen geschieht dies aber doch, allerdings nimmt die elektromagnetische Welle rasch, nämlich exponentiell ab, je weiter sie eindringt. Dies nennt man eine evaneszente Welle (evanescent: dt. dahinschwindend).

Die Reichweite evaneszenter Wellen ist so kurz, dass sie für uns unsichtbar sind. Aber wenn ein anderes, optisch ähnlich dichtes Material sehr nah an die

spiegelnde Oberfläche gestellt wird, kann es die Energie aufnehmen und übertragen. Diese Kopplungstechnik wird für manche optischen Geräte – zum Beispiel Strahlteiler – verwendet und ähnelt ein wenig der Ausbreitung von magnetischer Energie zwischen den Induktionsspulen eines Transformators.

Auch in der Elektronik ist das Tunneln nützlich. Es ermöglicht Elektronen in bestimmten Bereichen von Halbleitern und Supraleitern kontrolliert Energiebarrieren zu überwinden. Tunnelkontakte bestehen zum Beispiel aus zwei leitenden Materialien mit einem Isolator dazwischen – aber einige Elektronen können von einer Seite des Isolators zur anderen springen. Auch in einigen Typen von Dioden und Transistoren wird das Tunneln angewendet, um Spannungen zu steuern, ungefähr so, wie man die Lautstärke regeln kann.

Beim Rastertunnelmikroskop wird das Prinzip verwendet, um die Oberflächen von Materialien abzubilden, dabei werden Strukturen in der Größenordnung einzelner Atome sichtbar. Das funktioniert, indem man eine geladene Nadel in die Nähe einer Oberfläche bringt. Ein paar Elektronen tunneln von der Nadel auf die Oberfläche, und die Stärke dieses Stroms lässt Rückschlüsse auf den Abstand zwischen Nadel und Probe zu. Derartige Mikroskope haben eine Auflösung von nur einem Prozent eines Atomdurchmessers.

» Durch die Einführung der Quantenmechanik ist aus unserer wie ein Uhrwerk ablaufender Welt eine Lotterie geworden. Wichtige Ereignisse, wie der Zerfall eines radioaktiven Atoms, werden nun durch den Zufall, nicht durch irgendwelche Gesetze gesteuert. «

Ian Stewart

in *Spielt Gott Roulette?*, 2002

20 Kernspaltung

Kurz nachdem das Neutron entdeckt worden war, begannen Physiker damit große Atome damit zu beschießen, weil sie hofften, so neue Isotope und Elemente erzeugen zu können. Stattdessen brachen die Kerne auseinander. Die dabei freiwerdende Energie ließ die Kernspaltung als neue Energiequelle und für den Bau von Atombomben interessant werden.

In den 1920er- und 1930er-Jahren überlegten sich die Physiker, was sich außer Elektronen für die Untersuchung des Atomkerns eignen könnte. Die Radioaktivität – bei der ein großer Kern wie Uran oder Polonium in kleinere Bausteine auseinanderbrach – war wohlbekannt. Aber es war unklar, was dazu führte.

Nachdem Ernest Rutherford mit seinem Goldfolienexperiment den Kern entdeckt hatte, wandelte er 1917 Stickstoff in Sauerstoff um, indem er mit Alpha-Teilchen auf das Gas schoss. Außerdem schlugen Physiker von anderen Kernen kleinere Stücke ab. Aber erst 1932 gelang es John Cockcroft und Ernest Walton in Cambridge ein Atom in zwei Hälften zu teilen, indem sie ein Lithium-Ziel mit Protonen beschossen. Im gleichen Jahr gelang der umgekehrte Vorgang – Mark Oliphant verschmolz zwei Deuteriumkerne (eine schwere Form des Wasserstoffs) zu Helium.

Nachdem James Chadwick, ebenfalls 1932, das Neutron entdeckt hatte, eröffneten sich neue Möglichkeiten. Enrico Fermi in Italien und Otto Hahn mit Fritz Strassmann in Deutschland, beschossen das schwere Element Uran mit Neutronen, um noch schwerere Atome zu erzeugen. Aber 1938 gelang den beiden Deutschen etwas, das weitreichende Auswirkungen hatte. Sie teilten einen schweren Urankern ungefähr in der Mitte, sodass Barium entstand, das etwa 40 Prozent der Uranmasse hat.

Aber wie konnte der Einschlag eines Neutrons, das nur etwa ein halbes Prozent der Masse des Zielatoms Uran hatte, derart drastische Auswirkungen haben? Es war, als würde eine Melone in zwei Teile zerbrechen, weil sie von einer Erbse getroffen wurde. Die Entdeckung überraschte außerdem, weil Phy-

Zeitleiste

1896

Henri Becquerel entdeckt die Radioaktivität

1932

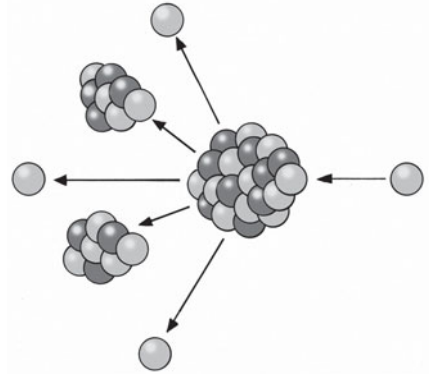
James Chadwick entdeckt das Neutron

1938

Die Kernspaltung wird beobachtet

siker wie George Gamow und Niels Bohr zu der Zeit dachten, der Kern ähnele einem Flüssigkeitstropfen. Die Kräfte der Oberflächenspannung sollten verhindern, dass sich der Tropfen teilt, und selbst wenn er sich teilte, würden sich die beiden positiv geladenen Stofftropfen abstoßen und auseinanderfliegen, so glaubten sie. Doch das war nicht das, was sie beobachteten.

Die Lösung kam von Hahns Kollegin Lise Meitner. Da sie vor den Nazis aus Deutschland geflohen war, lebte sie im Exil in Schweden. Meitner und ihr Neffe Otto Frisch, der ebenfalls Physiker war, erkannten sehr bald, dass es bei großen Kernen nicht so ungewöhnlich war, wenn sie in Hälften zerbrachen, denn die beiden Produkte sind stabiler als der Ausgangskern und deshalb müsste die Gesamtenergie geringer sein. Die verbleibende Energie musste irgendwie abgegeben werden. Meitner und Frisch nannten den Vorgang in Analogie zur Teilung einer biologischen Zelle „*nuclear fission*“, was als Kernspaltung ins Deutsche Eingang gefunden hat.



Neutronen, die auf einen schweren Kern geschossen werden, können den Kern in zwei Hälften teilen.

Eine mögliche Waffe Bei seiner Rückkehr nach Dänemark erwähnte Frisch ihre Idee bei Niels Bohr, der sie während einer Vortragsreihe auf der anderen Seite des Atlantiks verbreitete. Der italienische Emigrant Enrico Fermi begann daraufhin Kernspaltungsexperimente im Keller der Columbia University in New York. Der Ungar Leó Szilárd, der ebenfalls in Amerika im Exil lebte, erkannte, dass bei dieser Uran-Reaktion überschüssige Neutronen frei wurden, die weitere Spaltungen und so eine Kettenreaktion auslösen konnten, die sich selbst aufrecht erhielt und bei der ungeheure Energiemengen frei wurden.

Der Zweite Weltkrieg war ausgebrochen, und Szilárd hegte die Befürchtung, dass die deutschen Wissenschaftler auf die gleichen Schlussfolgerungen kommen würden. Er und Fermi beschlossen übereinstimmend, ihre Ergebnisse nicht zu veröffentlichen. 1939 überredeten Szilárd und zwei andere ungarische

1942

Die erste Kettenreaktion wird ausgelöst

1945

Atombomben werden über Japan abgeworfen

1951

In Kernkraftwerken wird Strom produziert

Flüchtlinge, Edward Teller und Eugene Wigner, Albert Einstein einen Brief an den US-Präsidenten Franklin Roosevelt mitzuunterzeichnen, der vor der Gefahr warnte, dass eine derartige Reaktion für den Bau einer Atombombe genutzt werden könnte.

Frisch, der jetzt in England im Exil war, machte sich mit Rudolph Peierls daran, zu bestimmen, wie viel Uran und welches Isotop notwendig waren. Die Antwort war schockierend – nur wenige Kilo des Uranisotops 235 (^{235}U) waren genug, um die Kettenreaktion auszulösen, nicht Tonnen davon, wie man erst dachte.

Wieder wurden Ideen über den Atlantik ausgetauscht, doch es schien immer noch schwierig, im Labor die Kettenreaktion auszulösen. Es war sehr schwer Uran anzureichern, und in den Experimenten wurden die Neutronen absorbiert bevor sie die Kernspaltungskette auslösten. An der University of Chicago gelang Fermi 1942 unter dem Fußballstadion die erste Kettenreaktion.

Inzwischen hatte auch Werner Heisenberg in Deutschland seine Regierung über die Möglichkeiten einer Uranbombe informiert. Glücklicherweise blieben die Deutschen in ihren Anstrengungen hinter den Alliierten zurück. Heisenbergs Rolle bei all dem ist unklar – manche denken, er habe das Projekt absichtlich verzögert, andere haben ihn dafür verdammt, dass er eine führende Rolle dabei gespielt hat. Wie dem auch sei, die deutschen Wissenschaftler haben zwar die

Robert Oppenheimer (1904–1967)

Robert Oppenheimer wurde als Sohn reicher Eltern in New York geboren. Als Teenager ging er nach New Mexiko, um sich von einer Krankheit zu erholen. Er studierte an der Harvard University Chemie und wechselte etwas später zur Physik. 1924 ging er an das von Ernest Rutherford geleitete Cavendish Laboratory der Cambridge University, eignete sich aber nicht wie vorgesehen als Experimentator. Um theoretische Physik zu betreiben, wechselte er 1926 zu Max Born nach Göttingen, wo er auch Größen wie Heisenberg, Pauli und Fermi kennenlernte. In den 1930er-Jahren kehrte Oppenheimer in die USA

zurück und arbeitete an der Caltech und in Berkeley. Er wurde als faszinierend und gleichzeitig kühl beschrieben, hatte aber eine starke Persönlichkeit. Seine kommunistischen Neigungen führten dazu, dass ihm die Regierung misstraute. Trotzdem wurde er 1942 mit der Führung des Manhattan-Projekts beauftragt. Oppenheimer machte sich nach dem Abwurf der Bomben starke Selbstvorwürfe. Er zitierte aus der Bhagavad Gita: „Jetzt bin ich der Tod geworden, der Zerstörer der Welten.“ In seinen späteren Lebensjahren engagierte er sich mit anderen Physikern für die nukleare Abrüstung.

Kernspaltung entdeckt, doch bis zum Ende des Krieges war es den Deutschen nicht einmal gelungen, eine Kettenreaktion auszulösen.

Im September 1941 besuchte Heisenberg das von den Deutschen besetzte Kopenhagen und seinen alten Kollegen Bohr. Das Thema ihres Gesprächs ist nicht genau bekannt – es ist das Thema von Michael Frayns Stück *Kopenhagen* –, obwohl beide in Briefen, von denen manche nie abgeschickt wurden, darüber berichteten. Die Briefe von Bohr wurden erst vor Kurzem von seiner Familie veröffentlicht. In einem wird bemerkt, dass Heisenberg ihn im Vertrauen über die Atomwaffenpläne der Deutschen informierte. Bohr war sehr aufgebracht und versuchte über Schweden eine Nachricht nach London zu schicken. Doch sie war verschlüsselt und wurde nicht verstanden, als sie ankam.

» Bevor sie entdeckt wurde, hatte keiner an die Kernspaltung gedacht. «

Lise Meitner, 1963

Das Manhattan-Projekt Frisch kehrte in die USA zurück. Seine Erkenntnis, dass nur eine kleine Menge Uran notwendig war, um eine Bombe zu bauen, fiel mit dem japanischen Überfall auf Pearl Harbor zusammen. Roosevelt rief daraufhin das US-Atombombenprojekt ins Leben, bekannt als Manhattan-Projekt. Es wurde von dem Physiker Robert Oppenheimer aus Berkeley auf einer Geheimbasis bei Los Alamos in New Mexico geleitet.

Oppenheimers Team begann mit dem Entwurf der Bombe im Sommer 1942. Der Trick war, die Uranmenge unterhalb der kritischen Masse zu halten, bis die Detonation den Spaltungsprozess in Gang setzte. Es wurden zwei Methoden ausprobiert, gepackt in die Bomben mit den Namen „Little Boy“ und „Fat Man“. Am 6. August fiel „Little Boy“ auf die japanische Stadt Hiroshima und setzte eine Energie äquivalent zu 20.000 Tonnen Dynamit frei. Drei Tage später vernichtete „Fat Man“ die Stadt Nagasaki. Jede der Bomben tötete sofort etwa 100.000 Menschen.

21 Antimaterie

Die meisten Elementarteilchen haben einen spiegelsymmetrischen Zwilling. Diese Antimaterieteilchen haben entgegengesetzte Ladung, aber die gleich Masse wie ihre „normale“ Form. Ein Positron ist zum Beispiel die positiv geladene Version des Elektrons. Der größte Teil des Universums besteht aus Materie. Wenn Materie auf Antimaterie trifft, zerstrahlen beide in einem Blitz aus Energie.

1928 versuchte der Physiker Paul Dirac die Schrödingergleichung um die Effekte der speziellen Relativitätstheorie zu erweitern. Die Wellengleichung beschrieb Teilchen wie das Elektron als stehende Welle, doch bis dahin war sie noch nicht vollständig.

Die Theorie galt für Partikel mit wenig Energie, also solche, die sich nur langsam bewegten, aber sie erklärte nicht die relativistischen Effekte hochenergetischer Teilchen, wie die der äußeren Elektronen in Atomen, die größer als der Wasserstoff sind. Damit die Spektren größerer oder angeregter Atome besser mit der Theorie übereinstimmen, wollte Dirac die relativistischen Effekte – Längenkontraktion und Zeitdilatation – in die Rechnungen einbeziehen und prüfen, welche Auswirkungen sie auf die Formen der Elektronenorbitale haben.

Als Dirac eine Gleichung für die Elektronenenergien hergeleitet hatte, schien sie zuerst zu allgemein zu sein. Die Mathematik erlaubte nämlich, dass ein Elektron nicht nur eine positive, sondern auch eine negative Energie haben konnte. Genau wie die Gleichung $x^2 = 4$ die Lösungen $x = 2$ und $x = -2$ hat. Die positive Lösung war das, was er erwartet hatte, aber die negative ergab keinen Sinn.

Gleich, aber entgegengesetzt Doch Dirac lehnte es ab, diesen verwirrenden Term mit der „negativen Energie“ einfach zu ignorieren. Stattdessen schlug er vor, dass so ein Teilchen tatsächlich existieren könnte. Vielleicht gab es ja Formen des Elektrons mit positiver statt negativer Ladung, aber der gleichen

Zeitleiste

1928

Dirac schlägt Antimaterie vor

1932

 Anderson entdeckt
das Positron

1955

 Antiprotonen werden
gefunden

Masse. Oder man konnte sie sich als Löcher in einem Meer normaler Elektronen vorstellen. Diese entgegengesetzte Art der Materie wurde deshalb „Antimaterie“ genannt.

Nun begann die Jagd. Und 1932 bestätigte der Wissenschaftler Carl Anderson am Caltech die Existenz des Positrons. Er hatte die Spuren von Partikelschauern verfolgt, die hochenergetische kosmische Strahlung beim Einfall in die Atmosphäre erzeugte. Diese war vom österreichischen Physiker Victor Hess erst zwei Jahrzehnte vorher entdeckt worden. Anderson beobachtete die Spuren von positiv geladenen Teilchen mit der Masse des Elektrons, das musste das Positron sein. Die Antimaterie war keine verrückte abstrakte Idee mehr, sondern Realität.

Das nächste Antiteilchen, das Antiproton, wurde 1955, also zwei Jahrzehnte später entdeckt. Emilio Segrè und seine Mitarbeiter an der University of California in Berkeley schossen mit einem Teilchenbeschleuniger – eine Maschine, die Bevatron genannt wurde – einen Strom schneller Protonen gegen Kerne in einem festen Ziel (Target). Die Energien der Protonen waren hoch genug, dass bei den Kollisionen Antiteilchen erzeugt wurden. Ein Jahr später wurde auch das Antineutron gefunden.

Paul Dirac (1902–1984)

Paul Dirac wurde gelegentlich als der seltsamste Mensch bezeichnet. Er gab zu, dass er niemals einen Satz begann, bevor er nicht sein Ende kannte. Seine Kollegen lästerten, dass die einzigen Worte, die er kannte, „ja“, „nein“ und „ich weiß nicht“ waren. Zum Glück war er genauso intelligent wie schüchtern. Seine Doktorarbeit, die er in Rekordzeit erstellt hatte und die ein vollkommen neues Bild der Quantenmechanik schuf, ist berühmt

für seine beeindruckende Kürze. Dirac arbeitete an der Vereinigung von Quanten- und Relativitätstheorie, sagte die Existenz von Antimaterie voraus und begann grundlegende Arbeiten zur Quantenfeldtheorie. 1933 wollte er den Nobelpreis ablehnen, weil er die Öffentlichkeit scheute; schließlich nahm er ihn doch an, nachdem ihn jemand darauf hingewiesen hatte, dass eine Ablehnung ihn noch mehr ins Rampenlicht rücken werde.

1965

Der erste Antikern wird erzeugt

1995

Anti-Wasserstoff-Atome werden geschaffen



Antimaterie und Materie annihilieren und erzeugen reine Energie.

Nun hatte man die Grundbausteine der Atome. War es jetzt auch möglich Antiatome zu erzeugen oder zumindest einen Antikern? Die Antwort war ja – wie 1965 gezeigt wurde. Ein Antikern des schweren Wasserstoffs (Deuterium), also ein Anti-Deuterium-Kern aus einem Antiproton und einem Antineutron, wurde von Wissenschaftlern am CERN in Europa und im Brookhaven Laboratory in Amerika erzeugt. Etwas länger dauerte es, ein Positron an ein Antiproton

zu binden, um Anti-Wasserstoff zu erzeugen. Aber auch das schaffte man 1995 am CERN. Heute untersucht man mithilfe von Experimenten, ob sich Anti-Wasserstoff genauso verhält wie normaler Wasserstoff.

Um gezielt auf der Erde Antimaterie zu erzeugen – statt nur Hinweise auf sie in der kosmischen Strahlung aus dem Weltall aufzufangen –, benötigen Physiker spezielle Maschinen mit riesigen Magneten und starken elektrischen Feldern, um die Teilchen zu beschleunigen und sie in Strahlen zu bündeln. In riesigen Teilchenbeschleunigern, wie dem Large Hadron Collider am CERN in der Schweiz, werden Teilchenstrahlen gegen Targets oder andere Strahlen geschossen.

Dabei werden hohe Energien frei und nach der Masse-Energie-Äquivalenz der Einstein-Gleichung $E = mc^2$ Schauer neuer Teilchen erzeugt. Weil Materie und Antimaterie in

einem Blitz aus reiner Energie annihilieren, sollten Sie es sich zweimal überlegen, ob Sie Ihrem Antimaterie-Zwilling die Hand geben wollen.

Ich liebe es, mit Gleichungen herumzuspielen, nur um schöne mathematische Zusammenhänge zu suchen, die vielleicht überhaupt keine physikalische Bedeutung haben. Manchmal haben sie eine.

Paul Dirac, 1963

Der unsymmetrische Urknall Wenn wir hinaus ins Universum blicken, beobachten wir nicht allzu viele Blitze von annihilierenden Teilchen. Der Grund dafür ist, dass es fast ausschließlich aus normaler Materie besteht – weniger als 0,01 % des Materials im Universum ist aus Antimaterie. Wie kam es zu dieser universellen Asymmetrie?

Vermutlich sind beim Urknall jeweils leicht unterschiedliche Mengen von Materie und Antimaterie entstanden. Im Laufe der Zeit sind die meisten Teilchen und Antiteilchen zusammengestoßen und haben sich ausgelöscht, aber einige wenige sind übriggeblieben. Wenn nur eines von 10.000.000.000 (10^{10}) Materieteilchen überlebt hat, würde es die Proportionen erklären, die wir heute vorfinden. Dies würde auch die große Zahl an Photonen und Formen reiner Energie erklären, die im Universum verstreut sind.

Vielleicht hat aber auch irgendein Quantenprozess im frühen Universum die Materie über ihre Spiegelform dominieren lassen. Vielleicht wurden in dem Feuerball ungewöhnliche Teilchen erzeugt, die vorzugsweise zu Materie zerfallen sind. Tausende von Physikern an den größten Teilchenbeschleunigern der Welt versuchen immer noch diese Fragen zu enträtseln.

„Ich glaube, dass die Entdeckung der Antimaterie vielleicht der größte Sprung unter all den großen Sprüngen der Physik unseres Jahrhunderts war.“

Werner Heisenberg, zitiert 1973

22 Quantenfeldtheorie

Wenn Licht und elektromagnetische Wellen durch Photonen übertragen werden, dann, so ist der Ansatz der Quantenfeldtheorie, müssen alle Felder durch Teilchen übertragen werden. Diese Theorie setzt voraus, dass Teilchen desselben Typs nicht unterscheidbar sind, dass bei Wechselwirkungen Teilchen emittiert und absorbiert werden und dass Antimaterie wirklich existiert.

Wenn Sie einen Magneten in die Nähe eines anderen bringen, werden Sie spüren, wie sich die beiden abstoßen oder anziehen. Aber wie wird diese Kraft übertragen? Und wie schafft es das Licht oder die Anziehungskraft der Sonne, über riesige Distanzen die Erde oder den kleinen Pluto zu beeinflussen?

Die Idee, dass Kräfte über größere Distanzen hinweg durch eine Art ausge dehntes „Feld“ wirken, entstand aus Michael Faradays Arbeiten über die Elektrizität und den Magnetismus Mitte des 19. Jahrhunderts. Seine Suche nach grundlegenden Gesetzen für den Elektromagnetismus – der elektrische und magnetische Phänomene verknüpft – wurde Jahrzehnte später durch James Clerk Maxwell vollendet. Mit nur vier Gleichungen beschrieb Maxwell die verschiedenen Aspekte elektromagnetischer Felder und wie sie mit der Entfernung schwächer werden.

Aber wie werden diese Kräfte übertragen? In der klassischen Physik denken wir üblicherweise, dass Objekte die Energie von einem Ort zum anderen übertragen. In einer Waffe übertragen die Atome einer Druckwelle Energie einer Explosion auf die Kugel, die dann auf ein Ziel trifft. Anfang des 20. Jahrhunderts beschrieb Albert Einstein Licht ganz ähnlich als Strom von Photonen, die Energiepakete abgeben, wenn sie auf eine Metallplatte treffen. Aber wie sieht es mit der anderen Kraft aus: der Gravitation oder der schwachen und der starken Wechselwirkung, die Kerne zusammenhält?

Zeitleiste

1831

Faraday entdeckt die elektromagnetische Induktion

1873

Maxwell stellt seine Gleichungen für den Elektromagnetismus vor

1905

Einstein schlägt das Konzept der Photonen vor

1925–27

Dirac beschreibt das Elektron und die Antimaterie

Austauschteilchen Die Quantenfeldtheorie, die Mitte der 1920er-Jahre entstand, nimmt an, dass alle Felder ihre Energieflüsse durch einen Austausch von Quantenteilchen übertragen – bekannt als Eichbosonen. Wie Photonen durchqueren sie den Raum, um ihre Wirkung zu entfalten. Wie Photonen übertragen sie auch bestimmte Energiequanten. Aber anders als Photonen haben einige von ihnen Masse. Und es gibt eine ganze Menagerie von ihnen.

Austauschteilchen sind nicht wie harte Billardkugeln, sondern mehr Kräuselungen im zugrundeliegenden Energiefeld. Sie sind weder echte Wellen noch echte Teilchen, sondern etwas dazwischen. Wie die Quantenpioniere Niels Bohr und Louis de Broglie erklärt haben, gilt das für alles auf atomaren Dimensionen. Diese Wechselwirkungsteilchen – zu denen das Photon gehört – verhalten sich unter bestimmten Umständen wie Teilchen und sie können nur eine genau definierte Menge an Energie tragen, entsprechend den quantenmechanischen Regeln. Fermionen, wie das Elektron, können ebenso als Träger des mit ihnen verbundenen Feldes angesehen werden.

Dirac und die Quantentheorie Das quantenmechanische Verhalten des elektromagnetischen Feldes wurde als Erstes untersucht. In den 1920er-Jahren versuchte der britische Physiker Paul Dirac eine Quantentheorie des Elektromagnetismus zu entwickeln. Er veröffentlichte sie 1927. Dabei konzentrierte er sich auf das Elektron. Was es so schwierig machte, sein Verhalten zu beschreiben, war, dass er erklären musste, warum ein Photon emittiert wurde, wenn ein Elektron von einem angeregten auf einen tieferen Energiezustand in einem Atom fiel. Wie wurde dieses zweite Teilchen tatsächlich erzeugt?

Er überlegte, dass Teilchen genauso miteinander reagieren könnten wie Chemikalien, solange sie sich an die Quantenregeln halten. Bestimmte Eigenschaften – wie Ladung und Energie – mussten, wenn man alle Teilchen berücksichtigte, vor und nach der Wechselwirkung erhalten bleiben. Also wechselwirkt das Elektron, wenn es Energie abgibt, und emittiert dabei die Energiedifferenz in Form eines Photons.

Diracs Kampf mit seinen Gleichungen für Elektronen führte schließlich zur Vorhersage der Antimaterie und des Positrons – das er sich als Loch in einem See aus Elektronen vorstellte. Teilchen haben ihre Antiteilchenzwillinge, mit

1927–28

Jordan und Wigner entwickeln die Quantenfeldtheorie

1946–50

Die Quantenelektrodynamik wird von Tomonaga, Schwinger und Feynman entwickelt

1954

Am Stanford Linearbeschleuniger werden Hinweise auf Quarks gefunden

1968

Gross, Wilczek und Politzer veröffentlichen ihre Quantenchromodynamik

einer entgegengesetzten Ladung und einer negativen Energie. Das Positron ist ein Antielektron.

Eine Annahme der Quantenfeldtheorie ist, dass all dies Elementarteilchen nicht unterscheidbar sind. Ein Photon mit einer bestimmten Energie sieht genauso aus, wie irgendein anderes und verhält sich auch gleich, ganz egal, wo im Universum es sich aufhält. Alle Elektronen sind vollkommen gleich, ob sie jetzt in einem Stück Schwefel oder einer Kupferplatte stecken oder in einer Leuchtstoffröhre herumschwirren.

Entstehung und Vernichtung von Energie Teilchen können manchmal plötzlich entstehen und wieder verschwinden. In Übereinstimmung mit der Heisenberg'schen Unschärferelation gibt es eine kleine Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein Energiepaket für eine Weile spontan auftauchen kann, sogar im Vakuum des Weltalls. Wie groß die Wahrscheinlichkeit dafür ist, hängt mit dem Produkt aus der Teilchenenergie und der Länge des Zeitraums zusammen, in dem das passiert – ein Teilchen mit hoher Energie kann also nur ganz kurz auftauchen.

Wollte die Quantenfeldtheorie diese Möglichkeiten berücksichtigen, dann musste sie die Statistik von vielen Teilchen einbeziehen, die alle dem Pauli-Prinzip gehorchten, das zum Ausdruck bringt, dass keine zwei Fermionen in

allen Eigenschaften übereinstimmen durften. 1927 bis 1928 arbeiteten Pascual Jordan und Eugene Wigner heraus, wie man viele Wellenfunktionen statistisch behandeln musste, um mit ihnen Felder darzustellen.

Aber die frühen Quantenfeldtheorien konnten einige Phänomene nicht erklären. Eines davon war, dass die Felder, die durch die Austauschteilchen erzeugt wurden, wiederum die Teilchen selbst beeinflussten. So hat zum Beispiel das Elektron eine elektrische Ladung, deshalb erzeugt es ein eigenes Feld und sitzt gleichzeitig selbst darin. Dies führt dazu, dass die Energien der Elektronenorbitale sich ein wenig verschieben.

Pascual Jordan (1902–1980)

Pascual Jordan wurde in Hannover geboren. Sein Vater war Künstler und hoffte, dass sein Sohn in seine Fußstapfen treten werde, doch Jordan entschied sich für die Wissenschaft. Nach einem Studium an der Technischen Universität Hannover, promovierte er an der Universität Göttingen, wo er mit Max Born zusammenarbeitete. 1925 veröffentlichten Born, Werner Heisenberg und Jordan die erste Theorie der Quantenmechanik. Ein Jahr später erweiterte Jordan die Idee der Energiequanten auf alle Felder – der erste Schritt in Richtung Quantenfeldtheorie war getan. Jordan erhielt nie den Nobelpreis, vielleicht weil er während des Zweiten Weltkriegs der NSDAP beigetreten war.

Woraus ein Elektron oder Photon tatsächlich bestand, war schwer vorstellbar. Wenn das negativ geladene Elektron eine Ausdehnung hat, statt punktförmig zu sein, würden Teile von ihm andere abstoßen. Elektromagnetische Spannungen könnten es dann auseinanderreißen. Aber wenn Elektronen infinitesimal kleine Punkte sind, wie kann man ihnen dann Eigenschaften wie Ladung und Masse zuordnen? Die Gleichungen füllten sich sehr schnell mit Unendlichkeitsstellen.

1947 fanden Physiker eine Möglichkeit, diese Unendlichkeiten zu kürzen – man nannte es Renormierung – und Pioniere wie Julian Schwinger und Richard Feynman brachten die Theorie voran. Das Ergebnis wurde als Quantenelektrodynamik bekannt, sie beschrieb, wie Licht mit Materie wechselwirkte und war konsistent mit der Relativitätstheorie. Elektromagnetische Effekte wurden über große Entfernungen über masselose Photonen durch den Raum übertragen.

Die anderen Kräfte zu erklären, war schwieriger und benötigte Jahrzehnte. Die Vereinigung der elektromagnetischen mit der schwachen Wechselwirkung – die bei der Fusion und dem Betazerfall eine Rolle spielt – brachte ein besseres Verständnis von Protonen und Neutronen, die aus winzigen Quarks aufgebaut sind. Die starke Wechselwirkung stellte noch eine größere Herausforderung dar, weil sie nur auf sehr kurzen Entfernungen wirkt. Deshalb wurden die elektroschwache Theorie und die Quantenchromodynamik erst in den 1970er-Jahren entwickelt.

Heute gibt es große Fortschritte bei der Vereinigung von schwacher und starker Wechselwirkung mit dem Elektromagnetismus. Aber das große Ziel, die Einbeziehung der Gravitation, wird uns noch eine Weile beschäftigen.

Es passiert oft, dass die Anforderungen an Einfachheit und Schönheit übereinstimmen, aber wenn sie in Konflikt stehen, muss Letztere den Vorrang haben.
Paul A. M. Dirac, 1939

23 Die Lamb-Verschiebung

Wie sieht ein Elektron aus? Eine Antwort aus den späten 1940er-Jahren auf diese Frage erlaubte es Physikern, ein Problem zu lösen, das es mit der Mathematik gab, die die quantenmechanische Sichtweise des Elektromagnetismus beschrieb. Das Elektron wird durch Wechselwirkungen mit Feldteilchen verschmiert, deshalb scheint es eine Ausdehnung zu haben.

In den 1930er-Jahren wussten Physiker schon ziemlich viel über Elektronen. Die einfache Vorstellung von Niels Bohr, in der Elektronen wie negativ geladene Planeten behandelt wurden, die um einen positiv geladenen Kern schwirrten, war verbessert worden. So hatte man die Abschirmung der äußeren Elektronen durch die inneren und die Auswirkungen des Drehimpulses berücksichtigt. Energieverschiebungen aufgrund des Elektronenspins in den Spektrallinien des Wasserstoffs zeigten, dass Elektronen sich wie kleine rotierende Ladungsbälle verhielten.

Der Zeeman- und der Stark-Effekt – also die feine Aufspaltung der Spektrallinien aufgrund magnetischer und elektrischer Felder – zeigten, dass die sich drehenden Elektronen wie Magnete wirkten. Und das Pauli-Prinzip erklärte, warum Elektronen, die ja Fermionen sind, nur bestimmte Quanteneigenschaften annehmen können und wie sie nach und nach die Schalen um die Atome auffüllten. Paul Dirac und andere bauten auch noch relativistische Korrekturen ein.

Dennoch blieben Fragen. Vor allem war immer noch nicht klar, wie ein Elektron aussah. Schrödingers Wellengleichung beschrieb die Wahrscheinlichkeit, dass sich ein Elektron an einem bestimmten Ort aufhielt, was durch eine Wellenfunktion ausgedrückt wurde. Aber in gewisser Hinsicht waren Elektronen durchaus lokalisierbar, da ja ihre Ladungen isoliert werden konnten und man sie auf Metallplatten schießen konnte. In den damals aufkommenden Gleichungen

Zeitleiste

1896

Zeeman beobachtet den Zeeman-Effekt

1922

Der Stern-Gerlach-Versuch zeigt den quantisierten Elektromagnetismus

1925

Goudsmit und Uhlenbeck schlagen vor, dass Elektronen geladene sich drehende Kugeln sind

Hans Bethe (1906–2005)

Bethe wurde in Straßburg geboren, das damals zu Deutschland gehörte, und zeigte schon sehr früh ein Gespür für Mathematik. Er schrieb auch sehr gerne und hatte Spaß daran, abwechselnd die Zeilen von links nach rechts und von rechts nach links zu schreiben. Bethe entschloss sich, an der Universität Frankfurt Physik zu studieren, denn „die Mathematik schien Dinge zu beweisen, die doch zu offensichtlich waren.“ Schließlich ging er nach München und beendete dort 1928 seine Doktorarbeit über Elektronenbeugung an Kristallen. Nachdem er nach Cambridge gezogen war, kam Bethes Humor zum Vorschein, so publizierte er eine Scherzveröffentlichung

über den absoluten Nullpunkt um seinen Kollegen Arthur Eddington zu necken (und zog sie später zurück). Während des Krieges zog Bethe in die USA um, weil er jüdische Vorfahren hatte, und blieb bis zum Ende seiner Karriere an der Cornell University. Er arbeitete in der Kernforschung und wirkte am Manhattan-Projekt mit. Dabei löste er das Problem, warum Sterne scheinen, indem er Fusionsreaktionen vorschlug. Dies brachte ihm den Nobelpreis ein. Bethes Sinn für Humor zeigte sich noch einmal als er zusammen mit R. Alpher und G. Gamow das „Alpha, Beta, Gamma Paper“ veröffentlichte.

der Quantenfeldtheorie, war es möglich, etwas unendlich Kleinem eine Ladung oder Masse zuzuweisen. Aber wenn ein geladenes Teilchen, wie ein Elektron, eine Ausdehnung hatte, wie konnte es dann existieren, ohne dass es von seiner Eigenabstoßung auseinandergerissen wurde? Die Gleichungen waren voller Unendlichkeitsstellen – mathematische Singularitäten –, die es unmöglich machten, damit umzugehen.

Quantendurchbruch 1947 wurde ein Experiment durchgeführt, aus dem man Schlussfolgerungen ziehen konnte, die die Quantenmechanik auf das nächste Level beförderten. An der Columbia University in New York fanden Willis Lamb und sein Student Robert Retherford einen Effekt in den Spektrallinien des Wasserstoffs. Lamb hatte während des Zweiten Weltkriegs an der Mikrowellentechnologie gearbeitet und versuchte nun, Wasserstoff bei Wellenlängen zu untersuchen, die viel größer waren als die des sichtbaren Lichts.

Bei den Mikrowellenfrequenzen, die sie verwendeten, zeigte das Wasserstoff-Emissionsspektrum zwei bestimmte Orbitale: ein sphärisches (genannt 2s-Zustand) und ein eher längliches (ein 2p-Zustand). Beide Energieniveaus liegen

1947

Lamb und Retherford entdecken eine Aufspaltung aufgrund der Formen der Elektronenorbitale

1947

Bethe schlägt die Renormierung vor

1946–50

QED wird von Tomonaga, Schwinger und Feynman entwickelt

dicht beieinander. Die Atomtheorie dieser Zeit sagte vorher, dass die beiden Orbitale die gleiche Energie haben sollten, weil sie aber verschiedene Formen hatten, sollten sie auf ein Magnetfeld unterschiedlich reagieren. Die Energiedifferenz, die so auftreten müsste, sollte eigentlich in einer weiteren Aufspaltung der Spektrallinien des Wasserstoffs sichtbar werden. Der Effekt sollte zwar zwischen allen Orbitalen mit verschiedenen Formen auftreten, doch mit Mikrowellen war er viel leichter zu erkennen als im optischen oder ultravioletten Teil des Spektrums.

Diese Energiedifferenz war genau das, was Lamb und Retherford fanden. Die beiden schossen einen Strahl aus Elektronen im rechten Winkel in einen aus Wasserstoffatomen. Dabei gewannen einige der Elektronen in den Wasserstoffatomen Energie und hüpfen ins 2s-Orbital. Die Quantenregeln verboten aber, dass sie diese Energie wieder abgeben konnten, indem sie in einen niedrigeren Energiezustand zurückfallen, deshalb blieben sie angeregt. Diese angeregten Atome lenkten die Wissenschaftler dann durch ein Magnetfeld – und erzeugten damit den Zeeman-Effekt – und ließen sie schließlich auf einer Metallplatte landen. Dort wurden Elektronen freigesetzt und erzeugten einen winzigen Strom.

Außerdem wurden in der Region des Magnetfelds die Atome mit Mikrowellen (bei Frequenzen, die so ähnlich auch in Mikrowellenherden verwendet werden) bestrahlt. Indem er die Stärke des Magnetfelds veränderte, konnte Lamb die Elektronen dazu bringen, in den 2p-Zustand zu springen. Von dort konnten die Elektronen bevor die Atome auf die Metallplatte trafen, wieder in den Grundzustand zurückkehren, da die Quantenregeln diesen Übergang erlaubten, sodass es zu keinem Stromfluss kam.

Lamb zeichnete bei einigen Frequenzen auf, wann dies passierte und erstellte daraus einen Graphen, aus dem er auf den Energieunterschied zwischen dem 2s- und 2p-Zustand bei Abwesenheit eines Magnetfelds schließen konnte – heute

nennt man diese nach ihm Lamb-Verschiebung. Sie war nicht null. Also musste die Theorie des Elektrons noch unvollständig sein.

1947 erschütterte diese Entdeckung die Gemeinschaft der Quantenphysiker. Es war das heiße Thema auf einer Konferenz in Shelter Island auf Long Island, New York, die im gleichen Jahr stattfand. Was bedeutete diese Verschiebung für die Form des Elektrons? Und wie konnte man die Gleichungen anpassen, damit sie sich darin widerspiegelt?

Wir brauchen die wissenschaftliche Erziehung, um Wissenschaftler hervorzubringen, aber wir brauchen sie genauso, um die Allgemeinheit zu bilden.

Hans Bethe
in *Popular Mechanics*, 1961

Viele Physiker nahmen an, die Verschiebung sei die Folge des „Eigenenergie-Problems“ – weil die Ladung des Elektrons selbst ein elektrisches Feld erzeugt, in dem es sich befindet. Aber die Gleichungen konnten damit nicht umgehen, sie sagten voraus, dass ein freies Elektron eine unendliche Masse haben müsste und dass die Spektrallinien, die dadurch entstanden, unendlich weit verschoben sein müssten. Diese unendlich großen Faktoren waren ein Fluch für die Physik dieser Tage.

Irgendetwas wurde gebraucht, um zu erklären, warum die Elektronenmasse begrenzt und nicht unendlich war. Hans Bethe stieß, während er von dieser Konferenz nach Hause fuhr, auf eine Methode, um das Problem zu umgehen. Er erkannte, dass eine saubere Lösung bei dem gegenwärtigen Kenntnisstand nicht möglich war, deshalb überarbeitete er die Gleichungen so, dass die Eigenschaften des Elektrons nicht mehr in Form ihrer üblichen Masse und Ladung ausgedrückt wurden, sondern in einer umskalierten Version davon. Es gelang ihm die Unendlichkeiten herauszukürzen, indem er geeignete Parameter wählte – dieser Ansatz wird Renormierung genannt.

Das Unendlichkeitsproblem tritt wegen der quantenmechanischen Körnung des elektromagnetischen Feldes auf. Das Elektron wird von den Teilchen, aus denen das Feld besteht, ständig angeschubst, genau wie bei der Brown'schen Bewegung Staubteilchen durch Luftmoleküle in Bewegung gesetzt werden. Deshalb wird das Elektron zu einer Sphäre verschmiert. Das verschmierte Elektron spürt eine geringere Anziehungskraft zum Kern, wenn es näher an ihm ist, als wenn es punktförmige wäre, deshalb hat das 2s-Orbital im Versuch von Lamb eine klein wenig höhere Energie. Das 2p-Orbital ist größer und weniger davon beeinflusst, weil das Elektron nicht so nahe am Kern ist, deshalb ist seine Energie geringer als die des 2s-Orbitals.

Bethes Erklärung passte zu den experimentellen Ergebnissen von Lamb sehr gut und kam gerade zur richtigen Zeit, um das Gebiet der Quantenphysik weiterzubringen. Seine Technik der Renormierung wird immer noch verwendet, auch wenn sie von manchen Physikern für etwas willkürlich gehalten wird.

Was wir beobachten, ist nicht die Natur selbst, sondern die Natur, die unseren Fragestellungen ausgesetzt ist.

Werner Heisenberg

in Physik und Philosophie, 1958

Die Brown'sche Bewegung des Elektrons

24 Quantenelektrodynamik

Nach Richard Feynman, einem ihrer Gründerväter, ist die Quantenelektrodynamik (QED) das „Juwel der Physik“. Sie ist wahrscheinlich die genaueste physikalische Theorie, die man kennt, und hat den Physikern geholfen, das Verhalten der Elektronen, Photonen und der elektromagnetischen Vorgänge außerordentlich gut zu verstehen.

Die QED ist die Quantenfeldtheorie der elektromagnetischen Kräfte. Sie erklärt, wie Licht und Materie wechselwirken, und berücksichtigt dabei auch die spezielle Relativitätstheorie. Die aktuelle Version beschreibt, wie geladene Teilchen durch den Austausch von Photonen interagieren und erklärt die Feinstruktur in den Spektrallinien des Wasserstoffs, auch die, die auf den Elektronenspin, den Zeeman-Effekt und die Lamb-Verschiebung zurückzuführen sind.

Die ersten Schritte in Richtung QED wurden in den 1920er-Jahren von Paul Dirac getan, als er zu erklären versuchte, wie ein Elektron Photonen emittierte oder absorbierte, wenn es in einem Wasserstoffatom Energie abgab oder dazugewann, und so die beobachteten Spektrallinien erzeugte. Dirac wandte die Idee der Energiequanten von Max Planck auf das elektromagnetische Feld an. Er stellte sich die Quanten als winzige Oszillatoren (also schwingende Saiten oder stehende Wellen) vor und führte die Idee von Teilchenwechselwirkungen ein, bei denen Teilchen spontan erzeugt oder vernichtet wurden.

Durchbruch Ein Jahrzehnt lang versuchten Physiker diese Theorie zu optimieren, dachten dann aber, sie hätten alle Möglichkeiten dazu ausgeschöpft. Dann aber mussten sie erkennen, dass das alles nur für den einfachen Fall des Wasserstoffatoms funktionierte. In komplizierteren Situationen – für Elektronen mit höheren Energien oder in größeren Atomen – wurden die Gleichungen nutz-

Zeitleiste

1873

Maxwell veröffentlicht seine Gleichungen des Elektromagnetismus

1927

Paul Dirac veröffentlicht eine Quantenbeschreibung des Elektromagnetismus

1927–28

Jordan und Wigner entwickeln die Quantenfeldtheorie

los, denn sie erforderten unendlich große Massen für das Elektron. Es kamen Zweifel an der gesamten Theorie auf: War die Quantenmechanik inkompatibel zur speziellen Relativitätstheorie? Weitere Entdeckungen in den 1940er-Jahren, wie die Lamb-Verschiebung und der Elektronenspin, erhöhten den Druck.

Hans Bethes Überarbeitung der Gleichungen von 1947, bei der er durch die Renormierung die Unendlichkeiten entfernte, und seine Erklärung der Lamb-Verschiebung entschärften die Lage. Doch das lieferte noch keine vollständige relativistische Theorie. Im Laufe der nächsten Jahre wurden Bethes Ideen von Physikern wie Sin-Itiro Tomonaga, Julian Schwinger und Richard Feynman weiterentwickelt. Indem sie die Gleichungen noch weiter manipulierten, gelang es ihnen, die Unendlichkeiten vollständig zu entfernen. Das brachte ihnen 1965 den Nobelpreis ein.

Richard Feynman (1918–1988)

Richard Feynman ist in New York geboren und aufgewachsen. Er fing sehr spät zu sprechen an. Erst mit drei gab er das erste Wort von sich, holte dies jedoch in seinem späteren Leben wieder auf, denn er entwickelte sich zum renommierten Dozenten und zu einem brillanten Physiker. Feynman studierte Physik an der Columbia University und in Princeton und durfte als Juniorwissenschaftler am Manhattan-Projekt in Los Alamos mitarbeiten. Feynman war ein Witzbold, der es liebte, seinen Kollegen in der Wüste von New Mexico Streiche zu spielen. Zum Beispiel brach er die Zahlenschlösser an Akten-schränken auf, indem er die allzu offensichtlich gewählten Codes erriet, etwa die Euler'sche Zahl 2,71828... und ließ Zettel zurück. Er begann in der Wüste zu trommeln

und zu tanzen, was ihm einen kauzigen Ruf einbrachte. Nach dem Krieg ging Feynman an das Caltech, unter anderem wegen des warmen Wetters. Er wurde als der „große Erklärer“ bekannt, denn er war ein hervorragender Lehrer und schrieb eine berühmte Buchreihe, die aus seinen Vorlesungen entstanden war. Er arbeitete nicht nur an der QED, für die er den Nobelpreis erhielt, sondern auch an Theorien zur schwachen Kernkraft und zu Supraflüssigkeiten. In einem berühmten Vortrag mit dem Titel „There's plenty of room at the bottom“ läutete er die Ära der Quantencomputer und der Nanotechnologie ein. Sein Physikerkollege Freeman Dyson beschrieb ihn einmal als „halb Genie, halb Clown“, änderte dieses Urteil aber später in „ganz Genie, ganz Clown“.

1947

Bethe schlägt
Renormierung vor

1946–50

QED wird von Tomonaga, Schwinger
und Feynman entwickelt

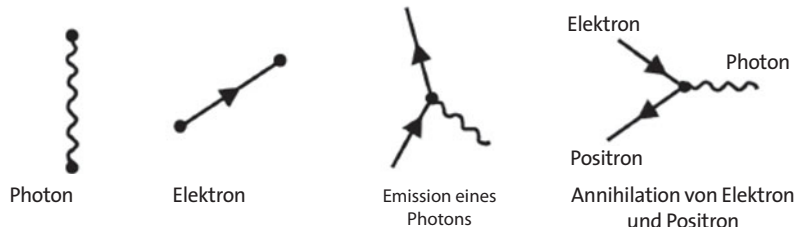
Die Renormierung wird auch heute in der Quantenphysik noch oft benutzt, doch ihre physikalische Bedeutung ist noch nicht klar. Feynman mochte sie nie, er nannte sie „Hokuspokus“.

Feynman-Diagramme Die Gleichungen der QED sind sehr kompliziert. Deshalb entwickelte Feynman, ein sehr komischer, aber herausragender Charakter, der ein hervorragender Lehrer war und wusste, wie man Zusammenhänge am besten visualisierte, eine sehr erfolgreiche Abkürzungsschreibweise. Statt langer algebraischer Gleichungen, zeichnete er einfach Pfeile, die die Wechselwirkungen der Teilchen repräsentierten und nur wenigen Regeln folgten.

Ein reiner Pfeil stellte ein Teilchen dar, das sich von einem Punkt zu einem anderen bewegte; eine wellenförmige Linie verwendet man für ein Photon, und andere Wechselwirkungsteilchen werden durch verschnörkelte Varianten davon bezeichnet. Jede Wechselwirkung zwischen Teilchen kann mithilfe von drei Pfeilen dargestellt werden, die sich an einem Punkt oder Knoten treffen. Abfolgen von Wechselwirkungen können erzeugt werden, indem man einfach weitere Bilder anhängt.

So wird zum Beispiel die Kollision eines Elektrons und eines Positrons und die folgende Annihilation und Erzeugung von Energie in Form eines Photons als zwei Pfeile gezeichnet, die sich an einem Punkt treffen, von dem dann eine gewellte Linie ausgeht. Die Zeit verläuft von links nach rechts auf der Seite. Weil Antiteilchen äquivalent zu echten Teilchen sind, die sich in der Zeit rückwärts bewegen, zeigt der Pfeil für das Positron in die andere Richtung von rechts nach links.

Zwei oder mehr Dreierknoten können kombiniert werden, um eine Reihe von Ereignissen darzustellen. Das Photon, das durch die Elektron-Positron-Wechselwirkung entstanden ist, könnte sich in der Folge aufspalten und ein weiteres



Feynman-Diagramme

Teilchen-Antiteilchen-Paar erzeugen, was durch zwei auseinanderlaufende Pfeile dargestellt würde.

Mit diesen Diagrammen können alle Arten von Wechselwirkungen dargestellt werden, denn sie funktionieren für alle Elementarkräfte, die durch Feldtheorien beschrieben werden können – vor allem den Elektromagnetismus und die schwache und starke Kernkraft. Es gibt nur einige Regeln, die befolgt werden müssen, etwa die Energieerhaltung. Und Teilchen, die allein nicht existieren können, müssen ausgeglichen werden, sodass die hereinkommenden und die entstehenden Teilchen echte Einheiten sind, wie Protonen und Neutronen

Wahrscheinlichkeiten Diese Diagramme sind nicht nur zur Visualisierung gut, sie haben eine tiefere mathematische Bedeutung – sie können uns verraten, wie wahrscheinlich die Wechselwirkungen sind. Um dies herauszufinden, muss man wissen, wie viele Wege es gibt, um an ein bestimmtes Ziel zu gelangen. Für jeden Anfangs- und Endpunkt kann die Zahl der alternativen Wechselwirkungspfade sehr schnell herausgefunden werden, indem man alle Varianten zeichnet. Wenn man sie dann zählt, erhält man die Antwort, welche am wahrscheinlichsten passieren wird.

Dies half Feynman bei seinen Überlegungen, was wohl hinter der QED steckt. Er erinnerte sich an das altbekannte Fermat'sche Prinzip aus der Optik über die Ausbreitung von Licht. Wenn man den Weg eines Lichtstrahls durch eine Linse und ein Prisma bestimmen will, in dem dieser gebrochen werden kann, sagt die Theorie, dass das Licht zwar alle möglichen Wege gehen könnte, letztlich aber der schnellstmöglichen der wahrscheinlichste ist und deshalb wird der größte Teil des Lichts diesem folgen. Indem Feynman seine Diagramme zählte, suchte er ebenso nach dem wahrscheinlichsten Ergebnis für eine quantenmechanische Wechselwirkung.

Die QED machte den Weg für weitere Entwicklungen in der Quantenfeldtheorie frei. Die Physiker weiteten dieses Bild auf das Feld der Farbladungen für die Quarks aus und nannten die Theorie Quantenchromodynamik oder QCD. Und die QED wurde mit der schwachen Kernkraft zur Theorie der elektroschwachen Kraft vereint.

» **Die Quantenelektrodynamik (QED) hat einen friedlichen Zustand der Koexistenz mit ihren Unendlichkeitsstellen gefunden ...** 
Sidney Drell, 1958

25 Der Betazerfall

Instabile Kerne zerfallen manchmal, indem sie Energie in Form von Teilchen abgeben. Der Betazerfall tritt auf, wenn sich ein Neutron in ein Proton umwandelt und dabei ein Elektron und eine Antineutrino emittiert. Enrico Fermis Theorie des Betazerfalls von 1934 gilt immer noch. Sie bereitete den Weg für die Forschungen zur schwachen Kernkraft, die eine wichtige Bedeutung bei der Fusion von Wasserstoff zu Helium in der Sonne hat.

Für die Radioaktivität, die aus einem Atomkern austritt, ist auch die schwache Kernkraft verantwortlich. Die wichtigsten drei Formen der Radioaktivität sind Alpha-, Beta- und Gammastrahlung. Alphateilchen sind nackte Heliumkerne aus zwei Protonen und zwei Neutronen. Sie werden zum Beispiel von schweren radioaktiven Elementen wie Radium oder Uran emittiert. Betateilchen sind Elektronen, die von einem Kern freigesetzt werden, wenn ein Neutron in ein Proton umgewandelt wird. Wenn der Kern nur Energie abgibt, emittiert er hochenergetische Photonen: Gammastrahlen.

Der Betazerfall war wie ein guter alter Freund. Es wird immer ein besonderer Platz in meinem Herzen nur für ihn reserviert sein.

Chien-Shiung Wu

Weil Alphateilchen relativ schwer sind, legen sie keine großen Strecken zurück. Schon von einem Blatt Papier oder unserer Haut können sie gestoppt werden. Betateilchen sind leichter und kommen weiter – man braucht schon Blei oder ein dickes Stück Metall, um sie aufzuhalten. Gammastrahlen dringen noch weiter ein.

In Experimenten – ähnlich denen, mit denen kurz zuvor das Elektron identifiziert wurde – maß Henri Becquerel 1900 das Verhältnis von Ladung zu Masse beim Betateilchen und fand heraus, dass es mit dem des Elektrons übereinstimmte. 1901 bemerkten Ernest Rutherford und Frederick Soddy, dass Strahlung die Natur des chemischen Elements, von dem sie abgegeben wurde, veränderte, es wanderte im Periodensystem der Elemente einen Platz nach rechts. Aus Cäsium wurde zum Beispiel Barium. Daraus

Zeitleiste

1900

Becquerel zeigt, dass ein Betateilchen das Gleiche wie ein Elektron ist

1901

Rutherford und Soddy zeigen, dass Betateilchen aus dem Kern kommen

1911

Meitner und Hahn zeigen, dass beim Betazerfall Energie verloren geht

1930

Pauli schlägt die Existenz des Neutrinos vor

schlossen sie, dass Betateilchen Elektronen aus dem Kern sein mussten.

1911 machten die deutschen Wissenschaftler Lise Meitner und Otto Hahn eine überraschend Entdeckung: Während Alphateilchen nur bei bestimmten Energien emittiert wurden, konnten Betateilchen bis zu einem bestimmten Maximum jeden Energiebetrag haben. Es sah so aus, als ob ein Teil der Energie, die ja erhalten bleiben musste, irgendwie verschwand.

Leptonen

Leptonen sind Grundbausteine der Materie. Es gibt sechs sogenannte Flavours: das Elektron, das Myon und das Tauon sowie ihre jeweils zugehörigen Neutrinos. Außerdem hat jedes sein Antiteilchen.

Teilchen	Symbol	Masse in GeV
Elektron	e	0,000511
Myon	μ	0,1057
Tauon	t	1,777

Suche nach einem fehlenden Teilchen

Auch der Impuls blieb nicht erhalten – die Richtung und die Geschwindigkeit des Kerns und des emittierten Betateilchens glichen einander nicht aus. Die beste Erklärung dafür war, dass noch ein weiteres Teilchen abgegeben wurde, das die überschüssige Energie und den Impuls ausglich. Doch man konnte nichts dergleichen nachweisen.

1930 schlug Wolfgang Pauli in einem berühmten Brief, der mit den Worten „Liebe radioaktiven Damen und Herren“ begann, die Existenz eines extrem leichten neutralen Teilchens vor, das ein Partner des Protons im Kern sei. Er nannte es Neutron. Später benannte es Enrico Fermi in Neutrino um (was „kleines Neutrales“ bedeutete), um eine Verwechslung mit dem schwereren Neutron zu vermeiden, das 1932 von James Chadwick entdeckt wurde.

Pauli dachte, dieses leichte Teilchen könne die Diskrepanzen erklären, und weil es keine Ladung hatte und sehr leicht war, konnte es sehr leicht seiner Entdeckung entgehen. 1934 veröffentlichte Enrico Fermi eine vollständige Theorie des Betazerfalls und schloss dabei die Eigenschaften des unsichtbaren Neutrinos mit ein. Es war eine Meisterleistung, aber Fermi war niedergeschmettert, als die Veröffentlichung vom Wissenschaftsmagazin *Nature* abgelehnt wurde, weil sie zu spekulativ sei. Eine Zeitlang widmete er sich daraufhin in seiner Forschung anderen Dingen.

1932

Chadwick entdeckt das Neutron

1934

Fermi veröffentlicht seine Theorie des Betazerfalls

1956

Cowan entdeckt das Neutrino

1962

Lederman und andere entdecken das Myon-Neutrino

1998

Oszillation der Sonnenneutrinos wird entdeckt

Enrico Fermi (1901–1954)

Als Kind in Rom zeigte sich Enrico Fermis Interesse an der Wissenschaft darin, dass er Motoren auseinanderbaute und mit Gyroskopen spielte. Da sein Vater starb, als er noch ein Teenager war, vertiefte er sich in seine Studien. Während er an der Universität Pisa Physik studierte, wurde er so gut in Quantenphysik, dass man ihn bat, Seminare zu organisieren, und 1921 veröffentlichte er sein erstes Paper über Elektrodynamik und Relativitätstheorie. Schon mit 21 promovierte er und wenige Jahre später wurde er Professor in Rom. Fermis Theorie des Betazerfalls wurde 1934 veröffentlicht, weil er aber enttäuscht davon war, dass sich so wenige dafür interessierten, wandte er sich im Folgenden der Experimentalphysik zu und machte erste Ver-

suche mit Neutronenbeschuss und Atomspaltung. Nachdem er für seine Arbeiten über die Kernphysik 1938 den Nobelpreis erhalten hatte, zog er in die USA um, um dem faschistischen Regime von Benito Mussolini zu entgehen. Fermis Gruppe gelang 1942 in Chicago die erste nukleare Kettenreaktion, daher wirkte er auch am Manhattan-Projekt mit. Fermi, der berühmt war für sein klares und einfaches Denken und seine Fähigkeiten sowohl in der experimentellen als auch in der theoretischen Physik, war einer der größten Physiker des 20. Jahrhunderts. Der Schriftsteller C. P. Snow bemerkte über seine Talente: „Alles über Fermi klingt wahrscheinlich als sei es übertrieben.“

Neutrinos Tatsächlich treten Neutrinos fast überhaupt nicht mit Materie in Wechselwirkung, und so dauerte es bis 1956, bis man sie ausgemacht hatte. Clyde Cowan und seine Mitarbeiter verwandelten dazu Protonen und Antineutrinos aus dem Betazerfall in Positronen und Neutronen. Aus quantenmechanischen Symmetriegründen ist das Teilchen, das beim Betazerfall emittiert wird, eigentlich ein Antineutrino.

Auch heute noch sind Neutrinos sehr schwer einzufangen. Weil sie keine Ladung tragen, ionisieren sie auch nichts. Weil sie so leicht sind, hinterlassen sie kaum Spuren, wenn sie mit einem Ziel zusammenstoßen. Tatsächlich fliegen die meisten von ihnen gerade durch die Erde.

Gelegentlich können Physiker eines von ihnen aufspüren, indem sie nach Lichtblitzen suchen, die entstehen, wenn eines in riesigen Wassertanks abgebremst wird – derartige gigantische Swimmingpools gibt es im Mittelmeerraum und unter dem antarktischen Eisschild. Das einfallende Neutrino kann dabei ein Wassermolekül treffen und ein Elektron herausschlagen, und damit eine Spur aus blauem Licht erzeugen (bekannt als Tscherenkow-Strahlung).

1962 zeigten Leon Ledermann, Melvin Schwartz und Jack Steinberger, dass es noch andere Neutrinentypen gab (genannt Flavours), indem sie Wechselwir-

kungen des Myon-Neutrinos entdeckten, ein Mitglied der Familie des Elektron-Neutrinos. Die dritte Sorte, das Tau-Neutrino wurde 1975 vorhergesagt, aber erst 2000 am Fermi-lab nachgewiesen.

Neutrinos werden auch in einigen Fusionsreaktionen erzeugt, die in der Sonne und anderen Sternen ablaufen. Ende der 1960er-Jahre bemerkten Physiker, die versuchten, die Sonnenneutrinos aufzuspüren, dass es zu wenige waren: nur 30 bis 50 Prozent der erwarteten Zahl kam bei uns an.

Das Problem der Sonnenneutrinos wurde erst 1998 gelöst, als Versuche wie am Super-Kamiokande in Japan und am Sudbury Neutrino Observatory in Kanada zeigten, wie Neutrinos zwischen den drei Flavours wechseln – oder oszillieren. Die relative Zahl von Elektron-, Myon- und Tau-Neutrinos war falsch eingeschätzt worden, und die verschiedenen Detektoren hatten einige Sorten übersehen. Die Neutrino-Oszillationen weisen darauf hin, dass Neutrinos eine, wenn auch kleine Ruhemasse besitzen.

Indem sie das Problem des Betazerfalls gelöst haben, haben Pauli und Fermi die Tür zu einer ganzen Welt von elektronenartigen Teilchen – den sogenannten Leptonen – aufgestoßen. Dazu haben sie das Neutrino vorhergesagt, ein Teilchen, dessen Eigenschaften auch heute noch verwirrend sind. Doch dies bereite den Weg für die Untersuchung der Kernkräfte.

» Wenn man erst einmal ein grundlegendes Wissen hat, wäre jeder Versuch, zu verhindern, dass es Früchte trägt, so aussichtsreich, wie zu hoffen, dass die Erde aufhören könnte um die Sonne zu kreisen. «

Enrico Fermi

*in Atomic Energy for Power,
Note e Memorie (Gesammelte
Veröffentlichungen)*

26 Schwache Wechselwirkung

Die schwächste der Elementarkräfte, die schwache Wechselwirkung, steuert den Zerfall von Neutronen zu Protonen und wirkt auf alle Fermionen. Eine ihrer seltsamen Eigenschaften ist, dass sie nicht spiegelsymmetrisch ist – das Universum ist „linkshändig“.

Die schwache Kernkraft ist eine wichtige Wechselwirkung bei radioaktiven Zerfallsprozessen. Die meisten Teilchen, sogar das freie Neutron, zerfallen nach kurzer Zeit in stabile Elementarteilchen. Innerhalb des Atomkerns sind Neutronen zwar meist stabil und langlebig, doch frei sind sie instabil. Nach etwa 10 Minuten hat sich ein Neutron mit 50 prozentiger Wahrscheinlichkeit in ein Proton, ein Elektron und ein Antineutrino verwandelt.

Beim Neutronenzerfall tritt Betastrahlung auf. Dies erlaubt die Radiokarbon-datierung – das in der Atmosphäre immer in konstanten Konzentrationen vorhandene Isotop Kohlenstoff-14 zerfällt aufgrund der schwachen Wechselwirkung mit einer Halbwertszeit von 5700 Jahren in Stickstoff-14, es wird aber nur von lebenden Organismen eingebaut. In die andere Richtung ermöglicht die schwache Wechselwirkung die Kernfusion in der Sonne und anderen Sternen, wobei aus Wasserstoff erst Deuterium und dann Helium entsteht. Es werden also mithilfe der schwachen Wechselwirkung schwerere Elemente erzeugt.

Die schwache Kernkraft heißt so, weil ihre Feldstärke mehr als Billionen Mal schwächer ist als die der starken Kernkraft, die die Protonen und Neutronen im Kern bindet, und immerhin noch Milliarden Mal schwächer als die elektromagnetische Kraft. Während die elektromagnetische Kraft über große Entfernungen wirken kann, wirkt die schwache Wechselwirkung nur über sehr kurze Distanzen – etwa 0,1 Prozent des Durchmessers eines Protons.

Zeitleiste

1927

Wigner schlägt das Konzept der Parität in Wellenfunktionen vor

1934

Fermi legt seine Theorie des Betazerfalls vor

1954

Yang und Mills veröffentlichen eine Theorie der starken Kernkraft

1956

Yang und Lee schlagen vor, dass die Parität bei der schwachen Wechselwirkung verletzt wird

Betazerfall In den 1930er-Jahren entwickelte Enrico Fermi seine Theorie des Betazerfalls und begann die Eigenschaften der schwachen Wechselwirkung zu entflechten. Fermi erkannte Parallelen zwischen der schwachen und der elektromagnetischen Kraft. Genau wie geladene Teilchen wechselwirken, indem sie ein Photon austauschen, so muss auch die schwache Kernkraft durch ein ähnliches Teilchen übertragen werden.

Die Physiker wandten sich nun den Grundlagen zu. Was ist ein Neutron überhaupt? Werner Heisenberg hatte sich das Neutron als Kombination eines Protons mit einem Elektron, das darauf „klebt“, vorgestellt, etwa wie ein Molekül. Er dachte, dass größere Kerne und Kombinationen davon durch eine Art „chemischer Bindung“ zusammengehalten werden, wobei Protonen und Neutronen durch den Austausch von Elektronen zusammengehalten werden. In einer Reihe von 1932 erschienenen Veröffentlichungen versuchte er die Stabilität des Heliumkerns (zwei Protonen und zwei Neutronen) und anderer Isotope zu erklären. Aber die Theorie funktionierte nicht so richtig – innerhalb weniger Jahre zeigten Experimente, dass sie nicht erklären konnte, wie zwei Protonen miteinander wechselwirken konnten.

Die Physiker schauten sich die Symmetrie an. Beim Elektromagnetismus bleibt die Ladung immer erhalten. Wenn Teilchen zerfallen oder sich verbinden, können sich Ladungen addieren oder gegenseitig aufheben, aber sie werden nicht erzeugt oder vernichtet. Eine weitere Eigenschaft in der Quantenmechanik ist die „Parität“: die Symmetrie bei der Spiegelung einer Wellenfunktion. Ein Teilchen hat eine gerade Parität, wenn es sich nicht ändert, wenn es von einer Seite zur anderen oder von oben nach unten reflektiert wird, sonst eine ungerade Parität.

Aber bei der schwachen Kernkraft waren die Zusammenhänge nicht so klar. 1956 schlugen Chen Ning Yang und Tsung-Dao Lee sogar die radikale Möglichkeit vor, dass die Parität bei der schwachen Wechselwirkung nicht erhalten sein könnte. 1957 dachten sich Chien-Shiung Wu, Eric Ambler und ihre Kollegen vom US-Büro of Standards in Washington DC ein Experiment aus, mit dem sie die Parität von Elektronen, die beim Betazerfall abgegeben werden, messen konnten. Sie verwendeten Kobalt-60-Atome und ließen die Betateilchen, die auftraten durch ein Magnetfeld fliegen. Wenn die Parität gerade wäre und die

1957

Wu und Ambler zeigen, dass die Parität im Betazerfall nicht erhalten bleibt

1957

Schwinger schlägt drei Trägerteilchen für die schwache Wechselwirkung vor: W^+ , W^- und Z^0

1964

Das Higgs-Feld wird vorgeschlagen

1983

Direkter Nachweis von W- und Z-Teilchen am CERN

Teilchen mit zufälliger Orientierung auftauchten, dann sollte sich ein symmetrisches Muster ergeben. Wenn sie eine Richtung bevorzugten, musste das Muster asymmetrisch sein.

Paritätsverletzung Die Physiker waren sehr gespannt auf die Ergebnisse. Wolfgang Pauli war so überzeugt davon, dass die Symmetrie erhalten bleibt, dass er sagte, er würde eine große Summe auf das Ergebnis wetten: „Ich glaube nicht, dass Gott ein schwacher Linkshänder ist.“ Vierzehn Tage später musste Pauli die Tatsache schlucken, dass die Parität nicht erhalten war.

Im gleichen Jahr, aber etwas später, bestätigten Maurice Goldhaber und sein Team am Brookhaven National Laboratory, dass das Neutrino und das Antineutrino entgegengesetzte Parität haben – das Neutrino ist „linkshändig“ und das Antineutrino ist „rechtshändig“. Die schwache Wechselwirkung, so wurde postuliert, wirke nur auf linkshändige Teilchen (und rechtshändige Antiteilchen).

Heute kennen wir mehr Teilchen und das Bild wurde dadurch komplizierter; trotzdem steht fest, dass die Parität bei der schwachen Wechselwirkung verletzt wird.

Viele Theoretiker machten sich hastig an das Problem. Im November 1957 schlug Julian Schwinger vor, dass an der Übermittlung der schwachen Kernkraft drei Bosonen beteiligt sein könnten. Damit Ladung durch sie übertragen werden konnte, mussten zwei davon entgegengesetzte Ladung tragen, er nannte sie W^+ und W^- . Das dritte Teilchen musste neutral sein. Er nahm an, es sei das Photon. Er stellte sich vor, dass beim Betazerfall das Neutron in ein Proton und ein W^- zerfiel und dieses wiederum in ein Elektron und ein Antineutrino.

Zehn Jahre zuvor hatte sich Julian Schwinger schon überlegt, ob die begrenzte Reichweite der schwachen Kraft nicht darauf hinweisen könnte, dass das Teilchen, das die Kraft überträgt, selbst eine Masse hat. Das Photon hat keine Masse, deshalb kann es sehr weit fliegen, aber das Äquivalent der schwachen Kernkraft könnte so schwer sein, dass es die Grenze des Kerns nicht überwinden kann. Die W-Bosonen mussten schwer und kurzlebig sein, sodass sie fast sofort zerfallen, und wir sie nicht beobachten können.

Schwinger setzte seinen Doktoranden Sheldon Glashow an diese Arbeit. Glashow brauchte seine Zeit, aber er fand noch mehr heraus. Er erkannte, dass die Tatsache, dass die W-Bosonen Ladung trugen, bedeutete, dass die schwache Wechselwirkung und der Elektromagnetismus zusammenhängen mussten. In den nächsten paar Jahren arbeitete er eine Theorie aus, die beide verband, doch

Es gibt nur etwas Schlimmeres, als vom Labor heim zu einer Spüle voll schmutzigen Geschirrs zu kommen, und das ist, überhaupt nicht ins Labor zu gehen.

Chien-Shiung Wu, zitiert 2001

sie erforderte, dass das dritte, neutrale Boson ebenfalls massiv war – es wurde das Z^0 getauft. Die schwache Kernkraft wurde also von drei schweren Bosonen übertragen: W^+ , W^- und Z^0 .

Bis 1960 machte Glashows Theorie zwar weitere Fortschritte, aber sie dümpelte nur vor sich hin. Genau wie die Quantenelektrodynamik steckte sie voller Unendlichkeiten, und keiner kam auf eine Idee, wie man diese beseitigen konnte. Ein weiteres Problem, mit dem er zu kämpfen hatte, war die Frage, warum die Trägerteilchen der schwachen Kernkraft eine große Masse hatten, das Photon aber keine.

Die elektroschwache Theorie Eine Lösung für die elektroschwache Theorie, die die schwache Kernkraft und den Elektromagnetismus vereinigte, versprach ein besseres Verständnis der Protonen und der Neutronen und der Tatsache, dass sie aus kleineren Teilchen, genannt Quarks, zusammengesetzt sind. Die schwache Kernkraft wandelt Quarks von einem Typ – oder Flavour – in einen anderen um. Ein Neutron wird also in ein Proton verwandelt, indem der Flavour eines Quarks geändert wird.

Das Masseproblem wurde 1964 theoretisch gelöst, als ein neues Teilchen – das Higgs-Boson – vorgeschlagen wurde. Es wurde vermutlich im Juli 2012 mit dem Large Hadron Collider am CERN experimentell nachgewiesen. Es zieht W- und Z-Bosonen an und verleiht ihnen eine Anziehungskraft und damit eine Trägheit. Weil die W- und Z-Bosonen so schwer sind, sind Zerfälle aufgrund der schwachen Wechselwirkung relativ langsam. Deshalb dauert es mehrere Minuten, bis ein Neutron zerfällt, während Photonen in Bruchteilen einer Sekunde abgegeben werden.

Etwa 1968 legten Glashow, Abdus Salam und Steven Weinberg eine vereinigte Theorie der elektroschwachen Kraft vor und erhielten dafür den Nobelpreis. Martinus Veltman und Gerard 't Hooft gelang es, die Theorie zu renormieren, sodass ihre Unendlichkeiten verschwanden. Hinweise auf die W- und Z-Teilchen folgten in Beschleunigerexperimenten in den 1970er-Jahren, direkt nachgewiesen wurden sie 1983 am CERN.

Während man lange dachte, die Naturgesetze seien immer spiegelsymmetrisch, stellte sich heraus, dass das für die schwache Kernkraft nicht gilt. Sie hat eine „Händigkeit“.

» Von Beginn der Physik an waren Symmetriebetrachtungen ein sehr mächtiges und nützliches Instrument bei unseren Bemühungen, die Natur zu verstehen. «
Tsung-Dao Lee, 1981

Worum es geht
Die linkshändige Kraft

27 Quarks

Als er versuchte, die Vielfalt der Elementarteilchen zu erklären, entdeckte Murray Gell-Mann Muster, die erklärt werden konnten, wenn die Teilchen aus drei grundlegenden Bausteinen aufgebaut sind. Inspiriert durch einen Roman von James Joyce nannte er sie Quarks. Innerhalb eines Jahrzehnts konnte nachgewiesen werden, dass es die Quarks tatsächlich gibt.

Bis 1960 hatten Physiker etwa 30 Elementarteilchen gefunden. Neben Elektronen, Protonen, Neutronen und Photonen gab es Dutzende exotischere Varianten wie Pionen, Myonen, Kaonen und Sigma-Teilchen – mit ihren jeweiligen Antiteilchen.

Enrico Fermi bemerkte einmal dazu: „Wenn ich mir die Namen all dieser Teilchen merken könnte, wäre ich Botaniker geworden.“ Nun begann die Suche nach einer Art Periodensystem für diese Teilchen, durch das sie verknüpft sind.

Bei den Elementarteilchen gibt es zwei grundsätzlich unterschiedliche Typen: Materie besteht aus Leptonen – dazu gehören Elektronen, Myonen und Neutrinos – und Hadronen, das sind die Baryonen wie Protonen und Neutronen sowie die Mesonen. Kräfte werden durch Eichbosonen übertragen; dazu gehören das Photon und das Gluon, wie das Pion und das Kaon, die für die starke Wechselwirkung verantwortlich sind, sowie die drei Eichbosonen der schwachen Wechselwirkung.

Der achtfache Pfad Als er dem Collège de France in Paris einen Besuch abstattete – wobei er angeblich sehr viel Rotwein getrunken haben soll – versuchte Murray Gell-Mann, all die Quanteneigenschaften dieser Teilchen zusammenzufassen. Es war, als würde man ein gigantisches Sudoku zu lösen versuchen. Als er sie nach quantenmechanischen Eigenschaften, wie ihrer Ladung und ihrem Spin, gruppierte, begann sich ein Muster abzuzeichnen. Er fand heraus, dass zwei Arten von Teilchen (Baryonen mit halbzahligem und Mesonen mit ganzzahligem Spin) jeweils passend in Achtergruppen angeordnet wer-

Zeitleiste

1954

Yang und Mills veröffentlichen aus Symmetriegründen eine Theorie der starken Wechselwirkung

1961

Gell-Mann veröffentlicht seinen achtfachen Pfad

1964

Gell-Mann veröffentlicht die Quark-Theorie

1968

Quarks werden am Stanford-Linearbeschleuniger entdeckt

Murray Gell-Mann (*1929)

Gell-Mann wurde als Sohn jüdischer Immigranten aus Österreich-Ungarn geboren und galt als Wunderkind. Bereits mit 15 studierte er an der Yale University, machte seinen Bachelor in Physik 1949 und ging dann an das MIT, um zu promovieren. Schon zwei Jahre später erlangte er den Doktorgrad.

Er klassifizierte die gerade entdeckten Kaonen und Hyperonen in der kosmischen Strahlung und schlug vor, dass ein Strangeness genanntes Quantenflavour bei der starken, nicht aber bei der schwachen Wechsel-

wirkung erhalten bleibt. 1961 ordnete er Hadronen in einem Oktettschema an und nannte es den achtfachen Pfad. 1964 schlug er während seiner Arbeit an der QCE vor, dass Hadronen aus drei „Quarks“ bestehen und dass die „Farbladung“ erhalten bleibt.

1969 erhielt Gell-Mann den Nobelpreis für Physik. In den 1990er-Jahren wandte er sich der Komplexitätstheorie zu. Er half bei der Gründung des Santa Fe Institutes in New Mexico und arbeitete dort parallel zu seiner Stelle am Caltech, die er seit 1955 innehatte.

den konnten. 1961 veröffentlichte er seine Vorstellungen unter dem Titel „der achtfache Pfad“, nach Buddhas acht Stufen auf dem Weg ins Nirwana.

Aber eines der Mesonen fehlte noch – man kannte nur sieben. Deshalb sagte er selbstbewusst die Existenz eines achten Mesons voraus. Es wurde nur einige Monate später von Luis Alvarez und seinem Team an der University of California in Berkeley gefunden. Als kurz darauf drei weitere Bosonen mit Spin $-3/2$ gefunden wurden, merkte Gell-Mann, dass sie in eine andere Gruppe mit zehn Objekten passten. Das Muster nahm allmählich Form an.

All diese Anordnungen ergaben mathematisch einen Sinn, wenn es drei Elementarteilchen gab, die diesen Mustern zugrunde lagen. Wenn Protonen und Neutronen aus drei kleineren Bausteinen zusammengesetzt waren, konnte man ihre Bausteine anders anordnen, um diese Teilchenstammbäume zu erhalten.

Die Grundbausteine mussten allerdings eine ungewöhnliche elektrische Ladung tragen, plus oder minus $1/3$ oder $2/3$ von der des Elektrons, sodass ihre Kombination die einfach positive Ladung des Protons oder null für das Neutron ergab. Derartige Teilladungen schienen lächerlich – etwas Derartiges hatte man noch nie beobachtet – deshalb gab Gell-Mann den imaginären Teilchen als Scherz den Namen „quorks“ oder „kworks“.

1973

Gross, Wilczek und Politzer veröffentlichen eine Theorie der Quantenchromodynamik

1974

Das Charm-Quark wird entdeckt

1977

Das Bottom-Quark wird entdeckt

1994

Das Top-Quark wird entdeckt

Quarks und ihre Flavours Als Gell-Mann *Finnegans Wake* von James Joyce las, fand er in dem Satz „Three quarks for Muster Mark!“ einen besseren Namen. Der Begriff, den Joyce verwendet hatte, war ein veraltetes englisches Verb für das Krächzen einer Möwe, aber Gell-Mann gefiel die Ähnlichkeit mit dem von ihm geschaffenen Begriff und der Verbindung mit der Zahl Drei. 1964 veröffentlichte er seine Quark-Theorie und schlug vor, dass das Neutron zusammengesetzt sei aus einem „Up-“, und zwei „Down-Quarks“. Beim Betazerfall wandle sich in einem Neutron ein Down-Quark in ein Up-Quark, sodass ein Proton entsteht. Dabei wird ein W^- -Teilchen emittiert.

Gell-Manns achtfacher Pfad schien zu funktionieren, doch nicht einmal der Physiker selbst wusste warum. Er nahm an, es sei lediglich ein mathematischer Ansatz. Andere verspotteten seine Quark-Theorie zuerst. Es gab kaum Hinweise darauf, dass Quarks physikalisch tatsächlich existierten, bis 1968 Versuche am Linearbeschleuniger von Stanford enthüllten, dass das Proton tatsächlich aus kleineren Komponenten aufgebaut war.

» **Three Quarks for Muster Mark! Sure he has not got much of a bark and sure any he has it's all beside the Mark.** «

James Joyce
in *Finnegans Wake*

Heute gilt Gell-Manns Vorstellung als gesichert, da immer mehr Teilchen entdeckt worden sind. Wir wissen, dass es Quarks mit sechs verschiedenen Flavours gibt: *up* und *down*, *strange* und *charm*, *bottom* und *top*, die man zu Paaren gruppiert. Das Up- und das Down-Quark sind die leichtesten und verbreitetsten. Nur bei sehr hohen Energien kommen bei Teilchenkollisionen die schwereren Quarks zum Vorschein – das Top-Quark wurde erst 1995 am Fermilab entdeckt.

Die verrückten Namen der Quarks, die ihre Eigenschaften zum Ausdruck bringen, entstanden ziemlich spontan. Bei den Up- und Down-Quarks kann man die Benennung noch am einfachsten nachvollziehen. Sie erhielten ihren Namen nach der Richtung ihres Isospins (eine Quanteneigenschaft bei der starken und schwachen Wechselwirkung, die analog dem Spin im Elektromagnetismus ist).

Die Strange-Quarks wurden so bezeichnet, weil es sich herausgestellt hat, dass sie die Komponenten dieser „seltsamen langlebigen Teilchen“ sind, die Jahrzehnte zuvor in der kosmischen Höhenstrahlung entdeckt wurden. Das „Charm-Quark“ wurde so genannt, weil sich sein Entdecker so darüber freute. Bottom- und Top-Quark wurden in Analogie zum Up- und Down-Quark benannt. Manche Physiker sind allerdings etwas romantischer und nennen Top- und Bottom-Quark „*truth*“ und „*beauty*“ (dt. Wahrheit und Schönheit).

Quarks können durch die schwache Wechselwirkung ihren Flavour ändern. Sie reagieren auf alle Elementarkräfte. Für jedes Quark gibt es ein Antiquark.

Teilchen, die aus Quarks bestehen, werden Hadronen genannt (vom griechischen Wort *hadros*, groß). Quarks können nicht allein existieren – sie treten nur gebunden in Hadronen als Zweier- und Dreiergruppen auf.

Quark-Farben Quarks haben ihre eigenen Eigenschaften, wie elektrische Ladung, Masse, Spin und eine weitere Quanteneigenschaft, die „Farbladung“, die mit der starken Kernkraft verknüpft ist. Die Quark-Farben werden als Rot, Grün und Blau bezeichnet. Antiquarks haben Antifarben, etwa Antirot. Genau wie sich in der Optik die drei Grundfarben zu weißem Licht verbinden, müssen Hadronen aus einer Kombination bestehen, die insgesamt Weiß ergibt.

Die Anziehung und Abstoßung der Quarks mit verschiedener Farbe wird durch die starke Kernkraft bestimmt und durch Teilchen übertragen, die man „Gluonen“ nennt. Die Theorie, die die starke Wechselwirkung beschreibt, wird Quantenchromodynamik (QCD) genannt.

Wie ist es möglich, dass ein paar einfache und elegante Formeln, die man wie kurze Gedichte niederschreibt und die strengen Regeln wie denen für das Sonett oder das Waka folgen, die universellen Regeln der Natur vorhersagen?

Murray Gell-Mann,

**bei seiner Nobelpreisrede am
10. Dezember 1969**

28 Tiefinelastische Streuung

Eine Reihe von Experimenten, die Ende der 1960er-Jahre in Kalifornien durchgeführt wurden, bestätigte das Quark-Modell des Protons und anderer Hadronen. Physiker zeigten, dass Elektronen, die sie mit hoher Energie auf Protonen geschossen haben, sehr stark zurückgeworfen wurden, wenn sie drei Punkte innerhalb des Nukleons trafen und dass die Quarks Bruchteile der Elementarladung tragen.

1968 rätselten die Physiker der Stanford University über die Ergebnisse, die ihr neuer Linearbeschleuniger lieferte. Am Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) südlich von San Francisco wurden nicht die höchsten Energien aller Teilchenbeschleuniger in der USA erreicht – das geschah in Brookhaven an der Ostküste. Aber der SLAC war für eine gewagte Aufgabe gebaut worden – er sollte das Proton zerlegen.

Die größeren Beschleuniger dieser Tage, wie der in Brookhaven, ließen meist Strahlen schwerer Protonen aufeinanderprallen. Man suchte in den Splittern des Zusammenpralls neue Teilchensorten. Richard Feynman äußerte dazu: „Das ist, wie wenn man eine Schweizer Uhr mit einem Hammer zerschlägt, um herauszufinden, wie sie funktioniert.“ Das SLAC-Team beschoss die Protonen dagegen mit einem Strahl schneller Elektronen.

Die Elektronen sind zwar viel leichter als Protonen und haben deshalb eine geringere Einschlagskraft, doch der amerikanische Theoretiker James Bjorken erkannte, dass sie dadurch präziseren Schaden anrichten können. Sehr hochenergetische Elektronen haben sehr kompakte Wellenfunktionen. Die Elektronen konnten ihren Stoß in einem Raumbereich abgeben, der winzig genug war, um das Proton zu durchstoßen. Im Prinzip gingen die Physiker des SLAC einen Schritt weiter als Rutherford, der 50 Jahre zuvor den Atomkern entdeckt hatte, indem er eine Goldfolie mit Alphateilchen beschoss.

Zeitleiste

1909

Rutherford führt sein Goldfolienexperiment durch

1918

Rutherford isoliert das Proton

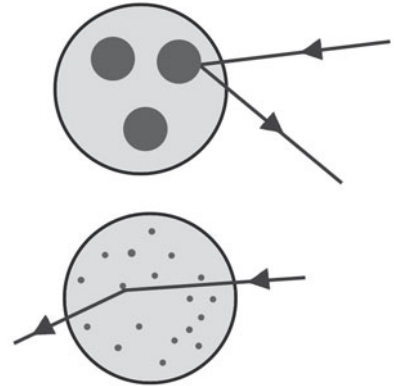
1932

Chadwick entdeckt das Neutron

1964

Gell-Mann schlägt das Quark-Modell der Hadronen vor

In den 1960er-Jahren wussten Physiker nicht, woraus Protonen aufgebaut sind. Murray Gell-Mann hatte zwar vorgeschlagen, dass sie aus drei Quarks bestehen könnten, doch das war eine rein theoretische Idee: Die Experimentalphysiker forderten Beweise. Genau wie sich Rutherford ein Rosinenkuchenatom vorgestellt hatte, so könnte das Proton eine massiver Kugel sein. Oder es könnte, ähnlich wie im Atommodell von Niels Bohr, aus hauptsächlich leerem Raum bestehen, der von kleineren Bausteinen besetzt ist.



Quarks innerhalb eines Protons streuen ankommende Elektronen, die sonst gerade durchgeflogen wären.

Zwei Arten von Kollisionen Im SLAC-Beschleuniger konnten Elektronen auf zwei verschiedene Weisen mit dem Proton zusammenstoßen. Im einfachsten Fall konnten sie vom Kern zurückgeworfen werden, dabei bleiben beide Teilchen intakt und reagieren entsprechend den Regeln der Impulserhaltung. Weil keine kinetische Energie verloren geht, wird dies als elastischer Stoß bezeichnet. Oder das Elektron könnte einen inelastischen Stoß durchführen, bei dem ein Teil der Energie in neue Teilchen verwandelt wird.

Bei der sanften Form der inelastischen Streuung bleibt das Proton im Wesentlichen an seinem Ort, es absorbiert nur einen Teil der Energie des Elektrons, und es werden einige andere Teilchen als Splitter erzeugt. Bei sehr hohen Energien kann das Elektron das Proton durchdringen und es auseinanderreißen – seine Innereien werden dabei in einem Teilchenschauer davongebblasen. Dieser zerstörerische Vorgang wird „tiefinelastische Streuung“ genannt. Bjorken erkannte, dass diese verraten könnte, wie das Proton aufgebaut ist.

Wenn das Proton eine gleichmäßige Masse wäre, dann sollten die Elektronen nur ein wenig von ihrem ursprünglichen Weg abgelenkt werden. Wenn das Proton aus winzigen harten Kernen aufgebaut ist, dann müssten die leichten Elektronen unter einem großen Winkel abprallen, genau wie Rutherford es bei den

1968

Innere Struktur von Protonen wird am SLAC enthüllt

1973

Glashow und Georgi schlagen eine große vereinheitlichte Theorie vor

1995

Top-Quark wird im Fermilab entdeckt

**„Ich glaube, es gibt
15.747.724.136.275.002.
577.605.653.961.181.555.
468.044.717.914.527.116.
709.366.231.025.076.185.
631.031.296 Protonen im
Universum und die
gleiche Zahl an
Elektronen.“**

**Sir Arthur Stanley Eddington,
1938**

Alphateilchen beobachtete, die von den harten Atomkernen des Goldes abprallten.

Bjorkens Team erkannte sehr schnell, dass viele Elektronen sehr stark abgelenkt wurden. Und da sie Maxima in den relativen Energien der gestreuten Elektronen ausmachten, konnten sie schließen, dass es in den Protonen eine Unterstruktur gab. Die Protonen mussten aus winzigen Körnern aufgebaut sein.

Auch Physiker stoßen aufeinander Diese Körner wurden nicht sofort als Quarks interpretiert, denn es gab auch andere Möglichkeiten. Richard Feynman, der gerade seinen Nobelpreis für seine Arbeiten zur Quantenelektrodynamik

abgeholt hatte, vertrat ein anderes Modell. Auch er hatte sich überlegt, dass Protonen und andere Hadronen vermutlich aus kleineren Komponenten aufgebaut sein müssten, doch er nannte seine Version „Partonen“ (engl. *parts of hadrons*, d.h. Teile von Hadronen).

Feynmans Modell befand sich noch in einem sehr frühen Stadium. Er wusste nicht, was Partonen sind, aber er dachte darüber nach, wie sie bei Stößen aufeinanderprallen würden, wenn das Proton und das Elektron aufgrund relativistischer Effekte gestaucht würden. Feynman war davon überzeugt, dass die SLAC-Ergebnisse sein Partonenmodell stützten, und weil er populär war und gerade den Nobelpreis erhalten hatte, waren viele kalifornischen Physiker gerne bereit, ihm zu glauben.

Aber weitere Experimente begannen das Quark-Modell zu stützen. Das nächste Ziel waren Neutronen. Sie erzeugten ein etwas anderes Muster bei den gestreuten Elektronen, also war ihr Aufbau etwas anders. Es dauerte mehrere Jahre und viel Gezänk, bis alle darin übereinstimmten, was die entscheidenden Tests waren und wie man die Daten interpretieren musste, aber am Ende gewann das Quark-Modell.

Protonen, Neutronen und andere Baryonen haben drei Streuzentren, die den drei Quarks entsprechen. Mesonen haben zwei Streuzentren, also ein Quark und ein Antiquark. Diese Körnchen sind extrem kompakt – im Wesentlichen punktförmig wie das Elektron. Und sie tragen eine Ladung, die ein oder zwei Drittel der Elementarladung ist, wie es das Quark-Modell vorhersagte.

1970 konnte Sheldon Glashow die Theorie weiter stärken, indem er aus dem Zerfall der schwereren Strange-Teilchen, wie dem Kaon, die Existenz des

**„Man könnte sagen,
dass Physiker es einfach
lieben, Streuexperimente
durchzuführen oder zu
interpretieren.“**
Clifford G. Shull, 1994

Charm-Quarks vorhersagte. Seit 1973 akzeptieren die meisten Physiker die Quark-Theorie.

Eine Reihe von Rätseln blieben aber noch: Während der Stöße scheinen sich die Quarks wie unabhängige Teilchen innerhalb des Kerns zu verhalten, aber sie können nicht freigesetzt werden. Warum? Woraus besteht der Quantenkleber, der sie zusammenhält? Und wenn Quarks Fermionen sind, wie können dann zwei ähnliche Seite an Seite innerhalb eines Protons oder Neutrons existieren? Das Pauli-Prinzip sollte das verhindern.

Die Antworten brachte die nächste Entwicklung der Quantenfeldtheorie – die Quantenchromodynamik (QCD) – und damit die Untersuchung der verschiedenen Eigenschaften der Quarks und der starken Wechselwirkung, die sie beherrscht.

Sheldon Glashow (*1932)

Sheldon Glashow ist in New York als Sohn russischer Immigranten geboren und aufgewachsen. Er war auf der Highschool ein Klassenkamerad eines anderen Physikers, Steven Weinberg, mit dem er sich – und mit Abdus Salam – 1979 den Nobelpreis teilte. Glashow besuchte die Cornell University und promovierte in Harvard, wo er zusammen mit einem weiteren späteren Nobelpreisträger studierte: Julian Schwinger. Glashow entwickelte 1964 zusammen mit James Bjorken die Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung und war der erste, der das Charm-Quark vorhersagte. 1973 schlugen er und Howard Georgi die erste große vereinheitlichte Theorie vor, die er einmal als „Tumor“ bezeichnete. Glashow setzte sich (ohne Erfolg) dafür ein, dass Stringtheoretiker nicht in die Physik-Fakultät von Harvard aufgenommen werden sollten.

29 Quantenchromodynamik

Nachdem die Quark-Theorie bestätigt worden war, begann die Suche nach einer vollständigeren Erklärung der starken Wechselwirkung, die das Verhalten von Protonen und Neutronen im Kern bestimmt. Die Quantenchromodynamik (QCD) beschreibt, dass auf Quarks eine „Farbkraft“ wirkt, die von Gluonen übertragen wird.

In den 1970er-Jahren begannen die Physiker zu akzeptieren, dass Protonen und Neutronen aus einem Trio kleinerer Komponenten aufgebaut sind, den sogenannten Quarks. Ursprünglich waren sie von Murray Gell-Mann vorhergesagt worden, weil er damit bestimmte Regelmäßigkeiten erklären konnte, die er in den Eigenschaften von Elementarteilchen gefunden hatte. Aber Quarks hatten einige verrückte Eigenschaften.

1968 deckten Experimente am Stanford Linear Accelerator Center durch den Beschuss von Protonen, später von Neutronen mit sehr schnellen Elektronen ihre Körnigkeit auf. Quarks haben eine Ladung, die plus oder minus das 1/3- oder 2/3-Fache der Elementarladung betrug, sodass die Verbindung von dreien davon entweder eine Ladung von +1 für das Proton oder 0 für das Neutron ergab.

Bei den SLAC-Experimenten verhielten sich die Quarks so, als hingen sie nicht zusammen. Aber sie konnten nicht aus dem Kern befreit werden – mussten also in ihn eingesperrt sein, was durch den Begriff „Confinement“ (engl. Gefangenschaft) ausgedrückt wird. Außerhalb sind niemals Teilchen mit dem Bruchteil einer Elementarladung beobachtet worden. Es war, als rasselten sie nur innerhalb des Protons herum, wie Eiswürfel in einem Cocktailshaker. Was hielt sie dermaßen stark fest?

Zeitleiste

1961

Gell-Mann veröffentlicht seinen achtfachen Pfad

1964

Gell-Mann schlägt das Quark-Modell der Hadronen vor

1968

Am SLAC wird eine Struktur in Protonen nachgewiesen

Ein zweites Problem war, dass Quarks Fermionen waren (mit Spin $1/2$). Das Pauli-Prinzip verbot aber, dass zwei Fermionen mit gleichen Eigenschaften am selben Ort sind. Trotzdem gibt es in Protonen und Neutronen zwei Up- bzw. zwei Down-Quarks. Wie war das möglich?

Farbladung Im Sommer 1970 dachte Gell-Mann über diese Probleme nach. Er hielt sich gerade auf einer physikalischen Klausurtagung in den Bergen von Aspen, Colorado, auf. Er erkannte, dass das Pauli-Prinzip-Problem gelöst werden konnte, wenn er eine neue Quantenzahl für die Quarks einführte (wie Ladung, Spin usw.). Er nannte diese Eigenschaft „Farbe“. Zwei Up-Quarks konnten sich dann zum Beispiel in einem Proton aufhalten, wenn sie unterschiedliche Farbe haben.

Er postulierte, dass Quarks drei Farben haben können: Rot, Grün und Blau. Also mussten die beiden ähnlichen Up- und Down-Quarks in Protonen und Neutronen nur verschiedene Farben haben, und schon ist die Einhaltung des Pauli-Prinzips gesichert. Ein Proton konnte zum Beispiel ein rotes und ein blaues Up-Quark und ein grünes Down-Quark enthalten.

Weil es diese Farben nur bei Quarks gab, nicht bei freien Teilchen wie Protonen, musste die Gesamtfarbe eines freien Teilchens Weiß sein – analog zu den Farben des Lichts. Eine Kombination von drei Quarks musste also immer Rot, Grün und Blau enthalten. Antiteilchen haben die entsprechenden Antifarben.

1972 bauten Gell-Mann und Harald Fritzsch die drei Quarkfarben in das Modell des achtfachen Pfades ein. Zusätzlich zu den drei Flavours und Farben forderte das Bild acht neue Teilchen für die Übertragung der Farbkraft. Man nannte sie Gluonen. Gell-Mann stellte sein Modell nebenbei bei einer Tagung in Rochester, New York, vor. Aber er zweifelte immer noch daran, dass es Quarks, geschweige denn Farbladungen und Gluonen, tatsächlich gab.

» Für mich ist die Einheit des Wissens ein lebendiges Ideal und Ziel. «
Frank Wilczek, 2004

Asymptotische Freiheit Schwieriger war das Problem des Confinements der Quarks im Kern zu lösen. Die SLAC-Experimente zeigten, dass sie sich umso unabhängiger verhielten, je näher sie zusammen waren. Andersherum

1973

Gross, Wilczek und Politzer veröffentlichen die Quantenchromodynamik

1974

Das Charm-Quark wird entdeckt

1977

Das Bottom-Quark wird entdeckt

1979

Gluonen-Jets werden beobachtet

1995

Das Top-Quark wird entdeckt

ausgedrückt: Sie zogen einander umso mehr an, je weiter sie voneinander weg waren.

Dieses Verhalten wird „asymptotische Freiheit“ genannt, denn sie sollten theoretisch vollkommen frei sein, wenn sie keinen Abstand haben, und dann auch nicht miteinander wechselwirken. Dieses Verhalten konnte man bestenfalls als „nicht intuitiv einleuchtend“ bezeichnen, denn bei Kräften wie dem Elektromagnetismus und der Gravitation war es genau andersherum: Ihre Stärke wurde mit dem Abstand geringer.

1973 dehnten David Gross und Frank Wilczek – und unabhängig von den

beiden David Politzer – den Rahmen der Quantentheorie aus, um die asymptotische Freiheit zu erklären. Gell-Mann und seine Kollegen entwickelten ihre Arbeit weiter und machten Vorhersagen über geringe Unterschiede in den Streuexperimenten, die am SLAC beobachtet wurden. Die rein als Gedankengebäude entwickelte Quark-Theorie stellte sich als bemerkenswert wahr heraus.

Die neue Theorie brauchte einen Namen und im darauffolgenden Sommer fand Gell-Mann einen: Quantenchromodynamik oder QCD. Er hat „viele Vorzüge und keine bekannten Nachteile“, sagte Gell-Mann.

Frank Wilczek (*1951)

Frank Wilczek wuchs in Queens, New York, auf. Er liebte Rätsel, beschäftigte sich als Spiel mit neuen Methoden, wie man Geld tauschen kann, und führte mathematische Kunststückchen durch. Es war die Zeit des kalten Krieges und der Eroberung des Weltalls, und er erinnerte sich daran, dass sein Haus voller alter Teile von Fernsehern und Radios stand, weil sein Vater Abendkurse in Elektrotechnik besuchte. Er war katholisch erzogen worden und „liebte die Vorstellung, dass es ein großes Drama und einen großen Plan hinter der Existenz gab“, doch er wandte sich schließlich von der Religion ab und suchte Sinn in der Wissenschaft.

Obwohl ihn die Neurowissenschaften interessierten, studierte er Mathematik an der Universität Chicago, weil ihm das „am meisten Freiheit verlieh“. Er schrieb in Princeton seine Doktorarbeit über Symmetrie. Dort traf er auch mit David Gross zusammen, mit dem er Theorien über die elektroschwache Wechselwirkung erarbeitete. Zusammen mit Gross entwickelte Wilczek eine grundlegende Theorie der starken Wechselwirkung (QCD). Zusammen mit David Politzer erhielten sie dafür 2004 den Nobelpreis.

Keine alleinstehenden Quarks Aber die Theorie war immer noch nicht ganz vollständig. Sie erklärte nicht, warum die Quarks niemals isoliert beobachtet werden konnten und warum sie im Kern der Hadronen eingesperrt waren.

Doch die Physiker fanden schließlich eine Erklärung. Wenn Quarks aus der Mitte des Protons herausgezogen werden, wird die Farbkraft stärker, und die Gluo-

„Wir nannten das neue (vierte) Quark das ‚Charm-Quark‘, weil wir so zufrieden waren und fasziniert von der Symmetrie, die es in die subnukleare Welt brachte.“

Sheldon Lee Glashow, 1977

nen, die sie zusammenhalten, werden auseinandergezogen, etwa wie ein Gummiband.

Wenn das Quark weiterhin versucht zu entkommen, reißt das Band schließlich, und die Bindungsenergie des Gluons wird in ein Quark-Antiquark-Paar umgewandelt. Das entkommene Quark verbindet sich mit dem Antiquark, sodass ein freies Meson entsteht. Das andere entstandene Quark bleibt im Kern. Einzelne Quarks können deshalb niemals der Farbkraft entkommen.

Anders als Photonen, die keine elektrische Ladung tragen, haben die Gluonen eine „Farbladung“ und können miteinander wechselwirken. Bei Farbwechselwirkungen können eine ganze Reihe von Teilchen aus Quark-Antiquark-Paaren erzeugt werden, und diese fliegen ungefähr in die gleiche Richtung weiter. Die Beobachtung 1979 dieser „Gluonen-Jets“ bestätigte die Existenz der Gluonen.

In den folgenden Jahren wurden weitere Quarks entdeckt: das Charm-Quark 1974, das Bottom-Quark 1977 und schließlich das Top-Quark 1995. Die QCD gesellte sich zu einer Reihe anderer genauer Quantenfeldtheorien. Was noch fehlte, war die Vereinigung der drei Haupt-Elementarkräfte – des Elektromagnetismus, der schwachen und der starken Wechselwirkung – um das Standardmodell der Teilchenphysik zu erklären.

30 Das Standardmodell

Einen komplexen Stammbaum für mehr als 60 Elementarteilchen und 20 Quantenparameter zusammensetzen war eine große Leistung. Muster wiesen auf die zugrunde liegenden Naturgesetze hin, dennoch könnte es sein, dass man zum Standardmodell der Teilchenphysik noch weitere Bausteine ergänzen müssen.

Mitte der 1980er-Jahren vollendeten die Physiker ihre lange Liste der vielen Elementarteilchen, die im Laufe der vorangegangenen Hundert Jahre entdeckt worden waren. Während die Theoretiker in den 1950er- und 1960er-Jahren überrascht aufgesammelt hatten, was in den Experimenten aufgetaucht war, konnten mithilfe der Beschleuniger die Lücken dessen gefüllt werden, was allmählich zum Standardmodell der Teilchenphysik wurde.

Nach Niels Bohrs ersten Ergebnissen zur Atomstruktur haben sich Elektronen als verrückte, von Wahrscheinlichkeiten bestimmte Kreaturen herausgestellt, die nur mit der Quantenmechanik in Form von Wellenfunktionen beschrieben werden können. Der Kern war noch seltsamer. Er bestand aus einer ganzen Liste einzelner Bausteine, angefangen bei den Quarks, die von federnden Gluonen zusammengehalten wurden, bis hin zu schweren W- und Z-Bosonen und flüchtigen Neutrinos, die zusammen solch vertraute Phänomene wie die Radioaktivität verursachten.

Als immer mehr Teilchen auftauchten – zuerst aus Untersuchungen der kosmischen Strahlung, dann bei Kollisionen in Beschleunigern auf dem Boden – brachte die mathematische Intuition von Murray Gell-Mann alles einen Schritt weiter. Sein achtfacher Pfad von 1961 beschrieb die zugrunde liegenden Symmetrien von Teilchenfamilien, die von ihren Quantenzahlen bestimmt wurden. Die Theorie der Quarks und die Quantenchromodynamik folgte.

Zeitleiste

1946–50

Tomonaga, Schwinger und Feynman entwickeln die QCD

1964

Gell-Mann schlägt das Quark-Modell der Hadronen vor

1964

Das Higgs-Feld wird vorgeschlagen

1968

Am SLAC wird die Struktur von Protonen entdeckt

1990 gab es im Standardmodell nur noch wenige Lücken zu füllen; da war das Top-Quark (entdeckt 1995) und das Tau-Neutrino (entdeckt 2000). Dass 2012 auch noch das Higgs-Boson gefunden wurde, war schließlich das Tüpfelchen auf dem i.

Drei Generationen Das Standardmodell beschreibt die Wechselwirkungen von drei Generationen von Materieteilchen durch drei Elementarkräfte, die jeweils durch eigene Wechselwirkungsteilchen vermittelt werden. Es gibt drei verschiedene Teilchensorten: Hadronen, etwa Protonen und Neutronen, die aus Quarks bestehen; Leptonen, zu denen das Elektron gehört; und Eichbosonen, wie das Photon, die mit der Übertragung von Kräften in Zusammenhang stehen. Jedes Hadron und Lepton hat ein zugehöriges Antiteilchen.

Auch Quarks kommen in Dreiergruppen. Sie haben drei „Farben“: Rot, Blau und Grün. Genau wie Elektronen und Protonen eine elektrische Ladung tragen, haben Quarks eine „Farbladung“. Die Farbkraft wird durch ein Wechselwirkungsteilchen, das sogenannte Gluon übertragen.

Statt mit größerem Abstand schwächer zu werden, wenn man Quarks auseinanderzieht, wird die Farbkraft stärker, etwa wie bei einem Gummiband. Das bindet sie so stark aneinander, dass einzelne Quarks niemals abgetrennt und allein existieren können. Jedes freie Teilchen, das aus Quarks besteht, muss farbneutral sein – also aus einer Farbkombination bestehen, die sich zu Weiß addiert. Teilchen wie das Proton und das Neutron bestehen aus drei Quarks und werden „Baryonen“ genannt (altgr. *barys*, schwer), Teilchen aus Quark-Antiquark-Paaren heißen „Mesonen“.

Quarks haben eine Masse, und es gibt sechs verschiedene Typen, genannt Flavours. Sie werden in drei Generationen eingeteilt mit drei komplementären Paaren. Ihre Bezeichnungen

Fermionen

Quarks

u Up-	c Charm-	t Top-
d Down-	s Strange-	b Bottom-

Leptonen

e Elektron	μ Myon	τ Tau
ν_e Elektron-Neutrino	ν_μ Myon-Neutrino	ν_τ Tau-Neutrino

Bosonen

Wechselwirkungsteilchen

γ Photon
W W-Boson
Z Z-Boson
g Gluon
H Higgs-Boson

1968

Glashow, Salam und Weinberg entwickeln die elektroschwache Theorie

1973

Theorie der Quantenchromodynamik wird von Gross, Wilczek und Politzer veröffentlicht

1995

Top-Quark wird entdeckt

2000

Tau-Neutrino wird entdeckt

haben historische Gründe: „Up-“ und „Down-“, „Strange-“ und „Charm-“ sowie „Top-“, und „Bottom-Quark“. Up-, Charm- und Top-Quarks haben die elektrische Ladung $+2/3$ einer Elementarladung, und Down-, Strange- und Bottom-Quark tragen $-1/3$ davon. Ein Proton besteht aus zwei Up- und einem Down-Quark, ein Neutron aus zwei Down- und einem Up-Quark.

Zu den Leptonen gehören Teilchen wie Elektronen und Neutrinos, die nicht der starken Kernkraft unterliegen. Wie die Quarks gibt es die Leptonen in sechs Flavours und drei Generationen mit steigender Masse: Elektronen, Myonen und Tau-Teilchen und ihre zugehörigen drei Neutrinos (Elektron-Neutrino, Myon-Neutrino und Tau-Neutrino). Myonen sind zweihundertmal und Tau-Teilchen 3700-mal schwerer als ein Elektron. Neutrinos haben fast keine Masse. Elektronenartige Leptonen tragen eine einfache negative Elementarladung, Neutrinos keine.

» **Wandteppiche werden von vielen Künstlern zusammen hergestellt ... genauso ist es bei unserem Bild der Teilchenphysik.** «

Sheldon Lee Glashow, 1979

Zu den Wechselwirkungsteilchen gehören das Photon, das die elektromagnetische Kraft überträgt, die W- und Z-Teilchen, die die schwache Kernkraft, und die Gluonen, die die starke Kernkraft vermitteln. Sie sind Bosonen und unterliegen damit nicht dem Pauli-Prinzip, das heißt, gleiche Teilchen können sich in einem Quantenzustand sammeln. Quarks und Leptonen sind Fermionen und deshalb durch das Pauli-Prinzip eingeschränkt. Photonen haben keine Masse, Gluonen sind leicht, aber W- und Z-Teilchen sind relativ schwer. Die Masse wird den W- und Z-Bosonen durch ein weiteres Feld verliehen – das Higgs-Feld, das vom Higgs-Boson übertragen wird.

Teilchen zertrümmern Die Entdeckung des Teilchenzoos wurde nur durch eine extreme Technologie möglich. Sieht man von denen ab, die von zerfallenden Atomen kommen, stammen die ersten exotischen Teilchen aus der kosmischen Strahlung. Dabei handelt es sich um hochenergetische Teilchen, die auf die oberen Schichten der Erdatmosphäre treffen und dadurch einen Schauer von Sekundärteilchen erzeugen, die Physiker dann auffangen können.

In den 1960er-Jahren erreichten eine Reihe von Teilchenbeschleunigern immer höhere Energien, wodurch es möglich wurde, gezielt Teilchen zu erzeugen. Indem Strahlen aus schnellen Protonen gegen feste Ziele oder entgegenkommende Strahlen geschossen wurden, konnten bei den Stößen neue Teilchen erzeugt werden. Um sehr schwere Teilchen zu erzeugen, müssen hohe Energien erreicht werden, deshalb wurden die schwersten auch tendenziell zuletzt ent-

deckt. Auch um die starke Kernkraft und Quarks zu untersuchen, wird sehr viel Energie benötigt.

Um die Teilchen zu identifizieren, lassen Physiker sie durch Magnetfelder fliegen. Positiv und negativ geladene Teilchen werden dadurch in unterschiedliche Richtungen abgelenkt, die einen nach rechts, die anderen nach links. Wie stark sie abgelenkt werden, hängt auch davon ab, wie schwer und wie schnell sie sind, einige erzeugen enge Spiralen.

Offene Fragen Das Standardmodell hat sich als bemerkenswert belastbar erwiesen, und seine Entwicklung ist sicherlich eine gewaltige Leistung. Aber noch frohlocken die Physiker nicht. Mit seinen 61 Teilchen und 20 Quantenparametern ist das Modell ziemlich schwerfällig. Die Werte dieser Parameter sind alle experimentell abgeleitet, nicht theoretisch vorhergesagt.

Die relativen Massen der verschiedenen Teilchen ergeben keinen offensichtlichen Sinn. Warum ist zum Beispiel das Top-Quark so viel schwerer als das Bottom-Quark? Und warum ist die Masse des Tau-Leptons so viel größer als die des Elektrons? Die jeweiligen Massen scheinen ziemlich zufällig zu sein.

Die Stärke der verschiedenen Wechselwirkungen – die relative Stärke der schwachen und der elektromagnetischen Kräfte zum Beispiel – sind genauso unergründlich. Wir können sie messen, aber warum haben sie diese Werte?

Und es gibt immer noch Lücken. Das Modell umfasst noch nicht die Gravitation. Das „Graviton“, also ein Wechselwirkungsteilchen für die Gravitation, wurde zwar postuliert, aber nur als Idee. Vielleicht wird es den Physikern eines Tages gelingen, die Gravitation in das Standardmodell einzubauen – etwa in einer großen vereinheitlichten Theorie (GUT: *grand unified theory*). Das ist ein großes und immer noch weit entfernt liegendes Ziel.

Zu den weiteren Rätseln, die durch das Standardmodell noch nicht geklärt werden, gehören einige Geheimnisse des Universums, etwa die Materie-Antimaterie-Asymmetrie, die Natur der dunklen Materie und der dunklen Energie. Es gibt also noch viel herauszufinden.

31 Symmetriebrechung

Die Physik ist voller Symmetrien. Die Naturgesetze ändern sich nicht, ganz egal, wo man sie misst. Symmetrien sind Bestandteil der meisten physikalischen Theorien und gelten für alle Teilchen im Universum. Aber manchmal werden diese Symmetrien gebrochen, woraus bestimmte Teilchenmassen oder -händigkeiten folgen.

Wir sind alle mit dem Prinzip der Symmetrie vertraut. Die Muster auf den Flügeln von Schmetterlingen sind Spiegelungen voneinander; das symmetrische Gesicht eines Menschen halten wir für besonders schön. Derartigen Symmetrien – oder Unabhängigkeit gegenüber Transformationen – liegt den meisten physikalischen Gesetzen zugrunde. Im 17. Jahrhundert nahmen Galileo Galilei und Isaac Newton an, dass das Universum überall gleich funktioniert – für die Erde und die Planeten gelten die gleichen Regeln. Die Naturgesetze bleiben gleich, wenn wir uns einige Millimeter oder Millionen von Lichtjahren nach links bewegen, ob wir uns drehen oder auf dem Kopf stehen.

Die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie von Albert Einstein sind von der Tatsache motiviert, dass das Universum für alle Beobachter gleich aussehen sollte, ganz egal, wo sie sich aufhalten und wie schnell sie sich bewegen oder beschleunigt werden. Die klassischen Gleichungen des Elektromagnetismus von James Clerk Maxwell nutzen Symmetrien zwischen dem elektrischen und dem magnetischen Feld, sodass ihre Eigenschaften aus verschiedenen Blickwinkeln ausgetauscht werden können.

Auch das Standardmodell der Teilchenphysik entstand aus Symmetriebetrachtungen. Murray Gell-Mann setzte das Puzzle aus den Elementarteilchen zusammen, indem er wiederkehrende Muster in den Quantenzahlen der Teilchen suchte. Als Folgerung sagte er die Existenz des Quark-Tripletts voraus.

Zeitleiste

1873	1905	1915	1954	1961
Maxwell veröffentlicht seine Gleichungen des Elektromagnetismus	Einstein veröffentlicht seine spezielle Relativitätstheorie	Einstein veröffentlicht die allgemeine Relativitätstheorie	Yang und Mills veröffentlichen die Eichtheorie der starken Wechselwirkung	Gell-Mann veröffentlicht seinen achtfachen Pfad

Alle drei Physiker – Einstein, Maxwell und Gell-Mann – entwickelten ihre revolutionären Theorien im tiefen Glauben an die Mathematik der Symmetrie. Ihr Vertrauen darauf, dass die Natur derartigen Regeln folgte, versetzte sie in die Lage, Vorurteile hinter sich zu lassen, die mit den bestehenden Beobachtungen und Ideen verbunden waren, um vollkommen neue Theorien abzuleiten, deren verrückte Aussagen sich später als wahr herausstellten.

Eichsymmetrie Die Quantenwelt ist voller Symmetrien. Weil es einen Unterschied gibt, zwischen dem, was in der realen Welt beobachtet wird, und dem, was unter der Oberfläche wirklich vor sich geht, müssen die Gleichungen der Quantenmechanik und der Quantenfeldtheorie aneinander anpassbar sein. Zum Beispiel muss die Wellen- und die Matrizenmechanik bei einem Experiment das gleiche Ergebnis ergeben, unabhängig davon, wie die Theorie formuliert wurde. Die Observablen – wie Ladung, Energie und Geschwindigkeit – sollten gleich sein, ganz egal auf welchem Maßstab wir das zugrunde liegende Feld beschreiben.

Diese physikalischen Gesetze müssen so niedergeschrieben sein, dass die beobachteten Größen von Koordinaten- oder Maßstabstransformationen unverändert bleiben. Dies ist als Eichinvarianz oder Eichsymmetrie bekannt, und Theorien, die dem gehorchen, nennt man Eichtheorien. Solange die Symmetrien richtig bleiben, können Physiker die Gleichungen umformulieren, so viel sie wollen, um ihr Verhalten zu erklären.

Die Maxwell'schen Gleichungen sind unter Maßstabstransformationen symmetrisch, genauso die allgemeine Relativitätstheorie. Aber dieser Ansatz wurde 1954 von Chen Ning Yang und Robert Mills verallgemeinert, indem sie ihn auf die starke Kernkraft anwandten. Die Technik inspirierte Gell-Manns Suche nach symmetrischen Gruppen von Teilchen und wurde auch in der Quantenfeldtheorie der schwachen Wechselwirkung und ihre Vereinheitlichung mit dem Elektromagnetismus zur elektroschwachen Theorie angewendet.

„Symmetrie, wie weit oder eng man diesen Begriff auch fassen mag, ist die eine Idee, nach der der Mensch über die Jahrhunderte hinweg versucht hatte Ordnung, Schönheit und Perfektion zu verstehen und zu schaffen.“

Hermann Weyl, 1952

1961

Der Higgs-Mechanismus wird vorgeschlagen

1968

Glashow, Salam und Weinberg legen die elektroschwache Theorie vor

1973

Gross, Wilczek und Politzer veröffentlichen die Quantenchromodynamik

2012

Higgs-artiges Boson wird entdeckt

Erhaltungssätze Symmetrien sind eng mit Erhaltungssätzen verbunden. Wenn die Energie erhalten ist, dann muss auch die Ladung erhalten bleiben, damit die Eichinvarianz weiterhin gültig ist – denn wir können keine feste Ladungsmenge erzeugen, wenn wir den absoluten Maßstab des Feldes nicht kennen. Wenn man Felder beschreibt, spielen nur relative Effekte eine Rolle.

Die Eichsymmetrie erklärt, warum alle Teilchen einer bestimmten Sorte nicht unterschieden werden können. Zwei davon können jederzeit ihre Position tauschen, und wir würden es niemals bemerken. Genauso sind Photonen unauflösbar verbunden, selbst wenn es so aussieht, als seien sie Individuen.

Zu anderen Symmetrien, die in der Physik wichtig sind, gehört die Zeit: Die Naturgesetze sind heute und morgen dieselben, und Antiteilchen sind äquivalent zu echten Teilchen, die sich in der Zeit rückwärts bewegen. Auch die Parität gehört dazu: Sie bringt zum Ausdruck, ob eine Wellenfunktion bei einer Reflexion symmetrisch ist oder nicht. Im ersten Fall ist die Parität gerade, sonst ungerade.

Symmetriebrechung Manchmal aber werden Symmetrien gebrochen. Zum Beispiel ist bei der schwachen Kernkraft die Parität nicht erhalten, außerdem werden linkshändige Teilchen bevorzugt (Elektronen und Neutrinos). Die Händigkeit (oder Chiralität) ist auch eine Eigenschaft von Quarks in der Quantenchromodynamik (QCD), sie bedeutet, dass sich ein linkshändiges Teilchen in die gleiche Richtung bewegt und dreht. Materie und Antimaterie sind auf kosmischem Maßstab im Ungleichgewicht. Auch die Tatsache, dass verschiedene Teilchen verschiedene Massen haben, macht eine Symmetriebrechung erforderlich – ohne sie wären alle masselos.

Genau wie Wasser sehr schnell gefriert und Eis bildet, passiert auch die Symmetriebrechung sehr schnell. An einem kritischen Punkt schaltet das System auf einen neuen Zustand um, der auf den ersten Blick willkürlich erscheint. Ein Beispiel dafür ist ein Bleistift, der auf seiner Spitze steht. Wenn er steht, ist er symmetrisch – er könnte nach dem Fall in jeder Richtung liegen – aber wenn er erst einmal umgefallen ist, hat er eine Richtung bevorzugt; die Symmetrie ist gebrochen.

Ein weiteres Beispiel ist die Entstehung eines Magnetfelds in einem Stabmagneten. In einem Stück heißen Eisen wackeln die inneren Magnetfelder ständige herum und sind zufällig orientiert – der Block erzeugt also kein Gesamtmagnetfeld. Aber wenn man ihn unter eine bestimmte Schwelle abkühlt, die sogenannte Curie-Temperatur (etwa 700 °C), machen die Atome einen Phasen-

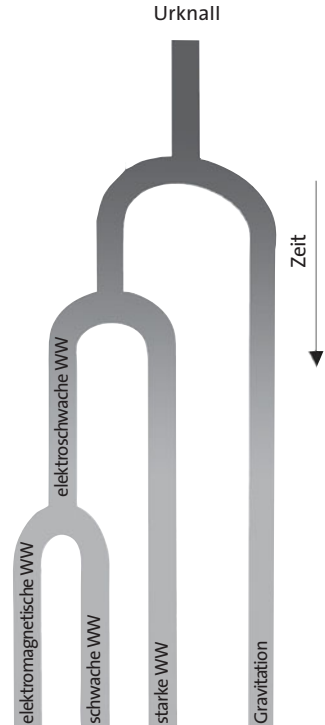
übergang und die meisten richten sich in eine Richtung aus. So erhält das kalte Eisen einen Nord- und einen Südpol.

Eine Reihe von ähnlichen Phasenübergängen im jungen Universum erklärt, warum wir heute vier Elementarkräfte haben und nicht nur eine. In der extremen Hitze des ganz frühen Universums, direkt nach dem Urknall, waren alle vier Kräfte vereinheitlicht. Als das Universum genau wie der Stabmagnet abkühlte, unterlag es Phasenübergängen mit Symmetriebrechungen.

Die verschiedenen Kräfte koppelten sich nacheinander ab: Nur 10^{-43} Sekunden nach dem Urknall entstand die Gravitation, nach 10^{-36} Sekunden tauchte die starke Wechselwirkung auf und zog die Quarks zusammen, und nach etwa 10^{-12} Sekunden trennten sich auch noch die schwache und die elektromagnetische Kraft.

Das Universum war bei diesem elektroschwachen Phasenübergang etwa 10^{15} Grad Celsius heiß (eine 10 mit 15 Nullen!). Oberhalb dieser Temperatur konnte man die W- und Z-Bosonen, die die schwache Wechselwirkung übertragen, und die Photonen nicht unterscheiden – ihre Äquivalente waren die Übermittler der elektroschwachen Wechselwirkung. Unter dieser Energieschwelle, so wissen wir heute, haben die W- und Z-Bosonen eine Masse, die Photonen aber nicht. Ihre Masse mussten sie also bei der Symmetriebrechung erhalten haben.

Die Symmetriebrechung erklärt die verschiedenen Massen der Eichbosonen – warum einige schwer, andere leicht oder ganz masselos sind. Ohne die spontane Symmetriebrechung, wären sie alle masselos. Den Mechanismus, der daran beteiligt war, nennt man heute das Higgs-Feld, nach dem Physiker Peter Higgs, der ihn in den 1960er-Jahren entwickelt hat.



Die vier Elementarkräfte teilen sich aufgrund der Symmetriebrechung im frühen Universum.

32 Das Higgs-Boson

Warum sind manche Teilchen schwerer als andere? Das Higgs-Boson wurde 1964 von Peter Higgs als Möglichkeit postuliert, Teilchen eine Trägheit zu verleihen. Es zieht an den Wechselwirkungsteilchen wie dem W- und Z-Bosonen und bricht die Symmetrie zwischen schwacher und elektromagnetischer Kraft.

Bis 1960 hatte man herausgefunden, dass die vier Elementarkräfte durch verschiedene Teilchen vermittelt werden. Photonen übertragen die elektromagnetische Kraft, Gluonen verbinden Quarks durch die starke Kernkraft, und die W- und Z-Bosonen sind Mittler der schwachen Kernkraft. Aber anders als Photonen, die masselos sind, sind die W- und Z-Bosonen schwer. Sie wiegen etwa hundertmal so viel wie ein Proton. Warum haben Teilchen derart verschiedene Massen?

Die Physiker schauten sich die Symmetrie an. Der in Japan geborene Amerikaner und Theoretiker Yoichiro Nambu und der britische Physiker Jeffrey Goldstone schlugen einen Mechanismus der spontanen Symmetriebrechung vor, bei dem während der Entkopplung der Kräfte viele Bosonen entstanden sind. Aber in ihren Modellen hatten diese Bosonen keine Masse, deshalb sollten alle Wechselwirkungsteilchen dem Photon ähneln.

Das ergab keinen Sinn. Für kurzreichweitige Kräfte, so überlegten sich die Physiker, brauchte man schwere Wechselwirkungsteilchen. Masselose Bosonen, wie das Photon, können sich über große Entfernungen bewegen, während die Kernkräfte offenbar eng begrenzt wirkten. Wenn die starke und die schwache Wechselwirkung schwere Wechselwirkungsteilchen besaßen, konnte auch ihre geringe Reichweite erklärt werden.

Als Kommentar dazu, wie sinnlos es war, dass Wechselwirkungsträger aus dem Vakuum entstehen, wie Nambu und Goldstone angenommen hatten,

Zeitleiste

1687

Newton stellt seine Gleichungen für die Masse auf

1961

Goldstone schlägt vor, dass Bosonen bei der Symmetriebrechung erzeugt werden

1964

Higgs und zwei weitere Teams veröffentlichen einen Mechanismus für die Masse

zitierte ihr Kollege Steven Weinberg aus *King Lear* von Shakespeare: „Von Nichts kommt Nichts.“

Der Festkörperphysiker Phil Anderson machte einen Vorschlag, zu dem er durch das Verhalten von gepaarten Elektronen in Supraleitern angeregt wurde. Nambu und Goldstones masselose Bosonen könnten sich in gewisser Weise auslöschen, so überlegte er, sodass nur die mit einer endlichen Masse übrigbleiben.

1964 folgte eine Flut von Veröffentlichungen, die seine Idee ausweiteten. Sie wurden von drei Teams geschrieben: dem belgischen Physikern Robert Brout und François Englert, die an der Cornell University arbeiteten, dem britischen Physiker Peter Higgs von der Edinburgh University und von Gerald Guralnik, Carl Hagen und Tom Kibble am Imperial College London. Der Mechanismus, den sie herleiteten, ist heute als Higgs-Mechanismus bekannt.

Alle drei Gruppen führten zwar ähnliche Berechnungen durch, doch nur Higgs beschrieb den Mechanismus in Form von Bosonen – dem Higgs-Boson.

Das „Gottesteilchen“

Der Nobelpreisträger Leon Lederman prägte mit seinem Buch „The God Particle“ für das Higgs-Boson den Namen „Gottesteilchen“.

Higgs-Boson Higgs stellte sich vor, dass die W- und Z-Wechselwirkungsteilchen dadurch abgebremst werden, dass sie durch ein Kraftfeld im Hintergrund fliegen müssen. Das sogenannte Higgs-Feld wird durch die Higgs-Bosonen übertragen. Es ist so ähnlich wie bei einer Glaskugel, wirft man sie in ein Glas Wasser, fällt sie langsamer als in Luft. Es ist, als ob die Perle in Wasser schwerer wäre – es dauert länger, bis die Gravitation sie durch die Flüssigkeit gezogen hat. In einem Glas Honig würde die Perle sogar noch langsamer sinken. Das Higgs-Feld funktioniert ganz ähnlich, wie Sirup.

Oder stellen Sie sich einen berühmten Menschen vor, der zu einer Cocktail-Party kommt. Kaum ist der Star durch die Tür, wird er von Fans umdrängt, diese werden seine Bewegung durch den Raum abbremsen. Die W- und Z-Bosonen sind die Teilchen mit Star-Appeal: das Higgs-Feld wirkt auf sie, aber nicht auf die Photonen, deshalb erhalten sie eine Masse.

2009

Der LHC geht in Betrieb

2012

Higgs-artiges Boson wird entdeckt

Peter Higgs (*1929)

Peter Higgs wurde in Newcastle upon Tyne in England geboren und hatte eine unruhige Kindheit. Seine Familie zog sehr oft um, einerseits weil sein Vater Tontechniker bei der BBC war und andererseits wegen des Zweiten Weltkriegs. Daher erhielt er seine Schulbildung zu Hause. Später ging er auf das gleiche Gymnasium, das auch Paul Dirac besucht hat.

Higgs studierte Physik am Kings College London und wurde 1960 Dozent an der University of Edingburgh. Er wurde berühmt für seine Idee, dass das Higgs-Boson Teilchen Masse verleihen könnte, die ihm 1964 bei einer Wanderung in den schottischen Highlands gekommen ist.

Heiße Spuren Hinweise auf das Higgs-Boson wurden bereits 2011 gefunden, doch die Messwerte konnten erst 2012 bestätigt und unter großer Aufmerksamkeit der Presse verkündet werden. Es hatte wegen der hohen Energien, bei

denen das Higgs-Boson auftauchen sollte, Jahrzehnte gedauert, eine Maschine zu bauen, die in der Lage war, es nachzuweisen (über 100 GeV). 2009 ging der viele Milliarden teure Large Hadron Collider (LHC) am CERN in der Schweiz in Betrieb.

» (Der große Hadronen-Beschleuniger) ist der Jurassic Park der Teilchenphysiker ... manche der Teilchen, die sie dort erzeugen oder erzeugen werden, hat es schon 14 Milliarden Jahre lang nicht mehr gegeben. «

Phillip Schewe, 2010

Das CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, dt. Europäische Organisation für Kernforschung) ist eine riesige Forschungseinrichtung für Teilchenphysik in der Nähe von Genf. Im Berg etwa 100 Meter unter der schweizerisch-französischen Grenze befindet sich ein 27 Kilometer langer Ring aus Tunneln, in dem die Teilchenstrahlen mithilfe gewaltiger supraleitender Magnete auf Kurs gehalten werden.

Zwei gegenläufige Protonenstrahlen stoßen dort aufeinander. Die riesigen Energien, die bei den Stößen erzeugt werden, setzen stoßweise einen Schauer von schweren Teilchen frei, die dann von Detektoren aufgezeichnet werden. Weil das Higgs-Boson so schwer ist, kann es erst bei extrem hohen Energien entstehen und das – entsprechend der Heisenberg'schen Unschärferelevation – nur für eine sehr kurze Zeit. Die Spur eines Higgs-Teilchens kann dabei unter Milliarden anderer Teilchenspuren versteckt sein; es ist also eine sehr schwierige Suche.

Obwohl die Symmetrien vor uns verborgen sind, können wir bemerken, dass sie sich in der Natur widerspiegeln und alles um uns herum lenken. Das ist der aufregendste Gedanke, den ich kenne: Die Natur ist viel einfacher als sie aussieht.

Steven Weinberg

Am 4. Juli 2012 behaupteten zwei Teams von Experimentalphysikern, dass sie ein neues Teilchen entdeckt hätten, das die Energie hatte, die man nach dem Standardmodell für das Higgs-Boson erwarten würde (126 GeV). Die Identität des Teilchens muss durch weitere Messungen bestätigt werden, aber sein Auftauchen ist spannend. Es ist nicht nur eine weitere Bestätigung des Standardmodells, sondern wirft auch viele neue Fragen auf, die die Teilchenphysiker erforschen müssen.

Die erste Frage lautet: Wie überträgt das Higgs-Teilchen die Masse genau? Vom Neutrino bis zum Top-Quark gibt es 14 Größenordnungen unterschiedlicher Massen im Standardmodell, die erklärt werden müssen. Und dann: Wie kommt das Higgs-Boson zu seiner eigenen Masse? Man darf gespannt bleiben.

33 Supersymmetrie

Sehr elegant finden manche Physiker das Standardmodell nicht gerade, deshalb haben sie sich auf die Suche nach einer grundlegenden Theorie der Teilchen und Kräfte gemacht. Die Supersymmetrie nimmt an, dass jedes Teilchen einen supersymmetrischen Partner besitzt, der abgesehen von seinem Quantenspin gleich ist. Genau wie die Antimaterie erleichtern diese neuen Teilchen die Lösung der quantenmechanischen Feldgleichungen und machen sie flexibler.

Das Standardmodell war beim Versuch, die verschiedenen Eigenschaften von über 60 Elementarteilchen zu verknüpfen, bemerkenswert erfolgreich. Die vielen Teilchen können entsprechend ihrem Aufbau wie in einer teuren Pralinen-schachtel in Schichten zusammengefasst werden. Aber das Standardmodell bleibt trotzdem sehr kompliziert, die Physiker sehnen sich aber nach Einfachheit.

Außerdem gibt es noch viele offene Fragen. Warum treten zum Beispiel so viele Teilcheneigenschaften in Dreiergruppen auf? Warum gibt es drei Generationen von Leptonen – Elektronen, Myonen und Tau-Teilchen mit ihren zugehörigen Neutrinos? Für den Nobelpreisträger I. I. Rabi waren schon zwei Generationen zu viel, sodass er bei seiner Entdeckung ausrief: „Wer hat dieses Myon bestellt?“ Auch die drei Generationen von Quarks sind erklärungsbedürftig.

Warum sind die Massen der Teilchen so unterschiedlich. Der Bereich von der Masse des Elektrons bis zu der des Top-Quarks umfasst sechs Größenordnungen! Als man kürzlich die Neutrino-Oszillationen entdeckt hat – die zeigen, dass Neutrinos eine winzige Masse haben müssen – dehnte sich dieser Bereich sogar auf dreizehn oder vierzehn Größenordnungen aus. Bei der Vielfalt der Möglichkeiten stellt sich die Frage: Warum hat jedes Teilchen genau die Masse, die es hat?

Auch die Stärke der vier Elementarkräfte – die mit den Massen ihrer Wechselwirkungsteilchen zusammenhängen – kann man aus dem Standardmodell

Zeitleiste

1927

Dirac sagt die
Antimaterie voraus

1961

Murray Gell-Mann veröffentlicht
seinen achtfachen Pfad

nicht ableiten. Warum genau ist die starke Kernkraft stark und die schwache Kernkraft schwach? Dann ist da noch das Higgs-Teilchen. Es wurde vorhergesagt, um die Symmetriebrechung bei elektroschwachen Wechselwirkungen begründen zu können. Bisher kennen wir nur ein Higgs-Boson. Aber könnte es noch mehr davon geben? Und was werden wir in Zukunft wohl noch alles finden? Der ganze Rahmen des Standardmodells bringt zwar Ordnung in all die Muster, aber es erscheint doch auch recht willkürlich.

Jenseits des Standardmodells Die Unordnung im Standardmodell lässt darauf schließen, dass wir mit unseren Erklärungen noch nicht ganz am Ende sind – dass wir eines Tages erkennen werden, dass das Modell ein Teil einer weiter gefassten und eleganteren Theorie ist. Die Physiker gehen gerade zurück zu den grundlegenden Definitionen und Konzepten, wie der Symmetrie, um herauszufinden, von welcher Art eine derartige allumfassende Theorie sein könnte.

Bei ihrer Suche nach einer grundlegenden Basis für das Verständnis mancher Phänomene, schauen die Physiker in der Regel auf immer winzigere Dimensionen. Die Physik der idealen Gase, des Drucks und der Thermodynamik erfordert ein Verständnis molekularer Vorgänge, und die Theorie des Atoms macht es nötig, dass wir Elektronen und Kerne verstehen.

Nehmen wir das Elektron. Die Physiker können mit den Gleichungen des Elektromagnetismus seine Eigenschaften in einiger Entfernung vom Teilchen selbst erklären, aber je näher man herangeht, desto mehr dominiert der Einfluss des Teilchens auf sich selbst. Wie die Feinstruktur des Wasserstoffspektrums zeigt, sind die Ladung, Größe und Form des Elektrons wichtig.

Wie der Weg zur Entwicklung der Quantenelektrodynamik (QED) zeigte, war eine quantenmechanische Betrachtungsweise des Elektrons als Wellenfunktion mit Berücksichtigung relativistischer Effekte notwendig, um all seine Eigenschaften zu beschreiben. Paul Dirac gelang es 1927, dies alles hinzuschreiben, aber das neue Bild hatte eine weitreichende Konsequenz – die Existenz der Antimaterie. So verdoppelte sich die Zahl der Teilchen im Universum, und eine Unmenge neuer Wechselwirkungen musste berücksichtigt werden.

1981

Eine supersymmetrische
Version des Standardmodells
wird postuliert

2009

Der LHC geht in Betrieb

2012

Higgs-Boson wird
entdeckt

Wissenschaft macht die größten Fortschritte, wenn Beobachtungen uns dazu zwingen, unsere Annahmen zu überdenken.

Vera Rubin

Die Gleichungen für das Elektron ergaben nur einen Sinn, wenn es auch Positronen gab, deren Quanteneigenschaften das Gegenteil derer des Elektrons waren. Für einen kurzen Zeitraum, der von der Heisenberg'schen Unschärferelation vorgegeben wird, können im leeren Raum plötzlich Elektronen-Positronen-Paare auftauchen und wieder annihilieren. Diese virtuellen Wechselwirkungen lösen Probleme, wie das der Größe eines Elektrons, die sonst Widersprüche in die Theorie gebracht hätten.

Um über das Standardmodell hinauszukommen, müssen wir Vorgänge auf noch kleineren Maßstäben und bei extremen Energien betrachten als bisher, insbesondere bei höheren als die des Higgs-Bosons (dessen Energie größer als 100 GeV ist). Genau wie beim Elektron müssen sich die Physiker fragen, wie ein Higgs-Boson wirklich aussieht und wie seine eigene Form und sein Feld sein Verhalten beeinflusst.

Teilchenzwillinge Und wieder, wie schon beim Elektron und Positron, macht die Lösung dieses Problems eine Verdoppelung der möglichen Teilchenzahlen erforderlich – sodass jedes Teilchen einen „supersymmetrischen“ Partner hat (mit dem gleichen Namen, aber mit einem vorangestellten „S“). Der supersymmetrische Partner des Elektrons ist das Selektron, Quarks haben Squarks. Die äquivalenten Teilchen zu Photon, W- und Z-Boson nennt man Photino, Wino und Zino.

Die Supersymmetrie (abgekürzt oft SUSY) ist eine Symmetrierelation zwischen Bosonen und Fermionen. Jedes Boson – oder Teilchen mit ganzzahligem Spin – hat zum Beispiel ein zugehöriges Fermion oder einen „Superpartner“, dessen Spin um die Hälfte einer Einheit von seinem eigenen abweicht, und umgekehrt. Abgesehen vom Spin haben die Superpartner die gleichen Quanteneigenschaften und Massen.

Die ersten Versuche wurden zwar schon in den 1970er-Jahren durchgeführt, die erste realistische supersymmetrische Version des Standardmodells wurde aber erst 1981 von Howard Georgi und Savas Dimopoulos entwickelt. Es sagte eine Reihe von Superpartnern für Bosonen in einem Energiebereich zwischen 100 und 1000 GeV vorher, also etwas mehr oder ähnlich der Masse eines Higgs-Bosons. Genau wie das Positron kürzen diese supersymmetrischen Teilchen Unregelmäßigkeiten bei der Beschreibung von Teilchen in deren unmittelbarer Umgebung heraus.

Mit dem Large Hadron Collider (LHC) am CERN können die unteren Energiebereiche nun erreicht werden. Bis heute (Mitte 2014) gibt es aber noch keine Hinweise auf supersymmetrische Teilchen. Man wird sehen, was passiert, wenn die Energie des Beschleunigers im Laufe der nächsten Jahre erhöht wird.

Die Superpartner bleiben unerreichbar, vor allem weil die Physiker vermuten, dass sie vielleicht sogar noch höhere Massen besitzen als ihre Gegenüber aus dem Standardmodell. In diesem Fall müsste die Supersymmetrie gebrochen sein, dann gäbe es noch eine weitere Ebene von Teilchen, die erforscht werden müsste.

Letztendlich könnte mithilfe der Supersymmetrie die schwache und die starke Wechselwirkung und der Elektromagnetismus vereinheitlicht werden, und vielleicht sogar die Gravitation. Die String-Theorie und die Quantengravitation, die einen anderen Weg gehen, müssten sie beinhalten, vor allem, wenn tatsächlich Hinweise auf supersymmetrische Teilchen gefunden werden sollten.

Dunkle Superpartner

Die Theorie ist zwar immer noch hochspekulativ, doch die Supersymmetrie hat einige interessante Eigenschaften. Die unentdeckten Superpartner sind hervorragende Kandidaten für die geisterhafte dunkle Materie, die im Universum umherspukt. Der Großteil der Masse des Universums besteht aus dunkler Materie, doch sie macht sich nur als Gravitationseffekt bemerkbar, sonst ist sie unsichtbar.

34 Quantengravitation

Das große Ziel einer Theorie für alle vier Elementarkräfte ist immer noch nicht in Sicht, aber die Hoffnung, die Quantentheorie und die allgemeine Relativitätstheorie verschmelzen zu können, haben die Physiker natürlich trotzdem noch nicht aufgegeben. In einer derartigen Theorie der noch zu entwickelnden Quantengravitation könnte der Raum vielleicht ein Gewebe aus winzigen miteinander verknüpften Schleifen sein.

Als Albert Einstein 1915 seine allgemeine Relativitätstheorie vorlegte, erkannte er, dass sie noch mit der sich schnell entwickelnden Quantentheorie des Atoms unter einen Hut gebracht werden musste. Genau wie Planeten durch die Gravitation auf ihrer Bahn um die Sonne gehalten werden, sollten Elektronen nicht nur eine elektromagnetische Kraft spüren, die sie in den Atomen in ihren Schalen hält, sondern auch eine Gravitationskraft. Einstein arbeitete einen Großteil seines Lebens daran, eine vollständige Theorie der Gravitation zu entwickeln. Aber er schaffte es nicht – und es ist den Physikern bis heute nicht gelungen.

Nach Einstein machte sich Niels Bohrs Schützling Léon Rosenfeld an die Arbeit, nachdem die Quantenmechanik in den 1930er-Jahren gerade fertig geworden war. Aber sofort zeigten sich die grundlegenden Hindernisse. Das erste ist, dass die allgemeine Relativitätstheorie nicht mit einem absoluten Hintergrund verbunden ist, die Quantenmechanik aber schon.

Die Relativität gilt vor allem für Objekte mit Masse, wie Planeten, Sterne, Galaxien, letztlich für alle Materie im ganzen Universum. Die Gleichungen dafür unterscheiden nicht zwischen Raum und Zeit, sondern behandeln sie als vier Dimensionen einer glatten Metrik, der sogenannten Raumzeit. Massen bewegen sich in ihr und krümmen sie entsprechend ihrer Masse. Aber es gibt kein absolutes Koordinatensystem. Wie ihr Name schon zum Ausdruck bringt, erklärt die allgemeine Relativitätstheorie nur Relativbewegungen eines Objekts relativ zu einem anderen in der gekrümmten Raumzeit.

Zeitleiste

1915

Einstein veröffentlicht seine allgemeine Relativitätstheorie

1957

Misner schlägt zwei Wege zu einer Quantengravitation vor

1966

DeWitt veröffentlicht eine Wellenfunktion des Universums

Ganz im Gegensatz dazu kümmert sich die Quantenmechanik gar nicht darum, wann und wo sich ein Teilchen aufhält. Wellenfunktionen werden von ihrer jeweiligen näheren Umgebung bestimmt und entwickeln sich auch ihr entsprechend – die Wellenfunktion jedes Teilchens in einer Kiste oder jedes Elektrons in einem Atom ist anders. In den Vorstellungen der Quantenmechanik ist der Raum nicht leer oder gleichförmig, sondern ein See virtueller Teilchen, die auftauchen und wieder verschwinden.

Genauso wie es sehr schwierig war, die Matrizenmechanik von Heisenberg mit der Wellenmechanik von Schrödinger in Einklang zu bringen, weil die eine diskrete und die andere kontinuierliche Lösungen lieferte, so ist es auch die Abstimmung von Quantenmechanik und allgemeiner Relativitätstheorie wie die Anpassung von Äpfeln und Orangen.

Es gibt drei Bereiche, in denen die Unterschiede zwischen den beiden am deutlichsten werden: Sowohl die allgemeine Relativitätstheorie als auch die Quantenmechanik gelten bei oder in der Nähe von Singularitäten nicht mehr oder werden dort inkonsistent, etwa bei schwarzen Löchern. Zweitens, weil die Heisenberg'sche Unschärferelation besagt, dass Ort und Geschwindigkeit eines Teilchens nicht gleichzeitig genau bestimmt werden können, ist es unmöglich zu sagen, welche Gravitationskraft darauf wirkt. Drittens hat die Zeit in der Quantenmechanik und der allgemeinen Relativitätstheorie eine unterschiedliche Bedeutung.

» Auch wenn es nur eine mögliche vereinheitlichte Theorie geben sollte, bleibt sie eine Reihe von Regeln und Gleichungen. Was ist es, das den Gleichungen Atem einhaucht und das Universum erschafft, das sie beschreiben sollen? «

Stephen Hawking, 1988

Quantenschaum Die Arbeiten an einer Quantentheorie der Gravitation wurden in den 1950er-Jahren wieder aufgenommen. John Wheeler, ein Physiker von der Princeton University, und sein Student Charles Misner wandten das Heisenberg'sche Unschärfeprinzip an, um die Raumzeit als eine Art „Quantenschaum“ zu beschreiben. Auf den kleinsten Maßstäben, so nahmen sie an, wird die Raumzeit in ein Gewirr von Tunneln, Schnüren, Klumpen und Unebenheiten deformiert. 1957 erkannte Misner, dass es zwei Wege gab, auf denen man weitermachen konnte. Erstens konnte die allgemeine Relativitätstheorie in eine Form von Differenzialgleichungen umgeschrieben werden, sodass sie mehr der

1981

Hawking entwickelt sein grenzenfreies Modell des Universums

1986

Smolin und Jacobson schlagen die Schleifenquantengravitation vor

1992

Anisotropien in der kosmischen Mikrowellen-Hintergrundstrahlung werden aufgezeichnet

Bryce DeWitt (1923–2004)

Bryce DeWitt wurde in Kalifornien geboren und studierte bei Julian Schwinger an der Harvard University Physik. Im Zweiten Weltkrieg diente er als Marinepilot. Nach mehreren Stellen übernahm er an der University of Texas in Austin das Zentrum für allgemeine Relativitätstheorie. DeWitt formulierte mit John Wheeler die Wheeler-DeWitt-Gleichung für die Wellenfunktion des Universums und brachte die Viele-Welten-Interpretation der Quantenmechanik von Hugh Everett weiter. Im Laufe seines ganzen Lebens arbeitete er eng mit seiner Frau zusammen, der mathematischen Physikerin Cécile DeWitt-Morette, die die einflussreiche Sommerschule in Les Houches in Frankreich gründete.

Quantenmechanik ähnelte. Dann konnte man die Theorie quantisieren. Die Alternative war, die existierende Quantenfeldtheorie auszuweiten, sodass sie auch die Gravitation umfasste. Dies entsprach dem Vorgehen, als man versuchte die Kernkräfte in die Quantenelektrodynamik einzubauen. Dazu benötigte man ein neues Wechselwirkungsteilchen für die Gravitation – das Graviton.

1966 ging Bryce DeWitt, der bei Julian Schwinger studiert hatte, nach einer Diskussion mit Wheeler einen anderen Weg. Er kannte sich gut mit der Kosmologie aus – und der kurz zuvor entdeckten kosmischen Mikrowellen-Hintergrundstrahlung –, so veröffent-

lichte er eine Wellenfunktion für das gesamte Universum. Das Ergebnis bezeichnet man heute als Wheeler-DeWitt-Gleichung. Er nahm die Gleichungen für die Expansion des Universums nach dem Urknall und behandelte den Kosmos als Teilchensee.

Ein seltsames Ergebnis war, dass die Zeit in DeWitts Formulierung nicht notwendig war. Er benötigte nur die drei Raumkoordinaten – die Zeit war nur ein Ausdruck der Änderung von Zuständen des Universums, die wir als Abfolge wahrnehmen. Genau wie Schrödinger Probleme damit hatte zu verstehen, was seine Wellenfunktion eigentlich bedeutete, so konnte auch DeWitt nicht erklären, was seine universelle Wellenfunktion im wahren Leben beschrieb. Während die Kopenhagener Deutung die Quanten- und die klassische Welt verband, gab es nichts, womit man das gesamte Universum vergleichen konnte. Es konnte keinen außenstehenden Beobachter geben, dessen Aufmerksamkeit die kosmische Wellenfunktion zum Kollaps brachte.

Zu den Physikern, die auch an dem Problem arbeiteten, gehörte Stephen Hawking, der eine Beschreibung des Universums entwickelte, die keine Grenzen hatte – und keinen Anfangspunkt. Bei einer Konferenz 1981 im Vatikan hatte er keinen Grund, dem Papst zu widersprechen, der meinte, die Kosmologen können das Universum immer erst nach seiner Entstehung untersuchen – Hawking benötigte keinen Schöpfer.

Eine neue Art, die Gleichungen der Relativität zu formulieren kam 1986 bei einem Quantengravitations-Workshop in Santa Barbara, Kalifornien auf. Lee Smolin und Theodore Jacobson, später zusammen mit Carlo Rovelli, stießen auf eine Reihe von Lösungen für die Gleichungen, die auf Quantenschleifen im Gravitationsfeld beruhten.

Schleifenquantengravitation Die Schleifen waren die Quanten des Raumes. Sie machten eine genaue Ortsangabe unnötig, weil es keinen Unterschied machte, wenn die Schleifen verschoben werden. Der Raum ist ein Gewebe aus diesen Schleifen, die miteinander verknötet und verbunden sind.

Das Schleifenkonzept war in einer anderen Form bereits bei der Entwicklung der Quantenchromodynamik aufgetaucht, als Roger Penrose daran arbeitete, ein Netz aus Teilchenwechselwirkungen zu beschreiben. In der Quantengravitation werden diese Schleifenzustände die Quanten des Raumes. Sie sind die kleinsten Bausteine des Universums – ihre Größe oder ihre Energie wird als Planck-Skala bezeichnet.

Die Schleifenquantengravitation ist ein Schritt in die Richtung einer allumfassenden Theorie, wenn auch noch ein Stück entfernt. Sie sagt zum Beispiel noch nichts über das Graviton. Andere Wege werden immer noch erforscht, etwa die Stringtheorie.

Aufgrund der gewaltigen Energien, die notwendig sind, ein Graviton zu finden oder irgendein Teilchen, das an der Epoche beteiligt war, als die Gravitation sich von den anderen Kräften trennte, können Physiker nur davon träumen die Quantengravitation an Beschleunigern zu untersuchen. Es gibt also keinerlei experimentelle Nachweise, die irgendeines der Modelle stützen.

Am besten sind in der Zwischenzeit noch Hinweise aus astronomischen Objekten, vor allem von schwarzen Löchern. Manche schwarze Löcher emittieren Teilchenjets – die man sich als Elektronen-Positronen-Paare vorstellt, die weggeschleudert werden, wenn Materie verschluckt wird. Um ein schwarzes Loch herum ist die Gravitation sehr stark, sodass ungewöhnliche Effekte beobachtet werden könnten, die der Relativitätstheorie widersprechen.

Ein alternativer Jagdgrund ist die kosmische Mikrowellen-Hintergrundstrahlung – ihre verstreuten heißen und kalten Flecken wurden durch Quantenschwankungen im jungen Universum erzeugt.

35 Hawking-Strahlung

Schwarze Löcher sind trichterförmige Singularitäten in der Raumzeit, die so tief sind, dass ihnen nicht einmal Licht entkommen kann, es sei denn, die quantenmechanische Unbestimmtheit erlaubt es. Stephen Hawking schlug vor, dass schwarze Löcher Teilchen emittieren könnten – und Information – die letztendlich dazu führen, dass sie schrumpfen.

In den 1970er-Jahren entstanden viele Theorien über die Quantengravitation. Bryce DeWitt bezeichnete seine Wellenfunktion des Universums als „diese verdammte Gleichung“, denn keiner wusste, was sie bedeutete. Die Physiker, die sich mit allgemeiner Relativitätstheorie beschäftigten, wandten sich den schwarzen Löchern zu. Mitte der 1960er-Jahre wurde postuliert, dass schwarze Löcher die Energiequelle der soeben entdeckten Quasare sind – das sind Galaxien, deren Kerne so stark leuchten, dass sie alle Sterne darin überstrahlen.

„Gott würfelt nicht nur, sondern er tut es manchmal auch noch dort, wo man nicht zusehen kann.“

Stephen Hawking, 1977

Die Idee der schwarzen Löcher wurde im 18. Jahrhundert vom Geologen John Michell und dem Mathematiker Pierre-Simon Laplace entwickelt. Später, nachdem Einstein seine Relativitätstheorien vorgelegt hatte, berechnete Karl Schwarzschild, wie ein schwarzes Loch aussehen könnte: ein Trichter in der Raumzeit. In Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie sind Raum und Zeit verbunden und verhalten sich wie ein riesiges Gummituch. Die Gravitation verbiegt dieses Tuch, je nachdem wie schwer ein Objekt ist. Ein schwerer Planet ruht in einer Senke in der Raumzeit, und seine Anziehungskraft entspricht der Kraft, die man bemerkt, wenn etwas in die Senke rollt, sie kann dessen Weg ablenken oder es in eine Umlaufbahn zwingen.

Ereignishorizont Schwarze Löcher tragen ihren Namen, weil nicht einmal Licht ihrer Gravitationskraft entfliehen kann. Wenn man einen Ball in die Luft wirft, erreicht er eine bestimmte Höhe und fällt dann zurück nach unten. Je

Zeitleiste

1784

Mitchell postuliert die Existenz von Dunkelsternen

1930er-Jahre

Die Existenz von gefrorenen Sternen wird vorhergesagt

1965

Quasare werden entdeckt

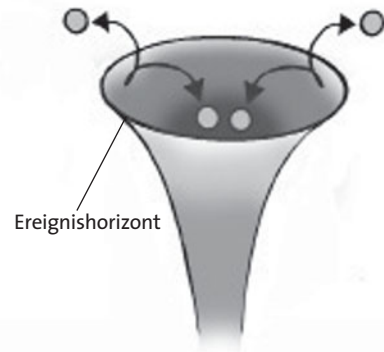
schneller man ihn wirft, desto höher wird er fliegen. Beschleunigt man ihn genug, wird er der Anziehungskraft der Erde in den Weltraum entkommen. Die Geschwindigkeit, die man dazu benötigt, trägt den Namen Fluchtgeschwindigkeit. Sie beträgt für die Erde 11 km/s.

Will eine Rakete der Erdanziehungskraft entkommen, muss sie diese Geschwindigkeit erreichen. Die Fluchtgeschwindigkeit ist für kleinere Himmelskörper geringer, beim Mond etwa beträgt sie nur 2,3 km/s. Aber bei größeren Planeten steigt sie. Wenn ein Himmelskörper schwer genug ist, wird die Fluchtgeschwindigkeit irgendwann einmal größer als die Lichtgeschwindigkeit.

Solange Sie ein schwarzes Loch in sicherem Abstand passieren, wird Ihr Weg durch die Raumzeit vielleicht ein bisschen verbogen, aber sie kommen mit dem Schrecken davon. Haben Sie sich aber einmal zu nahe herangewagt, dann werden Sie auf einer spiralförmigen Bahn hineingezogen. Auch ein Photon würde das gleiche Schicksal ereilen. Die Grenze, die diese beiden Schicksale voneinander trennt wird Ereignishorizont genannt. Alles, was den Ereignishorizont überschreitet, fällt in das schwarze Loch.

Gefrorene Sterne Wenn man ein Stück Materie beobachtet, das in Richtung eines schwarzen Lochs fällt, hätte man den Eindruck, dass es steckenbleibt. Lichtstrahlen, die in die Nähe eines schwarzen Lochs kommen, benötigen länger, um die gekrümmte Raumzeit zu durchqueren und uns zu erreichen.

Wenn also Materie den Ereignishorizont überschreitet, bleibt, aus sicherer Entfernung gesehen, die Zeit allmählich stehen. Wir haben den Eindruck, Material erstarre genau an dem Punkt, an dem es hineinfällt. In den 1930er-Jahren sag-



Ein Teilchen eines Teilchen-Antiteilchen-Paars, das sich in der Nähe des Ereignishorizonts gebildet hat, kann der Anziehungskraft des schwarzen Lochs entkommen.

Schwarze Löcher sind die vollkommensten makroskopischen Objekte im Universum: Ihr einziges Konstruktionsselement sind unsere Begriffe von Raum und Zeit.

Subrahmanyan Chandrasekhar,
1983

1967

Wheeler prägt den Begriff „schwarzes Loch“

1970er-Jahre

Hawking schlägt vor, dass schwarze Löcher strahlen

1997

Preskill wettet, dass in schwarzen Löchern keine Informationen verloren gehen

2004

Hawking gesteht ein, dass Preskill recht hat

ten Einstein und Schwarzschild die Existenz von sogenannten „gefrorenen Sternen“ voraus, sie sehen so aus, als seien sie genau zu dem Zeitpunkt erstarrt, in dem sie in sich zusammenfallen. Der Physiker John Wheeler setzte 1967 dann den Begriff „schwarze Löcher“ durch.

Stephen Hawking (*1942)

Stephen Hawking wurde während des Zweiten Weltkriegs geboren und wuchs in Oxford und St. Albans in England auf. Hawking betrieb an der Oxford University Physik und zog dann nach Cambridge um, wo er zusammen mit Dennis Sciama an kosmologischen Themen arbeitete. Er war von 1979 bis 2009 Inhaber des Lucasischen Lehrstuhls für Mathematik, den auch schon Isaac Newton innehatte. Kurz nach seinem 21. Geburtstag wurde bei Hawking Amyotrophe Lateralsklerose (ALS) diagnostiziert, eine degenerative Erkrankung des motorischen Nervensystems, doch er hat seine Ärzte überrascht und ist heute für sein Leben im Rollstuhl und seine computerunterstützte Stimme genauso bekannt wie für seine physikalischen Leistungen, wozu die Idee einer Strahlung gehört, die von schwarzen Löchern abgegeben wird, und einer Theorie des Universums, in der dieses keine Ränder hat.

Genau beschrieben wurde der Kollaps von Sternen zu schwarzen Löchern vom Astrophysiker Subrahmanyan Chandrasekhar. Er zeigte, dass Sterne wie unsere Sonne nicht schwer genug sind, dass sie durch ihr Eigengewicht zu einem schwarzen Loch zusammengezogen werden können, sobald ihr Fusionsmotor zu laufen aufhört. Erst Sterne, die das 1,4-Fache der Sonnenmasse haben, können kollabieren – allerdings nicht vollständig. Davor schützt sie der sogenannte Entartungsdruck aufgrund des Pauli-Prinzips. Es bildet sich ein weißer Zwerg oder ein Neutronenstern. Erst Sterne mit dem Dreifachen der Sonnenmasse würden weiter zusammenfallen und schwarze Löcher bilden.

Dass es schwarze Löcher tatsächlich gibt, wurde erst in den 1960er-Jahren nachgewiesen. Sie sind zwar dunkel, man kann ihre

Existenz aber dennoch belegen. Die gewaltigen Gravitationsfelder von schwarzen Löchern ziehen andere Objekte an, etwa Sterne. Auch Gas kann in sie hineingezogen werden, dabei erhitzt es sich und beginnt zu glühen.

Ein riesiges schwarzes Loch wurde in der Mitte unserer Galaxie entdeckt. Es hat eine Masse von einigen Millionen Sonnen, die auf ein Gebiet mit einem Radius von nur 10 Millionen Kilometern zusammengepfert sind (ca. 30 Lichtsekunden). Astronomen haben die Bahnen von Sternen verfolgt und bemerkt, dass sie plötzlich die Richtung ändern, wenn sie in die Nähe des schwarzen Lochs kommen. Genau wie Kometen gestreckte Umlaufbahnen haben und weit hinausgeschleudert werden, wenn sie an der Sonne vorbeigekommen sind, so bewegen sich auch diese Sterne im Zentrum der Milchstraße auf ungewöhnlichen Bahnen um das schwarze Loch.

Schwarze Löcher sind die Energiequellen von Quasaren. Gas, das in das schwarze Loch fällt wird sehr stark erhitzt und leuchtet heftig. Schwarze Löcher

mit einer Masse von der Größenordnung eines Sterns können auch aufgrund ihrer Röntgenstrahlung identifiziert werden, die das heiße, sie umkreisende Gas abgibt.

Verdampfung schwarzer Löcher Aber selbst wenn sie nicht von Gas umhüllt sind, sind schwarze Löcher nicht vollkommen schwarz. Als Folge von Quanteneffekten emittiert ihnen ein wenig Strahlung, wie Stephen Hawking in den 1970er-Jahren herausgefunden hat.

Nach der Heisenberg'schen Unschärferelation werden im leeren Raum ständig Teilchen und Antiteilchen erzeugt und vernichtet. Geschieht das in der Nähe des Ereignishorizonts, ist es möglich, dass eines in das schwarze Loch fällt, während das andere entkommt. Die Strahlung, die entkommt, nennt man heute Hawking-Strahlung. Weil sie Energie verlieren, wenn sie Teilchen abstrahlen, schrumpfen schwarze Löcher allmählich. Im Laufe von Milliarden von Jahren könnten sie vollständig verdampfen.

Aber das ist noch nicht das Ende der Geschichte. Es stellt sich die Frage, was mit all der Information passiert, die in einem Gegenstand steckt, der in ein schwarzes Loch fällt? Geht sie für immer verloren oder werden Teile seiner Quanteneigenschaften in der Hawking-Strahlung wieder abgegeben? Wüsste ein Teilchen davon, wenn ein mit ihm verschränktes anderes Teilchen hinein-fällt?

Hawking glaubte, dass Quanteninformationen zerstört werden. Andere Physiker sind da aber ganz anderer Meinung. Dieser Streit führte zu einer berühmten Wette. 1997 wettete John Preskill gegen Hawking und Kip Thorne, dass in schwarzen Löchern keine Informationen verloren gehen.

2004 veröffentlichte Hawking ein Paper, mit dem er behauptete, das Paradoxon gelöst zu haben – er zeigte, dass Quanteneffekte am Ereignishorizont es möglich machen könnten, dass Informationen aus dem schwarzen Loch ent-schlüpfen. Er schickte Preskill seinen Wetteinsatz, eine Enzyklopädie des Baseballs, mit der Bemerkung, dass daraus „Informationen entnommen werden können.“ Thorne ließ sich jedoch nicht überzeugen und blieb bei seiner Meinung.

Spaghettisierung

In ein schwarzes Loch zu fallen, wird oft als „Spaghettisierung“ beschrieben. Weil die Wände der Vertiefung in der Raumzeit so steil sind, gibt es innerhalb des schwarzen Lochs einen extremen Gravitationsgradienten. Wenn Sie mit den Füßen zuerst hineinfallen, würden diese sofort sehr viel stärker angezogen als Ihr Kopf. Sie würden gedehnt wie auf einer mittelalterlichen Streckbank. Käme noch eine Drehbewegung hinzu, würden sie auseinandergezogen wie ein Kaugummi zu einer langen Spaghettinudel.

36 Quantenkosmologie

Das Universum hat mit einer sehr hohen Energie auf kleinstem Raum begonnen, deshalb müssen auch noch Spuren davon in seinen großräumigen Eigenschaften zu finden sein. Die geheimnisvolle dunkle Materie und die dunkle Energie könnten von exotischen Teilchen und Quantenfluktuationen im Vakuum des leeren Raumes stammen. Und auch die kosmische Inflation könnte auf Quanteneffekten beruht haben.

Wenn man die Zeit zurückdreht, erkennt man, dass das Universum kleiner und dichter gewesen sein muss. Vor etwa 14 Milliarden Jahren musste alles in einem einzigen Punkt zusammengequetscht gewesen sein. Die explosionsartige Ausdehnung aus diesem Punkt nennt man den Urknall – ein Begriff, mit dem sich der britische Astronom Fred Hoyle 1949 eigentlich über die Vorstellung lustig machen wollte.

Die Temperatur des Universums innerhalb der ersten Mikrosekunde nach dem Urknall war so gewaltig, dass Atome instabil waren und nur ihre Bausteine in einer Quantensuppe existierten. Danach wurden Quarks zusammengezogen und es bildeten Protonen und Neutronen. Innerhalb der ersten drei Minuten verbanden sich Protonen und Neutronen entsprechend ihrer relativen Anzahl zu Wasserstoff-, Helium-, Spuren von Deuterium- (schwerer Wasserstoff), Lithium- und Berylliumkernen. Die Tatsache, dass die relative Anzahl dieser Elemente aus theoretischen Berechnungen mit der beobachteten übereinstimmt, ist eine der Stützen des Urknallmodells. Die schwereren Elemente wurden erst später in Sternen verschmolzen.

Mikrowellen-Hintergrund Eine weitere Stütze des Urknallmodells war die 1965 gemachte Entdeckung des schwachen Echos dieses Feuerballs – die kosmische Mikrowellen-Hintergrundstrahlung. Arno Penzias und Robert Wilson arbeiteten an einer Radioantenne der Bell Laboratories in New Jersey, als sie ein schwaches Signal einer Mikrowellenstrahlung bemerkten, dessen Ursprung

Zeitleiste

1915

Einstein veröffentlicht seine allgemeine Relativitätstheorie

1929

Hubble beweist, dass sich das Universum ausdehnt

1949

Hoyle prägt den Namen „Urknall“

sie sich erst nicht erklären konnten und das aus allen Himmelsrichtungen kam. Der Ursprung dieser Photonen war das junge heiße Universum!

Schon 1948 hatten George Gamow, Ralph Alpher und Robert Herman vorhergesagt, dass aus dem Urknall eine schwache Mikrowellenstrahlung zurückgeblieben sein müsste. Es stammt aus einer Zeit, etwa 380.000 Jahre nach diesem gewaltigen Feuerball, als sich die Atome gebildet haben. Vorher war das All mit geladenen Teilchen gefüllt – Protonen und Elektronen flogen ungebunden frei herum. Dieses Plasma bildete einen für die Photonen undurchdringlichen Nebel. Als sich die Atome gebildet hatten, klärte sich der Nebel auf, und das Universum wurde durchsichtig. Seitdem konnte sich das Licht frei im Raum ausbreiten. Der Nebel des jungen Universums war zwar ursprünglich sehr heiß (etwa 3000 Kelvin), doch weil es sich seither ausgedehnt hat, wurde die Strahlung stark rotverschoben, sodass wir heute eine Temperatur von 2,7 Kelvin (2,7 Grad über dem absoluten Nullpunkt) messen.

In den 1990er-Jahren hat der NASA-Satellit COBE die wärmeren und kälteren Bereiche im Mikrowellenhintergrund vermessen. Sie weichen um ein Hunderttausendstel von den 2,7 Kelvin Durchschnittstemperatur ab. Diese Gleichförmigkeit war sehr überraschend, denn man ging davon aus, dass das junge Universum so groß war, dass die weit voneinander entfernten Regionen nicht einmal mit Lichtgeschwindigkeit Informationen austauschen konnten. Es war also rätselhaft, wieso sie trotzdem fast überall die gleiche Temperatur hatten. Die winzigen Temperaturschwankungen sind die fossilen Abdrücke von Quantenfluktuationen im jungen Universum.

Man sagt, dass man im Leben nichts geschenkt bekommt. Doch das Universum gibt's vollkommen umsonst.

Alan Guth

Tiefe Verbindungen Drei weitere Eigenschaften des Universums weisen auf tiefe Verbindungen hin, die ihm in den ersten Augenblicken eingeprägt wurden. Zum einen breitet sich Licht über große Entfernungen des Raumes geradlinig aus – sonst sähen wir Sterne verzerrt, die weit weg sind.

Zweitens sieht das Universum in alle Richtungen ungefähr gleich aus. Das ist überraschend. Mit seinem Alter von 14 Milliarden Jahren, hat es einen Radius von etwa 45 Milliarden Lichtjahren (bekannt als der Beobachtungshorizont). Deshalb hatte das Licht noch keine Zeit, um von einem Ende des Universums

1965

Penzias und Wilson entdecken die kosmische Mikrowellen-Hintergrundstrahlung

1981

Guth schlägt die kosmische Inflation vor

1992

COBE zeichnet Anisotropien im Mikrowellenhintergrund auf

1998

Supernovae enthüllen dunkle Energie

zum anderen zu gelangen. Woher weiß dann die eine Seite, wie die andere aussehen soll?

Drittens sind die Galaxien sehr gleichmäßig über den Himmel verteilt. Auch das müsste nicht unbedingt so sein. Galaxien begannen als nur etwas dichtere Stellen im Gas, das beim Urknall übriggeblieben ist. Wegen der Schwerkraft begannen diese Punkte zu kollabieren, sodass sich Sterne bilden konnten. Diese dichteren Keime entstanden aufgrund von Quanteneffekten, winzige Variationen in den Energien von Teilchen im heißen Babyuniversum. Aber sie hätten sich auch genauso gut zu riesigen Galaxieflecken verstärken können, wie auf einer friesischen Kuh, statt sich so weit zu verstreuen, wie wir heute beobachten. Es gibt in der Galaxienverteilung viele Maulwurfshügel statt weniger großer Berge.

Diese drei Probleme – Flachheit, Homogenität und das Fehlen großer Strukturen – können gelöst werden, wenn man annimmt, dass das sehr frühe Universum innerhalb seines eigenen Beobachtungshorizonts lag. Dann konnten alle seine Punkte in Verbindung zueinander gewesen sein und ihre Eigenschaften abgestimmt haben. Wenn das so war, dann musste sich das Universum kurz danach plötzlich stark aufgebläht haben, sodass es sehr schnell über seinen Horizont hinausgewachsen ist und sich der expandierende Kosmos gebildet hat, den wir heute kennen. Diese plötzliche Ausdehnung ist als „Inflation“ bekannt und wurde 1981 vom amerikanischen Physiker Alan Guth vorgeschlagen. Die kleinen Dichteschwankungen, die vorher durch Körnungen in der Quantensuppe vorhanden war, wurden dabei verschmiert, wodurch das Universum auf großen Maßstäben glatt wurde.

Dunkle Seite Quanteneffekte könnten aber noch weitere Auswirkungen auf das Universum haben. Neunzig Prozent der Materie im Universum leuchtet nicht, sondern ist dunkel. Die dunkle Materie macht sich nur durch ihre Gravitation bemerkbar, zeigt aber kaum eine Wechselwirkung mit Lichtwellen oder Materie. Wissenschaftler vermuten, dass sie teilweise in Form von MACHOs (MASSive Compact Halo Objects, dt. massive, kompakte Objekte im Halo), also Gasplaneten und Sternen, die nicht gezündet haben, oder als WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles, dt. schwach wechselwirkende massereiche Teilchen), etwa exotischen subatomaren Teilchen wie Neutrinos und supersymmetrischen Teilchen, vorliegen könnte.

Heute wissen wir, dass nur etwa vier Prozent der Materie im Universum aus Baryonen besteht (d.h. normaler Materie, die aus Protonen und Neutronen aufgebaut ist). Weitere 23 Prozent sind die exotische dunkle Materie. Wir wissen, dass diese zum größten Teil keine Baryonen sind, doch es ist schwerer zu sagen,

woraus sie dann besteht – vielleicht aus WIMPs. Der Rest des Energiebudgets des Universums macht etwas ganz anderes aus, die dunkle Energie.

Albert Einstein hatte bereits die Idee mit der dunklen Energie, weil er etwas brauchte, das der anziehenden Kraft der Gravitation entgegenwirkt. Gäbe es nur die Gravitation, sollte das gesamte Universum in einen Punkt zusammenfallen. Also musste es etwas geben, was dies ausgleichen kann. So dachte Einstein, denn zu dieser Zeit wusste er noch nicht, dass sich das Universum ausdehnt, sondern er glaubte, es sei statisch.

Deshalb führte er in seine Gleichungen der allgemeinen Relativitätstheorie eine Art ausgleichenden „Anti-Gravitationsterm“ ein. Doch das bedauerte er ziemlich schnell, denn genau wie die Gravitation dazu führt, dass alles zusammenfällt, würde die Anti-Gravitation ganze Gebiete des Raumes auseinanderreißen. Also zuckte Einstein mit den Schultern und dachte, dieser Term sei einfach nicht notwendig, schließlich gab es keine Hinweise auf eine abstoßende Kraft. Er ließ seinen Term in seiner Gleichung, setzte ihn aber null.

Das änderte sich in den 1990er-Jahren, als zwei Gruppen herausfanden, dass weit entfernte Supernovae schwächer leuchten, als sie sollten. Die einzige Erklärung war, dass sie weiter weg waren, als man dachte. Der Raum zwischen ihnen und uns musste sich gedehnt haben. Nun kam Einsteins Term wieder ins Spiel – sein negativer Energieterm wurde „dunkle Energie“ genannt.

Anti-Gravitation Wir wissen über die dunkle Energie nicht besonders viel. Es ist eine Art der Energie, die im Vakuum des leeren Raumes gespeichert ist und in leeren Gegenden einen negativen Druck erzeugt. Dort, wo es viel Materie gibt – etwa in der Nähe von Galaxiegruppen und -clustern – gleicht die Gravitation sie aus oder ist sogar stärker.

Weil sie so schwer fassbar ist, kann man nur schlecht vorhersagen, wie ihre Anwesenheit das Universum auf lange Sicht beeinflussen wird. Weil das Universum auseinandergezogen wird, werden Galaxien ihre Haltekraft verlieren und weiter auseinanderdriften. Dann könnte die dunkle Energie beginnen, an den Sternen zu zerren, aus denen sie bestehen. Wenn diese Sterne erst einmal erloschen sind, wird das Universum dunkel werden. Letztlich bleibt ein Meer aus verteilten Atomen und subatomaren Teilchen. Und wieder würde die Quantenphysik die Herrschaft übernehmen.

70 Jahre lang haben wir versucht zu messen, wie sich die Expansion des Universums verlangsamt. Jetzt haben wir es geschafft – und mussten feststellen, dass sie sich beschleunigt.

Michael S. Turner, 2001

37 Stringtheorie

Die Stringtheorie versucht in einer modernen Version der Welle-Teilchen-Dualität Elementarteilchen als eine Art harmonische Schwingungen einer Saite zu beschreiben. Das Endziel ist die Vereinigung von Quantenphysik und Relativitätstheorie und somit die Erklärung aller vier Elementarkräfte in einem einzigen theoretischen Rahmen.

Die Stringtheorie ist ein eigenständiger Zweig der Physik, in dem eine ehrgeizige, aber einzigartige mathematische Methode entwickelt werden soll, die von Quanten und von Gravitation bestimmten Phänomene nicht in Form von festen Einheiten, sondern als Wellen auf vieldimensionalen Strings (dt. Saiten) zu beschreiben versucht. Sie entstand in den 1920er-Jahren, als Theodor Kaluza und Oskar Klein auf die Idee kamen, Harmonien, ähnlich einer musikalischen Stimmung, zu verwenden, um einige quantisierte Eigenschaften von Teilchen zu beschreiben.

Seit den 1940er-Jahren war klar, dass Materieteilchen wie das Elektron und das Proton nicht unendlich klein sind, sondern eine gewisse Ausdehnung haben. Um zu erklären, warum ein Elektron mit seinem eigenen Magnetfeld wechselwirkt, muss es eine verschmierte, geladene und sich drehende Kugel sein. Werner Heisenberg hatte überlegt, ob das daran liegen könnte, dass Raum und Zeit auf einem sehr kleinen Maßstab in Bruchstücke zerfallen. Auf einem größeren Maßstab bedeutete die Tatsache, dass Teilchen in Experimenten ein reproduzierbares Verhalten zeigen, dass ihr Quantenzustand gleich bleibt, ganz egal, was unter der Oberfläche vor sich geht. Aufbauend auf seiner Beschreibung des Wasserstoffatoms mithilfe der Matrizenmechanik verknüpfte Heisenberg das Verhalten eines Teilchens vor und nach einer Wechselwirkung durch eine Matrix, also einer Tabelle aus Koeffizienten.

Aber die Quantenfeldtheorie hatte inzwischen gezeigt, dass Vorgänge mit Elementarteilchen nicht in einem großen Schritt abliefen, sondern in vielen winzig kleinen. Heisenberg hätte eine Unzahl von Matrizen gebraucht, um auch

Zeitleiste

1920er-Jahre

Kaluza und Klein beschreiben die Gravitation und den Elektromagnetismus mithilfe von Harmonien

1940er-Jahre

Heisenberg entwickelt seine S-Matrizenmechanik

1964

Gell-Mann schlägt Quarks vor

nur den einfachsten Fall zu erklären. Deshalb versuchte er seine Matrizennotation anzupassen, was ihm aber nicht gelang.

In den 1960er-Jahren wandte man die Aufmerksamkeit mehr der Suche nach der starken Wechselwirkung zu. Murray Gell-Mann arbeitete damals an seiner Quark-Theorie der Nukleonen. Andere Theoretiker spielten mit alternativen mathematischen Beschreibungen herum.

1970 stellten Yoichiro Nambu, Holger Bech Nielsen und Leonard Susskind die Kernkräfte als eindimensionale schwingende Strings dar. Aber ihr Modell überzeugte nicht, sodass die Quantenchromodynamik an seine Stelle treten konnte. 1974 weiteten John Schwarz, Joël Scherk und Tamiaki Yoneya die Stringidee aus, um Bosonen zu beschreiben. Dass es ihnen gelang, auch das Graviton einzubeziehen, zeigte, dass die Stringtheorie ein vielversprechender Ansatz für die Vereinigung aller vier Kräfte war.

Schwingende Strings Strings wollen sich wie Federn oder Gummibänder zusammenziehen, um ihre Energie zu minimieren. Diese Spannung führt dazu, dass sie schwingen. Die Quantenmechanik legt die Noten fest, die sie dabei spielen, wobei jeder Schwingungszustand einem anderen Teilchen entspricht. Strings können offen sein – mit zwei Endpunkten – oder geschlossen und dabei eine Schleife formen.

Die ersten Stringmodelle waren nicht erfolgreich, weil sie nur Bosonen beschreiben konnten. Aber mit dem Konzept der Supersymmetrie wurden Theorien möglich, die auch Fermionen einschlossen – die sogenannten Superstringtheorien. Zwischen 1984 und 1986 konnten einige Barrieren überwunden werden, was als erste Superstring-Revolution bekannt wurde. Als sie erkannten, dass die Stringtheorie in der Lage war, alle bekannten Teilchen und Kräfte zu beschreiben, schlossen sich hunderte von Theoretikern der Sache an.

Die zweite Superstring-Revolution kam in den 1990er-Jahren. Edward Witten vereinigte all die verschiedenen Superstringtheorien in einer einzigen großen

» Es darf keine Schranken für die Forschungsfreiheit geben. In der Wissenschaft ist kein Platz für Dogmas. Dem Wissenschaftler steht frei, jede Frage zu stellen, jede Behauptung anzuzweifeln, nach allen Hinweisen zu suchen, jeden Fehler zu verbessern. «

J. Robert Oppenheimer, 1949

1970

Nambu, Nielsen und Susskind stellen Kernkräfte als Strings dar

1974

Schwarz, Scherk und Yoneya beschreiben Bosonen als Strings

1984–86

Erste Superstring-Revolution

1994–97

Zweite Superstring-Revolution, M-Theorie wird entwickelt

M-Theorie

Die M-Theorie ist ein Überbegriff für viele Arten von Stringtheorien, die in höheren Dimensionen existieren. Ein String, der ein Teilchen darstellt, kann eine einfache Linie oder eine Schleife sein, wie die Saite einer Gitarre. Aber wenn wir noch die Zeit als zusätzliche Achse dazunehmen, wird daraus eine Fläche oder ein Zylinder. Ihre weiteren Eigenschaften werden in zusätzlichen Dimensionen dargestellt. Die M-Theorie nimmt an, dass es 11 Dimensionen gibt. Wenn Teilchen wechselwirken, dann schneiden sich ihre Flächen und bilden neue Formen. Die M-Theorie ist also die mathematische Untersuchung dieser räumlichen Strukturen.

11-dimensionalen Theorie, der sogenannten M-Theorie (wobei „M“ verschieden ergänzt werden kann, zum Beispiel als Membran oder Mysterium). Zwischen 1994 und 1997 entstand eine Flut von Veröffentlichungen.

Seitdem hat die Stringtheorie beständig Fortschritte gemacht. Wenn ein neues experimentelles Ergebnis dazukommt, wird es geschickt in ihr katedralenartiges Gedankengebäude eingeflochten. Doch immer noch gibt es keine endgültige Theorie – man sagt, es gebe so viele Stringtheorien wie es Stringtheoretiker gibt. Und ohne Zweifel ist die Stringtheorie noch nicht so weit, dass man sie durch Experimente bestätigen könnte. Sie

wird dadurch zu einer Art luxuriösen wissenschaftlichen Spielerei.

Die einzige Möglichkeit, eine physikalische Theorie wirklich zu überprüfen, ist nach Meinung des Philosophen Karl Popper, zu zeigen, dass eine ihrer Aussagen falsch ist. Nun macht aber die Stringtheorie keinerlei neue Aussagen, die über die der Standardphysik hinausgehen, und so denken viele, dass sie zwar reizend ist, aber unpraktisch. Stringtheoretiker hoffen natürlich, dass sich das eines Tages ändern wird. Vielleicht wird eine neue Generation von Beschleunigern eine neue physikalische Ordnung zeigen. Vielleicht wird auch die Forschung, die Effekte wie die Quantenverschränkung untersucht, Fortschritte machen, sodass verborgene Dimensionen notwendig werden, um sie zu erklären.

Die Weltformel Das Endziel der Stringtheorie ist die Entwicklung einer Weltformel (*Theory of Everything*, dt. *Theorie von Allem*), die die vier Elementarkräfte in einem konsistenten Bild vereinigt (Elektromagnetismus, die starke und die schwache Kernkraft und die Gravitation). Es ist ein ambitioniertes Ziel, und man ist noch weit davon entfernt.

Es stimmt schon, dass der Rest der Physik sehr bruchstückhaft ist. Das Standardmodell der Teilchenphysik hat viele Vorzüge, aber seine Formulierung geschah im Wesentlichen aus dem Stegreif und im Vertrauen auf zugrunde liegende mathematische Symmetrien. Quantenfeldtheorien sind ein beeindruckenden

der Ansatz, aber alle Versuche, auch die Gravitation einzubeziehen, sind bis jetzt gescheitert. Und diese gekürzten Unendlichkeitsstellen in den Quanten- und Teilchentheorien – die durch den mathematischen Trick der Renormierung beseitigt wurden – sind immer noch unheimlich.

Einstein machte es den Rest seines Lebens Kummer, dass er es in den 1940er-Jahren nicht geschafft hat, die Quanten- und die Relativitätstheorie zu vereinigen. Seine Kollegen hielten ihn sogar für verrückt, weil er es überhaupt versucht hat. Aber die Tatsache, dass sie vielleicht versagen könnten, hat Stringtheoretiker bisher nicht davon abgehalten, mit ihrer abstrakten Suche weiterzumachen. Wird es vergebens sein? Stört es, wenn eine Handvoll Wissenschaftler ihre Zeit verschwenden? Werden wir auf dem Weg etwas Wertvolles lernen? Manche Physiker behaupten, dass Stringtheorie keine richtige Physik sei. Aber das muss vielleicht auch nicht sein. Immerhin half die reine Mathematik Werner Heisenberg seine Matrizenmechanik zu entwickeln und ließ Murray Gell-Mann Quarks vorhersagen.

Welchen Umfang muss eine Weltformel haben? Reicht es, wenn sie die physikalischen Kräfte beschreibt? Oder muss sie weitergehen und Aspekte der Welt, wie Leben und das Bewusstsein umfassen? Selbst wenn man ein Elektron als schwingenden String beschreibt, könnte uns das wenig darüber verraten, wie Moleküle aufgebaut sind oder gar wie lebende Zellen funktionieren.

Die Wissenschaftler sind in zwei Lager gespalten, wenn es um einen derartigen „Reduktionismus“ geht. Manche glauben, wir können zu einem Bild der Welt gelangen, das von unten nach oben geht, das von der Materie und den Kräften ausgeht. Andere halten das für lächerlich – die Welt ist so komplex, dass eine Unzahl von Verhaltensweisen aus Wechselwirkungen stammt, an die wir noch nie gedacht haben. Der Intuition widersprechende Aspekte, wie die quantenmechanische Verschränkung und das Chaos, machen die Welt noch unberechenbarer. Der Physiker Steven Weinberg glaubt, dass der Blick, der mit den Grundbausteinen beginnt, „abschreckend und unpersönlich“ ist. Wir müssen die Welt so annehmen, wie sie ist.

„Es gefällt mir nicht, dass sie nichts ausrechnen. Es gefällt mir nicht, dass sie nichts nachprüfen. Es gefällt mir nicht, dass sie für alles, was im Widerspruch zum Experiment steht, eine notdürftige Erklärung zusammenschustern, nur um sagen zu können: ‚Nun ja, es könnte schon stimmen.‘“

Richard Feynman

38 Die Viele-Welten-Hypothese

Die Kopenhagener Deutung macht bei einer Messung den Kollaps von Wellenfunktionen erforderlich; dies hielten viele Physiker für nicht realistisch. Hugh Everett III fand in den 1950er-Jahren einen Weg, der dies umging. Er schlug vor, dass sich das Universum aufspaltet, wenn ein Quantenereignis stattfindet.

In den 1950er- und 1960er-Jahren verstanden die Physiker Teilchen und Kräfte zwar immer besser, aber es wuchs damit auch der Wunsch, besser zu verstehen, was auf subatomarem Maßstab wirklich passierte. Auch Jahrzehnte nach ihrer Formulierung beherrschte immer noch die Kopenhagener Deutung das Denken – und immer noch bestand sie darauf, dass Wellen und Teilchen zwei Seiten derselben Medaille seien, die durch eine Wellenfunktion beschrieben werden, die erst dann kollabiert, also einen Zustand auswählt, wenn eine konkrete Messung durchgeführt wird.

Das Konzept des dänischen Physikers Niels Bohr konnte Quantenexperimente recht gut erklären, etwa das Verhalten von Licht bei Interferenzen oder dann, wenn es als Teilchen auftritt. Trotzdem blieben Wellenfunktionen schwer verständlich. Bohr stellte sie sich als sehr real vor. Andere sahen in ihnen nichts weiter als eine mathematische Abkürzung für das, was tatsächlich passierte. Die Wellenfunktion bringt zum Ausdruck, wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, dass etwa ein Elektron an einem bestimmten Ort ist oder eine gewisse Energie hat.

Das Schlimmere ist aber, dass die Kopenhagener Deutung alle Macht in die Hände eines „Beobachters“ legt. Wenn Schrödingers Katze gelassen in einer geschlossenen Kiste sitzt, nichts wissend von einer radioaktiven Gefahr, bedeutete Bohrs Vorstellung, dass das Tierchen in einem Überlagerungszustand ist –

Zeitleiste

1927

Kopenhagener Deutung der Quantenmechanik

1935

Schrödinger veröffentlicht sein Katzen-Gedankenexperiment

1957

Everett schlägt seine Antwort auf die Kopenhagener Deutung vor

sowohl tot als auch lebendig zur gleichen Zeit. Erst wenn die Kiste geöffnet wird, ist ihr Schicksal besiegelt. Aber was kümmert es die Katze, ob ein Mensch sie beobachtet hat oder nicht? Wer beobachtet unser Universum, um sicherzustellen, dass es uns gibt?

Multiversen 1957 schlug Hugh Everett eine andere Sichtweise vor. Ihm gefiel die Idee nicht, dass eine Wellenfunktion bei einer Messung kollabieren muss, und dass dazu Beobachter notwendig sind. Woher soll ein weit entfernter Stern wissen, dass es ihn gibt, wenn ihn noch keine Person gesehen hat?

Er argumentierte, dass alles im Universum zu jedem Zeitpunkt in allen möglichen Zuständen existiert – die Katze ist wirklich am Leben und tot. Doch damit man all diese Möglichkeiten erklären kann, muss es viele Paralleluniversen geben, in denen die Alternativen Realität wurden. Dies wurde als seine „Viele-Welten-Interpretation“ bekannt.

Es glauben zwar nicht alle Physiker daran, weil die Erzeugung vieler neuer Universen komplizierter erscheint, als einigen Photonen zu sagen, wie sie sich verhalten sollen, doch hat die Viele-Welten-Interpretation auch Anhänger. Der amerikanische Relativitätstheoretiker Bryce DeWitt, der den Begriff „Viele-Welten“ prägte, warb in den 1960er- und 1970er-Jahren dafür. Heute verwenden viele Physiker das Multiversum-Konzept, um sonst unerklärbare Phänomene in der Kosmologie zu erklären, etwa die Frage, warum die Kräfte die Stärke haben, die wir heute messen und die es ermöglicht, dass wir überhaupt existieren.

Hugh Everett III (1930–1982)

Hugh Everett ist in Washington DC geboren und aufgewachsen. Er studierte chemische Verfahrenstechnik an der katholischen Universität von Amerika, unterbrach sein Studium aber kurz nach dem Zweiten Weltkrieg, um seinen Vater zu besuchen, der in Westdeutschland stationiert war.

Everett ging zur Promotion an die Princeton University und wandte sich der Spieltheorie und der Quantenmechanik zu. Man hielt ihn zwar für intelligent, aber auch für zu sehr von Science-Fiction-Romanen beeinflusst. 1952 begann er für das Pentagon Modellrechnungen für Nuklearwaffen durchzuführen. 1959 besuchte er auf Vermittlung von John Wheeler Niels Bohr in Kopenhagen, aber seine Arbeiten fanden kaum Beachtung. Everett empfand es wie einen Besuch in der Hölle, und so konzentrierte er sich in seiner weiteren Karriere wieder auf seine Computerarbeiten. In den 1970er-Jahren wurde Everetts Idee durch einen vielbeachteten Artikel von Bryce DeWitt populär gemacht. Ein darauf folgendes Buch war schon 1973 ausverkauft. Science-Fiction-Autoren liebten Everetts Viele-Welten-Hypothese. Everett, der ein ziemlich ungesundes Leben führte, starb mit nur 51 Jahren an einem Herzinfarkt.

1970

DeWitt prägt den Begriff „viele Welten“

1994–1997

M-Theorie wird vorgeschlagen

Vor Everetts Vorschlag dachte man, das Universum folge in seiner Geschichte einem einzigen Weg. Im Laufe der Zeit entwickeln sich Ereignisse und erzeugen eine Kaskade von Veränderungen, die bestimmten Regeln gehorchen, wie dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik. Im Viele-Welten-Bild spaltet sich jedes Mal, wenn ein Quantenereignis passiert, ein neues Tochteruniversum ab. Die vielen Universen – vielleicht unendlich viele davon – erzeugen eine verästelte Struktur, wie einen Baum.

Obwohl es nicht viel Informationsaustausch zwischen den Universen gibt – sie sind getrennt voneinander, und jedes verfolgt danach seinen eigenen Entwicklungspfad –, haben einige Physiker vorgeschlagen, dass es doch geringe Verknüpfungen zwischen den abgespaltenen Welten geben könnte. Vielleicht erklären diese Wechselwirkungen Interferenzexperimente oder ermöglichen sogar Zeitreisen zwischen ihnen.

Vorteile Das Schöne an der Viele-Welten-Interpretation ist, dass man auf den Kollaps der Wellenfunktion und einen Beobachter, der sie verursacht, verzichten kann. Wenn sich Schrödingers Katze in ihrer Kiste in einem Überlagerungszustand befindet, dann muss das für den, der den Versuch durchführt, auch gelten. Der Wissenschaftler, der sieht, dass die Katze am Leben ist, befindet sich in einem Überlagerungszustand mit einem Wissenschaftler, der sie tot auffindet.

So löst Everetts Idee viele der Paradoxe der Quantenphysik. Alles, was vielleicht passieren kann, ist in einem Universum schon passiert oder könnte in einem anderen geschehen.

So kann das Universum existieren, ob es Leben gibt oder nicht. Schrödingers Katze lebt an einem Ort und ist an einem anderen tot, kein Mischzustand aus beiden. Auch die Welle-Teilchen-Dualität ist sinnvoll, denn beide Möglichkeiten sind verwirklicht.

Everett entwickelte sein Modell zu einer Zeit, als er noch Doktorand war und gerade an seiner Doktorarbeit schrieb. Die Viele-Welten-Idee wurde nicht sofort aufgegriffen und von einigen Kollegen sogar verachtet. Deshalb wandte sich Everett auch von der Forschung ab und der Verteidigungs-

und Computertechnik zu. Es war der populärwissenschaftliche Artikel von Bryce DeWitt in *Physics Today*, der in den 1970er-Jahren eine größere Aufmerksamkeit für die Theorie brachte.

Ich fordere nicht, dass eine Theorie mit der Realität übereinstimmt, weil ich nicht weiß, was das ist. Realität ist keine Größe, die man mit Lackmuspapier bestimmen kann.

Stephen Hawking

Probleme Heute betrachtet man die Viele-Welten-Interpretation mit gemischten Gefühlen. Seine Fans finden sie toll, weil sie eine einfache Lösung anbietet und mit so manchem Quantenverhalten aufräumt, das nicht einfach nachvollziehbar ist. Aber es ist fraglich, ob die Viele-Welten-Hypothese eine nachprüf-bare Theorie ist. Das hängt davon ab, wie weit die verschiedenen Universen miteinander wechselwirken und ob jemand Experimente einfallen, mit denen geprüft werden kann, ob die anderen Universen existieren. Das Urteil ist noch nicht gefallen.

Diejenigen, die weniger von der Interpretation angetan sind, argumentieren, dass die Abspaltung von Universen eine willkürliche Annahme ist – es ist nicht klar, was das bedeutet und wie es passieren soll. In Everetts beobachterlosem Bild ist die Messung an sich unwichtig, deshalb ist nicht klar, warum, wie und wann genau die Universen abzweigen sollten.

Es gibt noch weitere große Rätsel der Grundlagenphysik, die unerklärt bleiben – etwa die Richtung der Zeit und warum die Entropie nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik steigt. Es ist nicht klar, ob sich quantenmechanische Informationen mit Überlichtgeschwindigkeit durch das Universum ausbreiten können – ob sich das gesamte Universum jedes Mal aufspaltet, zum Beispiel wenn um ein schwarzes Loch am anderen Ende des Universums ein Teilchenpaar auftaucht. Manche der Paralleluniversen könnten nicht existieren, wenn ihre physikalischen Eigenschaften nicht zusammenpassen würden.

Stephen Hawking ist einer der Kritiker, der die Viele-Welten-Interpretation als „trivial wahr“ betrachtet; sie sei zwar eine nützliche Annäherung, um Wahrscheinlichkeiten auszurechnen, liefere aber sicherlich keine tiefen Einsichten in das reale Universum. Zu allen Versuchen, ein tieferes Verständnis für die Quantenwelt zu bekommen, sagt er abschätzig: „Wenn ich den Begriff Schrödingers Katze höre, greife ich nach meiner Pistole.“

Man sollte einem mathematischen Konzept vertrauen, selbst wenn es auf dem ersten Blick nicht mit der Physik verbunden zu sein scheint.

Paul A. M. Dirac, 1977

39 Verborgene Variablen

Manche Physiker, wie Albert Einstein, konnten sich ganz und gar nicht mit der Tatsache anfreunden, dass die Quantenwelt nur durch Wahrscheinlichkeiten beschrieben wird. Wie können Ursache und Wirkung überhaupt noch erklärt werden, wenn doch alles nur auf Zufall beruht? Ein Ausweg ist die Annahme, dass Quantensysteme vollständig festgelegt sind, dass es aber verborgene Variablen gibt, die wir noch nicht kennen.

Bekannterweise mochte Albert Einstein die Kopenhagener Deutung der Quantenmechanik nicht, was er durch den Satz „Gott würfelt nicht“ ausdrückte. Was ihn beunruhigte, war, dass die Wahrscheinlichkeitstheoretische Behandlung der Quantenmechanik nicht deterministisch war – aus einem bestimmten Zustand ließ sich nicht bestimmen, wie sich ein System in der Zukunft entwickeln würde.

Aufgrund der Heisenberg'schen Unschärferelation konnte man, selbst wenn man die aktuellen Eigenschaften eines Teilchens kannte, nicht bestimmen, wie sie später sein werden. Wenn aber das Universum von zufälligen Ereignissen abhängt, warum ist es dann geordnet und von physikalischen Gesetzen bestimmt?

Wie Einstein mit Boris Podolsky und Nathan Rosen mit ihrem EPR-Paradoxon von 1935 zu zeigen versuchten, muss die Quantenmechanik unvollständig sein. Weil Informationen nicht schneller als mit Lichtgeschwindigkeit übertragen werden können, müssen zwei Teilchen mit verschränkten Quanteneigenschaften, die voneinander wegfliegen immer „wissen“ in welchem Zustand sie sich befinden.

Die Beobachtung des Zustands eines Teilchens verrate uns etwas über den Zustand des anderen, aber nicht, weil eine Wellenfunktion kollabierte. Die

Zeitleiste

1926

Schrödinger stellt seine Wellengleichung vor

1927

Kopenhagener Deutung

1927

De Broglie schlägt eine Führungswellen-Theorie vor

Information stecke bereits in jedem Teilchen und zwar in „verborgenen Variablen“, so glaubte Einstein. Es müsse eine tiefere Ebene der Erkenntnis geben, die wir nur noch nicht sehen.

Determinismus In den 1920er- und 1930er-Jahren rätselten die Physiker über die Bedeutung der Quantenmechanik. Erwin Schrödinger, der 1926 seine Wellengleichung entwickelt hatte, glaubte, dass die Wellenfunktionen, die Quantensysteme beschrieben, echte reale Größen waren. Sein Kollege Max Born aber wollte das Bild noch genauer verstehen. In einer Veröffentlichung merkte er an, dass die wahrscheinlichkeitstheoretische Interpretation der Wellengleichung Auswirkungen auf den Determinismus hatte – auf Ursache und Wirkung.

Born dachte, dass weitere Eigenschaften des Atoms eines Tages vielleicht entdeckt werden könnten, die die Auswirkungen eines Quantenereignisses erklären, etwa den Zusammenstoß zweier Teilchen. Aber schließlich unterstützte er den Wellenansatz und akzeptierte, dass man nicht alles wissen konnte: „Ich selbst tendiere dazu, den Determinismus in der Welt der Atome aufzugeben. Aber das ist eine philosophische Frage, für die physikalische Argumente allein nicht entscheidend sind.“

Auch Einstein sah die Wellenfunktionen mit Misstrauen. Er erkannte, dass die Schrödingergleichung Atome nur in einem statistischen Sinn erklären konnte, nicht vollständig, obwohl er das nicht beweisen konnte. „Die Quantenmechanik ist sehr achtungsgebietend. Aber eine innere Stimme sagt mir, dass das doch nicht der wahre Jakob ist“, merkte er an.

Bei einer Konferenz, die 1927 in Belgien stattfand, stellte der Physiker Louis de Broglie eine Theorie der verborgenen Variablen vor, bei der der Determinismus erhalten blieb. Eine „Führungswelle“ leitet alle Teilchen durch den Raum, so schlug er vor. Auch Einstein hatte schon an diese Möglichkeit gedacht, doch er hatte sie verworfen und schwieg dazu. Auch andere Physiker hielten sich eher zurück. Die Mehrheit ließ sich von der Zuversicht Borns und Heisenbergs beeinflussen, die selbstsicher erklärten, die Quantenmechanik sei jetzt eine voll-

„Das Mehrdeutige ist die Realität und das Eindeutige nur ein spezieller Teil davon, bei dem wir es letztlich geschafft haben, einen ganz besonderen Aspekt festzumachen.“

David Bohm

1935

EPR-Paradoxon wird formuliert

1952

Bohm veröffentlicht seine Verborgene-Variablen-Theorie

1964

Bell schlägt Tests für verborgene Variablen vor

1981

Aspect schließt eine lokale Verborgene-Variablen-Theorie klar aus

„In gewisser Hinsicht ist der Mensch ein Mikrokosmos im Universum, deshalb ist das Wesen des Menschen ein Hinweis auf das Universum. Wir sind eng verbunden mit dem Universum.“

David Bohm

ständige Theorie. Sie glaubten, der Indeterminismus sei im Rahmen der Experimente, auf die er sich anwenden ließ, real

Nachdem Niels Bohr 1927 seine Kopenhagener Deutung der Quantenmechanik vorgeschlagen hatte, die einen Beobachter erforderlich macht, der die Wellenfunktion durch eine Messung zum Kollaps bringt, diskutierten er und Einstein heftig darüber, ob das sinnvoll ist oder nicht. Einsteins bestes Argument war das EPR-Paradoxon, bei dem es möglich wurde, dass ein Beobachter auf einer Seite des Universums eine Wellenfunktion auf der anderen Seite ohne Zeitverzögerung zum Kollabieren brachte – was im Widerspruch zur allgemeinen Relativitätstheorie stand.

Führungswellen 1952 erweckte David Bohm die Verborgene-Variablen-Theorie wieder zum Leben, indem er unwissentlich de Broglies nicht veröffentlichte Idee der Führungswelle wiederentdeckte. Bohm glaubte, dass Teilchen wie das Elektron, Proton und Photon real sind. Wir können zum Beispiel in einem Detektor einzelne Photonen auffangen, auch Elektronen erzeugen einen Strompuls, wenn sie auf eine geladene Platte treffen. Deshalb, so war er der Überzeugung, musste Schrödingers Wellenfunktion die Wahrscheinlichkeit beschreiben, dass es sich an einem bestimmten Ort befindet.

David Bohm (1917–1992)

Bohm ist in Pennsylvania, USA, geboren und aufgewachsen. Er promovierte an der University of California in Berkeley in theoretischer Physik bei Robert Oppenheimer, dem „Vater der Atombombe“. Bohm engagierte sich in radikalen politischen Vereinigungen, wie lokalen kommunistischen und pazifistischen Gruppen. Deshalb durfte er während des Zweiten Weltkriegs nicht am Manhattan-Projekt mitwirken, und manche seiner Arbeiten wurden als streng geheim eingestuft, sodass nicht einmal mehr er selbst Zugang dazu hatte. Nach dem Krieg ging Bohm an die Princeton University und arbeitete mit Einstein zusammen. Als während der McCarthy-Ära

gegen verdächtige Kommunisten vorgegangen wurde, weigerte er sich, eine Erklärung zu unterschreiben, und wurde eingesperrt. Er wurde 1951 freigesprochen, musste aber das Land verlassen, weil Princeton ihn entlassen hatte.

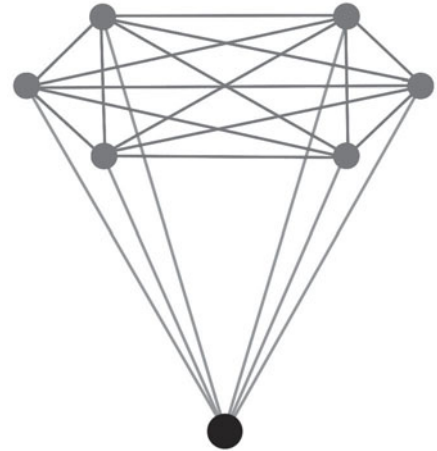
Bohm verbrachte Jahre in São Paulo, Brasilien, und Haifa, Israel, bevor er 1957 nach Großbritannien umzog, wo er Stellen an der University of Bristol und am Birkbeck College in London hatte. Während dieser Jahre arbeitete Bohm nicht nur an Themen der Quantenmechanik, sondern auch an Problemen der Kognition und an sozialen Fragen.

Um das Teilchen dorthin zu bringen, wo es sein sollte, definierte Bohm ein „Quantenpotenzial“. Es umfasst alle Quantenvariablen und antwortet auf andere Quantensysteme und -effekte und ist außerdem mit der Wellenfunktion verknüpft. Deshalb sind der Aufenthaltsort und die Flugbahn eines Teilchens immer definiert, weil wir aber am Anfang nicht alle Eigenschaften kennen, müssen wir eine Wellenfunktion verwenden, um die Wahrscheinlichkeit zu beschreiben, dass das Teilchen an einem bestimmten Ort ist oder eine gewisse Eigenschaft hat. Die verborgenen Variablen sind die Aufenthaltsorte des Teilchens, nicht das Quantenpotenzial oder die Wellenfunktion.

Bohms Theorie sichert Ursache und Wirkung – das Teilchen verfolgt, genau wie in der klassischen Physik, einen bestimmten Weg. Ein Kollaps der Wellenfunktion ist nicht mehr nötig.

Aber sie liefert keine Antwort auf das EPR-Paradoxon oder die „spukhafte Fernwirkung“. Sobald man einen Detektor lädt, ändert sich auch das Wellenfeld des Teilchens sofort. Weil sie unabhängig von einer Entfernung wirkt, nennt man die Theorie „nicht lokal“. Deshalb verletzt auch sie die spezielle Relativitätstheorie, was Einstein dazu brachte, sie als „zu billig“ zu bezeichnen.

Bohm zeigte, dass es möglich war, eine Verborgene-Variablen-Version der Quantenmechanik niederzuschreiben. Die nächsten Schritte bestanden darin, sie zu überprüfen. 1964 überlegte sich John Bell eine Reihe von Experimenten, durch deren Ergebnisse eine Verborgene-Variablen-Theorie getestet werden konnte. Wenn die Ergebnisse von diesen Vorhersagen abwichen, dann wäre die quantenmechanische Verschränkung wahr. 1980 gelang es Physikern diese Tests durchzuführen. Sie schlossen den einfachsten Fall von „lokalen“ verborgenen Variablen aus, bei dem Informationsübertragung durch die Lichtgeschwindigkeit eingeschränkt wird. Unmittelbare Zusammenhänge (Korrelationen) über große Entfernungen oder Quantenverschränkung sind tatsächlich notwendig.



Bohm stellte sich vor, dass ein Teilchen über ein Netz von „verborgenem Wissen“ über alle physikalischen Eigenschaften verfügt, die es haben könnte, aber die Quantenmechanik beschränkt, was wir davon wissen können.

40 Die Bell'sche Ungleichung

1964 packte John Bell den Unterschied zwischen Quanten- und Verborgene-Variablen-Theorien in Gleichungen. Er zeigte, dass sich Zusammenhänge zwischen Teilchen unterschiedlich verhalten, wenn sie von Anfang an bestehen oder sich aufgrund einer Messung formen.

Die Quantenmechanik ist beunruhigend. Ihre auf Wahrscheinlichkeiten begründeten Behauptungen und die grundlegenden Unbestimmtheiten, sogar bei einfachen Eigenschaften wie Energie und Zeit, Ort und Impuls, scheinen sich jeder Erklärung zu entziehen.

Anhänger der 1927 entstandenen Kopenhagener Deutung, wie Niels Bohr und Erwin Schrödinger, akzeptierten die Tatsache, dass es für das, was wir über die subatomare Welt wissen können, eine Grenze gibt. Teilchen, wie das Elektron, verhalten sich auch wie eine Welle, und wir können das, was wir über sie wissen, nur durch einen mathematischen Ausdruck, die Wellenfunktion, beschreiben.

Es scheint, dass die Nichtlokalität tief in der Quantenmechanik selbst verwurzelt ist und dass sie in jeder endgültigen Beschreibung vorhanden sein wird.

John Bell, 1966

Albert Einstein und Louis de Broglie in den 1930er-Jahren und später David Bohm in den 1950ern hielten am Glauben fest, dass Elektronen, Photonen und andere Teilchen reale Dinge seien. Sie existieren – es ist nur so, dass wir nicht alles über sie wissen können. Die Quantenmechanik muss unvollständig sein. Eine Reihe „verborgener Variablen“ könnte einige ihrer nicht einleuchtenden Eigenschaften erklären.

Das EPR-Paradoxon forderte eine Erklärung heraus. Die Eigenschaften von zwei korrelierten Teilchen, die in entgegengesetzte Richtungen durch das Universum fliegen, müssen verbunden bleiben, selbst wenn sie sich so weit vonei-

Zeitleiste

1927

Bohrs Kopenhagener Deutung der Quantenmechanik

1935

EPR-Paradoxon wird formuliert

1952

David Bohm schlägt verborgene Variablen vor

inander entfernen, dass ein Lichtsignal von dem einen das andere nicht erreichen kann. Diese Überlegung erfordert eine „spukhafte Fernwirkung“.

Quantenregeln können eine enge Verbindung zwischen Teilchen herstellen, genauso wie sie vorgeben, in welcher Reihenfolge Orbitale aufgefüllt werden. Wenn ein Teilchen – zum Beispiel ein Wasserstoffmolekül – in zwei Teile aufgespaltet wird, dann folgt aus den Erhaltungssätzen, dass die Spins der beiden entstehenden Bruchstücke entgegengesetzte Richtungen haben müssen. Wenn wir dann den Spin eines der Teilchen bestimmen und „up“ finden, dann wissen wir sofort, dass der Spin des anderen „down“ sein muss. In quantenmechanischer Sprache ausgedrückt: Die Wellenfunktion des zweiten Teilchens kollabiert genau zur gleichen Zeit wie die des ersten, ganz egal, wie weit die Teilchen voneinander entfernt sind.

Einstein und seine Kollegen hielten das für unvernünftig. Signale können nicht schneller als mit Lichtgeschwindigkeit übertragen werden, wie soll dann das Ergebnis der Messung vom ersten auf das zweite Teilchen übertragen werden? Einsteins Überlegungen gingen von zwei Annahmen aus: Lokalität, also dass nichts schneller als Licht sein kann, und Realismus, das heißt, dass sie unabhängig von einem Beobachter existieren. Einstein dachte also in Begriffen eines „lokalen Realismus“.

John Stewart Bell (1928–90)

John Bell wurde im nordirischen Belfast geboren und studierte später auch Physik an der Queen's University, Belfast. Er promovierte 1956 in Kern- und Quantenphysik an der University of Birmingham.

Er arbeitete erst für das Atomforschungszentrum UK Atomic Energy Research Establishment bei Harwell, Oxfordshire, und ging dann an das CERN in Genf. Hier beschäftigte er sich mit theoretischer Teilchen-

physik und der Entwicklung von Beschleunigern, hatte aber auch Zeit, die Grundlagen der Quantenphysik zu untersuchen.

1964, nachdem er ein Sabbatical in den USA verbracht hatte, veröffentlichte er ein Paper mit dem Titel: „On the Einstein-Podolsky-Rosen-Paradox“, in dem er das Bell'sche Theorem herleitete – einen Ausdruck, der von der Quantentheorie verletzt werden sollte.

1964

Bell formuliert seine Ungleichungen

1972

Das erste Experiment verletzt die Ungleichung

1981

Aspect-Experiment stützt schlüssig die Quantentheorie

Bells Theorem 1964 führte John Bell diese Gedanken einen Schritt weiter. Wenn sowohl verborgene Variablen als auch ein lokaler Realismus wahr sind, dann hätte die Entscheidung bei einer Messung an einem Teilchen in der Nähe keinerlei Auswirkungen auf die Eigenschaften eines weiter entfernten. Wenn das Teilchen, das weiter weg ist, wüsste, in welchem Zustand es sich gerade befindet, dann sollte es ihm egal sein, ob sich irgendjemand dazu entschließt, ein Interferenz- oder ein Streuexperiment mit dem Teilchen durchzuführen, das mit ihm verbunden war.

Bell beschrieb bestimmte Fälle, in denen dieses Verhalten mit den außergewöhnlicheren Vorhersagen der Quantenmechanik in Konflikt geriet. Er legte auch Größen fest, die gemessen werden können, um dies zu überprüfen. Würde zum Beispiel ein bestimmter Wert über oder unterschritten, würde das darauf hinweisen, dass entweder die Quanten- oder die Verborgene-Variablen-Theorie richtig ist. Diese mathematischen Aussagen sind heute als „Bell'sche Ungleichungen“ bekannt.

Bell modifizierte das EPR-Paradoxon ein wenig und stellte sich zwei Fermionen vor, deren Spin entgegengesetzt ist, etwa zwei Elektronen, eines mit Spin up, das andere mit Spin down. Ihre Eigenschaften sind korreliert, etwa weil sie beide aus einem einzelnen Teilchen stammen, das zerfallen ist. Die Teilchen bewegen sich in entgegengesetzte Richtungen voneinander weg.

Man weiß nicht, welches der beiden welchen Spin-Wert hat. An ihren jeweiligen Positionen wird dann eine Messung durchgeführt. Jede Beobachtung ergibt ein bestimmtes Ergebnis für Spin up oder Spin down. Jede Messung wird unabhängig von der anderen durchgeführt und ohne dass man das jeweils andere Ergebnis weiß.

Die Wahrscheinlichkeit, dass man bei einer Messung eine bestimmte Spinrichtung erhält, hängt vom Winkel ab, unter dem gemessen wird. Er beträgt zwischen 0 und 180 Grad.

Man erhält den Wert +1, wenn man das Messgerät gerade so ausgerichtet hat, dass seine Ausrichtung mit der des Spins übereinstimmt und –1, wenn das Teilchen entgegengesetzten Spin hat. Senkrecht dazu ergibt sich der Wert null. Bei den Winkeln dazwischen sagen die verschiedenen Theorien unterschiedliche Wahrscheinlichkeiten für die Messungen voraus.

Das Bell'sche Theorem liefert statistische Werte dafür, was man erhält, wenn man dieses Experiment sehr oft bei unterschiedlichen Winkeln durchführt. Bei einer Verborgenen-Variablen-Theorie müsste sich eine lineare Beziehung erge-

Keiner weiß, wo die Grenze zwischen klassischer und Quantenphysik genau verläuft ... einleuchtender für mich ist, dass wir entdecken werden, dass es eine solche Schranke gar nicht gibt.

John Bell, 1984

ben, für die Quantenmechanik variiert der Zusammenhang wie der Kosinus des Winkels. Wenn man also Messungen in vielen unterschiedlichen Richtungen durchführt, dann kann man sagen, was passiert.

Bell schloss: „Es muss einen Mechanismus geben, durch den die Einstellungen an einem Messegerät die Ergebnisse am anderen, das weit entfernt ist, beeinflussen; mehr noch, das beteiligte Signal muss sich ohne Zeitverlust ausbreiten.“

Bertlmanns Socken

Bell illustrierte sein Theorem mithilfe einer Figur, die einen außergewöhnlichen Kleidergeschmack hatte. Dr. Bertlmann zog gerne auffällige Socken an, jeweils zwei mit unterschiedlichen Farben. Welche Farbe er an einem bestimmten Tag trug, war unvorhersehbar. Aber wir können trotzdem etwas wissen – wenn wir sehen, dass eine Socke rosa ist, dann wissen wir, dass die andere nicht rosa sein kann. Bell meinte, dass das alles ist, was uns das EPR-Paradoxon sagen kann.

Die Vorhersagen wurden geprüft

Es dauerte mehr als ein Jahrzehnt, bis die Experimente gut genug funktionierten, um Bells Vorhersagen zu überprüfen. In den 1970er- und 1980er-Jahren zeigte eine Reihe von ihnen, dass die Quantenmechanik richtig war. Sie bewiesen, dass lokale Theorien mit verborgenen Variablen, also solche, bei denen die quantenmechanische Informationsübertragung durch die Lichtgeschwindigkeit begrenzt ist, auszuschließen waren. Es gibt also auf quantenmechanischem Maßstab eine Signalübertragung schneller als Licht. Manche Arten von Verborgenen-Variablen-Theorien sind immer noch möglich, etwa dann, wenn sie nichtlokal sind oder offen für überlichtschnelle Signalübertragung.

Bell begrüßte die Entdeckung, war aber auch enttäuscht: „Für mich ist es absolut vernünftig anzunehmen, dass die Photonen in diesen Experimenten Programme mit sich tragen, die bereits vorher abgestimmt wurden und die ihnen sagen, wie sie sich verhalten sollen.“ Es war schade, dass Einsteins Ideen nicht funktionierten.

Die Theorie von Bell ist eine der wichtigsten in der Grundlagenphysik. Sie beweist die Quantenmechanik zwar nicht ganz – manche Schlupflöcher in ihr wurden inzwischen ausgemacht – aber sie hielt vielen Versuchen stand, sie zu widerlegen.

41 Aspect-Experimente

In den 1970er- und 1980er-Jahren wurden Experimente durchgeführt, um die Bell'schen Ungleichungen zu überprüfen. Sie zeigten, dass es tatsächlich zu einer quantenmechanischen Verschränkung kommt. Jeder Partner eines Teilchenzwillings scheint zu wissen, ob der andere beobachtet wurde, selbst wenn er sehr weit weg ist. Folglich werden Quanteneigenschaften nicht ein für alle Mal gespeichert, sondern sind quervernetzt und reagieren aufeinander.

1964 schrieb John Bell eine Reihe von mathematischen Ausdrücken nieder, die gelten müssen, wenn das Verborgene-Variablen-Bild der Quantenphysik richtig ist – wenn also reale Teilchen einen ganzen Bestand an festgelegten Parametern mit sich herumtragen. Wenn diese Regeln aber verletzt werden sollten, dann müssten einige der verrückteren Aspekte der Quantenmechanik richtig sein: Die quantenmechanische Verschränkung mit ihrer spukhaften Fernwirkung müsste es dann wirklich geben.

Es dauerte mehr als ein Jahrzehnt, bis man sich verlässliche Experimente ausgedacht hatte, um die Bell'schen Ungleichungen zu überprüfen. Was war der Grund dafür? Es ist einfach unglaublich schwierig! Zuerst einmal musste man einen atomaren Übergang finden, der ein Paar von passenden Teilchen erzeugt. Dann brauchte man eine Teilcheneigenschaft, die von der Orientierung abhängt und die zuverlässig und genau gemessen werden kann, und schließlich einen Versuchsaufbau, mit dem man ein derartiges Experiment durchführen konnte.

1969 schlugen John Clauser, Michael Horne, Abner Shimony und Richard Holt vor, dass man als verschränkte Teilchen Photonenpaare verwenden könnte, die durch angeregte Kalziumatome erzeugt wurden. Wenn man durch Energiezufuhr die zwei äußeren Elektronen in Kalzium in ein höheres Orbital bringt

Zeitleiste

1935

EPR-Paradoxon wird formuliert

1964

Bell schlägt seine Ungleichungen vor

1974

Clauser und Freedman testen die Bell'schen Ungleichungen

1982

Aspect beweist, dass die Bell'schen Ungleichungen verletzt werden

und sie dann wieder zurückfallen lässt, werden zwei Photonen emittiert. Weil sie miteinander verknüpften Quantenregeln gehorchen, hat das Paar korrelierte Polarisationen. Diese Tatsache kannte man bereits seit Ende der 1940er-Jahre.

1972 führten Clauser und Stuart Freedman das erste erfolgreiche Experiment durch, mit dem die Bell'schen Ungleichungen überprüft werden konnten. Es war schwierig, die gepaarten Photonen anzufangen und einzufangen, sodass 200 Stunden für die Messungen notwendig waren. Die Polarisation der Photonen musste im blauen und grünen Teil des Spektrums bestimmt werden, doch damals waren die Detektoren noch nicht sehr empfindlich. Am Ende stimmte das Ergebnis mit den Vorhersagen der Quantenmechanik überein. Aber Clauser und seine Kollegen mussten ein wenig mit statistischen Methoden tricksen, um die fehlenden Photonen einzuberechnen, deshalb lieferte das Experiment kein wirklich zuverlässiges Ergebnis.

Weitere Experimente mit Kalzium und angeregten Quecksilberatomen, sogar mit Photonenpaaren, die bei Positronenannihilationen entstanden sind, folgten. Die meisten stützten die Quantenmechanik, manche lieferten kein eindeutiges Ergebnis. Mit den Verbesserungen der Detektortechnologie und der Laser wurde auch die Genauigkeit der Experimente höher, Atome ließen sich effizienter anregen, sodass sie mehr Photonen abgaben.

Aspects Versuche Ende der 1970er-Jahre erweiterte der französische Physiker Alain Aspect das Experiment. Er verwendete wieder verdampftes Kalzium und stellte zwei Laser genau auf die Frequenzen ein, die benötigt wurden, um

Alain Aspect (*1947)

Alain Aspect wurde in Agen in der französischen Region Aquitanien geboren. Er studierte an der École Normale Supérieure de Cachan und an der Université d'Orsay Physik. Nach seinem Master-Abschluss leistete er seine Wehrdienstzeit als Lehrer in Kamerun ab. Dort erwachte sein Interesse für die Bell'schen Ungleichungen. Aspect kehrte nach Cachan zurück und führte noch vor seiner Promotion in Orsay seine Experimente mit verschränkten Photonen durch. Später erhielt er eine Stelle am angesehenen Collège de France, wo er sich der Erforschung von lasergekühlten ultrakalten Atomen zuwandte, eine Technik, die mittlerweile in Atomuhren verwendet wird. Heute leitet er die Quantenoptik-Gruppe des CNRS (Centre national de la recherche scientifique) in Orsay. Er hat viele Verbindungen zur Industrie.

1998

Zeilinger beseitigt das Kommunikations-Schlupfloch

1998

Verschränkte Photonen werden 10 km durch Genf übertragen

2007

Verschränkte Photonen werden 144 km zwischen den kanarischen Inseln übertragen

das äußere Elektronenpaar zu einem Quantensprung in ein höheres Orbital zu veranlassen, von wo sie in einer Kaskade zurückfallen. Er beobachtete Lichtstrahlen, die in zwei entgegengesetzte Richtungen abgestrahlt wurden, jeweils einen pro Photonenfrequenz: grün und blau.

Weil die Zeit zwischen jedem Photonenpaar, das abgestrahlt wurde, länger war, als der Abstand der einzelnen Photonen des Paares, mussten die gleichzeitig gemessenen Photonen aus korrelierten Paaren bestehen. Außerdem musste jede Kommunikation zwischen den getrennten Photonen mit der doppelten Lichtgeschwindigkeit unterwegs sein, um sie verbinden zu können.

Genau wie Sonnenbrillen mit Polarisationsfilter die Blendung verringern, indem sie reflektiertes Licht blockieren, so kann auch die Polarisation der Photonen in jedem Strahl mithilfe spezieller Filter gemessen werden. Die Filter ließen senkrecht polarisiertes Licht sehr gut durch (etwa 95 % des Lichts ging durch), doch fast das gesamte horizontal polarisierte Licht (wieder etwa 95 %) wurde blockiert und reflektiert. Indem sie die Filter drehten, konnte das Team von Aspect messen, wie viel Licht mit dazwischenliegender Polarisation durchging.

Aspect, Philippe Grangier und Gérard Roger veröffentlichten ihre Ergebnisse 1982. Sie stimmten mit einer kosinusförmigen Variation beim Winkel der Polarisation überein, was die Quantenmechanik stützte. Lokale verborgene Variablen sagten einen linearen Abfall voraus. Ihre Ergebnisse hatten eine höhere statistische Signifikanz als die früherer Messungen und waren ein Meilenstein.

Theorien mit lokalen verborgenen Variablen waren nach diesem Ergebnis tot oder zumindest in akuter Lebensgefahr. Es gab immer noch etwas Platz für exotischere Formen von verborgenen Variablen, die schneller als mit Lichtgeschwindigkeit kommunizierten, aber einfachere Modelle, die auf direkter Kommunikation mit Lichtgeschwindigkeit beruhten, konnte man ausschließen. Die Messung an einem Teilchen hatte also tatsächlich Einfluss auf das Verhalten des anderen, egal wie weit die beiden voneinander entfernt waren. Quantenzustände konnten verschränkt sein.

Schlupflöcher stopfen Kritiker bemängelten jedoch, dass die experimentellen Überprüfungen nicht perfekt waren und Schlupflöcher zuließen. Eines steckte im zuverlässigen Nachweis der Photonen. Es wurde bei der Analyse der Daten durch Clauser gestopft: Nicht jedes Photon konnte nachgewiesen werden,

Der aufregendste Aufruf, den man in der Wissenschaft hören kann, der eine neue Entdeckung verkündet, ist nicht ‚Heureka!‘ (ich hab’s), sondern ‚das ist seltsam‘.

Isaac Asimov

deshalb war es nötig, für die Zählung einen statistischen Korrekturterm einzuführen. Das zweite Problem war das Kommunikations-Schlupfloch – weil das Experiment auf relativ engem Raum stattfand, konnte vielleicht einer der Detektoren irgendwie Informationen an den anderen übermitteln. Das wurde ausgeschlossen, indem die Geräte schneller umgeschaltet wurden, als jede Nachricht übertragen werden konnte. Aspect hatte sich bemüht, dieses Schlupfloch auszuschalten, indem er einen doppelstrahligen Versuchsaufbau wählte. Aber um ganz sicher zu gehen, veränderte er die Polarisatorstellung, während die Photonen unterwegs waren. Auch dieses Experiment zeigte, dass die Quantenphysik richtig ist. 1998 ging eine österreichische Gruppe unter Leitung von Anton Zeilinger noch einen Schritt weiter, indem sie die Auswahl des Detektors noch schneller machten und dem Zufall überließen. Es gab so keine Möglichkeit mehr, wie die eine Seite wissen könnte, was die andere gerade tat. Wieder wurde die Quantenphysik bestätigt. 2001 wurde dann von einem Team amerikanischer Physiker das verbleibende Schlupfloch geschlossen, nämlich dass sich bei der Auswahl der Stichproben Fehler einschlichen. Sie fingen bei einem auf Beryllium basierenden Experiment tatsächlich jedes einzelne korrelierte Photon ein. Die Ergebnisse stehen nun unwiderruflich fest: Quantenmechanische Informationen sind verschränkt.

Verschränkung über große Entfernung Inzwischen haben Physiker gezeigt, dass die Verschränkung über große Entfernungen aufrechterhalten wird. 1998 gelang es Wolfgang Tittel, Jürgen Brendel, Hugo Zbinden und Nicolas Gisin an der Universität Genf die Verschränkung von Photonen über eine Entfernung von 10 Kilometern nachzuweisen. Die Photonen wurden dabei durch Glasfaserleitungen durch Tunnel quer durch Genf geschickt.

2007 übertrug die Gruppe von Zeilinger verschränkte Photonen zwischen den Kanarischen Inseln La Palma und Teneriffa über eine Strecke von 144 Kilometern. Jetzt prüft man, ob man die Verschränkung für Quantenkommunikation über große Entfernungen nutzen kann.

Die Experimente von Clauser und Aspect und viele andere danach haben inzwischen schlüssig gezeigt, dass lokale Verborgene-Variablen-Theorien nicht richtig sein können. Die quantenmechanische Verschränkung mit ihrer nicht lokalen Wirkung gibt es wirklich.

42 Quantenradierer

Varianten des Doppelspaltexperiments von Young verleihen uns Einblicke in die Welle-Teilchen-Dualität. Zu Interferenzeffekten kommt es nur, wenn Photonen korreliert, ihre Wege aber zufällig sind. Sobald ihre Bahnen bekannt sind, verhalten sie sich wie Teilchen und die Interferenzen verschwinden. Dieses Verhalten kann durch Verschränken oder Löschen der Quanteninformation gesteuert werden.

Das Kernstück der Quantenphysik ist die Welle-Teilchen-Dualität. Nach Louis de Broglie hat alles sowohl Wellen- als auch Teilcheneigenschaften. Doch diese Aspekte der Natur können sich niemals gleichzeitig zeigen. Sie treten unter verschiedenen Bedingungen auf.

Im 19. Jahrhundert zeigte Thomas Young mit seinem Doppelspaltexperiment, dass sich Licht wie eine Welle verhält, wenn es durch zwei Spalte fällt: Die beiden sich überlagernden Wellenfronten erzeugen Interferenzen. 1905 wies Albert Einstein nach, dass Licht gelegentlich aber auch als Teilchenstrom auftritt. Unter den richtigen Bedingungen können auch Elektronen und selbst Atome interferieren. Der dänische Physiker Niels Bohr stellte sich vor, dass Wellen und Teilchen zwei Seiten der gleichen Medaille sind. Werner Heisenberg erklärte schließlich, dass man bestimmte komplementäre Eigenschaften – wie Impuls und Ort – niemals gleichzeitig genau bestimmen kann. Liegt der Grund dafür vielleicht auch in der Welle-Teilchen-Dualität?

1965 überlegte sich Richard Feynman, was wohl passieren würde, wenn wir messen könnten, durch welchen Spalt ein Teilchen in Youngs Experiment geflogen ist. Man könnte zum Beispiel Elektronen durch die beiden Schlitze fliegen lassen und diese gleichzeitig mit Licht bestrahlen. Wenn dieses Licht durch die einzelnen Elektronen gestreut wird, würde das deren Flugbahn verraten. Dann würden wir, so überlegte sich Feynman, die genaue Position des Elektrons kennen, sodass wir es als Teilchen betrachten müssten, und die Interferenzen sollten verschwinden.

Zeitleiste

1801

Young führt sein Doppelspaltexperiment durch

1905

Einstein zeigt, dass sich Licht wie ein Teilchen verhalten kann

1927

Bohr schlägt die Kopenhagener Deutung und die Komplementarität vor

1982 dachten sich die theoretischen Physiker Marlan Scully und Kai Drühl ein anderes Experiment aus, bei dem zwei Atome als Lichtquellen dienen. Wenn wir mit einem Laser in jedem der Atome ein Elektron auf das gleiche höhere Energieniveau anregen, dann würde jedes Elektron zurückfallen und ein ähnliches Photon abgeben. Beide hätten die gleiche Frequenz und deshalb könnte man nicht sagen, von welchem Atom sie kommen. Diese Photonen würden interferieren und Beugungsmuster erzeugen. Aber wir könnten auch zurückgehen und herausfinden, von welchem Atom sie abgegeben wurden, indem wir die Energien der zurückbleibenden Atome bestimmen – dasjenige, das Energie verloren hat, hätte das Photon abgestrahlt. Da wir die Atome vermessen haben, nachdem die Photonen abgegeben wurden, könnten wir also sowohl die Wellen- als auch die Teilchen-seite des Lichts gleichzeitig beobachten.

Aber die Kopenhagener Deutung behauptet kategorisch, dass wir nicht beides gleichzeitig beobachten können. Nach der Quantenmechanik müssen wir an das ganze System und seine Wellenfunktion denken. Indem wir den Zustand der Atome bestimmen, selbst nachdem das Photon sie verlassen hat, beeinflussen wir das gesamte Experiment. Wenn wir es so festlegen, wird sich das Photon wie ein Teilchen verhalten und die Interferenzen werden verschwinden.

Radierer Was passiert, wenn wir den Zustand der Atome bestimmen, aber uns die Ergebnisse nicht ansehen? Theoretisch sollten die Interferenzen bestehen bleiben, wenn wir über die Bahn der Photonen nichts wissen. In Wirklichkeit aber messen wir die Energien der verbleibenden Photonen, auch wenn wir sie geheim halten, die Interferenzen kommen also nicht zurück.

Eine Methode, die Energien zu bestimmen, aber die Information wieder zu verwerfen, ist mit Photonen aus einem Laser auf beide zu schießen. Das Atom, das das erste Photon erzeugt hat, wird so wieder angeregt, ein weiteres, drittes Photon wird abgegeben, aber jetzt wissen wir nicht, von welchem Atom es kam – jedes der beiden könnte in seinen Grundzustand zurückgekehrt sein.

„Ich habe keine Angst davor, Dinge nicht zu wissen, verloren zu sein in einem geheimnisvollen Universum ohne Zweck, denn genau das ist es, soweit ich das sagen kann. Ich habe keine Angst davor.“

Richard Feynman, 1981

1965

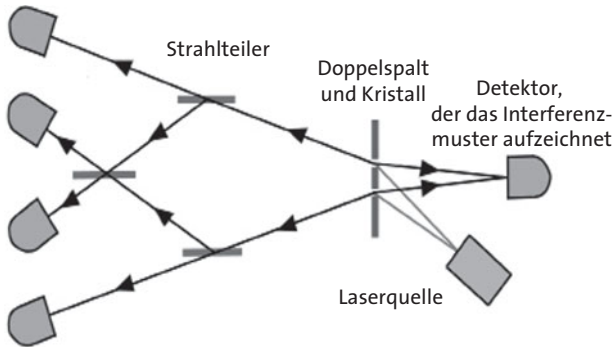
Feynman fragt, ob beide Formen eines Photons gleichzeitig beobachtet werden können

1982

Scully und Drühl überlegen sich ein Experiment, um von Welle auf Teilchen umzuschalten

1995

Zeilinger beobachtet das Umschalten von Welle auf Teilchen



Licht von jeder Spalte verläuft auf verschiedenen Wegen, A und B wird wieder aufgespalten. Die Information darüber, welchen Weg sie genommen haben, wird bei Photonen gelöscht, wenn sie auf D1 und D2, nicht aber wenn sie auf D3 und D4 treffen.

Wenn überhaupt, dann wurde Wissen nur selten dazu vermittelt, damit man es behält, sondern damit man es teilt; die Gnade dieses reichen Juwels geht bei der Geheimhaltung verloren.

Joseph Hall

Das reicht aber nicht, dass die Interferenzen wieder auftauchen. Die interferierenden Photonen wissen nichts über das dritte Photon. Es ist notwendig, dass die beiden Gruppen korreliert werden, bevor die Interferenzen wieder auftreten. Im oben geschilderten Fall, können wir die Information, die im dritten Photon enthalten ist, auslöschen, wobei es trotzdem Teil des ganzen Systems bleibt. Wenn wir das dritte Photon so aufzeichnen, dass wir nicht sagen können, aus welchem Atom es stammt, wird die Quantenunsi-

cherheit wiederhergestellt. So könnte zum Beispiel das dritte Photon von einem Detektor aufgefangen werden, der zwischen den beiden Atomen steht. Die

Wahrscheinlichkeit, dass das passiert ist 50 Prozent, es wäre also unbestimmt. Aber seine Aufzeichnung (oder Nicht-Aufzeichnung) würde das System derart zurücksetzen, dass wir nichts über die Wege der interferierenden Photonen sagen könnten. Ein derartiges Experiment wird Quantenradierer genannt, weil es das Quantenwissen über ein System zerstört.

Wenn wir uns dies auf einer tieferen Ebene ansehen, wird das ursprüngliche interferierende Photon mit dem dritten Photon korreliert. Es gibt zwei Möglichkeiten – das dritte Photon wird entweder aufgezeichnet oder nicht. Und jede liefert ein Interferenzmuster. Doch beide sind phasenverschoben, sodass sie sich gegenseitig auslöschen, wenn sie sich überlagern. Also fügt das Auftreten des dritten Photons – mit seiner unberührten Unbestimmtheit – ein Interferenzmuster

hinzu, das das erste löscht. Wenn es am Ende aufgezeichnet wird, tauchen die Beugungsmuster des Systems wieder auf.

Verschränkte Interferenz 1995 machte die Gruppe von Anton Zeilinger im österreichischen Innsbruck eine ähnliche Beobachtung, als sie verschränkte

Photonenpaare verwendeten, die durch Laseranregung eines Kristalls erzeugt wurden. Indem sie sehr geringe Intensitäten von rotem und infrarotem Licht verwendeten, konnten die Forscher im Wesentlichen die Bahnen der einzelnen Photonen durch ihren Versuchsaufbau verfolgen. Sie erzeugten zuerst durch Anregung einen Strahl von Photonen und schickten einige davon wieder zurück durch den Kristall, um einen zweiten Strahl zu erzeugen. Wo sie sich schnitten, wurden Interferenzen erzeugt. Als man aber die Strahlen unterscheidbar machte, indem man ihre Polarisation änderte – sodass man die Flugbahnen der einzelnen Photonen nachvollziehen konnte – verschwanden die Interferenzen. Die Interferenzmuster traten erst wieder auf, nachdem die Wege gemischt wurden, sodass alle örtlichen Informationen verloren gingen.

Noch seltsamer ist, dass es keinen Unterschied macht, wann man sich entscheidet, den Quantenradierer einzusetzen. Das geht sogar noch, nachdem die interferierenden Photonen aufgezeichnet wurden. 2000 führten Yoon-Ho Kim, Marlan O. Scully und ihre Kollegen ein derartiges „Verzögerter-Quantenradierer-Experiment“ durch. Das Interferenzmuster konnte beeinflusst werden, indem man sich – sogar nachdem man die Position des Photons bestimmt hatte – dafür oder dagegen entschied, den Quantenradierer anzuwenden. Die Interferenzen traten nur auf, nachdem die Unbestimmtheit wiederhergestellt worden war.

Es gibt also eine Verbindung zwischen Komplementarität und nichtlokalen Effekten in der Quantenphysik. Interferenz funktioniert nur aufgrund dieser Korrelationen durch die Verschränkung über größere Entfernungen. Und es ist einfach unmöglich gleichzeitig Wellen- und Teilcheneigenschaften zu messen.

Anton Zeilinger (*1945)

Anton Zeilinger wurde 1945 in Österreich geboren. Heute ist er Professor an der Universität Wien und der österreichischen Akademie der Wissenschaften. Seit den 1970er-Jahren leistet er Pionierarbeiten bei Experimenten zur quantenmechanischen Verschränkung. Er beschrieb die korrelierten Polarisationen von Photonenpaaren, die in den Experimenten verwendet werden, als ein Paar von Würfeln, die immer auf zueinander passenden Zahlen landen. Zeilingers Arbeitsgruppe hält viele Rekorde – für den größten Abstand, über den verschränkte Photonen übertragen wurden, und für die Zahl von verschränkten Photonen. 1997 zeigte Zeilinger Quantenteleportation – die Abbildung eines Quantenzustands von einem zu einem zweiten verschränkten Teilchen. „Ich mache das alles nur zum Spaß“, sagt er.

43 Dekohärenz

Quantensysteme können leicht mit anderen verschränkt werden, sodass sich ihre Wellenfunktionen verbinden. Ob sie dies in Phase tun oder nicht, bestimmt das Ergebnis. Deshalb können Quanteninformationen leicht verloren gehen und damit auch der Zusammenhang des quantenmechanischen Zustands. Größere Objekte verlieren ihren Zusammenhang schneller als kleinere.

In der Quantenwelt ist alles unsicher. Teilchen und Wellen sind nicht unterscheidbar. Wellenfunktionen kollabieren, wenn wir durch eine Messung etwas festlegen. In der klassischen Welt scheint alles solider zu sein. Ein Rußteilchen ist heute genauso ein Rußteilchen wie morgen.

Wo ist die Trennlinie zwischen der quantenmechanischen und der klassischen Welt? Louis de Broglie wies jedem Objekt im Universum eine charakteristische Wellenlänge zu. Große Gegenstände wie Fußbälle haben eine sehr kleine Wellenlänge, deshalb verhalten sie sich wie Teilchen. Winzige Dinge wie Elektronen haben Wellenlängen, die näher an ihrer Größe sind, deshalb treten ihre Welleneigenschaften zu Tage.

In der Kopenhagener Deutung der Quantenmechanik schlug Niels Bohr vor, dass eine Wellenfunktion „kollabiert“, wenn eine Messung durchgeführt wird. Etwas ihrer typischen Wahrscheinlichkeit geht verloren, wenn wir eine Eigenschaft mit Sicherheit feststellen. Das ist irreversibel. Aber was passiert, wenn eine Wellenfunktion kollabiert oder wenn wir eine Messung durchführen? Wie werden die unscharfen Unbestimmtheiten in ein greifbares Ergebnis umgewandelt?

Hugh Everett umging diese Frage, indem er 1957 seine „Viele-Welten-Hypothese“ vorschlug. Er behandelte das gesamte Universum, als hätte es nur eine Wellenfunktion, die sich entwickelt, aber niemals kollabiert. Der Akt der Messung ist eine Wechselwirkung oder Verschränkung zwischen Quantensystemen,

Zeitleiste

1927

Kopenhagener Deutung wird vorgeschlagen

1952

Bohm entwickelt eine Verborgene-Variablen-Theorie

1957

Everett schlägt Viele-Welten-Hypothese vor

die dazu führt, dass sich ein neues Universum abtrennt. Aber nicht einmal damit konnte Everett erklären, was genau an diesem Punkt vor sich geht.

In später entstandenen „Leitwellen-Quantentheorien“, wie denen von de Broglie und David Bohm, die die Welle-Teilchen-Dualität in Form eines Teilchens in einem Quantenpotenzial zu beschreiben versuchten, verzerrten Messungen die Bewegung des Teilchens in seinem Quantenfeld. Es ist etwa so, als würde man in der allgemeinen Relativitätstheorie eine Masse in die Nähe einer anderen bringen, dabei verändert sich die Raumzeit und die gravitativen Einflüsse mischen sich. Einen echten Kollaps der Wellenfunktion gibt es dabei nicht, sie ändert nur ihre Form.

Dekohärenz Heute ist die beste Erklärung für den Austausch von Wahrscheinlichkeit durch Bestimmtheit das Konzept der Dekohärenz, das 1970 durch den Physiker Dieter Zeh entwickelt wurde. Wenn zwei oder mehr Wellenfunktionen zusammentreffen, etwa wenn eine Messapparatur in die Nähe einer Quantengröße gebracht wird, dann hängt die Art ihrer Wechselwirkung von ihren relativen Phasen ab. Genau wie sich kreuzende Licht- oder Wasserwellen verstärken oder auslöschen, wenn sie interferieren, so können auch Wellenfunktionen verstärkt oder ausgelöscht werden, wenn sie sich vermischen.

Jede Wechselwirkung bringt eine Wellenfunktion ein wenig mehr durcheinander. Schließlich wird sie vollkommen unzusammenhängend und verliert ihre Welleneigenschaften. Bei großen Objekten spielt die Dekohärenz eine viel größere Rolle – sie verlieren ihren quantenmechanischen Zusammenhang viel schneller. Das Quantendasein kleiner Dinge wie Elektronen bleibt dagegen länger bestehen. Schrödingers Katze zum Beispiel nimmt demnach ziemlich schnell wieder die Form eines Haustiers an, selbst wenn sie nicht beobachtet wird, weil ihre Wellenfunktion fast sofort zerfällt.

Quanten-Discord

Die Überwindung der Dekohärenz ist eine große Herausforderung für Quantencomputer, die davon abhängen, dass man Quantenzustände über lange Zeit speichern kann. Hier hilft der sogenannte Discord. Er ist ein Maß dafür, wie stark ein System gestört wird, wenn ein Beobachter seine Eigenschaften misst, und erlaubt es, bei Rechengvorgängen auch gemischte Zustände mit einzubeziehen.

1970

Zeh schlägt Dekohärenz-Konzept vor

1996

Quanten-Dekohärenz wird mithilfe von Rubidiumatomen beobachtet

1999

Beugung von Buckminsterfullerenen wird beobachtet

Das ist eine beruhigende Vorstellung, denn sie stellt unsere makroskopische Welt auf sichere Füße. Doch bleiben auch bei diesem Ansatz Rätsel. Etwa warum die Dekohärenz über einen Quantenriesen so gleichmäßig wirkt. Könnte nicht auch die Hälfte des Tieres in einer Quanten-Möglichkeit bleiben, während die andere real wird? Könnte es tatsächlich halb tot und halb am Leben sein?

Außerdem: Was beschränkt das Ergebnis der zerfallenen Wellenfunktion auf die geeignete Messgröße? Warum taucht ein Photon auf, wenn es gebraucht wird, oder eine Lichtwelle, wenn ein Doppelspalt in ihren Weg gebracht wird? Die Dekohärenz verrät uns nicht allzu viel über die Welle-Teilchen-Dualität.

Große Systeme Eine Methode, mehr darüber herauszufinden, ist die Untersuchung von makroskopischen Phänomenen oder Objekten, die Quantenverhalten zeigen. 1996 und 1998 brachten die französischen Physiker Michel Brune, Serge Haroche und Jean-Michel Raimond und ihre Kollegen elektromagnetische Felder mithilfe von Rubidiumatomen in einen Überlagerungszustand und beobachteten, wie die quantenmechanische Intaktheit verloren ging. Andere Gruppen haben versucht, noch größere und bessere an Schrödingers Katze erinnernde Szenarios zu bauen.

Das Verhalten von großen Molekülen ist ein weiterer Weg. 1999 gelang es der Gruppe von Anton Zeilinger in Österreich die Beugung von Buckminsterfullerenen zu beobachten, das sind fußballförmige Gebilde aus 60 Kohlenstoffatomen – sie wurden nach dem Architekten Buckminster Fuller benannt, der durch seine geodätischen Kuppeln bekannt wurde. Um die Maßstäbe zu verdeutlichen: Es war, als schieße man einen Fußball auf einen Spalt, der so groß wie ein Tor war, und beobachte, dass der Ball Wellenverhalten zeigt und interferiert. Die Wellenlänge des Fußballmoleküls betrug ein Vierhundertstel der physikalischen Größe des Moleküls.

Ein weiteres System, bei dem Dekohärenz-Effekte untersucht werden können, ist ein supraleitender Magnet, der oft die Form eines extrem gekühlten Metallrings mit einigen Zentimetern Durchmesser hat. Supraleiter haben eine unendliche große Leitfähigkeit – das heißt, ein Elektron kann sich ungestört durch das Material bewegen.

Der supraleitende Magnet nimmt bestimmte Energieniveaus oder Quantenzustände an. Deshalb ist es möglich, zu untersuchen, wie mehrere davon interferieren, wenn man sie einander annähert und die Ströme in ihnen zum Beispiel in unterschiedliche Richtungen, im oder gegen den Uhrzeigersinn, fließen. Eine Fülle von Untersuchungen hat gezeigt, dass die Dekohärenz der Systeme umso schneller auftritt, je größer sie sind.

Quantenlecks Man kann sich die Dekohärenz vorstellen als das allmähliche Abfließen von Quanteninformationen in die Umgebung durch viele kleine Wechselwirkungen. Diese bringen die Wellenfunktion nicht wirklich zum Kollaps, aber es ist ähnlich, denn die Quantenbestandteile eines Systems werden unaufhörlich entkoppelt.

Die Dekohärenz löst also nicht das Messproblem. Weil Messgeräte groß genug sein müssen, dass wir sie ablesen können, sind sie einfach komplexe Quantensysteme, die in den Weg des ursprünglichen gestellt werden, das wir beobachten möchten. Die vielen Teilchen, aus denen der Detektor besteht, wechselwirken in komplexer Weise mit dem Untersuchungsobjekt. Bei diesen vielen zusammenhängenden Zuständen tritt allmählich Dekohärenz auf, bis nur noch ein Durcheinander aus getrennten Zuständen übrigbleibt. Dieser quantenmechanische „Sandhaufen“ wird schließlich zum Ergebnis der Messung, aus dem die anderen Quanteninformationen des Originalsystems entfernt wurden.

Insgesamt zeigt dieses Bild eines verworrenen Netzes von Quantenwechselwirkungen, dass der „Realismus“ tot ist. Wie die „Lokalität“, also Kommunikation durch die Übermittlung von unmittelbaren durch die Lichtgeschwindigkeit beschränkten Signalen, so ist auch der „Realismus“, dass es Teilchen als getrennte existierende Einheit gibt, ein Trugbild. Die offensichtliche Realität der Welt ist eine Maske, die sie trägt, um zu verbergen, dass sie in Wirklichkeit aus Quantenasche besteht.

Es gibt eine große Schwierigkeit mit einer guten Hypothese. Wenn sie fertig und abgerundet ist, die Ecken glatt und der Inhalt zusammenhängend und schlüssig, dann wird sie zu einem Ding an sich, ein Kunstwerk.

John Steinbeck, 1941

44 Qubits

Vielleicht werden eines Tages Quantencomputer die heutigen auf Halbleitern basierenden Technologien ersetzen. Sie wären leistungsfähig genug, um fast jeden Geheimcode zu knacken. Doch bis jetzt existieren nur Prototypen, sie behandeln binäre Daten in Form von Quantenbits, also von Zuständen von Atomen. Da sie auf Grundlage der Quantenmechanik funktionieren und Phänomene wie die Verschränkung benutzen, könnten sie Millionen von Berechnungen gleichzeitig durchführen.

Dank der winzigen Dimensionen von Quantensystemen und ihrer Fähigkeit in verschiedenen Zuständen zu existieren, steigt derzeit die Wahrscheinlichkeit, dass eines Tages grundlegend neue Computertypen gebaut werden könnten. Statt mit elektronischen Bauelementen könnten die digitalen Informationen dann durch individuelle Atome im Herzen eines Quantencomputers gespeichert werden.

Aber obwohl sie schon in den 1980er-Jahren vorgeschlagen wurden und seither große Entwicklungsfortschritte gemacht haben, bleibt noch ein langer Weg, bis sie tatsächlich realisiert werden. Bisher ist es den Physikern erst gelungen, etwa ein Duzend von Atomen so zu verknüpfen, dass sie für Berechnungen genutzt werden können. Der Hauptgrund dafür ist, dass es sehr schwierig ist, die Atome – oder andere Bausteine – so zu isolieren, dass ihre Quantenzustände zwar ausgelesen werden können, aber unempfindlich gegenüber Störungen sind.

Konventionelle Computer zerlegen Zahlen und Anweisungen in einen Binär-code – eine Reihe von Einsen und Nullen. Während wir normalerweise in Vielfachen von Zehn zählen, rechnen Computer im Zweiersystem: Die Zahlen 2 und 6 werden im Binär-code als „10“ (eine Zwei und null Einsen) und „110“ (eine Vier, eine Zwei und null Einsen) ausgedrückt. Jede 0 oder 1 stellt ein Bit dar (*binary digit*). Ein Computer übersetzt durch seine Hardware diesen Binär-code in physikalische Zustände, wie an und aus. Jede Entweder-oder-Entschei-

Zeitleiste

1981

Paul Benioff wendet die Quantentheorie auf Computer an

1982

Richard Feynman hat die Idee für einen Quantencomputer

1989

David Deutsch beweist, dass man einen Quantencomputer bauen kann

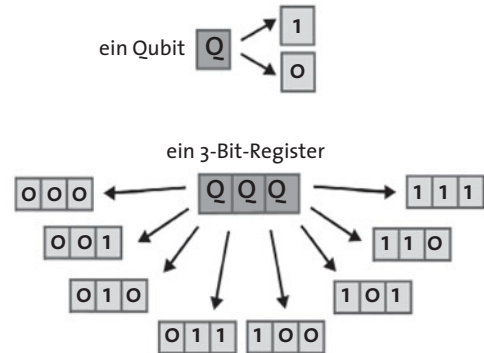
dung funktioniert durch Speicherung von Binärdaten. Jede Folge von Binärzahlen wird dann durch eine Abfolge von logischen Schaltern geschleust, die in Siliziumchips eingebaut sind.

Quantenbits Quantencomputer sind grundlegend anders. Auch bei ihnen gibt es diese Ein- und Aus-Zustände – die sogenannten Quantenbits oder Qubits –, aber mit einer Abweichung. Wie die Siliziumvarianten können sie einen von zwei Zuständen annehmen, aber anders als diese können sie auch in einer Überlagerung der Zustände vorliegen.

Ein einzelnes Qubit kann eine Überlagerung von zwei Zuständen, 0 und 1, darstellen. Ein Paar kann vier Zustände überlagern und drei Qubits decken acht Zustände ab. Jedes Mal, wenn man ein weiteres Qubit hinzufügt, verdoppelt sich die Zahl der Überlagerungszustände. Im Gegensatz dazu könnte ein konventionelles Speicherelement nur einen einzigen dieser Zustände zu einer bestimmten Zeit annehmen. Diese schnelle Verdopplung von Verknüpfungen zwischen Qubits verleiht den Quantencomputern ihre Leistungsfähigkeit.

Ein weiterer Vorteil der Quantenwelt, der für die Computertechnik genutzt werden kann, ist die Verschränkung. Das Verhalten von Qubits, die weit voneinander entfernt sind, könnte durch quantenmechanische Regeln verbunden werden. Bringt man einen davon in einen bestimmten Zustand, würde sich dadurch auch gleichzeitig ein anderer ändern, was sowohl Geschwindigkeit als auch Vielseitigkeit in die Mechanismen für die Lösung mathematischer Probleme bringen würde.

Aus diesen Gründen haben Quantencomputer das Potenzial bei manchen Arten von Rechnungen viel schneller als konventionelle zu sein. Vor allem Quantennetze sind sehr effizient und geeignet, Probleme zu lösen, für die



Drei Qubits können acht Zustände gleichzeitig darstellen.

1995

Shor schlägt seinen Faktorisierungs-Algorithmus vor

2001

Wissenschaftler implementieren Shors Algorithmus auf einem Quantencomputer

2007

Ein kanadisches Unternehmen baut einen 16-Bit-Computer mit Ionenfalle

Qubit-Geräte

- **Ionenfallen** verwenden Licht und Magnetfelder, um Ionen oder Atome einzuschließen.
- **Optische Fallen** verwenden Lichtwellen, um Teilchen zu beeinflussen.
- **Quantenpunkte** bestehen aus Halbleitermaterialien und steuern Elektronen.
- **Supraleitende Schaltkreise** lassen Elektronen bei sehr tiefen Temperaturen fast ohne Widerstand fließen.

ein schnelles Abgleichen von Daten oder komplexe Netzwerke für verknüpfte Kommunikationen notwendig sind.

1994 bekam das Gebiet neuen Schwung, als der Mathematiker Peter Shor einen effizienten Algorithmus entwickelte, um ganze Zahlen mit einem Quantencomputer zu faktorisieren, das heißt, die Primzahlen zu bestimmen, deren Produkt diese Zahl ergibt. Inzwischen wurde Shors Algorithmus von mehreren Teams unter Verwendung einer Handvoll von Qubits implementiert.

Obwohl das ein technischer Durchbruch ist, sind die Ergebnisse zugegebenermaßen weit davon entfernt überwältigend zu sein: Es wurde gezeigt, dass 15 das Produkt von 3 und 5 und dass 21 das von 3 und 7 ist. Aber wir sind eben noch in einem sehr frühen Stadium. Sobald es größere Quantencomputer gibt, wird Shors Algorithmus seine Leistungsfähigkeit zeigen können. Er könnte dazu verwendet werden, alle im Augenblick verwendeten Geheimcodes im Internet zu brechen, wodurch es notwendig würde, sich andere Möglichkeiten auszudenken, Informationen online zu sichern.

Aufrechterhaltung der Kohärenz Wie baut man einen Quantencomputer? Zuerst einmal braucht man ein paar Qubits. Sie kann man aus mehr oder weniger jedem Quantensystem zusammenbauen, das zwei verschiedene Zustände annehmen kann. Das einfachste sind Photonen zum Beispiel mit zwei verschiedenen Polarisationsrichtungen, vertikal und horizontal. Auch Atome oder Ionen mit verschiedenen Elektronenkonfigurationen wurden ausprobiert, genauso Supraleiter, in denen der Strom mit oder gegen den Uhrzeigersinn floss.

Genau wie Schrödingers Katze potenziell sowohl lebendig als auch tot ist, wenn sie sich unbeobachtet in ihrer Kiste befindet, so sind auch Qubits Überlagerungen ihrer möglichen Zustände, bis diese durch eine Messung festgelegt werden. Genau wie bei der berühmten Katze können die Wellenfunktionen von Qubits aufgrund der winzigen Wechselwirkungen mit Objekten ihrer Umgebung teilweise kollabieren. Die Minimierung dieser Dekohärenz ist eine der größten Herausforderung für das Rechnen mit Quanten. Es ist wichtig, die Qubits innerhalb des Geräts zu isolieren, sodass ihre Wellenfunktionen nicht gestört werden. Gleichzeitig muss das Qubit verändert werden können.

Einzelne Qubits, wie Atome oder Ionen, können in winzige Zellen eingesperrt werden. Eine Verkleidung aus Kupfer und Glas kann sie vor elektromagnetischen Störfeldern schützen und sie gleichzeitig mit Elektroden verbinden. Die Atome müssen im Vakuum sein, damit sie nicht mit anderen Atomen wechselwirken. Laser und andere optische Geräte können verwendet werden, um die Energien und Quantenzustände der Qubits zu verändern, etwa die Energieniveaus ihrer Elektronen oder deren Spin.

Bisher wurden nur Prototyp-Quantenregister von etwa zehn verbundenen Qubits gebaut. Es gibt noch viele technische Probleme zu lösen. Erstens ist es schon schwierig genug, auch nur ein Qubit zu erzeugen und zu isolieren. Es über einen längeren Zeitraum stabil zu halten, ohne dass es seine Quanteninformationen verliert, ist ein weiteres Problem. Dann muss man noch sicherstellen, dass es genaue und reproduzierbare Ergebnisse liefert – wenn man mehrmals 3 mal 5 rechnet, möchte man immer die gleiche richtige Antwort. Verbindet man mehrere Qubits, steigt die Komplexität noch weiter. Und wenn die Qubit-Reihen weiter wachsen, erhöht sich die Schwierigkeit, die ganze Anordnung zu steuern, denn unbeabsichtigte Wechselwirkungen werden wahrscheinlicher, und die Genauigkeit leidet.

Computer der Zukunft Da die Halbleitertechnologie der konventionellen Computer langsam ihre Grenzen erreicht, können wir uns auf die Quantentechniken freuen, die ein ganz neues Leistungsniveau erreichen werden. Ein Quantencomputer sollte so gut wie alles simulieren können und könnte sogar der Schlüssel für eine Maschine mit künstlicher Intelligenz sein.

Weil sie so viele Berechnungen gleichzeitig durchführen, betreiben Quantencomputer Mathematik eher in vielen parallelen Universen statt nur in parallelen Geräten. Um diese Leistung auch wirklich nutzen zu können, werden wir neue Arten von Algorithmen, wie die Funktion von Shor, benötigen. Aber die Quelle der Stärke eines Quantencomputers ist auch seine Schwäche. Weil sie so empfindlich auf ihre Umgebung reagieren, sind sie auch sehr störanfällig.

Wenn wir wirklich Quantencomputer bauen, werden Spione aller Arten sie wollen. Alle unsere Verschlüsselungstechniken werden versagen und sie werden unsere E-Mails lesen, bis wir eine Quantenverschlüsselung haben und sie damit wieder davon abbringen.

Jennifer und Peter Shor

45 Quantenkryptografie

Weil Computer so leistungsfähig geworden sind, dass sie beinahe jeden Code knacken können, werden wir vielleicht bald keine privaten verschlüsselten Nachrichten mehr senden können. Eine wasserdichte Methode ist hingegen, quantenmechanische Unbestimmtheit und Verschränkung für die Nachrichtenverschlüsselung zu verwenden. Jeder Lauscher würde den Quantenzustand verändern und es damit offensichtlich machen, dass jemand versucht hat einzudringen, ja er würde sogar die Nachricht selbst damit zerstören.

Immer wenn wir unseren Kontostand prüfen oder eine E-Mail über das Internet schicken, übermittelt der Computer Nachrichten in einem verschlüsselten Format, sodass sie nur der Empfänger lesen kann. Die Buchstaben und Zahlen werden in eine kodierte Nachricht verwandelt, die dann auf der anderen Seite mithilfe eines Schlüssels, der sie übersetzen kann, wieder dekodiert wird.

Schon lange werden Codes verwendet, um andere Menschen davon abzuhalten, Nachrichten mitzulesen. Der römische Feldherr Julius Cäsar verwendete eine einfache Chiffrierung, um seine Botschaften zu übermitteln: Er ersetzte einfach einen Buchstaben gegen einen anderen. Wenn man jeden Buchstaben durch den ersetzt, der zwei Stellen danach kommt, wird aus dem Wort „HALLO“ das rätselhafte „JCNNQ“.

Im Zweiten Weltkrieg bauten die Deutschen Chiffriermaschinen, um den Kodierungsvorgang für ihre geheime Kommunikation zu automatisieren. Das komplizierte Gerät sah ungefähr so aus wie eine Schreibmaschine und hieß Enigma. Das Raffinierte an der Verwendung dieser Maschine für die Kodierung von Sätzen war, dass die Umsetzung der Buchstaben der Originalnachricht in die verschlüsselte Version davon abhing, wie die jeweilige Maschine gebaut war. Es gab keine einfache Regel, die jemand, der die Nachricht abgefangen hatte, verfolgen konnte – man benötigte ein passendes Gerät, um den Code zu knacken.

Zeitleiste

1935

EPR-Paradoxon wird formuliert

1938

Turing beginnt mit seinen Arbeiten zur Entschlüsselung in Bletchley Park

1982

Aspect beweist, dass es die quantenmechanische Verschränkung gibt

Britischen Mathematikern wie Alan Turing, die in der geheimen Dechiffrierungseinrichtung der Regierung in Bletchley Park arbeiteten, gelang es bekanntermaßen, den Enigma-Code immer wieder zu knacken, indem sie die Wahrscheinlichkeiten für bestimmte Buchstabenkombinationen berechneten. Bei unserem simplen Beispiel von oben ließe sich aus der „JCNNQ“-Nachricht auf ein Wort mit Doppelbuchstaben schließen. Hat man genügend Wörter, kann man mit solchen logischen Schlussfolgerungen den Code enträtseln. Dass die deutschen Nachrichten in Bletchley entziffert werden konnten, war für die Alliierten kriegsentscheidend.

„Ich wusste, dass der Tag nicht weit sein konnte, an dem ich vollständige Nachrichten ohne Kabel oder Drähte über den Atlantik schicken kann.“

Guglielmo Marconi

Geheimschlüssel Mit der Ausbreitung der Kommunikationstechnologien wurden immer kompliziertere Verschlüsselungen benötigt. Selbst maschinell erzeugte sind nicht vollkommen sicher, denn dafür bräuchte man idealerweise eine einmalige zufällige Zuordnung eines Buchstabens zu einem kodierte Buchstaben. Wenn der Leser den gleichen Schlüssel für den Code hat, dann kann er damit die Nachricht lesen.

Schlüssel werden oft in einer von zwei möglichen Verfahren verwendet, bekannt als Kryptografie mit öffentlichem und geheimem Schlüssel. Im ersten Fall nimmt der Sender zwei verbundene Schlüssel. Einen davon behält er selbst, den anderen veröffentlicht er. Es ist als stecke man einen Brief in einen Metallbriefkasten mit zwei Öffnungen: Jeder kann dem Empfänger mit dem öffentlichen Teilcode eine Nachricht schicken, aber nur er hat den zweiten Code, um sie vollständig zu dekodieren. Die zweite Methode verwendet einen Schlüssel, der zwischen zwei Leuten geteilt werden muss, die sich austauschen möchten. In diesem Fall ist der Code nur sicher, solange er geheim gehalten wird.

Keine der Methoden ist vollkommen fehlerfrei. Aber durch einige Quantentricks können sie verbessert werden. Öffentliche Schlüssel müssen extrem lang sein, damit sie allen Versuchen, sie zu knacken, Widerstand leisten können. Dies jedoch verlangsamt den Ver- und Entschlüsselungsvorgang. Je schneller die Computer werden, desto länger müssen die Schlüssel sein. Wenn es erst ein-

1998

Verschränkte Photonen werden
10 km durch Genf übertragen

2007

Verschränkte Photonen werden
144 km zwischen den kanarischen
Inseln übertragen

mal Quantencomputer gibt, werden die meisten öffentlichen Schlüssel schnell geknackt sein.

Das Problem mit dem geheimen Schlüsseln ist, dass man sich mit der Person, mit der man kommunizieren möchte, treffen muss, um die Schlüssel auszutauschen, denn wenn man eine Nachricht schicken würde, die Informationen über den Schlüssel enthält, könnte diese abgefangen und ausgespäht werden. Die Quantenphysik aber liefert eine Lösung.

Quantenschlüssel Man könnte den Schlüssel mit Photonen schicken. Eine Nachricht im Binärformat – eine Reihe von Nullen und Einsen – könnte mithilfe von horizontal oder vertikal polarisierten Photonen übermittelt werden. Und die quantenmechanische Unbestimmtheit könnte eingebunden werden, um diese Information zu verschlüsseln.

Stellen Sie sich zwei Menschen vor, die eine Nachricht austauschen möchten. Anne prägt ihre Binärnachricht als erstes in eine Reihe von Photonen, indem sie ihnen bestimmte Polarisierungen gibt. Um die Nachricht dann vertraulich zu schicken, verschlüsselt sie sie. Das ist möglich, indem die Photonen durch einige zufällig ausgewählte orthogonale Filter geschickt werden. Jeder davon kann zwei orthogonale Polarisationsrichtungen bestimmen und je zwei davon stehen im 45-Grad-Winkel zueinander (+ oder \times). Jedes Photon hat vier mögliche Polarisationszustände – vertikal, horizontal, links- oder rechtsdrehend.

Annes Empfänger Bert empfängt nun diese verschlüsselten Photonen. Auch er nimmt für jedes einen Filter und zeichnet auf, was er misst. So weit hat Bert weiter nichts als eine scheinbar ungeordnete Menge von Beobachtungen. Aber die Quantenmagie kommt ins Spiel, sobald Anne und Bert ihre Nachrichten vergleichen. Bert verrät Anne, welchen Filter er für jedes Photon verwendet hat. Anne sagt ihm, ob das falsch oder richtig war. Diese Information genügt Bert, um die Binärnachricht zu übersetzen.

Da nur Bert das Ergebnis kennt, kann keine dritte Seite herausfinden, worüber die beiden sprechen. Besser noch, wenn der Lauscher versucht, die Photonen abzufangen, dann wird das den Gesetzen der Quantenmechanik zufolge die Eigenschaften der Teilchen verändern. Deshalb würden in Anne und Berts Vergleich Diskrepanzen auftauchen, und sie würden wissen, dass jemand mitgehört hat.

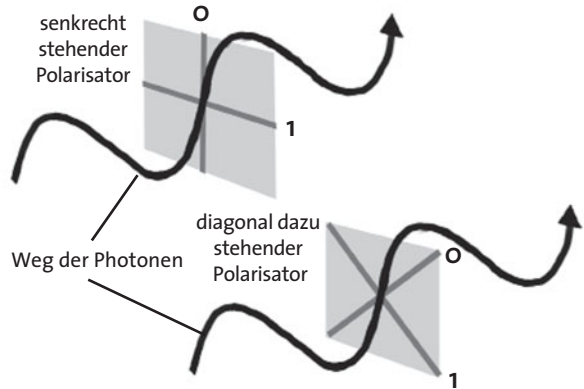
Verschränkte Nachrichten Die Quantenkryptografie ist vielversprechend, aber bisher funktioniert sie nur in der Theorie. Es wurden zwar schon Nachrichten übermittelt, aber nur über relativ kurze Entfernungen. Das Hauptproblem

besteht darin, dass jedes Photon auf seinem Weg mit vielen anderen Teilchen wechselwirkt und so seine Information verliert.

Ein Weg, diesem Informationsverlust entgegenzuwirken, ist die Verwendung der quantenmechanischen Verschränkung. Ein einzelnes Photon muss nicht den ganzen Spießrutenlauf machen und kilometerweit bis zu seinem Ziel fliegen – es reicht, wenn der Empfänger ein gekoppeltes Photon hat, dessen Eigenschaften mit dem Teilchen des Senders verschränkt sind. Wenn der Sender den

Zustand seines Teilchens verändert, stellt das verschränkte Partnerteilchen gleichzeitig den entsprechenden Zustand ein. Also könnte Bert die Nachricht entschlüsseln, indem er einen Schritt hinzufügt, der Quantenregeln mit einbezieht.

2007 gelang es dem Team des Österreichers Anton Zeilinger Nachrichten über eine Entfernung von 144 Kilometern zwischen zwei Inseln der Kanaren mit verschränkten Photonen zu übertragen – eine Meisterleistung, die unter dem Begriff Quanten-Teleportation bekannt wurde. Die Photonen hatten entgegengesetzte Polarisierungen, die an einem bestimmten Punkt durch Kopplung der Teilchen erzeugt worden waren. Zeilingers Gruppe schaffte es, Informationen durch ein optisches Kabel zu übertragen, indem sie ein Photon veränderten und beobachteten, was mit einem verschränkten Partner am anderen Ende passierte.



Gedrehte Filter können verwendet werden, um Informationen in den Photonen zu verschlüsseln.

46 Quantenpunkte

In winzigen Stückchen aus Silizium oder anderen Halbleitern, die nur einige Dutzend Atome breit sind, verhalten sich manche Elektronen, als seien sie an das „punktförmige“ Potenzial eines exotischen Atoms gebunden. Deshalb bezeichnet man diese Stückchen als Quantenpunkte. Genau wie ein Wasserstoffatom strahlt, wenn seine Elektronen auf ein tieferes Energieniveau springen, können Quantenpunkte leuchten. Sie lassen sich aber mit beliebiger Farbe herstellen, weshalb sie als Lichtquellen und Biosensoren interessant sind.

Der größte Teil unserer modernen Elektronik, vom Siliziumchips bis zur Germaniumdioden, besteht aus Halbleitern. Diese leiten normalerweise keinen Strom – ihre Elektronen sind innerhalb des Kristallverbunds eingesperrt. Aber mit ein wenig zusätzlicher Energie können Elektronen freigesetzt werden, sodass sie sich innerhalb des Kristalls bewegen und als elektrischer Strom fließen können.

Die Energie, die man den Elektronen zuführen muss, damit sie die Schwelle zur Beweglichkeit überschreiten, nennt man Bandlücke. Wenn Elektronen über diese Bandlücke springen können, werden sie frei beweglich und der Widerstand des Materials nimmt stark ab. Diese Flexibilität – also ihre Stellung zwischen Leiter und Isolator – macht Halbleiter so wertvoll für steuerbare elektronische Bauteile.

Die meisten konventionellen elektronischen Komponenten verwenden relativ große Stück aus Halbleitermaterial. Man kann einen Siliziumchip in die Hand nehmen oder einen Widerstand in ein Radio löten. Aber 1980 fanden Physiker heraus, dass winzige Stücke dieser Elemente sich sehr ungewöhnlich verhalten, denn dann beginnen Quanteneffekte eine Rolle zu spielen.

Winzige Bruchstücke aus Halbleiterelementen wie Silizium, die nur aus einigen Tausend Atomen bestehen, nennt man Quantenpunkte. Sie haben einen

Zeitleiste

1925

Pauli formuliert sein
Ausschließungsprinzip

1981

Alexei Jekimow veröffentlicht
über quantenmechanische
Größeneffekte

1983

Louis Brus veröffentlicht über
quantenmechanische Größen-
effekte bei Halbleitern

Durchmesser von Nanometern (Milliardstel Meter), sind also so groß wie sehr große Molekül.

Weil sie so klein sind, werden die Elektronen in einem Quantenpunkt aufgrund von Quantenverbindungen korreliert. Im Wesentlichen beginnt sich die gesamte Anordnung wie ein einziges Objekt zu verhalten, daher nennt man sie manchmal „künstliche Atome“.

Weil sie Fermionen sind und dem Pauli-Prinzip gehorchen, muss sich jedes Elektron in einem anderen Quantenzustand befinden. Daraus ergibt sich eine Hierarchie der Elektronen, sodass sich im Quantenpunkt eine Reihe von neuen Energieniveaus ausbilden, etwa so wie bei den vielen Orbitalen in einem einzelnen Atom.

Wenn ein Elektron auf ein höheres Energieniveau springt, lässt es ein „Loch“ im Kristall zurück, das relativ gesehen positiv geladen ist. Das Elektronen-Loch-Paar verhält sich ähnlich wie ein Wasserstoffatom (ein Proton und ein Elektron). Und wie ein Wasserstoffatom kann der Quantenpunkt auch Photonen emittieren und absorbieren, wenn Elektronen Energiesprünge machen. So beginnt der Quantenpunkt zu leuchten.

Der durchschnittliche „Sprossen“-Abstand in der Leiter der Quanten-Energiezustände hängt von der Größe des Punktes ab und entsprechend auch die

Die gesamte sichtbare Welt ist nur ein kleiner Ausschnitt im großen Busen der Natur.

Blaise Pascal, 1670

Biosensoren

Viele Biologen verwenden chemische Farbstoffe, von denen manche fluoreszieren, um bei Experimenten im Labor oder der Natur Veränderungen in Organismen zu verfolgen. Manche davon haben Nachteile, zum Beispiel verfallen oder verblassen einige davon ziemlich schnell. Hier bieten Quantenpunkte einige Vorteile. Weil sie chemisch stabil sind,

halten sie länger. Und weil das Licht, das sie aussenden, in einem engen Spektralbereich liegt, kann es mithilfe von Filtern einfacher gegen einen Hintergrund aufgezeichnet werden. Quantenpunkte können zehnmal so hell und hundertmal so stabil sein, wie übliche Farbstoffe.

1988

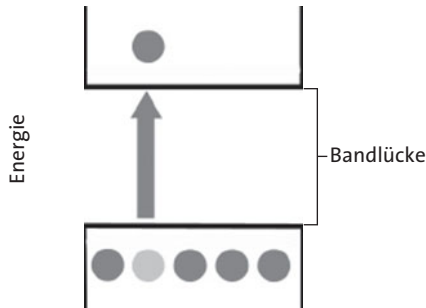
Mark Reed verwendet den Begriff „Quantenpunkt“

1990

Forscher bringen Silizium dazu, rot zu leuchten

Quantenmechanisches Confinement

Wenn die Ausmaße eines Halbleiterstücks in die Nähe der Größe der Wellenfunktion kommen, beginnen Quanteneffekte zu dominieren. Quantenpunkte verhalten sich dann wie ein einzelnes Atom, und ihre Energiebänder verschieben sich entsprechend. Dies ist unter dem Begriff quantenmechanisches Confinement bekannt.



Elektronen können auf höhere Energieniveaus springen und sich dann frei bewegen. Dadurch leuchten Quantenpunkte.

Frequenz des abgegeben Lichts. Größere Quantenpunkte haben enger beieinanderliegende Energielücken und leuchten rot. Kleinere Punkte leuchten blau. Dies eröffnet eine Reihe von Anwendungen für Quantenpunkte als Lichtquellen, Marker und Sensoren.

Quantenpunkte bei der Arbeit Seit Langem versuchen Physiker Silizium dazu zu bringen, Licht zu emittieren. Silizium wird zum Beispiel in Solarzellen verwendet, weil Licht es leitfähig macht und einen Stromfluss anregt. Doch der umgekehrte Vorgang schien bis 1990 unmöglich. Erst dann gelang es europäischen Forschern, Silizium dazu zu bringen, aufgrund seines Quantenverhaltens rot zu leuchten.

Seitdem haben die Forscher Silizium auch dazu gebracht, grün und blau zu strahlen. Vor allem blaues Licht ist wertvoll, denn dies war lange Zeit nur im Labor unter genau definierten Bedingungen möglich. Quantenpunkte könnten

deshalb als Basis für eine neue Art blauer Laser dienen.

Quantenpunkte aus Silizium und Germanium überspannen heute das Spektrum vom infraroten bis zum ultravioletten Bereich. Ihre Farbe kann einfach über ihre Größe genau und leicht eingestellt werden. So kann die Quantenpunkt-Technologie für die Herstellung von LEDs (light-emitting Diodes) genutzt werden, die sowohl als energiesparende Lichtquelle, als auch für Computer- und Fernsehbildschirme verwendet werden. Vielleicht können Quantenpunkte eines Tages auch als Qubits für Quantencomputer und -kryptografie genutzt werden. Weil sie sich wie einzelne Atome verhalten, können ihre Zustände verschränkt werden.

Quantenpunkte können als Biosensoren verwendet werden, die schädliche Chemikalien oder Stoffe in der Umwelt aufspüren. Sie sind langlebiger als fluoreszierende chemische Farbstoffe und emittieren Licht mit genauer definierten

Die Geschichte der Halbleiterphysik handelt nicht von großen heroischen Theorien, sondern von akribischer kluger Arbeit.

Ernest Braun, 1992

Frequenzen, sodass dieses leichter zu messen ist. Auch für optische Technologien, wie sehr schnelle Schalter und logische Gatter für optische Computer und die Signalübertragung durch Glasfasern sind sie nützlich.

Herstellung von Quantenpunkten Die meisten Halbleiterbauteile werden hergestellt, indem man in recht dicke Schichten des Materials, zum Beispiel Silizium, Strukturenätzt. Quantenpunkte dagegen werden Atom für Atom aufgebaut. Weil sie derart von unten nach oben aufgebaut werden, kann ihre Struktur und Größe genau gesteuert werden. Man kann Quantenpunkte in Lösung als Kristalle wachsen lassen. Sie können in großer Menge hergestellt werden, sodass sich als Endprodukt ein Puder oder Teilchen in einer Flüssigkeit ergeben. Quantenpunkte können nicht nur aus Silizium oder Germanium hergestellt werden, sondern auch aus Legierungen von Cadmium und Indium.

Manche Forscher haben Quantenpunkte bereits verbunden und daraus mikroskopische Strukturen und Schaltkreise hergestellt. Die Netze werden durch winzige Quantendrähte verbunden. Doch es ist dabei sehr große Sorgfalt notwendig, damit die Quanteneigenschaften des Punktes erhalten bleiben. Sie können auch mit langen dünnen organischen Molekülen verknüpft werden, die chemisch mit der Oberfläche des Punktes verbunden werden. Auf diese Weise können Kristalle, Folien oder andere Anordnungen von Quantenpunkten konstruiert werden.

47 Supraleitung

Bei sehr tiefen Temperaturen leiten manche Metalle, Legierungen und Keramiken Strom ohne jeden Widerstand. Ströme könnten Milliarden von Jahren fließen, ohne Energie zu verlieren. Der Grund dafür liegt in der Quantenmechanik. Wenn Elektronen sich zu Paaren verbinden, indem sie das positiv geladene Ionengitter leicht verzerren, können sie sich dauerhaft wie ein einziges Teilchen verhalten, das keine Wechselwirkung zeigt.

1911 untersuchte der dänische Physiker Heike Kamerlingh Onnes die Eigenschaften von tiefgeköhlten Metallen. Er hatte es geschafft, Helium so weit abzukühlen, dass es flüssig wurde – bei frostigen 4,2 Kelvin (also ein wenig über dem absoluten Nullpunkt, der tiefstmöglichen Temperatur von $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$). Indem er Metalle in das flüssige Helium tauchte, konnte er herausfinden, wie sich ihr elektrisches Verhalten ändert.

Zu seiner großen Überraschung verlor ein mit Quecksilber gefülltes Teströhrchen seinen elektrischen Widerstand vollständig, nachdem es in das flüssige Helium getaucht wurde. Quecksilber ist bei Raumtemperatur (etwa 300 K) flüssig, bei 4 K fest. In diesem extrem gekühlten Zustand ist Quecksilber ein vollkommener Leiter – sein Widerstand ist null, es wurde zum „Supraleiter“.

Bald fand man heraus, dass auch andere Metalle wie Blei, Niob und Rhodium supraleitend werden, andere, die man gewöhnlich für Drähte verwendet, wie Kupfer, Silber und Gold, dagegen nicht. Blei wird bei 7,2 K supraleitend. Andere Elemente haben jeweils ihre eigenen „kritische Temperatur“, ab der ihr Widerstand verschwindet. Die Ströme, die durch einen Supraleiter fließen, klingen niemals ab, durch einen tiefgeköhlten Bleiring etwa fließen sie ohne Energie zu verlieren. Bei Raumtemperatur dagegen kommen sie sehr schnell zum Erliegen. Da in Supraleitern der Widerstand verschwindet, könnten Ströme Milliarden von Jahren fließen, ohne schwächer zu werden, denn die Regeln der Quantenmechanik führen dazu, dass sie keine Energie verlieren können – es gibt für sie gar keine Möglichkeit dazu.

Zeitleiste

1911

Onnes entdeckt die Supraleitung

1933

Meissner-Ochsenfeld-Effekt wird entdeckt

1957

BCS-Theorie wird veröffentlicht

Warum werden Stoffe supraleitend? Es hat viele Jahrzehnte gedauert, bis man die Supraleitung vollständig erklären konnte. 1957 veröffentlichten die drei US-Physiker John Bardeen, Leon Cooper und John Schrieffer ihre BCS-Theorie der Supraleitung. Sie beschreibt, wie die Bewegungen der Elektronen innerhalb eines supraleitenden Materials koordiniert werden, sodass sie als ein einziges System behandelt werden können, das mit einer Wellengleichung beschrieben werden kann.

Ein Metall besteht aus einem Gitter positiv geladener Atomrümpfe, umgeben von einem „See“ aus Elektronen, die sich dort frei bewegen und dabei einen Strom erzeugen können. Doch dazu müssen sie Kräfte überwinden: Bei ihrer Bewegung wechselwirken die Elektronen mit den Atomrümpfen, regen Gitterschwingungen an – erzeugen also Wärme – und verlieren dabei Energie. Dieser Effekt verstärkt sich noch mit zunehmender Temperatur, weil die Elektronen auch mit den Gitterschwingungen wechselwirken können.

Die Wechselwirkungen erzeugen den elektrischen Widerstand, der den Stromfluss behindert und Strom in Wärme umwandelt. Dieses Modell erklärt auch, warum der Widerstand normaler Metalle mit abnehmender Temperatur sinkt, aber selbst nahe des absoluten Nullpunkts nicht verschwindet. Doch was passiert in Supraleitern?

Einen Hinweis darauf, was da vor sich geht, gibt die Tatsache, dass die kritische Temperatur mit der Masse des supraleitenden Materials zusammenhängt. Hinge sie nur von den Elektroneneigenschaften ab, wäre das nicht der Fall, da diese ja im Wesentlichen alle gleich sind. So haben schwerere Isotope etwa von Quecksilber eine leicht tiefere kritische Temperatur. Das weist darauf hin, dass das gesamte Metallgitter beteiligt sein muss – die schweren Atomrümpfe bewegen sich genauso wie die Elektronen.

Das Bild der BCS-Theorie ist, dass die Elektronen „händchenhaltend“ eine Art von Tanz beginnen. Die Schwingungen des Kristallgitters selbst geben den Takt vor. Die Elektronen bilden also lose zusammenhängende Paare – bekannt als Cooper-Paare – deren Bewegungen verbunden sind.

So hat das Quecksilber bei 4,2 K einen neuen Zustand angenommen, der aufgrund seiner besonderen elektrischen Eigenschaften als der Zustand der Supraleitung bezeichnet werden kann.

Heike Kamerlingh Onnes, 1913

1986

Die kritische Temperatur von 30 K wird erreicht

1987

Die Schwelle zum flüssigen Stickstoff wird überschritten

Schwebende Magnete

Wenn ein kleiner Magnet über einen Supraleiter gebracht wird, wird er aufgrund des Meissner-Ochsenfeld-Effekts abgestoßen. Der Supraleiter wirkt im Wesentlichen wie ein spiegelbildlicher Magnet, der auf seiner Oberfläche ein entgegengesetztes Feld erzeugt, das den Magneten wegdrückt. Das kann dazu führen, dass der Magnet über der Oberfläche des Supraleiters schwebt – magnetische Levitation. Das könnte die Grundlage für magnetische Schweb- oder Transportsysteme sein. Züge, die auf einer derartigen Magnetbasis gebaut werden, könnten angehoben werden und reibungslos über supraleitende Gleise fliegen.

Elektronen sind Fermionen, die normalerweise aufgrund des Pauli-Prinzips nicht im gleichen Quantenzustand vorliegen können. Aber Elektronenpaare, die sich im Supraleiter bilden, sind Bosonen und können sich deswegen im gleichen Zustand versammeln. Dadurch verringert sich die Gesamtenergie des Systems. Eine energetische „Bandlücke“ über ihnen wirkt als Barriere. Bei sehr tiefen Temperaturen haben die Elektronen nicht genügend Energie, um freizukommen und einzeln durch das Gitter zu fliegen. Deshalb gibt es auch keine Zusammenstöße, die den Widerstand erzeugen.

Die BCS-Theorie sagt voraus, dass die Supraleitung zusammenbricht, sobald die Elektronen genug Energie haben, um über diese Bandlücke zu springen. In Übereinstimmung dazu konnte gezeigt werden, dass die Bandlücke von der kritischen Temperatur abhängt.

Supraleiter haben nicht nur keinen Widerstand, sondern eine weitere verrückte Eigenschaft: Sie lassen kein Magnetfeld in sich eindringen. Das wurde 1933 von Walther Meissner und Robert Ochsenfeld entdeckt. Der Supraleiter drängt ein Magnetfeld aus sich heraus, indem sich an seiner Oberfläche Ströme bilden, die ein Magnetfeld erzeugen, das genauso groß, aber entgegengesetzt ist wie das äußere Magnetfeld.

Es geht auch wärmer In den 1980er-Jahren begann die Jagd nach neuen Arten von Supraleitern. Physiker versuchten, Supraleiter mit höheren kritischen Temperaturen zu finden, die einfacher praktisch eingesetzt werden können. Flüssiges Helium lässt sich nur sehr schwer herstellen und lagern. Flüssiger Stickstoff, der bis 77 K kühlt, ist viel leichter herzustellen und zu handhaben. Deshalb suchten die Wissenschaftler nach Materialien, die bei Temperaturen funktionierten, die mit flüssigem Stickstoff erreicht werden können. Ideal wären Supraleiter, die bei Raumtemperatur funktionieren, doch davon sind wir noch weit entfernt.

Man fand, dass Legierungen aus Niob und Titan oder Niob und Zinn bereits ab etwas höheren Temperaturen (bei 10 K bzw. 18 K) als ihre Einzelbestandteile supraleitend werden. Sie konnten dazu verwendet werden, um supralei-

tende Drähte für starke Magnete herzustellen, die zum Beispiel in Teilchenbeschleunigern verwendet werden können.

Eine weitere Vorhersage, nämlich die des britischen Physikers Brian Josephson führte zu einer Reihe neuer Geräte. Josephson berechnete, dass durch eine Schichtenabfolge aus zwei Supraleitern, die durch einen Isolator getrennt wurden, ein Strom fließen konnte. Die elektrische Energie konnte durch diese Schichtanordnung tunneln – dabei bildet sie einen sogenannten Josephson-Kontakt. Dieser ist so empfindlich, dass man damit Magnetfelder messen kann, die nur ein Milliardstel der Stärke des Erdmagnetfelds betragen.

1986 entdeckten Georg Bednorz und Alex Müller Keramiktypen, die schon bei 30 K supraleitend wurde, was einen großen Schritt vorwärts bedeutete. Sie wurden aus Mischungen aus Barium, Lanthan, Kupfer und Sauerstoff (Kuprate) hergestellt. Dies war überraschend, denn Keramiken sind eher dafür bekannt, hervorragende Isolatoren zu sein – sie werden zum Beispiel bei Strommasten und Transformatoren verwendet.

Ein Jahr später entdeckte man, dass ein keramisches Material, das Yttrium statt Lanthan enthielt, schon bei etwa 90 K supraleitend wurde. Damit wurde die Schwelle überschritten, ab der man flüssigen Stickstoff zum Kühlen verwenden kann, und die sogenannten Hochtemperatursupraleiter wurden wirtschaftlich nutzbar. Es begann eine intensive Suche nach weiteren Supraleitern mit höheren kritischen Temperaturen. Heute sind wir bei etwa 130 K angelangt, aber noch keiner ist bei Raumtemperatur verwendbar.

Ein ausgebildeter und scharfsinniger Forscher ist notwendig, um das Ziel im Blick zu behalten und die schleichenden Fortschritte in seine Richtung zu erkennen.

John C. Polanyi, 1986

48 Bose-Einstein-Kondensate

Wenn Gruppen aus Bosonen extrem kalt werden, können sie ihren niedrigsten Energiezustand annehmen. Dabei gibt es keine Grenze für die Anzahl der Bosonen, die den gleichen Zustand einnehmen, sodass außergewöhnliche quantenmechanische Verhaltensweisen auftreten, wie Supraflüssigkeit und Interferenzerscheinungen.

Es gibt zwei Arten von Teilchen – Bosonen und Fermionen – je nachdem, ob ihr quantenmechanischer Spin ganzzahlig oder halbzahlig ist. Zu den Bosonen gehören Photonen und andere Wechselwirkungsteilchen sowie Atome mit ganzzahligem Gesamtspin wie Helium (dessen Kern aus zwei Protonen und zwei Neutronen besteht). Elektronen, Protonen und Neutronen sind Fermionen.

Nach dem Pauli-Prinzip können zwei Fermionen nicht im gleichen Quantenzustand vorliegen. Ganz anders die Bosonen, sie können tun, was sie wollen. 1924 dachte Albert Einstein darüber nach, was wohl passieren würde, wenn sehr viele Bosonen im gleichen Grundzustand zusammenkämen, so, als ob sie in ein quantenmechanisches schwarzes Loch gequetscht würden. Wie würde sich diese Gemeinschaft von Klonen verhalten?

Satyendranath Bose, ein indischer Physiker, hatte Einstein eine Veröffentlichung über die Quantenstatistik von Photonen geschickt. Einstein hielt die Arbeit für so wichtig, dass er sie übersetzte und Boses Artikel auf Deutsch noch einmal veröffentlichte, dann machte er sich daran, die Ideen auf andere Teilchen auszuweiten. Das Ergebnis war eine statistische Beschreibung der Quanteneigenschaften von Bosonen, die heute seinen Namen tragen.

Bose und Einstein stellten sich ein Gas aus Bosonen vor. Genau wie Atome im Dampf einen Bereich von unterschiedlichen kinetischen Energien um einen Mittelwert annehmen, der von der Temperatur des Gases abhängt, würden auch

Zeitleiste

1924

Einstein schlägt
Kondensate vor

1925

Pauli formuliert sein
Ausschlussprinzip

1938

London erkennt die supraflüssigen
Eigenschaften von flüssigem Helium

die Bosonen einen Bereich von Quantenzuständen annehmen. Die Physiker leiteten einen mathematischen Ausdruck für die Verteilung der Zustände her, der für alle Bosonen gilt – er ist heute als Bose-Einstein-Statistik bekannt.

Einstein fragte sich dann, was passiert, wenn die Temperatur gesenkt wird. Alle Bosonen würden niedrigere Energien annehmen. Schließlich, so überlegte er sich, sollten fast alle im tiefstmöglichen Energiezustand kondensieren. Theoretisch könnte eine unbegrenzte Anzahl diese Minimum-Energie annehmen und eine neue Form von Materie bilden, das sogenannte Bose-Einstein-Kondensat. Wenn sie aus vielen Atomen bestehen, sollten derartige Kondensate ein quantenmechanisches Verhalten auf einem makroskopischen Maßstab zeigen.

Supraflüssigkeiten Die Beobachtung eines Bose-Einstein-Kondensats im Labor gelang erst in den 1990er-Jahren. Inzwischen ist man durch das Studium von Helium zu einigen Einsichten gekommen. Flüssiges Helium kondensiert bei einer Temperatur von etwa 4 Kelvin. Wie Pjotr Kapiza, John Allen und Don Misener 1938 herausgefunden haben, beginnt Helium, das noch weiter auf etwa 2 Kelvin abgekühlt wurde, sich sehr seltsam zu verhalten. Genau wie ultratief gekühltes Quecksilber supraleitend wird, so verliert flüssiges Helium seine innere Reibung beim Fließen.

Das flüssige Helium wird eine „Supraflüssigkeit“ mit einer Viskosität von null. Fritz London schlug die Bose-Einstein-Kondensation als möglichen Mechanismus für dieses seltsame Verhalten vor – einige der Heliumatome nehmen kollektiv den tiefstmöglichen Energiezustand an, bei dem es nicht mehr zu Kollisionen kommen kann. Weil aber flüssiges Helium eine Flüssigkeit und kein Gas ist, passt supraflüssiges Helium nicht gut genug zu Einsteins Gleichungen, um Londons Vorschlag zu überprüfen.

Es dauerte sehr lange, bis es den Physikern gelang, die Technologien zu entwickeln, die notwendig waren, um ein gasförmiges Kondensat im Labor herzustellen. So viele Teilchen in einen einzigen Quantenzustand zu bringen, ist nicht

» Ab einer bestimmten Temperatur kondensieren die Moleküle ohne anziehende Kräfte, das heißt, sie haben dann alle eine Geschwindigkeit von null. Die Theorie ist schön und gut, aber steckt auch etwas Wahrheit darin? «

Albert Einstein, 1924

1995

Die ersten gasförmigen Bose-Einstein-Kondensate werden hergestellt

1999

Hau bremst Lichtstrahl stark ab

Satyendranath Bose (1894–1974)

Satyendranath Bose wurde in Kalkutta im indischen Bundesstaat Westbengalen geboren. Er studierte Mathematik und schloss seinen Master mit der besten Note ab, die an der University of Calcutta je vergeben wurde. 1924 schrieb Bose einen einflussreichen Artikel, in dem er eine neue Methode vorstellte, mit der man das Planck'sche Strahlungsgesetz herleiten konnte. Es war der Startschuss für die Quantenstatistik und erregte Albert Einsteins Aufmerksamkeit, der den Artikel ins Deutsche übersetzte und neu publizierte. Bose arbeitete mehrere Jahre lang mit Louis de Broglie, Marie Curie und Einstein in Europa, bevor er 1926 an die University of Dacca in Bengalen zurückkehrte, wo er Laboratorien für die Röntgenkristallografie einrichtete. Nach der Teilung Indiens ging er nach Kalkutta. Er widmete einen großen Teil seiner Zeit darauf, sich für die bengalische Sprache einzusetzen. Bose erhielt nie den Nobelpreis. Wenn er darauf angesprochen wurde, sagte er: „Ich habe alle Anerkennung erhalten, die ich verdiene.“

einfach. Die beteiligten Teilchen mussten quantenmechanisch identisch sein, was für ganze Atome schwer zu erreichen ist. Der beste Weg dazu ist, ein dünnes Gas aus den Atomen herzustellen, sie auf extrem tiefe Temperaturen abzukühlen und sie dann so nahe zueinander zu bringen, dass sich ihre Wellenfunktionen überlappen.

Heute können Atome gekühlt werden, indem man sie in magnetischen Fallen fängt und mit einem Laser beschießt. So können sie auf Temperaturen von einem Milliardstel Kelvins (Nanokelvin) gebracht werden. 1995 gelang es Eric Cornell und Carl Wieman an der University of Colorado in Boulder, das erste Bose-Einstein-Kondensat aus etwa 2000 Rubidiumatomen bei nur 170 Nanokelvin herzustellen.

Einige Monate später folgte am MIT Wolfgang Ketterle, dem später zusammen mit Cornell und Wieman der Nobelpreis verliehen wurde, ihrem Beispiel mit

Natriumatomen. Indem er hundertmal so viele Atome verwendete, konnte Ketterle neue Verhaltensweisen beobachten, zum Beispiel die quantenmechanische Interferenz zwischen zwei Kondensaten.

Superkalte Eigenartigkeiten Heute widmen sich viele Forscher den Bose-Einstein-Kondensaten und Supraflüssigkeiten und bringen immer mehr ihrer seltsamen Eigenschaften zu Tage. Wenn Kondensate und Supraflüssigkeiten umgerührt oder in Rotation gebracht werden, treten Wirbel oder Strudel auf. Der Drehimpuls dieser Strömungen ist quantisiert, tritt also in Vielfachen einer Elementareinheit auf.

Wenn Kondensate zu groß werden, werden sie instabil und explodieren. Bose-Einstein-Kondensate sind deshalb sehr empfindlich. Die geringste Wechselwirkung mit ihrer Umgebung oder eine geringe Aufheizung, kann sie zerstören.

ren. Die Forscher suchen jetzt nach Möglichkeiten, die Atome zu stabilisieren, sodass größere Kondensate hergestellt werden können.

Ein Einflussfaktor ist die natürliche Anziehung oder Abstoßung der Atome. So ziehen sich Lithiumatome in der Regel an, deshalb implodieren Kondensate, die aus ihnen hergestellt werden, plötzlich, wenn sie eine bestimmte Größe überschreiten. Dabei blasen sie wie bei der Explosion einer Supernova das meiste Material weg. Isotope, die sich normalerweise abstoßen, etwa Rubidium-87, können verwendet werden, um stabilere Kondensate zu erzeugen.

Kondensate und Supraflüssigkeiten können dazu verwendet werden, um Licht bis zum Stillstand zu bringen. 1999 brachte die Physikerin Lene Hau an der Harvard University einen Laserstrahl dazu, extrem langsam zu werden, später sogar bis zum vollständigen Stillstand, indem sie ihn durch ein Glasgefäß schickte, das mit ultrakaltem Natriumdampf gefüllt war. Das Kondensat versucht im Wesentlichen die einfallenden Photonen in seinen eigenen Zustand zu bringen, dabei zieht es an ihnen, bis sie stillstehen.

Hau verringerte dann die Helligkeit des Lasers, bis keine Photonen im Kondensat mehr waren, trotzdem blieben die Spins der Photonen als Abdrücke in den Natriumatomen zurück. Diese Quanteninformationen können freigesetzt werden, indem man einen anderen Laserstrahl durch das Gefäß schießt. Auf diese Weise können Informationen durch Licht übermittelt, aber von den ultrakalten Atomen zwischengespeichert werden. Deshalb könnten Bose-Einstein-Kondensate eines Tages für die Quantenkommunikation verwendet werden.

49 Quantenbiologie

Quanteneffekte – wie die Welle-Teilchen-Dualität, Tunneln und Verschränkung – könnten auch in lebenden Organismen eine wichtige Rolle spielen. Durch sie werden chemische Reaktionen erst möglich, sie fokussieren Energie auf chemische Reaktionszentren und helfen Vögeln, den Erdmagnetismus für die Navigation zu verwenden.

Die Quantenmechanik herrscht über die kalte und von Wahrscheinlichkeiten bestimmte Welt des Atoms. Aber wie wichtig ist sie für die natürliche Welt? Auf der einen Seite ist die Quantenmechanik die Grundlage aller chemischen Prozesse und damit auch der einzelnen Moleküle in Pflanzen oder tierischen und menschlichen Körpern. Aber es ist nur schwer vorstellbar, dass quantenmechanische Wellenfunktionen bei dem Durcheinander der Vorgänge in einer Zelle kohärent bleiben sollen.

Der österreichische Physiker Erwin Schrödinger machte sich als einer der ersten in seinem 1944 erschienenen Buch *Was ist Leben* über die Quantenbiologie Gedanken. Und auch heute machen Physiker durchaus Entdeckungen, die

Die Chromosomenstrukturen ... sind zugleich Gesetzbuch und ausübende Gewalt, Plan des Architekten und Handwerker des Baumeisters.

Erwin Schrödinger, 1944

darauf hinweisen, dass unerwartete quantenmechanische Effekte eine wichtige Rolle bei biologischen Phänomenen spielen. Vielleicht spüren Vögel mithilfe der Quantenmechanik das Magnetfeld der Erde, um es für ihre Navigation zu nutzen. Auch an der Photosynthese – diesem lebensnotwendigen Vorgang, bei dem Organismen Wasser, Kohlendioxid und Sonnenlicht in Biomasse verwandeln – könnten interferierende Wellenfunktionen beteiligt sein.

Wenn Sonnenlicht auf ein Blatt fällt, stoßen Photonen auf Chlorophyllmoleküle. Diese absorbieren die Energie des Photons, müssen sie dann aber zu dem Teil der Zelle weiterleiten, in dem sich das Reaktionszentrum befindet, die chemische Fabrik, die eifrig Zucker herstellt. Woher weiß die Zelle, wie man das am effektivsten macht?

Zeitleiste

1944

Schrödinger veröffentlicht *Was ist Leben?*

2004

Das Modell der Radikalenpaare für den Vogelkompass wird vorgeschlagen

2007

Quantenwellen werden in Photosynthese treibenden Bakterien beobachtet

Die Energie des Photons breitet sich als Welle im Lichtsammelkomplex der Pflanzenzelle aus. Genau wie die Theorie der Quantenelektrodynamik Wechselwirkungen zwischen den Photonen und Materie in Form aller möglichen Pfade beschreibt, sollte der wahrscheinlichste Weg das Ergebnis sein. Deshalb kann die Energieweiterleitung als Überlagerung von Wellen beschrieben werden. Letztendlich zieht der optimale Weg die Energie des Photons zum Reaktionszentrum der Zelle.

Gruppen von Chemikern unter anderem an der University of California in Berkeley haben in den letzten Jahren experimentelle Hinweise dafür gefunden, die diese Vorstellung stützen. Indem sie Laserpulse auf Photosynthese betreibende Bakterien geschossen haben, konnten sie Energiewellen ausmachen, die durch diese Zellen fließen. Die Wellen verhielten sich koordiniert und zeigten sogar Interferenzeffekte, was bewies, dass sie kohärent waren. All dies findet bei normalen Umgebungstemperaturen statt.

Es ist immer noch eine offene Frage, warum diese koordinierten Quanteneffekte nicht aufgrund all der chemischen Vorgänge in den Zellen sehr schnell zusammenbrechen. Der Chemiker Seth Lloyd hat vorgeschlagen, dass ein zufälliges Rauschen innerhalb der Zellumgebung den Photosyntheseprozess unter-

Was ist Leben?

1944 veröffentlichte Erwin Schrödinger ein populärwissenschaftliches Buch mit dem Titel *Was ist Leben?* Es handelte sich um eine Zusammenfassung von Physik- und Chemievorlesungen, die er für Biologiestudenten in Dublin gehalten hatte. Schrödinger glaubte, dass es in einem Molekül „Erbinformationen“ geben muss, die in seinen chemischen Bindungen gespeichert sind. (Gene und die Rolle der DNA bei der Reproduktion waren damals noch nicht bekannt). Das Buch beginnt mit einer Erklä-

rung, wie Ordnung aus Unordnung entsteht. Weil Leben Ordnung erforderlich macht, muss der Generalcode eines lebenden Organismus relativ lang sein, also aus vielen Atomen bestehen, die geordnet werden können. Mutationen entstehen durch Quantensprünge. Das Buch schließt mit Gedanken über das Bewusstsein und den freien Willen. Schrödinger glaubte, dass Bewusstsein ein Zustand ist, der unabhängig vom Körper existiert, obwohl er davon abhängig ist.

2010

Quantenkohärenz wird bei Raumtemperatur in Bakterien gemessen

2011

Verschränkung im Vogelkompass wird vorgeschlagen

stützt. Das ganze Herumwackeln verhindert, dass die Energie der Welle an einer bestimmten Stelle steckenbleibt, es schüttelt sie vielmehr sanft frei.

Quantenfühlen Auch in anderen Reaktionen innerhalb von Zellen sind Quanteneffekte wichtig. Quantentunneln von Protonen von einem Molekül zu einem anderen ist etwas, das bei einigen Reaktionen vorkommt, die von Enzymen ausgelöst werden. Ohne eine helfende Hand aus der quantenmechanischen Wahrscheinlichkeit, sollte das Proton nicht in der Lage sein über die erforderliche Energiebarriere zu gelangen. Das Tunneln von Elektronen könnte auch hinter unserem Geruchssinn liegen, es würde erklären, wie die Rezeptoren in unserer Nase biochemische Schwingungen aufgreifen.

Zugvögel holen sich Hinweise aus dem Erdmagnetfeld. Photonen, die auf die Netzhaut des Vogels treffen, aktivieren einen Magnetsensor. Wie der Mechanismus genau funktioniert, ist noch nicht bekannt. Aber eine Möglichkeit ist, dass das einfallende Photon ein Radikalenpaar erzeugt – zwei Moleküle, von denen eines ein überschüssiges Elektron besitzt und einem ein Elektron fehlt –, das sehr reaktionsfreudig ist. Der Quantenspin dieser Moleküle könnte sich nach dem Magnetfeld ausrichten.

Die Moleküle reagieren mit anderen auf verschiedene Weise, je nachdem wie ihr Spin orientiert ist, und weisen so auf die Richtung des geomagnetischen Feldes hin. Denn eine bestimmte Chemikalie wird nur in einem der beiden Zustände erzeugt. Auf diese Weise vermittelt ihre Konzentration dem Vogel, in welche Richtung er in Bezug auf das Erdmagnetfeld fliegt.

Simon Benjamin, ein Physiker von der University of Oxford hat vorgeschlagen, dass zwei Elektronen der Moleküle verschränkt sein könnten. Wenn diese getrennt werden, bleiben ihre Quantenspinzustände verknüpft. Forscher gehen davon aus, dass diese Verschränkung für einige zehn Mikrosekunden lang im Inneren des Vogelkompasses aufrechterhalten wird – viel länger als man es für ein warmes, feuchtes chemisches Systemen erwarten würde.

Auch anderen Tieren und Pflanzen könnte die Quantenmechanik helfen, Richtungen zu erspüren. Manche Insekten und Pflanzen haben empfindliche Sensoren für Magnetfelder. So wird zum Beispiel der Wuchs der Acker-Schmalwand (*Arabidopsis thaliana*) durch blaues Licht behindert, aber Magnetfelder können diesen Effekt verändern, vielleicht spielt auch dabei der Radikalenpaar-Mechanismus eine Rolle.

Die Nutzung der Quantenmechanik bringt einem Organismus viele Vorteile. Es sieht so aus, als überwinde sie die Tendenz der Natur zur Unordnung und

„Nach allem, was wir von der Struktur der lebenden Materie gehört haben, müssen wir darauf gefasst sein, dass sie auf eine Weise wirkt, die sich nicht auf die gewöhnlichen physikalischen Gesetze zurückführen lässt.“

Erwin Schrödinger, 1944

funktioniere auch bei Umgebungstemperaturen – anders als in vielen Situationen, die Physiker unter ihren extrem kalten Laborbedingungen vorliegen haben.

Die Frage, ob und wie sich derartige Fähigkeiten entwickelt haben, konnte noch nicht beantwortet werden. Wissenschaftler wissen nicht, ob Quanteneffekte durch die natürliche Auslese bevorzugt werden oder ob sie ein zufälliges Nebenprodukt des eng gepackten Systems sind, aus denen Organismen gebildet werden. Eines Tages könnte es möglich werden, zum Beispiel die Moleküle verschiedener Arten von Algen zu vergleichen, die zu unterschiedlichen Zeiten entstanden sind, um nach evolutionären Veränderungen im Laufe der Zeit zu suchen.

Sollten Wissenschaftler mehr über Quanteneffekte in Organismen herausfinden, könnten sie damit sogar aufregende neue Technologien entwickeln. Künstliche Photosynthese könnte eine grundlegende neue Energiequelle sein, die vielleicht zu hocheffizienten neuen Solarzellen führen kann. Auch die Quantencomputertechnik könnte Vorteile davon haben, wenn man herausfinden würde, wie biologische Systeme die Kohärenz aufrechterhalten.

50 Quanten- bewusstsein

Vom freien Willen bis hin zu unserem Zeitgefühl, es gibt Parallelen zwischen der Art und Weise, wie unser Verstand arbeitet, und der Quantentheorie. Viele Physiker machen sich Gedanken darüber, ob es also eine tiefere Verbindung zwischen beiden gibt. Es gibt viele Spekulationen darüber, ob wir zu unserem Bewusstsein durch Quantenvorgänge in den mikroskopischen Strukturen in unserem Gehirn, durch kollabierende Wellenfunktionen oder Verschränkung kommen.

Mit seinem verknüpften Netz aus Neuronen und Synapsen ist das Gehirn eines der komplexesten Systeme, das wir kennen. Kein Computer reicht an seine Leistungsfähigkeit heran. Kann die Quantentheorie manche der einzigartigen Fähigkeiten des Gehirns erklären?

Es gibt zwei große Unterschiede zwischen dem Gehirn und einem Computer – das Speicherverfahren und die Verarbeitungsgeschwindigkeit. Ein Computer hat viel mehr Speicherplatz als das Gehirn – eine Festplatte kann fast beliebig groß sein. Aber das Gehirn nimmt Informationen trotzdem viel schneller auf. Es kann eine Person in einer Menschenmenge viel schneller erkennen als jedes Gerät.

Die Verarbeitungsleistung des Gehirns ist hunderttausende Mal größer als die der meisten Computerchips. Trotzdem werden Signale innerhalb des Gehirns relativ gesehen mit Schneckengeschwindigkeit übertragen – bis zu sechs Größenordnungen langsamer als digitale Signale. Als Ergebnis dieser unterschiedlichen Geschwindigkeiten hat das Gehirn eine hierarchische Struktur; es ist aus vielen Schichten aufgebaut, die miteinander kommunizieren. Computer bestehen im Wesentlichen nur aus einer Schicht, die Millionen von Berechnungen durchführen, um zum Beispiel menschliche Schach-Großmeister zu besiegen.

Zeitleiste

1936

Turing schreibt über
Berechenbarkeit

1989

Penrose veröffentlicht seine Quanten-
gravitationsidee des Bewusstseins

Bewusstsein Wie entsteht aber aus den Berechnungen in unserem Gehirn unser Bewusstsein? Es ist ziemlich schwer zu definieren, was Bewusstsein genau ist. Letztlich ist es die Art und Weise, wie wir Leben erfahren. Wir haben einen Sinn für die Gegenwart – wir leben im Jetzt. Und wir empfinden das Vergehen von Zeit – die Vergangenheit. Unser Gehirn speichert Erinnerungen, und wir verbinden diese mit Mustern, um ihnen einen Sinn zu geben. Wir können einfache Vorhersagen für die Zukunft machen, die uns helfen, Entscheidungen zu treffen.

Viele Physiker wie die Quantenpioniere Niels Bohr und Erwin Schrödinger vertraten die Ansicht, dass biologische Systeme, also auch unser Gehirn, sich auf eine Weise verhalten, die man mit klassischer Physik nicht beschreiben kann. Im Laufe der Entwicklung der Quantentheorie wurden einige Wege vorgeschlagen, wie Bewusstsein entstehen könnte, etwa durch den Kollaps von Wellenfunktionen oder Verschränkung. Aber wir sind noch weit davon entfernt zu wissen, wie das wirklich funktioniert.

Künstliche Intelligenz

Einer der ersten, der versuchte zu quantifizieren, wie unser Gehirn mit Informationen umgeht, war der britische Mathematiker Alan Turing. Er gilt heute als einer der Väter des Computers. 1936 veröffentlichte er einen berühmten Artikel, in dem er bewies, dass man eine Maschine bauen kann, die jede Berechnung durchführen kann, für die man eine Reihe von Regeln aufstellen kann, einen Algorithmus. Er stellte sich das Gehirn als eine Art Computer vor und überlegte, nach welchen Regeln es wohl arbeite. Turing schlug einen Test für künstliche Intelligenz vor. Dieser sogenannte Turing-Test geht folgendermaßen: Ein Computer kann nur dann als intelligent bezeichnet werden, wenn er jede Frage so beantworten

kann, dass man die Antwort von der eines Menschen nicht unterscheiden kann.

2011 kam ein Computer mit dem Namen Watson dem schon sehr nahe. Bei der US-amerikanischen TV-Serie *Jeopardy!* schlug die Maschine zwei menschliche Kandidaten. Bei der Serie werden den Mitspielern Antworten aus verschiedenen Kategorien präsentiert, die Teilnehmer müssen dann möglichst schnell eine passende Frage auf die vorgegebene Antwort formulieren. Watson bewies, dass das Konzept der Forscher, die an künstlicher Intelligenz arbeiten, funktioniert, doch sein logisches System arbeitet ganz anders als das menschliche Gehirn.

1999

Tegmark behauptet, dass die Dekohärenz Quantenzustände im Gehirn unmöglich macht

„Ich halte Bewusstsein für etwas sehr Grundlegendes. Ich glaube, dass Materie vom Bewusstsein abgeleitet ist. Wir können nicht hinter das Bewusstsein kommen. Alles, worüber wir reden, alles, was wir für existent halten, setzt Bewusstsein voraus.“

Max Planck, 1931

David Bohm fragte, was passiert, wenn wir Musik hören. Wenn der Ton ankommt greifen wir auf eine Erinnerung an die Schwingungsform zurück, die an uns vorbeizieht und vergleichen unsere Sammlung mit der augenblicklichen sensorischen Erfahrung der Geräusche, Akkorde und Gefühle der Musik, die wir gerade hören. Es ist diese Mischung des Musters aus der Vergangenheit mit dem Gewebe der Gegenwart, was uns Bewusstsein erleben lässt.

Bohm argumentierte, dass diese zusammenhängenden Abläufe eng mit der zugrunde liegenden Ordnung des Universums verbunden sind. Genau wie Photonen sowohl Wellen als auch Teilchen sind, so sind auch Geist und Materie Projektionen auf unsere Welt in einer tieferen Ordnung. Sie sind getrennte Aspekte des Lebens: Sie sind komplementär – wenn wir auf die Materie schauen, erfahren wir nichts über das Bewusstsein und umgekehrt.

Quantenzustände des Gehirns 1989 veröffentlichte Roger Penrose, ein Mathematiker und Kosmologe aus Oxford, mit seinem Buch *The Emperor's New Mind* (dt. *Computerdenken*) eine der umstrittensten Ideen darüber, wie Bewusstsein entsteht. Penrose griff Turings Ideen wieder auf und argumentierte, dass das Gehirn kein Computer ist. Vielmehr funktioniert es grundlegend anders, und kein Computer wird es mit Logik allein nachmachen können.

Penrose ging einige große Schritte weiter, indem er vorschlug, dass Bewusstsein aufgrund der Quantengravitation mit den Fluktuationen in der Raumzeit verknüpft sein könnte. Vielen Physikern gefiel das nicht – warum soll die Quantengravitation auf das weiche, feuchte, gallertartige Gehirn wirken? Und der Gemeinde der Leute, die an der künstlichen Intelligenz arbeiten, gefiel das nicht, weil sie hoffen, irgendwann einen leistungsfähigen Gehirnsimulator bauen zu können.

Penrose konnte nicht sagen, wie genau das Gehirn mit diesen Effekten der Quantengravitation umgeht. Er tat sich mit dem Narkosearzt Stuart Hameroff zusammen, um das Modell zu erweitern, was 1994 im Buch *Shadows of the Mind* (dt. *Schatten des Geistes*) von Penrose weiter ausgeführt wurde. Er vertritt

darin die Ansicht, dass der bewusste Geist aus vielen überlagerten Quantenzuständen aufgebaut ist, von dem jeder seine eigene Raumzeitgeometrie hat. Die Zustände zerfallen, wenn ein Ereignis eintritt, aber sie tun das nicht gleichzeitig. Die Tatsache, dass wir das spüren, macht unser Gefühl für Bewusstsein aus.

Die Quantengravitation wirkt auf winzigen Maßstäben, kleiner als ein Neuron. Hameroff schlug vor, dass dies in den langen röhrenförmigen Proteinstrukturen vor sich gehen könnte, die es innerhalb der Neuronen und anderer Zellen gibt, den sogenannten Mikrotubuli. Sie stellen das Gerüst dar und lenken auch die chemischen Botenstoffe des Nervensystems.

Bose-Einstein-Kondensate, kollabierende Wellenfunktionen und die Verbindung zwischen Beobachter und dem Beobachteten wurden als Auslöser für das Bewusstsein in Erwägung gezogen. Auch die Quantenfeldtheorie wurde als Möglichkeit herangezogen, die Zustände des Gehirns zu beschreiben. Erinnerungszustände können als Vielteilchensysteme beschrieben werden, etwa wie ein virtueller See aus Teilchen, die mit den Quantenfeldern und dem leeren Raum verknüpft sind. Quantentunneln könnte bei den chemischen Reaktionen nachhelfen, die bei der Signalübertragung in Neuronen auftreten.

Andere Physiker haben vorgeschlagen, dass die quantenmechanische Wahrscheinlichkeit unserem Bewusstsein zugrunde liegt und uns nach und nach von einem aufmerksamen Zustand zu einem anderen bringt. Doch viele Physiker bleiben skeptisch, denn sie bezweifeln, dass Quantenzustände in unserem Gehirn lange genug aufrechterhalten bleiben können. In einem 1999 veröffentlichten Artikel schreibt der Physiker Max Tegmark, dass Dekohärenzeffekte Quantenzustände in viel kürzeren Zeiten zerstören würden, als sie bei der Signalübertragung im Gehirn auftreten. Das Gehirn ist zu groß und zu heiß, um ein Quantengerät zu sein. Das Urteil darüber, ob die Quantentheorie unser Bewusstsein erklärt, ist also noch nicht gefallen.

Glossar

Antimaterie Komplementärer Zustand zu normaler Materie mit umgekehrten Quantenparametern.

Atom Kleinster Baustein der Materie, der unabhängig von etwas anderem existieren kann. Ein Atom besteht aus einem Kern aus Protonen und Neutronen, umgeben von Elektronen.

Atomkern Der kompakte Kern des Atoms, bestehend aus Protonen und Neutronen.

Baryon Elementarteilchen (etwa das Proton), das aus drei Quarks besteht.

Beobachter In der Quantenmechanik der Zeuge einer Messung.

Boson Teilchen mit ganzzahligem Quantenspin.

Elektromagnetismus Theorie, die Elektrizität und Magnetismus vereinigt.

Elektronenschale Region des Raumes um einen Atomkern, in dem Elektronen gefunden werden können.

Energie Die Fähigkeit, etwas zu verändern; sie bleibt insgesamt erhalten.

Feld Funktion, die jedem Punkt im Raum eine physikalische Größe zuordnet.

Fermion Teilchen mit halbzahligem Quantenspin; zwei Fermionen am selben Ort können nicht alle Quanteneigenschaften gleich haben.

Frequenz Die Rate, mit der Wellenberge an einem Punkt vorbeikommen.

Gravitation Eine Kraft, die Massen anzieht.

Hadron Elementarteilchen, das aus Quarks besteht (dazu gehören Baryonen und Mesonen).

Halbleiter Ein Material, dessen elektrische Leitfähigkeit durch äußere Einflüsse über viele Größenordnungen hinweg verändert werden kann.

Impuls Das Produkt von Masse und Geschwindigkeit.

Interferenz Die Verstärkung oder Schwächung von sich überlagernden Wellen.

Isotop Versionen eines chemischen Elements mit einer abweichenden Zahl von Neutronen.

Kernfusion Das Verschmelzen kleinerer Atomkerne.

Kernspaltung Die Spaltung eines großen Atomkerns.

Komplementarität Die Tatsache, dass ein Quantenobjekt sich entweder wie eine Welle oder wie ein Teilchen verhält, abhängig von der Art und Weise, wie es gemessen wurde.

Kosmischer Mikrowellenhintergrund Schwaches Mikrowellenleuchten am gesamten Himmel, dessen Ursprung im frühen Universum liegt.

Kosmologie Die Wissenschaft von der Entwicklung und dem Aufbau des Universums.

Kraft Ein Anziehen, Wegdrücken oder anderer Einfluss, der etwas beschleunigt.

Lokalität Prinzip, dass ein Objekt nur durch seine direkte Nachbarschaft beeinflusst werden kann.

Masse Eine Eigenschaft, die davon abhängt, wie viele Atome oder wie viel Energie ein Objekt enthält.

Matrix Ein mathematisches Konstrukt, das einer Tabelle mit Zahlen ähnelt.

Molekül Zwei oder mehr durch chemische Bindungen verbundene Atome.

Phase Der relative Unterschied zwischen zwei Wellen, gemessen als Bruchteil einer Wellenlänge.

Photon Ein Lichtteilchen.

Quant Ein Energiepaket.

Quark Der kleinste Bestandteil eines Hadrons, z.B. eines Protons oder Neutrons.

Qubit Quantenbit, Einheit der Quanteninformatik.

Radioaktivität Teilchen oder Strahlung, die von instabilen Kernen emittiert wird.

Raumzeit Die Verbindung der drei Raumdimensionen und der Zeit in der Relativitätstheorie.

Schwarzkörperstrahlung Charakteristische Strahlung einer vollkommen schwarzen Oberfläche.

Spektrum Die verschiedenen Wellenlängen eines Lichtstrahls.

Suprafluidität Bewegung einer Flüssigkeit ohne Viskosität.

Supraleitung Stromleitung ohne Widerstand.

Symmetrie Ähnlichkeit z.B. bei Spiegelung, Drehung oder Skalierung.

Unbestimmtheit In der Quantenmechanik die Idee, dass bestimmte Größen nicht gleichzeitig bekannt sein können.

Universum Der gesamte Raum und Zeit; die Beschreibung von Physikern könnte darüber hinausgehen, wenn sie über Paralleluniversen und die Stringtheorie sprechen.

Vakuum Vollkommen leerer Raum.

Verschränkung In Beziehung stehende Eigenschaften mehrerer Teilchen.

Viele-Welten-Hypothese Die Idee, dass Quantenereignisse dazu führen, dass sich Paralleluniversen abspalten.

Wellenfunktion In der Quantentheorie eine wellenartige Wahrscheinlichkeitsfunktion, die die Eigenschaften eines Teilchens beschreibt.

Wellenlänge Der Abstand zwischen zwei Wellenbergen oder -tälern.

Welle-Teilchen-Dualismus Die Idee, dass Quanteneinheiten wie Licht entweder als Teilchen oder als Welle auftreten können (vgl. Komplementarität).

Zufälligkeit Ein Ergebnis hängt nur vom Zufall ab, etwa beim Werfen eines Würfels.

Index

A

Absorptionslinien 40
 achtfacher Pfad 108
 allgemeine Relativitätstheorie 136
 Alphastrahlung 100
 Alphateilchen 32
 Ambler, Eric 105
 Antimaterie 84, 89
 Antiproton 85
 Aspect-Experimente 164
 Aspect, Alain 165
 asymptotische Freiheit 117
 Äther 20
 Atombombe 83
 Atomgewicht 34
 Atomkern 33
 Atommodell
 nach Bohr 36, 52
 nach Rutherford 32
 Rosinenkuchenmodell 32
 Austauschteilchen 89

B

Bandlücke 184
 Bardeen, John 189
 Baryon 108, 121
 BCS-Theorie 189
 Bell, John 159, 161, 164
 Bell'sche Ungleichung 160, 164
 Beobachter 69, 152
 Beobachtungshorizont 145
 Betastrahlung 100
 Betazerfall 100, 105
 Bethe, Hans 93, 97
 Beugung 18
 Beugungsgitter 41
 Beugungsringe 42
 Bewusstsein 70, 201
 Biosensor 185
 Bohm, David 158, 173, 202
 Bohr, Niels 52, 68, 81, 152
 Born, Max 53
 Bose-Einstein-Kondensat 192
 Bose, Satyendranath 50, 194
 Boson 50, 190, 192
 Bottom-Quark 110, 119
 Broglie, Louis de 29, 157, 173
 Brown'sche Bewegung 27
 Buckminster-Fullerene 174
 Bunsen, Robert 40

C

CERN 86, 107
 Chadwick, James 34

Chandrasekhar-Grenze 50
 Charm-Quark 110, 119
 chemische Bindung 37
 Chiralität 126
 chwarzes Loch 51
 COBE 11, 145
 Code 180
 Compton-Effekt 31
 Compton, Arthur 31
 Confinement 116, 186
 Cooper-Paar 189
 Cooper, Leon 189
 Cornell, Eric 194

D

Dekohärenz 172, 178, 203
 Determinismus 157
 DeWitt, Bryce 138, 153
 Dirac, Paul 85, 89, 96
 DNA 30
 Doppelhelixstruktur 30
 Doppelspalterexperiment 16
 Doppelspalterversuch 29
 Doppler-Effekt 43
 down (Spin) 46
 Drehimpuls 6
 dunkle Energie 147
 dunkle Materie 135, 146

E

Eichboson 89, 108, 121
 Eichinvarianz 125
 Eichsymmetrie 125
 Eigenenergie-Problem 95
 Einstein-Podolsky-Rosen-Paradoxon 68, 72
 Einstein, Albert 5, 21, 27, 68, 72, 88, 136, 147, 156, 192
 Elektrizität 14
 elektromagnetische Welle 14
 Elektromagnetismus 12
 Elektron 92, 133
 Elektron-Positron-Paar 134
 Elektronenhülle 38
 Elektronenorbital 57
 Elektronenspin 46
 elektroschwache Theorie 91, 107
 Elementarkraft 35
 Emissionslinien 42
 Energie 4
 kinetische 5
 potentielle 5
 Energieerhaltung 4
 Energiequanten 26
 Enigma 180
 Entartungsdruck 50
 Entropie 6
 EPR-Paradoxon 68, 72, 156, 160
 Erhaltungssätze 126
 evaneszente Welle 78
 Everett, Hugh 70, 153

F

Faraday, Michael 14
 Farbladung 111, 117, 119, 121
 Farbtemperatur 9
 Fermat'sches Prinzip 99
 Fermi, Enrico 80, 102
 Fermion 49, 192
 Fernwirkung 75, 164
 Feynman-Diagramm 98
 Feynman, Richard 91, 97, 114
 Flavour 102, 121
 Fraunhofer-Linien 40
 Fraunhofer, Joseph von 41
 Frequenz 13
 Fresnel, Augustin-Jean 18
 Frisch, Otto 81
 Führungswellen 158
 Funkenstreckensender 24

G

Galilei, Galileo 5
 Gammastrahlung 14, 100
 Gauß, Carl Friedrich 14
 Gauß'sches Gesetz 14
 Geheimschlüssel 181
 Gehirn 200
 Gell-Mann, Murray 109, 116
 Generationen 121
 Glashow, Sheldon 106, 115
 Gluon 108, 117, 121
 Gluonen-Jet 119
 Gravitation 136
 Graviton 123, 138
 große vereinheitlichte Theorie 123
 GUT 123
 Guth, Alan 146

H

Hadron 108, 111, 121
 Hahn, Otto 80, 101
 Halbleiter 184
 Halbwertszeit 77
 Hale, George Ellery 45
 Händigkeit 107, 126
 Hauptquantenzahl 37
 Hawking, Stephen 138
 Heisenberg, Werner 52, 58, 60, 63, 82, 105, 148
 Heisenberg'sche Unschärfere-lation 60, 90, 134, 137, 156
 Helium 188
 Hertz, Heinrich 24
 Higgs-Boson 107, 133
 Higgs-Feld 122, 127
 Higgs, Peter 127
 Hiroshima 83
 Hoyle, Fred 144
 Hund, Friedrich 77

Huygens, Christiaan 17
 Huygens'sche Prinzip 17

I

Impuls 6
 Inflation 146
 Infrarot 14
 Interferenz 17, 168
 Ionenfalle 178
 Isospin 110
 Isotop 34

J

Jeans, James 9
 Jordan, Pascual 90
 Josephson-Kontakt 191

K

Kern 33
 Kernfusion 4, 76
 Kernspaltung 80
 Ketterere, Wolfgang 194
 Kirchhoff, Gustav 40
 Kollaps der Wellenfunktion 152, 172
 Kopenhagener Deutung 68, 72, 152
 kosmische Strahlung 85
 kritische Temperatur 188
 Kryptografie 181
 künstliche Atome 185
 künstliche Intelligenz 179, 201

L

Lamb-Verschiebung 92
 Längenkontraktion 23
 Large Hadron Collider 86, 107, 135
 Laue, Max von 31
 Leben 197
 LED 186
 Leibniz, Gottfried 5
 Lepton 101, 108, 121
 LHC 86, 135
 Licht 12
 Lichtgeschwindigkeit 15, 20
 lokale Realität 74
 Lokalität 74

M

M-Theorie 150
 MACHO 146
 Magnetismus 14
 Manhattan-Projekt 83, 102
 Masse 132
 Materiewellen 30
 Matrix 54
 Matrizenmechanik 52, 58, 60
 Max-Planck-Institut 10
 Maxwell-Gleichungen 14, 27

- Maxwell, James Clerk 7, 15, 88
 Maxwell'scher Dämon 7
 Meissner-Ochsenfeld-Effekt 190
 Meitner, Lise 81, 101
 Meson 121
 Messung 172
 Michelson-Morley-Experiment 20
 Michelson, Albert Abraham 23
 Mikrowellen-Hintergrund 11, 144
 Millikan, Robert 25
 Misner, Charles 137
 Morley, Edward 20
 Multiversen 153
 Multiversum-Theorie 71
- N**
 Nachricht 180
 Neutrino 102, 106
 Neutron 34, 80
 Neutronenstern 50
 Neutronenzerfall 104
 Newton, Isaac 12
 Nucleus 33
 Nuklearchemie 33
- O**
 Öltröpfchenversuch 26
 Onnes, Heike Kamerlingh 188
 Oppenheimer, Robert 82
 optische Falle 178
- P**
 Parität 105, 126
 Paritätsverletzung 106
 Parton 114
 Pauli-Prinzip 48, 192
 Pauli, Wolfgang 49, 101
 Pendel 5
 Penrose, Roger 202
 Penzias, Arno 144
 Perpetuum mobile 7
 Photino 134
 photoelektrischer Effekt 24
 Photon 88
 Photosynthese 196
 Planck
 Weltraumteleskop 11
 Planck-Skala 139
 Planck, Max 10
 Planck'sche Konstante 25
 Planck'sches Strahlungsge-
 setz 8, 39
 Podolsky, Boris 72
 Positron 85, 89
 Proton 34
- Q**
 QCD 126
 QED 96
 Quanten 10
 Quanten-Teleportation 183
 Quantenbewusstsein 200
 Quantenbiologie 196
 Quantenbits 74
 Quantenchromodynamik 91, 116, 126
 Quantencomputer 176
 Quantenelektrodynamik 91, 96
 Quantenfeldtheorie 88, 96
 Quantengravitation 136, 202
 Quantenkommunikation 195
 Quantenkryptografie 180
 Quantenpunkt 178, 184
 Quantenradierer 168
 Quantenschlüssel 182
 Quantensprünge 36
 Quark 99, 107, 108, 116, 121
 Qubit 74, 176, 186
 Quecksilber 188
- R**
 Radioaktivität 76, 100, 104
 Radiokarbondatierung 34
 Raumzeit 22, 136, 203
 Rayleigh 9
 Relativitätstheorie 22
 Renormierung 91, 95, 97
 Röntgen, Wilhelm Conrad 31
 Röntgenkristallografie 30
 Röntgenstrahlen 14
 Rosen, Nathan 72
 Rosinenkuchenmodell 32
 Rotverschiebung 43
 Rutherford, Ernest 33
- S**
 Salam, Abdus 107
 Schleifenquantengravitation 139
 Schlüssel 180
 geheim 181
 öffentlich 181
 Schrieffer, John 189
 Schrödinger-Gleichung 56
 Schrödinger, Erwin 57, 60, 70, 196
 Schrödingers Katze 68, 152, 173
 schwache Kernkraft 104, 126
 schwache Wechselwirkung 104
 Schwarzkörperstrahlung 8
 Schwinger, Julian 91, 97, 106
 Selektion 134
- Serie**
 Balmer 45
 Lyman 44
 Paschen 45
 Singularität 137
 Sonnenflecken 45
 Sonnenneutrino 103
 Sonnenspektrum 40
 Spektrallinie 37
 Spektroskopie 41
 Spektrum 13
 spezielle Relativitätstheorie 23, 27
 Spin 46
 Spinquantenzahl 46
 spukhafte Fernwirkung 161
 Squark 134
 Standardmodell 120, 132
 Stanford Linear Accelerator Center 112
 Stark-Effekt 47
 starke Kernkraft 35
 starke Wechselwirkung 35
 Stern-Gerlach-Versuch 45
 Strange-Quark 110
 Strassmann, Fritz 80
 Stringtheorie 148
 Supernovaexplosion 50
 Supersymmetrie 132, 149
 Supraflüssigkeit 50, 193
 supraleitender Schaltkreis 178
 Supraleiter 174
 Supraleitung 50, 188
 SUSY 134
 Symmetrie 124
 Symmetriebrechung 124
- T**
 Teilchenbeschleuniger 86, 122
 Theory of Everything 150
 Thomson, Joseph John 32
 tiefinelastische Streuung 112
 Tomonaga, Sin-Itiro 97
 Top-Quark 110, 119
 Tunneleffekt 76
 Turing, Alan 181, 201
- U**
 Überlagerung 177
 Ultraviolett-Katastrophe 9
 ultraviolettes Licht 14
 Unschärfeprinzip 55
up (Spin) 46
 Urknall 87, 144
- V**
 verborgene Variablen 156, 160, 164
 Verschränkung 74, 164, 167, 177
- Viele-Welten-Hypothese 71, 152, 172
vis viva 5
 Viskosität 193
- W**
 W-Boson 106
 Wasserstoff 93
 Watson 201
 Wechselwirkung 173
 stark 35
 Wechselwirkungsteilchen 89, 122
 Weinberg, Steven 107
 weißer Zwerg 50
 Welle-Teilchen-Dualität 28, 52, 154, 168
 Wellenfunktion 58, 152
 Wellenlänge 13
 Weltformel 150
 Wheeler, John 137
 Wieman, Carl 194
 Wien, Wilhelm 9
 Wilczek, Franz 118
 Wilson, Robert 144
 WIMP 146
 Witten, Edward 149
 Wollaston, William Hyde 40
 Wu, Chien-Shiung 105
- Y**
 Young, Thomas 5, 17
 Young'sches Doppelspaltex-
 periment 16
- Z**
 Zeeman-Effekt 44
 Zeeman, Pieter 47
 Zeilinger, Anton 167, 171, 183
 Zeit 126, 137
 Zeitdilatation 22
 Zugvögel 198
 Zwillings-Paradoxon 21

Titel der Originalausgabe: *50 Quantum Physics Ideas You Really Need to Know*

Copyright © Joanne Baker 2013

Published by arrangement with Quercus Editions Ltd (UK)

Aus dem Englischen übersetzt von Bernhard Gerl

ISBN 978-3-662-45032-1

ISBN 978-3-662-45033-8 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-662-45033-8

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

Springer Spektrum

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015

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.

Planung und Lektorat: Frank Wigger, Martina Mechler

Redaktion: Martin Radke

Zeichnungen: Patrick Nugent

Satz: TypoDesign Hecker, Leimen

Einbandentwurf: deblik, Berlin

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Printed in China

Springer Spektrum ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.

www.springer-spektrum.de