

DIE NATURKRÄFTE

*Wo Kraft not tut, muß man sie kühn, entschlossen und bis
zum Ende anwenden.*

LEO TROTZKI¹

Einige Denker der Antike hatten den intuitiven Gedanken, jede Form der Materie könne sich letztlich auf wenige fundamentale Elemente zurückführen lassen. Die moderne Wissenschaft hat ihnen recht gegeben. Schwerlich aber wäre den antiken Philosophen in den Sinn gekommen, dass dies nicht nur für die Materie, sondern auch für die Kräfte gilt. Weniger intuitiv erschließt sich die Vorstellung, dass sämtliche Naturphänomene in all ihrer Unterschiedlichkeit und Komplexität sich auf vier Grundkräfte zurückführen lassen: Gravitation, Elektromagnetismus, schwache und starke Kraft. Sogar noch schwerer vorhersehbar ist die Erkenntnis, dass ebenso wie die Materie auch die Kräfte von Elementarteilchen hervorgebracht werden. Der gedankliche Weg zu dieser Erkenntnis war nicht einfach.

¹ Leo Trotzki: Was nun? Schicksalsfagen des deutschen Proletariats. 1932. [Die Originalübersetzung von L. Siebenzahl »Wo *Gewalt* not tut, ...« ist hier verändert worden, um die Doppeldeutigkeit des englischen »force« zu bewahren; d. Übs.]

DIE GRAVITATION

*Die Gravitation ist ein mystisches Verhalten im Körper,
erfunden, um die Mängel des Geistes zu verbergen.*

FRANÇOIS DE LA ROCHEFOUCAULD²

Aristoteles erklärte die Gravitation als die natürliche Tendenz jeder Bewegung. Jedes Objekt, das nicht einer Kraft oder einer Beeinflussung von außen ausgesetzt ist, folgt demnach geradlinig seiner *naturgegebenen* Bewegungsrichtung: Leichte Elemente (Luft und Feuer) strebten nach oben, schwere (Erde und Wasser) nach unten. Je schwerer ein Körper sei, desto schneller falle er. Gleichermassen liegt es laut Aristoteles in der Natur der Erde, dem Zentrum des Universums entgegenzustreben, und in der Natur der Himmelskörper, kreisförmigen Bahnen um die Erde zu folgen.

Aristoteles vertrat einen *organizistischen* Standpunkt, der unbeseelten Dingen einen naturgegebenen Drang zu einer globalen Ordnung zuschrieb, fast so, als ahmten sie eine menschliche Gemeinschaft nach. An die Stelle dieser Lehre trat etwa im 17. Jahrhundert allmählich ein *mechanistisches* Bild, demzufolge Bewegung von physikalischen Gesetzen bestimmt wird, die in mathematischen Gleichungen formuliert sind.

Im Mittelpunkt dieses neuen wissenschaftlichen Ansatzes standen Experimente. Nicht dass Aristoteles' Weltbild aus reiner Philosophie entstanden wäre—er vertrat stets die Ansicht, dass jede Behauptung mit einer Beobachtung der Natur beginnen müsse. Zwischen Experiment und Beobachtung aber gibt es einen wichtigen Unterschied: Bei der Beobachtung werden Naturphänomene so untersucht, wie sie sich unserer Wahrnehmung darbieten. Im Experiment dagegen werden unter kontrollierten und reproduzierbaren Bedingungen besondere Situationen geschaffen, um quantitative Angaben über das Verhalten der Natur zu erhalten.

² F. de La Rochefoucauld: *Maximes*. Engl. Nachdruck in G. Powell (Hrg.): *La Rochefoucauld, The Moral Maxims and Reflections* (1665–1678). Stokes Company, New York 1930.

Zu verdanken haben wir diesen Wandel in der wissenschaftlichen Haltung in erster Linie Galileo Galilei (1564–1642). Galilei zog aus seinen Studien den Schluss, dass die Schwerkraft alle Körper unabhängig von deren Masse auf die gleiche Weise beschleunigt. Dieses Resultat bedeutete eine klare Abwendung von der aristotelischen Lehre. Galileos Behauptung stützte sich auf Experimente, aber er musste seine Daten durch Extrapolation auf eine Situation übertragen, in der die Wirkung des Luftwiderstands keine Rolle spielte. Die reine Beobachtung, welche die Auswirkungen von Gravitation und Reibung nicht voneinander trennt, kann zu falschen Ergebnissen führen.

Voller Ehrfurcht stellen wir uns Galileo vor, wie er in seiner legendären Arroganz und Eitelkeit rasch die Wendeltreppe des Schiefen Turms von Pisa hinaufsteigt. Oben angekommen, lässt er auf der überhängenden Seite mit einem selbstsicheren und herablassenden Lächeln auf den Lippen eine schwere Kanonenkugel und eine leichte Gewehrkugel fallen. Beide Objekte treffen, begleitet vom Jubel der Menge und einigen ohnmächtig darniedersinkenden greisen Universitätsgelehrten, mit perfekter Gleichzeitigkeit auf den Wiesenboden auf.

Leider ist diese Geschichte ganz sicher falsch. Anhand des heutigen Kenntnisstands wurde nachgewiesen, dass Galilei eine solche öffentliche Demonstration nicht hätte gelingen können.³ Der Luftwiderstand stand dem entgegen. Zudem hätte Galilei aufgrund der Reaktionszeit des Menschen die Kugeln unmöglich mit der gebotenen absoluten Gleichzeitigkeit fallen lassen können. Tatsächlich wird diese Demonstration in keinem von Galileis Werken erwähnt. Die Geschichte entstammt einer Biographie von Vincenzo Viviani (1622–1703), dem letzten Assistenten Galileis, der das gefeierte Leben seines Meisters wohl mit zusätzlichem Glanz versehen wollte. In Wahrheit wurde das Gesetz der Schwerkraftbeschleunigung im stillen Kämmerlein eines Labors durch sorgfältige und präzise Experimente auf schiefen Ebenen erkannt. Und das ist auch gut so.

³ G. Feinberg: »Fall of Bodies Near the Earth«, *American Journal of Physics* 33, 501 (1965); B. M. Casper: »Galileo and the Fall of Aristotle. A Case of Historical Injustice?«, *American Journal of Physics* 45, 325 (1977); C. G. Adler und B. L. Coulter: »Galileo and the Tower of Pisa Experiment«, *American Journal of Physics* 46, 199 (1978).

Isaac Newton (1643–1727)⁴ entdeckte das allgemeine Gesetz der Schwerkraft, und ein herabfallender Apfel allein reichte nicht aus, um diesem Problem beizukommen. Newton berechnete die Beschleunigung, die erforderlich war, um den Mond auf einer stabilen Erdumlaufbahn zu halten. Daraufhin stellte er fest, dass der errechnete Wert die Gravitationsbeschleunigung auf der Erde um einen Betrag unterschreitet, der dem Quadrat des Verhältnisses des Abstands zwischen Erde und Mond zum Erddurchmesser entspricht. Den eigentlichen Durchbruch bildete der Nachweis, dass sich aus einer Gravitation, die um das Quadrat des Abstands abnimmt, elliptische Umlaufbahnen der Planeten mit der Sonne als einem der Brennpunkte ergeben. Genau darin besteht das Ergebnis des ersten Kepler'schen Gesetzes. Das empirische Gesetz, das Kepler auf der Grundlage astronomischer Beobachtungen aufgestellt hatte, ergab sich somit aus der Gravitationstheorie Newtons.

Der entscheidende gedankliche Schritt bestand darin, dass Newton die Universalität der Gravitation erkannte: Dieselbe Kraft, die Äpfel von Bäumen fallen lässt, lenkt auch die Bewegung von Planeten. Eine und dieselbe mathematische Gleichung bestimmt über völlig unterschiedliche Phänomene und ermöglicht uns, die Bewegung von Objekten an jedem beliebigen Ort im Universum zu berechnen.

Mehr als zwei Jahrhunderte später stolperte Albert Einstein (1879–1955, Nobelpreis 1921) über einen Aspekt der Newton'schen Gravitationstheorie. Woher weiß die Erde, dass in 150 Millionen Kilometern Entfernung die Sonne existiert, und bewegt sich entsprechend? Newtons Theorie gibt auf diese Frage keine Antwort. Die Kraft der Gravitation wirkt selbst über kosmische Distanzen ohne Verzögerung. An keiner Stelle jedoch erklärt die Theorie, wie ein Körper über eine Entfernung

⁴ Newtons Geburtstag fällt nach dem im damaligen England noch geltenden Julianischen Kalender auf den 25. Dezember 1642, nach dem Gregorianischen Kalender jedoch, den das restliche Europa zu jener Zeit bereits eingeführt hatte, auf den 4. Januar 1643. Es wird häufig behauptet, Newton habe das Licht der Welt im Todesjahr Galileis erblickt. Das trifft jedoch nicht zu, wenn man beide Ereignisse nach einer Zeitrechnung datiert. Galilei starb am 8. Januar 1642 (Gregorianischer Kalender), was nach der englischen Zeitrechnung, in der der 25. März als Jahresanfang galt, ins Jahr 1641 fällt.

hinweg wirkt oder wie die Kraft im Raum übermittelt wird. Newton selbst war sich dieser Lücke in seiner Theorie wohl bewusst, als er schrieb: »... dass ein Körper über eine Entfernung hinweg durch ein Vakuum hindurch auf einen anderen Körper wirken soll, ohne dass dies durch etwas Anderes vermittelt würde, durch und über welches ihr Handeln und ihre Kraft vom einen auf den anderen übertragen werden kann, ist für mich eine so große Absurdität, dass, glaube ich, kein Mensch, der ein in philosophischen Dingen geschultes Denkvermögen besitzt, dem jemals aufsitzen könnte.«⁵

Einstein besaß in der Tat ein »in philosophischen Dingen geschultes Denkvermögen« und hatte nicht vor, »dem aufzusitzen«. Besonders dringlich war das Problem nach 1905 geworden, als Einstein entdeckte, dass der Speziellen Relativitätstheorie zufolge keine Information schneller als mit Lichtgeschwindigkeit übertragen werden konnte. Das Konzept unverzögert über Entfernungen hinweg agierender Kräfte war mit der Speziellen Relativitätstheorie unvereinbar.

Von diesen Erwägungen ausgehend und auf einem Weg, der sich als ebenso lang (1907–1915) wie steinig erwies (aufgrund der logischen und mathematischen Hindernisse), gelangte Einstein zu einer Neuformulierung der Gravitationstheorie in der *Allgemeinen Relativitätstheorie*. Die Allgemeine Relativitätstheorie besagt, dass Masse eine Verformung von Raum und Zeit verursacht. Sie »krümmt« Raum und Zeit und verändert die fundamentalen geometrischen Eigenschaften, die uns aus dem »flachen« Raum vertraut sind. Im gekrümmten Raum verläuft die Bewegung eines kräftefreien Körpers—auf den keinerlei äußere Kräfte einwirken—nicht linear, sondern entlang den Hügellandschaften dieses verformten Raums. Laut Einstein tritt die Geometrie an die Stelle der Gravitationskraft: Die Bahn eines kräftefreien Körpers im gekrümmten Raum fällt exakt mit dem zusammen, was wir als die Bahn eines Körpers wahrnehmen, der im flachen Raum der Gravitation ausgesetzt ist. Die Gravitation, die wir als Kraft interpretieren, ist somit lediglich die

⁵ I. Newton in: Four Letters from Sir Isaac Newton to Doctor Bentley Containing Some Arguments in Proof of a Deity. R. and J. Dodsley, London 1756.

Konsequenz aus den intrinsischen Eigenschaften des Raums. Sie ist keine von außen wirkende Kraft, sondern Ergebnis einer wechselseitigen Reaktion zwischen Materie und Raumgeometrie. Die Materie verändert den Raum, sie verursacht seine Krümmung; im Gegenzug verändert die Krümmung des Raums die Bewegung der Materie. Eine einzige fundamentale Gleichung—die Einstein'sche Gleichung—beschreibt die dynamische Relation zwischen Materie und Geometrie.

Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie bedeutet eine tiefgreifende Neubewertung von Grundkonzepten wie Raum, Zeit, Kraft und Gravitation. Für mich ist sie die eleganteste und packendste wissenschaftliche Theorie, die je aufgestellt wurde. Die Allgemeine Relativitätstheorie ist auch mehr als eine Neufassung der Newton'schen Theorie. Sie sagte neue Effekte voraus—etwa die Periheldrehung des Merkur oder die Ablenkung des Lichts durch Masse—, die durch Beobachtungen ihre spektakuläre Bestätigung fanden. Die Allgemeine Relativitätstheorie ist, zumindest bis zur nächsten konzeptuellen Revolution, die gültige Theorie zur Erklärung der Gravitation.

DIE ELEKTROMAGNETISCHE KRAFT

Talent ist wie Elektrizität. Wir begreifen die Elektrizität nicht. Wir nutzen sie.

MAYA ANGELOU⁶

Von den elektrischen Eigenschaften von Bernstein, der an Pelz gerieben wird, und den magnetischen Eigenschaften einiger eisenhaltiger Mineralien weiß man seit der Antike. Erstmals systematisch untersucht wurden diese Wirkungen jedoch erst von William Gilbert (1544–1603), dem Hofarzt von Königin Elizabeth I. und König James (VI. von Schottland und I. von England). Im Jahr 1600 prägte Gilbert das Wort *electricus* (vom lateinischen *electrum*, Bernstein); das Wort *magneticus* leitet sich von *magnitis lithos* ab, einem in der griechischen Gegend Magnesia gewonnenen Mineral, das heute Magnetit genannt wird.

⁶ Maya Angelou in C. Tate (Hrg.): Black Women Writers at Work. Continuum, New York 1983.

Die Ergründung der elektrischen und magnetischen Eigenschaften kam zunächst recht langsam voran. Im 18. Jahrhundert baute man wunderliche Maschinen, um in eleganten Salons und öffentlichen Ausstellungen die Wunder der Elektrizität vorzuführen. Später faszinierte die geheimnisvolle Aura elektrischer Phänomene die romantische Seele mit der Vorstellung von einer ungezähmten Natur, die ihre Kraft entfesselt. Der Dichter Percy Shelley verschlang während seiner Studienzeit an der Oxforder Universität »Abhandlungen über Magie und Hexerei wie auch jene modernen, welche die Mirakel der Elektrizität und des Galvanismus beschreiben«. Er versammelte seine Freunde um sich und »führte mit wachsender Leidenschaftlichkeit Diskurse über die wunderbaren Kräfte der Elektrizität, von Donner und Blitz, beschrieb einen elektrischen Drachen, den er bei sich zu Hause gefertigt hatte, und plante einen weiteren sowie einen riesigen, vielmehr eine Verbindung aus vielen Drachen, die ein immenses Ausmaß an Energie aus dem Himmel herabziehen würde, die gesamte Munition eines gewaltigen Gewitters; und dieses, auf einen Punkt gelenkt, werde dort die erstaunlichsten Resultate hervorbringen.«⁷

Die erstaunlichen Resultate der Elektrizität konnten jedoch leicht tragisch enden. Während einer Versammlung der Sankt Petersburger Akademie der Wissenschaften im Jahr 1753 hörte der Physiker Georg Wilhelm Richmann (1711–1753), wie Donnergrollen ein heraufziehendes Gewitter ankündigte. Er eilte nach Hause, um mithilfe eines mit einem Metallstab verbundenen Instruments die Intensität der Elektrizität in Blitzschlägen zu messen. Der Blitz fuhr herab und versetzte Richmann einen sofort tödlichen Stromschlag, ohne den unglückseligen Forscher seine Messungen beenden zu lassen.

Mit der Zeit brachte die Wissenschaft etwas Ordnung in diese nur unzureichend geklärte Frage, und der Erkenntnisstand zu elektrischen und magnetischen Phänomenen kulminierte in den berühmten Maxwell'schen Gleichungen. James Clerk Maxwell (1831–1879) schrieb sich mit 16 Jahren an der University of Edinburgh ein und wechselte drei Jahre später nach Cambridge. Es heißt, Maxwell sei bei seiner Ankunft

⁷ T. J. Hogg: *The Life of Shelley*. Moxton, London 1858.

in Cambridge mitgeteilt worden, dass um 6 Uhr morgens ein Gottesdienst mit Anwesenheitspflicht stattfindet. »Aye«, soll Maxwell in seinem starken schottischen Akzent erwidert haben, »so lange könnte ich wohl aufbleiben.« In dieser Hinsicht glich er vielen modernen Physikern. Noch heute erinnere ich mich an den Anfang der Definition in meinem Physikbuch: »Physik ist das, womit Physiker sich spät nachts beschäftigen.«⁸ In seinem Tagesrhythmus mag Maxwell sich von zahlreichen Physikern nicht unterschieden haben; in vielen anderen Dingen jedoch war er einzigartig.

Maxwell nahm sich des Problems der elektrischen und magnetischen Erscheinungen an, indem er einen Analogieschluss zog zwischen den Grundsätzen der Hydrodynamik, die sich mit dem Strömungsverhalten von Flüssigkeiten befasst, und den Gesetzen von Elektrizität und Magnetismus, die den Fluss der Ladungen in elektrischen Strömen beschreiben. Als Hauptvariablen für seine Gleichungen wählte er anschließend die elektrische und die magnetische Feldstärke.

Der von Michael Faraday eingeführte Begriff des *Felds* gehört zu den Grundlagen der modernen Physik. Ein Feld ordnet jedem Punkt im Raum eine physikalische Größe zu, die mit einem Zahlenwert oder mit einem System von Zahlenwerten darstellbar ist. Eine Wanderkarte, auf der die Höhenlinien verzeichnet sind, kann als Feld gelten: Jedem Punkt auf der Karte ist ein Höhenwert zugeordnet. Auch ein rotglühendes Stück Metall lässt sich als Feld interpretieren: Punkt für Punkt zeigen die unterschiedlichen Farbschattierungen auf der Oberfläche die Temperaturwerte an.

Das elektrische und das magnetische Feld beschreiben an jedem Punkt im Raum die elektrischen und die magnetischen Kräfte, die auf ein hypothetisches Teilchen an diesem Punkt wirken. So definiert, mag das Feld nur als ein verworrenes und unnötiges Konzept erscheinen, das an die Stelle des intuitiv leichter zugänglichen Begriffs der Kraft gesetzt wird. Aber es steckt mehr dahinter. Durch die Einführung des Felds werden zwei unterschiedliche physikalische Effekte voneinander getrennt:

⁸ J. Orear: *Fundamental Physics*. Wiley, New York 1967.

jener, der eine Kraft hervorbringt, und jener, auf den diese Kraft wirkt. Mit anderen Worten: Im elektrischen und im magnetischen Feld sind die Informationen über alle im System vorliegenden Ladungen und Ströme sowie über deren Position und zeitliche Variation zusammengefasst, ohne dass diese Informationen vom Körper abhängig wären, auf den die Kraft wirkt.

Sich stark auf die Ergebnisse seiner Vorgänger stützend fand Maxwell vier Gleichungen, mit denen sich für jede beliebige Konfiguration elektrischer Ladungen und Ströme und in jedem Punkt im Raum ebenso die Werte des elektrischen und des magnetischen Felds bestimmen lassen wie ihre Veränderung in der Zeit. Die Gleichungen zeigten eine so tiefgreifende Parallelität zwischen Elektrizität und Magnetismus auf, dass beide Konzepte zu einer Größe zusammengeführt werden konnten. Aus diesem Grund sprechen wir heute einfach von der *elektromagnetischen Kraft*.

»Im langfristigen Rückblick auf die Geschichte der Menschheit—sagen wir, in zehntausend Jahren von heute an gesehen—kann es kaum Zweifel daran geben, dass das bedeutendste Ereignis des 19. Jahrhunderts in Maxwells Entdeckung der Gesetze der Elektrodynamik gesehen werden wird«, meint Richard Feynman.⁹ Der von einem Sturm entfesselte Blitz, die Ausrichtung einer Kompassnadel, der elektrische Strom in einem Mikrochip—alles unterschiedliche Phänomene, die durch dieselben physikalischen Gesetze zur Beschreibung der elektromagnetischen Kraft erklärbar werden.

Maxwells Entdeckung brachte ein unvermutetes und wirklich erstaunliches Resultat ans Licht. Seine Gleichungen sagten die Existenz von Wellen voraus, hervorgerufen durch wechselseitige Schwingungen elektrischer und magnetischer Felder. Maxwell konnte die Ausbreitungsgeschwindigkeit dieser Wellen berechnen—das Ergebnis war eine veritable Überraschung: Die errechnete Geschwindigkeit entsprach mit experimenteller Genauigkeit der Lichtgeschwindigkeit, die man von Messungen im Labor und den Methoden der Astronomie her kannte.

⁹ R. P. Feynman: The Feynman Lectures on Physics. Addison-Wesley, Reading 1964.

1865 veröffentlichte Maxwell einen Aufsatz, in dem er schrieb: »Diese Geschwindigkeit liegt so nahe bei der Lichtgeschwindigkeit, dass wir aus guten Gründen scheinen schlussfolgern zu können, dass das Licht selbst (einschließlich der Wärmestrahlung und anderer Strahlung, sofern vorhanden) eine elektromagnetische Verwirbelung in Form von Wellen ist, die sich im elektromagnetischen Feld gemäß den elektromagnetischen Gesetzen fortpflanzen.«¹⁰

Die Zusammenführung von Elektrizität und Magnetismus hatte also die Erkenntnis der Natur des Lichts zur Folge. Maxwells Theorie gemäß ist Licht eine elektromagnetische Welle und damit von gleicher Art wie die Wellen, die heute vom Radio empfangen oder im Mikrowellenherd erzeugt oder als Röntgenstrahlen für die medizinische Diagnose eingesetzt werden. Diese unterschiedlichen Phänomene haben denselben physikalischen Ursprung und lassen sich sämtlich und lückenlos mit den Gesetzen zur Beschreibung der elektromagnetischen Kraft erklären.

Die Maxwell'schen Gleichungen lieferten den Schlüssel zur Lösung einer alten Kontroverse, die seit den Anfängen der Optik andauert hatte: Besteht Licht aus Teilchen oder aus Wellen? Newton sprach sich für die korpuskulare Interpretation aus, da ein Hindernis Lichtstrahlen aufhalte, Wellen jedoch an ihm vorbeikämen. Huygens wählte die Wellen, da er Interferenzmuster im Licht beobachtete. Sieben Jahre nach Maxwells Tod erzeugte Heinrich Hertz (1857–1894) im Labor elektromagnetische Wellen und fand Maxwells Deutung lückenlos bestätigt. Damit waren sämtliche berechtigten Zweifel zerstreut: Licht ist eine Welle.

Ein paradoxer Aspekt in Hertz' Experimenten beweist einmal mehr, wie unvorhersehbar und zufällig die Wissenschaft voranschreitet. In Hertz' Beweis, dass Licht eine Welle ist, war die These angelegt, dass Licht aus Teilchen bestehe. Tatsächlich nämlich war Hertz im Rahmen seiner Experimente zu elektromagnetischen Wellen auf das Phänomen

¹⁰ J. C. Maxwell: »A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field«, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 155, 459–512 (1865).

gestoßen, dass wir als *fotoelektrischen Effekt* kennen. Diverse unerklärliche Eigenschaften in diesem Phänomen waren mit der klassischen Theorie des Elektromagnetismus unvereinbar. Rund zwei Jahrzehnte später fand Einstein eine befriedigende Erklärung für das Versuchsergebnis, allerdings um den Preis einer überraschenden Prämisse: Licht setzt sich aus Teilchen zusammen.

Dieses Ergebnis war ein wahrer Schock, lief es doch sämtlichen Daten zuwider, die die Welleninterpretation bestätigten. Einstein selbst wusste diesen Widerspruch nicht aufzulösen und gestand: »Ich bestehe auf dem provisorischen Charakter dieses Konzepts, das mit den experimentell verifizierten Auswirkungen der Wellentheorie nicht vereinbar scheint.«¹¹ Dennoch hatte Einstein recht, und in späteren Experimenten bestätigte sich, dass Licht in der Tat aus Teilchen besteht, die wir heute *Photonen* nennen. Ein Resultat von fundamentaler Bedeutung; Einstein erhielt den Nobelpreis nicht für die Relativitätstheorie—den bekanntesten seiner Erfolge—, sondern für seine Erklärung des fotoelektrischen Effekts.

In den verwirrenden Ergebnissen des fotoelektrischen Effekts offenbarte die Quantenmechanik ihr ureigenstes Wesen als eine Theorie, die jedem intuitiven Verständnis zuwiderläuft. Ein Physiker musste sich mit dem Gedanken abfinden, dass die vertrauten Bilder von Teilchen und Welle in der Quantenmechanik ihrem Wesen nach uneindeutig sind und einander nicht ausschließen. So wie bei Dr. Jekyll und Mr Hyde in einem Menschen gleichermaßen Gut wie Böse stecken und sich mal das eine und mal das andere Gesicht zeigt, kann Licht gleichzeitig Teilchen und Welle sein. Newton und Huygens hatten gewissermaßen beide recht und unrecht.

Die Erkenntnis, dass elektromagnetische Wellen aus Photonen bestehen, führte zu einer neuen Auslegung des elektromagnetischen Felds und somit auch der elektromagnetischen Kraft. Eine Analogie kann dies veranschaulichen helfen: Ein multinationales Unternehmen hat Niederlassungen in aller Welt. Keine davon jedoch arbeitet unabhängig,

¹¹ A. Einstein in P. Langevin und M. de Broglie (Hrg.): First Solvay Congress. Gauthier-Villars, Paris 1912.

vielmehr wird durch den Austausch von Informationen zur Firmenpolitik jede von allen anderen beeinflusst. Um die Verständigung zwischen den Filialen zu erleichtern, hat man ein Computernetzwerk eingerichtet. Dieses Netzwerksystem ist ein globales Gebilde, das die gesamte Welt umspannt. Die eigentliche Kommunikation jedoch findet über einzelne E-Mails statt, die von einer Filiale zur andern gesendet werden. Über das Netzwerksystem werden pausenlos zahlreiche E-Mails hin- und hergeschickt. Die globale Aktivität des Unternehmens wird also letztlich von einzelnen, wenn auch zahlreichen E-Mails bestimmt.

Die Unternehmensvertretungen in unserem Vergleich sind die verschiedenen, im Raum verteilten elektrischen Ladungen, und dem Computernetzwerk entspricht das elektromagnetische Feld, welches das System überwacht und die Kraft überträgt. Die E-Mails sind wie Photonen: kleine Happen ausgetauschter Information. Obwohl das elektromagnetische Feld ein globales Gebilde ist, das den gesamten Raum ausfüllt, besteht es dennoch aus Teilchen—den Photonen. Die elektromagnetische Kraft wird daher durch einen kontinuierlichen Photonenaustausch zwischen elektrischen Ladungen verursacht. Ein wirklich sensationelles Resultat: Nicht nur Materie besteht aus Teilchen, auch die Kraft ist ein Ergebnis von Teilchen.

DIE SCHWACHE KRAFT

*Der Schwache schlägt den Starken auch, hilft ihm das
Recht.*

SOPHOKLES¹²

Die Geschichte der Entdeckung der schwachen Kraft beginnt in Paris, an einem wolkenverhangenen Tag im Februar 1896. Henri Becquerel (1852–1908, Nobelpreis 1903) ist mit Experimenten zur Fluoreszenz beschäftigt. Er schlägt eine Fotoplatte in eine dicke Schicht schwarzen Papiers und legt einen metallischen Gegenstand auf dieses Paket—einen

¹² Sophokles: *Ödipus Coloneus*. Dt. v. E. Buschor (1954).

Orden von der Form eines Malteserkreuzes. Abschließend bedeckt er beides mit Uran-Kaliumsulfat, einer kristallinen Uranverbindung, die er selbst hergestellt hat. Der nächste Schritt soll darin bestehen, die Probe dem Sonnenlicht auszusetzen, um nach der anschließenden Entwicklung der Fotoplatte die Umrisse des fluoreszierenden Körpers beobachten zu können. Wie die von Röntgen entdeckten »X-Strahlen« hätte die Strahlung wohl das Papier, nicht aber den Metallgegenstand durchdrungen, sodass eine Negativaufnahme des Kreuzes zu sehen sein würde.

Doch der Himmel über Paris blieb über mehrere Tage verhangen, und in Ermangelung des nötigen Sonnenlichts musste Becquerel sein Experiment verschieben. Seinen Versuchsaufbau verstaute er in einem dunklen Schrank. Von einer seherischen Eingebung heimgesucht oder auch einfach des Wartens überdrüssig beschloss er irgendwann, die Fotoplatte zu entwickeln, ohne den fluoreszierenden Gegenstand je der Bestrahlung mit Sonnenlicht ausgesetzt zu haben. Zu seiner Überraschung fand er auf der Fotoplatte ein Abbild des Malteserkreuzes vor (siehe Abb. 2.1).

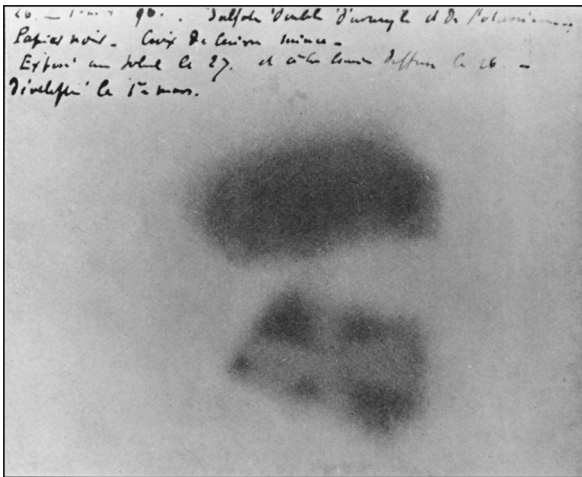


Abb. 2.1 Das fotografische Abbild des Malteserkreuzes mit Becquerels handschriftlichen Notizen

Quelle: AIP Emilio Segrè Visual Archives/William G. Myers Collection.

Das Uransalz hatte also ohne die Einwirkung einer Lichtquelle unsichtbare Strahlen abgegeben, die das Papier durchdringen konnten. Becquerel führte diesen Effekt auf eine »unsichtbare fluoreszierende Strahlung« zurück, eine Strahlung »von einer Beharrlichkeit, die unendlich größer ist als die Beharrlichkeit der Lichtstrahlung«.¹³ Becquerel hatte die *Radioaktivität* entdeckt.

Kurioserweise im selben Monat desselben Jahres erzielte Silvanus Thompson (1851–1916) identische Resultate, begünstigt durch das englische Winterwetter und die Smogschicht über dem viktorianischen London. Wie bei Becquerel war bei Thompsons Versuchsanordnung ohne jegliche Sonnenbestrahlung ein Abbild entstanden. Doch Thompson zögerte mit der Veröffentlichung seiner Beobachtungen und irrte sich in der Interpretation der Ergebnisse, die er auf Fluoreszenz zurückführte. Er hatte den Beweis für eine neue Form der Strahlung nicht erkannt und versäumte so seine Verabredung mit der Geschichte.

Aus späteren Untersuchungen wissen wir, dass Atomkerne drei Arten von Strahlung emittieren: *Alpha*-, *Beta*- und *Gamma*-Radioaktivität. Die Alphastrahlung entsteht beim Austritt von Kernfragmenten aus instabilen Kernen. Bei den Fragmenten handelt es sich um die aus zwei Protonen und zwei Neutronen bestehenden Alphateilchen, die wir aus Rutherfords Experimenten bereits kennen. Um nach der Emission von Alphateilchen wieder ein Gleichgewicht zwischen Masse und elektrischer Ladung herzustellen, durchlaufen die Atomkerne einen Prozess, der als Betastrahlung bezeichnet wird. Bei der Beta-Radioaktivität wird ein Neutron in ein Proton umgewandelt, wobei ein Elektron austritt. Die Gamma-Radioaktivität schließlich ist eine elektromagnetische Strahlung, durch die ein Kern, im Regelfall nach einem Alpha- oder Betazerfall, einen Teil seiner Energie freisetzt. In unserer Geschichte geht es ausschließlich um die Betastrahlung—sie hatte zu dem Bild des Malteserkreuzes geführt, das Becquerel beobachtete.

Die Beta-Radioaktivität stellte die Forschung vor ein Rätsel. In allen anderen Formen der Radioaktivität entsprach die durch die Strahlung

¹³ H. Becquerel: *Comptes Rendus* 122, 501 (1896).

freigesetzte Energie dem Energieverlust im Kern. Das leuchtet ein— das Geld, das wir beim Einkaufen ausgeben, (die bei der Strahlung freigesetzte Energie) muss dem Betrag entsprechen, der aus unserer Brieftasche verschwunden ist (der im Kern fehlenden Energie). Anders kann es nicht sein.

Bei der Beta-Radioaktivität aber war es anders. In zahlreichen Experimenten, die 1927 in den Messungen von Charles Ellis (1895–1980) und William Wooster (1903–1984) am Cavendish-Laboratorium kulminierten, wurde gezeigt, dass die vom Atomkern ausgehende Betastrahlung unterschiedliche Energiewerte aufweist. Die Betastrahlung zeigte sich als ein Strom von Elektronen, an denen für jedes einzelne ein anderer Energiewert gemessen wurde. Als würde man aus demselben Gewehr viele Kugeln abschießen, die alle völlig unterschiedlich schnell flögen: Einige verlassen den Lauf langsam, andere sausen wie Raketen durch die Luft. Wie ist das möglich?

Diese Frage landete auf den Schreibtischen der Theoretiker und entfachte insbesondere zwischen Niels Bohr und Wolfgang Pauli (1900–1958, Nobelpreis 1945) eine heftige Diskussion. Bohrs Antwort war ein umstürzlerischer Gedanke: Auf atomarer Ebene bleibe die Energie lediglich im Durchschnitt erhalten, nicht aber in jedem einzelnen Schritt. Bei der Beta-Radioaktivität kämen die Elektronen daher mit zufälligen Energiewerten aus dem Kern geschossen. Zur damaligen Zeit, als Relativitätstheorie und Quantenmechanik sämtliche bekannten Grundsätze über den Haufen warfen, schien der Physik nichts mehr heilig. Selbst der geliebte Energieerhaltungssatz—ein Grundpfeiler der klassischen Physik—durfte nach Meinung Bohrs demontiert werden. Pauli jedoch widersprach dem: »Bohr [ist] mit seinen diesbezüglichen Betrachtungen über eine Verletzung des Energiesatzes auf *vollkommen falscher* Fährte!«¹⁴ Bohr verfolgte seine Idee weiter und hielt sogar für möglich, dass sich mit einer Verletzung des Energieerhaltungssatzes in der Beta-Radioaktivität die anscheinend unendliche Energieproduktion

¹⁴ W. Pauli an O. Klein, 18. Februar 1929; in A. Herrmann, K. von Meyenn, V. Weisskopf (Hrg.): Wolfgang Pauli—Wissenschaftlicher Briefwechsel; Bd. 1: 1919–1929. Springer, New York 1979.

in Sternen erklären ließe. Worauf Pauli erwiderte: »[...] und lasse die Sterne in Frieden strahlen!«¹⁵



Abb. 2.2 Niels Bohr (links) und Wolfgang Pauli auf der Solvay-Konferenz 1948

Quelle: Pauli Archive/CERN.

Pauli war bekannt für seinen scharfen Verstand, seinen spöttischen Sarkasmus und sein lautes Lachen. Gleichzeitig genoss er höchstes Ansehen und die Bewunderung seiner Kollegen für seine außergewöhnliche Begabung und sein enzyklopädisches Wissen. Seinen ersten wissenschaftlichen Artikel—über die Allgemeine Relativitätstheorie—veröffentlichte Pauli im Alter von 18 Jahren, wenige Monate nach seiner Matura in Wien. Den Großteil seiner Laufbahn als Wissenschaftler verbrachte er in Zürich, reiste jedoch viel—wohin er nur konnte, um über

¹⁵ W. Pauli an N. Bohr, 17. Juli 1929; ebd.

Physik zu diskutieren. Wenn er vor Publikum sprach, lief er unaufhörlich vor der Tafel hin und her, und in physikalischen Diskussionen pflegte er mit dem Körper vor- und zurückzuschwingen, als spräche er ein chassidisches Gebet.

Theoretische Physiker werden gern wegen ihres Mangels an Sinn fürs Praktische und an Geschicklichkeit im Umgang mit Laborinstrumenten aufgezogen. Auch auf diesem Gebiet brillierte Pauli als Vertreter seiner Berufsgruppe. Eigens wurde sogar der Begriff des »Pauli-Effekts« geprägt, für das rätselhafte Phänomen, dass, sobald Pauli über die Schwelle eines Labors trat, Instrumente zerbrachen oder aus unerfindlichen Gründen funktionsuntüchtig wurden. Als dem Physiker James Franck in seinem Göttinger Labor einmal unerklärlicherweise ein kompliziertes Teil seiner Ausstattung explodierte, beschrieb er Pauli den Vorfall in einem Brief und gestand, die Ursache nie begriffen zu haben. Wäre Pauli zugegen gewesen, fügte er hinzu, hätte er die Sache wenigstens dessen metaphysischer Wirkung zuschreiben können. Pauli überprüfte seine Tagebuchaufzeichnungen und stellte höchst amüsiert fest, dass er tatsächlich genau zum fraglichen Zeitpunkt, von Zürich kommend, am Göttinger Bahnhof auf einen Anschlusszug nach Kopenhagen gewartet hatte.

Einmal beschlossen mehrere Physiker, Pauli einen Streich zu spielen. Während einer Konferenz verbanden sie den Leuchter im Versammlungsraum mit einem Gerät, welches so konstruiert war, dass Pauli beim Betreten des Raums unwissentlich den Mechanismus auslösen und den Leuchter zu Fall bringen würde. Daraufhin wollten alle überrascht aufschreien und als einzig mögliche Erklärung für den unglaublichen Zwischenfall den rätselhaften Pauli-Effekt anführen. Pauli betrat nichts ahnend den Raum, doch der Leuchter fiel nicht herab, da das Gerät nicht funktionierte. Wieder einmal hatte der Pauli-Effekt zugeschlagen.

Zur Lösung des Problems der Beta-Radioaktivität wählte Pauli eine andere Strategie als Bohr. Er stellte die Hypothese auf, dass die Gesamtenergie bei der Beta-Strahlung stets unverändert bleibe. Das Elektron enthalte dabei jedoch nur einen Teil der Energie, der Rest befinde sich in einem neuen Teilchen—dem *Neutrino*—ohne elektrische Ladung und ohne Masse (oder zumindest mit einer sehr viel geringeren

als der Protonenmasse). Dieses Teilchen sei für Detektoren vollkommen unsichtbar, da es gegenüber der elektromagnetischen Kraft nahezu unempfindlich sei. Aus diesem Grund werde, so Pauli, in Versuchen lediglich ein Teil der bei der Beta-Radioaktivität tatsächlich produzierten Energie gemessen. Dies erkläre, warum bei der Beta-Strahlung für die Elektronen so merkwürdige Energiewerte gemessen würden.



Abb. 2.3 Wolfgang Pauli 1929 bei einer Vorlesung in Kopenhagen

Quelle: Pauli Archive/CERN.

Paulis Erklärung lässt sich mithilfe eines der oben angeführten Analogien anders formulieren. Jeder Schuss aus einem Gewehr besitzt dieselbe Energie. Wir wollen jedoch einmal annehmen, dass das Gewehr bei jedem Schuss nicht nur eine, sondern zwei Kugeln gleichzeitig abfeuert. Eine dieser Kugeln ist »sichtbar« (das Elektron), weil sie Veränderungen an ihrem Ziel bewirkt; die andere dagegen ist »unsichtbar«

(das Neutrino), weil sie ihr Ziel durchdringt, ohne Spuren zu hinterlassen. Die Energie des Schusses verteilt sich willkürlich auf beide Projektile; da wir jedoch nur eines sehen können, entsteht der irrige Eindruck, ein Teil der Energie sei verloren gegangen.

Heutzutage sind Physiker besser daran gewöhnt, neue Teilchen zu erfinden; zur damaligen Zeit jedoch klang Paulis Hypothese sehr radikal. Tatsächlich fehlte Pauli der Mut, seinen Gedanken in einem wissenschaftlichen Artikel zu veröffentlichen; er erläuterte ihn lediglich in einem Brief an die Teilnehmer einer Physikertagung zur Radioaktivität in Tübingen, an der er nicht teilnehmen konnte, weil er zu einem Ball der italienischen Studenten in einem Züricher Hotel eingeladen war. Seinen Brief überschrieb Pauli mit »Liebe Radioaktiven Damen und Herren« und nannte seine Hypothese einen »verzweifelden Ausweg«¹⁶ aus dem Problem um die Betastrahlung.

Sogar Pauli selbst empfand seinen Gedanken als Schuss ins Blaue. Im Oktober 1931 nahm er an einer Konferenz in Rom teil, von der ihm, wie er später berichtete, zwei schreckliche Ereignisse im Gedächtnis blieben. Zum einen hatte er Mussolini die Hand schütteln müssen. Zum andern musste er der Hartnäckigkeit seiner Kollegen nachgeben und seine Neutrino-Hypothese erläutern.

Im Rückblick beschrieb er seine Hypothese als »dieses närrische Kind meiner Lebenskrise (1930/1931)—das sich auch weiter recht närrisch aufgeführt hat«.¹⁷ Es war keine leichte Zeit für Pauli: Nach dem Freitod seiner Mutter und der Scheidung von seiner ersten Frau, der deutschen Tänzerin Käthe Deppner, geriet er in einen Zustand der Depression. Er suchte den Psychoanalytiker Carl G. Jung auf und war fast vier Jahre lang in Therapie. Jung hielt die Analyse von mehreren Hundert Träumen Paulis in seinem Buch *Psychologie und Alchemie* fest.

¹⁶ W. Pauli an die Tagungsteilnehmer in Tübingen, 4. Dezember 1930; Abbildung der Originalabschrift: <http://www.library.ethz.ch/exhibit/pauli/neutrino.html>. [Mai 2011]

¹⁷ W. Pauli an M. Delbrück, 6. Oktober 1958; in K. v. Meyenn (Hrg.): Wolfgang Pauli: Wissenschaftlicher Briefwechsel mit Bohr, Einstein, Heisenberg u. a. Bd. IV, Teil IV, B: 1958. Springer, Berlin/Heidelberg 2005. [Originalwortlaut: »Die Geschichte dieses närrischen Kindes . . .«]

In seinem Brief an die Tagungsteilnehmer in Tübingen bezeichnete Pauli das neue Teilchen als »Neutron«. Chadwicks Neutron war zum damaligen Zeitpunkt noch nicht entdeckt. Die Bezeichnung »Neutrino« war ein nicht ernst gemeinter Vorschlag von Enrico Fermi (1901–1954, Nobelpreis 1938), der während eines Seminars in Rom gefragt wurde, ob die beiden Teilchen identisch seien. »Nein«, antwortete Fermi, »Chadwicks Neutronen sind groß und schwer. Paulis Neutronen sind klein und leicht; sie müssen Neutrinos heißen.«¹⁸ Das Wortspiel wird natürlich nur im Italienischen offenbar, wo »Neutrino« das Diminutivum von »Neutron« ist und so viel wie »kleines Neutron« bedeutet.

Die Verwirrung galt jedoch nicht nur der Benennung, sondern auch der Rolle dieser Teilchen. Wenn Atomkerne bei der Beta-Radioaktivität Elektronen und Neutrinos abgeben, gehören diese dann ebenso zum Kern wie Protonen und Neutronen? Wo halten sich Elektronen und Neutrinos auf, bevor sie emittiert werden? Pauli war zunächst der Meinung, Neutrinos würden wie kleine Magnete von elektromagnetischen Kräften im Innern des Atomkerns festgehalten; dieser Gedanke jedoch war falsch.

Die letztgültige Erklärung kam schließlich von Fermi, der sich von den neu entstehenden Ideen der Quantenfeldtheorie inspirieren ließ, die zur Beschreibung der Emission von Photonen und der Absorption durch Atome postuliert worden war. Wie wir in Kap. 3 noch genauer sehen werden, setzt man in einer Quantenfeldtheorie anstelle des Konzepts der Kraft die Wechselwirkungen zwischen Teilchen: Teilchen entstehen und vergehen an unterschiedlichen Punkten im Raum als Folge ihrer Interaktionen. Kraft ist das Ergebnis eines Teilchenaustauschs und somit letztlich von Wechselwirkungen zwischen Teilchen. Photonen beispielsweise können aufgrund der elektromagnetischen Wechselwirkung emittiert oder von Atomen absorbiert werden; dennoch sind sie keine »Bestandteile« des Atoms.

Fermi argumentierte, die Beta-Strahlung lasse sich auf ganz ähnliche Weise erklären wie die elektromagnetische Strahlung. Er postulierte

¹⁸ G. Gamow: *Thirty Years That Shook Physics*. Anchor Books, New York 1966.

eine neue Wechselwirkung, an der Neutronen, Protonen, Elektronen und Neutrinos beteiligt seien. Infolge dieser Wechselwirkung werde ein Neutron in ein Proton umgewandelt, wobei ein Elektron und ein Neutrino freigesetzt würden. Damit hatte Fermi eine neue, für die Beta-Radioaktivität verantwortliche Kraft erfunden, die später *schwache Kraft* genannt wurde.



Abb. 2.4 »I ragazzi di Via Panisperna«—die Gruppe junger Physiker der Universität Rom um Fermi; von links nach rechts: Oscar D'Agostino, Emilio Segrè, Edoardo Amaldi, Franco Rasetti und Enrico Fermi

Quelle: Archivio Amaldi/Dipartimento di Fisica/Sapienza, Università di Roma.

Fermi war hochzufrieden mit seiner Theorie. Während eines Skiurlaubs in den Alpen bat er seine Freunde und Kollegen Emilio Segrè, Edoardo Amaldi und Franco Rasetti in sein Hotelzimmer. Auf seinem Bett sitzend las er ihnen den Artikel vor, den er geschrieben hatte, und nahm ihre begeisterten Anmerkungen entgegen. Voller Selbstvertrauen

reichte er sein Manuskript beim Wissenschaftsmagazin *Nature* ein. Der Artikel aber wurde mit der Begründung abgelehnt, »er enthält Spekulationen, die zu weit von der Realität entfernt sind, um für den Leser von Interesse zu sein«.¹⁹ Fermis Artikel erschien schließlich in einer anderen Zeitschrift, und seine Theorie war bald allgemein anerkannt. Tatsächlich wurde der Artikel sogar in zwei Zeitschriften abgedruckt (in einer italienischen und einer deutschen Fassung). Die faschistische Gesetzgebung nämlich verlangte von italienischen Wissenschaftlern, dass sie in italienischer Sprache publizierten. Da ein auf Italienisch verfasster Artikel in der internationalen Wissenschaftlergemeinschaft jedoch garantiert vollkommen unbeachtet bleiben würde, nahm Fermi eine Doppelveröffentlichung vor.

Neben der Verbindung, die Fermi gefunden hatte, gibt es zwischen der elektromagnetischen und der schwachen Kraft aber auch wichtige Unterschiede. Die elektromagnetische Kraft verändert das Wesen des Teilchens nicht, auf das sie einwirkt. Anders ausgedrückt: Ein Elektron übt eine elektromagnetische Kraft auf andere Ladungen aus, indem es Photonen austauscht, ohne dass sich durch die Emission von Photonen die Identität des Elektrons verändern würde. Demgegenüber hat die schwache Kraft die Eigenschaft, Teilchen zu transformieren. Während es eine schwache Kraft ausübt, wird das Teilchen selbst verändert. Insbesondere wechselt bei der Beta-Radioaktivität ein Neutron, das ein Elektron-Neutrino-Paar abgibt, seine Identität und wird zu einem neuen Teilchen—einem Proton.

Der zweite Unterschied zwischen den Kräften besteht in ihrer Reichweite. Eine elektrische Ladung ist auch über sehr weite Entfernungen noch wirksam; aus diesem Grund kann der Elektromagnetismus in unserer Welt makroskopische Phänomene bewirken. Die schwache Kraft dagegen wirkt nur über sehr geringe Distanzen. Um die Auswirkungen dieser Kraft spüren zu können, dürfen zwei Teilchen höchstens etwa 10^{-18} Meter voneinander entfernt sein. Diese Entfernung ist

¹⁹ F. Rasetti in E. Fermi: *Note e Memoire (Collected Papers)* Vol. I, Italia 1921–1938. Accademia Nazionale dei Lincei u. The University of Chicago Press, Rom u. Chicago 1962.

eindeutig zu gering, als dass wir die schwache Kraft mit bloßem Auge wahrnehmen könnten.

Dennoch ist die schwache Kraft mehr als ein Zeitvertreib für Elementarteilchen. Sie hinterlässt durchaus sichtbare Spuren in unserer Welt—so sichtbar wie die Sonne nämlich. In gewissem Sinne lag Bohr richtig mit seiner Vermutung, der Ursprung der Sterne liege in der Beta-Radioaktivität begründet, auch wenn eine Verletzung der Energieerhaltung nicht im Spiel war. Ebenso wie alle übrigen Sterne scheint die Sonne aufgrund thermonuklearer Prozesse, die von der schwachen Kraft angetrieben werden.

Der dritte Unterschied zwischen schwacher und elektromagnetischer Kraft liegt in ihrer Intensität. Entgegen Paulis erster Vermutung tritt das Neutrino mit Materie ausschließlich über die schwache Kraft in Wechselwirkung und ist deshalb unglaublich schwer zu fassen und mit unseren Detektoren kaum auszumachen. Dem Neutrino ist die ganze Welt ein nahezu vollkommen durchlässiges Medium. Zuverlässig aufhalten kann ein durch Beta-Radioaktivität freigesetztes Neutrino nur ein Eisenklotz von der Dicke der Distanz zwischen Erde und Alpha Centauri. Dass diese Kraft schwach genannt wird, hat gute Gründe.

Dennoch lassen sich Neutrinos experimentell beobachten. Um die verschwindend geringe Chance zu kompensieren, ein einzelnes Neutrino zu erfassen, setzen Experimentatoren Neutrinoströme von hoher Intensität ein, da mit zunehmender Teilchenzahl die Detektionswahrscheinlichkeit insgesamt steigt. Im Jahr 1956 erbrachten Clyde Cowan (1919–1974) und Frederick Reines (1918–1998, Nobelpreis 1995) am Kernreaktor von Savannah River im US-Bundesstaat South Carolina den ersten experimentellen Nachweis für die Existenz von Neutrinos. Gleich nach ihrer Entdeckung schickten die beiden amerikanischen Wissenschaftler ein Telegramm an Pauli. Der leerte zur Feier des Ereignisses mit seinen Freunden eine Kiste Champagner und antwortete dann mit einem kurzen Brief: »Danke für Mitteilung. Alles kommt zu dem, der warten kann. Pauli.«²⁰

²⁰ F. Reines: »The Detection of Pauli's Neutrino«, in H. B. Newman und T. Ypsilantis (Hrg.): *History of Original Ideas and Basic Discoveries in Particle Physics*. Plenum Press, New York 1996.

DIE STARKE KRAFT

Die Geschichte wird nur von starken Persönlichkeiten ertragen, die schwachen löscht sie vollends aus.

FRIEDRICH NIETZSCHE²¹

Nachdem nun feststand, dass der Atomkern aus Protonen und Neutronen, nicht aber aus Elektronen besteht, galt es herauszufinden, was diese Teilchen im Kern zusammenhält. Die Gravitation kam hierfür nicht in Frage: Sie ist für Kernpartikel viel zu schwach. Die elektromagnetische Kraft hat die falsche Wirkung: Sie stößt Protonen ab und trägt so zum Zerfall des Kerns und daher sicher nicht zu dessen Zusammenhalt bei. Nach Fermis Entdeckung der schwachen Kraft versuchten Werner Heisenberg und andere Physiker diese für die Erklärung der Stabilität von Atomkernen einzuspannen, doch sämtliche Versuche scheiterten.

Als nächstes war die Annahme einer neuartigen Kraft geboten. Diese hypothetische neue Wechselwirkung wurde die *starke Kernkraft* genannt, da ihre Intensität im Atomkern alle bekannten Kräfte übersteigen musste. Viel wusste man nicht über die starke Kraft, nur dass sie eine merkwürdige Eigenschaft besaß: Messungen der Streuung von Protonen und Neutronen hatten gezeigt, dass die starke Kraft in etwa dieselbe Wirkung auf beide Teilchen hatte. Für diese Eigenschaft wurde der Begriff *Ladungsunabhängigkeit* geprägt. Woher aber die starke Kraft kam, blieb ein vollkommenes Rätsel.

Im Jahr 1934 kam der japanische theoretische Physiker Hideki Yukawa (1907–1981, Nobelpreis 1949) auf einen Gedanken, der ihm einen Platz in der Wissenschaftsgeschichte sicherte: »Die Kernkraft wirkt auf extrem kleinen Distanzen. Meine neue Erkenntnis war, dass diese Distanz und die Masse des neuen Teilchens in einem umgekehrt proportionalen Verhältnis zueinander stehen.«²² Um die Bedeutung der Worte Yukawas besser zu verstehen, wollen wir einen einfachen Vergleich bemühen.

²¹ F. W. Nietzsche: *Unzeitgemäße Betrachtungen II* (1874).

²² H. Yukawa: *Tabibito (The Traveler)*. World Scientific, Singapur 1982.

Zwei sich zankende Brüder gehen an einem Wintertag zum Spielen nach draußen. Es kommt zum Streit und die beiden Jungs beginnen eine Schneeballschlacht. Die Schneebälle üben auf die Kinder eine Abstoßungskraft aus, die sie auseinandertreibt. Da die Brüder weit werfen können, bleibt diese Kraft auch über große Distanzen erhalten. Die Wogen glätten sich, allerdings nicht lange. Neue Anschuldigungen werden laut und münden in Beleidigungen, bis das Spiel härter wird. Schneebälle reichen nun nicht mehr aus; die Brüder schleudern jetzt Sandsäcke aufeinander, die sie in der Nähe gefunden haben. Sandsäcke sind deutlich schwerer als Schneebälle und lassen sich nicht sehr weit werfen. Die Abstoßungskraft, welche die Sandsäcke beim Auftreffen auf die beiden Rabauken freisetzen, ist sehr effektiv, aber sie wirkt nur über relativ geringe Distanzen.

Je schwerer das ausgetauschte Objekt, desto kürzer die Reichweite der Kraft. Dasselbe gilt für Teilchen: Die elektromagnetische Kraft—so Yukawas Argumentation—kann über jede beliebige Entfernung wirken und hat eine unendliche Reichweite, aus dem einfachen Grund, dass das Photon keine Masse besitzt. Besäße das Photon, der Vermittler der elektromagnetischen Kraft, eine Masse, wäre diese Kraft nur über kurze Entfernungen wirksam. Demnach—so Yukawas Schlussfolgerung—muss das Teilchen, das die starke Kraft vermittelt, schwer sein, was seinerseits erklärt, warum die Wechselwirkung zwischen Protonen und Neutronen nur über Distanzen innerhalb des Atomkerns funktioniert.

Ein Schneeball, der durch die Luft fliegt, vermittelt eine abstoßende Kraft zwischen den beiden Jungen. Photonen, die durch elektrische Ladungen ausgetauscht werden, vermitteln elektromagnetische Kräfte, die abstoßend (bei gleichnamigen Ladungen) oder anziehend (bei ungleichnamigen Ladungen) sein können. Ganz ähnlich üben Yukawas Teilchen, die zwischen Protonen und Neutronen ausgetauscht werden, eine anziehende Kraft aus, die den Kern zusammenhält. Anders als die masselosen Photonen aber sind Yukawas Teilchen schwer, sodass sich ihre Wirkung wie bei den schweren Sandsäcken nur über relativ kurze Entfernungen überträgt. Die starke Kraft ist sehr intensiv, aber nur über Entfernungen innerhalb des Kerns wirksam und nicht darüber hinaus.

Mithilfe experimenteller Daten zu den Wechselwirkungen im Kern konnte Yukawa nun die Masse des hypothetischen Teilchens berechnen, das für die starke Kraft verantwortlich zeichnet. Diesen Berechnungen zufolge musste die Masse des neuen Teilchens um etwa das 200-Fache über der Elektronenmasse liegen. Das Teilchen erhielt später die Bezeichnung *Meson* (vom griechischen Wort *mésos*, in der Mitte), da seine Masse zwischen der des Elektrons und jener des Protons liegt (das über 1.800 mal so schwer ist wie das Elektron). Als nächstes galt es herauszufinden, ob Yukawas Meson tatsächlich existierte.

Der leistungsstärkste Teilchenbeschleuniger des Universums ist das Universum selbst. Angetrieben von unterschiedlichen astronomischen Quellen erreichen die überwiegend aus Protonen und Atomkernen bestehenden kosmischen Strahlen enorme Energien und halten unsere Atmosphäre unablässig unter Beschuss, wobei sie bis zur Erdoberfläche vordringen. Die kosmischen Strahlen bildeten die erste Quelle, welche die Physiker für die Suche nach neuen Teilchen nutzten, zu deren Herstellung hochenergetische Kollisionen erforderlich sind.

Zur Detektion von Teilchen aus dem Aufprall kosmischer Strahlung auf die Atmosphäre setzten die Physiker *Nebelkammern* ein. Dieses Instrument wurde von Charles Wilson (1869–1959) in Cambridge bei meteorologischen Untersuchungen zu Wolkenformationen erfunden. Eine Nebelkammer ist ein mit Gas gefüllter Behälter, wobei die Bedingungen so definiert sind, dass ein geladenes Teilchen beim Durchqueren des Behälters die Kondensation des Gases zu winzigen Tröpfchen verursacht. Diese Tröpfchen bilden eine Spur und machen so die Bahn des Teilchens sichtbar, wie ein Kondensstreifen, den ein Flugzeug am Himmel hinterlässt. Die Masse des Teilchens lässt sich aus der Breite der Spur ableiten. Seine Ladung wird gemessen, indem man die Spur über ein Magnetfeld ablenkt.

Im Jahr 1936 arbeiteten Carl Anderson, der Entdecker des Positrons, und sein Student Seth Neddermeyer (1907–1988) am California Institute of Technology an der Analyse kosmischer Strahlen mithilfe von Nebelkammern. In den Spuren entdeckten sie ein neues Teilchen: Es hatte dieselbe Ladung wie ein Elektron, und seine Masse lag im Bereich des 100- bis 400-Fachen der Elektronenmasse, mit

einer maximalen Wahrscheinlichkeit des Faktors 200. Eine sensationelle Entdeckung: Yukawas hypothetisches Meson existiert tatsächlich.

»Raffiniert ist der Herrgott, aber boshaft ist er nicht.«²³ Mit diesen berühmten Worten kommentierte Einstein 1921 bei seinem ersten Besuch in Princeton Gerüchte über eine neue experimentelle Messung, die die Spezielle Relativitätstheorie zu widerlegen schien. Das Zitat wurde später in der Fine Hall, der alten Abteilung für Mathematik der Princeton University, über dem Kamin eingemeißelt. Weniger bekannt ist dagegen, dass Einstein in einem jener Momente der Frustration, die im Leben eines theoretischen Physikers durchaus vorkommen, einem Kollegen gegenüber gestand: »Ich bin mir nicht mehr so sicher. Vielleicht ist Er doch boshaft.«²⁴ Wie wir bald sehen werden, findet sich in der Geschichte um die Entdeckung des Mesons die zweite Sichtweise bestätigt.

Schon früh wurde der Verdacht laut, dass an der Entdeckung des Mesons irgendetwas faul war. Doch dann kam der Krieg und die Menschen hatten Wichtigeres zu tun. Der definitive Beweis für ein Problem in Andersons Messergebnissen ergab sich aus Experimenten, die Marcello Conversi (1917–1988), Ettore Pancini (1915–1981) und Oreste Piccioni (1915–2002) im Jahr 1946 abschlossen. Begonnen hatten diese Experimente während des Krieges, im Keller einer römischen Oberschule, die man aufgrund ihrer geografischen Nähe zum Vatikan ausgewählt hatte, um das Risiko einer Bombardierung gering zu halten. (Im modernen Sprachgebrauch bezeichnet man das als Reduzierung des Hintergrundrauschens.) Die elektronischen Bauteile ihres Versuchsaufbaus erstanden die Physiker während der nationalsozialistischen Besatzung Roms auf dem Schwarzmarkt. Pancini stieß erst am Ende des Krieges zu seinen beiden Kollegen, da er zuvor Brigaden des norditalienischen Widerstands befehligt hatte. Die Experimente der drei Italiener zeigten, dass das von Anderson entdeckte Teilchen nur sehr

²³ A. Pais: *Raffiniert ist der Herrgott . . .* (Subtle is the Lord, 1982). Dt. v. R. U. Sexl, H. Kühnelt u. E. Streeruwitz, Spektrum, Heidelberg 2000.

²⁴ J. Sayen: *Einstein in America*. Crown Publishers, New York 1985.

schwach mit dem Kern interagierte und daher nicht Yukawas Meson sein konnte, das die starke Kernkraft vermittelt.

Auf der Shelter-Island-Konferenz von 1947—einer der ereignisreichsten und berühmtesten Konferenzen in der Geschichte der Physik—schlug Robert Marshak (1916–1992) (später auch in einer gemeinsamen Veröffentlichung mit Hans Bethe) eine mögliche Erklärung für den Widerspruch vor. Es gebe, so Marshak, zwei Mesonen: ein *Myon*, welches Anderson entdeckt habe, und das *Pion*, was lediglich ein neuer Name für das von Yukawa vermutete Teilchen sei. Das Myon und das Pion hätten nichts miteinander zu tun und besäßen nur deshalb zufällig ungefähr die gleiche Masse, weil die Natur aus einer boshaften Laune heraus die Physiker habe konfus machen wollen. Beide Teilchen könnten durch kosmische Strahlen hervorgebracht werden, das Pion jedoch zerfalle so rasch, dass es sich nur in großen Höhen beobachten lasse. Das Myon dagegen könne auf die Erdoberfläche gelangen.

Dass bereits 1942 einige japanische Physiker denselben Gedanken geäußert hatten, war Marshak nicht bewusst, da der wissenschaftliche Austausch zwischen Japan und den USA zu jener Zeit aus erkennbaren Gründen ziemlich angespannt war. Hinzu kam, dass keiner der Wissenschaftler auf Shelter Island von einem sehr interessanten Ergebnis wusste, das man in der Alten Welt erzielt hatte.

Insbesondere an der Bristol University waren erfolgreich neue fotografische Methoden zur Detektion von Teilchen entwickelt worden. Die Methode fußt auf Fotoplatten (sogenannten Kernemulsionsplatten), die auf schnelle geladene Teilchen reagieren. Auf der entwickelten Platte sind als dunkle Spuren die Teilchenbahnen zu sehen. Die Herstellung dieser faktischen Fotografien von Teilchen ist methodisch so einfach, »sogar ein Theoretiker könnte dazu in der Lage sein«,²⁵ wie der theoretische Physiker Walter Heitler bemerkte, der zur Entwicklung dieser Methode beigetragen hat.

Bald nach Ende des Krieges brachten Giuseppe Occhialini (1907–1993) und Cecil Powell (1903–1969, Nobelpreis 1950) von der Bristol

²⁵ O. Lock: »The Discovery of the Pion«, *CERN Courier*, Juni 1997.

University mehrere Kernemulsionsplatten auf den 2.877 Meter hohen Pic du Midi in den französischen Pyrenäen. Heute befindet sich dort ein Observatorium; damals jedoch war der Gipfel nur schwer zugänglich. Durch einen glücklichen Umstand allerdings stellte dies für das Experiment kein Hindernis dar. Occhialini hatte nach der Bekanntschaft mit den Reizen des faschistischen Regimes 1937 Italien verlassen und war nach Brasilien gezogen. Mit dem Kriegseintritt Brasiliens jedoch war er zum feindlichen Ausländer geworden und hatte sich in den Bergen von Itatiaia versteckt gehalten und dort als Bergführer gearbeitet. Seine Fachkenntnisse in der Physik, aber auch in der Seilarbeit erwiesen sich bei den Aufbauarbeiten am Pic du Midi als äußerst nützlich.

Bei ihrem Experiment entdeckten Occhialini und Powell das Pion, ein Teilchen, das nur in großer Höhe sichtbar wird, weil es rasch zu Myonen zerfällt. César Lattes (1924–2005), ein brasilianischer Student, der Occhialini nach Bristol gefolgt war, transportierte die Platten zu einer meteorologischen Messstation auf dem 5.600 Meter hohen Chacaltaya in Bolivien. Die Entdeckung des Pions war damit endgültig bestätigt. Die Gruppe aus Bristol veröffentlichte ihre Ergebnisse im Oktober 1947, wenige Monate nach der Konferenz auf Shelter Island. Yukawas Eingebung hatte sich bestätigt: Die tatsächliche Existenz seines Mesons—des Pions—war bewiesen.

Aber die wechselvolle Geschichte der starken Kraft mit all ihren großartigen Entdeckungen und irrigen Interpretationen war damit noch nicht zu Ende. Das Pion hatte seinen Platz als Vermittler der starken Kraft zwar eingenommen, doch was hatte das Myon mit der Natur zu tun? Manche Teilchen (Protonen, Neutronen und Elektronen) sind dazu da, Materie hervorzubringen. Andere (Photonen und Pionen) sind dazu da, Kräfte hervorzubringen. Das Myon hingegen schien im Bauplan der Natur keinen Zweck zu erfüllen. »Wer hat das bestellt?«, fragte Isidor Isaac Rabi, als man das Myon identifiziert hatte.

Das war eine wirklich gute Frage, aber Rabi hatte auch gelernt Fragen zu stellen, ein Verdienst, das er allein seiner Mutter verdankte. »Meine Mutter hat aus mir einen Wissenschaftler gemacht, ohne das je zu wollen«, erinnert sich Rabi. »Alle anderen jüdischen Mütter in Brooklyn fragten ihre Kinder nach der Schule: ‚Und, hast du heute

etwas gelernt?' Aber nicht meine Mutter. ‚Izzy‘, pflegte sie zu sagen, ‚hast du heute eine gute Frage gestellt?' Durch diesen Unterschied—gute Fragen zu stellen—wurde ich zum Wissenschaftler.«²⁶

Statt einer Antwort auf Rabis Frage fanden die Physiker allerdings immer neue Teilchen. Von den 1950er Jahren an wurden, zunächst in der kosmischen Strahlung, später in Beschleunigern, zahlreiche neue Teilchen entdeckt—Teilchen, die ganze 10^{-24} Sekunden nach ihrer Entstehung zerfallen, Teilchen, die mit gewöhnlicher Materie oder Kräften nichts zu tun hatten. Die Liste der »Elementar«-Teilchen wurde so lang, dass dem griechischen Alphabet die Buchstaben zu ihrer Benennung ausgingen. Als Fermi einmal bemerkte, wie einer seiner Studenten überrascht schien, weil seinem Professor der Name eines Teilchens nicht gleich einfel, meinte er nur: »Junger Mann, wenn ich die Namen all dieser Teilchen behalten könnte, wäre ich Botaniker geworden.«²⁷

Die Lage erschien vollkommen unübersichtlich. Es wurde offenbar, dass Yukawas Erklärung der starken Kraft unvollständig oder sogar falsch war. »Sparsam ist die Natur . . . nicht mit Teilchen oder Kräften, sondern mit Prinzipien«,²⁸ wird der theoretische Physiker Abdus Salam zitiert. Nur hatte zum damaligen Zeitpunkt keiner auch nur den leisesten Schimmer, worin diese Grundsätze bestanden.

²⁶ Zitiert in »Great Minds Start With Questions«, *Parents Magazine*, September 1993.

²⁷ Der Student war Leon Lederman, der später den Nobelpreis für seine Entdeckung des Myon-Neutrinos erhielt. Die Begebenheit wird geschildert in L. Lederman und D. Teresi: *The God Particle*. Dell Publishing, New York 1993.

²⁸ S. Weinberg: *Der Traum von der Einheit des Universums (Dreams of a Final Theory, 1993)*. Dt. v. F. Giese, Bertelsmann, München 1993.

Odyssee im Zeptoraum

Eine Reise in die Physik des LHC

Giudice, G.F.

2012, XIV, 372 S. 56 Abb., Hardcover

ISBN: 978-3-642-22394-5