

## 6. Antimaterie

### 6.1 Die erstaunliche Kraft der Mathematik

Das Elektron war schon seit der Jahrhundertwende ein wohl studiertes und – so glaubte man – wohl verstandenes Teilchen. Es hatte eine Masse, eine Ladung und, wie man Anfang der zwanziger Jahre herausgefunden hatte, auch einen Spin, einen Drehimpuls, wie ein Kinderkreisel. Auch die Wellengleichung, die Schrödinger vorgeschlagen hatte, um die Bahnen der Elektronen um den Kern zu beschreiben, war recht erfolgreich, aber es gab auch noch gewisse Diskrepanzen zwischen der Rechnung und den Messungen. Das schien, so vermutete man, daran zu liegen, dass sich die Elektronen um den Atomkern doch recht schnell bewegen und man die relativistischen Effekte nicht mehr ganz vernachlässigen konnte. Schrödinger selbst versuchte seine Gleichung so abzuändern, dass sie auch mit der Relativitätstheorie verträglich ist, aber konnte gewisse Probleme nicht in den Griff bekommen. Erst Dirac gelang das im Jahre 1928. Dirac war bekannt als sehr formaler Denker und stellte aus allgemeinen Prinzipien eine neue Gleichung auf, die folgenden Forderungen genügte:

- a. Sie sollte linear in den Ableitungen nach Raum und Zeit sein – eine rein mathematische Forderung.
- b. Sie sollte im Einklang mit der Speziellen Relativitätstheorie Einsteins stehen.

Die Lösungen dieser Gleichung für das Wasserstoffatom zeigten gegenüber der Lösung aus der Schrödingergleichung folgende Vorteile:

- a. Die berechneten Energieniveaus stimmten besser mit den experimentellen Daten überein.
- b. Die Lösung implizierte, dass die Elektronen einen Spin und ein magnetisches Moment haben, ohne dass diese Eigenschaften in die Gleichung eingearbeitet waren.
- c. Zusätzlich zum Spin tauchte in der Lösung ein Anteil auf, der ein Teilchen beschreibt, das die gleiche Masse wie das Elektron, aber eine positive Ladung und – ganz unverständlich – eine negative Energie hat.

An dieser Stelle wollen wir eine Bemerkung zur Rolle der Mathematik in der Physik machen. Mathematik ist formalisiertes logisches Denken, das sich nach vorgegebenen Regeln vollzieht. Dabei kann es geschehen, dass man zu völlig neuen Erkenntnissen gelangt, die sich in der Physik jedoch noch der experimentellen Überprüfung stellen müssen. Für die Dirac-Gleichung hieß das: Aus allgemein postulierten Prinzipien ergab sich die Existenz des Elektronenspins mit dem bereits bekannten magnetischen Moment. Damit war der Spin mathematisch verstanden. Es tauchten jedoch neue Komplikationen auf, nämlich Lösungen mit negativer Energie.

Dirac brauchte zwei Jahre, um diese zu verstehen: Es musste neben dem Elektron noch ein anderes Teilchen geben, eine Art Spiegel- oder Antiteilchen, das sich wie ein positiv geladenes Elektron verhält. Gleichzeitig deutete dessen negative Energie darauf hin, dass Elektron und Positron, wie das "Spiegelteilchen" später genannt wurde, irgendwie ihre Energien zusammenbringen können und von beiden "nichts" übrig bleibt.

## 6.2 "Spuren aus dem Nichts": Elektron-Positron-Erzeugung

Zwei Jahre später entdeckte Anderson das Positron in einer Nebelkammer.

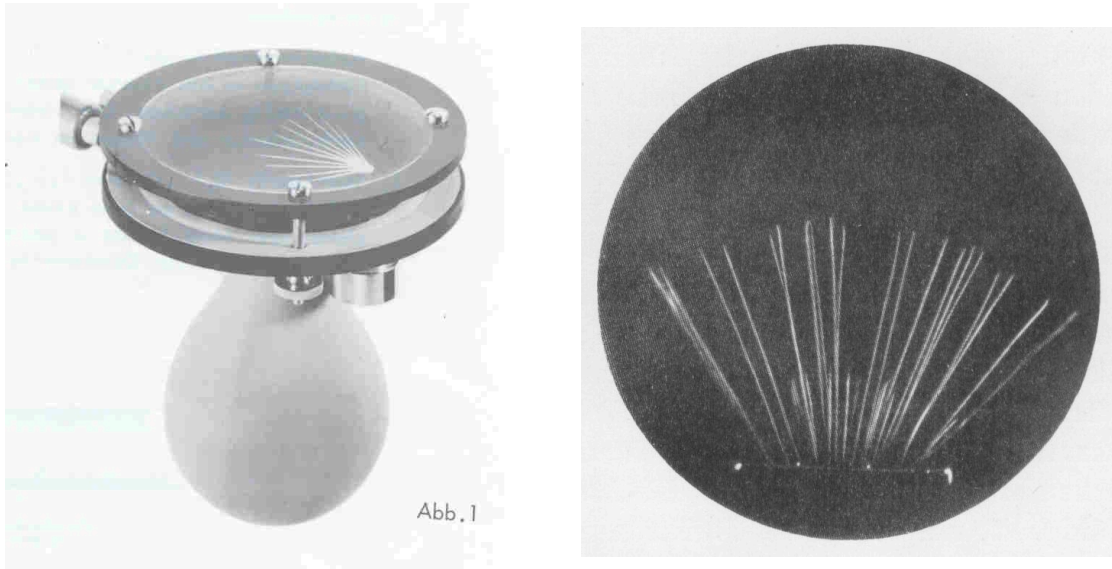


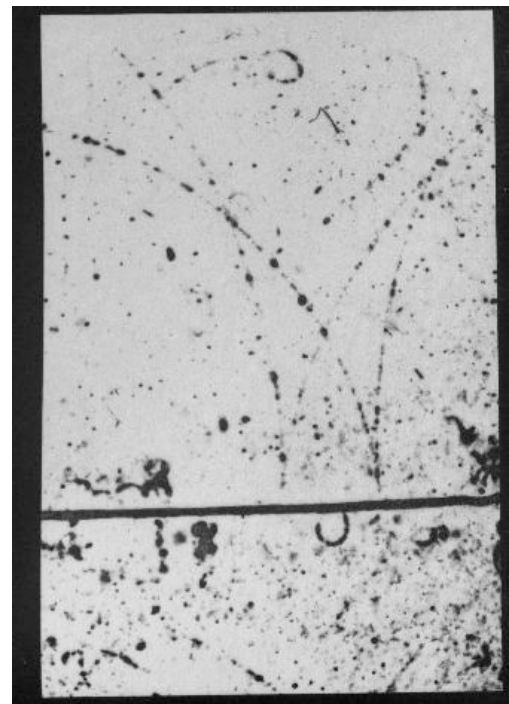
Abb. 6.1: Nebelkammer (links) zum Nachweis von ionisierender Strahlung (rechts).  
Die Spuren entstehen als Nebeltröpfchen entlang der Bahn, die das ionisierende Teilchen durchlaufen hat.

Er schickte Gamma Strahlung, eine Art harter Röntgenstrahlung, in eine Nebelkammer, die in der Kammer keine Spuren hinterließ. Die Strahlung traf dann innerhalb der Kammer auf eine Bleiplatte und erzeugte hinter der Platte zwei Spuren, die entgegengesetzt gekrümmt waren. Die Gamma Strahlung war offensichtlich in zwei geladene

Abb. 6.2: Paarerzeugung

Bildung von Elektron-Positron-Paaren in einer Bleifolie. Die  $\gamma$ -Strahlung kommt von unten. Oberhalb der Bleiplatte sieht man zwei Elektron-Positron-Paare in einem Magnetfeld V-förmig auseinanderlaufen.

Teilchen umgewandelt worden. Da die Nebelkammer in einem Magnetfeld untergebracht war, konnte man aus der Krümmung der Spuren direkt die Vorzeichen der Ladungen erkennen. Eines dieser Teilchen musste negativ, das andere positiv geladen sein. Da die Krümmung der beiden Teilchen etwa gleich groß war, konnte es sich nicht um ein Elektron-Proton-Paar handeln. (Das waren damals die einzig bekannten Teilchen mit negativer bzw. positiver Ladung).



Wenn das negative Teilchen ein Elektron war, dann musste das positive das von Dirac vorausgesagte Positron sein. Genauere Experimente bestätigten diese Interpretation. Was war geschehen? Das einlaufende Energiequant aus hartem Licht wandelte sich in ein Elektron-Positron-Paar um (Die Blei-Atome spielen dabei eine untergeordnete Rolle.) Da Positron und Elektron die gleiche Masse haben, und mit jeder Masse eine Ruheenergie  $E = m \cdot c^2$  verbunden ist, muss das einlaufende Energiequant mindestens eine Energie von  $2 \cdot m \cdot c^2$  mitgebracht haben, um ein Teilchen-Antiteilchen Paar zu erzeugen. Aber warum gerade ein Paar? Warum konnte nicht nur ein Elektron erzeugt werden? Es gibt ein ganz strenges Gesetz: Die Gesamtladung, muss bei allen Prozessen erhalten sein. Da das einlaufende Gamma keine Ladung trägt, muss auch am Ende die Gesamtladung Null sein: Die positiven und negativen Ladungen müssen sich genau gegeneinander aufheben. Natürlich würde dieses Gesetz der Ladungserhaltung erlauben, dass ein Elektron und ein Proton erzeugt werden. Aber da gibt es noch andere Gesetze, die das verbieten: Die Protonen tragen neben ihrer elektrischen Ladung noch eine positive Baryonenladung, während die Baryonenladung der Elektronen null ist. Da auch die Baryonengesamtladung erhalten sein muss, kann auch aus dem Gamma kein Proton-Elektron-Paar entstehen.

### 6.3 Antiteilchen - Antimaterie

Zu jedem Teilchen gehört ein Antiteilchen. In manchen Eigenschaften stimmen beide überein, in anderen unterscheiden sie sich:

- a. Die Massen von Teilchen und Antiteilchen stimmen exakt überein. Beide, Teilchen und Antiteilchen spüren dieselbe Schwerkraft, fallen also beide nach "unten."
- b. Sie unterscheiden sich in der elektrischen Ladung: Das Elektron ist negativ, das Positron ist positiv geladen, das Proton positiv, das Antiproton negativ. Wenn das Teilchen elektrisch neutral ist, dann gilt das auch für das Antiteilchen. So sind z.B. Neutron und Antineutron elektrisch neutral.
- c. Unter Umständen unterscheiden sich Teilchen und Antiteilchen noch durch andere innere Ladungen wie die oben erwähnte Baryonenladung.
- d. Es gibt auch Fälle, in denen Teilchen und Antiteilchen identisch sind. Ein Beispiel hierfür ist das Lichtteilchen, das Photon.

Neben der Erzeugung von Teilchen-Antiteilchen-Paaren aus Photonen ist die Umkehrung, die Zerstrahlung, ein wichtiger Prozess:

Die Erzeugung von Elektron-Positron-Paaren aus einem Photon haben wir oben schon diskutiert. Das Photon braucht nur genügend Energie mitzubringen, um die Ruheenergie der beiden Teilchen aufzubringen. Umgekehrt: wenn Teilchen und Antiteilchen aufeinandertreffen, zerstrahlen sie in zwei Photonen, die die Ruheenergie wegtragen.

So wie die Atome der Materie aus positiven Kernen und negativen Elektronen aufgebaut sind, kreisen in der Antimaterie die positiven Positronen um die negativ geladenen Anti-Atomkerne. Anti-Wasserstoffatome sind vor einigen Jahren im Labor erzeugt worden. Nach allem, was wir wissen, sollte die Chemie in der Antiwelt genauso ablaufen wie in unserer Welt. So könnte es auch einen Antimenschen geben, der durch den bloßen Anblick nicht von einem "normalen" Menschen zu unterscheiden wäre. Allerdings sollten die beiden sich nicht die Hände schütteln, da sie dann im Nu

zerstrahlen würden. Wegen dieser Eigenschaft kann es auf der Erde keine Antimaterie geben, außer im Labor, wo man sie kurzzeitig erzeugen kann.

#### 6.4 Materie und Antimaterie bei der Entstehung unsere Universums

Materie und Antimaterie sind im gewissen Sinn gleichberechtigt. Warum sollte das Universum aus Materie bestehen und nicht auch aus Antimaterie? So fragte man sich bald, nachdem man die Antimaterie entdeckt hatte. Auch wenn auf der Erde nur Materie vorhanden ist, könnten ferne Sternsysteme aus Antimaterie aufgebaut sein. So ganz genau wissen wir es heute noch nicht, aber es gibt Hinweise, dass es im All nur eine Sorte Materie gibt.

Aber warum diese Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie? Ganz genau wissen wir auch das heute noch nicht. Man stellt sich nämlich vor, dass am Anfang, im Urknall, die Welt symmetrisch gewesen ist: Materie und Antimaterie waren gleich häufig vertreten. Erst während der Entwicklung des Universums, und zwar in den ersten winzigen Bruchteilen einer Sekunde ( $10^{-10}$  s), entstand ein ganz winziger Überschuss von Materie. Während der ersten Sekunde nach dem Urknall zerstrahlte dann alle Antimaterie mit Materie zu Photonen und nur der winzige Überschuss blieb als Materie übrig. Dass es nur ein winziger Überschuss ist, können wir heute messen. Die Photonen aus der Zerstrahlungsphase sind heute noch vorhanden, und wir wissen auch, wie viele Atome es heute gibt: Man misst einige Atome auf  $10^{10}$  Photonen! Also hat der Überschuss von Materie über Antimaterie nur etwa ein Milliardstel betragen, also ganz, ganz wenig. Hätte es diesen Überschuss nicht gegeben, so würden wir heute nicht existieren. Das Weltall wäre "leer", es bestünde aus nichts als Photonen.

#### 6.5 Biographie: Paul Adrien Maurice Dirac (1902 – 1984)

Der Sohn eines Schweizer Französischlehrers und einer Walliserin kam in Bristol in England zur Welt. Die sehr strenge Erziehung durch seinen Vater haben das Leben Diracs entscheidend geprägt. Seine außergewöhnlichen mathematischen Fähigkeiten fielen schon in der Grundschule auf. Als er 1914 die Secondary School besuchte, brachte ihm der 1. Weltkrieg als einem der wenigen Glück. Da die älteren Schüler zum Militärdienst mussten, erhielten die jüngeren früher als normal Zugang zu den naturwissenschaftlichen Übungsräumen, was Diracs Interessen sehr entgegenkam.

Obwohl seine große Liebe der Mathematik galt, wollte er auf keinen Fall Mathematiklehrer werden. Aus diesem Grunde studierte zunächst von 1918 bis 1921 Elektrotechnik und anschließend von 1921 bis 1923 Mathematik an der Universität in Bristol.

Auf Grund eines hervorragendem Abschlusses erhielt er ein Forschungsstipendium für das St. John's College in Cambridge. Dort wollte er eigentlich bei Cunningham über die Allgemeine Relativitätstheorie arbeiten, doch dieser hatte bereits zu viele



Forschungsstudenten. So ging Dirac zu Fowler, dem führenden Theoretiker in Cambridge, der sich in der Quantentheorie der Atome sehr gut auskannte. Als Dirac 1926 mit einer Arbeit zur Quantenmechanik promovierte, hatte er auf diesem Gebiet bereits 11 Arbeiten zur Veröffentlichung eingereicht.

Bevor er 1927 Fellow des St. John's College in Cambridge wurde, ging er für einige Zeit nach Kopenhagen zu N. Bohr, nach Göttingen zu R. Oppenheimer, M. Born und J. Franck und nach Leiden zu P. Ehrenfest. 1928 folgte sein erster Besuch in der Sowjetunion, der nicht der letzte sein sollte. Im gleichen Jahr stellte er die nach ihm benannte Dirac-Gleichung auf, die aus einer Verbindung zwischen Quantenmechanik und Spezieller Relativitätstheorie erwuchs.

Nach Besuchen in den USA und in Japan veröffentlichte er 1930 sein berühmtes Buch "The Principles of Quantum Mechanics", wofür er 1933 den Nobelpreis für Physik erhielt, den er zunächst nicht annehmen wollte, da er jede Art von Publicity hasste.

Dirac gilt zusammen mit Werner Heisenberg, Niels Bohr und Max Born als Begründer der modernen Quantenmechanik, insbesondere ihrer geschlossenen, mathematischen Formulierung.

Er wurde Fellow der Royal Society und erhielt 1932 einen Ruf auf den Lucasischen Lehrstuhl für Mathematik an der Universität Cambridge, den er dann 37 Jahre innehatte. Dieser Lehrstuhl war ursprünglich für Newton eingerichtet worden und wird derzeit von Stephen Hawking besetzt.

Bei einem Besuch des Institute for Advanced Study in Princeton lernte er im Jahre 1934 über seinen Freund Wigner dessen Schwester kennen, die er 1937 heiratete.

Während des 2. Weltkrieges war er an der Trennung der Uranisotope und an der Entwicklung von Kernwaffen beteiligt. Daher durfte er auch nach dem Kriege die Sowjetunion bis 1957 nicht wieder besuchen.

Im Jahre 1969 zog Dirac mit seiner Familie nach Florida um und lehrte von 1971 bis zu seiner Emeritierung im Jahre 1973 an der Florida State University.

Dirac wurden für seine Arbeiten viele Ehrungen angetragen. Da er Ehrendoktorwürden ablehnte, Aufnahme in Akademien und wissenschaftlichen Gesellschaften andererseits annahm, war er Mitglied in sehr vielen solchen Institutionen.

Ferner sind viele Anekdoten bekannt, die sich um Diracs Person ranken. Meist handeln sie davon, dass er genau das sagte, was er meinte, aber nicht mehr. Als einmal jemand während einer höflichen Unterhaltung bei Tisch bemerkte, dass es windig sei, stand Dirac auf, ging zur Tür, schaute heraus, kam zum Tisch zurück und antwortete, dass es in der Tat windig sei. Heisenberg berichtet, wie ihn Dirac an einem Tanzabend fragte: "Heisenberg, warum tanzen Sie?" Er antwortete: "Weil es eine Freude ist, mit netten Mädchen zu tanzen." Nach einigen schweigsamen Minuten erkundigte sich Dirac dann: "Heisenberg, warum wissen Sie vorher, welche Mädchen nett sind?"

Spötter sagten im Scherz sogar, dass Diracs gesprochener Wortschatz nur aus "Ja", "Nein" und "Ich weiß es nicht" bestünde. Er selbst erklärte seine Wortkargheit dadurch, dass ihm in der Schule beigebracht worden sei, niemals einen Satz zu beginnen, ohne das Ende zu kennen. Dies mag vieles über seinen Konversationsstil, aber auch über die wunderbar formulierten Sätze in seinen Büchern und Veröffentlichungen erklären.

Quellen:

1. <http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Mathematicians/Dirac.html>
2. Armin Hermann 'Lexikon - Geschichte der Physik A-Z', Aulis-Verlag Deubner & Co KG 1978