

Happy Birthday Elektron - zum 100. Geburtstag der Entdeckung des Elektrons - eine Reise durch hundert Jahre Physik

Henning Hoerber , Armin Wachter

Als Lord Ernest Rutherford, einer der bedeutendsten Physiker der Jahrhundertwende, im Jahre 1895 die Thomsons besuchte, war er sehr beeindruckt. Er schrieb an seine spätere Frau Mary: „Aber um die Sensation des Hauses nicht zu vergessen; Ich habe auch das einzige Kind, den dreieinhalbjährigen Jungen, gesehen, einen strammen Stammhalter, typisch angelsächsisch, aber wahrhaft hübsch und wohlgeraten.“ Das Kind war George Paget Thomson, der Vater Joseph John Thomson. Damals hat Rutherford natürlich noch nicht ahnen können, daß der Vater kurze Zeit später der Entdecker des Elektrons werden sollte, während sein Sohn wenige Jahre darauf durch seine Arbeiten über Interferenzen an Elektronenstrahlen den Beweis für die Wellen-Natur der Elektronen erbringen würde. Beide Thomsons erhielten für Ihre Arbeiten den Nobelpreis, J. J. im Jahre 1906, G. P. im Jahre 1937. Was heutzutage im modernen Sprachgebrauch der Quantenmechanik als *Welle-Teilchen Dualismus* bezeichnet wird, zog sich also durch die Thomson-Familie als *Vater-Sohn Dualismus!*

Was also ist dieses Elektron, dessen Geburtsstunde - zumindest als Teilchen - sich dieses Jahr zum hundersten Mal jährt? Elementar ist es, so der Vater, unteilbar, ein punktförmiges Etwas mit einer Masse, etwa 1837 mal kleiner als die des Protons und einer negativen elektrischen Ladung, deren Größe exakt mit der des positiv geladenen Protons übereinstimmt. Mehr nicht! Kennt man ein Elektron, kennt man sie alle; sie sind sich alle gleich in ihren elementaren Eigenschaften. Noch nie ist ein Elektron beobachtet worden, das auch nur ein Prozentelchen von diesen Werten abweicht. Thomson war es 1897 gelungen, nachzuweisen, daß Kathodenstrahlen, die er in einer kleinen Vakuumröhre beschleunigte, ein Ladungs- zu Massenverhältnis hatten, welches deutlich größer war als für alle bis dato bekannten Teilchen. Obwohl er damals recht un-

genau maß - statt 1837 bekam er etwa den Wert 1000 - waren seine Versuchsreihen doch ausreichend, ihn zu der Hypothese von einer „Materie in einem neuen Zustand“ zu bewegen (am 30. April, 1897). Das Elektron, Leichtestes aller geladenen Teilchen, war gefunden. Noch heute sind die Masse und Ladung des Elektrons - neben der Lichtgeschwindigkeit und dem Planckschen Wirkungsquantum der Quantentheorie - die fundamentalen Naturkonstanten der Atomphysik.

Welle ist es, sagt der Sohn, es verhält sich so, wie man es justament von einer Licht- oder Wasserwelle erwartet, es wird gebeugt und kann interferieren, d.h. die typischen Muster von Verstärkung und Auslöschung zeigen, wie man es etwa bei Wasserwelle beobachtet, die aufeinander zulaufen und sich durchdringen. Was aber soll es eigentlich sein, das dort wie eine Welle „schwappt“? Im Fall der Wasserwelle ist es die Wasseroberfläche, bei akustischen Wellen oszilliert die Luftdichte - und bei Elektronen?

Welle-Teilchen-Dualismus

Wer von beiden hat nun Recht? Wir wissen aus unserer alltäglichen Erfahrung, daß etwas entweder ein festes, räumlich abgegrenztes Objekt ist, das eine Masse besitzt, oder aber eine Welle und als solche sich ohne natürliche räumliche Begrenzung ausbreitet. Dies war im wesentlichen auch der Standpunkt der sog. *klassischen Physik* des ausgehenden 19. Jahrhunderts, welche ebenfalls fein säuberlich zwischen wellen- und teilchenartigen Phänomenen unterschied. Für die materielle Seite gab es Theorien wie z.B. die Newonsche Mechanik, die alle bekannten korpuskularen Phänomene (etwa die Bewegung der Planeten im Gravitationsfeld der Sonne) zufriedenstellend beschreiben konnte, während z.B. die klassische Elektrodynamik von James Clerk Maxwell für die Beschreibung elektromagneti-

scher Wellenphänomene erfolgreich angewendet wurde. Man kann sich vielleicht vorstellen, vor welchem Dilemma damals die Physiker angesichts der sich klassisch total widersprechenden Entdeckungen der beiden Thomsons und vieler anderer Wissenschaftler standen. Hier ging es nicht nur um die Modifikation einer Theorie, um neue Erkenntnisse widerspruchsfrei in bestehende Gedankengebäude einzubetten, sondern es wurden die Grundfeste der Physik erschüttert und damit Jahrhunderte alte Denktraditionen in Frage gestellt.

Quantentheorie

Durch so hervorragende Physiker wie Niels Bohr, Albert Einstein, Max Planck, Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger, Paul Dirac, Richard Feynman und viele andere ist es innerhalb von nur wenigen Jahrzehnten gelungen, diese Krise zu überwinden und in einen großartigen Erfolg des menschlichen Geistes umzumünzen. Nach dem heutigen Verständnis der Quantenmechanik gibt die Natur in Experimenten nur den Teil preis, den das Experiment, und damit der Physiker als Erfinder des Experiments, zuläßt. Insofern ist Experimentieren eine überaus subjektive Angelegenheit. Die aus Experimenten folgenden Ergebnisse bereichern nicht nur das Wissen über die Natur, sondern auch das Wissen darüber, wie wir die Natur konzeptionell zu beschreiben haben. Die Wellenmechanik der Quantentheorie ist dabei „nur“ ein Rezept, eine Rechenvorschrift für die Ausbreitung der „Elektronenwelle“; die Intensität dieser Welle ist proportional zu der Wahrscheinlichkeit, das Elektron an einem bestimmten Ort anzutreffen. Diese Vorschrift bezüglich des Zusammenhangs zwischen der Intensität der Welle und der Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Elektrons führt also ein Element des Indeterminismus ein, macht die Theorie probabilistisch. Man kann demzufolge nicht mehr von der „Bahn“ eines Elektrons im klassischen Sinne, wie etwa der Bahn einer Billiardkugel, reden. Die Mathematik der Wellenausbreitung des Elektrons ist jedoch völlig deterministisch und analog der Ausbreitung klassischer

Wellen. Denn obwohl die Quantentheorie nicht in der Lage ist, den Zustand des Elektrons mit Sicherheit (d.h. mit Wahrscheinlichkeit *Eins*) vorherzusagen, gehorcht das Elektron doch einer deterministischen Gleichung, der sog. *Schrödingergleichung*. Nicht der Zustand eines Elektrons ist für alle Zeiten durch diese Gleichung vorherbestimmt, wie beispielsweise die Planetenbahnen durch die Newtonschen Gesetze, sondern seine Wahrscheinlichkeitsverteilung. Es ist gerade dieses Wahrscheinlichkeitskonzept, welches es ermöglicht, den Welle-Teilchen-Konflikt zu beseitigen, allerdings nur unter Inkaufnahme eines größeren Abstraktionsgrades.

Die Sache ist also kompliziert geworden. Aus dem simplen Elementarteilchen mit Masse und Ladung ist, dank der Quantenmechanik, etwas Abstraktes geworden, das sich, geradezu launisch, mal so mal so verhält. Und es kommt noch schöner. Im Jahre 1925 schlugen zwei Physiker aus Leiden, Uhlenbeck und Goudsmit, vor, daß das Elektron einen Spin habe, eine Art Eigendrehimpuls; es dreht sich, wie die Erde, um sich selbst, und das, obwohl es immer noch als punktförmig betrachtet wird! Dieser Spin des Elektrons kann aber nicht jeden beliebigen Wert annehmen; er ist, wie praktisch alle Größen in der Quantenmechanik, *gequantelt* und kann somit nur ganz bestimmte Werte annehmen. Fast hätte ein anderer großer Physiker, Wolfgang Pauli, die Veröffentlichung der Arbeit von Goudsmit und Uhlenbeck verhindert, da er meinte, ein Faktor 2 in einer Formel stehe im Widerspruch zu ihren Versuchsergebnissen. Ein seltener Irrtum Paulis!

Schon sehr bald nach der Formulierung der Quantentheorie sah man, daß sie – trotz aller Erfolge – nicht die volle Beschreibung des Elektrons liefern konnte, da sie eine nichtrelativistische Theorie ist und als solche nur den Grenzfall kleiner Geschwindigkeiten (im Vergleich zur Lichtgeschwindigkeit) abdeckt. Durch ein geniales Konzept von Dirac in den dreißiger Jahren gelang es, die Quantenmechanik zu einer relativistischen Theorie zu erweitern, wel-

che wiederum neue Einsichten für die Beschreibung des Elektrons bescherte. Der Spin etwa, den Uhlenbeck und Goudsmit brauchten, um ihre Beobachtungen von Atomspektren erklären zu können, ergab sich nun auf natürliche Weise aus der Diracschen Theorie. Ein weiterer großer Erfolg dieser relativistischen Quantenmechanik liegt in der Vorhersage von Antimaterie. Zum Elektron sollte demnach ein Antiteilchen, das *Positron*, existieren, welches sich dadurch auszeichnet, daß es die selben raumzeitlichen Eigenschaften wie z.B. Masse oder Spin besitzt, aber in den inneren Freiheitsgraden, etwa der elektrischen Ladung, genau entgegengesetzt ist. Dies wird übrigens auch für jedes andere Teilchen vorausgesagt und wurde inzwischen bestens experimentell bestätigt.

Quantenelektrodynamik

Nachdem nun die quantisierte Form der Mechanik, die relativistische Quantenmechanik, erfolgreich etabliert war, lag es nahe, in ähnlicher Weise eine Quantisierung der klassischen Elektrodynamik zu versuchen, d.h. eine Theorie des quantisierten elektromagnetischen Feldes zu formulieren. Dies gelang Richard Feynman, Julian Schwinger und Shinichiro Tomonaga tatsächlich in Form der sog. *Quantenelektrodynamik* in den vierziger Jahren. Aus ihr ergeben sich sehr bizarre Konsequenzen: Das Vakuum z.B. ist alles andere als leer. Dies hat damit zu tun, daß es in der Mikrowelt der Quantentheorie nach dem *Heisenbergschen Unschärfeprinzip* möglich ist, Energie zu borgen, wenn auch nur für kurze Zeit! Je kürzer die Dauer des Energie-Kredites, desto höher die erlaubte Energie-Entnahme. Das Vakuum, in dem sich z.B. die Elektronen befanden, die J. J. Thomson bei seiner Massenmessung untersuchte, ist voll von solchen Heisenbergschen Energiekrediten. So kann etwa aus dem Nichts ein Elektron-Positron-Paar entstehen, das dann aber nur so kurze Zeit existiert, daß man es nicht richtig zu fassen bekommt. Und auch andere Teilchen sind dabei, das Photon z.B., welches als eine Art Nachrichtenträger die elektromagnetische Kraft

zwischen Elektronen vermittelt. Für das Elektron selbst hat das ungeheure Auswirkungen: Es kann sich gar nicht isoliert zeigen, da es untrennbar mit diesen Energie-Fluktuationen des Vakuums verbunden ist. Gleich einem Schwarm Mücken an einem warmen Sommerabend ist das Elektron permanent von dieser „virtuellen Teilchenwolke“ umgeben. In der Quantenelektrodynamik spiegelt sich diese Tatsache darin wider, daß man unendlich große Resultate erhält, wenn man die „nackte Masse“ des Elektrons auszurechnen versucht. Erst zu Beginn der fünfziger Jahre gelang es, dieses schwierige mathematische Problem zu lösen. Man erkannte, daß sich die Austausch-Prozesse des Elektrons mit den Vakuum-Fluktuationen so anordnen lassen, daß jedem negativ unendlichen Beitrag genau ein gleich großer positiver gegenübersteht. Das, was übrig bleibt, ist dann tatsächlich ein endlicher Wert, der mit der Theorie verglichen werden kann. Es klingt bizarr, aber es funktioniert.

Die Quantenelektrodynamik beinhaltet unser heutiges Wissen über das Elektron. Sie gilt als eine der experimentell am besten verifizierten Theorien, deren Gültigkeitsbereich zumindest bis zu Abständen von 10^{-16} cm hinunterreicht. Mathematisch betrachtet basiert die Theorie auf wenigen Symmetrie-Prinzipien, die heutzutage als fundamental angesehen werden. Es ist in der Tat gelungen, die Ideen der Quantenelektrodynamik auf alle fundamentalen Kräfte auszuweiten, mit Ausnahme der Gravitation. Somit ist die Quantenelektrodynamik gewissermaßen das Flaggship aller Quantenfeldtheorien, welche die Dynamik elementarster Teilchen beschreiben.

Standard Modell

Diese Betrachtungsweise hat sich in den letzten zwanzig Jahren so in der Elementarteilchenphysik etabliert, daß sie heute schon unter dem Namen „Standard-Modell“ gehandelt wird. Doch Schluß ist damit sicher nicht. Zum einen wird es von vielen Physikern als unbefriedigend empfunden, daß die Theorie nicht in der Lage ist, *alle* Naturkonstanten vorherzusagen; so sind

auch die Masse und die Ladung des Elektrons nur Parameter der Theorie, die, sozusagen von Hand, eingefügt werden müssen. Zum anderen hat die Generation heutiger Physiker kein sehnlicheres Ziel, als neue aufregende Phänomene zu entdecken, die möglicherweise die Theorie des Standard-Modells in Frage stellen. Kein Standard währt ewig!

Fast scheint es eine Laune der Natur zu sein, daß just zum 100. Geburtstag des Elektrons die Zeichen dazu gar nicht so schlecht stehen. Physiker am DESY in Hamburg, erzeugen derzeit fieberhaft neue Daten, die daraufhin untersucht werden, ob eine neue Art der Wechselwirkung zwischen Positron, also dem Antiteilchen des Elektrons, und dem Quark, einem weiteren Elementarteilchen, existiert. Diese Idee wurde vor kurzem in einem aktuellen Forschungspapier präsentiert. Eins steht fest, auch hundert Jahre nach Thomsons bahnbrechender Entdeckung: spannend ist es noch immer!