
Physik vor 1900

In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts war für die klassische Physik die Welt noch in Ordnung. In diesem Zusammenhang wird oft der Physiker Philipp von Jolly zitiert, der dem jungen Max Planck 1874 von einem Studium der Theoretischen Physik abriet (Planck 1933): „Die Physik ist eine hochentwickelte, nahezu voll ausgereifte Wissenschaft, die nunmehr, nachdem ihr durch die Entdeckung der Energie gewissermaßen die Krone aufgesetzt wurde, wohl bald ihre endgültige stabile Form annehmen wird. Wohl gibt es vielleicht in einem oder dem anderen Winkel noch ein Stäubchen oder ein Bläschen zu prüfen und einzuordnen, aber das System als Ganzes steht ziemlich gesichert da, und die Theoretische Physik nähert sich merklich demjenigen Grade der Vollendung, wie ihn etwa die Geometrie schon seit Jahrhunderten besitzt.“

Auf den Erkenntnissen von Galileo Galilei und Johannes Kepler aufbauend, vollzog Isaac Newton in seinem Hauptwerk „*Mathematische Prinzipien der Physik*“ (1687) die erste große Synthese der Physik. Der Fall seines berühmten Apfels vom Baum und die Planetenbahnen beruhen auf demselben universellen Gesetz der Massenanziehung (Gravitationsgesetz). Vor allem durch Joseph-Louis Lagrange Ende des 18. Jahrhunderts und dann durch William Hamilton in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts erhielt die klassische Mechanik ihre endgültige Form.

Die Autorität Newtons zeigte sich auch in der Entwicklung der Theorie des Lichts. Da Newton das Licht als aus kleinen Teilchen zusammengesetzt erklärt hatte, verschwand die konkurrierende Wellentheorie für 100 Jahre von der Bildfläche. Erst zu Beginn des 19. Jahrhunderts fanden sich unwiderlegbare Hinweise auf die Wellennatur des Lichts (Interferenz, Beugung, Polarisation). Parallel zu diesen Entdeckungen wurden die Erscheinungen der Elektrizität und des Magnetismus untersucht. Die zweite große Synthese der Physik erfolgte 1864 durch James Maxwell, der an die Vorstellungen von Michael Faraday über elektrische und magnetische Felder anknüpfte und in seiner Theorie des Elektromagnetismus

(Maxwell-Gleichungen, Anhang B) drei Hauptgebiete der Physik vereinigte: Elektrizität, Magnetismus und Optik. Wesentlich für die allgemeine Akzeptanz war vor allem auch der experimentelle Nachweis von Heinrich Hertz, dass sowohl Radiowellen wie auch das Licht elektromagnetische Wellen sind, die sich nur durch ihre Wellenlänge unterscheiden.

Gegen Ende des 19. Jahrhunderts war die Ansicht unter Physikern daher weitverbreitet, dass die Grundgesetze der Physik nun bekannt wären und künftige Generationen sich nur noch mit deren Auswertung beschäftigen würden. Weniger bekannt als der eingangs zitierte Rat des Lehrers von Planck, aber umso überraschender ist die Meinung des amerikanischen Physikers Albert Michelson aus dem Jahre 1899 (zitiert in [Teich und Porter 1990](#)): „The more important fundamental laws and facts of physical science have all been discovered, and these are so firmly established that the possibility of their ever being supplanted in consequence of new discoveries is exceedingly remote.“ Diese Meinung ist umso erstaunlicher, als das Experiment von Michelson und Morley 1887 dem Äther als Träger elektromagnetischer Wellen letztlich den Todesstoß versetzte und knapp 20 Jahre später ein gewichtiger Befund für die Aufstellung der Speziellen Relativitätstheorie durch Albert Einstein wurde.

Allerdings taten sich immer mehr „Bläschen“, um nicht zu sagen Lücken im großartigen Gebäude der klassischen Physik auf.

- In der Debatte um die physikalische Realität von Atomen (Ernst Mach: „Hamscho ans gsegn?“; in hochdeutscher Übersetzung: „Haben Sie schon eines gesehen?“) begannen sich die Atomistiker, vor allem vertreten durch Ludwig Boltzmann, immer mehr durchzusetzen.
- Trotz vieler negativer Befunde war der Äther als Träger elektromagnetischer Wellen scheinbar nicht umzubringen. Allerdings mussten ihm aufgrund der experimentellen Sachlage ungewöhnliche Eigenschaften zugeschrieben werden, wie etwa die Verkürzung von Maßstäben, die sich relativ zum Äther bewegen (Lorentz-Kontraktion).
- Die Struktur atomarer Spektrallinien war im Rahmen der klassischen Physik völlig rätselhaft. Schon 1885 entdeckte Johann Balmer rein empirisch eine Formel für die Wellenlängen der Spektrallinien im sichtbaren Bereich des Wasserstoffatoms, die drei Jahre später von Johannes Rydberg verallgemeinert wurde. Es stellte sich heraus, dass die inversen Wellenlängen folgender Gesetzmäßigkeit genügen:

$$\frac{1}{\lambda_{nm}} = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad n \geq 1, m \geq n + 1. \quad (2.1)$$

R ist eine empirische Konstante (Rydberg-Konstante), die im Bohr'schen Atommodell und dann in der Quantenmechanik ihre Erklärung findet. Die Balmer-Serie ergibt sich für $n = 2$. Die Formel (2.1) wurde später für $n = 1$ (Lyman-Serie, Ultraviolett-Bereich), $n = 3$ (Paschen-Serie, Infrarot-Bereich), usw. experimentell bestätigt. Das Termschema des Wasserstoffs ist in [Abb. 2.1](#) wiedergegeben.

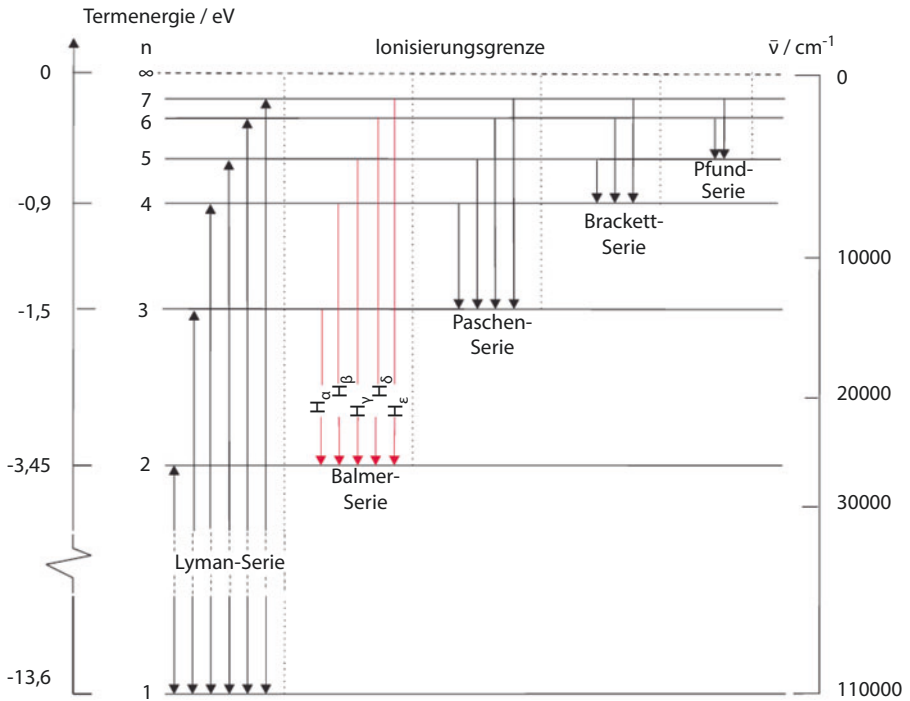


Abb. 2.1 Termschema und Spektralserien des Wasserstoffs. Die Energie der Niveaus ist in eV angegeben. Die Energie des Grundzustands mit Hauptquantenzahl $n = 1$ beträgt $-13,6 \text{ eV}$ (s. Gl.(3.10)) (Aus Demtröder 2010; mit freundlicher Genehmigung von © Springer-Verlag Berlin/Heidelberg 2010. All Rights Reserved)

- Bereits 1892 hatte Hendrik Lorentz die Aufspaltung von Spektrallinien in homogenen Magnetfeldern vorhergesagt. Diese Aufspaltung wurde einige Jahre später von Pieter Zeeman experimentell bestätigt, allerdings war die Aufspaltung wesentlich größer, als von Lorentz vorhergesagt. Lorentz fand auch sofort die Erklärung. Die Lorentz-Kraft auf bewegte Ladungsträger in einem Magnetfeld wirkt nicht auf das Atom als Ganzes, sondern auf die gerade erst entdeckten Elektronen. Die viel kleinere Masse des Elektrons (im Vergleich zum Atom) erklärt dann die Stärke des Zeeman-Effekts. Das für die Aufspaltung maßgebende magnetische Moment der Ladung ist nämlich umgekehrt proportional zur Masse (s. Gl.(5.5)). Allerdings war damit nur der sogenannte „normale“ Zeeman-Effekt erklärt (Aufspaltung in drei Linien), der viel häufigere „anomale“ Zeeman-Effekt konnte erst im Rahmen der Quantenmechanik unter Berücksichtigung des Spins der Elektronen richtig interpretiert werden. Die Bezeichnung ist aus heutiger Sicht ein historisches Kuriosum. Der „normale“ Effekt ist ein Spezialfall des allgemeineren „anomalen“ Effekts für Gesamtspin 0 der Elektronen.

- Aufgrund seiner Experimente mit Kathodenstrahlen postulierte J. J. Thomson 1897 die Existenz von „Korpuskeln“, die umgehend von Lorentz in Elektronen umgetauft wurden.
- Henri Becquerel entdeckte im Jahre 1896 eine rätselhafte Strahlung, die von Marie und Pierre Curie als Radioaktivität bezeichnet und in detaillierten Experimenten untersucht wurde. Man unterschied schon bald zwischen α -, β - und γ -Strahlung.¹ Ernest Rutherford und Frederick Soddy erkannten 1902, dass es sich dabei um die Emission von Teilchen aus dem Atomkern handelt, die dem radioaktiven Zerfallsgesetz unterliegt (Halbwertszeit). Mit der α -Strahlung (Emission von Helium-Kernen) und der β -Strahlung (Emission von Elektronen) ist außerdem eine Elementumwandlung² verbunden. Es war offensichtlich, dass diese Strahlung nicht im Rahmen der klassischen Physik erklärt werden konnte.

Beginn des Quantenzeitalters

Im Jahre 1900 beginnt nicht nur ein neues Jahrhundert, sondern nach allgemeiner Übereinkunft der Physiker das Zeitalter der Quantenphysik. In diesem Jahr präsentiert Planck die richtige Formel für das Energiespektrum des schwarzen Strahlers. Der schwarze Strahler ist eine typische Idealisierung der Theoretiker, der die elektromagnetische Strahlung vollständig absorbiert und maximal emittiert. Die spektrale Energiedichte der Strahlung³ im schwarzen Körper $\eta(\nu)$ kann für kleine Frequenzen⁴ ν aus der klassischen Elektrodynamik abgeleitet werden. Das Ergebnis⁵ ($k = 1,38064852(79) \cdot 10^{-23}$ J(oule)/K(elvin)) ist die Boltzmann-Konstante, T die absolute Temperatur in K)

$$\eta(\nu) = \frac{8\pi kT}{c^3} \nu^2 \quad (2.2)$$

ist als Rayleigh-Jeans-Gesetz bekannt. Die spektrale Energiedichte wird offenbar für große Frequenzen (kleine Wellenlängen) beliebig groß, ein unsinniges Ergebnis, das den Namen Ultraviolettkatastrophe verdient. Rein empirisch wurde von Wilhelm Wien festgestellt, dass die Formel (2.2) für große Frequenzen ersetzt werden muss durch

¹Für eine populäre Einführung s. <https://www.youtube.com/watch?v=eq3O1Tr96BM>

²Soddy: „Rutherford, this is transmutation!“; Rutherford: „Dont’t call it transmutation. They’ll have our heads off as alchemists“ (Zitiert in Howorth 1958).

³Integriert man über alle Frequenzen, erhält man aus der spektralen Energiedichte die gesamte Energiedichte im schwarzen Körper.

⁴Zur Erinnerung: Frequenz ν und Wellenlänge λ erfüllen die Gleichung $\lambda\nu = c$ mit der Lichtgeschwindigkeit c .

⁵Physikalische Einheiten und die Notation für numerische Werte werden im Anhang A erklärt.

$$\eta(\nu) = a\nu^3 e^{-b\nu/T} \quad (2.3)$$

mit zwei empirisch zu bestimmenden Konstanten a, b . Im Oktober 1900 präsentierte Planck eine empirische Interpolationsformel, die in heutiger Schreibweise

$$\eta(\nu) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (2.4)$$

lautet, mit einer zunächst unbestimmten Konstante (h für „h_{ilf}“!). Im Dezember 1900 reicht Planck eine theoretische Begründung für sein Strahlungsgesetz nach (Planck 1901): Der Energieaustausch kann nur in „Energiepaketen“ der Größe $E = h\nu$ vor sich gehen. Die Konstante $h = 6,626070040(81) \cdot 10^{-34}$ J s ist seither als Planck'sches Wirkungsquantum bekannt. Für Planck war nur der Energieaustausch, nicht aber die Strahlung selbst quantisiert. Eine wirkliche Ableitung der Strahlungsformel (2.4) ist erst mithilfe der Quantenstatistik möglich. Für kleine Argumente x kann die Exponentialfunktion entwickelt werden: $e^x = 1 + x + \dots$. Daher wird für kleine Frequenzen $e^{h\nu/kT} - 1 = h\nu/kT + \dots$, und in diesem Grenzfall ergibt sich aus Formel (2.4) das Rayleigh-Jeans-Gesetz (2.2). Mit dieser Herleitung erkennt man auch, dass (2.2) der klassische Limes ($h \rightarrow 0$) von (2.4) ist. Die Ableitung der Wien'schen Formel (2.3) ist noch einfacher, wenn man berücksichtigt, dass für große Frequenzen $e^{h\nu/kT} \gg 1$.

Zur Veranschaulichung der Größenordnungen betrachten wir kleine Schwingungen eines Pendels mit der Masse 0,1 kg und der Länge 1 m. Das Produkt aus der mittleren Energie $\langle E \rangle$ der Pendelbewegung und der Schwingungsdauer τ einer Periode ist dann durch $\langle E \rangle \tau \sim 10^{34} h \varphi_0^2$ gegeben, wobei φ_0 der maximale Auslenkungswinkel ist. Die Wirkung der Pendelbewegung ist also um so viele Größenordnungen größer als das Wirkungsquantum h , dass man getrost alle Quanteneffekte vergessen kann. Gleichzeitig sehen wir, dass das Produkt Energie \times Zeit wie übrigens auch Ort \times Impuls die Dimension einer Wirkung hat.

Im Jahre 1905, dem annus mirabilis der Physik schlechthin, veröffentlicht Einstein neben seiner Dissertation vier bahnbrechende Arbeiten in den Annalen der Physik. Die erste dieser Arbeiten liefert eine Deutung des Photoeffekts (Einstein 1905a) mittels der Lichtquantenhypothese.⁶ Beim Photoeffekt werden bei der Bestrahlung von Metallen mit kurzwelligem Licht Elektronen aus der Oberfläche herausgelöst. Die experimentellen Ergebnisse waren im Widerspruch zur klassischen Wellentheorie des Lichts. So hängt etwa die kinetische Energie der austretenden Elektronen nicht von der Bestrahlungsstärke, sondern nur von der Frequenz des Lichts ab. Die minimale Frequenz, bei der noch Elektronen austreten, hängt vom Material der Metalloberfläche ab. Einstein ging noch über die Vorstellungen von Planck hinaus und postulierte, dass das Licht selbst aus diskreten Quanten der Energie $E = h\nu$ besteht, die die Elektronen jeweils in einem Elementarprozess freisetzen. Damit konnten nicht nur alle Phänomene des Photoeffekts erklärt werden. Da es andererseits eindeutige Befunde für die Wellennatur des Lichts gibt,

⁶Statt Lichtquanten hat sich der 1926 vom amerikanischen Physikochemiker Gilbert Lewis vorgeschlagene und von Arthur Compton propagierte Terminus Photonen durchgesetzt.

tritt hier zum ersten Mal der Welle-Teilchen-Dualismus auf. Der Photoeffekt ist daher ein Schlüsselexperiment zur Begründung der Quantenphysik, und Einstein erhielt für die Lichtquantenhypothese auch den Nobelpreis des Jahres 1921.

Zur Veranschaulichung der Größenordnungen betrachten wir das Sonnenlicht. Das auf die Erde einfallende Sonnenlicht entspricht (bei klarem Himmel) etwa $4 \cdot 10^{21}$ Photonen/m² s (also pro Quadratmeter Erdoberfläche und pro Sekunde). Das menschliche Auge reagiert dagegen bereits bei einem viel kleineren Photonenfluss. Die Evolution hat dafür gesorgt, dass unser Auge für den Bereich des elektromagnetischen Spektrums besonders empfindlich ist, der dem Sonnenlicht entspricht. Das Empfindlichkeitsmaximum liegt bei einer Wellenlänge von 555 nm. Bei dieser Wellenlänge reagiert ein gesundes, im Dunkeln adaptiertes Auge bereits bei einem Photonenfluss von etwa 10 Photonen/s. Wenn wir es nicht ohnehin gewusst hätten, würde uns der Vergleich mit dem Photonenfluss von der Sonne überzeugen, dass wir mit ungeschützten Augen nicht in die Sonne blicken sollten.

Bereits im Jahre 1827 entdeckte der schottische Botaniker Robert Brown die nach ihm benannte Brown'sche Bewegung, die unregelmäßige Bewegung kleiner, aber im Mikroskop sichtbarer Teilchen in Flüssigkeiten. Schon vor 1905 war klar, dass dieses Phänomen durch die unregelmäßige Wärmebewegung noch kleinerer Teilchen hervorgerufen wird, die ständig gegen die beobachteten Teilchen stoßen. Einstein blieb in seiner Dissertation (Einstein 1905b) aber nicht bei diesem qualitativen Verständnis stehen, sondern machte auf der Grundlage der molekularen Theorie der Wärme eine quantitative Voraussage, wonach ein gestoßenes Teilchen im Mittel eine gewisse Strecke zurücklegt, deren Quadrat proportional zur Beobachtungszeit und zur Temperatur, sowie umgekehrt proportional zum Radius des Teilchens und zur Viskosität der Flüssigkeit ist. Diese Vorhersage wurde in den folgenden Jahren von Jean-Baptiste Perrin experimentell bestätigt. Damit war auch die Realität der Atome endgültig etabliert, und es konnte die Größe der unsichtbaren Moleküle abgeschätzt werden ($\gtrsim 10^{-10}$ m).

Spezielle Relativitätstheorie

Schließlich formuliert Einstein in den letzten zwei Arbeiten (Einstein 1905c, 1905d) des annus mirabilis 1905 seine Spezielle Relativitätstheorie (SRT), die unsere Vorstellungen von Raum und Zeit grundlegend veränderte. Sie hatte zwar keine unmittelbare Auswirkung auf die Entwicklung der Quantenmechanik, die eine nichtrelativistische Theorie ist, aber sie war von eminenter Bedeutung für die Weiterentwicklung zur Quantenfeldtheorie. Alle experimentellen Befunde der letzten 110 Jahre zeigen, dass die Welt relativistisch ist, und daher müssen die Theorien der fundamentalen Wechselwirkungen mit der SRT verträglich sein. In der Terminologie der Physiker heißt das, dass diese Theorien lorentzinvariant sind: Die zugrunde liegenden (Feld-)Gleichungen ändern sich nicht unter Lorentz-Transformationen (s. Anhang B). Das damit im Zusammenhang stehende Relativitätsprinzip gibt es

bereits in der klassischen Mechanik. Alle Inertialsysteme sind gleichberechtigt, und deshalb haben die Newton'schen Bewegungsgleichungen in allen Inertialsystemen die gleiche Form. Diese ausgezeichneten Bezugssysteme werden im 1. Newton'schen Axiom definiert: Es existieren Bezugssysteme mit einer universellen Zeit (Inertialsysteme), in denen ohne Einwirkung von Kräften alle Punktteilchen konstante Geschwindigkeiten haben (geradlinige, gleichförmige Bewegung). Dabei ist die behauptete Existenz von Inertialsystemen wieder eine Idealisierung der Theorie. Die folgenden Bezugssysteme stellen immer bessere Annäherungen an ein Inertialsystem dar: Erde, Raumschiff, Sonnensystem, Fixsternsystem, ... Allerdings sind in der klassischen Mechanik verschiedene Inertialsysteme durch eine Klasse von Transformationen verbunden (Galilei-Transformationen (B.12)), in denen es eben die postulierte universelle oder absolute Zeit gibt. Wenn man von einem Inertialsystem zu einem relativ dazu mit der konstanten Geschwindigkeit \vec{v} bewegten übergeht, so ändern sich in der Newton'schen Mechanik alle Teilchengeschwindigkeiten genau um dieses \vec{v} (Addition der Geschwindigkeiten (B.14)). Einstein durchschlägt den gordischen Knoten des Ätherproblems und postuliert, dass die Lichtgeschwindigkeit in allen Inertialsystemen denselben Wert c hat. Das ist aber nicht mit der Galilei-Invarianz vereinbar, denn durch den Übergang zu einem anderen Inertialsystem könnte man durch geeignete Wahl der Geschwindigkeit \vec{v} eine beliebig große Lichtgeschwindigkeit erhalten. Damit ist auch die Forderung einer absoluten Zeit nicht mehr haltbar, und die Galilei-Transformation muss durch die Lorentz-Transformation (B.11) ersetzt werden. Die Abhängigkeit der Zeit vom Bezugssystem ist die Ursache fast aller begrifflichen Schwierigkeiten der SRT wie etwa im Zwillingsparadoxon.

Tatsächlich wurden die Lorentz-Transformationen schon vor Einstein aufgestellt und von Henri Poincaré, der ihnen auch den Namen gab, kurz vor Aufstellung der SRT in ihre endgültige Form gebracht. Poincaré zeigte auch im selben Jahr, dass die Maxwell'sche Elektrodynamik lorentzinvariant ist, dass also die Maxwell-Gleichungen (B.1) in allen Inertialsystemen dieselbe Form haben. Allerdings hielten sowohl Lorentz als auch Poincaré an der Existenz des Äthers fest. Die Lorentz-Transformationen bestimmten den Übergang von einem ausgezeichneten Bezugssystem, in dem der Äther ruht, zu allen anderen Bezugssystemen. Daher unterschieden die Physiker vor Einstein zwischen wahren und scheinbaren Koordinaten und Zeiten. Die Äquivalenz der Inertialsysteme in der SRT machte den ominösen Äther nicht nur nicht beobachtbar, sondern auch völlig irrelevant. Trotzdem lässt sich erahnen, warum die Leistung von Einstein immer wieder angezweifelt wurde, oft in Verbindung mit antisemitischen Untertönen.

In seiner zweiten Arbeit zur SRT (Einstein 1905d) untersucht Einstein die Konsequenzen seiner Forderung, dass alle physikalischen Theorien lorentzinvariant sein müssen. Die Maxwell-Gleichungen erfüllen diese Forderung automatisch (es ist nicht klar, ob Einstein den diesbezüglichen Beweis von Poincaré kannte), aber die Newton'sche Mechanik muss modifiziert werden. Eine Konsequenz dieser Forderung ist die berühmteste Formel der Physik:

$$E = mc^2 . \tag{2.5}$$

Diese Beziehung zwischen der Energie und der Masse eines Teilchens gab und gibt noch immer Anlass zur Verwirrung. Oft wird diese Gleichung in der Form $E_0 = mc^2$ geschrieben und damit zum Ausdruck gebracht, dass ein Teilchen im Ruhezustand die Energie mc^2 besitzt. Leider wird aus historischen Gründen, nicht zuletzt in vielen Schulbüchern und sogar in manchen Lehrbüchern, die Masse m oft durch die sogenannte Ruhemasse m_0 ersetzt. Trotz ihrer angeblichen „Anschaulichkeit“ sind diese Ruhemasse und die damit verbundene „dynamische“ Masse verwirrend und unsinnig (eine ausführliche Diskussion findet man in Okun 1989). Energie und Impuls eines Teilchens sind analog zu Zeit und Ort vom gewählten Inertialsystem abhängig (sie unterliegen der Lorentz-Transformation), aber die Masse ist in allen Inertialsystemen dieselbe. Das bedeutet nicht, dass die Masse unveränderlich ist. Masse kann sehr wohl in Energie umgewandelt werden, wie Kernspaltung, Kernfusion oder die Zerstrahlung von Materie mit Antimaterie beweisen, aber diese Umwandlung kann erst im Rahmen der Kern- und Teilchenphysik befriedigend behandelt werden.

Bevor wir uns wieder auf den Weg zur Quantenmechanik machen, wollen wir uns noch kurz mit den begrifflichen Schwierigkeiten der SRT beschäftigen, die fast alle mit der Abkehr von der absoluten Zeit Newtons zu tun haben. Eine schwer zu verdauende Aussage der SRT ist, dass die Zeit in bewegten Systemen langsamer vergeht als im Ruhesystem des Beobachters (Zeitdilatation). Lorentz-Transformationen werden für Geschwindigkeiten, die klein im Vergleich zur Lichtgeschwindigkeit sind, den Galilei-Transformationen immer ähnlicher. Die Physiker – aber wahrscheinlich nur sie – haben auch mit der äquivalenten Aussage kein Problem, dass eine Lorentz-Transformation im Grenzfall $c \rightarrow \infty$ in eine Galilei-Transformation übergeht (Anhang B). Auf jeden Fall ist klar, dass sich die Zeitdilatation dann besonders eindrücklich manifestiert, wenn die Geschwindigkeiten in die Nähe der Lichtgeschwindigkeit kommen. Das ist in der Teilchenphysik der Fall, und deshalb kommen auch die schönsten Beispiele für die Zeitdilatation aus der Teilchenphysik.

Die Myonen gehören zur Klasse der Leptonen und sind als solche massivere Geschwister der Elektronen. Sie sind instabil und zerfallen (in ihrem Ruhesystem) mit einer mittleren Lebensdauer $\tau_\mu \simeq 2,2 \cdot 10^{-6}$ s. Sie werden in der Atmosphäre in der sogenannten Höhenstrahlung erzeugt und sollten, da sie langsamer als mit Lichtgeschwindigkeit unterwegs sind, eigentlich nach einer Strecke von höchstens $c\tau_\mu \simeq 660$ m zerfallen sein (präziser, ihre Zahl sollte auf den e -ten Teil mit der Euler'schen Zahl $e \simeq 2,71828$ abgesunken sein). Tatsächlich erreichen aber auch solche Myonen die Erde, die in 30 km Höhe erzeugt werden. Von unserer Erde aus gesehen, gehen die „Uhren“ der Myonen in der Höhenstrahlung offenbar langsamer und zwar beträchtlich langsamer, weil die Myonen eben fast mit Lichtgeschwindigkeit unterwegs sind. Die Zeit hat keine absolute Bedeutung mehr, sie ist vom Bezugssystem abhängig.

Noch spektakulärer ist das folgende, biologisch unbedenkliche Experiment zum Zwillingsparadoxon. Zur Messung des magnetischen Moments der Myonen wurden im Speicherring des Brookhaven National Laboratory Myonen durch ein angelegtes

Magnetfeld auf einer Kreisbahn gehalten (Bennett et al. 2006). Naiverweise würde man auch hier erwarten, dass die Myonen im Mittel nach einer Strecke von etwa 660 m zerfallen sind, das entspricht im Speicherring in Brookhaven etwa 7,5 Runden. Tatsächlich sind sie aber fast mit Lichtgeschwindigkeit unterwegs ($v \simeq 0,99942 c$), und daher sagt die SRT voraus, dass sie in der lokalen Zeit des Experimentators erst nach

$$T = \frac{\tau_\mu}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \simeq 29,3 \tau_\mu \quad (2.6)$$

zerfallen sein sollten (immer im Sinne des radioaktiven Zerfallsgesetzes). Das entspricht ziemlich genau 220 Runden im Speicherring, wie tatsächlich beobachtet, und stellt nebenbei eine sehr präzise Messung des Zeitdilationsfaktors $1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ dar. Was hat das alles mit dem Zwillingsparadoxon zu tun? Wenn der Experimentator neben dem Speicherring ein normales Myon-Zerfallsexperiment mit nahezu ruhenden Myonen aufbaut, wird er feststellen, dass die Myonen im Speicherring 29,3-mal länger leben als ihre ruhenden Kollegen. Hier erübrigt sich jede Diskussion, ob der reisende Zwilling nach seiner Rückkehr „wirklich“ jünger ist als seine daheim gebliebene Zwillingsschwester. Der Unterschied in der Lebensdauer der Myonen ist ein unbestreitbares experimentelles Faktum.

Rutherford'sches Atommodell

Im ersten Jahrzehnt des 20. Jahrhunderts stellte man sich das Atom wie einen (positiv geladenen) Kuchenteig vor, in dem die (negativ geladenen) Elektronen wie Rosinen eingebettet waren (Gugelhupf-Modell⁷ von Thomson). In den Jahren 1908–1913 führten Johannes Geiger und Ernest Marsden auf Anregung von Rutherford in Manchester Streuexperimente durch, in denen α -Teilchen (Helium-Kerne) auf dünne Folien aus Gold und anderen Metallen geschossen wurden. Die wesentlichen Ergebnisse waren die Folgenden:

- Die meisten α -Teilchen passierten die Folien ungehindert.
- Je größer der Streuwinkel, desto weniger Streuereignisse gab es.
- Eines von etwa 8000 α -Teilchen wurde vollständig zurückgestreut.

Rutherford schloss 1911 aus diesen Ergebnissen, dass fast die gesamte Masse eines Atoms im positiv geladenen Atomkern der Größenordnung $\gtrsim 10^{-15}$ m konzentriert sein muss, während die viel leichteren, negativ geladenen Elektronen den Kern wie Planeten die Sonne umschwirren und das Atom insgesamt elektrisch neutral machen (Rutherford 1911). Da die Atome aber gut 100.000-mal größer als ihre

⁷Mit etwas Lokalkolorit versetzte deutsche Übersetzung des englischen Originals Plum Pudding Model

Kerne sind, müssen sie zum Großteil aus leerem Raum bestehen. Dieses Rutherford'sche Atommodell bestimmte in der Folge die Vorstellung, die sich die Physiker von einem Atom machten. Allerdings lieferte es weder eine Erklärung für die Struktur von Spektrallinien, noch konnte es die Frage beantworten, warum die Elektronen nicht in den Kern stürzen.

In Streuexperimenten mit Röntgenstrahlen an Kristallen stellte Max von Laue 1912 fest, dass die Röntgenstrahlen am Kristallgitter gebeugt werden, ein klarer Hinweis auf die Wellennatur der Strahlung. Außerdem bestätigte das Beugungsmuster sowohl den regulären atomaren Aufbau der Materie als auch die Größenordnung von Atomen mit $r_{\text{Atom}} \gtrsim 10^{-10} \text{ m} = 1 \text{ \AA}(\text{ngström})$.

Literatur

- Bennett GW et al (Muon $g - 2$ Collaboration) (2006) Phys Rev D73: 072003. <https://arxiv.org/abs/hep-ex/0602035>. Zugegriffen: 29. Apr. 2017
- Demtröder W (2010) Experimentalphysik 3: Atome, Moleküle und Festkörper. Springer Spektrum, Berlin
- Einstein A (1905a) Ann Phys 17: 132
- Einstein A (1905b) Ann Phys 17: 549
- Einstein A (1905c) Ann Phys 17: 891
- Einstein A (1905d) Ann Phys 18: 639
- Howorth M (1958) Pioneer research on the atom: the life story of Frederick Soddy. New World, London
- Okun LB (1989) The concept of mass. Physics Today 42: 31
- Planck M (1901) Ann Phys 4: 553
- Planck M (1933) Wege zur physikalischen Erkenntnis: Reden und Vorträge. Verlag S. Hirzel, Leipzig
- Rutherford E (1911) Phil Mag 21: 669
- Teich M, Porter R (1990) Fin de siècle and its legacy. Cambridge Univ. Press, Cambridge



<http://www.springer.com/978-3-662-54549-2>

Teilchen, Felder, Quanten

Von der Quantenmechanik zum Standardmodell der
Teilchenphysik

Ecker, G.

2017, XIV, 151 S. 36 Abb., 13 Abb. in Farbe., Softcover

ISBN: 978-3-662-54549-2