

Theoretische Physik seit 1900

Von
G. WENTZEL

Die Entwicklung der theoretischen Physik seit der Jahrhundertwende kann in ihren Hauptzügen durch zwei Stichworte gekennzeichnet werden: Relativitätstheorie und Quantentheorie.

Die Relativitätstheorie

ist aus dem Problemkreis der Elektrodynamik bewegter Medien herausgewachsen. Von der überlieferten Vorstellung eines Lichtäthers als Träger der elektromagnetischen Wellen ausgehend, geriet diese Theorie in immer grössere Schwierigkeiten, da der erwartete Einfluss der Erdbewegung auf die Lichtgeschwindigkeit (Michelson-Versuch) und auf andere elektromagnetische Erscheinungen nicht gefunden wurde. Die elektronentheoretische Diskussion führte H. A. LORENTZ und H. POINCARÉ 1904/5 zur Überzeugung, dass es ein ausgezeichnetes Bezugssystem «Äther» nicht geben könne; mit ihrem Beweis, dass die Maxwell'schen Gleichungen des elektromagnetischen Feldes gegenüber «Lorentztransformationen» invariant sind, kommt die Auffassung zum Durchbruch, dass alle Naturgesetze diese Invarianzeigenschaft besitzen sollten. Unabhängig von ihnen kam EINSTEIN 1905 zum gleichen Schluss, und er erkannte die tiefliegenden geometrisch-kinematischen Konsequenzen dieser Auffassung. Wenn die Maxwell'schen Gleichungen für das Vakuumfeld in jedem Bezugssystem (unabhängig von seinem Bewegungszustand) gelten, so muss die Vakuum-Lichtgeschwindigkeit in jedem Bezugssystem den gleichen Wert c haben (Prinzip von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit): ein Lichtsignal im Vakuum besitzt für zwei Beobachter, auch wenn sie gegeneinander bewegt sind, immer die gleiche Geschwindigkeit c . Kinematisch ist das nur möglich, wenn jeder Beobachter seine eigene individuelle Zeitrechnung besitzt. Diese «Relativierung der Zeit» ist widerspruchsfrei durchführbar, da es wegen der endlichen Geschwindigkeit aller Signale ($\leq c$) kein absolutes Kriterium für Gleichzeitigkeit gibt.

EINSTEIN verwendete als Basis für seine Relativitätstheorie nur zwei Postulate: das Relativitätsprinzip und das Prinzip von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit. Das Relativitätsprinzip besagt, dass die Naturgesetze in allen Bezugssystemen, wie sie auch bewegt sein mögen, gleich lauten: es soll kein ausgezeichnetes Bezugssystem («Äther») geben, in dem die Naturgesetze besonders einfach formuliert werden können. In der ersten Form der Einstein'schen Theorie, der sog. speziellen Relativitätstheorie, wird das Relativitätsprinzip nur auf Inertialsysteme (Galileische Systeme) angewendet, d. h. auf solche Koordinatensysteme, in denen sich kraftfreie Teilchen gleichförmig bewegen. Die Koordinatentransformationen, die den Übergang von einem solchen Inertialsystem zu einem anderen beschreiben, und die nach

dem Relativitätsprinzip die Naturgesetze invariant lassen sollen, können dann nach dem Prinzip von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit nur die Lorentztransformationen sein (d. h. diejenigen linear-homogenen Transformationen der kartesischen Raumkoordinaten x, y, z und der Zeitkoordinate t , welche die quadratische Form $x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2$ invariant lassen).

Die Elektrodynamik bewegter Medien wird damit von ihren Schwierigkeiten befreit; einen Einfluss der Erdbewegung kann es ja nach dem Relativitätsprinzip nicht geben. Die Konsequenzen der Theorie erstrecken sich aber nicht nur auf die Elektrodynamik, sondern auf alle Gebiete der Physik, so auf die Mechanik. Die Newton'sche Mechanik genügt zwar dem Relativitätsprinzip (wie NEWTON klar gewusst hat), doch ist sie nicht invariant gegenüber Lorentztransformationen. Dies bedeutet, dass die Newton'schen Bewegungsgleichungen nur in unrelativistischer Näherung gelten können, d. h. nur wenn die Geschwindigkeiten v der betrachteten Körper klein sind gegen die Lichtgeschwindigkeit c . Exakt gelten sie aber im momentanen Ruhssystem eines Massenteilchens ($v = 0$), und daher kann man die Bewegungsgleichungen in einem beliebigen Bezugssystem durch eine Lorentztransformation ableiten. Man erhält auf diese Weise wieder Gleichungen von der Form Newton'scher Bewegungsgleichungen:

$$\frac{d\mathfrak{p}}{dt} = \frac{d}{dt}(m\mathfrak{v}) = \mathfrak{K}$$

(\mathfrak{p} = Impuls, \mathfrak{v} = Geschwindigkeit, \mathfrak{K} = Kraft); aber die träge Masse m wird jetzt geschwindigkeitsabhängig gemäss der Formel

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

(m_0 = «Ruhmasse»). Für das Elektron hatte LORENTZ schon früher diese Formel aus seiner Hypothese der Längskontraktion (Lorentzkontraktion) abgeleitet, und sie wurde durch Messungen der spezifischen Ladung e/m von schnellen Kathodenstrahl-Elektronen bestätigt. Nach der Relativitätstheorie gilt aber die Masse-Geschwindigkeits-Beziehung (wie die Lorentzkontraktion) für beliebige Körper. In der Energie-Erhaltungs-Gleichung der relativistischen Mechanik übernimmt die Grösse

$$m c^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

die Rolle der kinetischen Energie; in der Tat ist in unrelativistischer Näherung ($v \ll c$):

$$m c^2 = m_0 c^2 + \frac{1}{2} m_0 v^2 + \dots,$$

d. h. bis auf eine additive Konstante $m_0 c^2$ («Ruhenergie») wird $m c^2$ näherungsweise gleich der kinetischen Energie $\frac{1}{2} m_0 v^2$. Anschliessende Überlegungen führten EINSTEIN zu der These, dass zwischen Energie E und

träger Masse m allgemein die Beziehung $E = m c^2$ bestehen müsse: jeder Energie E kommt eine träge Masse $m = E/c^2$ zu («Trägheit der Energie»). In der Experimentalphysik hat sich diese Auffassung seither ausnahmslos bewährt, z. B. im Gebiete der Radioaktivität: wenn bei einer radioaktiven Umwandlung die Energie ΔE an die Zerfallsstrahlung (z. B. γ -Strahlen) abgegeben wird, nimmt die Masse des zerfallenden Atomkerns um $\Delta E/c^2$ ab. Für die moderne Physik der Atomkerne ist die Energie-Masse-Äquivalenz als theoretisches Fundament unentbehrlich und geradezu selbstverständlich geworden.

Die Forderung, dass auch Nicht-Inertialsysteme hinsichtlich der Naturbeschreibung gleichberechtigt sein sollen, führte EINSTEIN in den folgenden Jahren zu seiner «allgemeinen Relativitätstheorie» (abgeschlossen 1916). Der leitende Gesichtspunkt bei der Durchführung war die Bemerkung, dass in der Newton'schen Mechanik ein gleichförmig beschleunigtes Bezugssystem völlig äquivalent ist einem Inertialsystem, in welchem ein homogenes (räumlich konstantes) Gravitationsfeld besteht. Ein solches Feld erteilt nämlich — wegen der Gleichheit von «schwerer» und «träger» Masse — allen Körpern die gleiche Beschleunigung, genau als ob das Bezugssystem beschleunigt wäre. Indem EINSTEIN solche Systeme als allgemein äquivalent betrachtete, konnte er die Wirkung homogener Gravitationsfelder auf beliebige Vorgänge rechnerisch ermitteln, so die Krümmung der Lichtstrahlen und die Rotverschiebung von Spektrallinien. Im Falle inhomogener Gravitationsfelder soll das «Äquivalenzprinzip» noch für unendlich kleine Raum-Zeit-Gebiete gelten. In der mathematischen Durchführung (an der M. GROSSMANN beteiligt war) wird ein Raum-Zeit-Kontinuum mit nichteuklidischer Metrik zugrundegelegt (also eine Verallgemeinerung des von MIKOWSKI in der speziellen Relativitätstheorie eingeführten euklidischen Kontinuums). Nach dem Äquivalenzprinzip muss die Bahn eines Massenpunktes, auf den nur Gravitationskräfte wirken, eine geodätische Linie («kürzeste» Verbindungslinie zweier Punkte) sein; dadurch wird die Metrik des Raum-Zeit-Kontinuums mit dem Gravitationsfeld in Beziehung gesetzt. Wie die Gravitation, so muss auch die Metrik (d. h. die Geometrie) durch die anwesende Materie bestimmt sein (diese Auffassung wurde schon von RIEMANN vertreten). Die Verknüpfung wird durch die «Feldgleichungen» der Gravitation hergestellt; der Einstein'sche Ansatz verknüpft die Raumkrümmung mit dem Energie-Impuls-Tensor der Materie (in allgemein kovarianter Weise). In einer ersten Näherung (schwache, quasistatische Gravitationsfelder) gelangt man zur Newtonschen Theorie der Gravitation als «Fernkraft» zurück. Die Aussagen, in denen sich die allgemeine Relativitätstheorie von den früheren Theorien unterscheidet, beschränken sich auf so geringe Effekte, dass ihre quantitative Nachprüfung auf grosse Schwierigkeiten gestossen ist: Perihelbewegung des Merkur, Krümmung der Lichtstrahlen am Sonnenrand und Rotverschiebung der Spektrallinien. Über die Struktur der Welt im grossen sind mehrere Möglichkeiten diskutiert worden (EINSTEIN, DE SITTER u. a.); darauf kann aber hier nicht eingegangen werden. WEYL hat

gezeigt, dass neben der Gravitation auch das elektromagnetische Feld gewissermassen geometrisiert werden kann; eine solche Theorie lässt jedoch die überzeugende Eindeutigkeit vermissen. Ein neuer Vorstoss in dieser Richtung ist noch in jüngster Zeit (1943/44) von SCHRÖDINGER unternommen worden; dabei wird auch das die Kernkräfte vermittelnde Mesonfeld (s. u.) in die Betrachtung miteinbezogen.

Den ersten Schritt zur

Quantentheorie

hat bekanntlich PLANCK getan, als er 1900 das «Wirkungsquantum» h einführte, um die Theorie der Hohlraumstrahlung (elektromagnetische Strahlung im thermischen Gleichgewicht mit der als Thermostat dienenden Wand des Hohlraums) mit der Erfahrung in Einklang zu bringen. Während nach der klassischen Statistik (Äquipartitionstheorem) die mittlere Energie einer Hohlraum-Eigenschwingung (d. h. einer stehenden Welle) = kT ist (k = Boltzmann'sche Konstante, T = absolute Temperatur), ergibt sich diese Energie nach der Planck'schen Hypothese zu

$$\frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

(ν = Frequenz der Eigenschwingung). Berücksichtigt man, wie viele Eigenfrequenzen ν auf ein Intervall $d\nu$ entfallen, so gelangt man unmittelbar zur Planck'schen Formel für das Spektrum der Hohlraumstrahlung. 1907 betonte EINSTEIN die Bedeutung der Planck'schen Vorstellungen für das Problem der spezifischen Wärmen bei tiefen Temperaturen. Die Anwendung der Planck'schen Formel auf die Eigenschwingungen von Gasmolekülen oder von Kristallen lehrt nämlich, dass diejenigen Eigenfrequenzen ν , die wesentlich grösser als kT/h sind, zur thermischen Energie keinen Beitrag liefern; bei abnehmender Temperatur fallen also mehr und mehr Eigenschwingungen aus (sie «frieren ein»), was sich in einer Abnahme der spezifischen Wärme äussern muss. Im Falle der Gase wurde eine quantitative Auswertung dieser Auffassung allerdings erst durch die spätere Quantenmechanik ermöglicht. Für die spezifischen Wärmen fester Körper liefert die Theorie von DEBYE (Zürich 1912) eine sehr gute Annäherung. Nach dieser Theorie sind es die elastischen Eigenschwingungen des festen Körpers, die als Träger der thermischen Energie zu gelten haben und somit eine ähnliche Rolle spielen wie die elektromagnetischen Hohlraumsschwingungen in Plancks Theorie; bei tiefen Temperaturen geht die Analogie bis zur Übereinstimmung in der Temperaturabhängigkeit: die Energie variiert proportional zur vierten, die spezifische Wärme proportional zur dritten Potenz der absoluten Temperatur. Im Falle höherer Temperaturen ist allerdings die atomistische Struktur der festen Körper zu berücksichtigen, die nach der LAUESchen Entdeckung (Röntgenstrahl-Interferenzen) bekanntlich eine Kristallgitter-Struktur ist. Die Gittertheorie ist namentlich von BORN und

VON KÄRMÁN gefördert worden; in neuerer Zeit hat BLACKMAN den Einfluss der Gitterstruktur auf die spezifischen Wärmen der Kristalle eingehender untersucht.

Ein tieferes Verständnis für die Bedeutung des Planck'schen Wirkungsquantums brachte die Entdeckung der korpuskularen Eigenschaften des Lichtes. 1905 deutet EINSTEIN die Energiebilanz beim photoelektrischen Effekt auf Grund des Lichtquanten-Begriffs: bei der Absorption eines Lichtquants wird dessen Energie $h\nu$ in mechanische Energie umgewandelt, nämlich — abgesehen von einer Ablösungsarbeit — in die kinetische Energie des photoelektrisch ausgelösten Elektrons. Auf die Emission des Lichtes angewendet findet man diese Vorstellung wieder in der BOHR'schen Atomtheorie (1913): die von einem Atom bei einem «Quantensprung» abgegebene mechanische Energie ΔE wird auf ein Lichtquant übertragen; das BOHR'sche « $h\nu$ -Prinzip» $\Delta E = h\nu$ bestimmt die Frequenz ν des emittierten Lichtes. Der ebenfalls von EINSTEIN eingeführte Begriff des Lichtquanten-Impulses ($p = h\nu/c = h/\lambda$) bewährte sich namentlich in der Theorie des Compton-Effektes, d. h. der Frequenzänderung von Röntgenstrahlen bei der Streuung an materiellen Körpern. Nach der unabhängig von A. H. COMPTON und DEBYE aufgestellten Theorie (1923) erteilt das gestreute (abgelenkte) Lichtquant vermöge seines Impulses dem streuenden Elektron einen Rückstoß; dadurch wird seine Energie $h\nu$ bzw. seine Frequenz ν herabgesetzt.

Gegenüber diesen typischen Quantenphänomenen, deren quantitative Gesetze durch das Planck'sche h bestimmt sind, versagt die klassische Wellentheorie des Lichtes grundsätzlich. Und doch kann man diese klassische Theorie nicht entbehren: die Interferenz- und Beugungserscheinungen sind nur wellentheoretisch deutbar, nämlich auf Grund der Vorstellung, dass Wellenfunktionen einander durch Superposition verstärken oder schwächen können. In Maxwell's elektromagnetischer Theorie des Lichtes hat die Wellentheorie ihre umfassendste Formulierung gefunden, die — mit einer elektronentheoretischen Ergänzung bezüglich der Dispersion — die Ausbreitung von Licht unter allen denkbaren Bedingungen in vollendeter Weise beschreibt. Es ist daher unumgänglich, dem Licht wellenmässige wie auch korpuskulare Eigenschaften zuzuschreiben. Dieser Welle-Korpuskel-Dualismus erwies sich immer mehr als ein Grundproblem der Quantentheorie.

L. DE BROGLIE war der erste, der (1924) einen solchen Dualismus auch für andere Strahlenarten annahm, die man auf Grund der damaligen experimentellen Kenntnisse für rein korpuskular gehalten hatte, wie für die Elektronen eines Kathodenstrahls. Zwischen den Wellendaten (Frequenz ν , Wellenlänge λ) und den Korpuskeldaten (Energie E , Impuls p) sollen nach DE BROGLIE die gleichen Beziehungen bestehen wie beim Licht:

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = h\nu \quad , \quad p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{h}{\lambda} ;$$

zur Begründung dienten relativistische Argumente. Diese de Broglie'sche

Idee wurde 1925/26 von E. SCHRÖDINGER in Zürich zur «Wellenmechanik» ausgebaut, auf die wir unten zurückkommen. Die von diesen Theorien vorausgesagten Interferenzerscheinungen wurden 1927 von DAVISSON und GERMER an Kathodenstrahlen aufgefunden und seither, auch an anderen Arten von Materie-Strahlen, vielfach bestätigt.

Ein zweiter Weg zur Quantenmechanik hatte als Ausgangspunkt die BOHR-SOMMERFELDSche Theorie des Atombaus (1913 uff). Für diese Theorie ist charakteristisch, dass die klassische Mechanik zur Berechnung der Elektronenbewegungen in Atomen herangezogen wird, wobei aber nur ausgewählte Bewegungszustände zugelassen werden; diese «stationären Zustände» sind durch «Quantenbedingungen» ausgezeichnet, in denen das Planck'sche h entscheidend auftritt. Dieser Theorie verdankt man die ersten Aufschlüsse über den Aufbau der atomaren Elektronenhüllen (Schalenstruktur der Atome); in Verbindung mit dem Bohrschen $h\nu$ -Prinzip (s. o.) entstand eine Theorie der Linienspektren der Atome und Moleküle, die bis in die Einzelheiten einem äusserst umfangreichen Tatsachenmaterial gerecht wurde (vgl. A. SOMMERFELD'S Buch «Atombau und Spektrallinien»).

Diese grossen Erfolge konnten aber nicht darüber hinwegtäuschen, dass die Theorie an ernsten inneren Schwierigkeiten krankte, die von der Kombination klassischer und quantentheoretischer Elemente herrührten, und die BOHR veranlassten, zu betonen, dass die klassischen Bestandteile der Theorie nur «korrespondenzmässig» zu verstehen seien, d. h. als ein mehr oder weniger qualitativer Ersatz für noch unbekannte Aussagen einer exakten Quantenmechanik. Gegen die Mitte der zwanziger Jahre häuften sich die Anzeichen, dass in der Tat eine Verschärfung qualitativer Korrespondenzregeln zu quantitativen Gesetzmässigkeiten möglich sei. HEISENBERG, der als Schüler von SOMMERFELD und BOHR an diesen Forschungen beteiligt war, hatte 1925 — von der These ausgehend, dass nur «prinzipiell beobachtbare Grössen» im Formalismus vorkommen sollten — die entscheidende Idee: Die Gesetze der neuen Mechanik sind allgemein und exakt formulierbar mit Hilfe eines Matrixkalküls. Die Bestimmungsstücke eines atomaren Systems sind als «Matrizen» darstellbar, d. h. ihre Multiplikation ist nicht notwendig kommutativ; z. B. haben zwei kanonisch konjugierte Grössen q , p den «Kommutator» $pq - qp = h/2\pi i$. Dieser quantenmechanische Formalismus erwies sich als äquivalent dem ungefähr gleichzeitig von SCHRÖDINGER entdeckten wellenmechanischen Formalismus; beispielsweise kann man die Schrödinger'schen Wellenfunktionen zur Berechnung der Heisenberg'schen Matrizen verwenden, und dies ist auch oft der einfachste Weg.

Auf die zahlreichen Einzelprobleme der Atomphysik, die in den folgenden Jahren mittels der neuen Wellen- oder Quantenmechanik erfolgreich behandelt wurden, kann hier auch nicht andeutungsweise eingegangen werden. Aber wie wird die Quantentheorie mit der prinzipiellen Frage des Welle-Korpuskel-Dualismus fertig? Die Meinung ist die, dass die physikalische Bedeutung der Wellenfunktion lediglich darin besteht, dass sie eine statistische Auskunft über korpuskulare Bestimmungsstücke (wie Ort und Im-

puls von Teilchen) vermittelt; bei einer SCHRÖDINGER'schen Wellenfunktion $\Psi(xyz, t)$ z. B. wird $|\Psi(xyz, t)|^2$ als «Wahrscheinlichkeitsdichte» interpretiert, d. h. als ein Mass für die Wahrscheinlichkeit, ein Teilchen zur Zeit t in einer Raumeinheit beim Punkte xyz anzutreffen (BORN 1926). Der Umfang dieser aus Ψ -Funktionen zu gewinnenden statistischen Aussagen stimmt nun genau überein mit dem Umfang der Aussagen, die man aus prinzipiell möglichen Beobachtungen erhalten kann. Wie HEISENBERG und BOHR (1927) an vielen Beispielen dargelegt haben, kann man nämlich durch Messungen (z. B. von Ortskoordinaten oder Geschwindigkeiten eines Teilchens) immer nur eine statistische Auskunft über kanonisch konjugierte Bestimmungsstücke q, p erhalten; die Intervalle $\Delta q, \Delta p$, innerhalb derer q und p durch Messungen festgelegt werden können, haben eine Mindestgrösse, die durch die «Heisenberg'sche Unbestimmtheitsrelation» $\Delta q \cdot \Delta p \gtrsim h$ gekennzeichnet ist. Dies liegt daran, dass jede Messung einen Eingriff in den Bewegungsablauf darstellt (z. B. Streuung von Licht mit Compton-Rückstoss), und dass die Wirkung dieses Eingriffs nicht vollständig ermittelt werden kann. Der wellenmechanische Formalismus in korpuskularstatistischer Interpretation macht nun seine Aussagen ebenfalls im Rahmen der Heisenberg'schen Unbestimmtheitsrelation, d. h. er gestattet gerade, das Ergebnis prinzipiell möglicher Messungen zu beschreiben, bzw. vorauszusagen. Damit begnügt man sich, unter Verzicht auf die Beschreibung «objektiver Vorgänge».

In den atommechanischen Anwendungen spielt das «PAULISCHE Ausschlussprinzip» eine grosse Rolle, das gewissen physikalisch gleichartigen Teilchen — z. B. zwei Elektronen — verbietet, den gleichen Quantenzustand einzunehmen (1925). In der Wellenmechanik kann dieses Prinzip als eine Symmetrieforderung an die Wellenfunktion der Teilchen formuliert werden. Das Ausschlussprinzip ist z. B. verantwortlich dafür, dass die Elektronen eines Atoms nicht alle in den energetisch tiefsten Zustand (K-Schale) herunterfallen können, sondern sich in den bekannten Schalen zu 2, 8, 18, 32 Elektronen anordnen; es ist also bestimmend für den Aufbau des periodischen Systems der Elemente. Ein «Elektronengas», wie es in den Leitungselektronen eines Metalls realisiert ist, ist infolge des Pauliprinzips nicht nach der klassischen BOLTZMANN'schen Statistik zu behandeln, in der die «verbotenen» Gaszustände fälschlich mitgezählt werden, sondern nach der FERMI-DIRAC-Statistik. PAULI hat auf dieser Grundlage den Paramagnetismus der Metalle gedeutet, und SOMMERFELD u. a. haben die ältere DRUDE-LORENTZ'sche Theorie der metallischen Leitung revidiert; auch dieses ausgedehnte Forschungsgebiet kann hier nur erwähnt werden. Im Gegensatz zu Elektronen, die einen Spin (Eigen-Drehimpuls) $h/4\pi$ besitzen (GOUDSMIT und UHLENBECK 1925), genügen spinfreie Partikeln, wie Helium-Atome, der BOSE-EINSTEIN-Statistik. Diese Statistik wurde zuerst von BOSE (1924) für das Lichtquantengas aufgestellt (korpuskulare Auffassung der Hohlraumstrahlung), und dann von EINSTEIN auf materielle Gase übertragen. Eine von EINSTEIN vorausgesagte Entartungserscheinung bei tiefen

Temperaturen erklärt vielleicht den sogenannten λ -Punkt des flüssigen Heliums (LONDON).

Die Heisenberg-Schrödinger'sche Quantenmechanik ist eine unrelativistische Mechanik. Eine relativistische Wellenmechanik des Elektrons wurde 1928 von DIRAC aufgestellt. Sie hat den Vorzug, den Spin des Elektrons, der in der unrelativistischen Theorie ad hoc angenommen werden musste (PAULI's Theorie des Spins 1927), in natürlicher Weise zu erklären: das Elektron erhält automatisch das richtige mechanische Spinmoment $h/4\pi$ und in der einfachsten Form der Theorie auch das richtige magnetische Moment; letzteres ist für die magnetische Aufspaltung der Spektrallinien (Zeemaneffekt) massgebend. Die Schwierigkeit, dass das Elektron nach dieser relativistischen Theorie auch Zustände negativer Energie besitzt, wurde 1930 von DIRAC durch die Annahme überwunden, dass diese Zustände normalerweise vollständig von Elektronen «besetzt» sind; diese Vorstellung wird durch das Pauliprinzip ermöglicht. Ein einzelner unbesetzter Zustand negativer Energie muss als ein positives Teilchen gedeutet werden; 1933 wurde dieses «Positron» in der kosmischen Strahlung (Höhenstrahlung) durch ANDERSON entdeckt. Ein Positron und ein Elektron können neu entstehen bei Bestrahlung von Materie mit γ -Strahlen; diese «Paarerzeugung» ist nach der DIRAC'schen Theorie als ein Lichtabsorptionsprozess zu deuten, bei dem ein Elektron aus einem Zustand negativer Energie (das dort entstehende «Loch» ist das Positron) auf ein Niveau positiver Energie (Elektronenzustand) hinaufgehoben wird. Die absorbierte Lichtquanten-Energie $h\nu$ findet sich in der Masse der entstandenen Teilchen wieder, entsprechend der Einsteinschen Energie-Masse-Äquivalenz (s. o. S. 147/8):

$$h\nu = 2 mc^2 = 2 m_0 c^2 + \text{kinetische Energie beider Teilchen.}$$

Die Erscheinung der Paarerzeugung, wie auch der umgekehrte Prozess, die «Paarzerstrahlung», wird durch die Dirac'sche «Löchertheorie» in quantitativer Übereinstimmung mit der Erfahrung beschrieben. In anderer Hinsicht führt diese Theorie allerdings noch zu Schwierigkeiten, ähnlich denjenigen, die auch sonst beim Versuch eines relativistischen Ausbaus der Quantentheorie zutage treten (s. u.), und die einen besonderen Subtraktionsformalismus notwendig machen (DIRAC, HEISENBERG 1934).

Nach einer relativistisch invarianten Formulierung verlangt vor allem die Theorie des elektromagnetischen Feldes. Die quantentheoretische Behandlung dieses Feldes geht — wie schon die klassische Theorie der Hohlraumstrahlung — von der Vorstellung aus, dass die elektromagnetischen Eigenschwingungen (z. B. ebene Lichtquellen) harmonischen Oszillatoren äquivalent sind; diese müssen nur «quantisiert» werden; dadurch treten die korpuskularen Eigenschaften des Lichtes zutage. Auf dieser Grundlage behandelte DIRAC 1927 die Wechselwirkung zwischen Licht und atommechanischen Systemen; die so erhaltenen Formeln für die Wahrscheinlichkeiten von Licht-Emissions-, Absorptions- und Streuprozessen stehen im Einklang einerseits mit den quantenmechanisch verschärften Aus-

sagen des Bohr'schen Korrespondenzprinzips, andererseits mit gewissen Bedingungen, denen die Emissions- und Absorptionskoeffizienten nach EINSTEIN (1917) genügen müssen, damit zwischen Hohlraumstrahlung und materiellen Systemen ein Temperaturgleichgewicht bestehen kann. Diese «Dirac'sche Strahlungstheorie» wurde von JORDAN, PAULI, HEISENBERG und FERMI zu einer relativistischen «Quanten-Elektrodynamik» ausgebaut (1928/30). Wie in der Quantenmechanik die Newton'schen Bewegungsgleichungen als Gleichungen für die statistischen Erwartungswerte der Teilchenkoordination in Geltung bleiben, so gelten in der Quanten-Elektrodynamik die Maxwell'schen Gleichungen für die Erwartungswerte der elektrischen und magnetischen Feldstärken. So werden die wellenmässigen wie auch die korpuskularen Aspekte des Strahlungsfeldes in vollendeter Weise wiedergegeben.

Auch in dieser Theorie gibt jedoch die Kombination von Quantentheorie und Relativitätstheorie zu Schwierigkeiten Anlass, und zwar aus folgendem Grunde. Das einem geladenen Teilchen anhaftende elektromagnetische Feld liefert einen Beitrag zur Energie bzw. zur Masse des Teilchens. Bei einem ausdehnungslosen Teilchen («Punktladung») wäre diese «Selbstenergie» — wegen der starken Singularität des Feldes — unendlich, was auszuschliessen ist. Diese Situation bestand ebenso schon in der klassischen Elektronentheorie von LORENTZ; während aber dort die Annahme eines ausgedehnten Elektrons (kleine Ladungswolke) über die Schwierigkeiten wenigstens provisorisch hinweghalf, zerstört diese Annahme in der Quantentheorie die Invarianz gegenüber Lorentztransformationen. Nun konnte man zwar durch formale Modifikationen der Theorie solche Unendlichkeiten etappenweise eliminieren (WENTZEL 1933, DIRAC 1939/42, HEITLER 1941, STUECKELBERG 1943); die auszuführenden «Subtraktionen» sind aber nicht willkürfrei: die Eindeutigkeit der Theorie geht verloren. Auch begibt man sich damit der Möglichkeit, die Masse des Elektrons rein elektromagnetisch zu deuten; eine solche Deutung wäre aber im Hinblick auf das Ziel einer einheitlichen Naturbeschreibung sehr zu wünschen. Hierin liegen Probleme zukünftiger Forschung.

Die Beschreibung der Lichtquanten durch das quantisierte Maxwell-Feld kann auch für andersartige Partikeln nachgeahmt werden, so z. B. für Elektronen, indem man das de Broglie-Dirac'sche Wellenfeld quantisiert («Hyperquantelung»; JORDAN und WIGNER 1928). Die allgemeine Quantentheorie der Wellenfelder führt zu einer natürlichen Klassifikation und Beschreibung aller denkbaren «Elementarteilchen», nämlich solcher Teilchen, deren Spin (Eigen-Drehimpuls) ein ganzes oder halbganzes Vielfaches des Einheitsmoments $\hbar/2\pi$ ist, und deren elektrische Ladung 0 oder ± 1 Elementarquanten beträgt. Dabei lässt sich auch begründen, warum die Partikeln mit ganzzahligem Spin (wie die Lichtquanten: Spin $1 \cdot \hbar/2\pi$) der Bose-Einstein-Statistik unterworfen sind, die Teilchen mit halbganzem Spin (wie Elektronen, Protonen, Neutronen) dagegen dem PAULI'schen Ausschlussprinzip, d. h. der Fermi-Dirac-Statistik (FIERZ 1938, PAULI 1940).

Ein Elementarteilchen, das in den letzten Jahren das Interesse besonders auf sich gelenkt hat, ist das «Meson», ein Teilchen, dessen Masse zwischen der Elektronen- und der Protonenmasse liegt. Schon vor seiner Entdeckung in der kosmischen Strahlung (NEDDERMEYER und ANDERSON 1937) wurde die Existenz eines solchen Teilchens von YUKAWA (1935) vermutet, und zwar auf Grund von Spekulationen über den Ursprung der Kernkräfte, d. h. der Kräfte, welche die Protonen und Neutronen in den Atomkernen aneinander binden. Die Eigenschaften dieser Kräfte kennt man aus der wellenmechanischen Diskussion der kernphysikalischen Phänomene (Arbeiten von HEISENBERG und anderen, seit 1932). Nun stellt sich die Frage, ob die Kernkräfte als Wirkungen eines Feldes verstanden werden können, ähnlich wie die elektromagnetischen Kräfte als Wirkungen des Maxwell-Feldes. Jenem hypothetischen Felde müssen gewisse Elementarteilchen entsprechen (analog den Lichtquanten, gleichfalls mit ganzzahligem Spin); die Ruhmasse dieser Partikeln, welche die Reichweite der Kernkräfte bestimmt, muss in derselben Grössenordnung angenommen werden wie die Ruhmasse der Höhenstrahlmesonen; es liegt daher nahe, das die Kernkräfte vermittelnde Feld als ein Mesonfeld zu interpretieren. Für diese Auffassung spricht auch der beobachtete β -Zerfall der Mesonen; man kann nun nämlich (nach YUKAWA) den β -Zerfall radioaktiver Atomkerne als einen β -Zerfall der in ihnen enthaltenen Mesonen deuten; aus der gemessenen mittleren Lebensdauer des freien Mesons ($\sim 2 \cdot 10^{-6}$ sec im Ruhsystem) folgt dann für die Lebensdauer der β -aktiven Substanzen eine Grössenordnung, die im grossen und ganzen mit den Erfahrungsdaten in Einklang steht. In den Einzelheiten ist aber diese Mesontheorie der Kernkräfte noch sehr hypothetisch, namentlich wo Selbstenergieprobleme, ähnlich denen der Quanten-Elektrodynamik, hineinspielen.

In ihren letzten Entwicklungsphasen hat also die Quantentheorie — unter dem Zwang relativistischer Forderungen — zu neuartigen Fragestellungen geführt, für deren Beantwortung quantentheoretische und relativistische Gedankengänge allein vermutlich nicht ausreichen werden.

Astronomie

Von

W. BRUNNER

(Mit 2 Abbildungen im Text)

Die Teilnahme Zürichs an den Fortschritten der Astronomie in den letzten fünfzig Jahren beschränkt sich fast ausschliesslich auf das Gebiet der Sonnenforschung. Das ist bedingt durch die Notwendigkeit der Fortführung und die Wünschbarkeit der Erweiterung der um die Mitte des vorigen Jahr-