

Einleitung

Bereits in der grossen ‘Drei-Männer-Arbeit’ über Matrizenmechanik erkannten Born, Heisenberg und Jordan, dass die Neuinterpretation der physikalischen Observablen auch auf das Maxwell-Feld ausgedehnt werden musste. Da das freie elektromagnetische Feld als ein System von unendlich vielen ungekoppelten harmonischen Oszillatoren aufgefasst werden kann, war klar, wie die Quantisierung zu geschehen hatte. Dabei tauchten im Lichtfeld ganz von selbst die korpuskularen Teilchen auf, die Einstein in raffinierten statistischen Überlegungen aus dem Planckschen Strahlungsgesetz herausgelesen hatte. Im Jahre 1927 behandelte Dirac als erster das quantisierte elektromagnetische Feld in Wechselwirkung mit einem materiellen System, welches noch durch die nichtrelativistische Quantenmechanik beschrieben wurde. Erfolg und Misserfolg waren sofort klar. Dirac leitete in seiner Theorie konsequent die Einstein-Koeffizienten für Emission und Absorption von Licht her. Ehrenfest wies aber sogleich darauf hin, dass die Theorie in höheren Ordnungen zu Unendlichkeiten führen müsse. Über diese berüchtigten Divergenzen wird gleich noch mehr zu sagen sein. Der Diracschen Strahlungstheorie, mit ihren reichhaltigen Anwendungen in der Atom- und Kernphysik, wird in diesem Buch in Kap.1 ein breiter Raum gewidmet.

Als Nächstes musste eine relativistische Verallgemeinerung der Quantenmechanik gefunden werden. Der erste entscheidende Schritt kam wiederum von Dirac, als er eine relativistische Version der Schrödinger-Gleichung für ein Spin-1/2-Teilchen aufstellte. Mit seiner nach ihm benannten Gleichung erhielt er u.a. die richtige Feinstruktur für das Wasserstoffatom. Aber sehr rasch tauchten auch hier prinzipielle Schwierigkeiten auf, welche erst behoben wurden, als man die Diracsche Wellenfunktion als Quantenfeld reinterpretierte. Diese wichtigen Teile der relativistischen Quantentheorie werden im 2. und 3. Kapitel behandelt.

Im Anschluss an diese Entwicklungen entstanden nun die die zwei grossen Arbeiten von Heisenberg und Pauli, in denen zum ersten Mal eine systematische Theorie der Feldquantisierung entwickelt wurde. Damit waren die Grundlagen gelegt, auf denen alle weiteren Entwicklungen der Quantenfeldtheorie und insbesondere der Quantenelektrodynamik (QED) aufbauten.

In den frühen dreissiger Jahren benutzte man die QED zur Berechnung einer Vielzahl physikalischer Prozesse, mit Ergebnissen, die in tiefster Ordnung

Störungstheorie glänzende Übereinstimmung mit dem Experiment zeigten; aber in höheren Ordnungen tauchten die bereits erwähnten katastrophalen Divergenzen auf. Die Gründergeneration war deshalb Mitte der dreissiger Jahre der Ansicht, dass die QED bestenfalls als eine erste Näherung einer zukünftigen Theorie ernst zu nehmen sei. Erst nach dem Zweiten Weltkrieg erkannten verschiedene Forscher – insbesondere Feynman, Schwinger und Tomonaga –, dass die auftretenden Divergenzen auf eine unendliche Selbstenergie und einen unendlichen Beitrag zu seiner elektrischen Ladung zurückzuführen sind. Die Selbstenergie können wir uns folgendermassen vorstellen: Ein Elektron emittiert und reabsorbiert dauernd Photonen aller Frequenzen. Da der Frequenz und damit der Energie der Photonen keine Grenzen gesetzt sind, ist die Energie der Photonwolke – die sogenannte Selbstenergie des Elektrons – unendlich gross. Weil es nicht möglich ist, ein Elektron von seiner Photonenwolke zu trennen, ist dieser Selbstenergieanteil aber unbeobachtbar; messbar ist nur die (endliche) Gesamtmasse des Elektrons. Entsprechendes gilt für die elektrische Ladung. Dank dieser Einsicht wurde es möglich, alle auftretenden Divergenzen durch eine “Renormierung” der Masse und der Ladung zu absorbieren.¹

Für die QED gelangte man dadurch zu einer Störungsreihe, die in jeder Ordnung wohldefiniert ist. Wir sagen, die Theorie sei renormierbar. Die ersten paar Glieder dieser Reihe stimmen ausnahmslos mit zahlreichen Präzisionsexperimenten perfekt überein. Die QED ist damit in einem von ihren Begründern nicht erträumten Masse erfolgreich geworden. Wesentliche Teile der QED werden wir in den restlichen Kapiteln 4-7 dieses Lehrbuchs entwickeln. Als Abschluss wird dabei das Schwingersche Resultat für die anomalen magnetischen Momente der geladenen Leptonen hergeleitet.

Obschon die weiteren Entwicklungen der Quantenfeldtheorie und deren Anwendungen in der Elementarteilchenphysik in diesem Buch nicht besprochen werden, wollen wir in dieser Einleitung kurz darauf eingehen. Die QED hat sich dabei – für manche überraschend – als sehr fruchtbares Vorbild erwiesen.

Die *schwache Wechselwirkung* schien für lange Zeit nicht durch eine renormierbare Feldtheorie beschreibbar zu sein. Den ersten Schritt zu einer Theorie der schwachen Wechselwirkung hatte Enrico Fermi bereits 1933 getan. Um 1958 war man nach einigen Verbesserungen im Besitz einer Theorie, die in erster Ordnung Störungstheorie mit allen damaligen Experimenten im Einklang stand. In höheren Ordnungen liessen sich aber die Divergenzen nicht in endlich vielen Renormierungskonstanten absorbieren; die erweiterte Fermi-Theorie ist unrenormierbar. Eng damit verknüpft ist eine andere Schwierigkeit dieser Theorie, auf die Heisenberg schon in den dreissiger Jahren hingewiesen hatte. Bereits aus Dimensionsgründen müssen nämlich in ihr

¹ Es muss jedoch betont werden, dass die Idee der Renormierung an sich nicht mit dem Auftreten von unendlichen Grössen verbunden ist. Auch wenn die Selbstmasse und die Selbstladung endlich wären, wäre es nötig sie zuerst in der Theorie zu isolieren, bevor ein Vergleich mit dem Experiment stattfinden könnte.

die Raten aller Neutrinoreaktionen mit zunehmender Energie in einer Weise anwachsen, welche im Widerspruch zu grundsätzlichen Prinzipien steht („Unitaritätskatastrophe“). Die Theorie musste deshalb, wie damals klar gesagt wurde, spätestens bei einer Energieskala von ungefähr 300 GeV versagen. Wiederum befanden sich die theoretischen Physiker – trotz praktischer Erfolge – in einer verzweifelten Situation. Es waren Symmetrieprinzipien, die schliesslich einen Ausweg aus der Sackgasse weisen sollten. Dies bringt uns zum nächsten Thema.

Die QED ist ein besonders einfaches Beispiel einer „Eichtheorie“. Sie gehört damit zu einer speziellen Klasse von Feldtheorien mit einem hohen Grad von Symmetrie, die man aus rein historischen Gründen als Eichsymmetrie bezeichnet. Die Symmetrieoperationen bestehen dabei aus gewissen Transformationen aller Felder, wobei – und das ist das Besondere – die Transformationen **an jedem Ort und zu jeder Zeit unabhängig gewählt werden** können. Damit hat diese Symmetrie eine enge Verwandtschaft mit der grundlegenden Invarianzeigenschaft der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART). Die Forderung, dass die Grundgleichungen der Theorie unter Eichtransformationen invariant bleiben, erzwingt die Existenz von sogenannten Eichfeldern, zu denen auch das elektromagnetische Feld gehört. Ausserdem – und das ist besonders wichtig – legt die Eichinvarianz auch die Selbstwechselwirkung der Eichfelder und deren Kopplung an die Materie fest; die **Invarianz impliziert die Dynamik**. Die einfachste Eichinvarianz wurde schon kurz nach Schrödingers berühmten Arbeiten zur Wellenmechanik von mehreren Autoren unabhängig entdeckt. Es war aber Hermann Weyl, der die Eichinvarianz als *Symmetrieprinzip* betonte, aus dem die Elektrodynamik hergeleitet werden kann. Dieser Gesichtspunkt erwies sich viel später als ausserordentlich fruchtbar. In seiner grossartigen Arbeit von 1929 schreibt Weyl bereits in der Einleitung: *“Es scheint mir darum dieses Prinzip der Eichinvarianz zwingend darauf hinzuweisen, dass das elektromagnetische Feld ein notwendiges Begleitphänomen des [materiellen] Wellenfeldes ist.”* Gleich anschliessend weist er auf die Ähnlichkeit mit der ART hin, wenn er sagt: *“Da die Eichinvarianz eine willkürliche Funktion einschliesst, hat sie den Charakter allgemeiner Relativität und kann natürlich nur in ihrem Rahmen verstanden werden.”*²

Mitte der fünfziger Jahre begann man, verallgemeinerte Eichtheorien zu formulieren. Von der QED unterscheiden sich diese dadurch, dass die Symmetrieoperationen i.A. nicht miteinander vertauschbar sind. Man spricht deshalb von nicht-kommutativen oder nicht-abelschen Eichtheorien. Diese schienen während längerer Zeit für die Physik von ungeordneter Bedeutung zu sein. C.N.Yang, der 1954 mit R.Mills die wichtigste Arbeit über (ungebrochene) nicht-abelsche Eichtheorien schrieb, sagte in einem Interview im Jahre 1991 auf die Frage, ob ihm 1954 die enorme Bedeutung seiner Arbeit bereits

² Für eine Würdigung dieser Arbeit von Weyl siehe z.B.: L.O’Raifeartaigh und N.Straumann, Rev. Mod. Phys. **72**, 1 (2000).

bewusst gewesen sei: “No. In the 1950s we felt our work was elegant. I realized its importance in the 1960s and its great importance in the 1970s. Its relationship to deep mathematics became clear to me only after 1974.” Der Hauptgrund, weshalb dies so lange dauerte lag daran, dass man nicht wusste, wie die Quanten, die zu den Eichfeldern gehören (also Teilchen analog zum Photon), eine Masse erhalten könnten. Da die schwache Wechselwirkung extrem kurzreichweitig ist, war deren Beschreibung im Rahmen einer Eichtheorie nur denkbar, wenn die entsprechenden Quanten eine Masse von etwa 100 Protonmassen aufweisen würden.

In den sechziger Jahren erkannten schliesslich mehrere Forscher, dass gewisse Quanten von Eichfeldern automatisch eine Masse erhalten, falls die Eichsymmetrie “spontan gebrochen” ist. Dieses sogenannte *Higgs-Phänomen* ist auch aus der Theorie der Supraleitung bekannt. Die Landau-Ginzburg-Theorie der Supraleitung ist eine einfache Eichtheorie, deren Symmetrie in der supraleitenden Phase spontan gebrochen wird. Dabei wird das elektromagnetische Feld massiv, was sich darin äussert, dass das Magnetfeld praktisch nicht in den Supraleiter eindringen kann.

In dieser Situation machten Steven Weinberg und Abdus Salam (an frühere Beiträge von Sheldon Glashow anknüpfend) um 1967 unabhängig denselben Versuch, die elektromagnetische und die schwache Wechselwirkung im Rahmen einer spontan gebrochenen Eichtheorie einheitlich zu beschreiben. Zunächst stiessen diese Arbeiten auf wenig Echo. Dies beruhte hauptsächlich darauf, dass die beiden Autoren zwar die Hoffnung äusserten, dass ihre Theorie – ähnlich wie die QED – renormierbar sei, aber zeigen konnten sie dies nicht. Dies gelang erst einige Jahre später den beiden Holländern G. ’t Hooft und M. Veltman. Damit geriet die elektroschwache Eichtheorie auf die Tagesordnung der physikalischen Forschung und wurde zu einem dominierenden Thema. Bald darauf fand man auch für die *starke Wechselwirkung* eine elegante und erfolgreiche Eichtheorie, die Quantenchromodynamik (QCD), welche schnell allgemein akzeptiert wurde. Die elektroschwache Theorie und die QCD, die zusammen das *Standardmodell* der Teilchenphysik ausmachen, wurden vor allem in den neunziger Jahren an mehreren Beschleunigern, in erster Linie am Large Electron Positron Collider (LEP) des CERN, durch zahlreiche Präzisionsexperimente überprüft. Bis jetzt wurden – zum Leidwesen der Experimentalphysiker – keine eindeutigen Abweichungen von der Theorie entdeckt.

Trotz dieser grossen Erfolge bleiben aber noch viele Fragen offen. Diese zwingen uns, über das Erreichte hinauszugehen. Mit dem Higgs-Mechanismus ist es zwar möglich die Eichsymmetrie in renormierbarer Weise zu brechen; ob aber die Natur so verfährt, ist keineswegs sicher. Ein Verständnis der Massen der fundamentalen Teilchen (Leptonen und Quarks) hängt vermutlich eng mit der elektroschwachen Symmetriebrechung zusammen. Im Rahmen des Higgs-Mechanismus können wir jedoch über diese Massen fast nichts aussagen. Sie sind freie Parameter, die aus dem Experiment entnommen werden müssen.

Schlimmer noch, eine ganze Reihe von weiteren freien Parametern der Theorie ist im Higgs-Sektor angesiedelt. Es ist eine der grossen Hoffnungen, dass wir mit zukünftigen Experimenten am Large Hadron Collider (LHC), der am CERN im Bau ist, über diesen dunklen Aspekt Klarheit bekommen werden.

Das Standardmodell hat aber noch andere unbefriedigende Züge. Das beginnt schon damit, dass wir nicht verstehen, weshalb gerade seine und nicht andere Eichsymmetrien realisiert sind. Auch die zugehörigen Multipletts von Materiefeldern müssen aus dem experimentellen Material erraten werden. Dann allerdings – und das ist ein sehr befriedigender Aspekt – sind die Eichfelder, ihre Selbstwechselwirkungen und ihre Kopplungen an die Materiefelder (fast) vollständig bestimmt. Wie in der ART legt die Eichsymmetrie die Dynamik fest. Wir hoffen, dass wir eines Tages ein tieferes Verständnis für den Ursprung der Eichgruppen gewinnen werden.

<http://www.springer.com/978-3-540-22951-3>

Relativistische Quantentheorie

Eine Einführung in die Quantenfeldtheorie

Straumann, N.

2005, XII, 330 S., Softcover

ISBN: 978-3-540-22951-3