

Quarks, Leptonen und ihre Wechselwirkungen

Heinrich Leutwyler, Universität Bern

In den letzten Jahren zeichnet sich eine bemerkenswerte Klärung unserer Vorstellungen über die mikroskopische Struktur der Materie ab. Dies ist einerseits der Erkenntnis zuzuschreiben, dass viele der sogenannten Elementarteilchen (Proton, Neutron, π -Meson ...) nicht elementare, sondern aus Quarks zusammengesetzte Objekte sind; andererseits sind in der Theorie der Naturgesetze, die die Kräfte zwischen den Bausteinen der Materie beschreiben, wesentliche Fortschritte zu verzeichnen, die mit den beiden Stichwörtern Eichfeldtheorie und spontaner Symmetriezusammenbruch zu tun haben.

Quarks, Leptons and Their Interactions

Recent developments in particle physics are reviewed: the discoveries of leptons and quarks and some of the progress in our understanding of their mutual interactions. The key role of gauge theories in the basic laws of nature is emphasized.

1 Einleitung

Um die Entwicklung unserer Kenntnis über die Struktur der Materie zu skizzieren¹, erinnere ich daran, dass wir erst seit etwas mehr als hundert Jahren das periodische System kennen, wonach sich alle Substanzen aus den 92 in diesem System geordneten chemischen Elementen aufbauen lassen. Die 92 *Atome* sind insofern unveränderliche, reproduzierbare Bausteine, als sie isoliert stets nach kurzer Zeit in den Grundzustand übergehen – in diesem Zustand sind die Atome eines Elements (genauer: eines Isotops) voneinander nicht unterscheidbar. Gegen Ende des letzten Jahrhunderts wies Thomson nach, dass Atome *Elektronen* enthalten, und noch vor dem Beginn des Ersten Weltkrieges führten die bahnbrechenden Forschungen von Rutherford und Bohr zur Erkenntnis, dass die negativ geladenen Elektronen einen positiv geladenen Atomkern umkreisen. Für die chemischen Eigenschaften der Atome und damit für die ganze Vielfalt der Erscheinungsformen der Materie sind fast ausschliesslich die Elektronen verantwortlich; der Kern wird durch die Elektronenhülle von einer Teilnahme an der Wechselwirkung mit andern Atomen abgeschirmt.

¹ Text nach einem Vortrag vor der NGZ vom 9. Februar 1981

2 Teilchen und ihre Bausteine

2.1 Leptonen

Die Arbeiten von Heisenberg, Schrödinger, Pauli und Dirac führten in den zwanziger Jahren zu einer Theorie des Elektrons, d.h. einer quantitativen Formulierung des Naturgesetzes, das die elektromagnetische Wechselwirkung des Elektrons beschreibt. Diese Theorie erklärt sowohl den Aufbau der Atomhülle als auch die Wechselwirkungen zwischen den Atomen und liefert somit eine quantitative Grundlage für die Chemie und die Physik der Atome, die bis in minutiöse Details experimentell überprüft werden konnte. In dieser Theorie ist das Elektron im eigentlichen Sinne des Wortes ein Elementarteilchen, kein zusammengesetztes Objekt, und es gibt bis heute keine Beobachtungen, die darauf hinweisen würden, dass diese Vorstellung unrichtig ist. Dagegen wurde im Laufe der Zeit eine stattliche Anzahl von Verwandten des Elektrons entdeckt, die Familie der *Leptonen*. Bereits 1930 postulierte Pauli die Existenz eines neutralen Leptons, des *Neutrinos*, um die Beobachtungen beim radioaktiven Zerfall mit der Energie- und Impulserhaltung in Einklang zu bringen. Obschon dieses Teilchen regelmässig bei radioaktiven Zerfällen emittiert wird, gelang sein Nachweis erst 1956, weil es weder an der starken noch an der elektromagnetischen, sondern ausschliesslich an der schwachen Wechselwirkung teilnimmt und selbst grosse Detektoren unbeeindruckt durchquert, ohne eine Reaktion auszulösen. Schon 1936 war statt des Neutrinos völlig unerwartet ein schwerer Partner des Elektrons, das *Myon*, entdeckt worden. Dieses Teilchen hat sehr viele Eigenschaften mit dem Elektron gemeinsam, ist aber nicht stabil, sondern zerfällt in ein Elektron und zwei Neutrinos. Wir wissen heute noch nicht, wozu dieses zweite Elektron da ist und warum, wie 1962 gezeigt werden konnte, es sein eigenes Neutrino besitzt. Anstelle einer Erklärung dieses Rätsels ist vor drei Jahren ein weiteres schweres Elektron aufgetaucht, das *Tau*, das vermutlich wiederum sein eigenes Neutrino besitzt, so dass die Leptonenfamilie mindestens sechs Mitglieder umfassen dürfte: e , ν_e , μ , ν_μ , τ , ν_τ . Es ist zwar nicht neu, dass die Natur mit ihren Mitteln verschwenderischer umgeht als die Finanzdirektion; auf dem Niveau der Elementarteilchen deutet aber eine unverstandene Multiplizität doch darauf hin, dass wir das Problem noch nicht erfasst haben.

2.2 Baryonen und Mesonen

Die Erforschung der Struktur des Atomkerns begann in den dreissiger Jahren. Sie führte zur Erkenntnis, dass auch der Kern teilbar ist und aus *Protonen* und *Neutronen* besteht. Diese beiden Teilchen sind eng miteinander verwandt (was sich schon daran erkennen lässt, dass sie nahezu die gleiche Masse aufweisen), unterscheiden sich dagegen in augenfälliger Weise von den Leptonen: sie üben aufeinander eine *starke Wechselwirkung* aus. Diese Wechselwirkung ist für die ausserordentlich starke Bindung der Protonen und Neutronen

im Kern verantwortlich – diese ist etwa eine Million mal stärker als die (elektromagnetische) Bindung der Elektronen an die Atome. Die Entwicklung leistungsfähiger Beschleuniger erlaubte es, die Eigenschaften dieser Teilchen eingehend zu studieren. Ein erstes Ergebnis dieser Forschung war 1947 die Entdeckung des π -Mesons, eines Teilchens, das Yukawa 1935 vorausgesagt hatte und das in der Vermittlung der Kernkräfte eine entscheidende Rolle spielt. Seither ist eine Vielzahl von Verwandten sowohl des Protons und Neutrons (die *Baryonen*) als auch des π -Mesons (die *Mesonen*) zutage getreten. Heute kennen wir je etwa hundert Baryonen und Mesonen, die ausnahmslos instabil sind und nach kurzer Zeit zerfallen. Im Vergleich dazu nimmt sich die Familie der Leptonen sehr bescheiden aus. Dieser markante Unterschied hat seinen guten Grund: weder die Baryonen noch die Mesonen sind elementare Objekte, sondern sind wie die Atome aus einfacheren Bausteinen zusammengesetzt. Für zusammengesetzte Objekte ist ein reichhaltiges Spektrum verschiedener Zustände zu erwarten: 1) Es können verschiedene Kombinationen von Bausteinen in Betracht kommen (vgl. die 92 aus Protonen, Neutronen und Elektronen zusammengesetzten Atome). 2) Selbst bei vorgegebenen Bestandteilen sind verschiedene Zustände der Bewegung dieser Teile möglich. (Vgl. die angeregten Zustände der Atome. Das Elektron kann im Wasserstoffatom unendlich viele verschiedene Bahnen einnehmen. Die Tatsache, dass es nach kurzer Zeit in den Grundzustand springt, bedeutet lediglich, dass die angeregten Zustände des Systems nicht stabil sind.) Der erste quantitative Hinweis über die Natur der Bestandteile von Baryonen und Mesonen wurde ganz analog gefunden wie in der Atomphysik: Regelmässigkeiten in den Eigenschaften der Baryonen und der Mesonen führten zu einem *periodischen System*, das die physikalischen Eigenschaften dieser Teilchen ordnet (Gell-Mann, Ne’eman 1961). Ein eindrucklicher Erfolg dieses periodischen Systems war die Voraussage des Baryons Ω^- , dessen Eigenschaften recht genau aufgrund der Symmetrie, die der Klassifikation zugrundeliegt, vorausberechnet werden konnten.

2.3 Quarks

Bereits im Jahre 1964 schlugen Gell-Mann und Zweig eine Erklärung für dieses periodische System vor, die es in sehr einfacher Weise erlaubt, die Grundeigenschaften der Baryonen und Mesonen zu verstehen. Danach sind alle Baryonen aus drei *Quarks* zusammengesetzt, während die Mesonen aus je einem Quark und einem Antiquark bestehen. Es gibt mindestens fünf, vermutlich sechs verschiedene Quarks, die die Namen u, d, s, c, b, t für up, down, strange, charm, bottom und top tragen. Ein Baryon kann somit irgendeine der 56 Kombinationen uuu, uud, uus, ..., btt, ttt enthalten. Der Grundzustand der Kombination uud ist das Proton, der Grundzustand von udd das Neutron; das π^+ -Meson enthält $u\bar{d}$ das π^- besteht aus einem d-Quark und einem Anti-u. Bereits in der ersten Hälfte unseres Jahrhunderts hatte man Baryonen

gefunden, die aus drei u-Quarks, und solche, die aus drei d-Quarks bestehen. Diese Verwandten des Protons sind allerdings ausserordentlich kurzlebig; sie zerfallen, kurz nachdem sie erzeugt worden sind, sei es bei Kollisionen, wie sie beim Auftreffen der kosmischen Strahlung auf die Erdatmosphäre vorkommen, oder bei Kollisionen künstlich beschleunigter Protonen, wie sie z.B. am CERN in Genf oder am Schweizerischen Institut für Nuklearforschung in Villigen studiert werden können. Seit etwa 1950 kennen wir auch Baryonen, die neben den gewöhnlichen Quarks u und d (aus denen Proton und Neutron und damit alle Atome unserer Umwelt aufgebaut sind) das seltsame Quark s enthalten. Der Reihe nach wurden Baryonen mit dem Quarkgehalt uds (Λ , Σ^0), uus (Σ^+), dds (Σ^-), uss (Ξ^0) und dss (Ξ^-) entdeckt. Wenn man einmal weiss, dass die Baryonen aus Quarks aufgebaut sind und dass es u-, d- und s-Quarks gibt, dann ist die Voraussage des Ω^- eine Selbstverständlichkeit: es muss auch Baryonen geben, die aus drei s-Quarks bestehen. Heute kennen wir nicht nur die Grundzustände der erwähnten Kombinationen, sondern auch eine stattliche Anzahl angeregter Zustände, in denen die drei Quarks auf höheren Bahnen einander umkreisen. Diese angeregten Zustände machen sich wie in der Atomphysik durch die Linien bemerkbar, die sie beim Zerfall emittieren.

Das erste Teilchen, das ein c-Quark enthält (ein Meson vom Typ $c\bar{c}$), wurde erst im November 1974 entdeckt, und zwar gleichzeitig von zwei unabhängigen amerikanischen Gruppen. Ting und Richter erhielten für diese Entdeckung den Nobelpreis für Physik des Jahres 1976. Seither sind bereits weitere Mesonen gefunden worden, die c-Quarks enthalten, und 1976 wurde auch ein erstes Baryon nachgewiesen, das neben zwei gewöhnlichen Quarks ebenfalls ein c-Quark enthält. Die Existenz eines vierten Quarks neben u, d und s war bereits 1970 aufgrund von theoretischen Überlegungen im Zusammenhang mit der sogenannten schwachen Wechselwirkung vorhergesagt worden – es hatte sich als unmöglich erwiesen, die beobachteten Eigenschaften dieser Wechselwirkung zu verstehen, wenn nur drei verschiedene Quarks existieren würden. Es scheint, dass das c-Quark in der Tat die spezifischen Eigenschaften besitzt, um diese Lücke im Verständnis der schwachen Wechselwirkung auszufüllen.

Warum trat das s-Quark erst um 1950, das c-Quark erst 1974 in Erscheinung? Der Grund liegt darin, dass diese Quarks wesentlich schwerer sind als die gewöhnlichen Quarks u und d, die im Proton vorkommen. Dies hat zur Konsequenz, dass die Quarks s und c nicht stabil sind; sie zerfallen nach kurzer Zeit in eines der gewöhnlichen Quarks. Entsprechend sind auch die Baryonen oder Mesonen, die diese Quarks enthalten, nicht stabil – sie können nur studiert werden, wenn man in der Lage ist, sie überhaupt erst zu produzieren. In der kosmischen Strahlung geschieht dies zwar laufend, aber unter schwer kontrollierbaren Bedingungen. Ein Teilchenbeschleuniger bietet wesentlich bessere Versuchsbedingungen, vorausgesetzt, dass der Beschleuniger genügend Energie zur Verfügung stellt, um diese schweren Quarks erzeugen

zu können. Da ein s-Quark etwa um eine π -Meson-Masse ($\frac{1}{2}$ der Masse eines Protons) schwerer ist als die gewöhnlichen Quarks u und d, trat es erst dann zutage, als die Beschleuniger genügend Energie lieferten, um π -Mesonen zu produzieren. Das c-Quark ist etwa anderthalbmal so schwer wie ein Proton und benötigt entsprechend viel Energie, um überhaupt erst produziert zu werden. Bei Kollisionen mit so hohen Energien kommt erschwerend hinzu, dass statt eines c-Quarks meistens viele gewöhnliche Quarks erzeugt werden. Es ist gar nicht leicht, in dieser heißen Suppe das Haar zu finden.

Vor drei Jahren hat sich nochmals ein neues Quark bemerkbar gemacht, das b-Quark: es wurden drei neue Mesonen entdeckt, die in einem periodischen System, das auf u, d, s und c beruht, keinen Platz finden. Das b-Quark ist etwa fünfmal schwerer als das Proton. Die einfachste Theorie, die mit diesem Quark ohne Schwierigkeiten zu Rande kommt, benötigt ein sechstes Quark, das t-Quark. Vermutlich haben wir es (mindestens) mit sechs Leptonen und sechs Quarks zu tun. Warum es so vieler Teilchen bedarf, um eine kohärente Welt zu bauen, entzieht sich zwar unserer Kenntnis, nicht aber unserer Freude an der Spekulation.

3 Die vier Wechselwirkungen

Die Kenntnis ihrer Bausteine ist natürlich eine wesentliche Voraussetzung für ein Verständnis der Physik der Elementarteilchen. Einen Massstab für die Qualität dieses Verständnisses setzt aber erst die Kenntnis der Naturgesetze, die die Wechselwirkungen dieser Bausteine regeln. Die Geschichte der Physik kennt eine faszinierende Folge von Entwicklungen, die von einer vorwiegend beschreibenden Formulierung der Kräfte und Energien, die sich in den verschiedenen Erscheinungsformen der Materie zeigen, hin zu einem einfachen und umfassenden Naturgesetz führten. Symbole einer solchen Entwicklung sind Newtons «Aha-Erlebnis» mit dem Apfel (Naturgesetz der *Gravitationswechselwirkung*) oder die allgemeine Relativitätstheorie Einsteins, die dieses Naturgesetz auf eine geometrische Eigenschaft, die Krümmung des Raums, zurückführt, oder Maxwells Erkenntnis, dass nicht nur die elektrischen und die magnetischen Kräfte, sondern auch das Licht Aspekte eines einzigen Naturgesetzes darstellen, das die *elektromagnetische Wechselwirkung* regelt. Die oben erwähnte Theorie des Elektrons zeigte dann, dass auch die Kräfte, die die Struktur der Körper bestimmen, die chemischen Bindungen, die Kristallformen usw. der elektromagnetischen Wechselwirkung zuzuschreiben sind. Diese Wechselwirkung bestimmt die Erscheinungsform, die die Materie annehmen wird, wenn eine gegebene Anzahl von Atomkernen und Elektronen gemischt werden. Die Frage, wie sich eine gegebene Anzahl von Protonen und Neutronen zu Atomkernen zusammenfügen, wenn sie im Innern eines Sterns miteinander reagieren, betrifft ein anderes Naturgesetz: die *starke Wechselwirkung*. Seit Beginn der Erforschung der Struktur des Atomkerns

wurden immer wieder Formulierungen dieses Naturgesetzes versucht, meist semi-phänomenologischer Art. Erst 1973 wurde eine Theorie der starken Wechselwirkung gefunden, die Quantenchromodynamik, die nicht nur die Bezeichnung Theorie verdient, sondern die vermutlich sogar richtig ist.

Neben der Gravitation, der elektromagnetischen und der starken Wechselwirkung kennen wir eine vierte Kategorie von Kräften, die *schwache Wechselwirkung*, die für den radioaktiven Zerfall, z.B. den Zerfall eines Neutrons in ein Proton, ein Elektron und ein Neutrino, verantwortlich ist. Fermi hat im Jahre 1934 eine semi-phänomenologische Theorie dieser Wechselwirkung vorgeschlagen, die sich ausgezeichnet bewährt hat, die aber zu innern Widersprüchen führt, wenn sie über den Bereich einer Beschreibung der radioaktiven Zerfälle hinaus als umfassendes Naturgesetz aufgefasst wird.

3.1 Eichfeldtheorie

In der Theorie der schwachen Wechselwirkung zeichnete sich in den sechziger Jahren ein Durchbruch ab, der zu einer tiefen Einsicht in die Verwandtschaft der vier Wechselwirkungen geführt hat. Dieser Durchbruch beruht auf den theoretischen Fortschritten im Verständnis der *Eichfeldtheorie*, einer mathematischen Struktur, die mit der Differentialgeometrie eng verwandt ist und die für die elektromagnetische, schwache und starke Wechselwirkung eine ähnliche zentrale Rolle zu spielen scheint wie die Differentialgeometrie für die Gravitationswechselwirkung.

Der geistige Vater der Eichfeldtheorie ist James Clark Maxwell, ein genialer englischer Theoretiker, der um 1864 gezeigt hat, dass die elektrischen und magnetischen Wechselwirkungen der Materie durch ein einziges Eichfeld, das elektromagnetische Feld, beschrieben werden können. Hermann Weyl hat in zwei grundlegenden Arbeiten aus den Jahren 1918 und 1929 dem elektromagnetischen Feld eine geometrische Deutung gegeben, die sich für die Entwicklung der Eichfeldtheorie als zentral erwiesen hat. Er konnte zeigen, dass die Eigenschaften des elektromagnetischen Felds eng mit der Erhaltung der elektrischen Ladung zusammenhängen und dass diese Erhaltung einer Symmetrie der Naturgesetze entspringt. Diese Symmetrie, die sogenannte Eichinvarianz, ist für die Beschreibung der Phänomene, an denen das elektromagnetische Feld beteiligt ist, von zentraler Bedeutung – man kann die Betrachtungsweise sogar umdrehen und das elektromagnetische Feld als Konsequenz dieser Symmetrie ansehen. Eine der Folgen dieser Symmetrie ist die Tatsache, dass die elektromagnetische Wechselwirkung lange Reichweite hat (Coulombsches $1/r^2$ -Gesetz). Im Jahre 1954 wiesen sodann Yang und Mills nach, dass die geometrischen Überlegungen von Weyl auf andere Symmetrien, die mit der Erhaltung der elektrischen Ladung nichts zu tun haben, erweitert werden können. Speziell können sie auch auf die Symmetrien angewandt werden, die dem periodischen System der Baryonen und Mesonen zugrunde liegen. Diese Verallgemeinerung führt dazu, dem elektromagnetischen Feld analoge Eich-

felder einzuführen, die mit den von der Symmetrie erfassten Teilchen wechselwirken. Allerdings ergab sich als unmittelbare Konsequenz der Symmetrie, dass die durch diese Felder vermittelten Wechselwirkungen langreichweitig sein müssen, analog wie die elektromagnetische Wechselwirkung. Die Idee, beispielsweise die schwache Wechselwirkung solchen geometrisch begründeten Eichfeldern zuzuschreiben, stand daher mit der Erfahrung in krassem Widerspruch, wonach die schwache Wechselwirkung extrem kurze Reichweite ($< 10^{-13}\text{cm}$) aufweist, und wurde fallengelassen.

3.2 Spontaner Symmetriezusammenbruch

Die Eichfeldtheorie von Weyl, Yang und Mills fristete während zehn Jahren ein rein akademisches Dasein, bis Brout, Englert und Higgs im Jahre 1964 beweisen konnten, dass sich in dieser Theorie unter gewissen Voraussetzungen ein ausserordentlich interessantes Phänomen zeigt: die *Symmetrie*, die der ganzen Theorie zugrunde liegt, kann aus dynamischen Gründen *spontan zusammenbrechen*. Dies geschieht dann, wenn der Zustand mit der tiefsten Energie aus irgendeinem Grund nicht ein symmetrischer Zustand ist. Ein analoges Phänomen war seit langem in der Theorie des Ferromagnetismus bekannt: die Naturgesetze, die die mikroskopische Struktur des Ferromagneten beschreiben (die Theorie des Elektrons), zeichnen keine Raumrichtung aus, d.h. sind symmetrisch gegenüber Drehungen. Trotzdem ist der Grundzustand des Magneten ein Zustand, in dem die magnetischen Momente aller Gitterteilchen in derselben Richtung ausgerichtet sind. Dieser asymmetrische Zustand hat eine tiefere Energie als alle symmetrischen Zustände, bei denen keine Raumrichtung ausgezeichnet ist. Der Grundzustand verletzt die Drehsymmetrie; sie zeigt sich nur noch indirekt darin, dass die ausgezeichnete Richtung der Magnetisierung beliebig gewählt werden kann. In einem festen gegebenen Zustand des Magneten ist die Drehsymmetrie des Systems nicht sichtbar, sie ist spontan gebrochen. Heisenberg hatte schon mehrere Jahre zuvor auf die Möglichkeit hingewiesen, dass ein analoger spontaner Zusammenbruch auch den Symmetrien der Elementarteilchenphysik zustossen könnte. Brout, Englert und Higgs haben gezeigt, dass ein solcher Symmetriezusammenbruch in gewissen Eichfeldtheorien in der Tat passiert. Dieser spontane Zusammenbruch zieht die Konsequenzen der Symmetrie stark in Mitleidenschaft. Beispielsweise fällt die Aussage dahin, dass die durch die Eichfelder vermittelte Wechselwirkung notwendigerweise lange Reichweite haben muss – im spontan gebrochenen Zustand kann die Reichweite der Wechselwirkung sogar weit unter 10^{-13}cm liegen. Damit fällt der Einwand weg, der gegen eine Eichfeldtheorie der schwachen Wechselwirkung erhoben werden musste.

3.3 Eichfeldtheorie der elektromagnetischen und schwachen Wechselwirkung

Auf Grund dieser Überlegungen haben Glashow, Salam und Weinberg eine

realistische Eichfeldtheorie der schwachen und elektromagnetischen Wechselwirkung vorgeschlagen, die eine ganze Reihe bemerkenswerter Eigenschaften aufweist. *Erstens* stellt sie die erste Theorie der schwachen Wechselwirkung dar, die weder innere Widersprüche enthält noch von vornherein mit der Erfahrung in Widerspruch steht. *Zweitens* liefert diese Theorie nicht nur eine konsistente Beschreibung bekannter Phänomene, sondern führt zu Voraussagen, die einer experimentellen Bestätigung oder Widerlegung zugänglich sind. In der Tat erwiesen sich die bisher überprüfbareren Voraussagen der Theorie als korrekt. In Anerkennung dieses Erfolgs wurde den Entdeckern der Theorie der Nobelpreis des Jahres 1979 verliehen. *Drittens*: die Theorie von Glashow, Salam und Weinberg zeigt, dass die elektromagnetischen Erscheinungen und der radioaktive Zerfall zwei Aspekte ein und desselben Naturgesetzes sind. Dieser einheitliche Ursprung ist nur deshalb schwer zu erkennen, weil die Symmetrie der elektromagnetischen und schwachen Wechselwirkung spontan gebrochen ist. Der Grundzustand ist bezüglich der schwachen Wechselwirkung asymmetrisch; diese Asymmetrie unterdrückt nicht nur die Reichweite der schwachen Wechselwirkung, sondern auch ihre effektive Stärke – das Naturgesetz selbst weist den beiden Kräften dieselbe Stärke und Reichweite zu. Ein *vierter* Zug dieser Theorie bestätigt eine Idee, die ebenfalls auf Heisenberg zurückgeht. Der spontane Symmetriezusammenbruch der elektromagnetischen und schwachen Wechselwirkung führt quasi gratis auch zu einer Verletzung der Symmetrie, die dem periodischen System der Baryonen und Mesonen zugrunde liegt, und löst damit ein altes Problem in der Teilchenphysik: Warum sind die sich im periodischen System manifestierenden Symmetrien nicht vollkommene, sondern nur approximative Symmetrien? Warum macht die Natur von einer möglichen Symmetrie nur zu 90% Gebrauch? Die Antwort, die die Theorie der schwachen und elektromagnetischen Wechselwirkung darauf gibt, lautet: Die Naturgesetze sind streng symmetrisch. Die Symmetrie ist aber schwer erkennbar, weil der Grundzustand aus dynamischen Gründen nicht symmetrisch sein kann. Die Symmetrieverletzungen sind ausschliesslich auf diese Asymmetrie des Grundzustands zurückzuführen.

Trotz all dieser bestechenden Züge der Theorie von Glashow, Salam und Weinberg handelt es sich um ein Modell mit ausgesprochen provisorischem Charakter. Einige grundlegende Fragen bleiben unbeantwortet und können auf Grund dieses Modells jetzt lediglich präziser gestellt werden: die Vereinheitlichung von elektromagnetischer und schwacher Wechselwirkung bleibt unvollkommen; die Theorie bietet kein Verständnis für die Multiplizität der Leptonen und der Quarks – zwei Leptonen und zwei Quarks würden für den Aufbau der Materie unserer Umwelt im Rahmen dieser Theorie durchaus ausreichen; schliesslich ist auch der Mechanismus der spontanen Symmetriebrechung noch weitgehend unverstanden – die Theorie gibt zwar eine plausible Erklärung für die Tatsache, dass die Quarks u , d , s , c , b ... unterschiedliche Massen aufweisen, gestattet es aber nicht, diese Massen zu berechnen. Man

benötigt kaum Phantasie, um zu prophezeien, dass die Suche nach einer vollkommeneren Theorie der elektromagnetischen und schwachen Wechselwirkung in den kommenden Jahren intensiv fortgesetzt werden wird.

3.4 Starke Wechselwirkung

Zum Schluss möchte ich kurz erläutern, weshalb auch die starke Wechselwirkung sehr gute Aussichten hat, durch Eichfelder vermittelt zu werden. Auch diese Einsicht verdanken wir einem besseren Verständnis der Eigenschaften der Eichfeldtheorie.

Seit der Aufstellung der Quarkhypothese wurde natürlich intensiv nach Quarks gesucht. Es liegt nahe zu erwarten, dass Systeme, die aus Quarks bestehen, bei Kollisionen genügend hoher Energie in ihre Bestandteile zerfallen sollten. Die Suche nach Quarks verlief jedoch ohne Ergebnis. Selbst wenn zwei Protonen mit den gewaltigen Energien aufeinanderprallen, die in der kosmischen Strahlung vorkommen, wurden nach der Kollision nie vereinzelt Quarks als Bruchteile beobachtet. Man muss daraus wohl den Schluss ziehen, dass Quarks gar nicht isoliert existieren können. Eine Theorie der starken Wechselwirkung, die die Bindung der Quarks zu Baryonen oder Mesonen beschreibt, muss in erster Linie die paradoxe Feststellung erklären, dass Quarks zwar in Verbänden von zwei oder drei Teilchen, aber nicht isoliert vorkommen. Die einzige heute bekannte Theorie, die ein solches Verhalten mindestens nahelegt, ist wiederum eine Eichfeldtheorie, die *Quantenchromodynamik*. In dieser Theorie wird die Unmöglichkeit, einzelne Quarks aus dem Verband zu lösen, wie folgt erklärt:

Untersucht man den Raum in der unmittelbaren Umgebung beispielsweise eines Elektrons, dann stellt man fest, dass dieses eine Wolke von Elektronen und Positronen mit sich führt – das Elektron polarisiert das Vakuum in seiner Umgebung. Dabei stellt sich heraus, dass die Positronen der Wolke vom Elektron angezogen, die Elektronen der Wolke dagegen abgestossen werden, so dass sich im Endeffekt mehr Positronen in der Umgebung des Elektrons finden als Elektronen, die Wolke also positiv geladen ist. Die Gesamtladung eines Elektrons (inklusive Wolke) ist daher kleiner als die Ladung eines nackten Elektrons: das Vakuum schirmt die Ladung ab. Dieses Verhalten ist für alle normalen Feldtheorien charakteristisch, gilt aber nicht für die Quantenchromodynamik, die genau das entgegengesetzte Verhalten zeitigt: die in der Wolke vorhandenen Teilchen haben vorwiegend dasselbe Ladungsvorzeichen wie das nackte Teilchen selbst; das Vakuum verstärkt die Ladung, statt diese wie üblich abzuschirmen. (Dabei ist zu präzisieren, dass hier nicht von der elektrischen Ladung die Rede ist, der Quelle des elektromagnetischen Felds, sondern von der Ladung, die das starke Eichfeld bewirkt, der sogenannten Farbquantenzahl.) Es spricht einiges für die Vermutung, dass sich diese Verstärkung aufschaukelt: das Teilchen umgibt sich mit einer Wolke, deren Ladung sich zur Ladung des Teilchens addiert; das entstehende Gebilde hat eine grös-

sere Ladung und wird das Vakuum in seiner Umgebung verstärkt polarisieren usw. Die in einer Kugel mit dem nackten Teilchen als Mittelpunkt enthaltene Energie wächst mit zunehmendem Radius an. Die erwähnte Vermutung besagt, dass die Gesamtenergie eines solchen Teilchens unendlich gross wird. Zustände mit endlicher Energie sind nicht für einzelne Teilchen, wohl aber für Paare zweier Teilchen mit entgegengesetzter Ladung möglich. (Allgemeiner können nur Systeme, deren Gesamtladung verschwindet, endliche Energie haben. Dies ist nicht nur für Quark-Antiquark-Paare, sondern auch für Systeme der Fall, die aus drei Quarks bestehen.) Um die beiden Quarks, aus denen ein Meson zusammengesetzt ist, auseinanderzuziehen, muss man dem System Energie zuführen, damit sich die Wolke um die beiden Teilchen aufbauen kann – die benötigte Energie wächst mit zunehmendem Abstand. Wenn eine kritische Schwelle erreicht ist, wird die zugeführte Energie ausreichen, ein Quark-Antiquark-Paar zu erzeugen. Das neu entstandene Antiquark kann sich mit dem alten Quark verbinden, das neue Quark wird das alte Antiquark heiraten – es entstehen zwei Mesonen. Anstelle eines Quarks wird man also ein Meson aus dem Meson herausziehen.

Eine befriedigende quantitative Beschreibung der Bewegung der Quarks in einem Meson oder Baryon auf Grund dieser Theorie steht noch aus wie auch eine quantitative Untermauerung der oben skizzierten Erklärung für die paradoxe Feststellung, dass Quarks zwar zu zweien oder dreien, nicht aber isoliert in vacuo vorkommen.

Die Physik der Elementarteilchen hat im vergangenen Jahrzehnt eine erstaunliche Wandlung erfahren, die sich darin zeigt, dass wir heute wieder mit Theorien arbeiten können und uns nicht mehr mit einem Mosaik semi-phänomenologischer Ansätze behelfen müssen. Diese Wandlung unterscheidet sich von der Entwicklung der Atomphysik in den zwanziger Jahren dadurch, dass zum Verständnis der Naturgesetze keine grundsätzlich neuen mathematischen Strukturen erforderlich zu sein scheinen, an die die physikalische Denkweise erst angepasst werden müsste. Statt dessen erhielt in völlig unerwarteter Weise ein bekannter geometrischer Begriff, das Eichfeld, eine universelle Bedeutung. Nicht nur die elektromagnetische Wechselwirkung, sondern auch die schwache und die starke Wechselwirkung werden offenbar durch Felder von der Art des elektromagnetischen Felds vermittelt. Damit tritt eine enge Verwandtschaft der drei Wechselwirkungen zutage; die Tatsache, dass die vierte Wechselwirkung, die Gravitation, ebenfalls durch eine einfache geometrische Struktur, die Differentialgeometrie, erfasst werden kann, die zudem mit der Geometrie der Eichfelder enge Beziehungen pflegt, unterstreicht die fundamentale Rolle einfacher geometrischer Begriffsbildungen in den Grundgesetzen der Physik.