Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin *100(2009), 23–55*

Karl Lanius

Erforschung des Mikrokosmos – eine Zäsur

Einleitung

In einigen Wochen geht der leistungsstärkste Beschleuniger, der je gebaut wurde, in Betrieb. In ihm werden in zwei gegenläufigen Ringen Protonen auf 99,999999 Prozent der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt, um in vier Kreuzungspunkten aufeinander zu stoßen. In internationaler Zusammenarbeit entstand im CERN (Genf) mit einem Kostenaufwand von rund drei Milliarden Schweizer Franken ein einmaliges Forschungsinstrument.

Was erhoffen sich die Teilchenphysiker von dieser gewaltigen Anlage?

An der Schwelle des 20. Jahrhunderts hatte sich die Überzeugung von der Realität der atomaren Struktur der Materie endgültig durchgesetzt. Jeder bedeutende Fortschritt beim Studium der Mikrowelt lehrte die Physiker jedoch, um wie vieles reicher die Natur selbst ist als unsere Vorstellungen von dem, was hinter der jeweiligen Grenze des bisher Erkannten liegt. Mit immer leistungsstärkeren Beschleunigern, mit Detektoren immer höherer Empfindlichkeit gelang das Eindringen in immer tiefer liegende Schichten der Materie. Auf diese Weise konnte der erforschte Raumbereich von der Dimension des Atoms (~ 10^{-8} cm) auf etwa den hundert millionsten Teil der Größe des Atoms (~ 10^{-16} cm) reduziert werden. Entsprechend wandelte sich die Antwort auf die Frage „Welche Elementarteilchen gibt es in der Natur?“

Aus den Streuversuchen mit α-Teilchen folgerte Rutherford 1911, daß das Atom aus einem kleinen, positiv geladenen, fast die ganze Atommasse tragenden Kern besteht, der von einem Planetensystem von Elektronen umgeben ist. Der Kern des Wasserstoffatoms wurde Proton p genannt.

Vor den Physikern stand damit die Aufgabe, die unveränderlichen charakteristischen Eigenschaften der Atome aus ihrer Kern-Elektron-Struktur zu verstehen. Die Lösung des Problems beruht auf dem Verständnis der Bedeutung des Planckschen Wirkungsquantums h im atomaren Bereich. Dieses Verständnis führte zur Quantenmechanik (Bohr, Schrödinger, Heisenberg und Dirac) mit ihrem charakteristischen Welle-Teilchen-Dualismus. Die ex-

perimentell beobachtbaren diskreten Quantenzustände des durch die elektrische Kraft zusammengehaltenen Kern-Elektron-Systems sind eine Folge der Welleneigenschaften der Elektronen.

Die Quantenmechanik des Elektron-Kern-Systems macht uns das Verhalten der Gase, der Flüssigkeiten und der festen Körper unter irdischen Bedingungen verständlich. Wir verstehen im Prinzip die chemischen und biologischen Erscheinungen im molekularen Bereich. Bis zum Beginn der dreißiger Jahre gingen daher die theoretischen Überlegungen von der Existenz zweier fundamentaler Teilchenarten aus, der Elektronen und der Protonen. Sie wurden als unveränderliche Elementarteilchen betrachtet. Daß diese Vorstellung falsch war, zeigten der experimentelle Nachweis des von der relativistischen Quantentheorie vorausgesagten Antiteilchens des Elektrons e^-, des Positrons e^+, und insbesondere die Entdeckung der Paarerzeugung von Elektron und Positron bzw. ihre gegenseitige Annihilation. Elektronen und Positronen werden erzeugt und vernichtet. Eine Elementarität im Sinne einer Unveränderlichkeit individueller Elektronen und Positronen gibt es nicht.

Neben diesem grundlegenden Wandel in der Auffassung der Elementarität brachte die erste Hälfte der dreißiger Jahre einige weitere wichtige Erkenntnisse. Die Entdeckung des Neutrons n durch Chadwick machte den Weg frei für das Verständnis des Aufbaus der Atomkerne aus Protonen und Neutronen.

Ausgehend von der Forderung der Energie-, Impuls- und Drehimpulserhaltung im radioaktiven Zerfall folgerte Pauli die Existenz des Neutrinos ν_e. Dabei ging es ihm um die Rettung dieser grundlegenden Erhaltungssätze der Physik. Der experimentelle Nachweis der Neutrinos gelang jedoch erst ca. 25 Jahre später Cowan und Reines. Sie nutzten dabei den hohen Antineutrino-Fluß eines Kernreaktors.

In den dreißiger Jahren standen zur Beschreibung der Struktur der Materie fünf elementare Teilchen zur Verfügung: Das Elektron und das Neutrino, das Photon als das Quant des elektromagnetischen Feldes und Proton und Neutron als die Bausteine der Kerne. Neben den Teilchen war das Vorhandensein von vier verschiedenen fundamentalen Wechselwirkungen oder Kräften in der Natur bekannt:

- Die starke Wechselwirkung, welche die Bindung der Protonen und Neutronen im Kern bewirkt. Die Reichweite dieser Kraft beträgt nur ca. 10^{-13} cm.
- Die elektromagnetische Wechselwirkung, die allen elektrischen und magnetischen Erscheinungen zugrunde liegt (Aufbau der Atome und Mole-

küle). Bekanntlich besitzt diese Kraft eine unendliche, sich mit dem Quadrat des Abstands zwischen den elektrischen Ladungen verringernde Reichweite.

- Die schwache Wechselwirkung; sie verursacht z. B. den radioaktiven Zerfall. Im Vergleich zur starken Wechselwirkung ist die schwache Wechselwirkung beim radioaktiven Zerfall um das 10^{16}fache schwächer. Ihre Reichweite ist um einen Faktor 100 kürzer als die der starken Kraft, und ihre Stärke wächst mit dem Anwachsen der Energie der schwach wechselwirkenden Teilchen.
- Die Gravitations-Wechselwirkung, der wegen ihrer Masse sämtliche Teilchen unterliegen, die aber wegen der sehr kleinen Massen der Teilchen im atomaren und subatomaren Bereich nur außerordentlich schwach wirkt. Auch sie hat eine unendliche Reichweite und läst sich nicht abschirmen.

Als ich Anfang der 1950er Jahre mit Untersuchungen der kosmischen Strahlung begann, wurden überwiegend zwei Detektortypen verwendet Nebelkammern und Kernemulsionen.

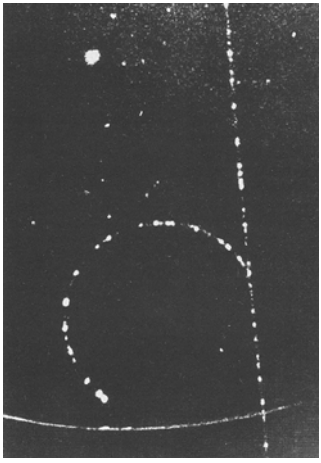

Abb. 1: Ein schnelles Elektron trifft längs seiner Bahn auf ein Elektron. Das langsamere Sekundärelektron hinterläßt eine im Magnetfeld stark gekrümmte Spur in der Nebelkammer .

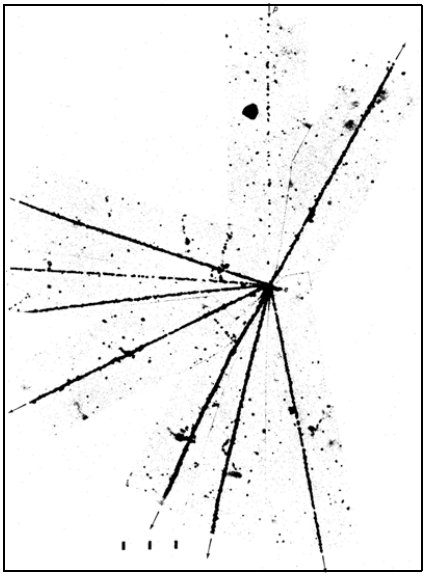

Abb. 2: Ein Proton der kosmischen Strahlung zertrümmert einen schweren Atomkern in einer Kernemulsion.

Die kosmische Strahlung war einerseits Untersuchungsgegenstand – woraus besteht sie und wo liegen ihre Quellen –, andererseits erlaubte sie das Studium hochenergetischer Kernprozesse, da zu dieser Zeit keine Beschleuniger vorhanden waren, die vergleichbar hochenergetische Teilchen erzeugen konnten.

Mit der Entwicklung leistungsstarker Beschleuniger kam ein weiterer Detektor hinzu, die Blasenkammer. Die erste Blasenkammer wurde 1952 von Donald Glaser gebaut. Sie enthielt wenige Kubikzentimeter Flüssigkeit. In weniger als zwei Jahrzehnten wuchs das Volumen der an Beschleunigern eingesetzten Blasenkammern auf das Millionenfache.

Optische Spurenkammern, wie Nebel- und Blasenkammern, sind energetisch instabile Systeme. Durchfliegt ein elektrisch geladenes Teilchen eine Nebelkammer, werden die längs der Teilchenbahn befindlichen Atome ionisiert. Sie werden in der mit übersättigtem Wasserdampf gefüllten Kammer zu Kondensationskeimen für Wassertröpfchen. Die Teilchenbahn wird als Nebelspur sichtbar.

Blasenkammern sind mit einer leicht siedenden durchsichtigen Flüssigkeit gefüllt. Die durch Ionisation entstandenen Kondenskeime längs der Bahn führen zur Bildung von Dampfbläschen, wenn kurz vor dem Teilchendurchgang die Flüssigkeit überhitzt wird.

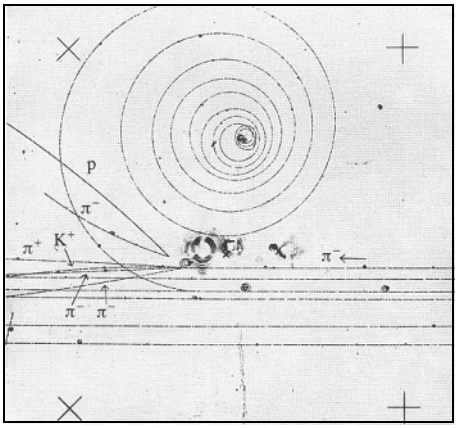

Abb. 3: Ein in der Wasserstoff-Blasenkammer MIRABELLE aufgezeichneter Prozeß. Ein in die Kammer geschossenes, negativ geladenes π^--Meson mit einer Energie von 32 GeV trifft auf ein Proton. Im Wechselwirkungsprozeß entstehen 6 Teilchen: ein K^+-Meson, ein π^+-Meson, zwei π^- Mesonen, ein (unsichtbares) π°-Meson und ein neutrales Λ-Hyperon, das in ein Proton und ein π^--Meson zerfällt:

$$\pi^- + p \rightarrow K^+ + \pi^+ + 2\,\pi^- + \Lambda^\circ + \pi^\circ$$
$$\Lambda^\circ \rightarrow p + \pi^-$$

Kernemulsionen, Nebel- und Blasenkammern vermitteln dem Physiker noch eine gewisse Erlebnisnähe zu dieser von unserer unmittelbaren Umwelt so weit entfernten Welt des Mikrokosmos. Sie haben jedoch einen großen Nachteil, sie sind nicht automatisch auslösbar. Physiker bezeichnen sie als nicht triggerbar.

Triggerbare Detektoren, die heute sowohl an Beschleunigern als auch in der kosmischen Strahlung eingesetzt werden, verwenden Funkenkammern und Szintillationszähler. Die Dimensionen dieser Detektoren, die zu Beginn der 1990er Jahre erreicht wurden, vermittelt der L3-Detektor, der am großen Elektron-Positron-Speicherring (LEP) des CERN eingesetzt wurde.

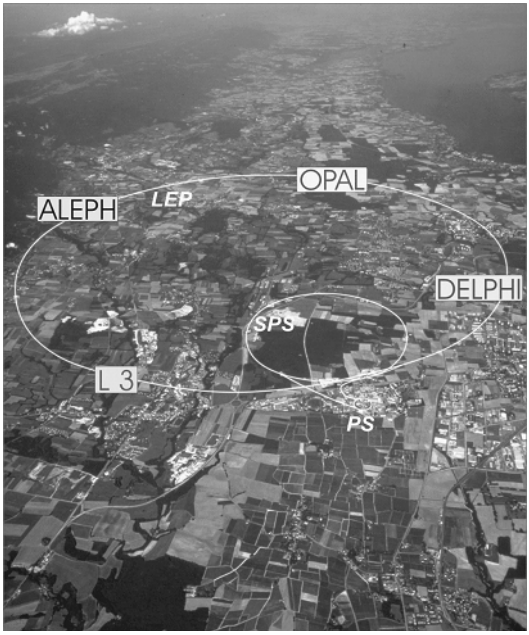

Abb. 4a: Der unterirdische Verlauf des großen Elektron-Positron-Speicherring-Beschleunigers und die Lage der Detektoren.

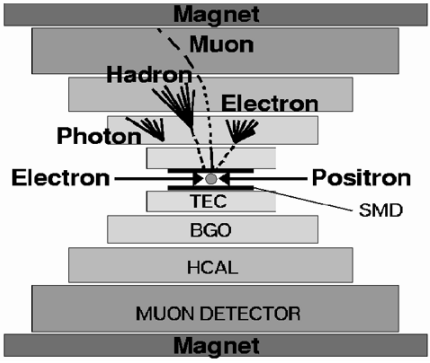

Abb. 4b: Der schematische Aufbau des L3-Detektors. Von innen nach außen ist er aus folgenden Teildetektoren aufgebaut: der Vertex- Drahtfunkenkammer (TEC), einem Kalorimeter zum Nachweis von Elektronen und Photonen (BGO), einem Kalorimeter zum Nachweis der stark wechselwirkenden Teilchen (HCAL), Funkenkammern zum Nachweis schwach wechselwirkender geladener Teilchen (Muon Detector).

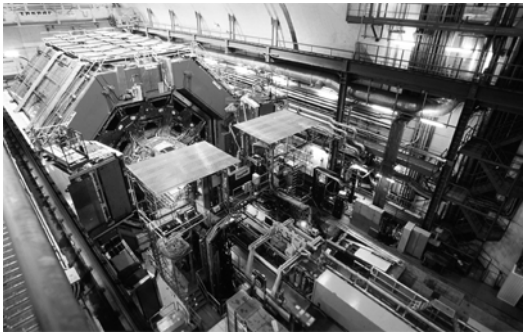

Abb. 4c: Ein Photo des L3-Detektors, nach der Montage im Strahl des Beschleunigers.

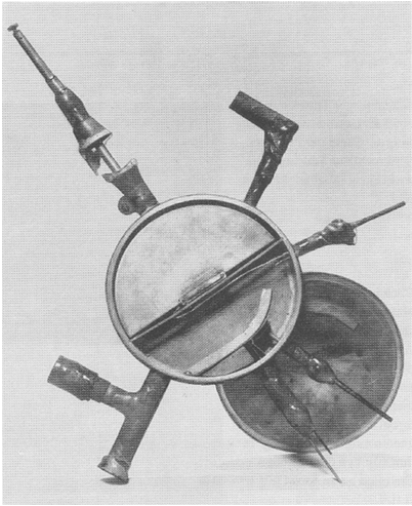

Abb. 5a: Die Fotografie zeigt die Vakuumkammer mit den beiden Halbdosen eines der ersten von Ernest Lawrence in Berkeley gebauten Zyklotrons. Sein Durchmesser beträgt 10 cm.

Die Entwicklung immer größerer und leistungsfähigerer Detektoren ist nicht zu trennen von der Entwicklung der Beschleuniger. Um in den Bereich unterhalb der Ausdehnung von Proton und Neutron vorzudringen, muß die Wellenlänge des Geschoßteilchens kleiner als 10^{-13} cm sein.[1] Für ein Proton als

1 Durch die de-Broglie-Beziehung $\lambda=h/p$ werden Teilchen Wellen zugeordnet. λ ist die Wellenlänge des Teilchens und p sein Impuls.

Geschoßteilchen ist eine Energie von 20 MeV erforderlich, um eine Wellenlänge von $\lambda \approx 10^{-13}$ cm zu erreichen.[2]

Prototyp eines Beschleunigers ist das Zyklotron.

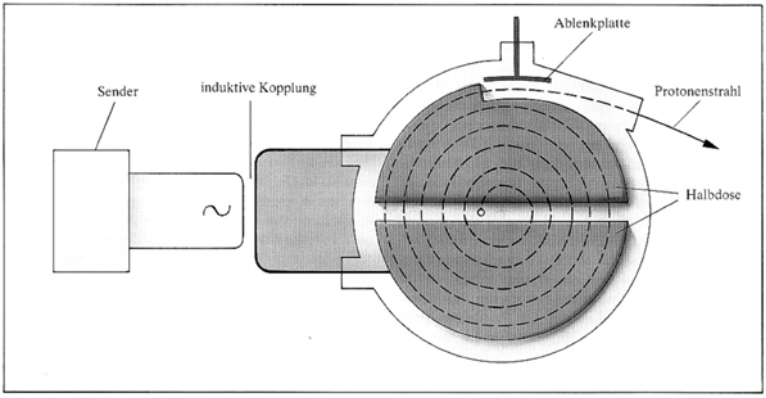

Abb. 5b: Schematische Darstellung eines Zyklotrons und Andeutung der Bahn der Protonen. Senkrecht zur Teilchenbahn wirkt ein homogenes Magnetfeld.

Die Luftbildaufnahme des neuen CERN-Beschleunigers vermittelt einen Eindruck von der Größe der Anlage. Im LHC, dem „Großen Hadron-Collider" werden zwei Protonenstrahlen auf jeweils 7 TeV beschleunigt, um dann in vier Kreuzungsbereichen aufeinander zu treffen. Da Geschoß- und Zielteilchen gleich große Impulse haben, läßt sich die gesamte Bewegungsenergie zur Erzeugung neuer Teilchen nutzen. Diese Art der Beschleuniger bezeichnet man als Speicherringe (Collider). Das LHC befindet sich in einem 27 km langen Tunnel in 50-150 m Tiefe. Der Beschleuniger ist aus Tausenden supraleitenden Magneten aufgebaut, die mit 10 000 Litern flüssigen Heliums auf 2 Kelvin gekühlt werden und eine Feldstärke von 8,3 Tesla erreichen. Die Anlage erlaubt es in den Bereich von 10^{-17} cm vorzudringen. Am LHC wollen rund 7000 Physiker aus mehr als 80 Ländern p-p-Wechselwirkungen in vier Detektorsystemen untersuchen.

2 Ein Elektron erreicht beim Durchfliegen einer Spannung von einem Volt eine Energie von einem Elektronenvolt (eV), beim Durchfliegen von einer Millionen Volt, also 10^6 eV = 1 MeV; 10^9 eV = 1 GeV_j. 10^{12} eV = 1 TeV.

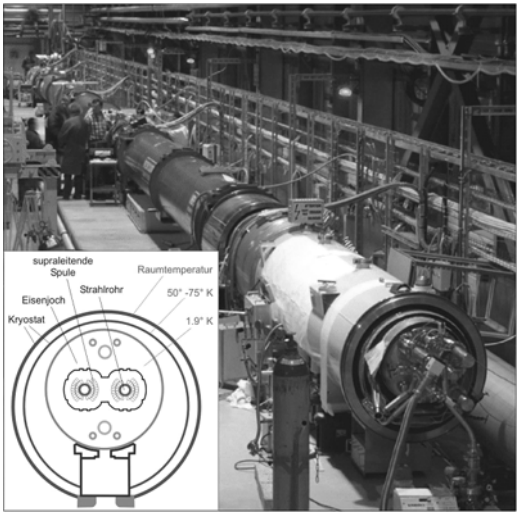

Abb. 6a: Querschnitt durch einen Dipolmagneten des LHC-Beschleunigers. Bild einer LHC-Zelle mit Magneten, Vakuumanlage, Kältetechnik und Stromversorgung wie sie im unterirdischen Tunnel angeordnet sind.

Abb. 6b: Luftbild mit angedeutetem Verlauf des LHC im Untergrund.

Der Generaldirektor des CERN formulierte die Situation, in der sich die Hochenergiephysik gegenwärtig befindet, mit den Worten: „Wenn wir mit

dem LHC nichts finden, wird sich die gesamte Elementarteilchenphysik davon nicht mehr erholen.“[3]

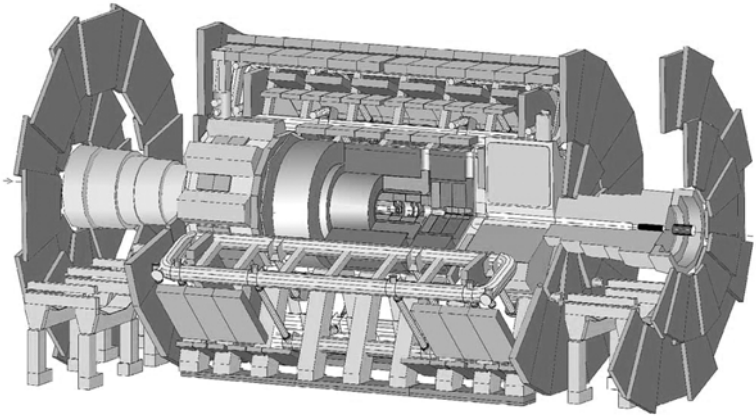

Abb. 6c: Der ATLAS- Detektor. An seiner Entwicklung waren 1900 Physiker und Ingenieure aus rund 150 Instituten beteiligt.

Auf einem der Poster des ATLAS-Detektors, einer der beiden für das LHC gebauten Universaldetektoren, werden die Zielvorstellungen angegeben, die man sich aus der Wechselwirkung von Quarks und Gluonen, den elementaren Bausteinen der Protonen, erhofft:

- Die Vereinigung der fundamentalen Kräfte,
- Extradimensionen aufzuspüren,
- ermitteln, was sich hinter der Dunkelmaterie verbirgt,
- die wahren Fundamente der Materie zu erkennen.

Wie schwierig es wird, die am LHC die aufgezeichneten Wechselwirkungen zu analisieren, zeigt die Computersimulation eines p-p-Stoßes. Im Mittel entstehen 1600 geladene Teilchen. Es kommen weitere 1600 neutrale Teilchen hinzu.

3 Spektrum der Wissenschaften 9 (2006), S. 89.

Abb. 6d: Computersimulation einer p-p-Wechselwirkung.

1. Symmetrie

Um diese Ziele und die Aussage des CERN- Generaldirektors zu verstehen, will ich versuchen, den gegenwärtigen Stand unserer Einsichten in den Mikrokosmos zu erläutern.

Der zentrale, die Physik prägende Begriff ist Symmetrie. Mit seiner Hilfe war es möglich, aus der Vielfalt der Erscheinungen ihre Grundstrukturen zu erkennen und auf einige wenige fundamentale Gleichungen zurückzuführen.

Der Begriff der Symmetrie ist untrennbar mit zwei weiteren Begriffen verknüpft, der Transformation und der Invarianz. Ein Kreis ist invariant gegenüber einer beliebigen Drehung um seinen Mittelpunkt und der Buchstabe H ist invariant gegenüber einer Drehung um 180 Grad. Beide sind invariant gegenüber einer Spiegelung.

Was die Physiker jedoch interessiert, ist die Symmetrie der Naturgesetze. Allgemein findet die Symmetrie der physikalischen Gesetze in einer mathematischen Transformation ihren Ausdruck, unter der die Naturgesetze invariant bleiben. So sind die Gesetze der Quantenmechanik invariant gegenüber einer beliebigen raumzeitlichen Transformation. Wenn wir eine Linienverschiebung in Spektren beobachten, die Milliarden Lichtjahre entfernte Sterne aussenden, so gehen wir davon aus, daß der Übergang von einem angeregten Zustand in den Grundzustand heute und hier den gleichen Gesetzen folgt wie

vor Jahrmilliarden in einer weit entfernten Galaxie. Kein Raum-Zeit-Punkt ist gegenüber anderen Raum-Zeit-Punkten ausgezeichnet. Wir sprechen von einer Homogenität von Raum und Zeit.

Zum zentralen Begriff der Physik wurde die Wirkung S. Die besondere Bedeutung der Wirkung in der Physik beruht auf dem Prinzip der kleinsten Wirkung. Danach nimmt die Wirkung für alle in der Natur ablaufenden Prozesse einen Extremwert an (Fermat: Die Natur wirkt auf dem allerleichtesten und zugänglichsten Weg). In S und in der mit ihr verknüpften Lagrange-Funktion L ist die gesamte Dynamik der vier fundamentalen Wechselwirkungen verschlüsselt. So folgen die Bewegungsgleichungen der klassischen Mechanik aus der Forderung, daß S einen Minimalwert annehmen soll, d.h. die erste Variation von S verschwindet:

$$\int_{t_1}^{t_2} L(x_i, \dot{x}_i, t)dt$$

$$\delta \mathrm{S} = \mathrm{O}$$

(dabei sind x_i die Koordinaten und die $\dot{x}_i$ die Geschwindigkeiten der Massenpunkte).

Diese Variation führt zu den Euler-Lagrangeschen Bewegungsgleichungen mechanischer Systeme.

Die Lagrange-Funktion und die aus ihr folgenden Bewegungsgleichungen sind invariant gegenüber folgenden Symmetrien und den entsprechenden Transformationen:

- Homogenität des Raumes, d.h. Äquivalenz aller Lagen im Raum. Jede räumliche Verschiebung eines abgeschlossenen mechanischen Systems im Raum führt zur Erhaltung des Gesamtimpulses des Systems.
- Homogenität der Zeit. Sie bewirkt, daß die Gesamtenergie des Systems erhalten bleibt.

Mit dem Prinzip der kleinen Wirkung sind die Namen Fermat, Leibniz, Maupertuis, Euler, Lagrange, Helmholtz, Planck und Noether verknüpft. Unter ihnen prominente Mitglieder unserer Akademie. Insbesondere durch die Arbeiten von Helmholtz, Planck und Emmy Noether wurde die ausgezeichnete und universelle Rolle der Wirkung deutlich. In den Noetherschen Theoremen werden die drei großen Prinzipien Symmetrie, Erhatungssätze und Variationsprizipien miteinander verbunden.

Der Speziellen Relativitätstheorie liegt die Lorentz-Symmetrie zugrunde: Die physikalischen Gesetze sind identisch für zwei Beobachter, die sich mit

unterschiedlichen konstanten Geschwindigkeiten bewegen. Die bekannte Einstein-Gleichung $E = mc^2$ ist eine Konsequenz dieser Symmetrie.

Auch die Kosmologie basiert auf zwei Symmetrien, der Homogenität und Isotropie des Universums. Erst mit diesen Postulaten ist die Lösung der Einsteinschen Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie möglich (die Friedmann-Modelle).

Zwei weitere Beispiele von Symmetrien, die in der Mikrowelt wichtig sind:

- Die Zeitumkehr. Bewirkt sie keine Änderung eines Naturgesetzes, so findet zu jedem Prozeß ein zeitlich inverser statt.
  Beispiel: $e^+ + e^- \leftrightarrow 2\gamma$ die Annihilation eines Elektron-Positron-Paares und die Paarerzeugung bei der Wechselwirkung zweier Photonen.
- Die Ladungserhaltung. In allen ablaufenden Wechselwirkungen bleibt die elektrische Ladung der beteiligten Ladungsträger erhalten. Siehe vorstehende Annihilation und Paarerzeugung. Auf beiden Seiten der Reaktionsgleichung ist die Gesamtladung Null.

Die Frage, die sich stellt: welches Symmetrieprinzip bewirkt die Ladungserhaltung? Zu ihrer Beantwortung müssen wir die Quantenelektrodynamik (QED) betrachten.

2. Quantenelektrodynamik

Paul Dirac formulierte 1928 eine quantenmechanische Bewegungsgleichung eines Elektrons, die auch den Forderungen der speziellen Relativitätstheorie genügte. Die Diracsche Wellengleichung hat vier den Zustand des Elektrons im Atom beschreibende Lösungen. Zwei der Lösungen entsprechen den beiden Spinzuständen des Elektrons. Der Spin ist eine fundamentale Eigenschaft aller Elementarteilchen, die sich aus der Schrödergleichung nicht ableiten ließ.

Die beiden weiteren Lösungen sind Zuständen mit negativer Energie zuzuordnen. Um dieser absurden Konsequenz zu entgehen, postulierte Dirac die Existenz einer unendlich großen Zahl von Elektronen, die alle Zustände negativer Energie besetzen. Nun besagt das Pauli-Prinzip, daß zwei Elektronen, die in allen Quantenzahlen übereinstimmen, nicht den gleichen Quantenzustand besetzen können. Daher kann kein weiteres Elektron in diesen unendlichen See negativer Energie gelangen. Elektronen negativer Energie sind unbeobachtbar. Einen unbesetzten Zustand negativer Energie, gewissermaßen ein Loch im See, würden wir als ein positiv geladenes Elektron, ein Positron, wahrnehmen. 1932 entdeckte Anderson die Spur eines Positrons in einer Nebelkammer, die in einem Magnetfeld arbeitete.

Eine zweite Interpretation wäre die Zustandsfunktion nicht als eine Zahl sondern als einen Feldoperator zu betrachten. Die naheliegende Idee in der weiteren Entwicklung der Quantentheorie war daher die Annahme der Existenz unendlich vieler Elektronen als Quanten eines Feldes. Der Dualismus von elektromagnetischem Feld und Quanten des Feldes, den Photonen, war den Physikern bereits vertraut und durch zahlreiche Beobachtungen belegt (Compton-Effekt, Lichtelektrischer Effekt). Die Quantenfeldtheorie, die die Wechselwirkung des elektromagnetischen Feldes mit dem Feld der Elektronen beschreibt, wird als Quantenelektrodynamik (QED) bezeichnet. Ihre Entwicklung fand Ende der 1940er Jahre ihren Abschluß.

Wie in der klassischen Mechanik lassen sich die Bewegungsgleichungen durch Einführung, einer den Bedingungen angepaßten Lagrange-Funktion – im Falle von Feldern einer Lagrangedichte $\mathscr{L}$ – herleiten.[4]

Dabei gilt wiederum die Forderung $\delta S = 0$. Spezifisch für die Elementarteilchenphysik ist es, daß die Wirkung S in der Größenordnung von h und die Geschwindigkeiten in der Größenordnung von c liegen.

Leitstern bei der Suche nach der geeigneten Form der Lagrangedichte ist die Symmetrie. In der QED werden die Beiträge zur Lagrangedichte so formuliert, daß sie invariant gegenüber einer sogenannten Eichtransformation sind.[5] Anschaulich bedeutet dies, daß die Wechselwirkungen sich nicht ändern, wenn man eine bestimmte Größe frei wählen, also wie einen Maßstab eichen kann. So gibt es beispielsweise keine absolute Skala zur Spannungseichung. Für einen Vogel ist es belanglos, ob er auf einer Hochspannungsleitung oder auf einem Ast sitzt. Die Spannungsskala ist frei wählbar.

Aus der Eichsymmetrie der QED ergeben sich zwei Konsequenzen:

- Die Erhaltung der elektrischen Ladung in allen Prozessen.
- Die Masselosigkeit des Photons.

Beide Folgerungen wurden mit hoher Genauigkeit experimentell gesichert. Die Suche nach dem Zerfall $e^- \rightarrow \nu + \gamma$ ergab als Grenzwert eine mittlere Lebensdauer von mehr als $4{,}6 \cdot 10^{26}$ Jahren. Der Grenzwert der Photonenmasse wurde zu kleiner als $6 \cdot 10^{-17}$ eV ermittelt.

Zur Berechnung und zur qualitativen Diskussion der Wechselwirkungen zwischen dem Dirac-Feld und dem Strahlungsfeld, die durch die QED erfaßt

4 L ist das Volumenintegral über die Dichte $\mathscr{L}$. Für physikalische Felder ist die Wirkung $S = \int \mathscr{L}\ d^4x$ mit $x = (ct, \mathbf{r})$ und $d^4x = cdtd^3\mathbf{r}$.

5 In der QED ist das eine unitäre Transformation, die man als U(1)-Transformation bezeichnet.

werden, erwies sich die Sprache der Feynman-Diagramme als bequem und anschaulich. Sie verschlüsselt in graphischer Form einen Algorithmus, nach dem sich störungstheoretisch die Wahrscheinlichkeitsamplituden von Prozessen berechnen lassen.

Betrachten wir die Streuung zwischen zwei Elektronen:

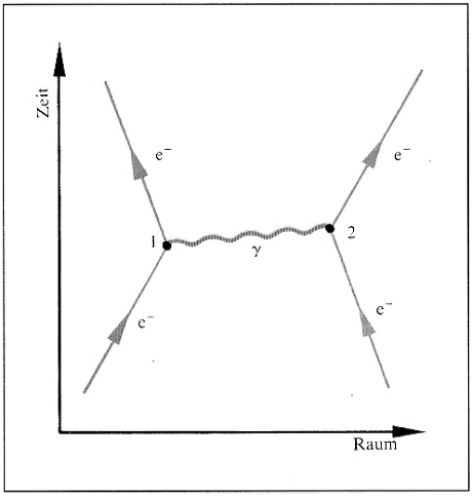

Abb. 7: Wechselwirkungen zwischen Elementarteilchen beschreiben die Physiker mittels Feynman-Diagrammen. Der skizzierte Prozeß beschreibt den Raum-Zeit-Verlauf einer Streuung zwischen zwei Elektronen über den Austausch eines virtuellen Photons.

Die elektrische Kraft zwischen den beiden Elektronen wirkt durch den Austausch eines Photons. Das Elektron sendet am Raum-Zeit-Punkt oder Vertex 1 ein Photon aus, wobei es Geschwindigkeit und Richtung ändert. Das andere Elektron absorbiert am Vertex 2 das Photon und ändert seinerseits seinen Impuls. Die eigentliche Wechselwirkung findet lokal an den Vertices 1 und 2 statt. Die fernwirkende elektrische Kraft wird als lokale Wechselwirkung beschrieben.

Das ausgetauschte Photon muß sich jedoch von einem realen Photon unterscheiden. Man bezeichnet es als ein virtuelles Photon, das der Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation genügt. Sie fordert, daß das Produkt aus der Unbestimmtheit von Energie und Zeit niemals kleiner sein kann als das Planksche Wirkungsquantum ($\Delta E \cdot \Delta t \geq h$). In diesem Bild betrachten wir den Vertex als einen Raum-Zeit-Punkt, an dem sich durch Emission oder Absorp-

tion eines virtuellen Photons der Bewegungszustand eines Elektrons ändert. Es entspricht jedoch besser den mathematischen Ausdrücken der QED, wenn man den Vertex als einen Punkt betrachtet, an dem einlaufende Teilchen vernichtet und auslaufende Teilchen erzeugt werden.

Die QED zwingt uns zur Änderung unserer Vorstellung vom Vakuum. Ein klassisches Vakuum als ein leerer Raum, wie ihn die klassische Mechanik und die Quantentheorie noch annahmen, ist in den Quantenfeldtheorien nicht mehr denkbar. Sie lehren uns, daß die zeitweilige Erzeugung virtueller Teilchen ein in der Natur möglicher und daher auch stets realisierter Prozeß ist. So können im Vakuum ein virtuelles Photon oder ein e^+e^--Paar erzeugt werden, um nach der ihnen von der Unbestimmtheitsrelation zugebilligten Zeit wieder zu verschwinden.

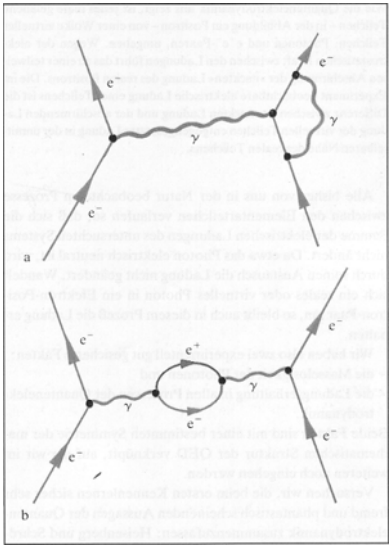

Abb. 8: Feynman-Diagramme höherer Ordnung. Sie schließen die virtuelle Emission und Absorption von a) einem Photon und b) einem Elektron-Positron-Paar ein. Virtuelle Prozesse höherer Ordnung erscheinen in den Diagrammen stets als geschlossene Schleifen.

Da sich die Zahl der Vertices erhöht, bezeichnet man sie als Diagramme höherer Ordnung.

Bereits in den 1930er Jahren wurde ein schweres Elektron, das Myon $\mu^{\pm}$, entdeckt. Viele Jahre später entdeckten die Hochenergiephysiker ein drittes, weit schwereres Elektron, das Tau $\tau^{\pm}$.

Auch die beiden schweren Elektronen gehorchen in beeindruckender Weise der QED.

Es gibt keine physikalische Theorie, die einen so hohen Grad an Übereinstimmung mit dem Experiment zeigt, wie die QED.

Ein Beispiel**,** die Anomalie des magnetischen Moments des Elektrons: Der gemessene Zahlenwert stimmt in beeindruckender Weise mit dem berechneten Wert überein.

Experiment: 1,001159652187 ± 0,000000000004
Theorie: 1,001159652205 ± 0,000000000028

3. Schwache Wechselwirkungen

Zur Beschreibung des radioaktiven Zerfalls postulierte Pauli die Existenz des Neutrinos. Wenn wir jede der vier fundamentalen Wechselwirkungen als eine Kraft verstehen, die den Zustand eines oder mehrerer Teilchen verändert, gilt das auch für den radioaktiven Zerfall eines Neutrons.

$$n \rightarrow p + e^{-} + \overline{\nu}_e$$

Das Neutron zerfällt nach einer mittleren Lebensdauer von rund 1000 Sekunden. Um also den inversen Prozeß zu beobachten

$$\overline{\nu}_e + p \rightarrow n + e^{+}$$

muß ein Antineutrino der gleichen Energie rund 1000 Sekunden im engen Kontakt mit einem Proton sein. Das Neutrino, dessen Ruhemasse sehr klein ist, bewegt sich durch jede Substanzschicht nahezu mit Lichtgeschwindigkeit. Dabei tritt es mit vielen Protonen in Kontakt, aber erst nach einer mittleren Berührungszeit von 1000 Sekunden findet der inverse Betazerfall statt. Es ist offensichtlich, daß Neutrinos Substanzschichten galaktischen Ausmaßes durchfliegen müssen, um vernichtet zu werden.

Eine elektromagnetische Wechselwirkung wie der Übergang vom angeregten Zustand eines Atoms in seinem Grundzustand dauert 10^{-8} Sekunden. Verglichen mit den 10^{3} Sekunden des Neutrinozerfalls wird deutlich wie schwach diese Art der Wechselwirkung gegenüber der elektromagnetischen Wechselwirkung ist.

In den zurückliegenden Jahrzehnten gelang der Nachweis nicht nur des Elektronenneutrinos, sondern auch von $\nu_\mu(\overline{\nu}_\mu) und \nu_\tau(\overline{\nu}_\tau)$.

In der nachfolgenden Tabelle ist unser gegenwärtiges Wissen über die Eigenschaften der schwach wechselwirkenden Teilchen, der Leptonen, zusammengefaßt:

		Ruhemasse	Mittlere Lebensdauer
1. Familie:	ν_e	< 2 eV	$> 7 \cdot 10^9$ s
	e^-	0,51 MeV	$> 4{,}6 \cdot 10^{26}$ Jahre
2. Familie:	ν_μ	< 0,19 MeV	
	μ^-	105,66 MeV	$2{,}197 \cdot 10^{-6}$ s
3. Familie:	ν_τ	< 18 MeV	
	τ^-	1776,99 MeV	$2{,}9 \cdot 10^{-13}$ s

Hinzu kommt eine entsprechende Gruppierung der Antileptonen. In den Grenzen unseres gegenwärtigen Wissens können wir alle Leptonen als unstrukturierte, punktartige Elementarteilchen betrachten. Jedes Lepton hat einen Spin der Größe ½.

Nach den außerordentlichen Erfolgen der QED lag der Versuch nahe, eine Theorie der schwachen Wechselwirkung nach dem Muster der QED zu formulieren.

Ursache der großen Schwäche von Prozessen wie dem radioaktiven Zerfall oder der Wechselwirkungen von Neutrinos ist die kurze Reichweite der schwachen Wechselwirkung von rund 10^{-16} cm.

Nimmt man nach dem Muster der QED an, daß auch die schwache Wechselwirkung über den Austausch von Feldquanten erfolgt, so läßt sich deren Masse aus der Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation abschätzen:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq h$$

$$\Delta t = \frac{h}{\Delta E} = \frac{h}{mc^2}$$

bewegt sich das Austauschteilchen der Masse m mit Lichtgeschwindigkeit

$$c = \frac{\Delta r}{\Delta t}$$

wird $\Delta r = c\Delta t = \frac{ch}{mc^2} = \frac{h}{mc}$.

Bei einer Reichweite von rund 10^{-16} cm erwarten wir eine Masse m des ausgetauschten Feldquants von ca. 100 GeV.

Betrachten wir als Beispiel das Feynman-Diagramm des Myonenzerfalls:

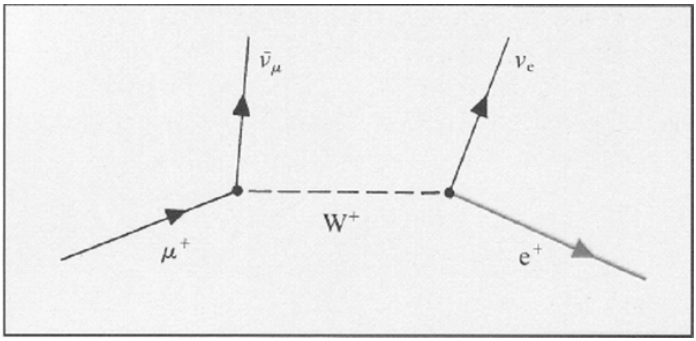

Abb. 9: Das Feynman-Diagramm des μ^+-Zerfalls

Das μ^+ wird im Raum-Zeit-Punkt 1 vernichtet, und es werden ein positiv geladenes intermediäres W^+-Quant und ein $\bar{\nu}_\mu$ erzeugt. Das virtuelle W^+ wird am Vertex 2 vernichtet und ein $e^+\nu_e$-Paar erzeugt.

Aus der Messung der Winkelverteilung zwischen den Flugrichtungen von μ^+ und e^+ läßt sich der Spin des W ermitteln. Die Messungen ergaben den Spin 1. Teilchen mit ganzzahligem Spin bezeichnet man als Bosonen.

Mitte der 1970er Jahre wurden schwache Prozesse beobachtet, die über den Austausch eines ungeladenen intermediären Bosons verlaufen

$$\bar{\nu}_\mu + e^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu + e^-$$

$$\nu_\mu + p \rightarrow \nu_\mu + p$$

Im Bemühen auch die schwache Wechselwirkung als eine Eichfeldtheorie zu formulieren wurde den Leptonen eine schwache Ladung g, analog zur elektrischen Ladung e der QED, zugeordnet In der QED gilt für die elektrische

Ladung ein strenger Erhaltungssatz: Gegenüber einer U(1)-Transformation sind die Bewegungsgleichungen der Elektronenfelder invariant, wenn die Photonen, die Feldquanten des Eichfeldes, masselos sind.

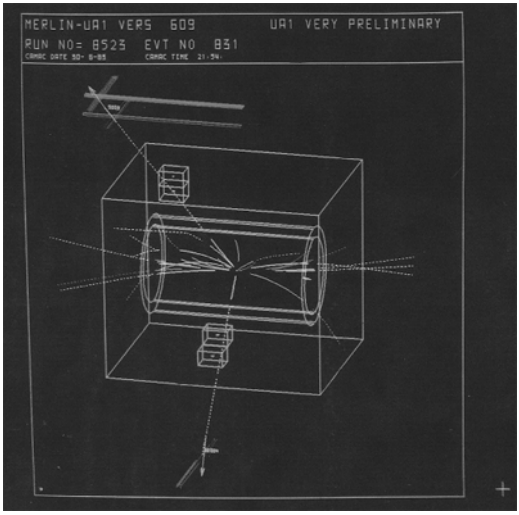

Abb. 10: Im Wechselwirkungsprozeß eines hochenergetischen Proton-Antiproton-Paares entstand ein Z^0-Boson, das in ein $\mu^+ \mu^-$-Paar zerfiel. Der Prozeß wurde in der UA-1-Anlage registriert und mittels Computer auf einem Bildschirm rekonstruiert. Die beiden Myonenspuren sind die nach unten verlaufende und die nach oben links verlaufenden Spuren.

Die Frage, die sich für die schwache Wechselwirkung stellt, ist die nach der Gültigkeit eines Erhaltungssatzes für die schwache Ladung.

Nun wirkt die schwache Kraft auf Zweiergruppen von Leptonen – $\nu_e e^-$, $\nu_\mu \mu^-$, $\nu_\tau \tau^-$ – wobei die Teilchen jedes Dubletts ineinander übergehen. Ihrem mathematischen Charakter entsprechend bezeichnet man die Art der Transformation als SU(2)-Transformation.

Damit die Bewegungsgleichungen der Leptonen gegenüber einer SU(2)-Transformation invariant bleiben, muß analog zur QED ein Eichfeld eingeführt werden. Interpretiert man die W-und Z-Bosonen als Quanten des Eichfeldes ergibt sich ein Problem. Der mathematische Formalismus aller Eichfeldtheorien fordert masselose Eichbosonen.

Um diesem und weiteren Problemen zu entgehen, unternahmen die Theoretiker in den 1970er Jahren den Versuch, eine einheitliche Theorie der schwachen und der elektromagnetischen Wechselwirkung zu formulieren.

Das Quant des elektromagnetischen Feldes ist das Photon. Das schwache Eichfeld hat drei Komponenten. Um vier Eichbosonen gerecht zu werden, muß die Symmetrietransformation der einheitlichen elektroschwachen Theorie erweitert werden. Der U(1)-Transformation wird die SU(2)-Transformation multiplikativ hinzugefügt: SU(2) x U(1).

Die einheitliche Theorie geht davon aus, daß elektromagnetische und schwache Kraft Erscheinungen einer Ursache sind. Bei extrem großen Energien, die sehr groß gegenüber 100 GeV sind, werden W- und Z-Bosonen genauso häufig erzeugt wie die Photonen. Alle Eichbosonen sind praktisch masselos verglichen mit den extrem großen Stoßenergien. Verbunden mit der SU(2) x U(1)-Symmetrie gilt für die elektrische und die schwache Ladung in allen auftretenden Reaktionen ein Erhaltungssatz. Sinkt die Energie der wechselwirkenden Teilchen, wird ein Mechanismus wirksam, der die Symmetrie stört. Die Physiker sprechen von einer spontanen Symmetriebrechung. Damit drei der Eichbosonen massiv werden ohne die Eichinvarianz der Lagrangedichte zu verletzen, wird in die Lagrangedichte der elektroschwachen Theorie ein zusätzliches Feld eingeführt, das man als Higgs-Feld bezeichnet. Das zugehörige Teilchen (Higgs-Boson) trägt den Spin 0. Das Higgs-Feld ist so beschaffen, dass die Symmetrieverletzung der physikalischen Zustände durch die Eigenart dieses Feldes entsteht.

Durch die Wechselwirkung des Higgs-Feldes mit den W-und Z-Bosonen, aber auch mit den Fermionen- und Bosonenfeldern aller wechselwirkenden Teilchen erhalten diese ihre Masse. Je stärker ein Teilchen mit diesem, das gesamte Universum durchdringenden Higgs-Feld wechselwirkt, umso größer wird seine Masse.

Mit der Inbetriebnahme von LEP im Jahre 1989 stand für rund zehn Jahre eine Anlage zur Verfügung, die zur experimentellen Überprüfung aller von der elektroschwachen Theorie vorausgesagte Phänomene hervorragend geeignet war. Um nur ein Beispiel zu nennen: in den vier Detektoren am LEP wurden im Laufe der Zeit ca. 20 Millionen Z°-Bosonen nachgewiesen. Jedes zerfiel in der von der Theorie vorausgesagten Weise, sowohl hinsichtlich der Häufigkeit jeder Zufallsart als auch hinsichtlich der Energien und Richtungen der Zufallsprodukte.

4. Starke Wechselwirkung

Beginnend in den 1940er Jahren wurde zunächst in der kosmischen Strahlung später an den immer leistungsfähigeren Beschleunigern eine Vielzahl von

Teilchen entdeckt, die nach sehr kurzer Zeit zerfielen. Man unterscheidet zwischen Mesonen und Baryonen.

Mesonen sind Teilchen mit einem ganzzahligen Spin, z.B. die π-Mesonen (π^+, π^-, π°), Baryonen besitzen stets einen halbzahligen Spin, z.B. die vier Δ-Baryonen (Δ^{++}, Δ^+, Δ^-, Δ°). Die stark wechselwirkenden Mesonen und Baryonen werden als Hadronen bezeichnet. Das leichteste Meson ist das π-Meson und das leichteste Baryon das Proton. Letzteres ist stabil, während die π-Mesonen über die schwache Wechselwirkung zerfallen. Das Δ^{++}-Baryon zerfällt z.B. in ca. 10^{-23} Sekunden in ein Proton und ein π^+-Meson:

$$\Delta^{++} \rightarrow p + \pi^+$$

Anfang der sechziger Jahre überstieg die Zahl der neu entdeckten Hadronen bereits die Zahl der chemischen Elemente. In Analogie zum periodischen System wurde ein Ordnungsprinzip zur Systematisierung der Hadronen formuliert. Die verschiedenen Ladungsmultipletts ließen sich in Supermultipletts zusammenfassen. Mesonen in Singuletts und Oktetts, Baryonen in Singuletts, Oktetts und Dekupletts.

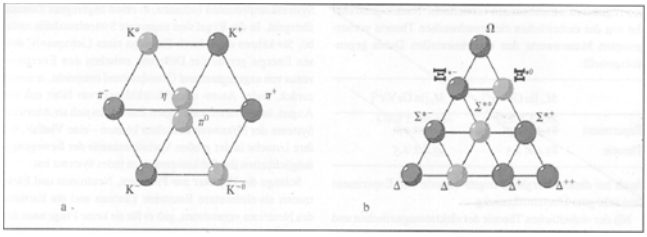

Abb. 11: a) Das Oktett der Mesonen mit Spin und Parität $J^P = 0^-$ und b) das Dekuplett der Baryonen mit $J^P = 3/2^+$

Unabhängig voneinander äußerten die Theoretiker Gell-Mann und Zweig die Vermutung, daß alle Hadronen aus fundamentalen Konstituenten aufgebaut sind, den sogenannten Quarks. Zur Beschreibung der damals bekannten Hadronen wurden drei Quarks (q) eingeführt:
u mit der elektrischen Ladung ⅔ e
d und s mit der elektrischen Ladung -⅓ e,
wobei allen Quarks der Spin ½ zugeordnet wurde. Um jedoch die d- und s-Quarks voneinander zu unterscheiden, mußte ihnen eine weitere Quantenzahl zugeordnet werden. Sie wurde als Flavour bezeichnet.

Das ursprüngliche Quarkmodell folgt zwei Regeln. Alle Mesonen sind aus einem Quark und einem Antiquark gebildet ($q, \overline{q}$). Alle Baryonen bestehen aus drei Quarks (q,q,q) bzw. drei Antiquarks ($\overline{q}, \overline{q}, \overline{q}$). So besteht das Proton aus zwei u-Quarks, jedes mit der Ladung ⅔e, und einem d-Quark mit der Ladung -⅓ e. Um das Neutron mit der Gesamtladung Null zu bilden, sind ein u-Quark und zwei d-Quarks erforderlich.

Anfangs standen viele Physiker dem Quarkmodell skeptisch gegenüber. Die gedrittelte Elementarladung und insbesondere der fehlende Nachweis eines Quarks nährten die Bedenken. Ende der 1960er Jahre und in den 1970ser Jahren wurden in Analogie zum Rutherfordschen Streuversuch von α-Teilchen an Atomen Streuversuche an Nukleonen durchgeführt. Als Geschoßteilchen dienten hochenergetische Leptonen. Dabei zeigte sich, daß Proton und Neutron im wesentlichen drei punktartige ($\leq 10^{-16}$ cm) elementare Bausteine enthalten – Quarks, die einen Eigendrehimpuls der Größe ½ haben und deren Ladung ⅓ bzw.⅔ der Elementarladung e beträgt.

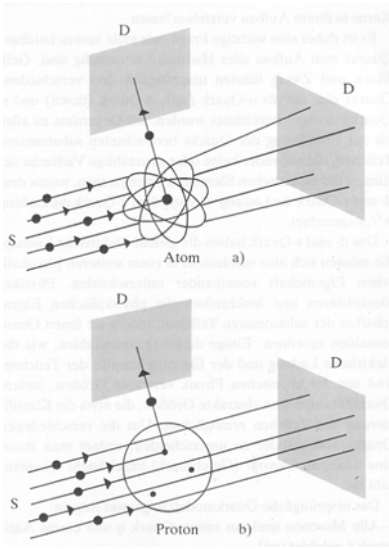

Abb. 12: Ein Bündel kleiner und schneller Geschoßteilchen S trifft auf ein Target, a) ein Atom, b) ein Nukleon. Die Mehrzahl der Teilchen durchfliegt ohne merkliche Ablenkung das Target, wie man aus ihrem Auftreffpunkt im Detektor D ermittelt. Nur ein Teilchen, das ein streuendes Zentrum, a) einen Atomkern, b) ein Quark, trifft, erfährt eine merkliche Ablenkung.

In den folgenden Jahrzehnten wurden viele weitere Hadronen entdeckt, die die Physiker zur Einführung weiterer Quarks zwangen.

Teilchen-name (Flavuor)	Symbol	Spin (in h/2π)	Masse in MeV	Elektrische Ladung in Einheiten der Elementarladung e
up	u	1/2	1,5-3	2/3
down	d	1/2	3-7	-1/3
charm	c	1/2	1250	2/3
strange	s	1/2	95	-1/3
top	t	1/2	1742 000	2/3
bottom	b	1/2	4200	-1/3

So attraktiv das Quarkmodell auch erscheint, problemlos ist es nicht. Wie die Streuversuche bestätigten, trägt jedes Quark den Spin ½. Teilchen mit halbzahligen Spin sollen aber dem Pauli-Prinzip folgen: Kein Hadron dürfte Quarks enthalten, die in allen Quantenzahlen übereinstimmen. So mußte das Δ^{++}-Baryon mit dem Spin 3/2 aus drei u-Quarks aufgebaut sein, deren Spins parallel stehen, um sich zu 3/2 zu addieren.

Zur Rettung des Quarkmodells in Verbindung mit der Gültigkeit des Pauli-Prinzips wurde eine weitere verborgene Quantenzahl eingeführt, die wir heute als Farbe (Color) bezeichnen. Danach kann jedes Quark in drei Farben vorkommen: Rot, Grün und Blau. Antiquarks tragen die Komplementärfarben: Antirot (Cyan), Antigrün (Magenta) und Antiblau (Gelb).

Neben Spin und elektrischer Ladung ist also jedes Quark durch Geschmack (Flavour) und Farbe (Color) charakterisiert. An Stelle von sechs Quarks unterschiedlichen Flavours treten 18 Quarks, die in Color und Flavour verschieden sind.

Die Beobachtungen zeigten allerdings keine Verdreifachung der nachgewiesenen Hadronen. Um im Farbbild zu bleiben: die Hadronen erwiesen sich als farblos. Wie die elektrischen Ladungen von Atomkern und Elektronenhülle kompensieren sich auch die Colorzustände im Innern der Hadronen. Die additive Mischung zu weiß erfolgt entweder durch Farbe und Komplementärfarbe (Mesonen) oder durch Mischung der drei Grundfarben (Baryonen).

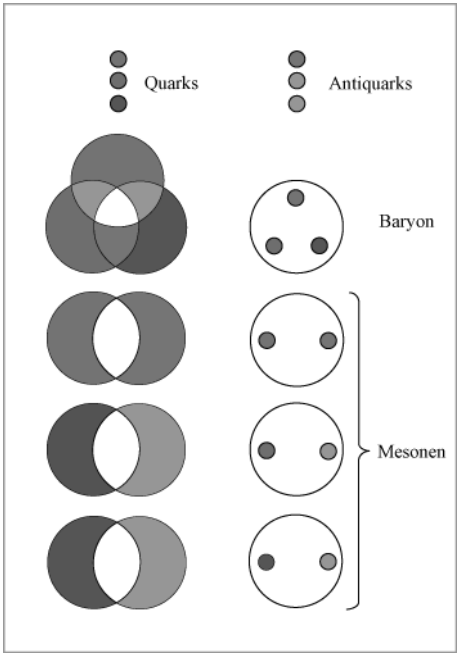

Abb. 13: Jedes der verschiedenen Quarks kann in drei Farben auftreten. Man ordnet ihnen die Grundfarben Rot, Grün und Blau und den Antiquarks die Komplementärfarben Cyan, Magenta und Gelb zu. Da farbige Zustände der hadronischen Materie nie beobachtet wurden, müssen sich die farbigen Zustände zu Weiß mischen. Das geschieht entweder durch additive Mischung der drei Grundfarben (Baryonen) oder durch Mischung jeder Grundfarbe mit ihrer Komplementärfarbe (Mesonen).

Die Einführung der Farbquantenzahl erlaubt in Analogie zur QED und zur elektroschwachen Theorie die Formulierung einer Theorie der starken Wechselwirkung zwischen den Quarks, der Quantenchromodynamik (QCD).

In der QED sind die Lagrangedichte und die sich ergebenden Bewegungsgleichungen invariant gegenüber der U(1)-Transformation, wenn man die Photonen als Eichfeld in die Theorie einführt. In der Theorie der schwachen Wechselwirkung wurde das dreikomponentige Eichfeld der Vektorenbosonen eingeführt, um die Bewegungsgleichungen invariant gegenüber der SU(2)-Transformation zu formulieren. In diesen Theorien bzw. in der elektroschwachen Theorie entsprechen Eichtransformationen physikalischen Prozessen, in denen die, eine elektrische Ladung e oder eine schwache Ladung g tragenden Elementarteilchen mit halbzahligen Spin, sogenannten

Fermionen, über den virtuellen Austausch von Photonen bzw. Vektorbosonen aufeinander wirken.

In Analogie wird in der QCD postuliert, daß die Farbladung die anziehende Kraft zwischen den Quarks vermittelt. Wie die Beobachtungen zeigen, sind die Hadronen gegenüber der SU(3)-Farbgruppe invariant. Jedes Hadron bleibt farblos, wenn die Quarks im Hadron ihre Farbe ändern.

Es bestehen zwei Möglichkeiten

- eine globale Farbtransformation, bei der jedes Quark gleichzeitig seine Farbe ändert,
- eine lokale Farbtransformation. Zur Vermeidung eines farbigen Endzustandes muß zwischen zwei Quarks ein Farbaustausch stattfinden.

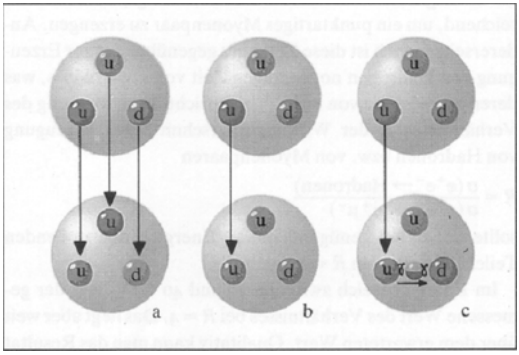

Abb. 14: Farbtransformationen beim Proton. a) Eine globale Farbtransformation, in der jedes Quark gleichzeitig seine Farbe ändert. Das führt wieder zu einem farblosen Endzustand. b) Eine lokale Farbtransformation, in der ein rotes in ein blaues u-Quark überführt wird. Es würde ein farbiger Endzustand entstehen. c) Lokale Farbtransformation, in der die Farbänderung der Quarks mit einem lokalen Gluonaustausch verbunden ist.

Um die Symmetrie gegenüber einer lokalen Farbtransformation zu sichern, muß ein zusätzliches Eichfeld eingeführt werden. Das Eichfeld der starken Wechselwirkung hat acht Komponenten. Die Quanten des Eichfeldes bezeichnet man als Gluonen. Wie die Photonen sind auch die Gluonen masselos. Sie haben den Spin 1. Jedes Gluon trägt Farbe und Antifarbe.

Eine Besonderheit der QCD gegenüber der QED und der Theorie der schwachen Wechselwirkung: es gibt weder freie Quarks noch freie Gluonen. Ihre Existenz im Innern aller Hadronen wurde in vielen Experimenten nachgewiesen. Die wenigen, mit der QCD berechenbaren Prozesse, befinden sich in Übereinstimmung mit den Messungen. Es erwies sich als sehr schwierig

messbare Konsequenzen der Theorie zu formulieren. Zu ihnen zählt die Berechnung der „asymptotic freedom“, die besagt, dass starke Wechselwirkungen bei sehr kleinen Abständen schwach werden. Für größere Distanzen hat sich die als Gitter-QCD bezeichnete Computersimulation gut bewährt. Beispielweise gelang es mit dieser Methode die Massen der Hadronen zu berechnen.

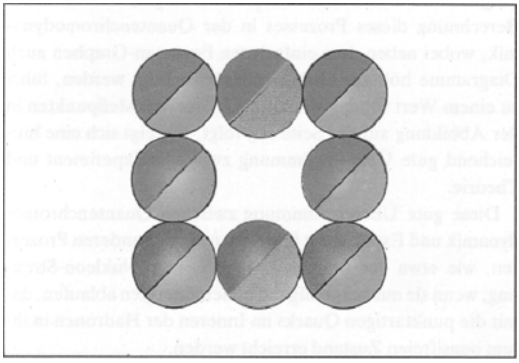

Abb. 15: Jedes Gluon trägt eine Farbe und eine Antifarbe. Da drei Gluonen mit den Farbkombinationen Blau - Antiblau, Rot – Antirot und Grün – Antigrün nicht gleichzeitig auftreten, fehlt letztere.

Die Erforschung der Mikrostruktur der Materie führte uns zu folgendem Bild der elementaren Bausteine – besser ihren Feldern – und zu den die Wechselwirkungen zwischen ihnen vermittelnden Feldern oder Eichbosonen.

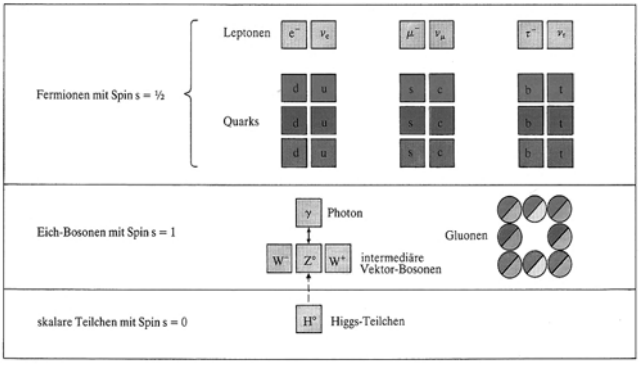

Abb. 16: Elementare Bausteine, Fermionen, und die zwischen ihnen die Wechselwirkung vermittelnden Bosonen

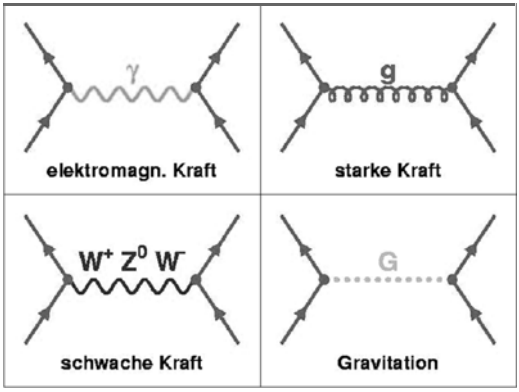

Abb. 17: Die vier fundamentalen Kräfte

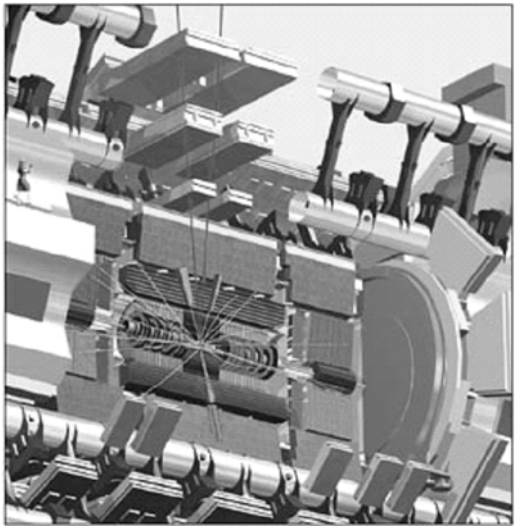

Abb. 18: Simulation des Zerfalls eines Higgs-Bosons im ATLAS- Detektor: $H \rightarrow Z^0 + Z^0$. Ein Z^0 zerfällt in ein Myon-Paar (die beiden nach oben verlaufenden Spuren im Myon-Detektor). Das nach unten verlaufende Z^0 zerfällt in ein Elektron-Positron-Paar, das im elektromagnetischen Kalorimeter registriert wird.

Alle Untersuchungen in den zurückliegenden Jahren bestätigten die berechenbaren Vorhersagen der elektroschwachen Theorie und der Quantenchromodynamik. In allen Fällen erhielten wir eine beeindruckende Übereinstim-

mung zwischen Theorie und Experiment. So sagte das Standardmodell die Existenz von W- und Z-Bosonen voraus – sie wurde in Experimenten gefunden. Die von der Theorie vorhergesagten Gluonen, aber auch die schweren Quarks (c und t) wurden experimentell nachgewiesen. Ihre Eigenschaften entsprachen exakt den Vorhersagen.

Was bisher fehlt, ist der experimentelle Nachweis des Higgs-Bosons. Seine Ruhemasse wird zwischen 140 und 240 GeV erwartet. Sie sollte sich mit dem LHC erzeugen lassen. Das Higgs-Boson, ein instabiles Teilchen, kann in b-Quarks, τ-Leptonen und W-und Z-Bosonen zerfallen.

5. Über das Standardmodell hinaus

Die durch viele experimentelle Kontrollen und bestätigte Vorhersagen hervorragend gesicherte Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung und der Quantenchromodynamik wird in der Regel als Standardmodell bezeichnet. Das Standardmodell ist eine Theorie, die alle Eigenschaften der elementaren Bausteine der subatomaren Welt und die in ihr wirkenden fundamentalen Kräfte hervorragend wiedergibt.

Sie erscheint vielen Physikern auch nach einem experimentellen Nachweis des Higgs-Bosons unvollständig. Das Standardmodell erklärt weder den Ursprung des Higgs-Bosons, und damit den Ursprung der Massen, noch den Grund für die Existenz von drei Leptonen- und Quarkfamilien.

Ein weiteres Ziel, das die Theoretiker seit Jahrzehnten erreichen wollen, ist die Vereinigung aller drei fundamentalen Wechselwirkungen in einer einheitlichen Theorie.

Im Bemühen um die Lösung der angesprochenen Probleme entstanden zahlreiche Modelle, die man unter dem Begriff der Supersymmetrie (SUSY) zusammenfaßt.

Bisher lernten wir äußere oder geometrische Symmetrien und innere Symmetrien kennen. Die Transformationen der äußeren Symmetrien umfassen die raumzeitlichen Verschiebungen, die Drehungen (Spin) und die Spiegelungen in Raum und Zeit. Daraus folgten die Erhaltungssätze für Energie, Impuls, Drehimpuls und räumliche Parität.

Die den inneren Symmetrien entsprechenden Transformationen verknüpfen in der Regel verschiedene miteinander verwandte Teilchen. So führt die Ladungskonjugation C jedes Teilchens in sein Antiteilchen über. Ein anderes Beispiel ist die Farbtransformation. Sie führt die verschiedenen Komponenten eines Farbmultipletts ineinander über und sichert damit die Erhaltung der Farbladung.

Die Supersymmetrie bietet die Möglichkeit, die inneren mit den äußeren Symmetrien zu verbinden. SUSY schafft eine Symmetrie zwischen Fermionen und Bosonen. Sie besteht darin, daß zu jedem Fermion mit halbzahligen Spin ein Boson mit ganzzahligen Spin als Superpartner existieren soll. Zu jedem Boson postuliert SUSY ein Fermion als Superpartner

Teilchen	**Superpartner**
Elektron	Selektron
Myon	Smyon
Neutrino	Sneutrino
Quark	Squark
Photon	Photino
Gluon	Gluino
W-Boson	Wino
Higgs-Boson	Higgsino

Da trotz intensiver Suche in den zurückliegenden Jahren noch nie ein Superpartner der Fermionen und Bosonen gefunden wurde, sollten sie schwerer sein als die bisher an Beschleunigern erzeugten Teilchen – falls sie existieren.

Wäre SUSY eine strenge Symmetrie, müßten die Superpartner in allen Eigenschaften mit denen der Teilchen des Standardmodells übereinstimmen, also auch die gleiche Masse haben wie das zugehörige Teilchen. Wäre die Supersymmetrie gebrochen, würde das erklären, warum die Superpartner schwerer sind. Symmetriebrechung sahen wir bereits in den Supermultipletts der Mesonen und Baryonen. In ihnen haben die Ladungsmultiplette unterschiedliche Massen (siehe Abb. 11).

Wäre die Symmetrie zwischen Teilchen und Antiteilchen, die Ladungskonjugation streng gültig, würden wir nicht existieren. Wir finden im Universum zwar Materie, aber kaum Antimaterie. Wären nach dem Urknall Protonen und Antiprotonen in gleicher Anzahl entstanden, hätten sie sich wechselseitig vernichtet. Also ist auch die Ladungskonjugation keine streng erhaltene innere Symmetrie.

Aus der Struktur von SUSY ergibt sich der Ursprung des Higgs-Bosons. Darüber hinaus löst das Modell das Problem der Masse des Higgs-Teilchens. Aus allen bisherigen Messungen wurde geschlossen, daß die Masse des

Higgs-Bosons unterhalb von 240 GeV liegt. Nach dem Standardmodell sollten Fermiomen und Bosonen aus der Wechselwirkung der Teilchen mit dem Higgsfeld ihre Massen erhalten. Je stärker die Wechselwirkung umso größer ist die Masse des Teilchens. Teilchen wie das Photon und die Gluonen, die nicht mit dem Higgsfeld in Wechselwirkung treten, bleiben masselos. Umgekehrt sollte aber auch das Higgs-Boson durch die Wechselwirkung mit den Fermionen und Bosonen immer massiver werden. Es sollte eine rund 10^{14} mal größere Masse haben als die schwersten, bisher entdeckten Teilchen.

Die mathematische Struktur von SUSY ist so beschaffen, daß die Beiträge der Fermionen zur Masse des Higgs-Bosons und die Beiträge aus den Wechselwirkungen mit den Superpartnern sich gegenseitig kompensieren. Zur Sicherung des Standardmodells erscheint eine gebrochene Supersymmetrie notwendig.

Eines der zentralen Probleme der Kosmologie besteht in der wahrscheinlichen Existenz der Dunkelmaterie im Universum. Sie muß ein Mehrfaches der Masse der sichtbaren aus Baryonen bestehenden Materie besitzen und der gravitativen Wechselwirkung unterliegen. SUSY bietet dafür geeignete Kandidaten.

In einer sehr frühen heißen Phase des Universums sollten Teilchen und ihre Superpartner entstanden sein. Mit der Expansion und Abkühlung des Universums zerfielen die Superpartner, wobei im Endzustand zu den bekannten Teilchen in den Zerfallsketten stets ein leichterer Superpartner gehören muß. Letztlich bleibt am Ende jeder Zerfallskette ein stabiler Superpartner übrig.

Im einfachen Modell einer supersymmetrischen Theorie sollten sieben stabile Superpartner übrig bleiben. Drei sind die Superneutrinos, hinzukommen die Superpartner von Photon, Z-Boson und zwei Higgsinos. Man bezeichnet die verbliebenen stabilen Superpartner als Neutralinos.

Nach ihnen wird intensiv gesucht, beispielsweise auch im IceCube-Detektor, über den Herr Spiering im Mai 07 berichtete. Alle Suche blieb bisher ohne Erfolg.

Die Physik des Mikrokosmos und die des Makrokosmos ruhen auf zwei sehr erfolgreichen Theorien, der Quantenmechanik, deren Kinder die Quantenfeldtheorien sind, und der Allgemeinen Relativitätstheorie. Die große Herausforderung für die Theoretiker liegt in der Vereinigung beider, d.h. der einheitlichen Beschreibung der vier fundamentalen Wechselwirkungen. Seit Jahrzehnten mühen sie sich um die große Synthese.

Ein geeigneter Weg zur Lösung des Problems der großen Vereinigung führt auf die Frage, wie sich die vier fundamentalen Kräfte unmittelbar nach dem Urknall verhielten. Unter diesen extremen Bedingungen sollten Quanteneffekte der Gravitation wirken. Analog zu den Quantenfeldtheorien erfolgt die gravitative Wechselwirkung durch den Austausch von Feldquanten, den Gravitonen, Bosonen mit dem Spin 2.

Gegenwärtig kulminieren die Bemühungen zur großen Vereinigung in den Stringtheorien. Bereits in den 1960er Jahren, vor der Entdeckung der Quarks, versuchte man die vielen Teilchen als Schwingungen von Strings zu beschreiben. Dabei werden die dimensionslosen punktartigen Teilchen durch eindimensionale winzige Saiten – Strings – ersetzt. Jede Saite kann auf unterschiedliche Art schwingen. Eine Kernidee der Stringtheorie bestand darin, der Vielfalt der Schwingungszustände die Vielfalt der Teilchen zuzuordnen. Dabei unterscheidet man zwischen offenen und geschlossenen Strings. Letztere bilden in sich geschlossene Schleifen.

Eine Renaissance erfuhr die Stringtheorie beim Versuch, die vier fundamentalen Wechselwirkungen in einer einheitlichen Theorie zu vereinen. Dabei erwiesen sich die vier raumzeitlichen Dimensionen als unzureichend. Eine Stringtheorie, die Fermionen und Bosonen einbezieht, läßt sich nur in zehn oder mehr Dimensionen formulieren.

Falls das Bild, das die Stringtheorie vom Zustand des Kosmos unmittelbar nach dem Urknall liefert, sich als zutreffend erweisen sollte, bewegen sich alle Teilchen in einer zehndimensionalen Welt. Mit der Abkühlung und der damit einhergehenden Reduzierung der Teilchenenergien verschwanden die winzigen Extradimensionen. Dabei scheint es möglich, daß einige Teilchen ihre Bewegungen in den Extradimensionen fortsetzen. Sie sollten gegenwärtig als neutrale schwere, sich langsam bewegende Teilchen erscheinen – weitere Kandidaten für die Dunkelmaterie. Sollte diese exotisch anmutende Beschreibung der Dunkelmaterie zutreffen, dann wäre sie keine gewöhnliche Materie, sondern eine verbogene Bewegungsform in einer hyperdimensionalen Geometrie.

Was alle phantasievollen Überlegungen der Theoretiker, ob SUSY- oder Stringtheorien, auszeichnet, bisher gibt es trotz intensiver jahrzehntelanger experimenteller Suche nicht den geringsten Hinweis auf ihre Gültigkeit.

Falls auch die experimentellen Bemühungen mit dem LHC eine neue Welt zu erschließen nur in der Entdeckung des Higgs-Bosons enden, wäre das in den Worten von John Ellis, einem der bedeutendsten Theoretiker des

CERN, „a real fivestar disaster, because that would mean there wouldn't need to be any new physics".[6]

Die Teilchenphysik steht an der Schwelle zu einer neuen Ära. Der Große Hadron Collider birgt das Potential zur zu einer tiefgreifenden Umgestaltung der Hochenergiephysik.[7]

6 Cho, A. Science 315 (2007), S. 1657.
7 Alle farbigen Abbildungen findet man unter Leibniz Online (www.leibniz-sozietaet.de).