

8. Quarks

8.1 Woran erkennt man, dass ein Baustein der Materie elementar ist?

Die Dinge, denen wir in der Natur begegnen, sind außerordentlich vielfältig. Seit der Zeit der griechischen Philosophen war es das Streben der denkenden Menschen, die Vielfalt der Dinge dadurch zu erklären, dass alle Dinge aus einer kleinen Zahl von "Elementen" in verschiedenen Mischungsverhältnissen aufgebaut sind. Demokrit postulierte die Atome, Empedokles die vier Elemente Luft, Wasser, Erde und Feuer. Aus der Hypothese der Atome entwickelte sich der empirisch fundierte Atombegriff auf Grund der Forschungen der Chemie und Physik des 19. Jahrhunderts. Es genügen 92 verschiedene Elemente, um alle Stoffe unserer Welt aufzubauen. Für die Chemie sind die Atome auch heute noch die "Elementarteilchen". Indem die Physik diese Atome mit sehr "kräftigen" Werkzeugen untersuchte, gelang es ihr, Atome in ihre Bestandteile zu zerlegen: Jedes Atom besteht aus einer bestimmten Anzahl von Elektronen, Protonen und Neutronen, z.B. bestehen die allermeisten Kohlenstoffatome aus 6 Elektronen, 6 Protonen und 6 Neutronen. Damit war die Vielfalt der 92 chemischen Elemente auf 3 "Elementarteilchen", Elektron, Proton und Neutron, zurückgeführt. Allerdings musste man sich fragen, ob nicht auch diese Teilchen ihrerseits wieder aus anderen, noch elementarerem, Bausteinen zusammengesetzt sind.

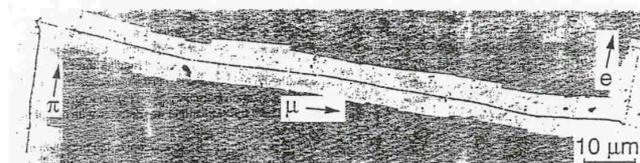
Woran erkennt man nun, ob ein Teilchen elementar oder zusammengesetzt ist? Darauf wissen wir auch heute noch keine allgemein gültige Antwort. Es scheint allerdings so zu sein, und das entspricht auch unserer Intuition, dass ein ausgedehntes Objekt nicht elementar ist. In diese Regel passt das Elektron, das kleiner ist als die kleinste Ausdehnung, die wir mit den gegenwärtigen Methoden messen können, und das sich bei allen Untersuchungen bisher als elementar erwiesen hat. Auch das Proton passt in diese Regel. Das Proton ist ausgedehnt, wie die Experimente von Hofstadter in den fünfziger Jahren ergaben, und es ist aus Quarks aufgebaut, worüber wir heute sprechen werden.

8.2 Hypothetische Quarks bringen Ordnung in den Teilchenzoo

Nachdem man das Atom in seine drei Bausteine, Elektron, Proton und Neutron, zerlegt hatte, war die Welt einfach und überschaubar. Das war etwa um das Jahr 1940. Weitere Forschungen machten die Welt der Physik dann wieder komplizierter, als man

1. begann, die Höhenstrahlung, d.h. die Strahlung, die aus dem Weltall auf die Erdatmosphäre fällt, genauer zu untersuchen und
2. an immer energiereicheren Beschleunigern experimentierte.

Abb. 8.1:
Die Zerfälle Pion \rightarrow Müon und Müon \rightarrow Elektron als Spuren in einer Photoemulsion.



Um die Höhenstrahlung zu analysieren, benutzte man u.a. Ballons, die Photoplatten in große Höhen trugen. Eventuelle Strahlung hinterlässt Spuren auf den Platten, die man

analysierte, nachdem man die Platten auf die Erde zurückgeholt und entwickelt hatte. Die Abbildung 8.1 zeigt einige dieser Spuren. Es gehört viel Erfahrung dazu, um diese Spuren "lesen", d.h. analysieren zu können. Auf dieser Abbildung zeigen sich die Spuren von drei Teilchen, die sich ineinander umwandeln. Ein erstes Teilchen, später "Pion" genannt, zerfällt in ein zweites Teilchen, das sogenannte "Müon", das dann schließlich in ein drittes Teilchen, das schon bekannte Elektron, zerfällt. Da auf einer Photoplatte nur geladenen Teilchen Spuren hinterlassen, können bei den beiden Zerfällen auch noch andere elektrisch neutrale Teilchen entstanden sein, die man auf der Platte nicht sieht. (In der Tat entstehen bei beiden Zerfällen auch noch Neutrinos.)

Mit dem Wissen von heute werden die zwei neu entdeckten Teilchen, Müon und Pion, mit den schon bekannten Teilchen in Familien geordnet: Elektron und Müon gehören zu der Familie der Leptonen ("Leichten") und die Hadronen ("Starken") umfassen die Protonen, Neutronen und die Pionen, von denen es drei Formen, ein positiv geladenes, ein ungeladenes und ein negativ geladenes gibt. Weitere Arbeiten, besonders mit Beschleunigern, lieferten nur noch ein weiteres Lepton, aber Hunderte von Hadronen. Zwar zerfallen diese Teilchen nach relativ kurzer Zeit wieder in die stabilen Teilchen Photonen, Protonen oder Elektronen, aber sie bringen in die Welt der Physik wieder eine verwirrende neue Vielfalt, die man den "Teilchenzoo" der Hadronen nannte. Also musste man nach neuen Ordnungskriterien suchen.

Bei genauerem Studium der Eigenschaften der verschiedenen Hadronen fiel auf, dass gewisse von ihnen sich ähnlicher verhalten als andere, und man fand auch einen mathematischen Formalismus, der diese Ähnlichkeiten beschrieb. Den abstrakten mathematischen Formalismus konnte man auch anschaulich machen. Man konnte sich nämlich vorstellen, dass die Hadronen aus gewissen Bausteinen, die Quarks genannt wurden, aufgebaut sind. Die wichtigsten sind das u-Quark mit der Ladung $(+2/3) \cdot e$ und das d-Quark mit der Ladung $(-1/3) \cdot e$, wobei e die Elementarladung, z.B. die Ladung des Protons ist. Dann ist z.B. das Proton aus 2 u- und einem d-Quark aufgebaut, das Neutron aus 2 d- und einem u-Quark und das positive Pion aus einem u-Quark und einem Anti-d-Quark. Man schreibt entsprechend $p = (u u d)$, $n = (u d d)$, $\pi^+ = (u \bar{d})$ und überzeugt sich leicht, dass wenigstens die Ladungen der Teilchen richtig herauskommen. Für das Proton $2 \cdot (2/3) \cdot e + 1 \cdot (-1/3) \cdot e = 1 \cdot e$ und für das Neutron $1 \cdot (2/3) \cdot e + 2 \cdot (-1/3) \cdot e = 0$. Dieses Ordnungsprinzip entspricht in etwa dem Vorgehen der Chemie im 18. Jahrhundert, die alle Stoffe auf Verbindungen aus Elementen und damit alle Moleküle auf den Zusammenschluss von Atomen zurückführte. Den Molekülen und Atomen von damals entsprechen die Teilchen und Quarks von heute.

8.3 Experimentelle Suche nach Quarks

Die Hypothese, dass die Hunderte von Hadronen aus wenigen Quarks - heute wissen wir dass es neben den u- und d-Quarks noch vier andere gibt - aufgebaut sind, machte den Teilchenzoo wieder überschaubar. Aber gibt es denn die Quarks auch wirklich? Was heißt wirklich? Man suchte nach den Quarks in zwei Typen von Experimenten.

1. Man bemühte sich, Teilchen mit drittelzahligen Ladungen, also z.B. mit der Ladung $2/3 e$ oder $-1/3 e$ in der Natur zu finden. Ohne Erfolg.

Ergebnis: **Es gibt keine Quarks in der Natur.**

2. Man beschoss Protonen, in denen ja Quarks sein sollten, mit sehr schnellen Elektronen und beobachtete die herauskommenden Elektronen. Einige wurden nach rückwärts gestreut, als ob sie ein winziges Objekt im Proton getroffen hätten. (Dieses Verfahren ist analog zum Vorgehen von Rutherford, der bei der Streuung von Alphateilchen an Atomen den Atomkern entdeckte.) Genauere Untersuchungen ergaben, dass das getroffene Objekt in 2 von 3 Fällen die Ladung $2/3 e$ trug. Später fand man u.a. am DESY in Hamburg, dass die getroffenen Objekte höchstens eine Ausdehnung besitzen, die kleiner als die gegebene Messgenauigkeit ist.

Ergebnis: **In Protonen gibt es eine körnige Struktur, die genau dem Bild von Quarks entspricht.**

Die Ergebnisse der beiden Versuchstypen scheinen sich zu widersprechen. In Protonen gibt es Quarks, in der freien Natur nicht. So etwas gab es bisher noch nicht. Erinnern wir uns an das Atom. Es enthält z.B. Elektronen, die man auch in der freien Natur findet. In diesem Sinn ist das Elektron ein "richtiges" Elementarteilchen. Man hat versucht, Quarks aus Protonen "herauszuschießen". Dazu hat man sich solche Ereignisse in der Streuung von Elektronen an Protonen angeschaut, in denen die Elektronen zurückgestreut wurden und die als Beweise dafür angesehen wurden, dass ein Quark getroffen worden war. Dort, wo man erwartete, dass das getroffene Quark herausfliegen sollte (auf Grund von Energie und Impulserhaltung), fand man in den Zählapparaturen nicht eine einzelne Spur, die auf ein Quark hinwies, sondern einen eng gebündelten Strahl von Hadronen ("Jet"), hauptsächlich Pionen.

8.4 Warum gibt es keine freien Quarks?

Der Grund für dieses merkwürdige Verhalten liegt in der Natur der Kräfte, die zwischen den Quarks wirken. Zwei Quarks ziehen sich mit einer Kraft an, die mit dem Abstand nicht kleiner wird, sondern gleich bleibt. (Die Kräfte zwischen zwei elektrischen Ladungen nehmen mit dem Abstand ab!). Die Kräfte zwischen den Quarks ähneln denen an einem Expander. Wenn die Griffe den Quarks entsprechen, dann entsprechen die Gummistränge der Kraft. Je weiter man sie auseinanderzieht, desto mehr Arbeit muss man aufbringen. Irgendwann aber wird der Expander reißen. So auch bei den Quarks. Beim Reißen der Kraftlinien zwischen den Quarks entstehen dann die Pionen, die man im Zähler sieht. In einem dieser Pionen "versteckt" sich das ursprünglich wegfliegende Quark. Deshalb wird man niemals freie Quarks sehen. Man nennt dieses Phänomen "Confinement" oder "Käfighaltung". Quarks sind an andere Quarks "angekettet".

8.5 Das Standard Modell der mikroskopischen Welt

Die gegenwärtige Vorstellung über den Aufbau der mikroskopischen Welt wird in einem sog. Standard Modell zusammengefasst: Hierin sind Quarks und Leptonen die Bausteine der Welt. Zum Beispiel bestehen die Atome aus Elektronen (Leptonen) und Atomkernen, die aus Quarks zusammengesetzt sind. Die Bausteine werden durch die elektromagnetischen und die starken Kräfte zusammengehalten. Die verschiedenen bekannten Quarks und Leptonen sind in der Tabelle 8.1 zusammengefasst.

Name	1. Familie	2. Familie	3. Familie	Ladung	Spin
Leptonen	ν_e	ν_μ	ν_τ	0	$\frac{1}{2}$
	e^-	μ^-	τ^-	-1	$\frac{1}{2}$
Quarks	u	c	t	+2/3	$\frac{1}{2}$
	d	s	b	-1/3	$\frac{1}{2}$

Tab. 8.1: Die Bausteine der Materie nach dem heutigen Standard Modell

Es gibt sechs Leptonen, drei ungeladene, die Neutrinos, und drei geladene, darunter das wohlbekannte Elektron. Hinzu kommen sechs Quarks, von denen drei positiv und drei negativ geladen sind. Leptonen und Quarks ordnet man in jeweils drei Familien an. Für unsere stabile tägliche Welt der Atome und Moleküle sind im wesentlichen nur die Bausteine der 1. Familie zuständig, während die höheren Familien bei den instabilen Teilchen des "Teilchenzoos" wichtig werden. Müonen (μ) und Tauonen (τ) zerfallen in Elektronen (e) und Neutrinos. Ebenso zerfallen die Quarks der 2. und 3. Familien in Teilchen der 1. Familie. Die Struktur der Bausteine unserer Materie, die in dem Schema der Tab. 8.1 dargestellt sind, zeigt eine wunderbare Symmetrie. Allerdings wissen wir nicht, woher diese Symmetrie kommt, warum es z.B. gerade drei Familien gibt. Außerdem sind wir nicht imstande, die Massen der Quarks und Leptonen zu berechnen.

8. 6 Das Ende der Reise zum Kleinsten

In der ersten Vorlesung sind wir von der makroskopischen Welt ausgegangen, die sich uns in täglichen Leben präsentiert. Wir haben die Geräte besprochen, mit denen man die Substrukturen unserer Welt erkennen kann. Mit immer aufwendigeren "Mikroskopen" - im weitesten Sinne des Wortes - konnten sukzessive die tieferen Schichten der mikroskopischen Welt aufgedeckt werden. Der historische Weg, dem wir in unserer Vorlesung gefolgt sind, ist in Tab. 8.2 schematisch dargestellt.

Zeitpunkt	Objekte	"Elementarteilchen"	Ordnungs- schema
Antike	Materie	Atome	
19. Jahrhundert	Moleküle	Atome von ca. 70 verschiedenen Elementen	Periodensystem
um 1910	Atome	Elektronen, Atomkerne	
um 1932	Atomkerne	Nukleonen (Protonen und Neutronen)	
um 1964	Nukleonen und andere Hadronen	Quarks	
um 1995		Leptonen und Quarks	Standardmodell
um 2050 ?	Leptonen und Quarks	???	???

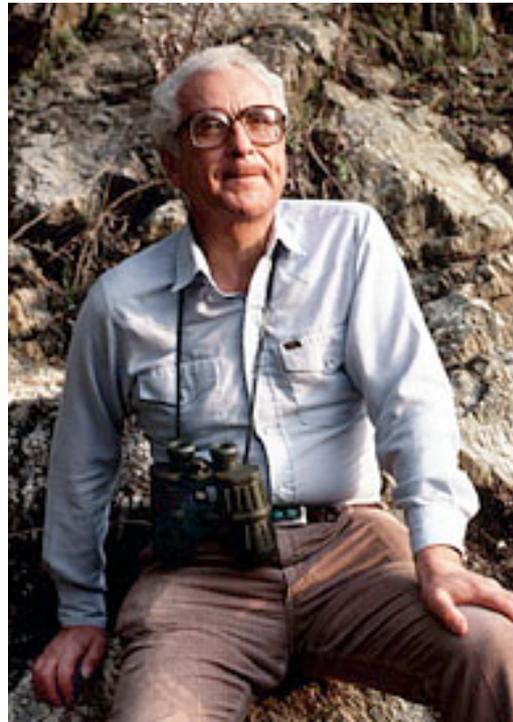
Tab. 8.2: Historische Entwicklung des Elementarteilchenkonzepts

Wir brechen nun den Weg zum Kleinsten bei den Leptonen und Quarks, den heutigen "Elementarteilchen", ab. Damit geben wir den gegenwärtigen Stand des gesicherten Wissens wieder, der aber nicht das Ende der Forschung bedeutet.

8.7 Biographien: Murray Gell-Mann (*1929) und Henry W. Kendall (1926 - 1999)

Das Quarkmodell und seine experimentelle Bestätigung gehen sicherlich auf mehr als zwei Physiker zurück. Daher stehen Gell-Mann und Kendall hier stellvertretend für viele, die auf diesem Gebiet gearbeitet haben. Sie erhielten beide einen Nobelpreis in Physik: Gell-Mann im Jahre 1969 (als Einziger) "für seine Beiträge und Entdeckungen auf dem Gebiet der Elementarteilchen und ihrer Wechselwirkungen", Kendall im Jahre 1990 zusammen mit Friedman und Taylor "für ihre Untersuchungen auf dem Gebiet der tiefinelastischen Streuung von Elektronen an Protonen und gebundenen Neutronen, die von besonderer Bedeutung für die Entwicklung des Quarkmodells in der Teilchenphysik waren".

Murray Gell-Mann, von dem Emilio Segré im Jahre 1981 sagte, er sei *"einer der bedeutendsten theoretischen Physiker der gegenwärtigen Generation"*, wurde als Sohn österreichischer Einwanderer in New York geboren. Schon im Alter von 7 Jahren beschäftigte er sich allein an Hand eines Lehrbuches mit Grenzwertproblemen und mit 15 ging er auf die Yale University. Sein ursprünglicher Plan war, Linguistik und Archäologie zu studieren, doch sein Vater wollte einen Ingenieur aus ihm machen. Als Kompromiss einigte man sich auf ein Physikstudium, obwohl die Schulphysik mit ihren langen Reihen von Formeln und ihren unzusammenhängenden Teilgebieten dem jungen Gell-Mann unerträglich langweilig erschien. Auf der Universität öffneten brillante Lehrer ihm die Augen für die esoterischen Freuden der Theoretischen Physik, so dass er sich tief in sie hineinkniete und mit 22 Jahren am MIT mit einer Arbeit zu einem Thema aus der Quantenphysik promovierte. Bald danach ging Gell-Mann nach Princeton ans Institut for Advanced Study und nach Chicago, wo Fermi arbeitete. Dort wurde er 1953 Assistant Professor und ein Jahr später Associate Professor. Nachdem er bereits 1953 eine Arbeit über die Einführung einer neuen Quantenzahl, der Strangeness, veröffentlicht hatte, erhielt er 1955 einen Ruf auf den R.A. Millikan-Lehrstuhl am California Institut for Technology, den er bis zum Jahre 1993 innehatte. Hier verlagerte sich sein Forschungsschwerpunkt auf die Theorie der Schwachen Wechselwirkungen. Außer bei der Strangeness war Gell-Mann an weiteren wichtigen Entdeckungen beteiligt. Er fand 1961 gleichzeitig mit, aber unabhängig von Ne'man den "Achtfachen Weg" als Klassifikationsschema der

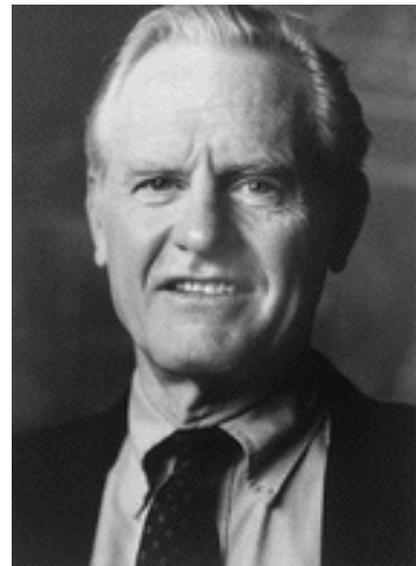


Elementarteilchen und hatte 1963 die Idee der Quarks, wiederum zur gleichen Zeit, doch unabhängig von G. Zweig.

Nach seiner Emeritierung am CalTec wurde er Professor und Distinguished Fellow of the Santa Fe Institute. Dort beschäftigt er sich mit dem Gebiet der komplexen Systeme, auf dem er seine vielseitigen Interessen - Naturgeschichte, Sprachentwicklung, Archäologie, Geschichte, Tiefenpsychologie, kreatives Denken sowie biologische und kulturelle Evolution - einbringen kann. Des weiteren ist er politisch engagiert und kümmert sich um Fragen zur Umweltproblematik: Erhaltung der biologischen Vielfalt, Beschränkung des Bevölkerungswachstums und zur nachhaltigen Wirtschaftentwicklung, Stabilität der politischen Systeme. In seiner verbleibenden Freizeit wandert und zeltet er gern und entspannt sich bei der Beobachtung von Vögeln.

Bei derart vielseitig gestreuten Interessen und Aktivitäten kann man vielleicht den Satz eines Kollegen verstehen, der einmal sagte: *"Murray has no particular talent for physics, but he's so smart he's a great physicist anyway."*

In seiner Liebe zur Natur konnte es der Experimentalphysiker Kendall dem Theoretiker Gell-Mann gut aufnehmen. Er war ein sehr erfahrener Kletterer, der an Touren in die Anden, ins Himalaya und in die Arktis teilgenommen und diese Expeditionen mit wundervollen Fotografien dokumentiert hat. Außerdem hatte er von Jugend auf großes Interesse am Tauchen und an der Unterwasserfotographie. Diese Aktivitäten, über die er auch schon früh zwei Bücher geschrieben hat, sah er selbst als gute Vorübung für seine spätere experimentelle Arbeit: Er lernte Projekte bis zum Ende durchzustehen und sie sicher zu gestalten. Doch trotz seiner großer Erfahrung starb er 1999 während eines Tauchgangs in Florida, bei dem er zusammen mit Freunden von der National Geographic Society Unterwasseraufnahmen machen wollte.



Geboren wurde Henry Kendall in Boston als Sohn eines Geschäftsmannes, seine Mutter war Kanadierin. Während seiner Kindheit machte er eine Leseschwäche durch und auch während der Vorbereitung auf das College waren seine Leistungen nicht überzeugend. Er selbst sagt dazu: *"My academic work was poor for I was more interested in non-academic matters and was bored with school work."* So zog es ihn zur Handelsmarine, bei der er in den Jahren 1945/46 Dienst tat. Anschließend studierte er Mathematik am Amherst College und machte dort 1950 sein Examen. Auf den Rat eines Freundes seiner Familie, der damals Präsident des MIT war, bewarb er sich bei dieser Institution und wurde als Physikstudent aufgenommen. Dort erlebte er zum ersten Mal die Freude des völligen Eintauchens in die Wissenschaft. In seiner Doktorarbeit versuchte er gewisse optische Eigenschaften von Positronium zu messen. Auch wenn der Versuch misslang, konnte er 1955 am MIT promovieren und wurde anschließend dort Fellow. Er wechselte dann im Jahre 1956 nach Stanford, wo er bis 1961 als Dozent tätig war und in der Forschungsgruppe von Robert Hofstadter arbeitete. Dort traf er Jerome Friedman und Richard Taylor, mit denen er später die berühmten Experimente zur tiefinelastischen Streuung am SLAC machen sollte, für die die drei 1990 den

Nobelpreis erhielten. Kendall kehrte 1961 ans MIT zurück und wurde dort 1967 zum Professor berufen. Da im Laufe der Zeit die Experimente zur Teilchenphysik immer größer, langwieriger und unüberschaubarer wurden, zog sich Kendall aus diesem Metier immer mehr zurück und lenkte sein Hauptaugenmerk auf die politische und soziale Verantwortung der Wissenschaft. Er war 1969 Gründungsmitglied der "Union of Concerned Scientists (UCS) und diente ihr 25 Jahre lang als Vorsitzender. Dabei lagen ihm Themen wie Waffenkontrolle und Reaktorsicherheit genauso am Herzen wie der Verbrauch der fossilen Brennstoffe und der Treibhauseffekt. Er war Berater des Verteidigungsministeriums und gehörte auch zu dem Kreis von Wissenschaftlern, die Präsident Clinton 1997 auf die Gefahren einer globalen Erwärmung aufmerksam machten. Für ihn war klar, dass ohne die Teilnahme der Wissenschaftler an öffentlichen Debatten die Chancen für die Zunahme des Unrechts in der Welt vergrößert würde.

Quellen:

1. Emilio Segré: Die großen Physiker und ihre Entdeckungen
2. http://www.geocities.com/omegaman_uk/gellmann.html
3. <http://www.pbs.org/wgbh/aso/databank/entries/bpgell.html>
4. www.santafe.edu/~mgm
5. www.minic.ac.at/ut/Physik/namen.html