

## Warum hat das Teilchen $J/\psi$ einen Doppelnamen? Woher kommen die Namen $J$ und $\psi$ ?

Im Jahr 1974 fanden zwei Forschergruppen unter der Leitung von BURTON RICHTER (\*1931) und SAMUEL C. C. TING (\*1936) unabhängig von einander ein äußerst schweres, neutrales Meson mit ungewöhnlich langer Lebensdauer ( $10^{-20}$  s), das man heute zu den **Charm-Teilchen** zählt.

Richter und sein Team hatten das Teilchen bei Zusammenstößen von Elektronen und Positronen im Speicherring am SLAC (Stanford Linear Accelerator Center) entdeckt <sup>[Aug74]</sup>. Aufgrund der Ähnlichkeit des von ihm erzeugten Detektorsignals mit dem griechischen Buchstaben  $\psi$ , wurde es von Richter auf den Namen „Psi“ getauft.

Ting und seine Mitarbeiter hatten am BNL (Brookhaven National Laboratory) ein festes Target mit Protonen beschossen und dabei dasselbe Teilchen erzeugt <sup>[Aub74]</sup>. Sie nannten das Teilchen „J“ wegen der Ähnlichkeit mit dem chinesischen Buchstaben für „Ting“. Heute trägt das Teilchen, das aus einem Charm- und einem Anticharm-Quark besteht, daher den Doppelnamen  $J/\psi$ .

Richter und Ting erhielten 1976 den Nobelpreis für Physik „für ihre führenden Leistungen bei der Entdeckung eines schweren Elementarteilchens neuer Art“ <sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Übersetzte Begründung des Nobelpreiskomitees

### Literatur:

<sup>[Aug74]</sup> J.E. Augustin, et al. : Phys. Rev. Let. **33** 1406 (1974)

<sup>[Aub74]</sup> J.J. Aubert, et al. : Phys. Rev. Let. **33** 1404 (1974)

Spurensuche im Teilchenzoo: F. Close, M. Marten, C. Sutton, Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH Heidelberg, 1989

Die Teilchenjäger: Yuval Ne'eman, Yoram Kirsh, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1995

Einführung in die Elementarteilchenphysik: D.J. Griffiths, Akademischer Verlag Berlin 1996

Physik, Atome – Atomkerne – Elementarteilchen: H. Hänsel, W. Neumann, Spektrum Akademischer Verlag GmbH Heidelberg Berlin Oxford 1995

Teilchen und Kerne, Eine Einführung in die physikalischen Konzepte: B. Povh, K. Rith, C. Scholz, F. Zetsche, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1993

## Was ist so seltsam an diesen Teilchen, dass man sie mit einer besonderen Eigenschaft („Strangeness“) versah?

In den fünfziger und sechziger Jahren konnte mit Hilfe von immer leistungsfähigeren Beschleunigungsanlagen eine große Zahl neuer Teilchen entdeckt werden. Einige von ihnen verhielten sich sehr „seltsam“: Sie konnten nur paarweise durch die starke Wechselwirkung erzeugt werden, zerfielen dann aber nur über die schwache Kraft, obwohl ihre Zerfallsprodukte Hadronen, also ebenfalls stark wechselwirkende Teilchen waren.

Der Amerikaner MURRAY GELL-MANN (\*1929) <sup>[Gel53]</sup> und der Japaner KASUHIKO NISHIJIMA (\*1926) <sup>[Nak53]</sup> konnten 1953 unabhängig voneinander das Verhalten dieser Teilchen durch die Einführung einer weiteren Quantenzahl, der „Seltsamkeit“ oder „Strangeness“ (S) erklären. Ihre Theorie besagt, dass die Seltsamkeit bei elektromagnetischen und starken Wechselwirkungen, nicht aber bei schwachen Prozessen erhalten bleibt. Bei der Bildung seltsamer Teilchen durch die starke Wechselwirkung zwischen Teilchen der Seltsamkeit null, muss daher auch die „Gesamtseltsamkeit“ der Zerfallsprodukte gleich null sein, wodurch sich die Erzeugung seltsamer Teilchen in Gruppen von zwei oder mehreren Teilchen erklären lässt: z. B.  $S: 0 + 0 \rightarrow -1 + 1$ .

In Prozessen der schwachen Wechselwirkung kann sich die Seltsamkeit ändern, sodass der Zerfall eines seltsamen Teilchens in andere Teilchen mit Gesamtseltsamkeit null über die schwache Kraft erlaubt ist. Der ausschließliche Zerfall der (meisten) seltsamen Teilchen über die schwache Kraft erklärt auch die relativ lange Lebensdauer (ca.  $10^{-10}$  s) dieser Teilchen. Durch Vergleiche von Reaktionen, in denen seltsame Teilchen erzeugt werden, konnten Gell-Mann und Nishijima – ausgehend von der willkürlichen Zuordnung  $S = -1$  für das neutrale Lambda  $\Lambda^0$  – den Wert der Seltsamkeit eines jeden Teilchens bestimmen.

Heute wissen wir, dass der Wert der Seltsamkeit eines Teilchens der Summe der Seltsamkeiten der in diesem Teilchen enthaltenen Quarks entspricht, wobei dem s-Quark die Seltsamkeit  $S = -1$ , dem  $\bar{s}$ -Quark die Seltsamkeit  $S = +1$  und allen anderen Quarks bzw. Antiquarks  $S = 0$  zugeordnet wird. Leptonen bestehen nicht aus Quarks, ihnen wird daher auch keine Seltsamkeitsquantenzahl S zugeordnet.

Name		Symbol	Quarks	S	Masse
Kaon	K-null	$\mathbf{K}^0$	$d\bar{s}$	+1	498 MeV/c <sup>2</sup>
	K-plus	$\mathbf{K}^+$	$u\bar{s}$	+1	494 MeV/c <sup>2</sup>
	K-minus	$\mathbf{K}^-$	$\bar{u}s$	-1	494 MeV/c <sup>2</sup>
Lambda		$\mathbf{\Lambda}^0$	uds	-1	1,115 GeV/c <sup>2</sup>
Sigma	Sigma-null	$\mathbf{S}^0$	uds	-1	1,192 GeV/c <sup>2</sup>
	Sigma-plus	$\mathbf{S}^+$	uus	-1	1,189 GeV/c <sup>2</sup>
	Sigma-minus	$\mathbf{S}^-$	dds	-1	1,197 GeV/c <sup>2</sup>
Xi	Xi-null	$\mathbf{X}^0$	uss	-2	1,315 GeV/c <sup>2</sup>
	Xi-minus	$\mathbf{X}^-$	dss	-2	1,321 GeV/c <sup>2</sup>
Omega-minus		$\mathbf{W}^-$	sss	-3	1,672 GeV/c <sup>2</sup>

Tabelle einiger seltsamer Hadronen

### Literatur:

<sup>[Gel53]</sup> M. Gell-Mann : Phys. Rev. **92** 883 (1953)

<sup>[Nak53]</sup> T. Nakano, K. Kishijima : Prog. Theor. Phys. **10** 581 (1953)

**Welches ist derzeit das schwerste Teilchen, das im Particle Data Booklet aufscheint?**

Das bei weitem schwerste Teilchen, das im [Particle Data Booklet](#) aufscheint, ist das top-Quark, dessen Masse mit  $m_t = 174,3 \pm 5,1 \text{ GeV}/c^2$ <sup>1</sup> angegeben wird. Dies entspricht etwa der Masse des aus 184 Nukleonen zusammengesetzten Wolfram-Kerns.

Aufgrund dieser enormen Masse konnte das top-Quark erst 1995 am Fermilab (Fermi National Laboratory) in den USA nachgewiesen werden. Die lange erwartete Entdeckung des top-Quark vervollständigte die Liste von je sechs Quarks und Leptonen, die nach der Theorie des Standardmodells, zusammen mit ihren Antiteilchen als Grundbausteine aller Materie im Universum angesehen werden.

---

<sup>1</sup> Aus: D.E. Groom *et al.* (Particle Data Group), Eur. Phys. Jour. **C15**, 1 (2000) and 2001 partial update for edition 2002 (URL: <http://pdg.lbl.gov>)

**Welche der folgenden Reaktionen treten in der Natur auf, welche nicht?**

$$\begin{array}{ll}
 \underline{p \rightarrow n + e^- + \bar{\nu}_e} & p^+ \rightarrow m^+ + \bar{n}_m / \underline{p^+ \rightarrow m^+ + \bar{n}_m} \\
 K^+ \rightarrow p^+ + p^- + p^0 / K^+ \rightarrow p^+ + p^- + p^+ & \underline{L^0 \rightarrow p + e^-}
 \end{array}$$

(In Gleichung 2 und 3 gilt die linke Formel für die Auflage 1.0 des Teilchenheftes, die rechte für Auflage 1.1!)

Teilchen können nur dann in andere Teilchen zerfallen, wenn diese Reaktionen nicht durch Erhaltungssätze verboten sind. Zusätzlich zu den Erhaltungsgrößen wie Energie (E), Impuls (p) oder elektrische Ladung (Q) konnten in den letzten Jahrzehnten weitere Größen eingeführt werden, die in elektromagnetischen, starken und schwachen Prozessen ebenfalls erhalten bleiben. Zu ihnen zählt die Baryonladung (B), die Leptonzahlen (L bzw.  $L_e$ ,  $L_\mu$  und  $L_\tau$ ) und die Seltsamkeit (S), die allerdings nur bei Zerfällen über die elektromagnetische und starke Wechselwirkung, nicht aber bei schwachen Prozessen erhalten bleiben muss.

1)  $\underline{p \rightarrow n + e^- + \bar{\nu}_e}$ :

Q:  $+1 \neq 0 -1 + 0$   
 B:  $1 = 1 + 0 + 0$   
 L:  $0 \neq 0 + 1 + 1$



Man sieht, dass in dieser Reaktion mehrere Erhaltungssätze verletzt sind. Sie kann daher in der Natur nicht beobachtet werden. Für freie Protonen ist auch der Energieerhaltungssatz verletzt, da das Neutron ( $m_n = 939,6 \text{ MeV}/c^2$ ) und damit natürlich auch die Summe Neutron, Elektron und Elektron-Neutrino, schwerer als das Proton ( $m_p = 938,3 \text{ MeV}/c^2$ ) ist.

2)  $\underline{p^+ \rightarrow m^+ + \bar{n}_m} / \underline{p^+ \rightarrow m^+ + \bar{n}_m}$

Q:  $+1 = +1 + 0 / +1 = +1 + 0$   
 B:  $1 = 0 + 0 / 0 = 0 + 0$   
 L:  $0 = -1 + 1 / 0 = -1 + 1$   
 $L_\mu$ :  $0 = -1 + 1 / 0 = -1 + 1$



Auflage 1.0: Baryonenzahlerhaltung verletzt

Auflage 1.1: Diese Reaktion kann auftreten, da alle Erhaltungssätze erfüllt sind.

Der Energieerhaltungssatz ist in beiden Reaktionen erfüllt (die Masse des  $p^+/\pi^+$  ist größer als die Summe der Massen der Zerfallsprodukte  $\mu^+$  und  $\nu_\mu$ ) – die Reaktion tritt in der Natur auf.

3)  $\underline{K^+ \rightarrow p^+ + p^- + p^0} / \underline{p^+}$

Q:  $+1 = +1 - 1 + 0 / +1$   
 B:  $0 = 0 + 0 + 0$   
 L:  $0 = 0 + 0 + 0$



Auflage 1.0: Ladungserhaltung verletzt

Auflage 1.1: Diese Reaktion kann auftreten, da alle Erhaltungssätze erfüllt sind.

4)  $\underline{L^0 \rightarrow p + e^-}$ :

Q:  $0 = +1 - 1$   
 B:  $+1 = +1 + 0$   
 L:  $0 \neq 0 + 1$



In dieser Reaktion ist die Erhaltung der Leptonenladung nicht gegeben, weshalb wir sie in der Natur nicht beobachten können.

**Welches sind die Quantenzahlen B, S, C für die Teilchen  $\Lambda^0$ ,  $\Omega^-$  und  $D^0$  ?**

Die **Baryonenzahl B**, die **Seltsamkeit S** und die **Charm-Quantenzahl C** sind Eigenschaften der Teilchen, die sich auf die Grundbausteine der Hadronen, die sogenannten „Quarks“, zurückführen lassen<sup>1</sup>.

Für die beiden Baryonen Lambda ( $\Lambda^0$ ) und Omega-minus ( $\Omega^-$ ), die beide aus je drei Quarks bestehen, gilt:

	$\Lambda^0$	=	(u	d	s)
<b>B</b> :	<b>1</b>	=	+1/3	+1/3	+1/3
<b>S</b> :	<b>-1</b>	=	0	+ 0	-1
<b>C</b> :	<b>0</b>	=	0	+ 0	+ 0

	$\Omega^-$	=	(s	s	s)
<b>B</b> :	<b>1</b>	=	+1/3	+1/3	+1/3
<b>S</b> :	<b>-3</b>	=	-1	-1	-1
<b>C</b> :	<b>0</b>	=	0	+ 0	+ 0

Das D-null-Meson ( $D^0$ ) besteht aus einem Charm- und einem Anti-up-Quark. Seine Quantenzahlen A, S und C sind:

	$D^0$	=	( $\bar{u}$	c)
<b>B</b> :	<b>0</b>	=	-1/3	+ 1/3
<b>S</b> :	<b>0</b>	=	0	+ 0
<b>C</b> :	<b>1</b>	=	0	+ 1

Die Quantenzahlen B, S und C spielen bei Leptonen keine Rolle, da Leptonen, anders als Mesonen und Baryonen, nicht aus Quarks aufgebaut sind. Sie werden daher für alle Leptonen gleich null gesetzt.

<sup>1</sup> Siehe Themenheft, Seite 24

**Literatur:**

Elementarteilchenphysik, von den Grundlagen zu den modernen Experimenten: C. Berger, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 2002

## Wie wurde das **W**-Teilchen gefunden?

1961 führten MURRAY GELL-MANN (\*1929) und YUVAL NE'EMAN (\*1925) unabhängig voneinander eine Theorie ein, die es erstmals ermöglichte, alle in der Natur gefundenen Teilchen aufgrund ihrer Eigenschaften in symmetrische Figuren (z. B. Oktetts und Dekupletts) einzuordnen. In Anlehnung an den „Eightfold path“ von Buddha nannte Gell-Mann die Theorie den „Achtfachen Weg“.

Der größte Erfolg des achtfachen Weges war die Vorhersage des  $\Omega^-$ -Teilchens, das nach Gell-Mann die Spitze des Dekupletts der Baryonen mit Spin  $3/2$  bilden sollte<sup>1</sup>. Aus der Theorie konnten die Eigenschaften dieses Teilchens sehr genau vorausgesagt werden, sodass sein tatsächlicher experimenteller Nachweis im Jahre 1964 am Brookhaven National Laboratory in den USA die Theorie des achtfachen Weges hervorragend bestätigte.



Abb. 31: Erste Fotografie des  $\Omega^-$ , aufgenommen 1964 in einer Blaskammer des Brookhaven National Laboratory

In einer Blaskammer hatte man Kollisionen energiereicher Kaonen (die beim Aufprall der im Synchrotron auf 33 GeV beschleunigten Protonen auf ein Target entstanden waren) mit den Protonen der Blaskammerflüssigkeit beobachtet. Der rote Pfeil im Bild kennzeichnet die Spur des  $\Omega^-$ -Teilchens, das in der Reaktion  $K^- + p \rightarrow \Omega^- + K^+ + K^0$  erzeugt wurde und  $10^{-10}$  Sekunden später über die Reaktion  $\Omega^- \rightarrow \Sigma^0 + \pi^-$  zerfiel.

<sup>1</sup> Siehe Schülerbuch, Seite 22

### Literatur:

Spurensuche im Teilchenzoo: F. Close, M. Marten, C. Sutton, Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH Heidelberg, 1989

**Eine weitere Gruppe bilden die Bayonen mit Spin  $\frac{1}{2}$  ( $p, n, \mathbf{S}^+, \mathbf{S}^-, \mathbf{S}^0, \mathbf{L}^0, \mathbf{X}^-, \mathbf{X}^0$ ). Welches sind die Werte für  $I_3$  und  $Y$  dieser Teilchen, und wie sieht das entsprechende Diagramm aus?**

Sind die Ladung ( $Q$ ) eines Teilchens und die Größe der Familie ( $n$ ), zu der das Teilchen gehört, bekannt, kann man daraus sehr einfach den Isospin ( $I$ ), dessen Einstellung ( $I_3$ ) und die Hyperladung ( $Y$ ) des Teilchens berechnen:

- Der **Isospin  $I$**  eines jeden Teilchens einer Familie mit  $n$  Elementen berechnet sich aus der Formel:  $I = \frac{1}{2} \cdot (n - 1)$
- Die **Isospineinstellungen  $I_3$**  der Teilchen innerhalb einer Familie sind verschieden. Man erhält sie aus der Formel:  $I_3 = I - m$  mit  $m = 0, 1, \dots, (n-1)$   
Dabei gilt:  $m = 0$  für das Teilchen mit der positivsten Ladung  $Q$ , bis hin zu  $m = (n-1)$  für das negativste Teilchen innerhalb der Familie.
- Die **Hyperladung  $Y$**  ergibt sich aus der Formel:  $Y = 2 \cdot (Q - I_3)$

In der Gruppe der Baryonen mit Spin  $\frac{1}{2}$  bilden das Proton ( $p$ ) und das Neutron ( $n$ ) ein Dublett ( $n = 2$ ), die Sigma-Teilchen ( $\Sigma^-, \Sigma^0$  und  $\Sigma^+$ ) ein Triplet ( $n = 3$ ), das Lambda ( $\Lambda^0$ ) ein Singulett und die beiden Xi-Teilchen ( $\Xi^-$  und  $\Xi^0$ ) wieder ein Dublett. Die Werte der Isospineinstellung  $I_3$  und der Hyperladung  $Y$  dieser Teilchen sind daher:

Teilchen	Q	I	$I_3$	Y
p	+1	$\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{2}$	1
n	0	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	1
$\Sigma^+$	+1	1	+1	0
$\Sigma^0$	0	1	0	0
$\Sigma^-$	-1	1	-1	0
$\Lambda^0$	0	0	0	0
$\Xi^0$	0	$\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{2}$	-1
$\Xi^-$	-1	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	-1

Tabelle der Baryonen mit Spin  $\frac{1}{2}$

## Starke Wechselwirkung Schon wieder Symmetrien

- **Diagramm:**

Konstruiert man die Punkte, die den  $I_3$ - und  $Y$ -Werten der einzelnen Teichen in einem Koordinatensystem mit den Achsen  $I_3$  und  $Y$  entsprechen, erhält man folgende, symmetrische Figur:

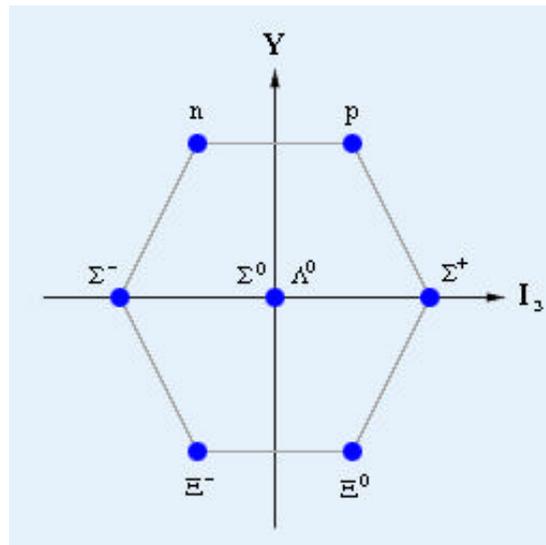


Abb. 32: Oktett der Baryonen mit Spin  $\frac{1}{2}$

Sigma-null ( $\Sigma^0$ ) und Lambda ( $\Lambda$ ) nehmen denselben Platz im Diagramm ein, d. h. sie bestehen aus den gleichen Quarks. Allerdings unterscheiden sie sich durch die Spineinstellungen ihrer Quarks:

$$\Sigma^0 = u(\uparrow) d(\uparrow) s(\downarrow) \quad \text{und} \quad \Lambda^0 = u(\uparrow) d(\downarrow) s(\uparrow)$$

---

### Literatur:

Elementarteilchenphysik, Von den Grundlagen zu den modernen Experimenten: C. Berger, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 2002

Hochenergiephysik: E. Lohrmann, Teubner-Verlag Stuttgart 1981

## Woher kommt der Name Quark?

Der Name Quark wurde 1963 von MURRAY GELL-MANN eingeführt. Anders als im Deutschen hat das Wort im Englischen keinerlei Bedeutung.

Gell-Mann schrieb später in einem seiner Bücher: *„Als ich 1963 den fundamentalen Bausteinen des Nukleons den Namen »Quark« gab, war mir zunächst der Klang des Wortes in den Sinn gekommen, den ich zunächst nicht mit einer bestimmten Buchstabenfolge assoziierte, die beispielsweise auch »kwork« hätte lauten können. Bei einem meiner gelegentlichen Streifzüge durch Finnegans Wake von James Joyce stieß ich dann auf das Wort Quark, und zwar in dem Satz ,Three quarks for Muster Mark‘.“*<sup>1</sup>

Heute kennen wir sechs verschiedene Quarks – up, down, strange, charm, bottom und top, die mit den Buchstaben u, d, s, c, b, und t bezeichnet werden. Eines der hervorstechendsten Merkmale der Quarks ist, dass sie im Unterschied zu allen anderen Teilchen Drittelladungen besitzen.

---

<sup>1</sup> Zitat aus: Das Quark und der Jaguar: Murray Gell-Mann, R. Piper GmbH & Co. KG München 1994

### Literatur:

Das Quark und der Jaguar: Murray Gell-Mann, R. Piper GmbH & Co. KG München 1994

Die Teilchenjäger: Yuval Ne'eman, Yoram Kirsh, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1995

Spurensuche im Teilchenzoo: F. Close, M. Marten, C. Sutton, Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH Heidelberg 1989

**Aus welchen Quarks sind  $K^-$ ,  $K^0$  und  $\bar{K}^0$  aufgebaut?**

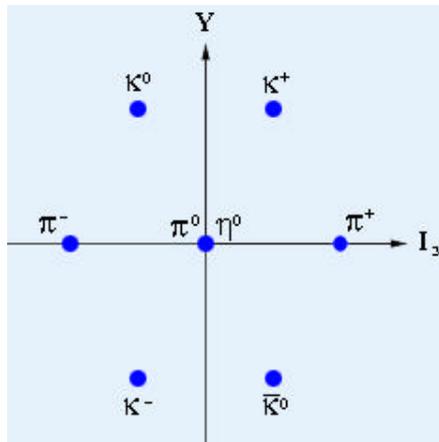


Abb. 33: Oktett der Mesonen mit Spin 0 (aus den Werten  $I_3$  und  $Y$  der Mesonen)

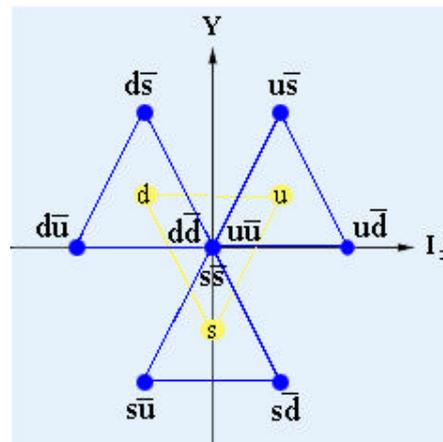


Abb. 34: Aus den u-, d- und s-Quarks zusammengesetzten Quark-Antiquark-Paare.

Der Vergleich von Isospineinstellung ( $I_3$ ) und Hyperladung ( $Y$ ) der Kaonen in Abb.33 mit den entsprechenden Werten der Quark-Antiquark-Paare in Abb.34 zeigt, dass jedem K-Meson in eindeutiger Weise eine Quark-Antiquark-Paar zugeordnet werden kann:

Teilchen	Q	I	$I_3$	Y	S	Quarks
$K^+$	+1	$\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{2}$	1	1	$u \bar{s}$
$K^0$	0	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	1	1	$d \bar{s}$
$\bar{K}^0$	0	$\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{2}$	-1	-1	$s \bar{d}$
$K^-$	-1	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	-1	-1	$s \bar{u}$

Ladung, Spin, Spineinstellung, Hyperladung, Seltsamkeit und Elementarbausteine der Kaonen

Die vier Kaonen sind Teilchen aus zwei verschiedenen Familien: Die beiden Mesonen  $K^+$  und  $K^0$  bzw. ihre Antiteilchen  $\bar{K}^0$  und  $K^-$  bilden zusammen je ein Teilchen-Dublett ( $n = 2$ ).

**Literatur:**

Hochenergiephysik: E. Lohrmann, Teubner-Verlag Stuttgart 1981  
Einführung in die Elementarteilchenphysik: D.J. Griffiths, Akademischer Verlag, Berlin 1996  
Elementarteilchenphysik, Von den Grundlagen zu den modernen Experimenten: C. Berger, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 2002

## Woraus setzen sich die Mesonen $\mathbf{p}^0$ und $\mathbf{h}^0$ zusammen?

Der Aufbau der Mesonen  $\pi^0$  und  $\eta^0$  lässt sich durch Vergleich der beiden oben skizzierten Diagramme (Abb.33 und Abb.34) nicht eindeutig bestimmen, da  $\pi^0$  und  $\eta^0$  demselben Punkt entsprechen. Außerdem stehen den beiden Mesonen drei mögliche Quark-Antiquark-Kombinationen ( $u\bar{u}, d\bar{d}$  und  $s\bar{s}$ ) gegenüber.

Um dennoch beiden Teilchen die entsprechenden, elementaren Bausteine zuordnen zu können, vergleicht man ihre Massen: Das  $\eta^0$ -Meson ( $m_\eta = 549 \text{ MeV}/c^2$ ) ist deutlich schwerer als das  $\pi^0$ -Teilchen ( $m_\pi = 135 \text{ MeV}/c^2$ ) – es muss daher auch aus den schwereren strange-Quarks aufgebaut sein. Tatsächlich entspricht es einem „Mischzustand“ aus up-, down- und strange-Quarks und Antiquarks:  $\mathbf{h}^0 = \frac{1}{\sqrt{6}}(u\bar{u} + d\bar{d} - 2s\bar{s})$

Das wesentlich leichtere Pi-null ist dagegen nur aus den beiden leichten Quark-Antiquark-Paaren  $u\bar{u}$  und  $d\bar{d}$  aufgebaut:  $\mathbf{p}^0 = \frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} - d\bar{d})$

Die vier Kaonen, die drei Pionen und das Eta-null bilden zusammen das Oktett der Mesonen mit Spin 0.

Neben diesen acht Teilchen existiert ein weiteres Meson  $\eta'$ , das ebenfalls den Spin 0 besitzt.  $\eta'$  ist völlig symmetrisch aus den drei Quark-Antiquark-Paaren aufgebaut:

$$\eta' = \frac{1}{\sqrt{3}}(u\bar{u} + d\bar{d} + s\bar{s})$$

Aus gruppentheoretischen Überlegungen ergibt sich daher, dass dieses Teilchen einem Singulett entspricht.

### Eigenschaften der Teilchen des Pion-Tripletts und des Eta-Singuletts:

Teilchen	Q	I	I <sub>3</sub>	Y	S	Quarks
$\pi^+$	+1	1	+1	0	0	$u\bar{d}$
$\pi^0$	0	1	0	0	0	$\pi^0 = \frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} - d\bar{d})$
$\pi^-$	-1	1	-1	0	0	$d\bar{u}$
$\eta^0$	-1	0	0	0	0	$\eta^0 = \frac{1}{\sqrt{6}}(u\bar{u} + d\bar{d} - 2s\bar{s})$

Ladung, Spin, Spineinstellung, Hyperladung, Seltsamkeit und Elementarteilchen der Pionen und Eta

#### Literatur:

Physik, Atome – Atomkerne – Elementarteilchen: H. Hänsel, W. Neumann, Spektrum Akademischer Verlag GmbH Heidelberg Berlin Oxford 1995  
Teilchenastrophysik: Klapdor-Kleingrothaus, Zuber, Teubner-Verlag Stuttgart 1997

Aus welchen Quarks sind die Mesonen Ypsilon ( $\Upsilon$ ),  $D^+$ ,  $B^-$  und die Baryonen  $\Sigma^0$ ,  $\Xi^-$ ,  $\Sigma_c^{++}$  aufgebaut?

Symbol	Q	I	I <sub>3</sub>	Y	B	S	C	B*	Quarks
$\Upsilon$	0	0	0	0	0	0	0	0	$b\bar{b}$
$D^+$	+1	1/2	+1/2	+1	0	0	+1	0	$c\bar{d}$
$B^-$	-1	1/2	-1/2	-1	0	0	0	-1	$b\bar{u}$
$\Sigma^0$	-1	1/2	-1/2	-1	+1	-2	0	0	$d s s$
$\Xi^-$	0	+1	0	0	+1	-1	0	0	$u d s$
$\Sigma_c^{++}$	+2	+1	1	+2	+1	0	+1	0	$u u c$

Ladungen und Elementarteilchen der Mesonen  $\Upsilon$ ,  $D^+$  und  $B^-$  und der Baryonen  $\Sigma^0$ ,  $\Xi^-$ ,  $\Sigma_c^{++}$

Q ... elektrische Ladung  
I ... Isospin  
I<sub>3</sub> ... Isospinkomponente  
Y ... Hyperladung

B ... Baryonenzahl  
S ... Seltsamkeit  
C ... Charm-Quantenzahl  
B\* ... Bottom-Quantenzahl

### Wie hat E. Rutherford die Existenz des Atomkerns gezeigt?

Im Jahre 1911 konnte ERNEST RUTHERFORD (1871-1937) die Existenz positiv geladener Atomkerne nachweisen. In seinem berühmten Streuexperiment hatte er Alpha-Teilchen auf eine wenige Mikrometer dicke Goldfolie geschossen<sup>1</sup>.

Dabei beobachtete er, dass die meisten Alpha-Teilchen die Goldfolie völlig unbeeinflusst durchquerten, einige wenige wurden jedoch sehr stark abgelenkt. Rutherford schloss daraus, dass Atome einen kleinen, massiven, positiv geladenen Kern enthalten, der die ebenfalls positiv geladenen Alpha-Teilchen abstößt und so aus ihrer Bahn lenkt. Die negativ geladenen Elektronen mussten sehr viel leichter als die Atomkerne sein, da kein entsprechender Einfluss auf die Alpha-Teilchen nachgewiesen werden konnte.

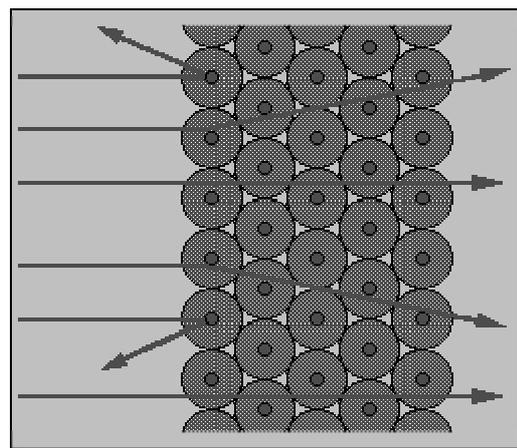


Abb. 35: Schema des Streuversuchs von Rutherford

#### Literatur:

<sup>1</sup> Basiswissen 4, Seite 9

Einführung in die Elementarteilchenphysik: D.J. Griffiths, Akademischer Verlag Berlin 1996  
Die Teilchenjäger: Yuval Ne'eman, Yoram Kirsh, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1995

## Wie erfolgten die SLAC-Experimente, die Ende der Sechziger Jahre zeigten, dass Protonen nicht elementar sind?

Den ersten Hinweis auf eine innere Struktur des Protons lieferten Streuexperimente, die in den Jahren 1967 - 1973 am SLAC (Stanford Linear Accelerator Center) durchgeführt wurden.

In diesen Experimenten wurden die im Linac auf Energien von 20 GeV beschleunigten Elektronen auf die Protonen und Neutronen eines ruhenden Targets geschossen. Erwartungsgemäß durchquerten die meisten Elektronen die Nukleonen, ohne ihre Richtung wesentlich zu ändern. Einige Elektronen wurden jedoch (ähnlich wie in Rutherford's Streuexperiment) unter großen Winkeln gestreut. Dieses Ergebnis ließ darauf schließen, dass kleine geladene Objekte im Inneren der Protonen existieren <sup>[Jac80]</sup>.

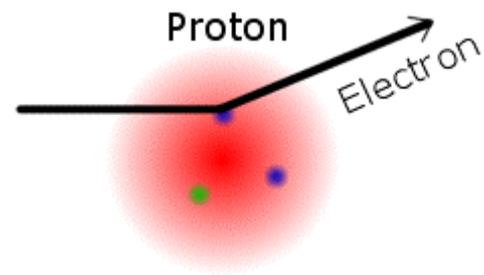


Abb. 36: Schema einer Elektron-Quark-Streuung

Richard Feynman nannte diese Objekte zunächst „Partonen“. Nach vielen weiteren Experimenten stellte sich heraus, dass diese experimentell gefundenen Teilchen und die theoretisch postulierten Quarks identische Eigenschaften aufwiesen, sodass man schließlich die Partonen mit den Quarks identifizierte.

---

### Literatur:

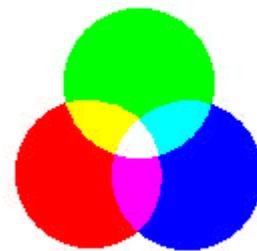
<sup>[Jac80]</sup> M. Jacob, P. Landshoff, Scientific Amerikan. (März 1980)

## Welche Wissenschaftler haben den Quarks Farbe gegeben?

OSKAR W. GREENBERG <sup>[Gre64]</sup> von der Universität von Maryland und die beiden Physiker YOISHIRO NAMBU und MOO-YOUNG HAN <sup>[Han65]</sup> von der Universität Chicago postulierten Mitte der Sechzigerjahre ein weiteres Unterscheidungsmerkmal der Quarks, um die scheinbare Verletzung des Pauli-Prinzips durch einige Hadronen aufzuheben.

Nach MURRAY GELL-MANN <sup>[Gel72]</sup> bezeichnet man die von den drei Physikern eingeführte zusätzliche Ladung der Quarks heute als „Farbladung“ oder einfach „Farbe“ („color“ im Amerikanischen bzw. „colour“ im Englischen).

Jede der sechs Quarkarten (up, down, strange, charm, bottom und top) kann nach ihrer Theorie in den drei Farbladungen **rot**, **grün** und **blau** vorliegen – ihre Antiteilchen tragen die Anti-Farbe **antirot**, **antigrün** oder **antiblau**. In Analogie zur additiven Farbmischung ergibt sich für drei Quarks mit unterschiedlichen Farbladungen in Summe ein farbloser Zustand. Ein Quark mit einer bestimmten Farbladung und ein Antiquark mit der zugehörigen Antifarbladung sind zusammen ebenfalls farbneutral.



Schema der additiven Farbmischung von rot, grün und blau.

---

### Literatur:

<sup>[Gre64]</sup> O.W. Greenberg: Phys. Rev. Lett. **13** 598 (1964)

<sup>[Han65]</sup> M.Y. Han, Y. Nambu: Phys. Rev. **139B** 1006 (1965)

<sup>[Gel72]</sup> M. Gell-Mann: Acta Physica Austriaca, Suppl. **IX** 733 (1972)

Teilchen, Felder und Symmetrien: Quantenfeldtheorie und die Einheit der Naturgesetze, Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft Heidelberg 1988

Elementarteilchenphysik, von den Grundlagen zu den modernen Experimenten: C. Berger, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 2002

Das Quark und der Jaguar: Murray Gell-Mann, R. Piper GmbH & Co. KG München 1994

## Warum gibt es nur acht Gluonen?

Die starke Kraft zwischen den farbigen Quarks wird durch Gluonen (vom englischen Wort „glue“ für Leim) vermittelt <sup>[Bec80]</sup>. Gluonen (g) sind masselos, besitzen den Spin  $s = 1$  und tragen selbst jeweils eine Farbe und eine Antifarbe.

Aus den sechs Farb- und Antifarbladungen lassen sich neun Farb-Antifarbe-Paare bilden:



und



Die ersten sechs Farbkombinationen besitzen eine echte Farbigkeit und können jeweils einem Gluon zugeordnet werden. Die drei Kombinationen aus Farbe und entsprechender Antifarbe sind ebenfalls nicht ganz farbneutral, da sie doch irgendwie an die drei Farben rot, grün und blau gekoppelt sind. Man spricht von einer „verdeckten“ Farbigkeit. Es können jedoch

$r\bar{r} \rightarrow g\bar{g} \rightarrow b\bar{b}$  erfolgen, ohne gegen die Erhaltung der Farbladung zu verstoßen.

Daraus ergeben sich die drei linear unabhängigen Superpositionen:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\sqrt{3}}(\mathbf{r}\bar{r} + \mathbf{g}\bar{g} + \mathbf{b}\bar{b}) \\ & \frac{1}{\sqrt{3}}(\mathbf{r}\bar{r} - \mathbf{g}\bar{g} + \mathbf{b}\bar{b}) \\ & \frac{1}{\sqrt{3}}(\mathbf{r}\bar{r} + \mathbf{g}\bar{g} - \mathbf{b}\bar{b}) \end{aligned}$$

Die erste Kombination ist völlig symmetrisch aus den drei Farbladungen zusammengesetzt und damit gänzlich farbneutral. Sie kann daher – im Unterschied zu den beiden anderen Kombinationen – keinem Austauschteilchen der starken Kraft entsprechen. Den drei Farbkombinationen rot-antirrot, grün-antigrün und blau-antiblaue entsprechen deshalb nur zwei weitere Gluonen.

Alle acht Gluonen sind völlig gleichberechtigt und können auf Grund ihrer eigenen Farbladung auch untereinander stark wechselwirken.

---

### Literatur:

<sup>[Bec80]</sup> P. Becker, M. Böhm, H. Joos: Eichtheorie der starken und elektroschwachen Wechselwirkung, Teubner-Verlag Stuttgart 1981  
Physik, Atome – Atomkerne – Elementarteilchen: H. Hänsel, W. Neumann, Spektrum Akademischer Verlag GmbH Heidelberg Berlin Oxford 1995

## Was geschieht, wenn man ein Meson „auseinanderzieht“?

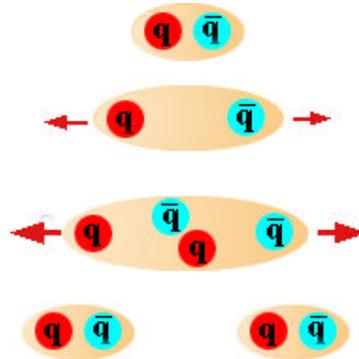


Abb. 37: Schema des Quarkeinschlusses in Mesonen

Versucht man Quark und Antiquark eines Mesons voneinander zu trennen, so wird die dafür benötigte Energie irgendwann so groß, dass ein neues Quark-Antiquark-Paar entstehen kann. Das erzeugte Quark verbindet sich daraufhin mit dem Antiquark des Mesons, das neue Antiquark mit dem ursprünglichen Quark. Anstelle von freien Quarks erhält man daher nur zwei Mesonen.

---

### Literatur:

Einführung in die Elementarteilchenphysik: D.J. Griffiths, Akademischer Verlag, Berlin 1996  
Elementarteilchenphysik, von den Grundlagen zu den modernen Experimenten: C. Berger, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 2002  
Teilchenphysik und Kosmologie: Eine Einführung in Grundlagen und Zusammenhänge: Michael Treichel, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 2000

**Das Alter des Universums ist etwa 14 Milliarden Jahre, das der Erde 4,5. Wie ist es möglich, eine (mittlere) Lebenszeit des Protons von größer als  $10^{32}$  Jahren zu messen?**

**GUT**) ist das Proton nicht stabil, sondern zerfällt nach einer mittleren Lebensdauer von  $10^{30}$  bis  $10^{33}$  Jahren. Das heißt aber nicht, dass man so lange warten muss, um den Zerfall eines Protons beobachten zu können. Protonen können auch viel früher oder viel später zerfallen, da der Zerfallsprozess genauso wie der gewöhnliche radioaktive Zerfall nur einem Wahrscheinlichkeitsgesetz gehorcht. Im Mittel ergeben sich  $10^{30}$  bis  $10^{33}$  Jahre für die Lebensdauer.

In einer großen Ansammlung von Protonen (z. B. viele tausend Tonnen Wasser) sollte man daher bereits nach kurzer Zeit einige wenige Protonzerfälle beobachten können. Nach diesem Prinzip wird derzeit in mehreren großen Experimenten (meist riesige Wassertanks einige hundert Meter unter der Erdoberfläche) nach Protonzerfällen gesucht – bisher ohne Erfolg. Durch den „Nicht-Nachweis“ von Protonzerfällen konnte man zumindest die untere Grenze der mittleren Lebensdauer auf mindestens  $10^{32}$  Jahren anheben.

---

**Literatur:**

Neutrino-Physik: Norbert Schmitz, Teubner-Verlag Stuttgart 1997

Teilchen, Felder und Symmetrien: Spektrum der Wissenschaft: Verständliche Forschung, Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft Heidelberg 1988

## Mit welchen experimentellen Anordnungen wird nach dem Zerfall des Protons gesucht?

Positron und ein neutrales Pion, gesucht. Alle diese Experimente beruhen auf demselben Prinzip: Eine sehr große Menge Material wird überwacht, denn je größer die Masse und damit die Anzahl der Protonen, um so größer ist die Wahrscheinlichkeit einen Zerfall zu beobachten. Die Experimente unterscheiden sich hauptsächlich in Art und Menge des eingesetzten Materials (z. B. Wasser, Beton oder Eisen).

- **Feste Materie-Detektoren**

Bei diesen Experimenten (z. B. NUSEX im Mont-Blanc-Tunnel, Fréjus im Fréjus-Tunnel in Frankreich,...) werden mehrere hundert Tonnen schwere Blöcke aus vielen dünnen Eisen- oder Betonplatten eingesetzt um Protonzerfälle aufzuspüren. Zwischen den Platten befinden sich Proportionalzähler oder Streamerröhren, mit denen sich energiereiche geladene Teilchen, wie sie beim Protonzerfall zu erwarten sind, direkt nachweisen lassen.

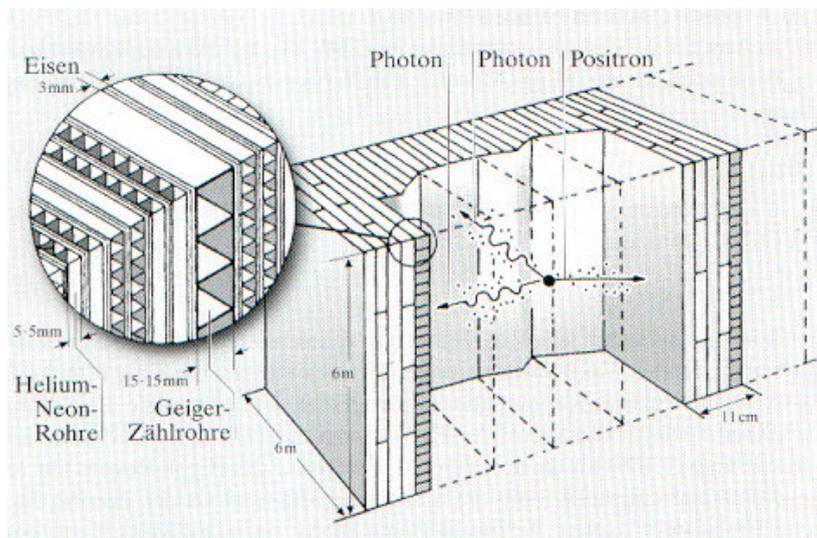


Abb.38: Schema des Fréjus-Detektors zur Suche nach dem Protonzerfall.

- **Wasser-Cerenkov-Detektoren**

Diese Detektoren (z. B. [Super-Kamiokande](#)<sup>1</sup> in Japan [Shi98], IMB in den USA [McG99]) bestehen aus großen Wassertanks, die von tausenden von Photomultipliern umgeben sind. Die Energie, die beim Zerfall des Protons freigesetzt werden müsste, ist so groß, dass die Geschwindigkeit der Zerfallsprodukte die Lichtgeschwindigkeit im Wasser übersteigt. Die neu entstandenen Teilchen emittieren daher Cerenkov-Licht, das von den Photomultipliern aufgezeichnet werden kann.

Starke Wechselwirkung  
Elektroschwach + stark = GUT

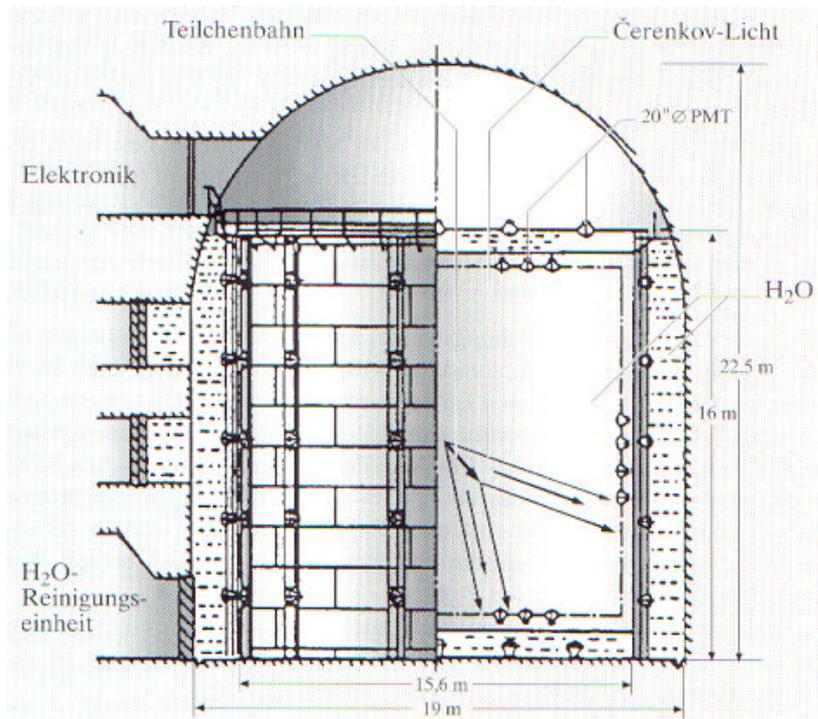


Abb. 39: Schematische Darstellung des Super-Kamiokande-Detektors in Japan.

Um Störsignale durch die kosmische Strahlung möglichst gering zu halten, sind alle diese Experimente tief unter der Erde aufgebaut. Nur Neutrinos und hochenergetische Myonen können die meterdicken Erdschichten über den Detektoren durchdringen und ebenfalls Signale auslösen. Die meisten dieser Detektoren werden daher auch zum Nachweis von Neutrinos eingesetzt.

<sup>1</sup> <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/doc/sk/>

**Literatur :**

<sup>[Shi98]</sup> M. Shiozawa et al. (Super-Kamiokande-Kollaboration) Phys. Rev. Lett. **81** 3319 (1998)

<sup>[McG99]</sup> C. McGrew et al. (IMB-Kollaboration) Phys. Rev. **D 59** 052004 (1999)

Elementarteilchenphysik, von den Grundlagen zu den modernen Experimenten: C. Berger, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 2002

Teilchenastrophysik: Klapdor-Kleingrothaus, Zuber, Teubner-Verlag Stuttgart 1997