

Experimentalphysik Modul PH-EP4 / PH-DP-EP4

Script für Vorlesung 02. Juli 2009

11 Elementarteilchen und die Entstehung des Universums

Nach der Entdeckung des Protons und des Neutrons wurden im zwanzigsten Jahrhundert weitere Elementarteilchen postuliert und mit Hilfe von Teilchenbeschleunigern nachgewiesen. In diesem Kapitel werden die verschiedenen Elementarteilchen im sogenannten *Standardmodell* erklärt und deren Bedeutung für das Urknallmodell und die Entstehung des Universums diskutiert.

11.1 Hadronen und Leptonen

Alle in der Natur auftretenden Kräfte sind auf vier grundlegende Wechselwirkungen (WW) zurückzuführen. In der Stärke abnehmend sind dies:

1. starke (hadronische) Wechselwirkung
2. elektromagnetische Wechselwirkung
3. schwache Wechselwirkung
4. Gravitation

Alle Elementarteilchen unterliegen der Gravitation, aber nur geladene Teilchen der elektromagnetischen WW. Auch der starken und schwachen Kraft unterliegen nur einige Teilchen:

- Teilchen, die stark wechselwirken, heißen **Hadronen**. Dabei unterscheidet man **Baryonen** (Teilchen mit halbzahligem Spin) und **Mesonen** (ganzzahliger Spin). Baryonen sind die schwersten Teilchen (z.B. Protonen und Neutronen), Mesonen sind mittelschwer (zwischen Protonen- und Elektronenmasse).
- Teilchen, die über die starke WW zerfallen, haben Lebenszeiten von 10^{-23} s. In dieser Zeit durchdringt das Licht die Distanz eines Atomkerndurchmessers. Teilchen, die über die schwache WW zerfallen, haben Lebenszeiten von 10^{-10} s.
- Hadronen haben eine komplexe innere Struktur und sind auf **Quarks** aufgebaut.
- **Leptonen** (*leichte Teilchen*) unterliegen der schwachen (aber NICHT der starken!) Kern-WW. Es gibt 6 Leptonen: Elektron und Elektronen-Neutrino, Myon und Myon-Neutrino, Tauon und Tauon-Neutrino. Das 1975 entdeckte Tauon ist jedoch ca. doppelt so schwer wie das Proton. Alle Leptonen sind nach dem heutigen Stand der Forschung Punktteilchen ohne Substruktur und können demnach nicht weiter zerfallen.
- Die Masse der Neutrinos ist vermutlich sehr klein und ungleich Null. Dies ist von unvorstellbarer Bedeutung für die Entwicklung des Universums. Denn selbst eine winzige Neutrinomasse beeinflusst die Expansion des Universums enorm, da es eine unvorstellbar große Zahl von Neutrinos gibt, die in den Sternen bei der Kernfusion emittiert werden. Die Neutrinomasse ist außerdem verantwortlich für die Absprengung der Sternhülle bei

der Supernovaexplosion, da hierbei durch Impulsübertrag der Neutrinos die Sternhülle nach außen vom Sternkern wegbeschleunigt wird.

Tabelle 41.1 Hadronen, die gegenüber einem Zerfall aufgrund der starken Wechselwirkung stabil sind

Name	Symbol	Masse, (MeV/c ²)	Spin, \hbar	Ladung, e	Antiteilchen	Mittlere Lebensdauer, s	Typische Zerfallsprodukte*
Baryonen							
Nukleon	p (Proton)	938,3	1/2	+1	\bar{p}	∞	
	n (Neutron)	939,6	1/2	0	\bar{n}	930	$p + e^- + \bar{\nu}_e$
Lambda	Λ^0	1116	1/2	0	$\bar{\Lambda}^0$	$2,5 \cdot 10^{-10}$	$p + \pi^-$
Sigma**	Σ^+	1189	1/2	+1	$\bar{\Sigma}^-$	$0,8 \cdot 10^{-10}$	$n + \pi^+$
	Σ^0	1193	1/2	0	$\bar{\Sigma}^0$	10^{-20}	$\Lambda^0 + \gamma$
	Σ^-	1197	1/2	-1	$\bar{\Sigma}^+$	$1,7 \cdot 10^{-10}$	$n + \pi^-$
Xi	Ξ^0	1315	1/2	0	$\bar{\Xi}^0$	$3,0 \cdot 10^{-10}$	$\Lambda^0 + \pi^0$
	Ξ^-	1321	1/2	-1	$\bar{\Xi}^+$	$1,7 \cdot 10^{-10}$	$\Lambda^0 + \pi^-$
Omega	Ω^-	1672	3/2	-1	$\bar{\Omega}^+$	$1,3 \cdot 10^{-10}$	$\Xi^0 + \pi^-$
Mesonen							
Pion	π^+	139,6	0	+1	π^-	$2,6 \cdot 10^{-8}$	$\mu^+ + \nu_\mu$
	π^0	135	0	0	π^0	$0,8 \cdot 10^{-16}$	$\gamma + \gamma$
	π^-	139,6	0	-1	π^+	$2,6 \cdot 10^{-8}$	$\mu^- + \bar{\nu}_\mu$
Kaon***	K^+	493,7	0	+1	K^-	$1,24 \cdot 10^{-8}$	$\pi^+ + \pi^0$
	K^0	497,7	0	0	\bar{K}^0	$0,88 \cdot 10^{-10}$	$\pi^+ + \pi^-$
					und		
Eta	η^0	549	0	0	$\bar{\eta}^0$	$5,2 \cdot 10^{-8}$	$\pi^+ + e^- + \bar{\nu}_e$
						$2 \cdot 10^{-19}$	$\gamma + \gamma$

* Für die meisten Teilchen existieren verschiedene Zerfallskanäle.
 ** Σ^0 wurde der Vollständigkeit halber ebenfalls in diese Tabelle aufgenommen, obwohl es über die starke Wechselwirkung zerfällt.
 *** Das K^0 kommt in zwei Varianten mit unterschiedlichen Lebensdauern vor; man nennt sie K^0_{short} und K^0_{long} .

11.2 Spin und Antiteilchen

- Wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln diskutiert wurde, unterscheidet man Teilchen mit halb - und ganzzahligem Spin. Teilchen mit halbzahligem Spin (Elektronen, Protonen, ...) unterliegen dem Pauliprinzip und heißen **Fermionen**. Teilchen mit ganzzahligem Spin (z.B. Mesonen) sind **Bosonen**.
- Fermionen werden in der relativistischen Betrachtung von der Dirac-Gleichung beschrieben, einer Erweiterung der Schrödinger Gleichung. Der Theorie nach gibt es zu jedem Fermion ein Antiteilchen, z.B. das Positron. Dieses Antiteilchen zum Elektron unterscheidet sich von diesem nur durch die positive Ladung e^+ .
- Antiteilchen können nie alleine, sondern nur durch Teilchen-Antiteilchen-Paare erzeugt werden. Z.B. kann aus einem Photon ein Elektron-Positron Paar werden, wenn das Photon eine Energie von $2m_e c^2 \approx 1,02 \text{ MeV}$ besitzt. Das Positron kann nicht zerfallen, dennoch ist seine Lebenszeit kurz, weil es durch ein Zusammentreffen mit einem Elektron wieder vernichtet wird:

$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma. \quad (1)$$

- Das Antiproton (schreibe \bar{p} statt p^-) wurde 1955 durch eine Protonenstrahl Reaktion entdeckt:

$$p + p \rightarrow p + p + p + \bar{p}. \quad (2)$$

Hierbei ist wenigstens die Energie $2m_p c^2 = 1877 \text{ MeV}$ nötig, wobei sich die Protonen mit nahezu gleich großem, aber entgegengesetztem Impuls aufeinander treffen. Im Laborsystem, wobei beim Aufprall ein Proton in Ruhe ist, benötigt man mindestens Energien des einlaufenden Protons von $6m_p c^2 = 5,63 \text{ GeV}$, da wegen der Impulserhaltung nicht die gesamte kinetische Energie in Ruheenergie umgewandelt werden kann.

BEISPIEL 41.1: Proton-Antiproton-Paarvernichtung

Sie haben nun einiges über Kernphysik und die Wechselwirkung von Teilchen erfahren. Eine der Reaktionen, die Sie dabei kennen gelernt haben, ist die Proton-Antiproton-Paarvernichtung, die der Reaktionsgleichung $p^+ + p^- \rightarrow \gamma + \gamma$ gehorcht. Sie haben sich vielleicht schon gefragt, ob die dabei erzeugten Photonen für das menschliche Auge sichtbar sind. Untersuchen Sie diese Fragestellung unter der Annahme, dass sich die beiden Protonen zu Anfang in Ruhe befinden.

IM KONTEXT

Problembeschreibung: Damit die Photonen sichtbar wären, müssten ihre Wellenlängen im Bereich von 400–800 nm liegen. Da sich Proton und Antiproton in Ruhe befinden, folgt aus dem Impulserhaltungssatz, dass die erzeugten Photonen entgegengesetzt gleichen Impuls und damit die gleiche Energie, Frequenz und Wellenlänge besitzen. Der Energieerhaltungssatz erfordert, dass die Gesamtenergie der beiden Photonen gleich der Summe der Ruheenergien des Protons und des Antiprotons ist (jeweils ca. 938 MeV).

Lösung:

1. Setzen Sie die Gesamtenergie der beiden Photonen, $2E_\gamma$, mit der Summe der Ruheenergien des Protons und des Antiprotons gleich, und lösen Sie nach E_γ auf:

$$2E_\gamma = 2m_p c^2 \Rightarrow E_\gamma = m_p c^2 = 938 \text{ MeV}$$

2. Setzen Sie für die Energie des Photons $h\nu = hc/\lambda$ ein und lösen Sie nach der Wellenlänge λ auf:

$$E_\gamma = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$
$$\lambda = \frac{hc}{E_\gamma} = \frac{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{938 \text{ MeV}} = 1,32 \cdot 10^{-6} \text{ nm} = 1,32 \text{ fm}$$

3. Vergleichen Sie diese Wellenlänge mit dem Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichts:

Die erzeugten Photonen liegen *nicht* im sichtbaren Bereich.

Kommentar: Die Wellenlänge der erzeugten Photonen ist um mehr als acht Größenordnungen kleiner als die kürzeste Wellenlänge des sichtbaren Bereichs, die ca. 400 nm beträgt.

11.3 Erhaltungssätze

- Bei allen Reaktionen, die in der Natur stattfinden, müssen neben den bekannten Energie-, Impuls- und Drehimpulserhaltungssätzen auch der Erhalt der Ladungen sichergestellt werden.
- In der Teilchenphysik gibt es zwei weitere Erhaltungssätze: Erhalt der Baryonen- und Leptonenzahl. So muss bei der Erzeugung von Baryonen und Leptonen auch ein entsprechendes Antiteilchen gebildet werden, um die Erhaltungssätze einzuhalten. Hieraus folgt z.B., dass das Proton als leichtestes Baryon nicht weiter zerfallen darf und stabil ist, denn Hardonen zerfallen immer in andere Hadronen.
- Ein Beispiel für den Erhalt der Leptonenzahl ist der β -Zerfall, bei dem ein Anti-Neutrino emittiert wird: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$.
- Einige Erhaltungssätze gelten nur für bestimmte Wechselwirkungen. Wichtig ist die **Selt-samkeit, Strangeness**, die bei der Reaktionen über die starke Kernkraft eine Rolle spielt. Betrachte das Beispiel



Das Proton und das Pion reagieren über die starke Wechselwirkung. Λ^0 und K^0 zerfallen beide in Hadronen: $\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$ und $K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$. Die Zerfallszeiten liegen hierbei allerdings in der Größenordnung von Prozessen der schwachen WW (10^{-10} s) statt, wie zu erwarten, 10^{-23} s. Andere Teilchen zeigen ähnliches Verhalten und heißen deshalb **selt-same Teilchen**. Man findet sie nur als Paar, nie einzeln und schreibt ihnen die Selt-samkeit als eine Eigenschaft zu. Bei Prozessen der starken WW bleibt sie immer erhalten. Bei Prozessen der schwachen WW kann sie hingegen um eins erhöht oder erniedrigt werden (siehe Beispiel).

BEISPIEL 41.2: Welche Erhaltungssätze sind verletzt?

Werden bei den folgenden Zerfällen Erhaltungssätze verletzt? Wenn ja, welche? a) $n \rightarrow p + \pi^-$, b) $\Lambda^0 \rightarrow \bar{p} + \pi^+$ und c) $\mu^- \rightarrow e^- + \gamma$.

Lösung:

Teilaufgabe a

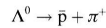
Bei diesem Zerfall treten keine Leptonen auf, die Leptonenzahl bleibt somit erhalten. Die Gesamtladung ist vor und nach dem Zerfall null, bleibt also ebenfalls erhalten. Auch die Baryonenzahl ist vor und nach dem Zerfall gleich, nämlich +1. Die Summe der Ruheenergien des Protons (938,3 MeV) und des Pions (139,6 MeV) ist jedoch größer als die Ruheenergie des Neutrons (939,6 MeV). Der Zerfall verletzt also den Energieerhaltungssatz.



Baryon \rightarrow Baryon + Meson
Energie: $939 < 938 + 139$ (verboten)
Leptonenzahl: $0 = 0 + 0$
Baryonenzahl: $1 = 1 + 0$

Teilaufgabe b

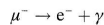
Auch an dieser Reaktion sind keine Leptonen beteiligt, und die Gesamtladung vor und nach dem Zerfall ist null. Die Ruheenergie des Λ^0 -Teilchens (1116 MeV) ist größer als die von Antiproton (938,3 MeV) plus Pion (139,6 MeV); die Energiedifferenz geht in zusätzliche kinetische Energie der Zerfallsprodukte über, so dass die Gesamtenergie erhalten bleibt. Allerdings bleibt die Baryonenzahl nicht erhalten, denn für das Λ^0 ist sie gleich +1, für das Antiproton aber -1.



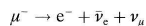
Baryon \rightarrow Antibaryon + Meson
Energie: $1116 > 938 + 139$
Leptonenzahl: $0 = 0 + 0$
Baryonenzahl: $1 \neq -1$ (verboten)

Teilaufgabe c

Diese Reaktion verletzt die Erhaltung der Myon- und Elektron-Leptonenzahl. Das Myon zerfällt aber dennoch, und zwar nach der Reaktion $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$, bei der sowohl die Myon- als auch die Elektron-Leptonenzahl erhalten bleibt.



Lepton \rightarrow Lepton + Photon
Energie: $105,6 > 0,5 + 0$
Leptonenzahl: $1_\mu \neq 1_e + 0$ (verboten)
Baryonenzahl: $0 = 0 + 0$



Lepton \rightarrow Lepton + Antineutrino + Neutrino
Leptonenzahl: $1_\mu = 1_e - 1_c + 1_\mu$

11.4 Quarks

- Nach dem Quark-Modell (1963) bestehen alle Hadronen aus Kombinationen von 3 Quarks, die wiederum elementar, also nicht teilbare Teilchen sind. Mesonen bestehen aus einem Quark und einem Antiquark.
- Man unterscheidet Quarks durch ihre drei verschiedenen **Flavors**: u (up), d (down), s (strange). Die Ladung des u-Quarks beträgt $\frac{2}{3}e$, die des d- und s-Quarks $-\frac{1}{3}e$. Jedes Quark besitzt den Spin $\frac{1}{2}$ und die Baryonenzahl $\frac{1}{3}$. Das u- und d-Quark haben die Seltsamkeit 0, das s-Quark -1. Zu jedem Quark gibt es ein Antiquark mit umgekehrter Ladung, Baryonenzahl und Seltsamkeit.
- Das Proton besteht aus der Quark Kombination uud, das Neutron aus udd. Baryonen mit Seltsamkeit $S = -1$ enthalten ein s-Quark.
- Experimentell kann man die Existenz von Quarks in hochenergetischen Teilchenbeschleunigern mittels tiefinelastischer Streuung nachweisen. Hierbei erfolgt der Beschuss von Atomkernen mit Mesonen oder Hadronen mit Energien zwischen 15-200 GeV.
- Um Diskrepanzen zwischen dem Quark-Modell und den experimentellen Daten zu beseitigen, wurde 1967 ein viertes Quark, das c (**Charm**) eingeführt. Diese Eigenschaft bleibt bei der starken Kern-WW erhalten, bei der schwachen jedoch nicht.
- Durch den Nachweis neuer Mesonen ist eine Erweiterung des Quark-Modells nötig gewesen, so dass 1974 zwei weitere Quarks, t (**top**) und b (**bottom**) vorgeschlagen wurden. Das Top-Quark wurde 1995 nachgewiesen.
- Die sechs Quarks und sechs Leptonen werden als die elementaren Teilchen angesehen, aus denen die gesamte Materie zusammengesetzt ist.

BEISPIEL 41.3: Starke Wechselwirkung, schwache Wechselwirkung oder gar keine Wechselwirkung

Stellen Sie fest, ob die folgenden Zerfälle über die starke oder die schwache Wechselwirkung verlaufen oder gar nicht stattfinden: a) $\Sigma^+ \rightarrow p + \pi^0$, b) $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 + \gamma$, c) $\Xi^0 \rightarrow n + \pi^0$.

Problembeschreibung: Wir stellen zunächst fest, dass die Masse des zerfallenden Teilchens jeweils größer ist als die Summe der Massen der Zerfallsprodukte, so dass alle Prozesse energetisch erlaubt sind. Ferner sind keine Leptonen beteiligt, und Ladung und Baryonenzahl bleiben bei allen Zerfällen erhalten. Ein Zerfall verläuft über die starke Wechselwirkung, wenn die Seltsamkeit erhalten bleibt. Ist $\Delta S = \pm 1$, so verläuft der entsprechende Zerfall über die schwache Wechselwirkung. Ändert sich $|S|$ um mehr als 1, so kann der Prozess gar nicht stattfinden.

Lösung:

Teilaufgabe a

Aus Abbildung 41.3 können wir entnehmen, dass die Seltsamkeit des Σ^+ -Teilchens -1 ist, während Proton und Pion beide die Seltsamkeit 0 haben. Der Zerfall ist somit nur über die schwache Wechselwirkung, nicht aber über die starke Wechselwirkung möglich. Dieser Prozess ist tatsächlich eine der Zerfallsmöglichkeiten des Σ^+ -Teilchens, das eine Lebensdauer in der Größenordnung von 10^{-10} s hat.

$$\Sigma^+ \rightarrow p + \pi^0$$

Baryon \rightarrow Baryon + Meson

$$\text{Baryonenzahl: } 1 = 1 + 0$$

$$\text{Strangeness: } -1 \neq 0 + 0 \text{ (schwacher Zerfall)}$$

$$\text{elektrische Ladung: } e = e + 0$$

Teilaufgabe b

Da sowohl das Σ^0 -Teilchen als auch das Λ^0 -Teilchen eine Seltsamkeit von -1 hat, kann dieser Zerfall über die starke Wechselwirkung erfolgen. In der Tat handelt es sich um den dominanten Zerfallskanal des Σ^0 -Teilchens, wobei die Lebensdauer dieses Teilchens etwa 10^{-20} s beträgt. (Der Begriff *Zerfallskanal* bezeichnet einen möglichen Zerfallsprozess eines Teilchens, wenn mehrere Möglichkeiten für einen Zerfall bestehen.)

$$\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 + \gamma$$

Baryon \rightarrow Baryon + Photon

$$\text{Baryonenzahl: } 1 = 1 + 0$$

$$\text{Strangeness: } -1 = -1 + 0$$

$$\text{elektrische Ladung: } 0 = 0 + 0$$

Teilaufgabe c

Die Seltsamkeit des Ξ^0 -Teilchens beträgt -2 , die von Neutron und Pion hingegen ist 0 . Da sich die Seltsamkeit in einem Prozess nicht um 2 ändern kann, kann dieser Zerfall nicht stattfinden.

$$\Xi^0 \rightarrow n + \pi^0$$

Baryon \rightarrow Baryon + Meson

$$\text{Baryonenzahl: } 1 = 1 + 0$$

$$\text{Strangeness: } -2 \neq 0 + 0 \text{ (verboten)}$$

$$\text{elektrische Ladung: } 0 = 0 + 0$$

- Bisher konnten keine einzelnen, isolierten Quarks beobachtet werden. Man nimmt deshalb an, dass die potenzielle Energie zweier Quarks mit wachsendem Abstand zunimmt, so dass es unmöglich ist sie zu trennen. Aus diesem Grund ist es nicht möglich die einzelnen Quarkmassen exakt zu bestimmen.

Tabelle 41.2 Eigenschaften von Quarks und Antiquarks

Flavour	Spin, \hbar	Ladung, e	Baryonenzahl	Seltsamkeit	Charm	Topness	Bottomness
Quarks							
u (up)	1/2	+2/3	+1/3	0	0	0	0
d (down)	1/2	-1/3	+1/3	0	0	0	0
s (strange)	1/2	-1/3	+1/3	-1	0	0	0
c (charm)	1/2	+2/3	+1/3	0	+1	0	0
t (top)	1/2	+2/3	+1/3	0	0	+1	0
b (bottom)	1/2	-1/3	+1/3	0	0	0	+1
Antiquarks							
\bar{u}	1/2	-2/3	-1/3	0	0	0	0
\bar{d}	1/2	+1/3	-1/3	0	0	0	0
\bar{s}	1/2	+1/3	-1/3	+1	0	0	0
\bar{c}	1/2	-2/3	-1/3	0	-1	0	0
\bar{t}	1/2	-2/3	-1/3	0	0	-1	0
\bar{b}	1/2	+1/3	-1/3	0	0	0	-1

11.5 Feldquanten

- Neben den beschriebenen Elementarteilchen gibt es noch Teilchen mit ganzzahligem Spin (Bosonen), die für die WW zwischen den Leptonen und Quarks verantwortlich sind, die **Feldquanten**. So ist z.B. die elektromagnetische WW beschrieben durch den Austausch virtueller Photonen, die permanent emittiert und absorbiert werden. Nur durch Energiezufuhr werden hieraus reale Photonen, die beobachtet werden können.

Tabelle 41.3 Fundamentale Teilchen und ihre Massen

Teilchen	Masse
Quarks	
u (up)	336 MeV/c ²
d (down)	338 MeV/c ²
s (strange)	540 MeV/c ²
c (charm)	1500 MeV/c ²
t (top)	174 000 MeV/c ²
b (bottom)	4500 MeV/c ²
Leptonen	
e ⁻ (Elektron)	0,511 MeV/c ²
ν _e (Elektron-Neutrino)	< 7 eV/c ²
μ ⁻ (Myon)	105,659 MeV/c ²
ν _μ (Myon-Neutrino)	< 0,27 MeV/c ²
τ ⁻ (Tauon)	1784 MeV/c ²
ν _τ (Tauon-Neutrino)	< 31 MeV/c ²

- Das Feldquant der Gravitation ist das **Graviton**, das zwischen der Masse wechselwirkt, analog zur Ladung bei der elektromagnetischen WW. Das Graviton konnte bisher noch nicht nachgewiesen werden.
- Bei der schwachen WW werden **Vektorbosonen**, W^+ , W^- , B^0 -Bosonen, ausgetauscht.
- Die WW zwischen Quarks wird durch **Gluonen** bestimmt. Die zur starken WW gehörte *Ladung* wird als rot, grün, blau bezeichnet. Die Ladung der starken WW bezeichnet man als Farbladung. Sie wird in der Feldtheorie **Quantenchromodynamik (QCD)** genauer beschrieben.

Tabelle 41.4 Bosonen, die die fundamentalen Wechselwirkungen vermitteln

Wechselwirkung	Boson	Spin, \hbar	Masse	Elektrische Ladung
Starke	Gluon*	1	0	0
Schwache	W^\pm	1	80,22 GeV/c ²	$\pm 1e$
	Z^0	1	91,19 GeV/c ²	0
Elektromagnetische	γ (Photon)	1	0	0
Gravitation	Graviton*	2	0	0

* Noch nicht beobachtet.

11.6 Die Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung

- In der Theorie der elektroschwachen WW werden die elektromagnetische und die schwache WW als eine WW des gleichen Ursprungs angesehen. Bei sehr hohen Energien ($\gg 100$ GeV) soll diese aus Symmetriegründen durch vier Bosonen vermittelt werden: W^+ , W^- , W^0 , B^0 -Bosonen.
- Bei niedrigeren Energien existiert die Symmetrie nicht mehr und die WW zerfällt in die elektromagnetische WW (Photon als Feldquant) und die schwache WW (W^+ , W^- , B^0 -Bosonen als Feldquanten).
- Die Symmetriebrechung wird durch das **Higgs-Feld** mit dem Feldquant, dem **Higgs-Boson** (Ruhemasse: 1 TeV = 10^{12} eV) erzeugt. Man hofft, das Higgs-Teilchen mit Hilfe des LHC (Large Hadron Collider) Beschleunigers am CERN Institut in Genf nachweisen zu können.

11.7 Das Standardmodell

Das Quark-Modell, die Theorie der elektroschwachen WW und die Quantenchromodynamik bilden zusammen das Standardmodell der Elementarteilchen. Viele Aspekte dieses Modells wurden schon angesprochen. Hier eine kurze Zusammenfassung:

- Die fundamentalen Teilchen sind Leptonen und Quarks. Es sind Fermionen
- Die Feldteilchen beschreiben die vier fundamentalen Wechselwirkungen. Sie sind Bosonen. Allgemein spricht man hier von WW zwischen *Ladungen*, wobei dies auch die Masse z.B. für die Gravitation sein kann. Die Ladung der starken WW ist die Farbladung (beachte: Gluonen tragen auch Farbe), die schwache Ladung der Leptonen und Quarks ist der Flavor. Alle Bosonen bis auf das Gluon tragen keine Ladung wie Farbe, Flavor, elektrische Ladung ...
- Das Ergebnis der QCD ist, dass nur farbneutrale Quarkkombinationen erlaubt sind, so ist ein Baryon bestehend aus roter, grüner, blauer Ladung weiß und damit neutral. Mesonen bestehen aus einem Quark einer Farbe und einem Antiquark mit der entsprechenden Antifarbe.
- Angeregte Zustände werden als neue Teilchen betrachtet. So ist z.B. das Δ^+ -Teilchen ein angeregter Zustand des Protons.
- Die starke WW besteht aus zwei Beiträgen: Die Farbwechselwirkung zwischen den Quarks und eine starke Restwechselwirkung. Sie wird verursacht durch den Austausch von Mesonen. Man kann sich die Rest-WW von farbneutralen Nukleonen vorstellen analog zur elektromagnetischen Rest-WW zwischen neutralen Atomen, die zum Entstehen von Bindungen und der Bildung von Molekülen führt.
- Jedes Teilchen des Standardmodells besitzt ein Antiteilchen gleicher Masse aber entgegengesetztem Spin und elektrischer Ladung.

	Gravitation	Schwache	Elektromagnetische	Starke	
				Fundamentale	Restliche
Wirkt auf Teilnehmende Teilchen	Masse Alle	Flavour Quarks, Leptonen	Elektrische Ladung Elektrisch geladene Teilchen	Farbladung Quarks, Gluonen	Hadronen
Vermittlerteilchen	Graviton	W^\pm, Z	γ	Gluonen	Mesonen
Kraft auf zwei Quarks im Abstand von 10^{-18} m*	10^{-41}	0,8	1	25	-
Kraft auf zwei Protonen im Kern*	10^{-36}	10^{-7}	1	-	20

* Stärke relativ zur elektromagnetischen Kraft.

11.7.1 Große vereinheitlichte Theorien

- Nach der Vereinheitlichung der elektromagnetischen Kraft mit der schwachen WW versucht man nun diese mit der starken Kernkraft zu vereinheitlichen. Hierbei werden Leptonen und Quarks als zwei Manifestationen einer einzigen Teilchenklasse betrachtet. Die können dabei unter bestimmten Umständen ineinander umgewandelt werden, was eine Verletzung der Baryonen- und Leptonenzahl bedeuten würden.

- Diese Theorie sagt voraus, dass das Proton instabil ist und nach einer Lebensdauer von 10^{32} Jahren zerfällt. Dies konnte bisher nicht nachgewiesen werden. So versucht man nun in großen Detektoren mit sehr vielen Protonen solch einen Zerfall zu beobachten.

11.8 Die Entwicklung des Universums

- Nach dem mehrheitlich anerkannten Modell zur Entstehung des Universums begann alles mit dem Urknall. Danach vergrößerte sich das Universum (Inflation). Der erste Beweis für die Ausdehnung gelang E. P. Hubble. Er beobachtete die Rotverschiebung des Lichts, das von Spiralgalaxien ausgesandt wurde.
- Die Rotverschiebung beruht auf dem Doppler-Effekt und beschreibt die Fluchtgeschwindigkeit der Galaxie und ihrem Abstand von der Erde: $v = H r$. H ist die Hubble-Konstante, die direkt aus der Rotverschiebung berechnet werden kann, wobei sie stark von der Entfernungskalibrierung bei der Vermessung des Universums abhängt. Heute nimmt man folgenden Wert an: $H = \frac{23 \text{ km/s}}{10^6 \text{ Lj}}$.
- Das Hubble-Gesetz sagt, dass alle Galaxien sich von der Erde wegbewegen und mit größerer Entfernung schneller werden. Alle Galaxien bewegen sich demnach mit einer Geschwindigkeit von 23 km pro 10^6 Lichtjahre Entfernung voneinander fort und das Universum dehnt sich aus.
- $1/H$ ist die Hubble-Zeit. Sie ist $1,3 \cdot 10^{10}$ Jahre und entspräche dem Alter des Universums, wenn es keine WW durch Gravitation geben würde.

11.8.1 Die kosmische 2,7-K-Hintergrundstrahlung

- Bei der Elementenhäufigkeit, wie sie in allen Himmelkörpern zu finden ist, fällt auf, dass mehr Helium zu finden ist als für die Lebensdauer des Universums zu erwarten ist. Man geht also davon aus, dass beim Urknall so heiße Temperaturen aufgetreten sind, dass hierbei Helium gebildet werden konnte.
- Diese Temperatur impliziert ein zugehöriges Strahlungsfeld ähnlich eines schwarzen Strahlers, der sich bei Expansion weiter abkühlt. Theoretischen Überlegungen nach müsste heute ein Strahlungsfeld der Temperatur von ca. 3 K existieren (Schwarzkörperspektrum im Mikrowellenlängenbereich). 1965 konnte diese Strahlung nachgewiesen werden. Sie beträgt $2,7 \pm 0,1$ K und ist homogen über das gesamte Universum verteilt.

11.8.2 Der Urknall

- Der Urknall stellt eine Singularität dar, bei der alle vier Wechselwirkungen vereint waren. Bisher konnte jedoch keine Theorie etabliert werden, die die elektroschwache WW und die starke WW mit der Gravitation vereinheitlicht. Somit bleibt unklar, was bis zur Entkopplung der Gravitation, 10^{-43} s nach dem Urknall, passiert ist. Hierbei war die mittlere Temperatur des Universums 10^{32} K und die Energie der erzeugten Teilchen 10^{19} GeV.
- Beim weiteren Abkühlen, als die drei Kräfte noch vereint waren und Leptonen und Quarks ununterscheidbar waren, stellte sich ein leichter Überfluss von Quarks gegenüber Anti-quarks ein: $(10^9 + 1) : 10^9$. Diese Differenz gibt den Ausschlag dafür, dass das Universum heute in der bekannten Form existieren kann.
- Nach 10^{-35} s war das Universum abgekühlt auf 10^{27} K und die starke Kernkraft wurde abgekoppelt. Hadronen wurden gebildet (Hadronenzeit).

- Nach weiteren 10^{-6} s war das Universum auf 10^{13} K abgekühlt und die meisten Hadronen waren durch Teilchen-/Antiteilchen Vernichtung wieder verschwunden, denn bei dieser Temperatur können gerade Hadron/Antihadron-Paare aus Photonen gebildet werden: $\gamma \rightarrow p + \bar{p}$ und $\gamma \rightarrow n + \bar{n}$. Die Annihilation war allerdings nicht vollständig durch den Quarküberschuss im Vergleich zu den Antiquarks.
- Bei $t = 10^{-4}$ s war die Anzahl an Photonen ungefähr gleich der Anzahl der Leptonen (Leptonenära).
- Bei $t = 10$ s und einer Energie von $k_B T \approx 1$ MeV ($T = 10^{10}$ K) reichte die Energie nicht mehr zur Bildung von Elektron-Positron-Paaren. Durch Annihilation verschwanden alle Positronen und es gab einen Elektronenüberschuss. Es waren nun hauptsächlich Photonen und Neutrinos vorhanden (Strahlungsära).
- Durch Expansion fiel die Temperatur innerhalb weniger Minuten soweit ab, dass Fusion von Protonen und Neutronen zu stabilen Atomkernen möglich wurde (Nukleosynthese). Es bildeten sich Kerne des Deuteriums, Heliums und des Lithiums. Schwerere Elemente wurden nicht gebildet, da die Temperatur nicht ausreichte.
- Lange Zeit später, als Temperaturen von 3000 K herrschten und das Universum so groß war wie 1/1000 der heutigen Größe, fiel die Energie ($k_B T$) unter die typischen atomaren Ionisierungsenergie und es bildeten sich Atome. Zu dieser Zeit hatte sich die Energie so weit zum Rot verschoben, dass die gesamte im Universum vorhandene Strahlungsenergie in etwa gleich der Energie der im Universum vorhandenen Masse war.
- Nach weiterer Expansion ist heute ($t = 10^{10}$ Jahre) die Strahlung so weit zum Rot verschoben, dass die Materie die 2,7 K-Strahlung um etwa das 1000fache übersteigt.