Eigenschaften der Elementarteilchen

Fermionen (Spin 1/2)–Materie

Leptonen					
	Symbol	Masse	el. Ladung	Entdeckung
1	ν_e	$< 2.2(0.4)$ eV	0	Cowan, Reines 1956 (inverser β-Zerfall)
	e^-	0.5110 MeV	-1	Kathodenstrahlen vor 1900 (Positron 1932)
2	ν_μ	< 0.19 MeV	0	Ledermann, Schwartz, Steinberger 1962
	μ^-	105.7 MeV	-1	Kosmische Strahlung 1936
3	ν_τ	< 18.2 MeV	0	DONUT Experiment (FNAL) 1997-2000
	τ^-	1777 MeV	-1	M. Perl et al. (MARK I Exp.) 1975

Review of Particle Properties: http://pdg.lbl.gov

Quarks				
	Symbol	Masse	el. Ladung	Entdeckung
1	d	~ 5 MeV	$-1/3$	~ 1964
	u	~ 7 MeV	$+2/3$	~ 1964
2	s	~ 150 MeV	$-1/3$	~ 1964
	c	~ 1.4 GeV	$+2/3$	Richter et al. (SLAC), Ting et al. (BNL) 1974
3	b	~ 4.5 GeV	$-1/3$	Lederman et al. (FNAL) 1977
	t	174 GeV	$+2/3$	CDF-, D0-Experimente (FNAL) 1994

Strangeness-Quantenzahl:
Assozierte Produktion von Kaonen, 1953.

SU(3)-flavour-Symmetrie: 1961.

Quarkmodell: Gell-Mann, Zweig 1964.

Substruktur der Hadronen (Partonen):
Hofstadter et al., Friedman, Kendall, Turner et al. (SLAC), 1969.

Review of Particle Properties: http://pdg.lbl.gov

Konvention: $\hbar = c = 1$

Bosonen–Vermittler der Wechselwirkungen

Kraft	rel. Stärke	wirkt auf	vermittelt durch	Theorie
Starke WW	1	Quarks und Gluonen (mit Farbladungen)	8 Gluonen g (masselos, Spin 1)	Quantenchromo-dynamik (QCD)
Elektro-magnet. WW	10^{-3}	elektrisch geladene Teilchen	Photon γ (masselos, Spin 1)	Quantenelektro-dynamik (QED)
Schwache WW	10^{-5}	Quarks, Leptonen (außer ν_R), $W^{\pm}$, Z^0	W^+, W^-, Z^0 (massiv, Spin 1)	Quantenflavour-dynamik (QFD), GSW-Theorie
Gravitation	10^{-38}	alle Teilchen	Graviton (masselos, Spin 2)	Allgemeine Relativitäts-theorie (ART)

Keine konsistenten Quantenfeldtheorien (QFT) für Punktteilchen mit Spin größer als 1.

Für wechselwirkende Teilchen bis Spin 1 nur genau in der Form von Feldtheorien mit lokaler Eichinvarianz (Eichfeldtheorien).

Spin 0-Bosonen (Higgsboson)–Vermittler der Teilchenruhemassen

Wechselwirkungen

• Die Wechselwirkungen der fundamentalen Teilchen werden durch Austausch von Feldquanten beschrieben nach dem Vorbild der Quantenelektrodynamik (QED), die die Wechselwirkung elektrisch geladener Teilchen mit Photonen beschreibt (quantenmechanische Formulierung der Maxwell Gleichungen der Elektrodynamik).

Die QED wurde in den 30-er Jahren entwickelt. Sie ist die erste und war bis Anfang der 70-er Jahre einzige konsistente (renormierbare) Quantenfeldtheorie (QFT). Die konsistente störungstheoretische Berechnung physikalischer Observabler in der QED wurde erst nach dem 2. Weltkrieg in den 40-er Jahren mit dem Renormierungsprogramm verstanden (Feynman, Schwinger, Tomonaga et al. 1949).

Seitdem hat die QED genauere Vorhersagen physikalischer Observabler ermöglicht als jede andere Theorie, z.B. Lamb shift, anomales magnetisches Moment des Elektrons. Die QED ist eine (Abel'sche) Eichfeldtheorie mit der kommutativen lokalen Eichsymmetriegruppe $U(1)$. Das Photon ist masselos aufgrund der Eichsymmetrie.

Die schwache Wechselwirkung

- Eine Theorie der schwachen Wechselwirkung wurde zuerst von E. Fermi 1933 in Form einer 4-Fermion-Punktwechselwirkung zur Beschreibung des radioaktiven β-Zerfalls formuliert. Vorbild war die QED. Die schwache Wechselwirkung legt die Ordnung der Leptonen und Quarks in Paaren in jeder Generation nahe, zwischen denen die (geladenen) schwachen Übergänge stattfinden (Universalität der schwachen Wechselwirkung).

Falls Austauschteilchen der schwachen Wechselwirkung, wie das Photon der QED, existierten (Schwinger, Sudarshan, Marshak, Gell-Mann, Feynman 1957), mußten sie wegen der kurzen Reichweite der schwachen Wechselwirkung (begrenzt auf de Atomkern) sehr schwer sein (bis 1965 Masse > 2 GeV), nach der Unschärferelation:

$$\Delta r = \Delta t \leq \frac{\hbar}{\Delta E} \leq \frac{\hbar}{M}.$$

Die erwarteten schweren, geladenen Austauschteilchen W^+ und W^- wurden 1983 durch die Experimente UA1 und UA2 am 270 GeV $p\bar{p}$-Speicherring SPS am CERN (C. Rubbia, S. van der Meer) entdeckt:

$$\begin{aligned} M_W &= 80.419 \pm 0.056 \; GeV, \\ M_Z &= 91.1882 \pm 0.0022 \; GeV. \end{aligned}$$

(aktuelle Präzisionsmessungen am e^+e^--Speicherring LEP am CERN und am $p\bar{p}$-Speicherring TEVATRON am Fermi National Laboratory, FNAL).

Das neutrale Z^0-Boson vermittelt die schwache sog. neutrale Stromwechselwirkung (im Gegensatz zu den geladenen Strömen beim β-Zerfall), die 1973 bei Neutrino-Streuung in einer Blasenkammer am CERN entdeckt wurde.

Eine konsistente Feldtheorie mit schweren Feldquanten mit Spin 1 (Vektormesonen) existierte nicht bis zur Einführung der Vereinheitlichten Theorie der elektromagnetischen und schwachen Wechselwirkung 1967/68 durch S. Glashow, A. Salam und S. Weinberg. Dabei handelt es sich um eine lokale Eichfeldtheorie nach dem Muster der QED mit der Eichsymmetriegruppe $SU(2)_W \times U(1)$.

Teilchenmassen und schwache Wechselwirkung

- Massen der Fermionen und Eichbosonen konnten eichinvariant nur durch den sog. Higgs-Mechanismus mit spontaner Eichsymmetriebrechung eingeführt werden. Die GSW-Theorie sagt das Z^0-Eichboson und das neutrale Higgsboson H mit Spin 0 voraus.

Das Higgsboson ist das einzige Teilchen der Theorie, das noch nicht direkt nachgewiesen werden konnte, da seine Masse größer ist als 113 GeV. Erste schwache Anzeichen für sein Auftreten wurden möglicherweise in diesem Jahr am e^+e^--Speicherring LEP am CERN gefunden. Die experimentellen Daten zur schwachen Wechselwirkung, vor allem vom LEP-Speicherring am CERN, verlangen eine Higgsbosonmasse kleiner als 215 GeV.

1971 wurde von G. t'Hooft und M. Veltman gezeigt, daß die GSW-Theorie wie die QED renormierbar, d.h. störungstheoretisch berechenbar ist. Vollständig (d.h. ohne sog. Anomalien bei der Quantisierung) ist dies nur möglich, wenn es zu jedem Leptonpaar in jeder Generation ein Quarkpaar in jeweils 3 Farben gibt.

Lokale Eichfeldtheorien mit oder ohne spontane Symmetriebrechung sind renormierbar durch Aufhebung von Divergenzen in höherer Ordnung der Störungstheorie aufgrund der Eichsymmetrie. Nicht-Abelsche Eichtheorien

(Yang-Mills-Theorien) mit nicht-kommutativer Eichsymmetriegruppe wurden 1954 durch Yang und Mills eingeführt.

Der Higgs-Mechanismus der spontanen Eichsymmetriebrechung zur Erzeugung der Teilchenmassen in Eichfeldtheorien wurde 1964 durch P. Higgs, F. Englert, R. Brout vorgeschlagen.

Symmetrieverletzungen durch die schwache Wechselwirkung

- Durch die schwache Wechselwirkung werden die Paritätssymmetrie P (Lee, Yang 1956, Wu 1957) und die Ladungskonjugationssymmetrie C maximal verletzt ($V-A$-Theorie der schwachen Wechselwirkung von Sudarshan, Marshak, Gell-Mann, Feynman 1957; nur linkshändige Neutrinos an der schwachen Wechselwirkung beteiligt).

1964 wurde auch eine leichte Verletzung der CP-Symmetrie und damit der Zeitumkehrinvarianz in schwachen K^0-Zerfällen beobachtet (Cronin, Fitch, Turlay et al.).

Der Nachweis, daß dafür die schwache Wechselwirkung und nicht eine neue superschwache Wechselwirkung verantwortlich ist, gelang erst endgültig 1999 am CERN und FNAL. Danach liegt der Ursprung der CP-Verletzung bei der schwachen Wechselwirkung in den Details der Wechselwirkung des Higgsbosons mit der Materie.

Die starke Wechselwirkung

• Die starke Wechselwirkung wirkt auf alle Teilchen mit Farbladungen, die 6 Quarks (je 3 Farben) und 8 Gluonen (8 Farbpaare, Farbladungen).

Die flavour-Symmetrie $SU(3)_F$ der Hadronen, Mesonen (Bosonen) und Baryonen (Fermionen), d.h. nicht Leptonen und Photonen, und ihre Einordnung in Multipletts der $SU(3)_F$-Symmetriegruppe wurde nach der Entdeckung der seltsamen Teilchen ab 1961 als Erweiterung der Isospinsymmetrie erkannt.

Dieses Symmetriekonzept führte zum Quarkmodell, das 1964 von Gell-Mann und Zweig vorgeschlagen wurde. Quarks besitzen drittelzahlige elektrische Ladungen und existieren nicht als freie Teilchen.

Die Farbquantenzahlen der Quarks als Ladungen einer (globalen) Eichsymmetriegruppe $SU(3)_C$ wurden 1965 eingeführt, um z.B. die antisymmetrische Wellenfunktion für das Δ^{++}-Baryon mit Spin-Parität $J^P = \frac{3}{2}^+$, $L = 0$ und Quarkzusammensetzung $(u \uparrow u \uparrow u \uparrow)$ zu erklären. Antiquarks tragen Antifarben.

Baryonen (qqq) und Mesonen $(q\bar{q})$ sind danach farblose Bindungszustände von Quarks. Die drei verschiedenen Farben ('rot', 'grün', 'blau') und Farben- und Antifarbenpaare kompensieren sich.

Die Farbladungen sind der Ursprung der starken Kraft zwischen Quarks. Die starke Wechselwirkung zwischen Hadronen, einschließlich der Kernkräfte, sind eine Restwechselwirkung der Quarkbindungskräfte (wie die van der Waals-Kräfte zwischen Molekülen).

Eine Eichfeldtheorie der starken Farbwechselwirkung mit lokaler Eichsymmetrie $SU(3)_C$ wurde ab 1973 formuliert (M. Gell-Mann, H. Fritsch u.a.), die Quantenchromodynamik (QCD) nach dem Vorbild er QED und der elektroschwachen Wechselwirkung.

Zum ersten Mal existiert eine renormierbare Theorie der starken Wechselwirkung. Die Austauschteilchen, 8 masselose Gluonen, werden durch die Eichsymmetrie festgelegt und besitzen ebenfalls Farbladungen, so daß sie stark wechselwirken und nicht als freie Teilchen vorkommen.

Die Selbstwechselwirkung der Gluonen führt zur unauflösbaren Bindung der farbgeladenen Teilchen in den Hadronen (Confinement). Innerhalb der Hadronen bewegen sich die Quarks und Gluonen wie freie Teilchen (Asympthotische Freiheit, störungstheoretisch berechenbar).

Beim Versuch die Bindung aufzubrechen (in Streuexperimenten bei hohen Teilchenenergien), entstehen neue Quark-Antiquarkpaare, die in Hadronen gebunden werden (Fragmentation). Dabei entstehen gebündelte sog. Hadronjets, die experimentell nachgewiesen wurden (erstmals am e^+e^--Speicherring SPEAR am SLAC 1975).

Auch hochenergetische Gluonen, die von Quarks abgestrahlt werden, fragmentieren in Hadronjets. Die Gluonjets wurden erstmals 1979 am e^+e^--Speicherring PETRA am DESY nachgewiesen wurden. Quark- und Gluonjets werden werden heute in großer Zahl und eindeutig in den Hochenergiebeschleunigern LEP (e^+e^-) und TEVATRON ($p\bar{p}$) erzeugt.

Vereinheitlichung der Wechselwirkungen?

• Nach der Einführung der GSW-Theorie und der QCD lassen sich alle fundamentalen Kräfte durch renormierbare lokale Eichfeldtheorien beschreiben, dem Standardmodell der Teilchenphysik. Keine physikalische Theorie wurde genauer überprüft als das Standardmodell. Bisher wurden keine Abweichungen gefunden.

Sofort nach der Entdeckung der QCD wurden Vereinheitlichungen der drei Kräfte in einer übergeordneten größeren Eichsymmetriegruppe vorgeschlagen, z.B. $SU(5)$, $SO(10)$, etc. Die minimale einbettende Gruppe des Standardmodells ist $SU(5)$. Diese sog. Grand Unified Theories (GUT) sagen zusätzliche, sehr schwere Eichbosonen mit sowohl elektroschwachen als auch Farbladungen voraus. Die neuen Wechselwirkungen führen u.a. zum Zerfall des Protons, der bisher nicht experimentell gefunden wurde, was die möglichen Theorien einschränkt.

Die GUT-Eichsymmetrien müssen bei den Energien heutiger Beschleuniger spontan gebrochen sein nach dem Vorbild des Higgs-Mechanismus' des Standardmodells. Sie sind nur bei den hohen Teilchenergien ($> 10^{15}$ GeV) in der heißen Frühzeit des Universums kurz nach dem Urknall realisiert und werden in einer Reihe von Phasenübergängen bei der Expansion und dem Abkühlen des Universums spontan gebrochen.

Die GUT-Theorien vereinheitlichen auch Quarks und Leptonen in den Multipletts der übergeordneten Eichsymmetrie. Damit wird die Kombination der Quarks und Leptonen pro Familie und die Quantisierung der elektrischen Ladung erklärt.

Die Gravitationswechselwirkung wird ebenfalls durch eine Eichfeldtheorie, die Allgemeine Relativitätstheorie (Einstein 1915), beschrieben. Bisher konnte allerdings keine konsistente (renormierbare) Quantengravitationstheorie gefunden werden.

Die Gravitationskraft wird erst stark bei großen Massenansammlungen (siehe schwarze Löcher) und ist verantwortlich für die Entwicklung des Universums. Für die Elementarteilchen spielt die Gravitation erst eine bei den höchsten möglichen Energien, der Planckenergie (10^{19} GeV), bzw. den kleinsten möglichen Abständen, der Planck-Länge (10^{-33} cm), bei denen die Gravitation und die Raum-Zeit quantisiert verstanden werden muß.

Im Rahmen der Superstringtheorie kann möglicherweise eine Quantentheorie der Gravitation und eine Vereinheitlichung mit den übrigen Wechselwirkungen gefunden werden.

Vereinheitlichung von Teilchen und Wechselwirkungen

- Fermionen und Bosonen werden durch die sog. Supersymmetrie (SUSY) miteinander verknüpft (seit 1974), die eine Erweiterung der Symmetrien der Raum-Zeit, der Lorentzinvarianz, darstellt.

Damit sind Materiebausteine (Spin 1/2), Austauschteilchen (Spin 1) und Higgsteilchen (Spin 0) durch ein Symmetrieprinzip verbunden. Bei derzeitigen Beschleunigerenergien ist die Supersymmetrie (spontan) gebrochen, da nicht alle Teilchen gleiche Massen besitzen.

Die supersymmetrischen Partner der bisher gefundenen, relativ leichten Elementarteilchen besitzen deutlich größere Massen zwischen 100 GeV und 1000 GeV. Dazu gehören auch weitere Higgs-Teilchen. Die SUSY-Teilchen sollen beim nächsten großen pp-Speicherring am CERN, dem Large Hadron Collider (LHC) gefunden werden, der zur Zeit im LEP-Tunnel gebaut wird.

Das leichteste und damit stabile SUSY-Teilchen ist ein guter Kandidat für die fehlende Dunkle Materie im Weltall.

Die Supersymmetrie hilft bei der Vereinheitlichung der Kräfte und stabilisiert die Selbstwechselwirkung der Higgsbosonen. Supersymmetrische Erweiterungen des Standardmodells sind renormierbar.

Eichfeldtheorien mit lokaler Supersymmetrie verbinden die inneren Quantenzahlen der Elementarteilchen mit den Symmetrien der Raum-Zeit und damit der Gravitation (allerdings nur bei mehr als 3 Raumdimensionen und bisher nicht renormierbar).

Eigenschaften der fundamentalen Wechselwirkungen

Wechsel-wirkungen	Theorie	Eichsymmetrie-gruppe	Eichbosonen (Vermittler)	erhaltene Ladungen	Entdeckung
Elektro-magnetische	QED	$U(1)$	Photon (γ)	elektrische Ladung	Maxwell: 1864 Einstein: 1905 QFT: ab 1930
Elektro-schwache	QFD (GSW)	$SU(2) \times U(1)$	$W^\pm$, Z^0, γ	schwacher Isospin (3 Ladungen), el. Ladung	GSW: 1968
Starke	QCD	$SU(3)$	8 Gluonen (g_i)	8 Farbladungen	1973
Vereinheit-lichte	GUT	$SU(5)$, $SO(10)$,...	zusätzliche Eichbosonen	zusätzliche Ladungen	ab 1973
Gravitation	ART	allgemeine lokale Koordinatentransf.	Graviton	Masse Energie	Einstein: 1915

Alle Theorien sind lorentzinvariant (relativistische Feldtheorien).

Teilchen und Ladungen im Standardmodell

Teilchen	Spin	Elektr. Ladung Q	Schwacher Isospin $(I,\ I_z)$	Farbe
ν_{eL}	1/2	0	$(1/2,\ +1/2)$	0
e^-	1/2	-1	$(1/2,\ -1/2)$	0
$\nu_{\mu L}$	1/2	0	$(1/2,\ +1/2)$	0
μ^-	1/2	-1	$(1/2,\ -1/2)$	0
$\nu_{\tau L}$	1/2	0	$(1/2,\ +1/2)$	0
τ^-	1/2	-1	$(1/2,\ -1/2)$	0
u	1/2	$+2/3$	$(1/2,\ +1/2)$	r, g, b
d	1/2	$-1/3$	$(1/2,\ -1/2)$	r, g, b
c	1/2	$+2/3$	$(1/2,\ +1/2)$	r, g, b
s	1/2	$-1/3$	$(1/2,\ -1/2)$	r, g, b
t	1/2	$+2/3$	$(1/2,\ +1/2)$	r, g, b
b	1/2	$-1/3$	$(1/2,\ -1/2)$	r, g, b
ν_{eR}	1/2	0	0	0
$\nu_{\mu R}$	1/2	0	0	0
$\nu_{\tau R}$	1/2	0	0	0
γ	1	0	(0, 0)	0
Z^0	1	0	(0, 0)	0
W^-	1	-1	$(1,\ -1)$	0
Gluonen	1	0	(0, 0)	$g\bar{r},\ r\bar{b},\ b\bar{g},$ $r\bar{g},\ b\bar{r},\ g\bar{b},$ $r\bar{r} - g\bar{g},$ $r\bar{r} + g\bar{g} - 2b\bar{b}$
Higgs H	0	0	$(1/2, -1/2)$	0