

# Der Urknall und seine Teilchen- Das Standardmodell

Handout zum Vortrag am 6.5.2011 von Michael Kech

## 1. Die Teilchen des Standardmodells

Die an Beschleunigern entdeckten Teilchen ließen aufgrund ihrer Eigenschaften zunächst in zwei Kategorien einteilen. Den leichten Leptonen und den schweren Hadronen. Bei Hadronen unterschied man zwischen Baryonen, die Fermionen mit großer Ruhemasse sind, und Mesonen, die Bosonen sind, deren Massen zwischen denen der Leptonen und Baryonen liegen. Alle entdeckten Hadronen ließen sich anhand ihrer Eigenschaften in Multiplets zusammenfassen. Die Analyse dieser Multiplets, zeigt dass diesen näherungsweise SU(3)-Symmetrie zugrunde liegt. Man konnte alle bis dahin entdeckten Hadronen als Zustände, die aus drei fundamentalen Teilchen, dem up, down und strange Quarks, aufgebaut sind, verstehen. Mesonen bestehen aus einem Quark-Antiquark-Paar und Baryonen bestehen aus drei Quarks. Durch Experimente bei höheren Energien wurden Teilchen entdeckt, die es erforderten diese Familie noch um das charm, bottom und top zu erweitern.

Flavour	EM-Ladung	Spin	$mc^2$ in Mev	Generation
d (down)	- 1/3	1/2	( 3-7)	1
u (up)	2/3	1/2	(1,5-3)	1
s (strange)	- 1/3	1/2	95±25	2
c (charm)	2/3	1/2	1250±90	2
b (bottom)	- 1/3	1/2	4200±70	3
t (top)	2/3	1/2	173000±1900	3

Die Quarks lassen sich in drei Generationen, die jeweils eine Dubletstruktur aufweisen, zusammenfassen. Die Eigenschaften der Teilchen innerhalb einer Generation stimmen bis auf die Massen genau mit denen aus den anderen Generationen überein. Zu jedem Quark gibt es ein zugehöriges Anti-Quark mit konjugierter Ladung. Vor allem die Massen des d und u sind nur schwer zu bestimmen, da Quarks nie frei sondern nur in gebundenen Zuständen auftreten. Diese Zustände sind aber so hochenergetisch, dass die Ruhemassen dieser Quarks kaum zum Tragen kommt und damit auch schwer zu bestimmen sind.

Leptonen	EM-Ladung	Spin	$mc^2$ in Mev	Generation
e (Elektron)	-1	1/2	0,511	1
$\nu_e$ (e-Neutrino)	0	1/2	>0,0000002	1
$\mu$ (Muon)	-1	1/2	105,66	2
$\nu_\mu$ ( $\mu$ -Neutrino)	0	1/2	>0,19	2
$\tau$ (Tauon)	-1	1/2	1777	3
$\nu_\tau$ ( $\tau$ -Neutrino)	0	1/2	>18,2	3

Zusätzlich gibt es noch die Leptonen, die sich genau wie die Quarks in Generationen mit ,bis auf die Massen, gleichen Eigenschaften einteilen lassen. Die sehr kleinen Massen der Neutrinos sind nur äußerst schwer zu bestimmen und es existiert nur eine obere Schranke für deren Abschätzung.

## 2. Die fundamentalen Wechselwirkungen

Die Gravitation gehört auch zu den grundlegenden Wechselwirkungen wird hier aber nicht behandelt, da sie im Standardmodell nicht enthalten ist.

### 2.1 Quantenelektrodynamik

Die Theorie der elektromagnetischen Wechselwirkung begann mit der Vereinigung der Elektrizität und des Magnetismus zum Elektromagnetismus, der sich durch Maxwells Gleichungen beschreiben lässt. Diese Gleichungen liefern eine klassische feldtheoretische Beschreibung der elektromagnetischen Wechselwirkung und sind lorentzinvariant, berücksichtigen also bereits die endliche Ausbreitung der Wirkung. Auch eine Quantentheorie des Elektromagnetismus sollte feldtheoretisch sein, da die Wahrscheinlichkeitsinterpretation der Wellenfunktionen, wie in der nichtrelativistischen Quantenmechanik, mit der Möglichkeit Teilchen zu erzeugen und zu vernichten nur schwer zu vereinen ist. Damit lagen die grundlegenden Gleichungen der Quantenelektrodynamik bereits vor, die Aufgabe bestand nun darin diese zu quantisieren. Dies gelang, indem der Hamiltonoperator der elektromagnetischen Wechselwirkung als Summe unendlich vieler quantenmechanischer Oszillatoren verstanden wurde.

Feynman-Diagramme sind eine sehr geschickte Darstellung der störungstheoretischen Behandlung der Quantenelektrodynamik. Anhand der Feynman-Diagrammen lassen sich Wirkungsquerschnitte und Lebensdauern nach einfachen Regeln direkt berechnen.

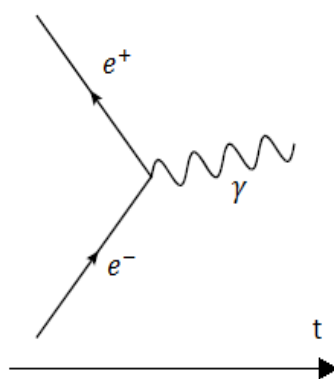


Abbildung 1 primitiver Vertex der QED

Jeder elektrodynamische Prozess lässt sich auch folgenden primitiven Vertex reduzieren:

Dieser Vertex ist dabei folgendermaßen zu interpretieren: In Horizontaler Richtung verläuft die Zeit, die vertikale Richtung kann als Ort aufgefasst werden. Die durchgezogenen Linien mit einem Pfeil symbolisieren ein Fermion. Ein Pfeil der in Richtung der Zeit verläuft steht für ein Teilchen, ein Pfeil der entgegen der Zeit läuft für ein Anti-Teilchen. Beim primitiven Vertex der QED läuft ein geladenes Fermion, hier z.B. ein Elektron, ein, zusammen mit dem zugehörigen Anti-Teilchen, hier einem Positron, und diese annihilieren zu einem Photon,

das durch die Wellenlinie dargestellt wird. Das Photon ist ein masseloses Spin-1 Teilchen. Der primitive Vertex stellt keinen tatsächlichen Prozess dar, da er die Impulserhaltung verletzen würde. Durch aneinanderfügen mehrerer primitiver Vertices erhält man einen

tatsächlichen physikalischen Prozess. Dabei darf man jeden einzelnen Vertex beliebig rotieren und spiegeln.

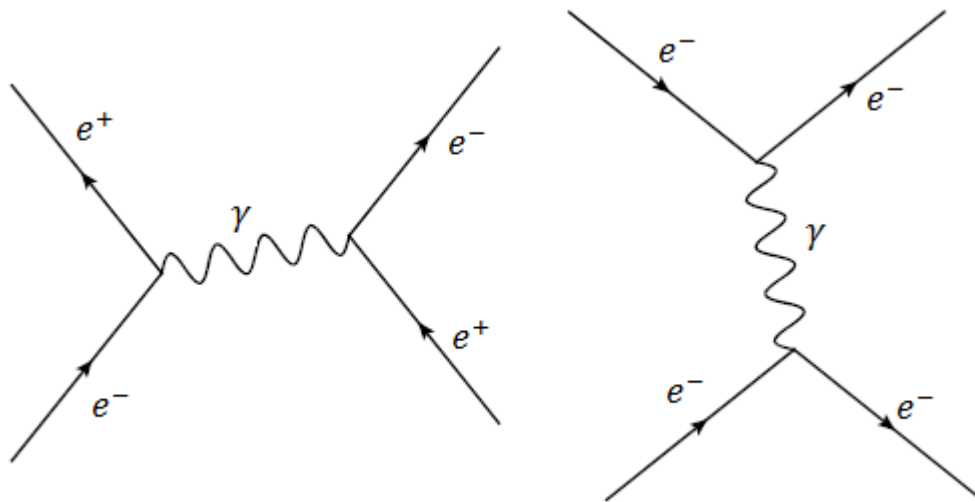


Abbildung 2 Anziehung von Elektron und Positron und Abstoßung zweier Elektronen

Linien die innerhalb eines Diagramms beginnen und enden entsprechen virtuellen Teilchen. Diese verletzen die Energie-Impuls-Beziehung, also  $E^2 \neq p^2 + m^2$ , so, dass die Energie- und Impulserhaltung an jedem Vertex gewährleistet ist. Mit einem virtuellen Teilchen ist bei Berechnungen von z.B. Wirkungsquerschnitten der Propagator  $\frac{1}{q^2 - m^2}$  verbunden, wobei  $q^2$  der Viererimpulsübertrag am entsprechenden Vertex ist. Also gerade der Grad mit dem die Energie-Impuls-Beziehung verletzt ist bestimmt die Stärke des Prozesses.

Will man nun ein komplettes physikalisches Phänomen beschreiben so muss man alle Diagramme berücksichtigen deren reale Teilchen die gleiche Situation beschreiben. Bei der Abstoßung zweier Elektronen müssten beispielsweise alle Diagramme bei denen zwei Elektronen einlaufen und zwei Elektronen auslaufen berücksichtigt werden. Dabei wird ein Diagramm pro Vertex mit einem Faktor von  $\sqrt{\alpha} = \sqrt{1/137}$  abgeschwächt. Diesen Faktor nennt man Kopplungskonstante. Es reicht also meistens die Diagramme mit nur wenigen Vertices zu berücksichtigen.

## 2.2 Schwache Wechselwirkung

Die schwache Wechselwirkung ist im Standardmodell mit der elektromagnetischen Wechselwirkung zur Elektroschwachen Wechselwirkung vereinigt. Schwache Wechselwirkung und Elektromagnetismus sind damit genau wie Magnetismus und Elektrizität zwei Manifestationen desselben Phänomens. Die schwache Wechselwirkung wirkt auf alle Quarks und alle Leptonen. Innerhalb der schwachen Wechselwirkung unterscheidet man zwischen geladener und ungeladener schwacher Wechselwirkung.

Die geladene schwache Wechselwirkung wird durch das  $W^+$  und das  $W^-$  Boson übertragen. Sie sind sehr schwer (ca. 80 GeV), tragen eine Ladung von  $\pm e$  und einen Spin von 1. Die hohe Masse der Mediatoren ist der Grund für die Schwäche der schwachen

Wechselwirkung. Der Propagator  $\frac{1}{q^2 - m^2}$  ist bei kleinen Viererimpulsüberträgen, nahezu komplett durch die hohe Masse der W bestimmt und damit sehr klein.

Zunächst betrachten wir die geladene schwache Wechselwirkung wenn sie auf Quarks wirkt.

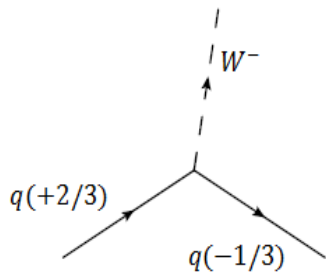


Abbildung 3 Vertex der geladenen schwachen WW (Quarks)

Ein Quark mit einer Ladung von +2/3 läuft ein und wird zu einem  $W^-$  und einem Quark mit einer Ladung von -1/3, die schwache Wechselwirkung kann also den Flavour ändern. Dabei sind die Quarks prinzipiell beliebig, wobei Übergänge die außerhalb der Generationen verlaufen gegenüber denen innerhalb der Generationen stark unterdrückt sind.

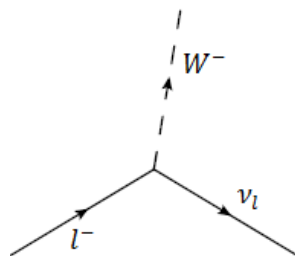


Abbildung 4 Vertex der geladenen schwachen WW (Leptonen)

Bei der leptonischen schwachen Wechselwirkung hat der primitive Vertex folgende Gestalt: Ein negativ geladenes Lepton läuft ein und wird zu einem  $W^-$  und dem zugehörigen Neutrino. Bei der leptonischen schwachen Wechselwirkung kommen keine Übergänge außerhalb der Generationen vor.

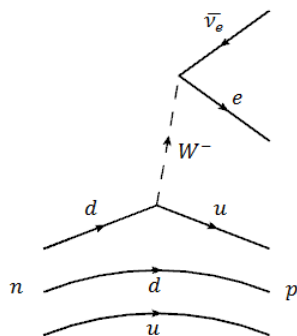


Abbildung 5  $\beta$ -Zerfall

Der Betazerfall ist eines der Prominentesten Beispiele für einen schwachen Zerfall. Es läuft ein Neutron (ddu) ein. Ein d-Quark des Neutrons zerfällt über die schwache Wechselwirkung zu einem  $W^-$  und einem u-Quark. Anschließend entsteht aus dem  $W^-$  dann noch ein Elektron und ein Elektron-Antineutrino. Damit zerfällt das Neutron zu einem Proton (uud), einem Elektron und einem Elektron-Antineutrino.

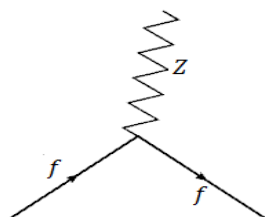


Abbildung 6 Vertex der neutralen schwachen WW

Die neutrale schwache Wechselwirkung wird durch das Z vermittelt. Das Z ist ein schweres (ca. 90 GeV) Spin-1 Teilchen ohne Ladung. Jeder Prozess der durch Photon vermittelt werden kann, kann auch durch ein Z vermittelt werden.

Anders als die anderen fundamentalen Wechselwirkungen verletzt die schwache Wechselwirkung die Parität, sie verletzt sie sogar maximal. Dies wurde

zuerst festgestellt, als man die Austrittsrichtung von Elektronen beim  $\beta$ -Zerfall von  $Co^{60}$ -Atomen, deren Spins alle in die gleiche Richtung ausgerichtet waren, untersuchte. Man stellte fest, dass alle Elektronen dem Spin entgegengesetzt austraten. Wenn man nun dieses Resultat in einer gespiegelten Welt betrachtet, so dreht sich die Richtung des Spins um (andere Drehsinn), wohingegen die Elektronen immer noch in die gleiche Richtung zeigen. Die Elektronen würden also entlang des Spins emittiert werden.

## 2.3 Starke Wechselwirkung (Quantenchromodynamik)

Die Quantenchromodynamik ist die Theorie, die die starke Wechselwirkung beschreibt. Die Mediatoren der starken Wechselwirkung heißen Gluonen, sie sind masselose Spin-1 Teilchen. Die starke Wechselwirkung beschreibt die Bindung von Quarks zu Hadronen, sowie die Kraft, die Protonen und Neutronen im Atomkern zusammenhalten. Sie wirkt auf Quarks, nicht aber auf Leptonen.

Der Quantenchromodynamik liegt eine exakte  $SU(3)$ -Symmetrie zugrunde. Es gibt drei verschiedene gleichberechtigte Ladungen, man nennt diese willkürlich Colour (hier rot ( $r$ ), grün ( $g$ ) und blau ( $b$ )). Zu jeder Farbe gibt es eine Antifarbe ( $\bar{r}, \bar{g}, \bar{b}$ ).

Auch die starke Wechselwirkung lässt sich im Feynman-Formalismus behandeln. Allerdings nur bei hohen Energien, also bei kleinen Abständen wie zum Beispiel bei Quarks die zu Hadronen gebunden sind. Dies liegt daran, dass die Kopplungskonstante bei hohen Energien klein ist und sogar für unendlich hohe Energien gegen Null läuft. Bei kleiner werdenden Energien, was großen Abständen entsprechen, läuft die aber gegen eins. Deshalb spricht man von starker Wechselwirkung. Diagramme aus vielen Vertices tragen also nicht mehr schwächer bei und der Formalismus von Feynman ist nicht mehr anwendbar.

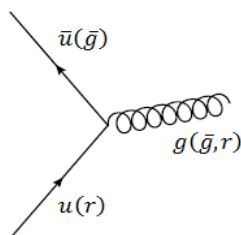


Abbildung 7 primitiver Vertex der QCD

Beim primitiven Vertex laufen ein Quark und sein zugehöriges Anti-Quark ein und diese annihilieren zu einem Gluon, das durch eine Spirallinie dargestellt wird. Die starke Wechselwirkung erhält die Gesamtfarbe und somit muss das Gluon Farbe und Antifarbe tragen um die Farben der einlaufenden Teilchen auszugleichen. Es gibt acht Gluonen, da die  $SU(3)$  acht freie Parameter hat (es gibt eigtl. noch ein Singlet Gluon, das allerdings nicht auftritt).

Da Gluonen Farbe tragen unterliegen diese auch der starken Wechselwirkung. Die primitiven Vertices bestehen aus drei oder vier Gluonen. Die QCD ist damit wesentlich facettenreicher als die QED.

Alle in der Natur vorkommenden Teilchen sind farblos, bzw. Farbsinglets. Sie tragen entweder gleiche Teile von allen Farben (Baryonen) oder Farbe und zugehörige Antifarbe (Mesonen). Da Quarks selbst Farbe tragen, bedeutet dies insbesondere auch dass es keine freien Quarks gibt. Dieses Phänomen heißt Confinement.

Quellenangaben:

1. David Griffiths, Introduction to Elementary Particles (Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA)
2. Lewis Ryder, Quantum Field Theory (Cambridge University Press)
3. Particle Data Group