

1 Einleitung

1.1 Das Standardmodell

Das Standardmodell ist eine Theorie zur Beschreibung der fundamentalen Elementarteilchen und der Wechselwirkungen zwischen diesen. Es gibt zwölf elementare Teilchen, aus denen Materie aufgebaut ist: sechs Quarks und sechs Leptonen, sowie deren jeweilige Antiteilchen. Diese Teilchen sind Fermionen mit Spin $\frac{1}{2}$, die der schwachen, und, im Falle einer von Null verschiedenen elektrischen Ladung, auch der elektromagnetischen Wechselwirkung unterliegen.

Die sechs Leptonen Elektron e^- , Myon μ^- , Tau τ^- und die drei entsprechenden Neutrinos lassen sich in drei Generationen unterteilen und mit den *Leptonenzahlen* L_e , L_μ und L_τ klassifizieren. Die Quarks lassen sich anhand des *Isospins* I_z und der *Flavors* (Strangeness S , Charm C , Bottom B und Top T) unterscheiden und werden ebenfalls in drei Generationen unterteilt (Tab. 1.1). Die Quarks unterliegen als Träger der starken *Farbladung* auch der starken Wechselwirkung. Die drei möglichen Farbladungen werden als *rot*, *blau* und *grün* bezeichnet.

q	Q [e]	I_z	Flavor				Masse [MeV/ c^2]	l	Q [e]	Leptonenzahl			Masse [MeV/ c^2]
			C	S	T	B				L_e	L_μ	L_τ	
u	+2/3	1/2	0	0	0	0	1,5 - 3,3	e^-	-1	1	0	0	0,511
d	-1/3	-1/2	0	0	0	0	3,5 - 6,0	ν_e	0	1	0	0	$< 2 \times 10^{-6}$
c	+2/3	0	1	0	0	0	1270	μ^-	-1	0	1	0	106
s	-1/3	0	0	-1	0	0	104	ν_μ	0	0	1	0	$< 190 \times 10^{-3}$
t	+2/3	0	0	0	1	0	$1,71 \times 10^5$	τ^-	-1	0	0	1	1777
b	-1/3	0	0	0	0	-1	4200	ν_τ	0	0	0	1	< 18

Tabelle 1.1: Eigenschaften der Quarks (q) und Leptonen (l) [PDG10]

Die Ladung Q ist in Einheiten der Elementarladung $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C angegeben. Die jeweiligen Antiteilchen unterscheiden sich im Vorzeichen der Ladung und des Flavors bzw. der Leptonenzahl.

Die drei grundlegenden Wechselwirkungen des Standardmodells sind die schwache Kraft, Elektromagnetismus und die starke Kraft. Die Gravitation wird in der Elementarteilchenphysik vernachlässigt, da ihre Kopplungsstärke 24 Größenordnungen kleiner ist als die der nächststärkeren Wechselwirkung.

Eichtheorien beschreiben die Kräfte im Standardmodell. Die Kraft zwischen zwei Teilchen wird durch den Austausch von virtuellen Vektorbosonen mit ganzzahligem Spin

übertragen (Tab. 1.2). Diese virtuellen Bosonen müssen im Gegensatz zu reellen Teilchen nicht auf der Massenschale liegen, das heißt die Relation $m^2 = E^2 c^{-4} - p^2 c^{-2}$ muss nicht erfüllt sein. Die Mittlerteilchen der schwachen Wechselwirkung, die an die schwache Ladung koppelt, sind die W^\pm - und Z^0 -Bosonen. Aus der Unschärferelation folgt aufgrund der hohen Ruhemasse dieser Teilchen ($m_W = 80,39 \text{ GeV}/c^{-2}$, $m_Z = 91,19 \text{ GeV}/c^{-2}$) die geringe Reichweite dieser Kraft. Die schwache Wechselwirkung ist die einzige, die das Flavor der Teilchen ändern kann. Die elektromagnetische Wechselwirkung koppelt an die elektrische Ladung eines Teilchens und wird durch den Austausch virtueller Photonen vermittelt. Diese Kraft ist sowohl im mikroskopischen als auch im makroskopischen Bereich von Bedeutung. Im Standardmodell werden die schwache und die elektromagnetische Kraft zur elektroschwachen Kraft zusammengefasst. Die stärkste Kraft ist die starke Wechselwirkung. Diese koppelt an die starke Farbladung und wird durch acht Gluonen übertragen. Eine Besonderheit der starken Wechselwirkung ist, dass die Mittlerteilchen selbst eine Farbladung tragen und somit untereinander wechselwirken. Diese Selbstwechselwirkung resultiert in der kurzen Reichweite dieser Kraft [Mus88]. Die starke Wechselwirkung wird im folgenden Abschnitt näher besprochen.

Wechselwirkung	relative Stärke	Reichweite [m]	Ladung	Mittlerteilchen
starke Kraft	1	10^{-15}	Farbladung	8 Gluonen
Elektromagnetismus	10^{-2}	∞	elektrische Ladung	Photon
schwache Kraft	10^{-14}	$2 \cdot 10^{-18}$	schwache Ladung	W^\pm, Z^0

Tabelle 1.2: Eigenschaften und Austauscheteilchen der drei fundamentalen Wechselwirkungen des Standardmodells [PDG10]

1.2 Quantenchromodynamik

Die elektromagnetische Wechselwirkung wird seit 1940 erfolgreich durch die *Quantenelektrodynamik* (QED) beschrieben. Analog dazu wurde für die starke Wechselwirkung die *Quantenchromodynamik* (QCD) entwickelt. Als Mittlerteilchen der starken Kraft dienen die masselosen Gluonen, die an die Farbladung der Quarks koppeln. Die Gluonen tragen jedoch selbst gleichzeitig Farbe und Antifarbe, wobei aus gruppentheoretischen Überlegungen acht mögliche Kombinationen folgen. Aus diesem Grund unterliegen die Gluonen, im Gegensatz zum elektrisch neutralen Photon in der elektromagnetischen Wechselwirkung, selbst der starken Kraft. Diese Selbstwechselwirkung ist ein großer Unterschied der starken Wechselwirkung zu den anderen und führt zu einigen Besonderheiten im Verhalten dieser Kraft. Bei der Betrachtung der Charmonium-Zustände ($c\bar{c}$ -Zustände) weisen die relativen Abstände der Energieniveaus eine Ähnlichkeit zum Positronium-Spektrum auf. Aus diesem Grund sollte sich das Potential der starken Wechselwirkung bei kleinen Abständen der Quarks Coulomb-artig verhalten und mit $1/r$ abfallen. Die höheren Zustände des Charmonium-Spektrums weichen allerdings von denen

des Positroniums ab, es liegt also kein reines Coulomb-Potential zu Grunde. Da zudem keine Quarks als freie Teilchen beobachtet werden, wird das Wechselwirkungspotential durch einen linearen Term erweitert [Pov09]:

$$V(r) = -\frac{4}{3} \frac{\alpha_s(r) \hbar c}{r} + kr \quad (1.1)$$

Die Größe $\alpha_s(r)$ bezeichnet die *Kopplungskonstante* der starken Kraft, die vom Abstand der Quarks zueinander abhängig ist.

Zur Bestimmung der Kopplungskonstante in der QED betrachtet man eine Testladung im Vakuum. Aufgrund der Energie-Zeit-Unschärfe strahlt die Testladung virtuelle Photonen ab, die wiederum Elektron-Positron-Paare bilden. Die dadurch entstehende Ladungswolke wird polarisiert, und schirmt die eigentliche Testladung teilweise ab. Als Konsequenz nimmt die beobachtbare effektive Ladung mit steigendem Abstand zur Testladung ab. Die Kopplungskonstante nimmt im Grenzfall großer Abstände bzw. kleiner Energien den Wert $\alpha = 1/137$ an.

Analog kann man auch die Kopplungskonstante der starken Wechselwirkung bestimmen. Aufgrund der Selbstwechselwirkung der Gluonen besteht die Ladungswolke jedoch nicht nur aus Gluonen und Quark-Antiquark-Paaren, sondern auch aus Gluonpaaren. Während die Quark-Antiquark-Paare analog zu den Elektron-Positron-Paaren die effektive Ladung für größere Abstände abschwächen, "verwischen" die Gluonen die Farbladung, so dass diese bei kleiner werdenden Abständen abnimmt. Die Kopplungskonstante muss also für kleine Abstände ($\ll 1$ fm) ebenfalls kleine Werte annehmen. Dies führt zur *asymptotischen Freiheit* der Quarks, die in diesem Bereich als quasi-freie Teilchen betrachtet werden können [Bet08, Pov09]. Bei diesen Abständen lassen sich in der QCD störungstheoretische Methoden anwenden (Bereich der perturbativen QCD). Die Konstituentenquarks in Hadronen haben jedoch grössere Abstände, bei denen die Störungstheorie nicht mehr anwenden ist (Bereich der nicht-perturbativen QCD), da die Kopplung zwischen den Teilchen mit dem Abstand zu nimmt. Dabei wird bei zunehmendem Abstand der Quarks die Feldenergie so groß, dass aus dieser ein neues Quark-Antiquark-Paar entsteht, welches sich mit den ursprünglichen Quarks zu neuen Teilchen verbindet. Dieses Verhalten wird als *Confinement* bezeichnet. Eine Konsequenz des Confinement ist die Nicht-Existenz einzelner freier Quarks.

Die Quarks können nur in gebundenen Zuständen, den Hadronen, beobachtet werden, die nach aussen hin farbneutral sind. Zu den etablierten Hadronen gehören die Mesonen, Quark-Antiquark-Paare, und die Baryonen, die aus drei Quarks bestehen. Weiterhin werden von der QCD auch noch sogenannte exotische Zustände vorhergesagt. Dazu gehören Multiquarkzustände, die aus vier oder fünf Quarks bestehen und Molekülverbindungen eingehen, und Hybride, die zusätzlich zu ihren Quarks auch ein konstituierendes Gluon besitzen. Außerdem werden reine Gluonen-Verbindungen, die Gluonenbälle, vorhergesagt. Für einige dieser exotischen Zustände wurden Kandidaten beobachtet, allerdings konnten diese noch nicht eindeutig zugeordnet werden.

1.3 Spektrum der Charmonium-Resonanzen

Charmonium-Resonanzen sind Mesonen, die aus einem gebundenen Charm-Anticharmquark-Paar bestehen. Aufgrund der großen Masse lassen sich diese Mesonen nicht-relativistisch behandeln. Wie bereits im vorherigen Abschnitt beschrieben, zeigt das Charmonium-Spektrum Ähnlichkeiten zu dem des Positroniums.

Die vorhergesagten und beobachteten Zustände [PDG10] des Charmonium-Spektrums sind in Abbildung 1.1 dargestellt. Das $\eta_c(1S)$ bildet den Grundzustand mit $L = 0$ und $S = 0$. Zustände mit $L = 0$ und $S = 1$ werden ψ genannt, wobei der niedrigste dieser Zustände das $J/\psi(1S)$ ist. Die Zustände des $1P$ -Triplets ($L = 1$ und $S = 1$) werden als χ_{cJ} bezeichnet [Pov09]. Unterhalb der $D\bar{D}$ -Schwelle wurden bereits alle vorhergesagten Charmonium-Zustände nachgewiesen.

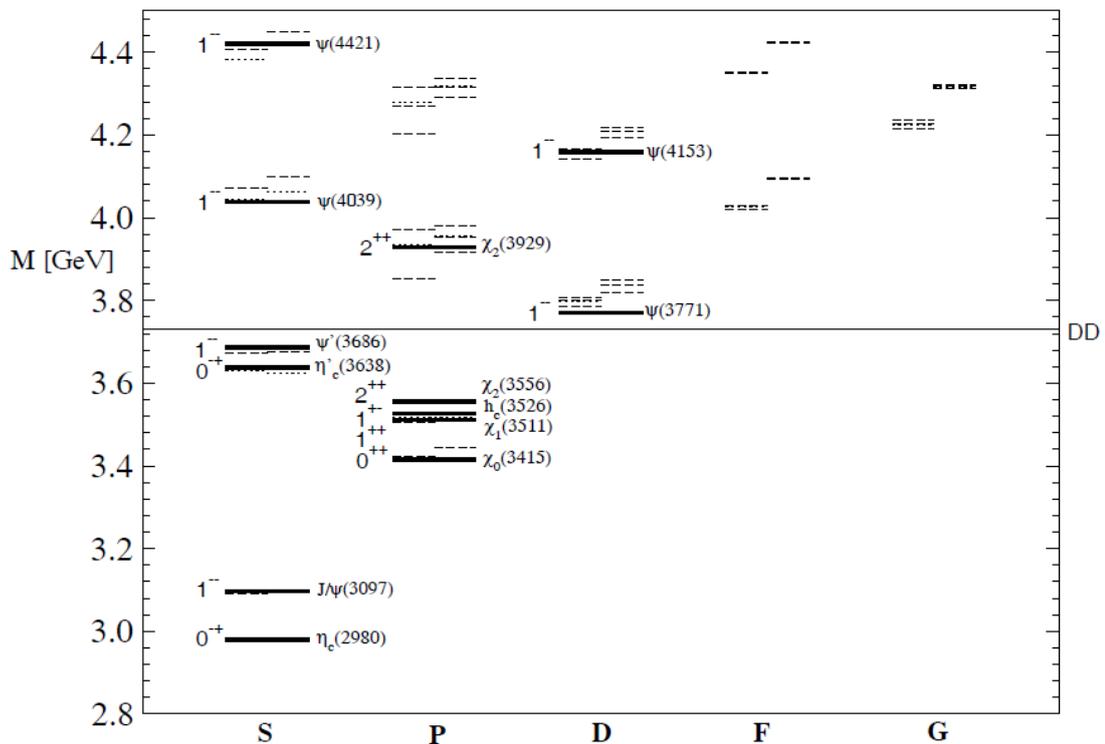


Abbildung 1.1: Vorhergesagte und beobachtete Charmonium-Zustände.

Die durchgezogenen Linien representieren die experimentell gefundenen Zustände, während die unterbrochenen Linien theoretische Vorhersagen sind (Nicht-relativistisches Modell links, Godfrey-Isgur Modell rechts). Spin-Triplets sind in den theoretischen Vorhersagen gestrichelt, Spin-Singlets sind mit gepunkteten Linien dargestellt. Die $D\bar{D}$ -Schwelle bei 3,73 GeV ist ebenfalls eingezeichnet. [Asn09]

Zur Vorhersage der noch nicht gefundenen Charmonium-Zustände gibt es verschiedene theoretische Modelle. In obiger Abbildung 1.1 sind zwei dieser Modelle dargestellt. Zum

einen ein völlig nicht-relativistisches Potentialmodell, und zum Anderen das relativistische *Godfrey-Isgur Modell* [Asn09].

Oberhalb der $D\bar{D}$ -Schwelle wurden in den letzten Jahren einige weitere Zustände beobachtet, die im Massenbereich vorhergesagter Charmonia liegen. Jedoch steht eine eindeutige Zuordnung als Charmonium für diese Zustände noch aus, da in diesem Massenbereich auch exotische Charmonium-Hybride, $c\bar{c}$ -Zustände mit einem zusätzlichen Gluon, vorhergesagt werden.

1.4 Exotische Materie

Neben den konventionellen Hadronen, den Mesonen ($q\bar{q}$) und den Baryonen (qqq) werden in der QCD noch weitere als *exotisch* bezeichnete Zustände vorhergesagt. Diese exotischen Zustände können in drei Kategorien unterteilt werden.

Hybride sind gebundene Quark-Antiquark-Paare mit einem zusätzlichen gluonischen Freiheitsgrad. Aufgrund dessen können Hybride und Gluebälle exotische Spinquantenzahlen ($J^{PC} = 0^{--}, 0^{+-}, 1^{-+}, 2^{+-}, \dots$) besitzen, die für konventionelle Mesonen verboten sind. Der gluonische Freiheitsgrad kann durch eine Feldröhre (engl. *flux tube*) erklärt werden, dessen Schwingungen sich in transversalen farb-magnetischen und transversalen farb-elektrischen Anregungen äußern. Die Quantenzahlen dieser exotischen Zustände können durch einfaches addieren der Quantenzahlen der gluonischen Anregung und des $q\bar{q}$ -Paares bestimmt werden. Für S-Wellen Mesonen resultiert dies in acht Hybrid-Zustände, von denen drei exotische Quantenzahlen haben [Kop11].

Gluebälle dagegen bestehen nur aus Gluonen, ohne ein Valenzquark als Inhalt. Gitter-QCD Rechnungen sagen 15 Gluebälle unterhalb einer Masse von $5 \text{ GeV}/c^2$ voraus. Es wird erwartet, dass einige davon exotische Quantenzahlen besitzen. Diese Zustände können kaum mit konventionellen Mesonen mischen und sollten schmal sein.

Da Gluebälle keine Valenzquarks besitzen, unterliegen sie nicht der OZI-Regel und können farb-blind in jeden offenen Kanal zerfallen [Kop11, Wie09].

Die letzte Kategorie sind die Multiquark-Zustände, die wiederum in Moleküle, gering gebundene Mesonen, Tetraquarks, fest gebundene (qq)($\bar{q}\bar{q}$)-Zustände, und Pentaquarks ($qqqq\bar{q}$) unterteilt wird.