

1 Einführung

1.1 Größenordnungen in der Teilchenphysik

1.1.1 Energie, Impuls und Masse

Elektronen-Volt eV ist die Basiseinheit für Energie in der Teilchenphysik:

$$1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Betrachtet man die relativistische Energie-Impuls-Beziehung eines Teilchens mit Energie E , Ruhemasse m_0 und Impuls p :

$$E^2 = m_0^2 c^4 + p^2 c^2 \quad (1)$$

ist die Definition von eV/c als Grundeinheit für Impuls und eV/c^2 als Grundeinheit für Masse, naheliegend.

Z.B. ist die Masse eines Elektrons $m(e^-) = 511 \text{ keV}/c^2$ und die eines Protons $m(p) = 938 \text{ MeV}/c^2$

Viele Experimente in der Teilchenphysik basieren auf Gleichung 1:

Hochenergetische Teilchen, d.h. Teilchen für die gilt $m_0^2 c^4 \ll E^2$ werden zur Kollision gebracht, zum Beispiel Elektronen e^- und Positronen (Antiteilchen des Elektrons) e^+ am LEP Beschleuniger am CERN¹, oder p mit p am Large Hadron Collider (LHC)². In der Kollision entstehen neue Teilchen deren Masse oft ein vielfaches größer sind als die Masse der ursprünglichen Kollisionspartner. So wurden z.B. am LEP Beschleuniger sogenannte W und Z Bosonen mit einer Masse von $80 \text{ GeV}/c^2$ bzw. von $91 \text{ GeV}/c^2$ studiert und am LHC wurde das Higgs Boson mit einer Masse von $126 \text{ GeV}/c^2$ produziert.

Einschub: Relativistische Mechanik, Rechnen mit 4er Vektoren

Zeit-Orts-4er-Vektor: $x = (ct, \vec{x}) = (ct, x, y, z) = x^\mu$

Energie-Impuls-4er-Vektor (oder oft auch 4er-Impuls genannt):

$$p = (E/c, \vec{p}) = (E/c, p_x, p_y, p_z) = p^\mu$$

Konvention: In dieser Vorlesung bezeichnet \vec{x} einen 3er-Vektor im Ortsraum bzw. \vec{p} ein 3er-Vektor im Impulsraum. 4er Vektoren werden mit x bzw. p

¹ Laufzeit von 1989-2000

² seit 2008

bezeichnet.

Ein Skalarprodukt aus zwei 4er-Vektoren, z.B. $a = (a_0, \vec{a})$ und $b = (b_0, \vec{b})$ ist definiert als

$$a \cdot b = a_0 b_0 - \vec{a} \vec{b} = \sum_{\mu, \nu=0}^3 g_{\mu\nu} a^\mu b^\nu \quad (2)$$

mit folgender Metrik:

$$g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Das so definierte Skalarprodukt ist **lorentzinvariant!**

Beispielaufgabe:

Ein Proton mit der Energie von 100 GeV trifft frontal auf ein Proton mit der Energie von 300 GeV. Wie groß ist die Schwerpunktsenergie (= Energie im Ruhesystem)?

Bei folgender Rechnung wurden die Massen der Teilchen vernachlässigt, da $E \gg mc^2$.

Laborsystem: $p_1 = (300\text{GeV}/c, 300\text{GeV}/c, 0, 0)$, $p_2 = (100\text{GeV}/c, -100\text{GeV}/c, 0, 0)$

Ruhesystem: $p'_1 = (E'_1, \vec{p}'_1)$, $p'_2 = (E'_2, \vec{p}'_2)$ und $\vec{p}'_1 + \vec{p}'_2 = 0 \rightarrow E'_1 = E'_2 = E'$

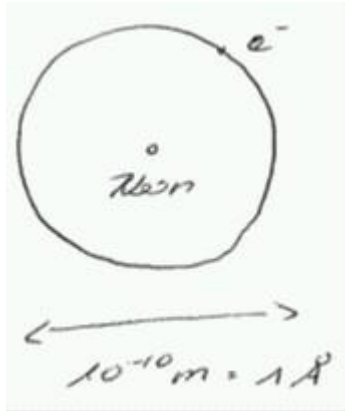
Lorentzinvarianz des Skalarprodukts:

$$\begin{aligned} (p'_1 + p'_2)^2 &= (p_1 + p_2)^2 \\ 4E'^2/c^2 &= (300\text{GeV}/c + 100\text{GeV}/c)^2 - (300\text{GeV}/c - 100\text{GeV}/c)^2 \\ E'^2 &= 30.000\text{GeV}^2 \\ 2E' &\sim 346\text{GeV} \end{aligned}$$

Die Schwerpunktsenergie ist $E_{CMS} = 346 \text{ GeV}$ (CMS: center-of-mass system).

1.1.2 Längenskalen

Ein Atom hat einen Durchmesser von $10^{-10} \text{ m} = 1 \text{ \AA}$. In der Mitte befindet sich der Atomkern und auf den Schalen “bewegen” sich die Elektronen.



Elektron sind so-geannte punktförmig Teilchen, d.h. haben keine Ausdehnung und dementsprechend auch keine Substruktur. Experimentell kann man nur eine Obergrenze für die Ausdehnung eines Elektrons angeben.

Der kleinste Abstand Δx den man mit einem Mikroskop auflösen kann entspricht der zugehörigen Wellenlänge λ . Bei Teilchenkollisionen entspricht die erreichbare Präzision der DeBroglie-Wellenlänge der benutzten Teilchen:

$$\Delta x = \lambda = \frac{h}{p} \quad (4)$$

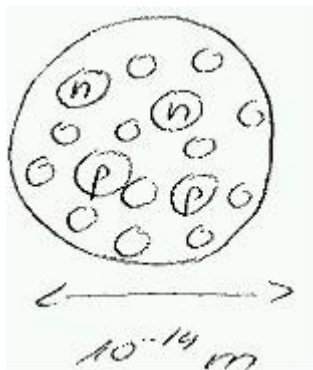
wobei h das Planck'sche Wirkungsquantum und p der Impuls der Teilchen ist. Eine Größe, die man sich auf alle Fälle merken sollte ist $\hbar = h/2\pi = 197 \text{ MeV fm}/c$. Typische maximal Impulse an Hochenergiebeschleunigern sind $100 \text{ GeV}/c$:

$$\Delta x = \frac{0.197 \text{ GeV}/c}{100 \text{ GeV}/c} 2\pi \text{ fm} \sim 1 \cdot 10^{-17} \text{ m} \quad (5)$$

$\mathcal{O}(10^{-18} \text{ m})$ entspricht der oberen Grenze, die wir für die Ausdehnung von Elektronen angeben können.

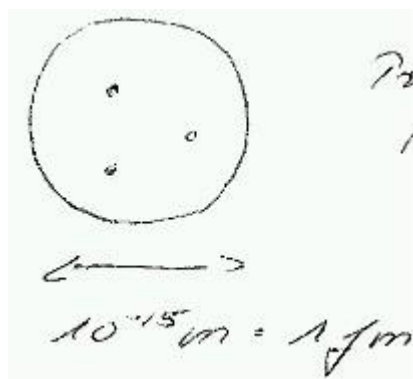
Der Atomkern besteht aus Neutronen und Protonen.

Die Dichte von Kernen ist konstant (siehe später in der Vorlesung), d.h. das



Kernvolumen wächst proportional zur Atommassenzahl A und entsprechend der Kernradius mit $A^{1/3}$. Eine gute Näherung des Kernradius R_K für alle Kerne mit $A > 10$ ist $R_K = 1.22 \text{ fm } A^{1/3}$. Daraus folgt, dass Atomkerne einen Radius von $\mathcal{O}(10^{-14}\text{m})$ haben.

Proton und Neutron werden unter dem Begriff Nukleonen zusammengefaßt. Sie haben eine Durchmesser von etwa 1 fm und bestehen jeweils aus drei Quarks; das Proton aus zwei u und einem d Quark und das Neutron aus zwei d und einem u Quark. Die Masse eines Protons ist $m(p) = 938.3 \text{ MeV}/c^2$ und die des Neutrons $m(n) = 939.6 \text{ MeV}/c^2$. Quarks sind (in unseren Modellen) genauso wie das Elektron punktförmige Teilchen.



1.2 Elementarteilchen

Alle punktförmigen Teilchen, werden Elementarteilchen genannt. Es gibt Elementarteilchen, die Fermionen sind, d.h. einen halbzahligen Spin haben ($1/2$, $3/2$, $5/2$, ...) und Bosonen die einen ganzzahligen Spin haben. Die Klasse der fermionischen Elementarteilchen kann man noch weiter in Leptonen und Quarks unterteilen.

1.2.1 Fermionen

Leptonen

I	II	III	Q (Ladung)
ν_e	ν_μ	ν_τ	0
e^-	μ^-	τ^-	-1
$m(e)=511 \text{ keV}/c^2$	$m(\mu)=106 \text{ MeV}/c^2$	$m(\tau)=1.75 \text{ GeV}/c^2$	

Neutrinos haben in vielen Modellen (und im Rahmen dieser Vorlesung) keine Masse. Allerdings wurde durch die Umwandlung von einer Neutrinosorte in die andere nachgewiesen, dass mindestens eine Neutrinosorte zwar eine sehr kleine aber von null verschiedene Masse haben muß. Für den experimentellen Nachweis der Neutrinomasse ging vor wenigen Tagen der Nobelpreis an Arthur B. McDonald (SNO Experiment) und an Takaaki Kajita (Super-Kamiokande Experiment).

Quarks

I	II	III	Q
u (up)	c (charm)	t (top)	+ 2/3
$m(u)=3 \text{ MeV}/c^2$	$m(c)=1.3 \text{ GeV}/c^2$	$m(t)= 173 \text{ GeV}/c^2$	
d (down)	s (strange)	b (bottom)	- 1/3
$m(d)=6 \text{ MeV}/c^2$	$m(s)=104 \text{ MeV}/c^2$	$m(b)= 4.2 \text{ GeV}/c^2$	

Schwere Teilchen zerfallen (wenn nicht durch bestimmte Erhaltungssätze ein Zerfall verboten ist) in leichtere Teilchen. D.h. die Teilchen der ersten Familie (Elektron, up und down Quark) sind stabil, ebenso die Neutrinos. Die Materie um uns herum ist aus Elektronen, Protonen und Neutronen, d.h. up und down Quarks aufgebaut.

Für Quarks existieren neben der elektrischen Ladung auch so-genannte Farbladung (\equiv Ladung der starken Wechselwirkung, siehe später). Sie kann drei Werte annehmen r - red, g - green, b - blue.

Zu allen Teilchen existieren Antiteilchen mit entgegengesetzter elektrischer Ladung und Farbladung³, aber mit selber Masse, selben Spin und selber Lebensdauer:

$$e^- \rightarrow e^+, u \rightarrow \bar{u}, \nu_e \rightarrow \bar{\nu}_e, t \rightarrow \bar{t}, \dots$$

Antiteilchen geladener Teilchen werden mit entsprechend umgekehrter Ladung gekennzeichnet oder mit einem Querstrich, neurale mit einem Querstrich.

Das Elektron ist das einzige Teilchen, dessen Antiteilchen einen eigenen Namen hat, das Positron. Es wurde 1932 von Carl D. Anderson nachgewiesen. Er erhielt 1936 für diese Entdeckung den Physiknobelpreis.

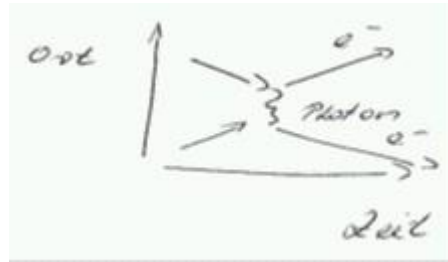
1.3 Fundamentale Wechselwirkungen

In der Quantenfeldtheorie (QFT) behandelt man Kräfte als quantisierte Felder. Wechselwirkungen (WW) zwischen Elementarteilchen werden als Austausch dieser Feldquanten (Austauschbosonen) beschrieben.

Feynman-Diagramm sind Pictogramme für Rechenregeln in der QFT die von Richard Feynman eingeführt wurden. Aber auch ohne Rechnung sind sie zur Veranschaulichung von Prozessen in der Teilchenphysik hilfreich. Mehr Details zu Feynman-Diagrammen werden später in der Vorlesung eingeführt.

Ein Beispiel für die Streuung zweier Elektronen auf Grunde ihrer Coulombwechselwirkung ist hier dargestellt. Die Übertragung der elektromagnetischen Kraft (Coulombwechselwirkung), d.h. die Abstoßung der Teilchen geschieht

³allgemein haben Antiteilchen invertierte Quantenzahlen



durch den Austausch eines Photons. Das Photon existiert kurzzeitig virtuell, es wird von einem Elektron emittiert und von dem zweiten absorbiert. Virtuell bedeutet, dass das Teilchen für eine kurze Zeit im Rahmen der Unschärferelation nicht die relativistische Energie-Impulsbeziehung (siehe Gleichung 1) erfüllt.

Insgesamt gibt es vier fundamentale WW: die starke Kraft, die elektromagnetische (EM) Kraft, die schwache Kraft und die Gravitation. Alle anderen Kräfte lassen sich auf diese vier Kräfte zurückführen. Z.B. ist die Kernkraft ein Effekt der starken WW, oder die Van-der-Waals Kraft (siehe Festkörperphysik) ist ein Resultat der elektromagnetischen Kraft). Die Gravitation spielt auf der Skala, die relevant für die Teilchenphysik ist, keine Rolle. Sie kann auch nicht im Rahmen der QFT beschrieben werden.

Die folgende Tabelle listet einige Eigenschaften der Wechselwirkungen und ihrer Austauschteilchen auf. Die rel. Stärken sind auf der für die Teilchenphysik relevanten Skalen angegeben.

WW	rel. Stärke	Austauschboson	Spin	Masse	Reichweite
starke	1	8 Gluonen	1	0	$< 1 \text{ fm}$
EM	$\sim 10^{-2}$	Photon	1	0	∞
schwache	$\sim 10^{-7}$	W^\pm, Z	1	$80 \text{ GeV}/c^2$ $91 \text{ GeV}/c^2$	$\sim 10^{-3} \text{ fm}$
Gravitation	$\sim 10^{-39}$	Graviton*	2	0	∞

*noch nicht entdeckt.

Im folgenden werden kurz einige Eigenschaften der drei für die Teilchenphysik relevanten Kräfte diskutiert. Es wird auf alle drei noch im Detail im Laufe der Vorlesung eingegangen werden.

1.3.1 Elektromagnetische (EM)Kraft

Die EM Kraft wirkt auf alle elektrisch geladenen Teilchen. Das Potential hat theoretisch eine unendliche Reichweite:

$$V(r) \propto -\frac{q_1 q_2}{r} \quad (6)$$

wobei q_1 und q_2 die Ladung der Teilchen ist zwischen denen die Kraft wirkt und r ihr Abstand. Praktisch gibt es natürlich Abschirmungseffekte, da die Materie aus positiv und negativ geladenen Teilchen besteht, die sich gegenseitig neutralisieren.

Nebenbemerkung:

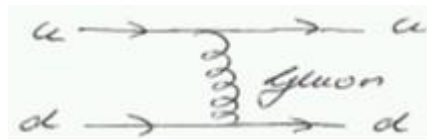
Das Gravitationspotential hat die gleiche Form.

$$V(r) \propto \frac{m_1 m_2}{r} \quad (7)$$

Da es kein Antimaterie in unserem Universum gibt, gibt es keine Abschirmeffekte und die Gravitationskraft wird bei großen Skalen die dominante Wechselwirkung, da die beteiligten Massen sehr groß sind.

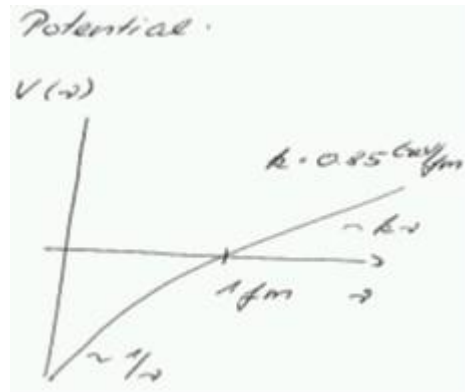
1.3.2 Starke Kraft

Die starke Kraft wirkt nur zwischen zwischen Teilchen mit Farbladung, d.h. Quarks und Gluonen. Es gibt 8 Gluonen mit unterschiedlichen Farb-Antifarbkombinationen.



Viele der Unterschiede der EM und der starken Kraft lassen sich darauf zurückführen, dass die Gluonen selbst Farbe tragen wohingegen das Photon elektrisch neutral ist. Das Potential der starken Wechselwirkung hat bei kleinen Abständen (< 1 fm) eine $1/r$ Abhängigkeit bei großen Abständen steigt es jedoch linear mit dem Abstand. D.h. bei kleinen Abständen sind zwei Quarks nur schwach gebunden, jedoch benötigt man um so mehr Energie, umso weiter man sie auseinander reißen möchte. Deshalb kommen Quarks

nicht alleine vor sondern sind immer in farbneutralen Hadronen gebunden, deren Ausdehnung bei etwa einem Femtometer liegen.



Man unterscheidet zwei Sorten von Hadronen:

Baryonen bestehen aus drei Quarks $|qqq\rangle$ mit Farben r, g, b oder 3 Antiquarks $|\bar{q}\bar{q}\bar{q}\rangle$ mit den Farben $\bar{r}, \bar{g}, \bar{b}$; z.B. $p = |uud\rangle$, $n = |udd\rangle$, $\Lambda = |uds\rangle$, Δ^{++}

Mesonen bestehen aus einem Quark-Antiquark-Paar $|q\bar{q}\rangle$ mit Farbe und Antifarbe ($r\bar{r}$ oder $g\bar{g}$ oder $b\bar{b}$)

z. B. $\pi^+ = |u\bar{d}\rangle$, $\pi^- = |\bar{u}d\rangle$, $B^+ = |u\bar{b}\rangle$, $D^0 = |\bar{u}c\rangle$

In Tabelle 1 sind alle Mesonen im Grundzustand (kein relativer Bahndrehimpuls der Quark-Antiquark-Paare; $L=0$) aufgeführt. Mesonen werden nach ihrem schwersten Quark benannt:

u, d : Pion s : Kaon c : D-Meson b : B-Meson

Das top-Quark ist so schwer, dass es zerfällt bevor es einen gebundenen Zustand eingehen kann. Die Lebensdauer eines top-Quarks ist $\tau(\text{top}) = 10^{-29}\text{s}$. Die Zeitskala der Hadronisierung, d.h. die Zeitspanne die nötig ist, dass sich Hadronen bilden liegt bei $t_{had} = 10^{-22}\text{s}$, d.h. ist deutlich länger.

	u	d	s	c	b	t
\bar{u}	π^0	π^-	K^-	D^0	B^-	
\bar{d}	π^+	π^0	\bar{K}^0	D^+	\bar{B}^0	—
\bar{s}	K^+	K^0	\bar{q}	D_s^+	\bar{B}_s^0	—
\bar{c}	\bar{D}^0	D^-	D_s^-	J/Ψ	B_c^-	—
\bar{b}	B^+	B^0	B_s^0	B_c^+	Υ	—
\bar{t}	—	—	—	—	—	—

Tabelle 1: Mesonen und Quark-Antiquark-Resonanzen im Grundzustand (L=0)..

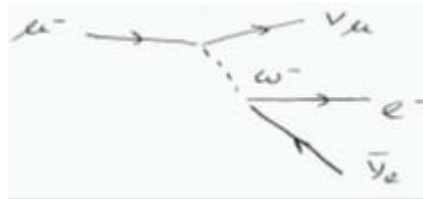
Nebenbemerkung:

Kürzlich (April 2014) wurden am LHCb-Experiment (Large Hadron collider beauty experiment) am CERN erstmals 4-Quarkzustände, so-genannte Tetraquarks mit folgendem Quarkinhalt $|qq\bar{q}\bar{q}\rangle$ nachgewiesen. Im Juli 2015 wurden am gleichen Experiment Pentaquarks ($|qq\bar{q}qq\rangle$) bzw. ($|qq\bar{q}\bar{q}\bar{q}\rangle$) entdeckt. Die bei weitem am häufigsten vorkommenden und für diese Vorlesung relevanten Hadronen sind allerdings die Mesonen und Baryonen.

1.3.3 Schwache Kraft

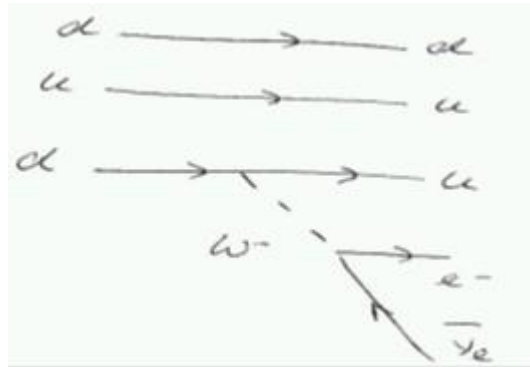
Die schwache Kraft koppelt an alle Quarks und an alle Leptonen⁴. Das bekannteste Beispiel eines schwachen Zerfalls ist der β -Zerfall

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$$



⁴Das equivalent zur elektrischen Ladung bei der EM Wechselwirkung und der Farbladung bei der starken Wechselwirkung ist der schwache Isospin, eine weitere Quantenzahl (= Freiheitsgrad) die den Teilchen zugeordnet ist.

oder $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$



1.3.4 Zusammenfassung

Die Tabelle faßt zusammen welche Teilchen und Antiteilchen an welcher Wechselwirkung teilnehmen.

Teilchen	starke WW	EM W	schwache WW
geladene Leptonen	0	x	x
Neutrinos + Antineutrinos	0	0	x
Quarks und Antiquarks	x	x	x

x: nimmt an WW Teil

1.4 Das Standardmodell der Teilchenphysik

Das Standardmodell (SM) ist eine QFT, die die WW zwischen den Elementarteilchen beschreibt.

Neben den Austauscheteilchen gibt es noch ein weiteres Boson, das Higgsboson, das den Teilchen Masse verleiht.

Der Higgsmechanismus wurde 1964 gleichzeitig von Higgs und von Englert und Brout eingeführt. Es ist eines der größten Erfolge des Standardmodells, dass dieses vorhergesagte Teilchen mit genau den vorhergesagten Eigenschaften 2012 am Large Hadron Collider am CERN nachgewiesen werden

konnte. Higgs und Englert haben für ihre Vorhersage 2013 den Physiknobelpreis bekommen. Auch wenn das Standardmodell, das vor über 40 Jahren eingeführt wurde seitdem jedem Test in Laborexperimenten Stand hält, kann die Theorie nicht vollständig sein. Es gibt fundamentale Fragen, die das Standardmodell nicht beantworten kann, wie z.B. die Ursache des Materieüberschusses im Universum, die Gravitation oder den Ursprung der dunklen Materie deren Existenz in cosmologischen Messungen eindeutig festgestellt wurde.