

Einführung in die theoretische Kern- und Teilchenphysik

Überblick

Hendrik van Hees

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Aufbau der Materie: Längen- und Energieskalen | 1 |
| 2 | Kern-Struktur (nicht-rel. Vielteilchentheorie) | 4 |
| 3 | Relativistische Quantenfeldtheorie und Standardmodell | 10 |
| 4 | Symmetrien und das Standardmodell | 15 |

1 Aufbau der Materie: Längen- und Energieskalen

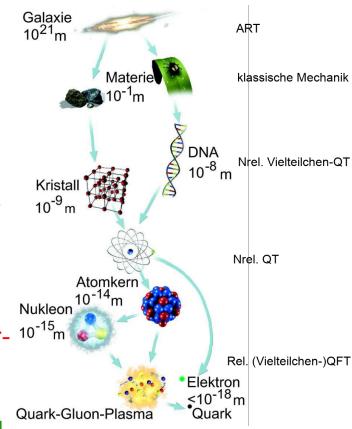
Aufbau der Materie

Aufbau der Materie: Längen- und Energieskalen

- verschiedene Skalen \Leftrightarrow verschiedene theoretische Beschreibungsebenen
- makroskopische Beschreibung: viele $\mathcal{O}(10^{24})$ Teilchen
 - klassische nichtrelativistische Mechanik: makroskopische Materie, gemittelte Beschreibung makroskopischer Freiheitsgrade, kleine Geschwindigkeiten/Kräfte
 - klassische relativistische (Kontinuums-)Mechanik: Bewegungen makroskopischer Körper; hohe Geschwindigkeiten; alle Wechselwirkungen außer Gravitation: SRT
- mikroskopische Beschreibung: einzelne Teilchen, fundamentale WW
 - nichtrelativistische QM/QFT: einzelne/wenige Teilchen; kleine Energien (nicht zu schwere Atome, Moleküle, Kerne; Makrophysik: kondensierte Materie)
 - Relativistische QFT: derzeit fundamentalste Ebene; beschreibt alles außer Gravitation (Quantenoptik, Hochenergieteilchen- und Kernphysik, Kern-Materie, Quark-Gluon-Plasma)
 - bislang QT-Beschreibung der Gravitation noch nicht befriedigend verstanden!

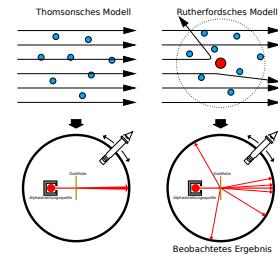
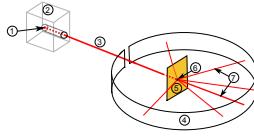
Aufbau der Materie: Längen- und Energieskalen

- fundamentale Physik: **relativistische QFT**
(umfassend außer Gravitation!)
- Demokrit (460-370 BC):
„nur Atome und leerer Raum“
- Atom=griechisch für „das Unteilbare“
- Rutherford (1909-1911):
größter Teil des Atoms ist „leerer Raum“
- Hauptanteil der Masse im **Atomkern**
- heute: **Standardmodell der Elementarteilchen**
- Beschreibung bei größeren Skalen:** Nrel. QT, Quanten-Statistik \Rightarrow klassische Physik



Streuexperimente

- Streuexperimente wichtigste Methode, um **Aufbau der Materie** zu untersuchen!
- räumliche Auflösung \leftrightarrow Impulsübertrag bei Stößen
- Beispiel: **Rutherford-Goldfolienexperiment**



- Nichtrelativistische QM:** Streuung von α -Teilchen am **Coulombpotential des Kerns** (Schwerpunktsystem)

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4E_0} \right)^2 \frac{1}{\sin^4(\vartheta/2)}$$

2 Kern-Struktur (nicht-rel. Vielteilchentheorie)

Kern-Struktur

Atomphysik und Quantenmechanik

- gebundene Zustände von Z Elektronen mit Kern mit Z Protonen
- **elektromagnetische Wechselwirkung** sehr gut bekannt (Maxwell-Theorie)
- einfaches Atom: **Wasserstoffatom**
- erstes **quantenmechanisches** Atommodell: Bohr 1913/Sommerfeld 1916
- „Quantenbedingungen“ ad-hoc-Annahmen in klassischer Newtonscher Mechanik \Leftrightarrow **Elektronenbahnen a la Planeten**
- erfolgreich nur für Wasserstoffatom
- Entwicklung der „**neuen Quantentheorie**“
- 1925 Heisenberg, Born, Jordan \Rightarrow **Matrizenmechanik** (nichtrelativistische Quantenmechanik; 1. Ideen zur Feldquantisierung)
- 1926 Pauli: **Wasserstoffatom im Rahmen der Matrizenmechanik**
- 1925/1926 Dirac: „**Transformationstheorie**“; Operatoren, kanonische Quantisierung
- 1926 **Wellenmechanik; Wasserstoffatom als Eigenwertproblem**
- 1926 Born: **Wahrscheinlichkeitsinterpretation**

Atomphysik und Relativitätstheorie

- 1928 Dirac: **relativistische Wellengleichung für Spin-1/2-Teilchen** (Dirac-Gleichung)
 - Erklärung für magnetisches Moment des Elektrons: Landé-Faktor $g_e = 2$
 - Vorhersage der Existenz von **Antielektronen/Positronen**
 - korrekte Beschreibung der **Feinstruktur des Wasserstoffspektrums**
- Relativistische Quantenfeldtheorie
 - 1925 Jordan: 1. Idee zur Feldquantisierung (in „Dreimänner-Arbeit“)
 - 1927 Dirac: Quantisierung des elektromagnetischen Feldes (**Quantenelektrodynamik (QED)**) „2. Quantisierung“
 - 1930er Heisenberg, Pauli, Jordan, Wigner, … Quantenfeldtheorie
 - Problem: Streuprozesse (**S-Matrix**) nur mit **Störungstheorie** beschreibbar
 - Divergente Korrekturen in höherer Ordnung
 - 1947-1948 Bethe, Feynman, Schwinger: **Renormierungstheorie**
 - motiviert durch Entdeckung der „Lamb-Shift“ beim Wasserstoffatom (**QED-Strahlungskorrekturen**)
 - Schwinger 1948: **anomales magnetisches Moment des Elektrons**
 - QED vs. Experiment: Übereinstimmung g_e auf 13 Dezimalstellen!

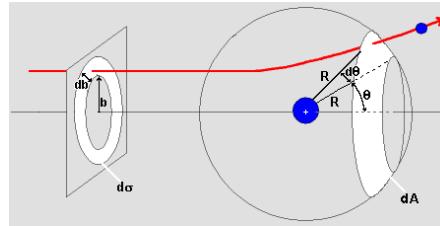
Kernphysik

- gebundene Zustände aus Z Protonen und N Neutronen (Nukleonen); Massenzahl $A = Z + N$
- Bezeichnung: ^{16}O Sauerstoffatom ($Z = 8, A = 16$)
- braucht zusätzliche **starke Wechselwirkung** zwischen Nukleonen (Coulomb-Abstoßung zwischen Protonen!)
- Eigenschaften aus **Streu-Experimenten**
- Elektron-Kern-Streuung \Rightarrow **Kernradien, Ladungsverteilungen („Formfaktoren“)**

- Kernradien (Ladungsradien): $R = r_0 A^{1/3}$ mit $r_0 \simeq 1.21 \text{ fm}$ ($1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m} = 1 \text{ Fermi}$)
- Nukleon-Kern-Streuung \Leftrightarrow **Wechselwirungspotential**
- **Deuteron** (einziger gebundener Zweinukleonenzustand $d = {}^2\text{H}$)

Streuquerschnitt

- Wirkungsquerschnitt (Streuquerschnitt)



$$\frac{d\sigma}{d^2\Omega} = \frac{\text{Anzahl von Teilchen pro Zeit und Raumwinkelement}}{\text{Fluss der einlaufenden Teilchen}}$$

- \vec{j} : Fluss = Teilchenzahlstromdichte = Zahl von Teilchen pro Fläche pro Zeit $\Rightarrow [\sigma] = \text{Fläche}$
- übliche Einheit: „barn“ $1 \text{ b} = 10^{-28} \text{ m} = (10 \text{ fm})^2$

Formfaktor

- Coulomb-Streuung: Streuung eines z.B. Elektrons an punktförmiger Ladung Ze
- **Rutherford-Streuquerschnitt**

$$\frac{d\sigma_{\text{Punkt}}}{d^2\Omega} = \left(\frac{Ze^2}{4E} \right)^2 \frac{1}{\sin^4(\vartheta/2)}$$

- E : kinetische Energie der einlaufenden Elektronen
- Streuung an ausgedehnter Ladungsverteilung $\rho(\vec{r})$

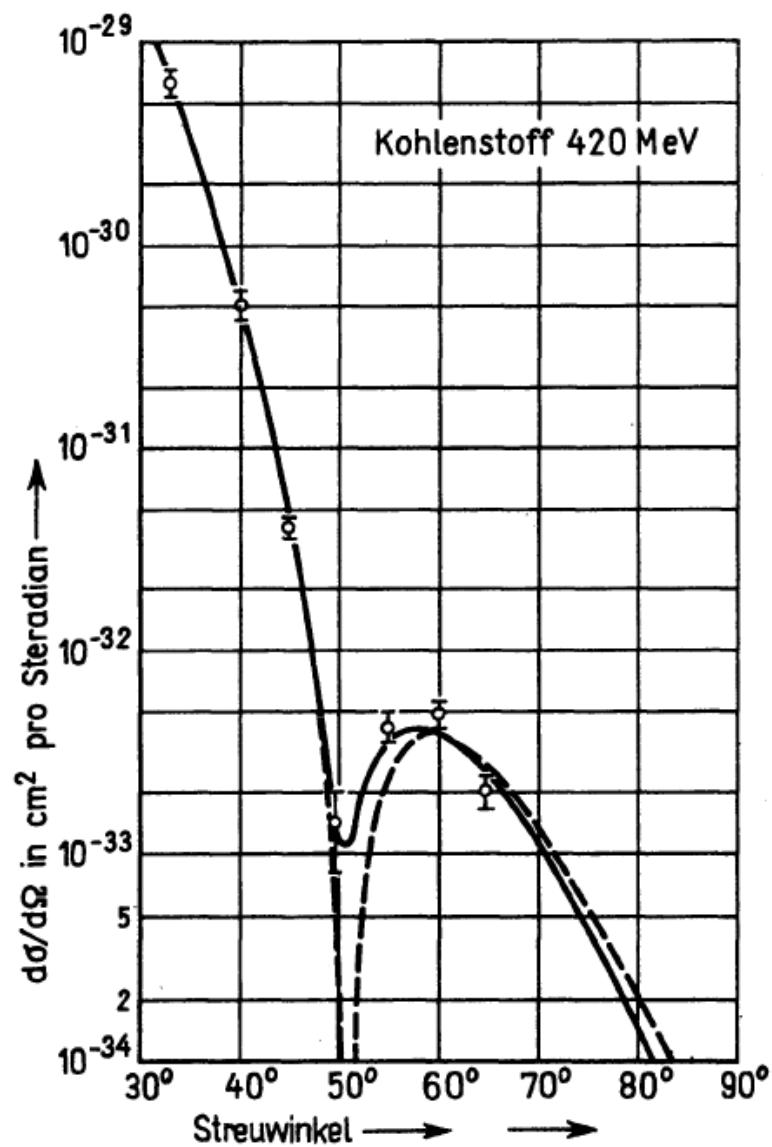
$$\frac{d\sigma_{\text{Vert}}}{d^2\Omega} = \frac{d\sigma_{\text{Punkt}}}{d^2\Omega} |F(\vec{q})|^2$$

- \vec{q} : Impulsübertrag bei der Streuung $\vec{q} = \vec{p}_{\text{ein}} - \vec{p}_{\text{aus}}$
- Fermis goldene Regel (1. Ordnung Störungstheorie für Streuprozess): **Formfaktor**

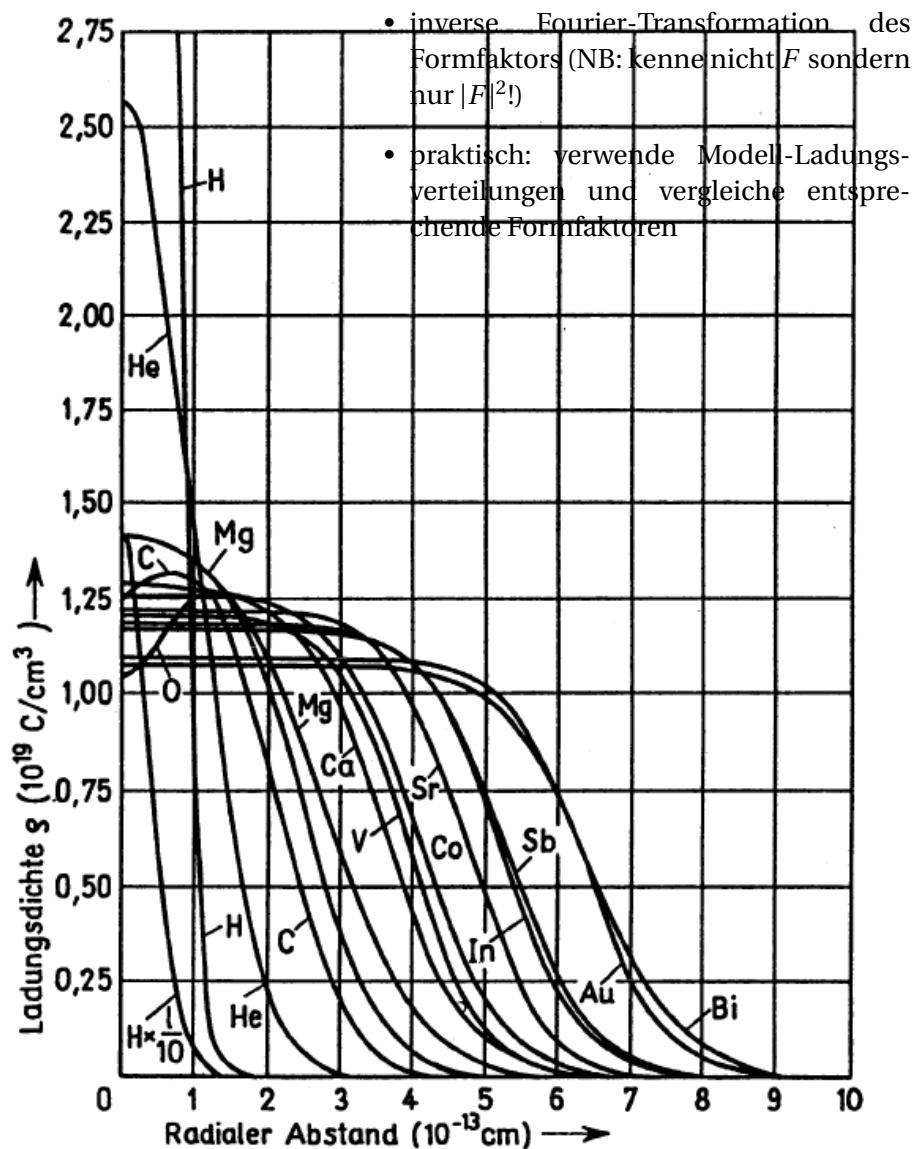
$$F(\vec{q}) = \frac{1}{e} \int_{\mathbb{R}^3} d^3 r \rho(\vec{r}) \exp\left(\frac{i\vec{q} \cdot \vec{r}}{\hbar}\right)$$

- NB: kleine Stoßimpulse \Rightarrow „schlechte Ortsauflösung“ \Rightarrow Kern „punktformig“
- **Fraunhofer-Beugung**: Beugungsbild = Fouriertransformierte der Blende

Formfaktor

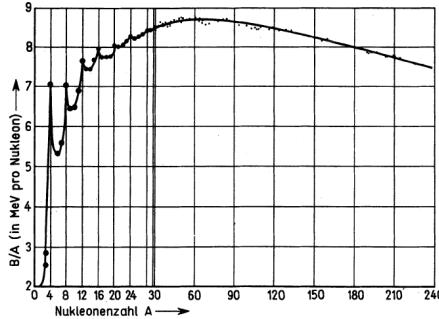


Ladungsdichteverteilung in Kernen



Bindungsenergien von Kernen

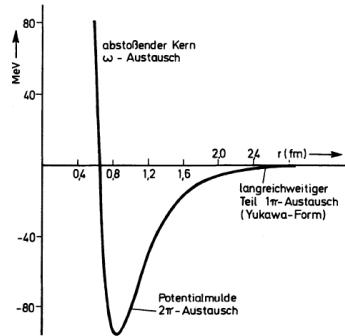
- Kernmasse: $M = Z m_p + (A - Z) m_n - \textcolor{red}{B}/c^2$ („ $E = m c^2$ “)



- Schalenmodell (Nobelpreis 1963: Maria Goeppert-Mayer, J. Hans D. Jensen)
- „magische Zahlen“; Spin-Bahn-Kopplung der Kernkräfte

Nukleon-Nukleon-Potential

- effektive Potentiale: empirisch bestimmt aus Kernstruktur, NN -Streuung
- effektive hadronische QFT-Modelle: π -, $\pi\pi$ -, ω -Meson-Austausch
- Hideki Yukawa 1938: Vorhersage Mesonen (Pionen); Nobelpreis 1949
- moderne Variante: chiral perturbation theory (QCD-basiert)



3 Relativistische Quantenfeldtheorie und Standardmodell

Relativistische QFT

Relativistische Quantenfeldtheorie

- Relativistische (hochenergetische) Stöße zwischen Teilchen: Erzeugungs- und Vernichtungsprozesse
- QM mit fester Teilchenzahl nicht mehr anwendbar!
- Ausweg: Quantenfeldtheorie mit Hilbertraum zur Beschreibung von Systemen nicht festgelegter Teilchenzahl
- weiteres Argument: relativistische Kausalität unverträglich mit QM („erste Quantisierung“)
- Beobachtung: Gleichartige Teilchen ununterscheidbar
- zwei grundlegende Sorten: Bosonen und Fermionen
- Hilbertraum unbestimmter Teilchenzahl
- einzelnes Teilchen durch Impuls-Spin-Zustände $|\vec{p}, \sigma\rangle$ bestimmt
- Details (weitgehend) festgelegt durch Poincaré-Symmetrie des Minkowski-Raums

Relativistische Quantenfeldtheorie

- Definiere nun $|\Omega\rangle$ als „Vakuumzustand“ (kein Teilchen vorhanden)
- und Erzeugungs- und Vernichtungsoperatoren (cf. harmonischer Oszillator!)

$$|\vec{p}_1, \sigma_1; \vec{p}_2, \sigma_2; \dots; \vec{p}_N, \sigma_N\rangle = \hat{a}^\dagger(\vec{p}_1, \sigma_1) \hat{a}^\dagger(\vec{p}_2, \sigma_2) \dots \hat{a}^\dagger(\vec{p}_N, \sigma_N) |\Omega\rangle$$

- Bosonen \Leftrightarrow wie beim harmonischen Oszillator *Kommutatoren*

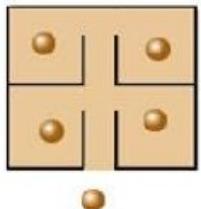
$$[\hat{a}(\vec{p}_1, \sigma_1), \hat{a}(\vec{p}_2, \sigma_2)] = 0, \quad [\hat{a}(\vec{p}_1, \sigma_1), \hat{a}^\dagger(\vec{p}_2, \sigma_2)] = \delta^{(3)}(\vec{p}_1 - \vec{p}_2) \delta_{\sigma_1 \sigma_2}$$

- $|\vec{p}_1, \sigma_1; \vec{p}_2, \sigma_2; \dots; \vec{p}_N, \sigma_N\rangle$ ändert sich nicht durch Vertauschen zweier Einzelchenzustände im N -Teilchenzustand
- Fermionen \Leftrightarrow Anti-Kommutatoren ($\{\hat{A}, \hat{B}\} = \hat{A}\hat{B} + \hat{B}\hat{A}$):

$$\{\hat{a}(\vec{p}_1, \sigma_1), \hat{a}(\vec{p}_2, \sigma_2)\} = 0, \quad \{\hat{a}(\vec{p}_1, \sigma_1), \hat{a}^\dagger(\vec{p}_2, \sigma_2)\} = \delta^{(3)}(\vec{p}_1 - \vec{p}_2) \delta_{\sigma_1 \sigma_2}$$

- $|\vec{p}_1, \sigma_1; \vec{p}_2 \sigma_2; \dots; \vec{p}_N, \sigma_N\rangle$ ändert Vorzeichen durch Vertauschen zweier Einteilchenzustände im N -Teilchenzustand
- Fermionen \Leftrightarrow Paulisches Auschließungsprinzip
- Pauli-Prinzip \Leftrightarrow Schalenaufbau der Atome, Periodensystem der Elemente

Bosonen und Fermionen und rel. QFT

| | | Fermionen | Bosonen |
|--|---------------------|---|---------------------|
|  | Leptonen und Quarks | Spin = $\frac{1}{2}$ | Spin = 1^* |
|  | Baryonen (qqq) | Spin = $\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots$ | Spin = 0, 1, 2, ... |

- notwendige Folge der relativistischen Raum-Zeit-Symmetrie
- für ununterscheidbare Teilchen: Bosonen oder Fermionen
- Spin-Statistik-Theorem:
 - Fermionen: nur ein Teilchen pro „Zimmer“ Teilchen mit halbzahligem Spin
 - Bosonen: bevorzugen Aufenthalt im gleichen „Zimmer“ Teilchen mit ganzzahligem Spin

Antiteilchen und rel. QFT

- notwendige Folge der relativistischen Raum-Zeit-Symmetrie \leftrightarrow relativistische Kausalität (Signal-Ausbreitungsgeschwindigkeit $\leq c$)

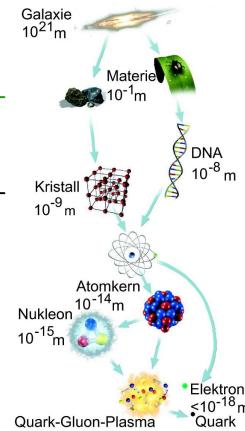
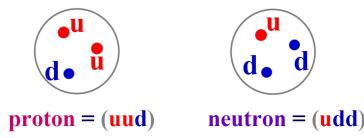
- „Einstein-Lokalität“ \leftrightarrow **Mikrokausalität**: $[\mathbf{O}_1(x), \mathbf{O}_1(y)] = 0$ für $(x-y)^2 < 0$ (Minkowski-Produkt)
- und damit Energie für alle N -Teilchenzustände **positiv** ist
- Vakuum $|\Omega\rangle$ ist Energiezustand zum Energieniveau $E = 0$, Gesamtimpuls $\vec{P} = 0$ und Gesamtdrehimpuls $\vec{J} = 0$
- Notwendigkeit der **Antimaterie** (Dirac 1928 für Spin-1/2-Teilchen)
- zu jedem Teilchen gibt es ein **Antiteilchen** mit exakt gleicher Masse und gleichem Spin aber entgegengesetzten Ladungen (z.B. Elektron mit Ladung $-e$ und Positron mit Ladung $+e$)
- gilt für alle Teilchensorten, auch Bosonen
- es gibt auch **strikt neutrale Teilchen** (Teilchen identisch mit Antiteilchen) z.B. neutrales Pion, Photon, vielleicht Neutrinos(?)

Wechselwirkungen und relativistische QFT

- neben Masse und Spin weitere Quantenzahlen: **Ladungen**
- beschreiben Kopplungsstärke an Felder, die Wechselwirkungen vermitteln (**Lokalität wie in klassischer E-Dynamik!**)
- **Fundamentale Wechselwirkungen**
 - **elektromagnetische Wechselwirkung**: direkt aus „makroskopischer Anschauung“ bekannt; elektrische und magnetische Kraftwirkung Licht u.a. **elektromagnetische Wellen**
 - **starke Wechselwirkung**: hält Atomkerne zusammen (kompliziertere Ladungsstruktur, s.u.)
 - **schwache Wechselwirkung**: β -Zerfall (kompliziertere Ladungsstruktur, s.u.)

Elementarteilchen

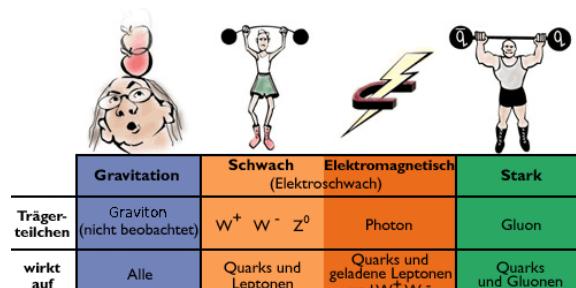
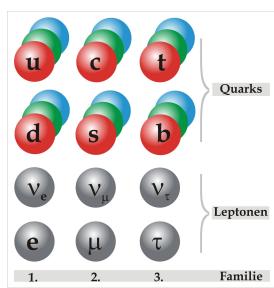
- Elektronen sind elementar
- Atomkern setzt sich zusammen aus **Nukleonen**=Protonen und Neutronen
- Nukleonen bestehen aus **up-** und **down-** Quarks



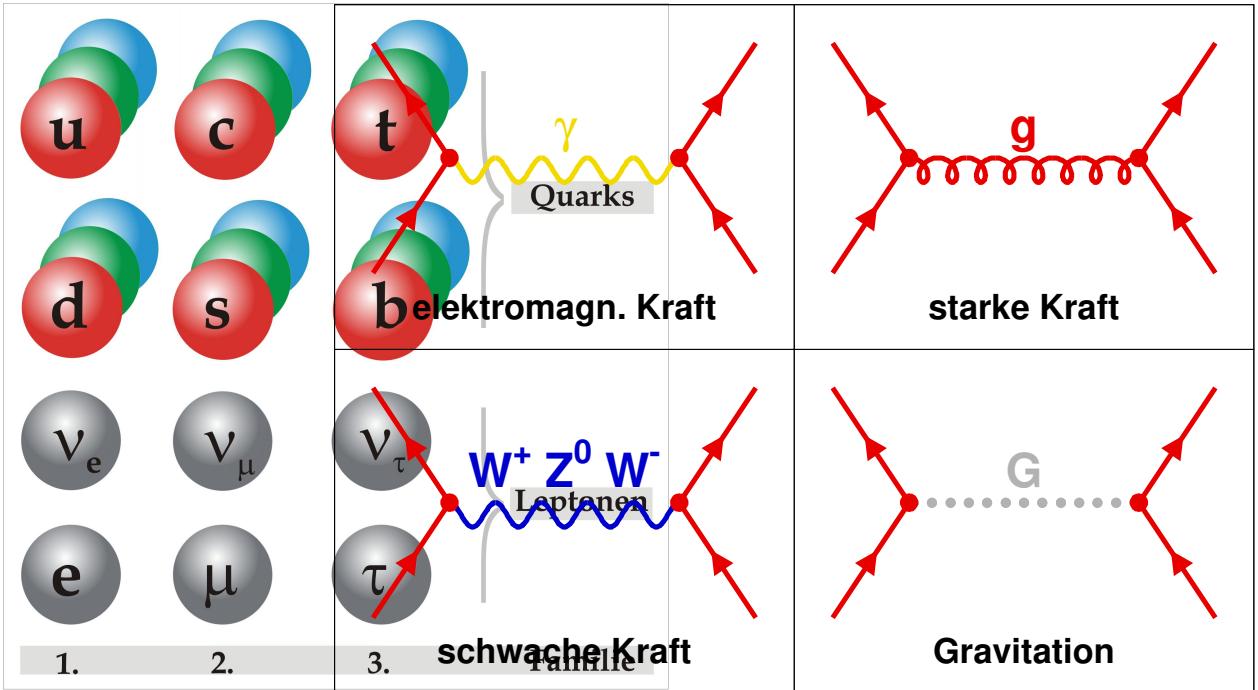
- **up**-Quark: Ladung $+2/3$, Masse $m_u = 3 \text{ MeV}/c^2$ **down**-Quark: Ladung $-1/3$, Masse $m_d = 6 \text{ MeV}/c^2$ Elektron: Ladung -1 , Masse $m_e = 0.5 \text{ MeV}/c^2$

Die fundamentalen Kräfte

- Was hält die Teilchen zusammen (\Rightarrow **Materie**)?
- Fundamentale Kräfte oder Wechselwirkungen
- Gesetze werden von **Symmetrien** bestimmt
- e.g., **Erhaltung der elektrischen Ladung** \Leftrightarrow „Kraftvermittlungsteilchen“ (Wellenfelder \leftrightarrow Teilchen) für elektromagnetische Wechselwirkung **Photon**



„Materieteilchen“ und „Kraftteilchen“



- „Materienteilchen“ Quarks und Leptonen Spin $s = 1/2$
- „Kraftteilchen“ Gluonen, Photonen (γ), W^\pm , Z^0 Spin $s = 1$
- Symmetrie der Wechselwirkungen:
 - Elementare Masse durch spontane Symmetriebrechung
 - Higgsboson \Rightarrow Masse für Quarks, Leptonen, W, Z -Bosonen

4 Symmetrien und das Standardmodell

Symmetrien und Standardmodell

Symmetrien als Grundprinzip der theoretischen Physik

- **Emmy Noether 1918:** Raum-Zeit-Symmetrien \leftrightarrow Erhaltungssätze
- **Newton'sche Mechanik:**
 - **Raum** euklidisch \Rightarrow symmetrisch unter Raumtranslationen, Drehungen um beliebigen Punkt
 - **Raum-Zeit-Mannigfaltigkeit:** Zeittranslationsinvarianz; Spezielles Relativitätsprinzip \Leftrightarrow Invarianz unter **Galilei**-Boosts
 - **Erhaltungsgrößen:** Zeittranslationsinvarianz \leftrightarrow **Energieerhaltung**; räumliche Translationsinvarianz \leftrightarrow **Impulserhaltung**; Drehinvarianz \leftrightarrow **Drehimpulserhaltung**; **Galilei**-Boost-Invarianz \leftrightarrow **Schwerpunktssatz** (**massen**-gewichtete Summe der Ortsvektoren der Konstituenten der Materie bewegt sich geradlinig gleichförmig)

Symmetrien als Grundprinzip der theoretischen Physik

- **Emmy Noether 1918:** Raum-Zeit-Symmetrien \leftrightarrow Erhaltungssätze
- **Spezielle Relativitätstheorie**
 - **Raum** euklidisch für inertielle Beobachter \Rightarrow symmetrisch unter Raumtranslationen, Drehungen um beliebigen Punkt
 - **Raum-Zeit-Mannigfaltigkeit:** Zeittranslationsinvarianz; Spezielles Relativitätsprinzip \Leftrightarrow Invarianz unter **Lorentz**-Boosts
 - **Erhaltungsgrößen:** Zeittranslationsinvarianz \leftrightarrow **Energieerhaltung**; räumliche Translationsinvarianz \leftrightarrow **Impulserhaltung**; Drehinvarianz \leftrightarrow **Drehimpulserhaltung**; **Lorentz**-Boost-Invarianz \leftrightarrow **Schwerpunktssatz** (**energie**-gewichtete Summe der Ortsvektoren der Konstituenten der Materie bewegt sich geradlinig gleichförmig)
- Mathematik zeigt: **Spezielles Relativitätsprinzip** \Leftrightarrow Raumzeit entweder Galilei-Newton- oder Einstein-Minkowski-Raumzeit!

Symmetrien von Teilchen

- Symmetrie als Ordnungsprinzip für Teilchenzoo
- einfaches Beispiel: Isospin für Proton und Neutron (Heisenberg 1932)

- Proton und Neutron haben fast gleiche Masse $m_N c^2 \simeq 938 \text{ MeV}$
- Proton und Neutron als ein Teilchen (**Nukleon**) mit zusätzlicher **Quantenzahl** (Isospin)
- Isospin analog zu Spin, aber *nicht* als Drehimpuls bzw. Drehung im geometrischen Raum
- Drehungen in „Flavor-Raum“
- Isospin $T = 1/2$, $T_3 = \text{diag}(1/2, -1/2)$
- Wirken auf 2D komplexen Isospinraum der Quantenzustände: Gruppe $\text{SU}(2)$ (2D $\mathbb{C}^{2 \times 2}$ -Matrizen mit $\det U = 1$ und $UU^\dagger = 1$)
- Physik der **starken WW** (näherungsweise) invariant unter **Isospinrotationen**
- Proton und Neutron verhalten sich bzgl. starker WW (fast) gleich

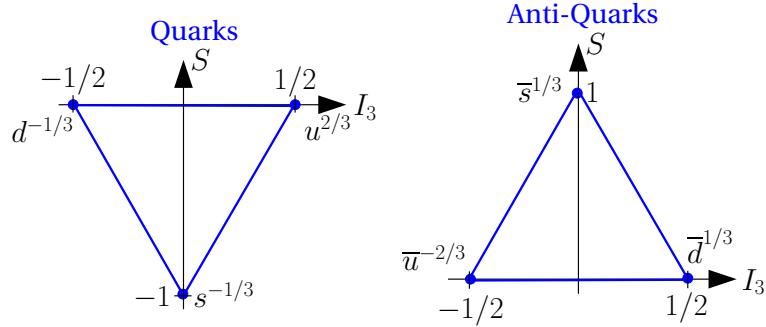
Der achtfache Pfad

- ab den 1950-1960ern wurde in Beschleunigerexperimenten ein ganzer **Teilchenzoo** entdeckt
- die meisten sind **Hadronen: Teilchen, auf die starke Kraft wirkt**
- Gell-Mann, Zweig, Ne'eman (1961): alle Hadronen als gebundene Zustände von **Spin-1/2-Teilchen mit Ladungen $-1/3$ und $+2/3$**
- Gell-Mann: Wie sollen sie heißen? **Quarks!**
- **Symmetrieprinzipien** brachten Ordnung ins Chaos:
 - drei Quarks (**up, down, strange**)
 - drei Flavors: $\text{SU}(3)$ -Symmetrie; (Zustände nur aus (up,down) Isospin $\text{SU}(2)$ -Untergruppe)
- Murray Gell-Mann: Nobel Prize in Physics (1969)



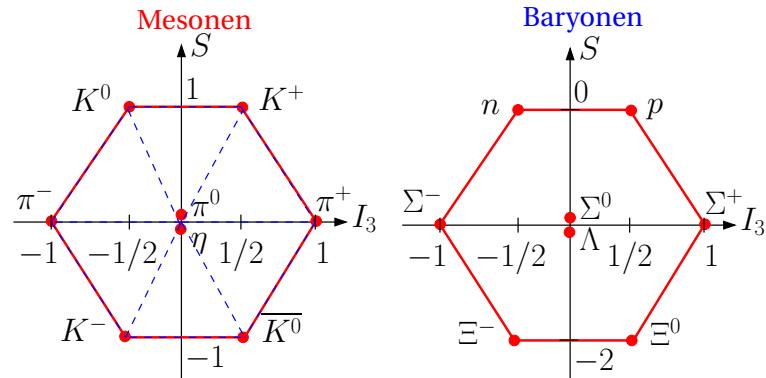
Flavor-SU(3): Der achtfache Pfad

- Symmetrie liefert zwei Quantenzahlen: Isospin und Strangeness
- Isospin und Strangeness erhalten bei starken Wechselwirkungen



Flavor-SU(3): Der achtfache Pfad

- Mesonen: „addiere“ ein Quark und ein Anti-Quark (Bsp: $|\pi^-\rangle = |d\bar{u}\rangle$)
- Baryonen: “addiere” drei Quarks (Bsp: $|p\rangle = |uud\rangle$)



Farbe für Quarks

- Problem: man erhält nur alle Hadronen, wenn man drei Quarks im gleichen Zustand erlaubt!
- ABER: Quarks müssen Spin 1/2 besitzen
- sie müssen daher Fermionen sein
(die nicht im gleichen Raum im Fermi-Hotel sein können!)

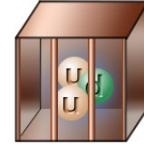
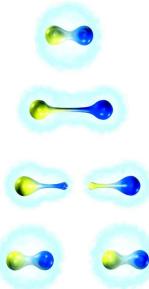
- andererseits funktioniert das Modell: vorhergesagtes Baryon $|\Omega^-\rangle = |sss\rangle$ wurde gefunden!
- Lösung: Jede Quarksorte kommt in drei „Farben“ vor
- Alle Quarks von demselben Flavor sind gleich, können aber verschiedene Farbquantenzahlen besitzen \Rightarrow Symmetrie!

Quantenchromodynamik

- Noch mehr Probleme: bislang hat noch niemand freie Quarks gefunden!

Befreiung der Quarks:

⇒ versuche Meson auseinanderzubrechen



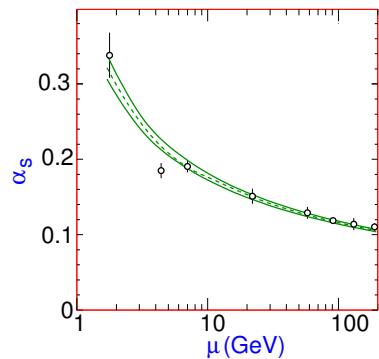
- Quarks in Hadronen gefangen
- 1973: Gross und Wilczek, Politzer
- Theorie der starken WW basierend auf **Farb-Symmetry!**
- Kraft **wird stärker** für größere Abstände
- Grund: Kraftteilchen tragen selbst **Farbe**

Man kann das Meson nicht auseinanderbrechen. Stattdessen produziert man mehr Hadronen!

Quantenchromodynamik

- Lokale Farb-Eichsymmetrie der Quarks (Farbladung **erhalten**)
- Kraftteilchen („Eichboson“): Gluonen (Spin 1)
- Materieteilchen mit Farbladung: Quarks (spin 1/2)

- Eich-Theorie: Quantenchromodynamik (QCD) (griechisch: chromos=Farbe)
- Kraft wird schwächer bei kurzen Abständen (hohen Energien/Impulsen)



Physik-Nobel-Preis 2004:



Gross, Wilczek, Politzer

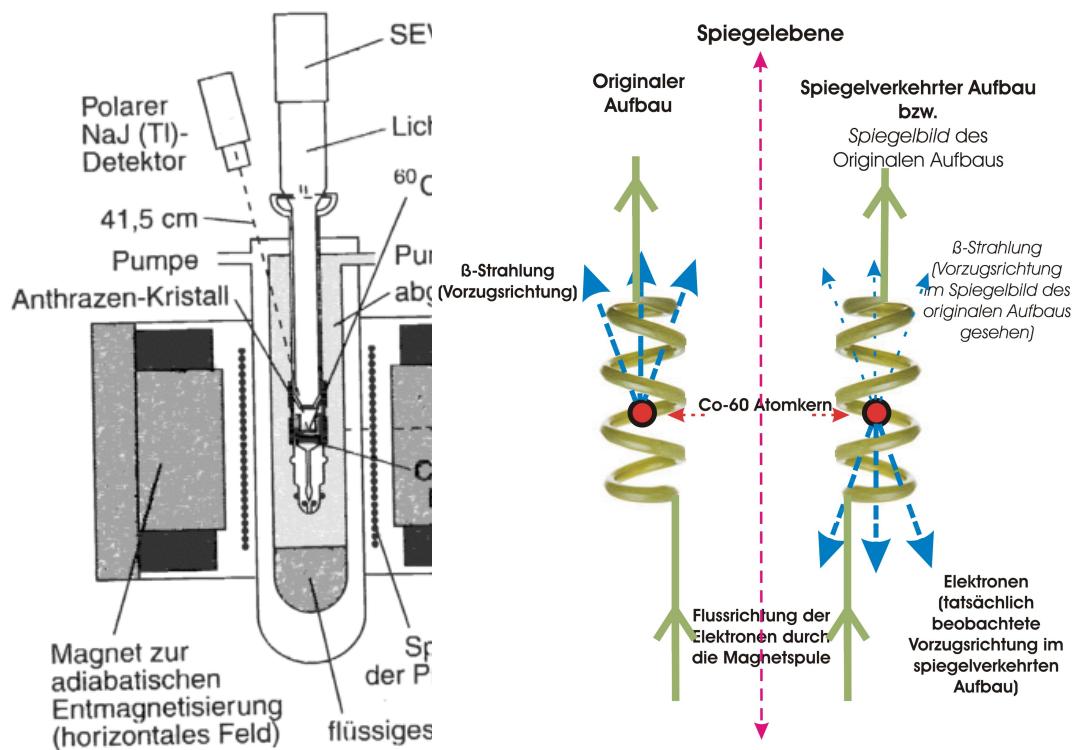
Elektroschwaches Standardmodell

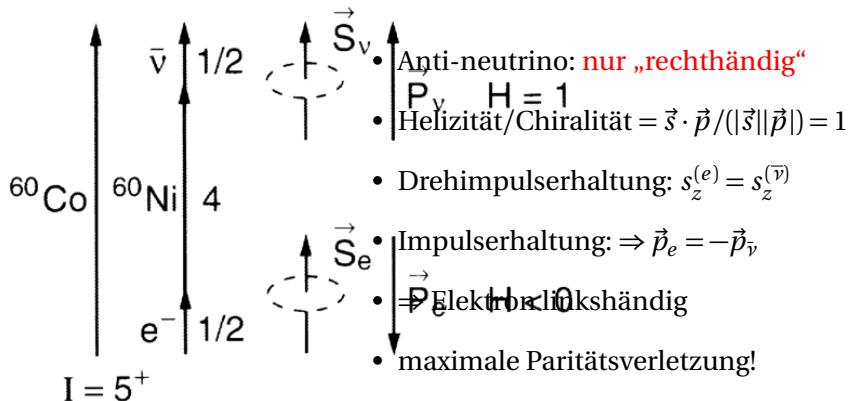
- Glashow, Salam, Weinberg (Nobelpreis 1979)



- lokale Eichsymmetrie (Gruppe $SU(2)_{\text{wiso}} \times U(1)_{\text{wY}}$)
- Flavor-Symmetrie: schwacher Isospin und schwache Hyperladung
- Eichbosonen sollten Masse haben (schwache WW sehr kurzreichweitig)
- Dilemma: **Eichsymmetrie verbietet Masse für Eichbosonen!**
- schwache Wechselwirkung **verletzt Symmetrie unter Spiegelungen**

Wu-Experiment



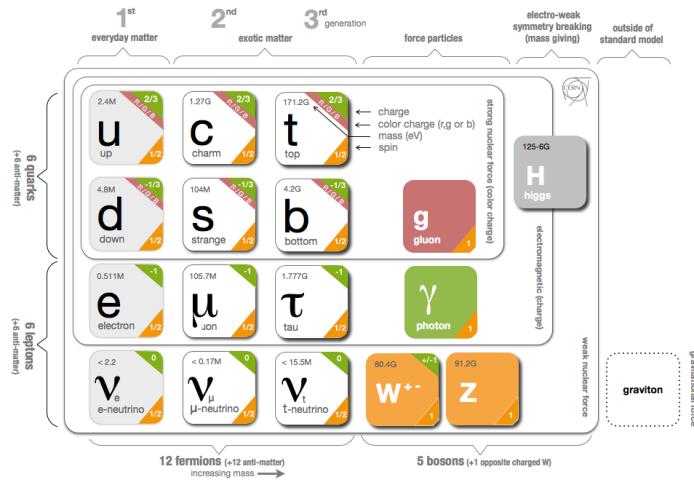


Higgs-Mechanismus

- schw. WW koppelt nur an linkshändige Teilchen/rechtshändige Antiteilchen
- Eichsymmetrie chiral \Rightarrow auch Quarks und Leptonen müßten masselos sein!
- Ausweg: Higgs-Mechanismus
- Führe Higgs-Feld ein (Bosonen mit Spin 0, WISO 1/2)
- WW mit Eichbosonen, Quarks und Leptonen erfüllt Eichsymmetrie
- $\langle \Omega | \nu | \Omega \rangle \neq 0 \Rightarrow$ 3 von 4 Eichbosonen, Quarks und Leptonen werden massiv
- Eichsymmetrie immer noch erfüllt; ein masseloses Eichboson übrig: Photon
- Vorhersage: es muß (mindestens) ein Higgs-Boson geben
- wurde 2012 am LHC gefunden (Physik-Nobel-Preis 2013)



Das endgültige Standardmodell: Übersicht



[graphics from <http://www.isgtw.org/spotlight/go-particle-quest-first-cern-hackfest>]

Bibliography