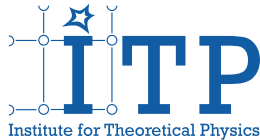


Einführung in die theoretische Kern- und Teilchenphysik

Überblick

Hendrik van Hees

Goethe University Frankfurt



Outline

Aufbau der Materie: Längen- und Energieskalen

Kern-Struktur (nicht-rel. Vielteilchentheorie)

Relativistische Quantenfeldtheorie und Standardmodell

Symmetrien und das Standardmodell

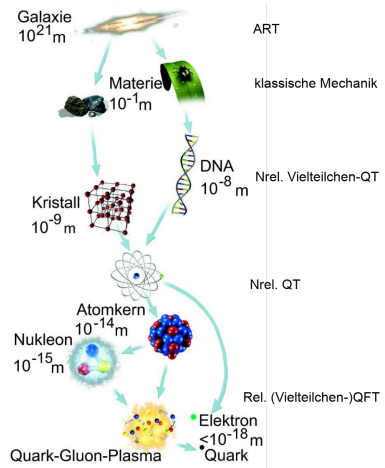
Aufbau der Materie

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!

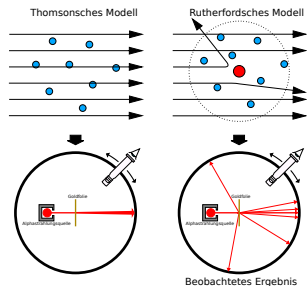
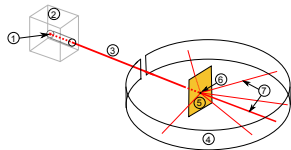
Aufbau der Materie: Längen- und Energieskalen

- ▶ 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)

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

Kern-Struktur

Atomphysik und Quantenmechanik

- ▶ gebundene Zustände von Z Elektronen mit Kern mit Z Protonen
- ▶ **elektromagnetische Wechselwirkung** sehr gut bekannt (Maxwell-Theorie)
- ▶ einfachstes 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 Relativistätstheorie

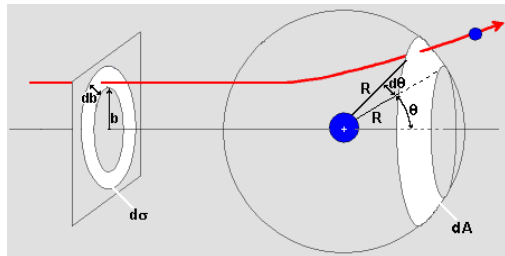
- ▶ 1928 Dirac: **relativistische Wellengleichung für Spin-1/2-Teilchen** (Dirac-Gleichung)
 - ▶ Erklärung für magnetisches Moment des Elektrons: Landé-Faktor $g_e = 2$
 - ▶ Vorhersage der Existenz von **Antielektronen/Positronen**
 - ▶ korrekte Beschreibung der **Feinstruktur des Wasserstoffspektrums**
- ▶ 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 Wasserstoff atom (**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 $\Leftrightarrow$ **Wechselwirkungspotential**
- ▶ **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“ $1b = 10^{-28}\text{m} = (10\text{ fm})^2$

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 $\rho(\vec{r})$

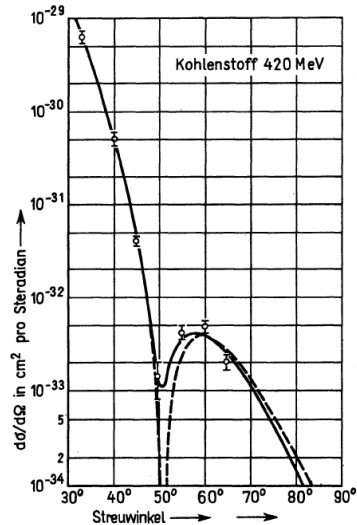
$$\frac{d\sigma_{\text{Vert}}}{d^2\Omega} = \frac{d\sigma_{\text{Punkt}}}{d^2\Omega} |F(\vec{q})|^2$$

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

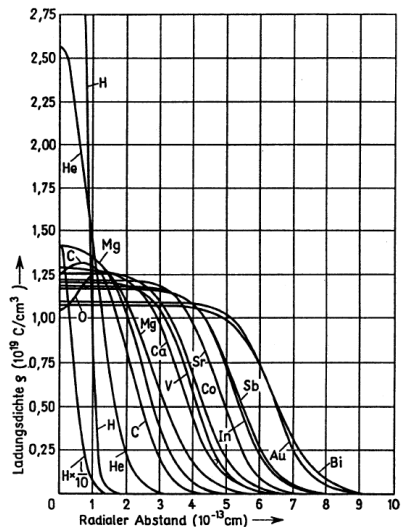
$$F(\vec{q}) = \frac{1}{e} \int_{\mathbb{R}^3} d^3r \rho(\vec{r}) \exp\left(\frac{i\vec{q} \cdot \vec{r}}{\hbar}\right)$$

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

Formfaktor



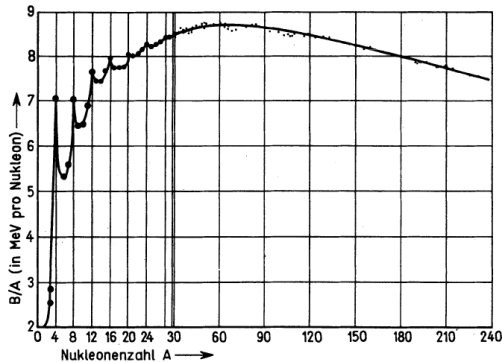
Ladungsdichteverteilung in Kernen



- ▶ inverse Fourier-Transformation des Formfaktors (NB: kenne nicht F sondern nur $|F|^2$!)
- ▶ praktisch: verwende Modell-Ladungsverteilungen und vergleiche entsprechende Formfaktoren

Bindungsenergien von Kernen

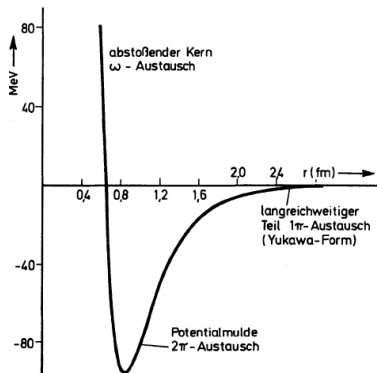
- ▶ Kernmasse: $M = Z m_p + (A - Z) m_n - B/c^2$ („ $E = mc^2$ “)



- ▶ 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)



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!**)

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

- ▶ **Bosonen $\Leftrightarrow$ wie beim harmonischen Oszi *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 Einteilchenzustände im N -Teilchenzustand

- ▶ **Fermionen $\Leftrightarrow$ *Anti-Kommutatoren*** ($\{\hat{A}, \hat{B}\} = \hat{A}\hat{B} + \hat{B}\hat{A}$):

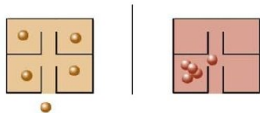
$$\{\hat{a}(\vec{p}_1, \sigma_1), \hat{a}(\vec{p}_2, \sigma_2)\} = 0, \quad \{\hat{a}(\vec{p}_1, \sigma_1), \hat{a}^\dagger(\vec{p}_2, \sigma_2)\} = \delta^{(3)}(\vec{p}_1 - \vec{p}_2) \delta_{\sigma_1 \sigma_2}$$

- ▶ $|\vec{p}_1, \sigma_1; \vec{p}_2, \sigma_2; \dots; \vec{p}_N, \sigma_N\rangle$ **ändert Vorzeichen** durch Vertauschen zweier Einteilchenzustände im N -Teilchenzustand

- ▶ Fermionen $\Leftrightarrow$ **Paulisches Ausschließungsprinzip**

- ▶ 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^*	Kraft-Träger Teilchen
Baryonen (qqq)	Spin = $\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots$	Spin = 0, 1, 2, ...	Mesonen (q $\bar{q}$)

- ▶ 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

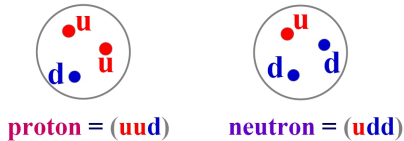
- ▶ notwendige Folge der relativistischen **Raum-Zeit-Symmetrie**
↔ **relativistische Kausalität** (Signal-Ausbreitungsgeschwindigkeit $\leq c$)
- ▶ „Einstein-Lokalität“
↔ **Mikrokausalität**: $[\mathbf{O}_1(x), \mathbf{O}_1(y)] = 0$ für $(x - y)^2 < 0$ (Minkowski-Produkt)
- ▶ und damit Energie für alle N -Teilchenzustände **positiv** ist
- ▶ Vakuum $|\Omega\rangle$ ist Energieeigenzustand zum Energieeigenwert $E = 0$, 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

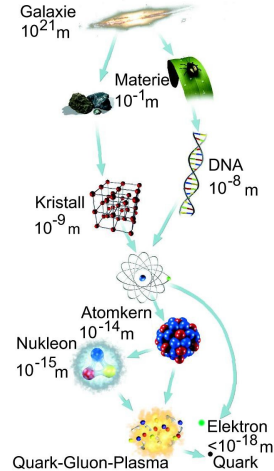
- ▶ neben Masse und Spin weitere Quantenzahlen: **Ladungen**
- ▶ beschreiben Kopplungsstärke an Felder, die Wechselwirkungen vermitteln
(**Lokalität wie in klassischer E-Dynamik!**)
- ▶ **Fundamentale Wechselwirkungen**
 - ▶ **elektromagnetische Wechselwirkung**: direkt aus „makroskopischer Anschauung“ 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

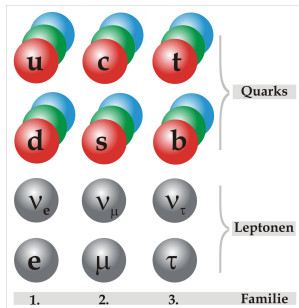


- ▶ up-Quark: Ladung $+2/3$, Masse $m_u = 3 \text{ MeV}/c^2$
- ▶ down-Quark: Ladung $-1/3$, Masse $m_d = 6 \text{ MeV}/c^2$
- ▶ Elektron: Ladung -1 , Masse $m_e = 0.5 \text{ MeV}/c^2$



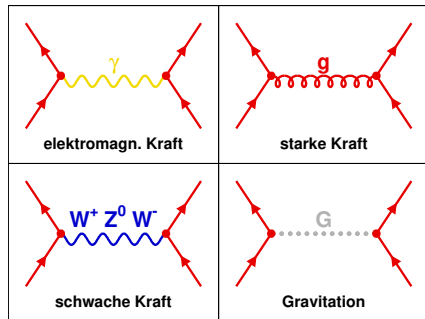
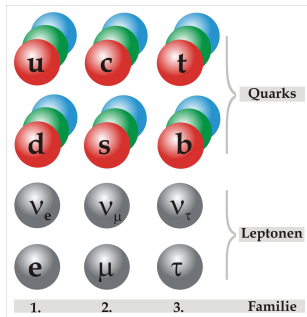
Die fundamentalen Kräfte

- ▶ 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**



	Gravitation	Schwach (Elektroschwach)	Elektromagnetisch	Stark
Träger- teilchen	Graviton (nicht beobachtet)	$W^+ W^- Z^0$	Photon	Gluon
wirkt auf	Alle	Quarks und Leptonen	Quarks und geladene Leptonen und $W^+ W^-$	Quarks und Gluonen

„Materieteilchen“ und „Kraftteilchen“



- ▶ „Materieteilchen“ **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**

Symmetrien und Standardmodell

Symmetrien als Grundprinzip der theoretischen Physik

- ▶ **Emmy Noether 1918:** Raum-Zeit-Symmetrien $\leftrightarrow$ Erhaltungssätze
- ▶ **Newtonsche 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
- ▶ einfachstes 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 $SU(2)$ (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

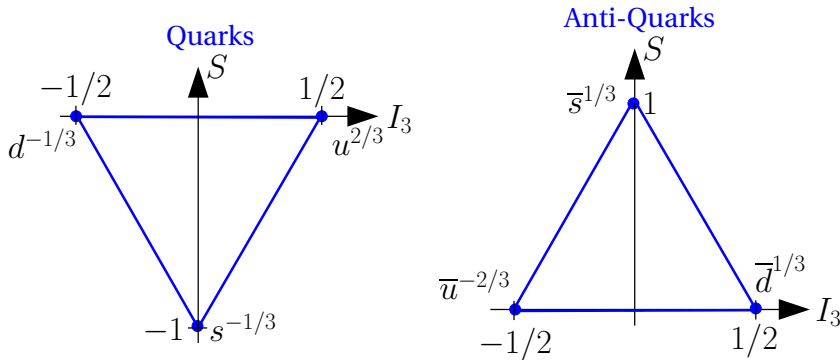
Der achtfache Pfad

- ▶ 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: SU(3)-Symmetrie; (Zustände nur aus (up,down) Isospin SU(2)-Untergruppe)
- ▶ Murray Gell-Mann: Nobel Prize in Physics (1969)



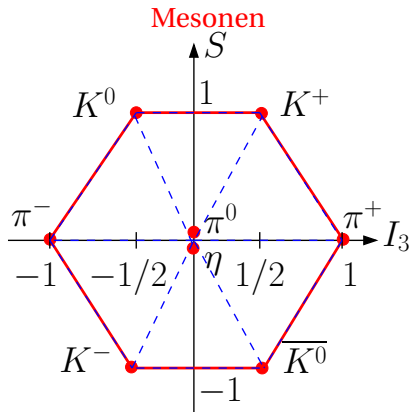
Flavor-SU(3): Der achtfache Pfad

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



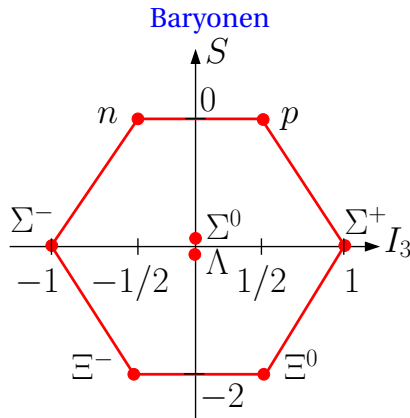
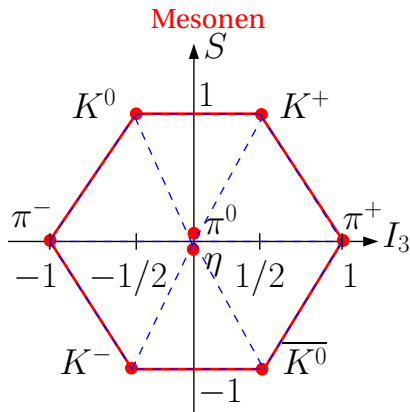
Flavor-SU(3): Der achtfache Pfad

- **Meson**: „addiere“ ein Quark und ein Anti-Quark (Bsp: $|\pi^- \rangle = |d \bar{u} \rangle$)



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 $|\Omega^- \rangle = |s s s \rangle$ wurde gefunden!

Farbe für Quarks

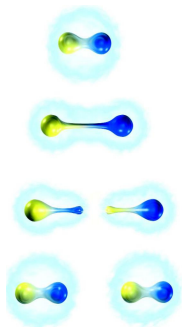
- ▶ Problem: man erhält nur alle Hadronen, wenn man drei Quarks im gleichen Zustand erlaubt!
- ▶ ABER: Quarks müssen Spin $1/2$ besitzen
- ▶ sie müssen daher Fermionen sein
(die nicht im gleichen Raum im Fermi-Hotel sein können!)
- ▶ andererseits funktioniert das Modell:
vorhergesagtes Baryon $|\Omega^- \rangle = |s s s \rangle$ 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

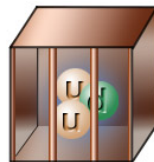
- Noch mehr Probleme: bislang hat noch niemand **freie Quarks** gefunden!

Befreiung der Quarks:

⇒ **versuche Meson auseinanderzubrechen**



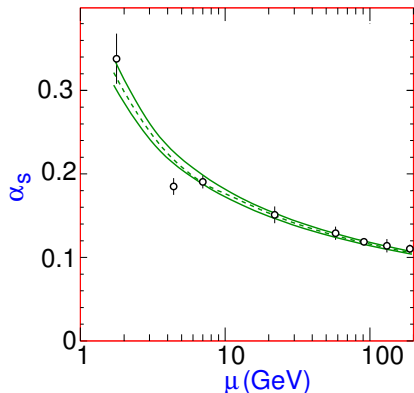
Man kann das Meson nicht auseinanderbrechen. Stattdessen
produziert man mehr Hadronen!



- 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**

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)



Photo from the Nobel Foundation archive.
Sheldon Lee Glashow



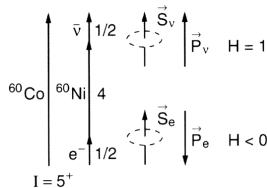
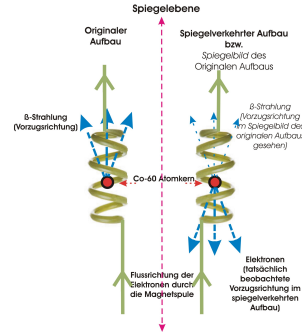
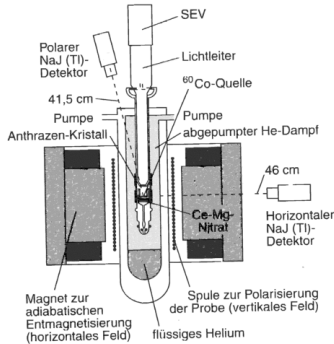
Photo from the Nobel Foundation archive.
Abdus Salam



Photo from the Nobel Foundation archive.
Steven Weinberg

- ▶ 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



- ▶ Anti-neutrino: **nur „rechthändig“**
- ▶ Helizität/Chiralität = $\vec{s} \cdot \vec{p} / (|\vec{s}| |\vec{p}|) = 1$
- ▶ Drehimpulserhaltung: $s_z^{(e)} = s_z^{(\bar{\nu})}$
- ▶ Impulserhaltung: $\Rightarrow \vec{p}_e = -\vec{p}_{\bar{\nu}}$
- ▶ $\Rightarrow$ Elektron linkshändig
- ▶ **maximale Paritätsverletzung!**

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)

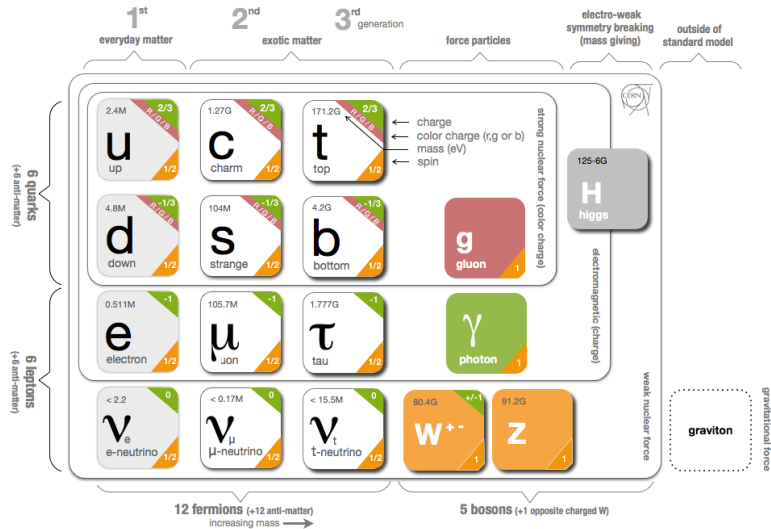


© Nobel Media AB. Photo: A. Mahmoud
François Englert



© Nobel Media AB. Photo: A. Mahmoud
Peter W. Higgs

Das endgültige Standardmodell: Übersicht



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

Bibliography I