

Moderne Physik: Elementarteilchenphysik, Astroteilchenphysik, Kosmologie

Ulrich Husemann
Humboldt-Universität zu Berlin
Sommersemester 2008

Termine

- Klausur
 - Prüfungsordnung sieht zweistündige Klausur vor
 - Termin: Donnerstag, 24.07.08
 - 9-11 Uhr s.t.
 - Raum: 2'101
 - Masterstudierende: 3 Wochen vor Beginn der Prüfungswoche anmelden (29.06.08)

Grundlagen der Teilchenphysik

Bosonen und Fermionen

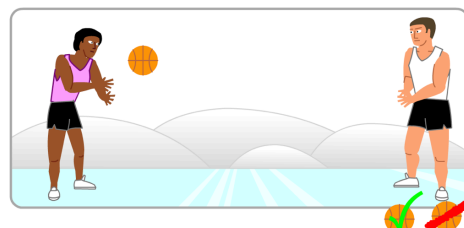
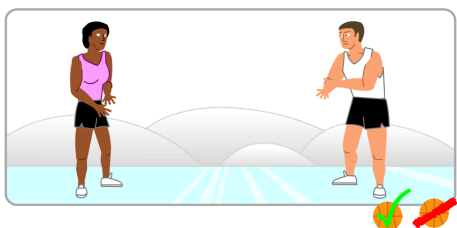
- Spin: interner Freiheitsgrad von Teilchen, der sich wie Drehimpuls verhält (punktförmig → es dreht sich nichts!)
 - Fermionen: Spin $\hbar/2, 3\hbar/2, 5\hbar/2, \dots$
 - Bosonen: Spin $\hbar, 2\hbar, 3\hbar, \dots$
- Pauli'sches Ausschließungsprinzip: keine zwei Fermionen im selben Quantenzustand
- Standardmodell: alle Teilchen Fermionen, alle Wechselwirkungen vermittelt von Bosonen

Quantenfelder

- Klassisches Feld: jedem Punkt im Raum wird zu jedem Zeitpunkt ein oder mehrere Zahlen zugeordnet:
 - Physikalisches Bild: harmonischer Oszillator - Kette gekoppelter Oszillatoren - Kontinuumslimit
 - Temperatur: skalares Feld (1 Zahl pro Raumzeitpunkt)
 - E-Feld: Vektorfeld (3 Zahlen pro Raumzeitpunkt)
- Quantenfeldtheorie:
 - Energie der Oszillatoren quantisiert
 - Sprung zwischen Energieniveaus: Erzeugung und Vernichtung von Feldquanten → physikalische Teilchen (quantisiertes E-Feld: Photonen)

Wechselwirkungen

- Wechselwirkungen (WW) zwischen Teilchen durch Austauschteilchen („Eichbosonen“) vermittelt



- Elektromagnetische WW
 - Alle elektrischen und magnetischen Phänomene
 - Austauschteilchen: Photon
 - Stärke bestimmt durch elektrische Ladung (Feinstrukturkonstante $\alpha = e^2/(4\pi\epsilon_0\hbar c) = 1/137$)

Wechselwirkungen

- Zusätzliche WW nötig zur Erklärung weiterer Naturphänomene:
 - Starke WW erklärt Bindung von p und n in Atomkern (stärker als elektromagnetische WW im Atomkern)
 - Schwache WW erklärt radioaktiven Zerfall: $n \rightarrow p e^- \nu_e$
- Stärke der WW und Lebensdauer von Teilchen (falls nicht durch Erhaltungssätze „geschützt“)
 - Starke WW: ca. 10^{-22} s
 - Elektromagnetische WW: ca. 10^{-16} s
 - Schwache WW $> 10^{-12}$ s

Symmetrien & Erhaltungssätze

- Mathematisch (Emmy Noether, 1918): zu jeder kontinuierlichen Symmetrie gibt es eine Erhaltungsgröße = „additive Quantenzahl“
- Moderne physikalische Theorien: aufgebaut auf Symmetrien (Heisenberg: „Am Anfang war die Symmetrie“)
- Beispiele:
 - Translationssymmetrie $x \rightarrow x'$: Impulserhaltung
 - Zeitliche Symmetrie $t \rightarrow t'$: Energieerhaltung
 - Quantenmechanische Phase: Ladungserhaltung

Erhaltene Quantenzahlen

- Energie/Impuls
- Elektrische Ladung
- Baryonenzahl → Proton als leichtestes Baryon stabil
 - +1 für Baryonen (p, n, ...), -1 für Antibaryonen
 - +1/3 für Quarks, -1/3 für Antiquarks
 - 0 für Mesonen und Leptonen
- Leptonenzahl: separat für jede Generation
 - +1 für Leptonen (e^- , ν_e), -1 für Antileptonen
 - 0 für Hadronen

Kapitel 6.1

Substruktur der Hadronen: Das Quark- Parton-Modell

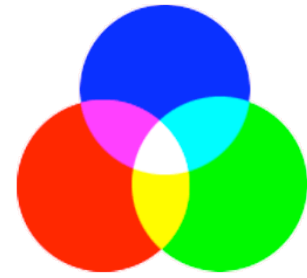
Der Teilchenzoo

- 1960er Jahre: Entdeckung von hunderten von „Elementarteilchen“ mit starker WW → „Teilchenzoo“
 - „Baryonen“: Fermionen, z.B. Proton, Neutron, Δ , Σ , Λ , ...
 - „Mesonen“: Bosonen, z.B. Pion, Kaon, ...
- Klassifizierungsschema (Murray Gell-Mann, 1964):
 - „Quarks“ (Phantasiename aus James Joyces „Finnegans Wake“)
 - Beschreibung aller bekannten „Elementarteilchen“ durch drei Quarks: up (u), down (d), strange (s)
 - Quarks: Fermionen mit drittelzahligen Ladungen:
 $q(u) = 2/3 e$, $q(d) = -1/3 e$, $q(s) = -1/3 e$

Konsequenzen aus Quarkmodell

- Klassifizierung der Hadronen:
 - Baryonen: 3 Quarks, z.B. Proton = uud, Neutron = udd
 - Mesonen: Quark-Antiquark-Paar, z.B. $\pi^+ = u\bar{d}$, $K^0 = d\bar{s}$
- Probleme mit naivem Quarkmodell:
 - $\Delta^{++} = uuu$ mit Spin 3/2 → drei identische Fermionen (gegen Pauli-Prinzip)
 - Nicht beobachtet: einzelne Quarks, uu (Ladung 4/3 e), ...
- Lösung (Gell-Mann, Fritzsche, 1972): Quarks besitzen neuen internen Freiheitsgrad Farbladung („Color“)

Farbladung



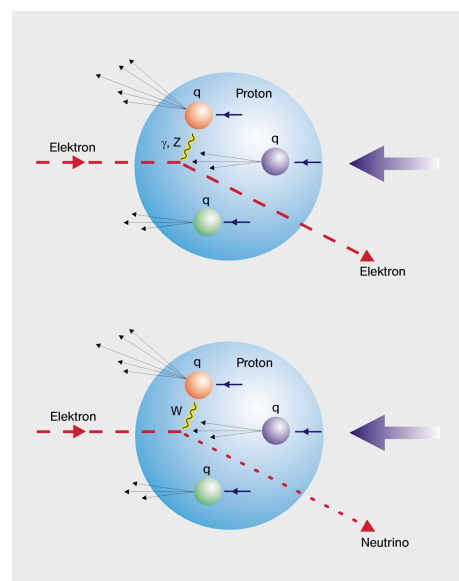
Additive Farbmischung

- Freiheitsgrad Farbladung:
 - Quarks in drei Farben: rot - grün - blau
 - Antiquarks: antirot (cyan) - antigrün (magenta) - antiblau (gelb)
- Alle beobachtbaren Teilchen sind farbneutral (weiß):
 - Z.B. $\Delta^{++} = u_R u_G u_B$, $\pi^+ = (u_R \bar{d}_R + u_G \bar{d}_G + u_B \bar{d}_B)$
 - Freie Quarks nicht farbneutral \rightarrow nicht erlaubt
 - 3 Farben später experimentell bestätigt in e^+e^- -Streuung:

$$\frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{Hadronen})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)} = 3 \sum_q e_q^2$$

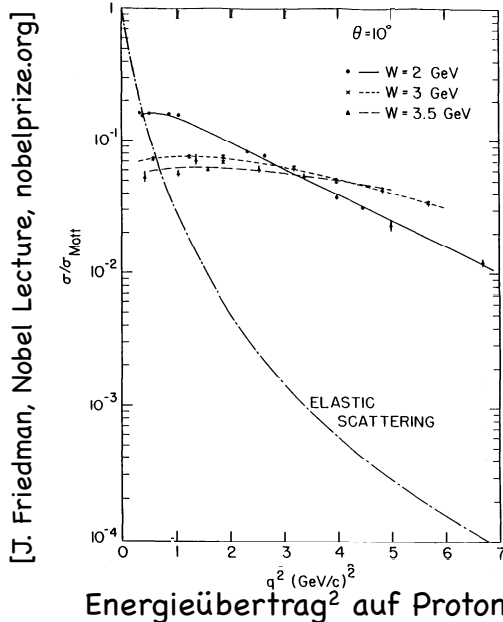
Tief-inelastische Streuung

- Frage: existieren Quarks in der Natur? (oder nur praktisches Klassifizierungsschema?)
- Schlüsselexperiment: „tiefinelastische Streuung“ (Friedman, Kendall, Taylor, 1967)
 - Streuung von hochenergetischen Elektronen an Protonen (festes Gastarget) \rightarrow Proton zerplatzt
 - Winkelverteilung des gestreuten Elektrons: punktförmig oder Substruktur?



Resultate

Wirkungsquerschnitt, normiert auf Mott-Streuung (punktförmiges Proton)



- Interpretation:
 - Proton nicht punktförmig
 - Proton keine homogene Ladungswolke
 - Streuung an kleineren punktförmigen Objekten
- Weitere Experimente: Objekte haben Spin 1/2

Moderne Physik (PK 23a), HU Berlin, Sommersemester 2008, Vorlesung 5

15

Partonen

- Interpretation der SLAC-Daten (Richard Feynman, 1968): Proton ist aus drei geladenen „Partonen“ aufgebaut → später mit Quarks identifiziert
- Impulserhaltung: nur 50% des Protonimpulses durch Quarks, Rest durch neutrale Partonen → „Gluonen“
- Später: Quantenchromodynamik (QCD) beschreibt WW zwischen Quarks, Gluonen als Austauscheteilchen

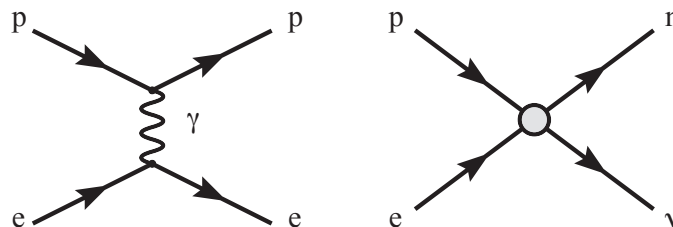
Moderne Physik (PK 23a), HU Berlin, Sommersemester 2008, Vorlesung 5

16

Schwache Wechselwirkung

Radioaktiver Beta-Zerfall

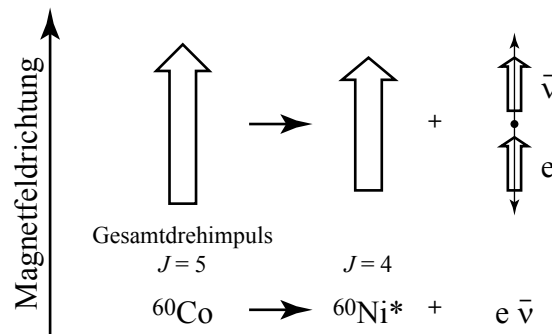
- Historisch: Fermi-Theorie des Beta-Zerfalls (1932)
 - Analog zu Elektron-Proton-Streuung
 - Kontaktwechselwirkung ohne Austauschteilchen



- Später: Austauschteilchen nicht einfach nachweisbar, da sehr schwer (hohe Masse = hohe Ruheenergie = kurze Distanz) → W-Boson, $80 \text{ GeV}/c^2$

Paritätsverletzung

- Parität: Symmetrie unter (Punkt-)Spiegelung am Ursprung → erhalten in EM und schwacher WW
- Schlüsselexperiment (Wu et al., 1957):
Vorzugsrichtung der Elektronen im Beta-Zerfall von ^{60}Co → schwache WW verletzt Parität (vergleichbar mit: rechte Hand \neq linke Hand)



Kapitel 6.3

Standardmodell der Elementarteilchenphysik

Überblick

- Teilchen im Standardmodell (+ Antiteilchen): Spin $1/2 \hbar$

| Generation | Quarks | Leptonen |
|------------|--------------------------|---|
| 1 | Up (u) Down (d) | Elektron-Neutrino (ν_e) Elektron (e) |
| 2 | Charm (c) Strange (s) | Myon-Neutrino (ν_μ) Myon (μ) |
| 3 | Top (t) Bottom (b) | Tau-Neutrino (ν_τ) Tau (τ) |

- Wechselwirkungen: Eichbosonen mit Spin $1 \hbar$

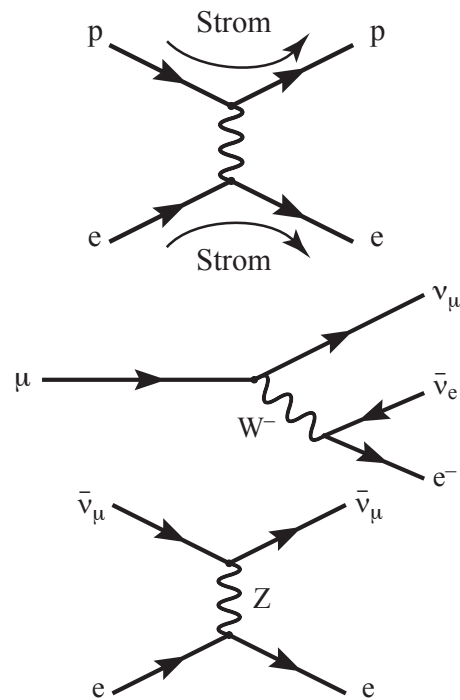
| WW | wirkt auf | Eichbosonen |
|-----------------------|-------------------|------------------|
| Schwache WW | alle Teilchen | W- und Z-Bosonen |
| Elektromagnetische WW | geladene Teilchen | Photon |
| Starke WW | Quarks | 8 Gluonen |

Elektroschwache Vereinigung

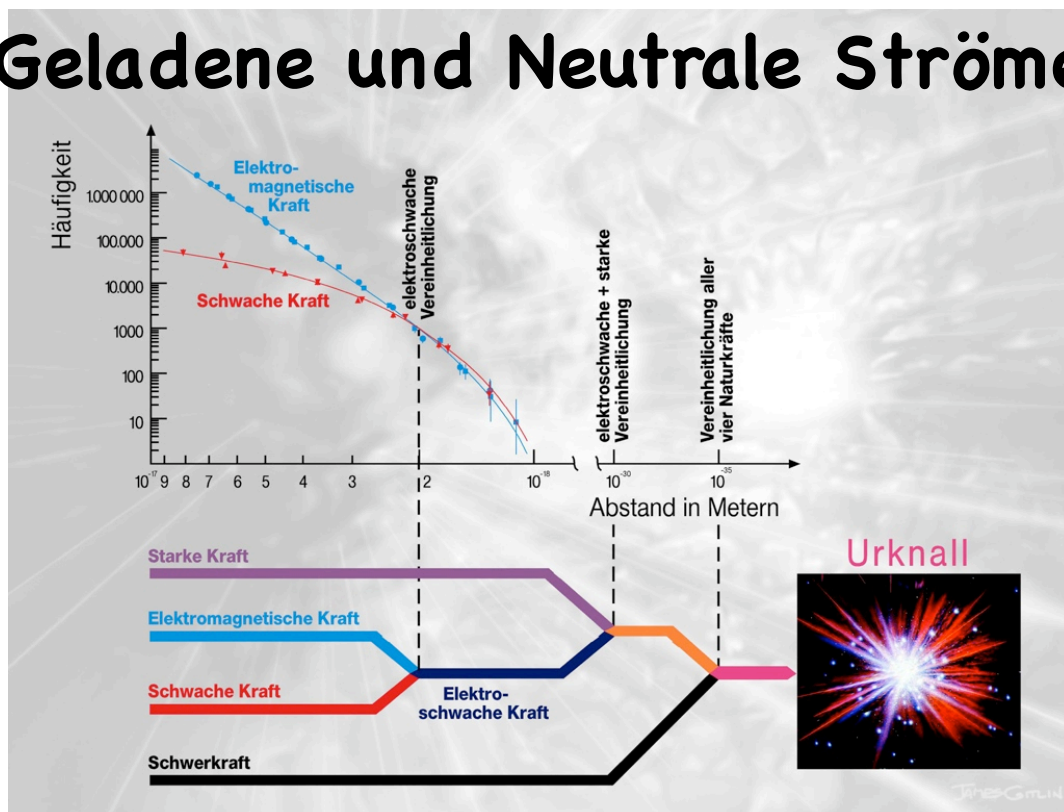
- Schwache WW allein: keine „gute“ Quantenfeldtheorie (liefert ∞ bei bestimmten Berechnungen)
- Glashow, Salam, Weinberg 1961–1968): elektromagnetische und schwache WW sind verschiedene Aspekte derselben WW \rightarrow elektroschwache WW („gute“ Theorie) mit Photon, W und Z als Eichbosonen
- Offene Frage: Warum ist Photon masselos, aber W/Z-Bosonen massiv? \rightarrow später: Higgs-Mechanismus

Geladene und Neutrale Ströme

- Strom = bewegte Ladung
- Schwache WW:
 - Geladener Strom: elektrische Ladung ändert sich an Vertex, z.B. Myonzerfall $\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$ → Austausch von geladenem W-Boson
 - Neutraler Strom: Ladung konstant am Vertex, z.B. $\bar{\nu}_\mu e^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu e^-$ → Austausch von neutralem Z-Boson

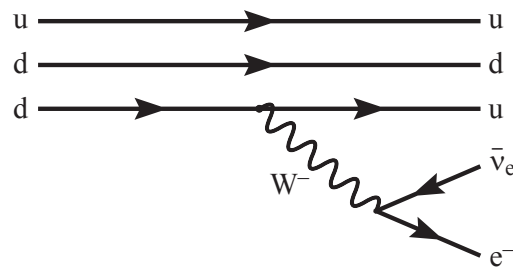


Geladene und Neutrale Ströme



Quarks und Schwache WW

- Beta-Zerfall auf Quarkniveau: geladener Strom $u \leftrightarrow d$



- Schwache WW unterschiedlich für Quarks & Leptonen
 - 6 Quarks: Übergänge zwischen (u,c,t) und (d,s,b) mit unterschiedlichen Kopplungsstärken → schwache WW wirkt auf Mischung der physikalische Teilchen
 - Kopplungsstärken freie Parameter im Standardmodell (Beschreibung: Cabibbo-Kobayashi-Maskawa-Matrix, CKM)