Moderne Physik: Elementarteilchenphysik, Astroteilchenphysik, Kosmologie

Ulrich Husemann Humboldt-Universität zu Berlin Sommersemester 2008

Vorstellung

- Dr. Ulrich Husemann
 - Seit 01.04. "Nachwuchsgruppenleiter": DESY (Standort Zeuthen) und HU Berlin
 - Forschungsgebiet: experimentelle Teilchenphysik
 - E-Mail: ulrich.husemann@desy.de
 - Telefon Zeuthen: 033762-7-7392
 - Büro Zeuthen: 3L/27
 - Büro Berlin: 2'412

Inhalte und Ziele der VL

- Vermittlung des modernen Weltbildes: Elementarteilchenphysik, Astroteilchenphysik, Kosmologie
- Inhaltsangabe:
 - Allgemeine Grundlagen (2 VL)
 - Elementarteilchenphysik (5 VL)
 - Astroteilchenphysik und Kosmologie (5 VL)
 - Ausblick: ungelöste Fragen (1 VL)

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

Einordnung der Vorlesung

- Pflichtveranstaltung Lehramts-Masterstudiengang: Modul PK 23a
- Zielgruppe:
 - 2. Fachsemester Kombimaster, Erstfach Physik
 - Masterarbeit in Physik oder Zweitfach
- Voraussetzungen: Modul PK 4a oder PK 4b Kombibachelor ("Experimentalphysik IV")

Termine und Prüfungen

- Termine:
 - Vorlesung: Donnerstags, 9:00–11:00 Uhr, NEW 15 2'101
 - Übung: Donnerstags, 11:00–13:00 Uhr, NEW 15 2'101 (jede zweite Woche)
- Prüfung
 - Zweistündige Klausur über Stoff der Vorlesung
 - Termin: 24.07.2008, 9:00-11:00 Uhr, NEW 15 2'101

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

Ablauf der Übungen

- Kurzreferate (10–15 Minuten) + Diskussion
- 14-täglich: 7 Termine mit je 3-4 Referaten
- Erster Termin: Donnerstag, 24.04.08, 11:00–13:00 Uhr, NEW 15 2'101
- - Vom geozentrischen zum heliozentrischen Weltbild
 - Entdeckung der kosmischen Strahlung
 - Der Rutherford-Streuversuch

Literatur

- Webseite zur Vorlesung: http://www-zeuthen.desy.de/ ~husemann/teaching/2008_ss/moderne_physik/
- Allgemeine Physikliteratur
 - C. Gerthsen: Physik (Springer 2006)
 - P. A. Tipler: Physik (Spektrum 2006)
- Nachschlagewerk: "Review of Particle Physics", http://pdg.lbl.gov

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

Literatur

- Elementarteilchenphysik (vorläufig)
 - K. Wille: Physik der Teilchenbeschleuniger und Synchrotronstrahlungsquellen (Teubner 1996)
 - C. Grupen: Teilchendetektoren (Spektrum 1993)
 - A. Das & T. Ferbel: Introduction to Nuclear and Particle Physics (World Scientific, 2004)
 - D. H. Perkins: Introduction to High Energy Physics (Cambridge University Press, 2000)
 - http://www.particleadventure.org
 - http://kworkquark.desy.de

Literatur

- Astroteilchenphysik und Kosmologie (vorläufig)
 - C. Grupen: Astroteilchenphysik (Vieweg 2000)
 - P. Schneider: Einführung in die Extragalaktische Astronomie und Kosmologie (Springer 2006)
 - H. V. Klapdor-Kleingrothaus, K. Zuber: Teilchenastrophysik, (Teubner 1997)
 - D. H. Perkins: Particle Astrophysics (Oxford, 2003)

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

9

Kapitel 1

Wissenschaftliche Methodik

Wissenschaftliche Methode

 Ziel der Wissenschaft: möglichst "objektiver"
 Erkenntnisgewinn, d. h. Reduktion des Einflusses von (wissenschaftlichen) Vorurteilen



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

Gute Theorien

- Theorie kann (jetzt oder in der Zukunft)
 experimentell überprüft werden: "Falsifizierbarkeit"
- Theorie gibt mehr zurück, als man hereingesteckt hat: "Vorhersagekraft"
- Beispiel: Standardmodell der Teilchenphysik Vorhersage neuer Teilchen (z.B. W– und Z–Bosonen), die später entdeckt worden sind
- Bemerkung: Newton'sche Mechanik Beispiel für gute Theorie mit begrenztem Gültigkeitsbereich ("effektive Theorie") – gute Näherung für Geschwindigkeiten viel kleiner als Lichtgeschwindigkeit

Schlechte Theorien

- Schlechte Theorie
 - Keine Überprüfbarkeit und/oder Vorhersagekraft
 - "Das ist nicht nur nicht richtig, es ist nicht einmal falsch!"
- Beispiel: Kreationismus / Intelligent Design



13

Kapitel 2

Geschichte der Teilchenphysik, Astroteilchenphysik und Kosmologie

Altertum

- Demokrit (ca. 400 v. Chr.): Materie ist aus unteilbaren kleinsten Teilchen aufgebaut ("Atome")
- Aristoteles (ca. 350 v. Chr.): systematische Sammlung und Klassifizierung des Wissens, Dialektik, Metaphysik usw.
- Claudius Ptolemäus (ca. 150): Theorie der Epizykeln
- Mittelalter in Europa ...

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



Mittelalter bis Renaissance





- Roger Bacon (ca. 1250): Anschluss an griechische und arabische Wissenschaft, empirische Naturforschung
- Nikolaus Kopernikus (ca. 1500): Erde dreht sich um die Sonne ("heliozentrisches Weltbild")

Renaissance und Barock

- Galileo Galilei, Tycho Brahe, Johannes Kepler (ca. 1600): Systematische Beobachtung von Himmelskörpern
 → Himmelsmechanik
- Isaac Newton (1687): klassische Mechanik beschreibt Gravitationskräfte zwischen Himmelskörpern



J. Kepler





I. Newton 17

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

19. Jahrhundert

- James C. Maxwell (1873): Theorie des Elektromagnetismus, Licht als elektromagnetische Welle
- Wilhelm C. Röntgen (1895):
 X-Strahlen



J. C. Maxwell



W. C. Röntgen

20. Jahrhundert



H. Becquerel



J. J. Thompson



- Henri Becquerel (1896): Entdeckung der Radioaktivität
- Joseph J. Thompson (1897): Entdeckung des Elektrons, Atommodell: Elektronen als "Rosinen im Kuchen"
- Marie & Pierre Curie (1898): Entdeckung der ersten radioaktiven Elemente (Polonium, Radium)

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



- Max Planck (1900): Erklärung der Schwarzkörperstrahlung mittels Quantisierung der Energie → Quantenphysik
- Albert Einstein (1905): Lichtquantenhypothese, Spezielle Relativitätstheorie

M. Planck A. Einstein Moderne Physik (PK 23a), HU Berlin, Sommersemester 2008

- Ernest Rutherford (1911): Streuung von Alphateilchen an Goldfolie → Atomkern
- Niels Bohr (1913): Atommodell erklärt Spektrallinien des Wasserstoff





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

20. Jahrhundert

- Victor Hess (1912): Entdeckung der "Höhenstrahlung" (kosmische Strahlung)
- Henrietta Leavitt (1912): Entfernungsmessung durch Periode-Leuchtkraft-Beziehung bei Cepheiden-Sternen





- Albert Einstein (1916): Allgemeine Relativitätstheorie (ART)
- Karl Schwarzschild (1916): Postulat schwarzer Löcher als Lösungen der Gleichungen der ART
- Arthur Eddington (1919): Ablenkung von Licht im Gravitationsfeld – Bestätigung der ART

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



20. Jahrhundert

- Wolfgang Pauli (1925): Ausschließungsprinzip
- Erwin Schrödinger (1926): Quantenmechanik formuliert als Wellenmechanik ("Schrödingergleichung")
- Werner Heisenberg (1927): Matrizenmechanik, Unschärferelation
- Paul A. M. Dirac (1928): Verbindung Relativitätstheorie und Quantenmechanik ("Diracgleichung")







W. Heisenberg







- Edwin Hubble (1928): Rotverschiebung des Lichts entfernter Galaxien proportional zur Entfernung
- Wolfgang Pauli (1930): Postulat des Neutrinos zur Energieerhaltung im Beta-Zerfall (n → p e⁻ v)
- Carl Anderson (1932): Entdeckung des Positrons als Antiteilchen des Elektrons

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

25

20. Jahrhundert

- James Chadwick (1932): Entdeckung des Neutrons
- Enrico Fermi (1933): Theorie des Beta-Zerfalls
 → schwache Wechselwirkung
- ca. 1940–1970: Entdeckung neuer Teilchen in kosmischer Strahlung: Myon, Pion, Kaon, Antiproton, D-Meson



Entdeckung des Kaons

- George Gamov (1948):
 Urknalltheorie erklärt Wasserstoffund Heliumgehalt des Universums
- Feynman, Schwinger, Tomonaga (ca. 1950): Quantentheorie des Elektromagnetismus (Quantenelektrodynamik, QED)
- Murray Gell-Mann, George Zweig R. Feynman (1964): Postulat der Quarks als fundamentale Bausteine der Natur



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

20. Jahrhundert

- Arno Penzias, Robert Wilson (1965): Entdeckung der kosmischen Mikrowellenhintergrundstrahlung
- Glashow, Salam, Weinberg (ca. 1970): Vereinheitlichung der elektromagnetischen und schwachen Wechselwirkung







S. Weinberg

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



- Gell-Mann, Fritzsch, Politzer, Gross, Wilczek, ... (ca. 1974): Theorie der starken Wechselwirkung
- Alan Guth (1980): kosmische Inflation erklärt flaches Universum und Struktur des Universums auf großen Längenskalen

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

29

20. Jahrhundert

- DESY (1979): Austauschteilchen der starken Wechselwirkung ("Gluon") entdeckt
- CERN (1982): Austauschteilchen der schwachen Wechselwirkung ("W/Z-Bosonen") entdeckt
- 1990: Satelliten (COBE Hintergrundstrahlung, ROSAT – Röntgenstrahlung, Hubble Space Telescope)



3-Jet-Ereignis bei TASSO



HST: Adlernebel



Top-Quark-Ereignis bei CDF



- Fermilab (1995): Das Top-Quark wird als letztes der sechs Quarks entdeckt
- Super-Kamiokande (1998): Neutrinos besitzen eine Masse

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

31

Kapitel 3

Grundlagen: Relativitätstheorie und Quantenphysik

Kapitel 3.1

Spezielle Relativitätstheorie

Postulate

- Theorie basiert auf zwei Postulaten:
 - Relativität: "Die physikalischen Gesetze haben in allen Inertialsystemen dieselbe Form"
 - Konstanz der Lichtgeschwindigkeit: "Lichtgeschwindigkeit hat in jedem Inertialsystem denselben Wert."
- Materialien:
 - Originalarbeit: A. Einstein, <u>Zur Elektrodynamik bewegter</u> <u>Körper</u>, Annalen der Physik 17 (1905) 891.
 - U. E. Schröder: Spezielle Relativitätstheorie (Deutsch 1994)
 - Visualisierung: http://www.tempolimitlichtgeschwindigkeit.de/

Lorentz-Transformation

- Klassische Mechanik: Galilei-Transformation zwischen Inertialsystemen S und S' (mit Geschwindigkeit v bewegt): x' = x - vt
- Ansatz, der Galileo-Transformation als Grenzfall enthält: y' = y(y)[y = yt]

$$x = \gamma(v)[x - vt]$$

mit $\gamma(v) \to 1$ für $v \ll c$

• Benutze Postulat der Relativität $x = \gamma(v)[x' + vt']$

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

35

Lorentz-Transformation

- Benutze Postulat der konstanten Lichtgeschwindigkeit
 - Sende Lichtblitz bei t = t' = 0
 - Ausbreitung nach t in System S: x = ct
 - Ausbreitung nach t' in System S': x' = ct' (dasselbe c!)
 - Ersetze t und t' in obigem Gleichungssystem (mit $\beta = v/c$)

$$x' = \gamma(v) [x - v/c \cdot x] = \gamma(v) x [1 - \beta]$$

$$x = \gamma(v) [x' + v/c \cdot x'] = \gamma(v) x' [1 + \beta]$$

Multiplikation der Gleichungen ergibt:

$$\gamma(v)^2 = \frac{1}{1 - \beta^2}$$

Lorentz-Transformation

 Transformationsgleichung f
ür Zeiten t und t' durch R
ückeinsetzen:

$$ct' = x' = \gamma(x - vt) = \gamma(ct - \beta x)$$

$$ct = x = \gamma(ct' + \beta x')$$

 Bemerkung: Gleichungen sind ähnlich für x und ct, können als Matrixgleichung geschrieben werden

$$\begin{pmatrix} ct' \\ x' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma & -\beta\gamma \\ -\beta\gamma & \gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} ct \\ x \end{pmatrix}$$

(3 Raumdimensionen: Richtungen senkrecht zur Bewegungsrichtung unbeeinflusst)

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

37

Folgerungen

- Längenkontraktion
 - Objekt ruht in bewegtem Bezugssystem S'
 - S: Objekt erscheint verkürzt

$$\Delta x' = x'_2 - x'_1 = \gamma(x_2 - x_1) = \gamma \Delta x \quad \Rightarrow \quad \Delta x = \sqrt{1 - \beta^2 \Delta x'}$$

Zeitdilatation

- $\bullet\,$ Zeitdifferenz zwischen zwei Ereignis an festem Ort x' in S'
- S: Zeitdifferenz im bewegten System S' verlängert ("bewegte Uhren gehen langsamer")

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \gamma(t'_2 - t'_1) = \gamma \Delta t'$$

Raum-Zeit-Abstand

• Messung von "Abständen" (Skalarprodukten) im vierdimensionalen Raum → unabhängig vom Bezugssystem = lorentzinvariant



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

Energie und Impuls

- Konjugierte Variable
 - Zeit ↔ Energie (Energieerhaltung durch zeitliche Symmetrie)
 - Ort ↔ Impuls (Impulserhaltung durch Translationssymmetrie)
- Relativistische Ausdrücke für Energie und Impuls

$$E = \gamma mc^{2}$$

$$pc = \gamma mvc = \beta \gamma mc^{2}$$

Skalarprodukt für Energie/Impuls: "invariante Masse"

$$\begin{split} E^2 - (pc)^2 &= (\gamma mc^2)^2 - (\beta \gamma mc^2)^2 = \gamma^2 (1 - \beta^2) (mc^2)^2 \\ &= (mc^2)^2 \end{split}$$

Beispiele

- Aus obigen Gleichungen (verallgemeinert für 3D):
 - "Boostvektor": $\vec{\beta} = \frac{\vec{p}c}{E}$ • γ : Verhältnis totale Energie zu Ruheenergie $\gamma = \frac{E}{mc^2}$
- Schwerpunktsenergie (center of mass system CMS) einer Zweiteilchenkollision

$$E_{\text{CMS}} = \sqrt{(E_1^2 + E_2^2)^2 - (\vec{p}_1 c + \vec{p}_2 c)^2}$$

= $\sqrt{E_1^2 - (p_1 c)^2 + E_2^2 - (p_2 c)^2 + 2E_1 E_2 - 2\vec{p}_1 \cdot \vec{p}_2 c^2}$
= $\sqrt{(m_1 c^2)^2 + (m_2 c^2)^2 + 2E_1 E_2 (1 - \beta_1 \beta_2 \cos \theta)}$

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

41

Beispiele

 Beispiel: Teilchen 2 ruht (E₂ = m₂c²), Ruhemassen vernachlässigbar ("Fixed Target"-Experiment)

$$E_{\rm CMS} \approx \sqrt{2E_1m_2c^2}$$

 \rightarrow zur Verfügung stehende Energie zur Produktion neuer Teilchen (E=mc²) wächst mit \sqrt{E}

 Beispiel: Teilchen 1 und Teilchen 2 kollidieren frontal (θ = π) mit derselben Energie (E₁ = E₂ = E), Ruhemassen vernachlässigbar, β≈1 ("Collider"-Experiment)

$$E_{\rm CMS} \approx 2E$$

→ zur Verfügung stehende Energie wächst mit E

Kapitel 3.2

Quantenphysik

Schwarzkörperstrahlung



- Modell: Schwarzer Hohlraum im thermischen Gleichgewicht bei Temperatur T
- Klassisches Spektrum (Energiedichte pro Frequenz): Rayleigh-Jeans-Gesetz

$$u(\boldsymbol{\omega}) = \frac{\boldsymbol{\omega}^2}{\pi^2 c^3} k_B T$$

- ∫u(ω)dω→∞ für ω→∞ ("UV-Katastrophe")
- Lösung (Planck, 1900): Ersetze kontinuierliches Energiespektrum (k_BT für jeden Oszillator) mit diskretem Spektrum mit ΔE = ħω (Planck'sches Wirkungsquantum ħ = 1,0546 · 10⁻³⁴ Js)

Schwarzkörperstrahlung



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

45

Lichtelektrischer Effekt



Lichtelektrischer Effekt

- Erklärung (A. Einstein, 1905): Licht besteht aus Teilchen (später: "Photonen") mit Energie E = ħω
 Maximala Energie den Elektronen: E = ħω
 - Maximale Energie der Elektronen: E_{max} = ħω W
 (mit W Austrittsarbeit = Energie, um e aus Metall zu lösen)
 - Minimale Frequenz: ħω_{min} = W
- Proportionalitätskonstante ħ dieselbe wie bei Schwarzkörperstrahlung → fundamentale Naturkonstante

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

Schrödingergleichung

- Wellenfunktion ψ beschreibt quantenmechanischen (QM)
 Zustand
- Wahrscheinlichkeit, QM–Zustand in d³x zu finden $|\psi(\vec{x},t)|^2 \mathrm{d}^3 x$
- QM-Observable = Erwartungswerte von (hermiteschen)
 Operatoren

$$\langle O \rangle = \int \mathrm{d}^3 x \, \psi^*(\vec{x},t) \, O \, \psi(\vec{x},t)$$

Schrödingergleichung: Zeitentwicklung von ψ

$$i\hbar \frac{\partial \psi(\vec{x},t)}{\partial t} = -H\psi(\vec{x},t)$$

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

Unschärferelation

• H: Hamiltonoperator (totale Energie des QM-Systems)

- Mit Impuls- und Energieoperatoren $\hat{\vec{p}} = -i\hbar\vec{\nabla}, \quad \hat{E} = i\hbar\frac{\partial}{\partial t}$
- Freies Teilchen: $H_0 = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{p^2}{2m} = \frac{\dot{\hbar}^2}{2m}\vec{\nabla}^2$
- Teilchen in Potenzial V: H = H₀ + V
- Superpositionsprinzip: Überlagerung von Wellen zu Wellenpaketen (Schrödingergleichung linear in t)
- Heisenbergsche Unschärferelation (aus Operatoreigenschaften von Ort/Impuls)
 - Lokalisierung von Wellenpaketen: $\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar/2$
- Nützlich für Teilchenphysik: $\Delta E \cdot \Delta t \gtrsim \hbar$ (Vorsicht: t ist kein Operator)

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

49

Wirkungsquerschnitt

- Experimente der Teilchenphysik: Streuung von Teilchen
 - Rutherford: α-Teilchen auf Goldfolie
 - Ab Sommer 2008 bei LHC: Protonen auf Protonen
- Wahrscheinlichkeit der Produktion von Teilchen H abhängig von:
 - Fluss der einfallenden Teilchen (Teilchen pro Fläche)
 - Teilchendichte in Objekt, am dem gestreut wird ("Target")
 - Wahrscheinlichkeit pro Einzelstreuung: effektive Fläche σ der Wechselwirkung ("Wirkungsquerschnitt") → intrinsische Eigenschaft des physikalischen Prozesses, nicht von außen beeinflussbar

Wirkungsquerschnitt

Target

 $P = \frac{\text{Reaktionsrate}}{\text{Einfallrate}} = \frac{\dot{N}_R}{\dot{N}_E}$ • Trefferwahrscheinlichkeit II: $P = \frac{N_{\text{target}} \cdot \sigma}{A} \text{ mit } N_{\text{target}} = \frac{\rho N_A}{M} \cdot V$ • Gleichsetzen: $\dot{N}_R = \sigma \cdot \underbrace{\left(\dot{N}_e \cdot \frac{\rho N_A}{M} \cdot \frac{V}{A}\right)}_{\text{Luminosität } \mathscr{L}}$ Reaktionsrate proportional zu Wirkungsquerschnitt • Einheit: 1 b = 1 barn = 10^{-28} m^2 • Geometischer Querschnittsfläche Protons (r=10^{-15}m): 31 mb • Top-Quarks bei Tevatron: 8 pb (40 Milliarden mal kleiner!)

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

Trefferwahrscheinlichkeit I

Beispiel: Harte Kugel



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

Fermis Goldene Regel

 (Näherungsweise) QM-Berechnung der Übergangswahrscheinlichkeit von Anfangs- zu Endzustand in Potenzial V ("Fermis Goldene Regel")

$$P_{if} = \frac{2\pi}{\hbar} \left| \mathscr{M}_{if} \right|^2 \frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}E_f}$$
"Matrixelement" $\mathscr{M}_{if} = \int \mathrm{d}^3 x \, \psi_f^* V \, \psi_i$

Wirkungsquerschnitt:

mit

 $\sigma = \frac{P_{if}}{\text{Teilchenfluss}} \cdot (\text{Zahl der Endzustände})$

 Wichtiges Resultat: Wirkungsquerschnitt (Messung) proportional zum Quadrat des Matrixelements (Theorie)

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

53

Feynman-Diagramme



Feynman-Diagramme

- Anschauliche graphische Darstellung von Prozessen zwischen Elementarteilchen
- Vorschrift zur (näherungsweisen) Berechnung des Matrixelements: Entwicklung in Kopplungskonstante, z.B. Feinstrukturkonstante α = e²/(4πε₀ħc) ≈ 1/137 für Elektrodynamik

≻ t



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

55



Feynman-Diagramme

 Beispiel 3: "Korrekturen höherer Ordnung" (in α, d.h. mehr Vertizes) zu Beispiel 2

Vakuumpolarisation



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

57

Kapitel 4

Teilchenbeschleuniger

Warum Teilchenbeschleuniger?



- Untersuchung von Materie auf Längenskalen < 10⁻¹⁵ m (Protonradius)
 - Optik: Beugungslimit für runde Linse mit Durchmesser d (Rayleigh-Kriterium)

$$\sin\theta_R = 1,22\frac{\lambda}{d}$$

- Elektronenmikroskop nutzt
 Welleneigenschaften des e: Auflösung ≈ 1 Å = 10⁻¹⁰ m
- Rastertunnelmikroskop nutzt
 Oberflächenabtastung mit
 QM-Tunneleffekt: 1 Å

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

59

Abschätzung der Energie

- Zusammenhang Wellenlänge/Energie: E = $\hbar \omega$ = $2\pi\hbar c/\lambda$
- Energieeinheit: Elektronenvolt (eV) = Energie, die ein Elektron durch eine Potenzialdifferenz von 1 V erhält:
 E = eU mit Elementarladung e = 1,6 · 10⁻¹⁹ C
- Faustformel zur Umrechnung: ħc = 197 MeV · fm
 → Für Auflösung von 1 fm benötigt man ca. 200 MeV
- Erzeugung neuer Teilchen
 - Mindestens Ruheenergie $E_0 = mc^2$ (Collider: $E_{CMS} = 2E$)
 - z. B.: Z-Boson (mc² ≈ 90 GeV) in e⁺e⁻-Collider: Strahlenergie mindestens 45 GeV (Fixed Target: >4000 GeV)

Lorentzkraft

- Lorentzkraft $ec{F} = e\left(ec{E} + ec{v} imes ec{B}
 ight)$
 - Elektrisches Feld E: Beschleunigung (parallel zu E-Feld)
 - Magnetisches Feld B: Ablenkung (senkrecht zu Bewegungsrichtung und B-Feld)
- Einfachster Beschleuniger: elektrostatisch, z. B.
 Braunsche Röhre Hochspannung Anode



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

Cockcroft-Walton-Generator





Fermilab Cockcroft-Walton-Generator (750 kV)

Linearbeschleuniger

- Gleichspannung limitiert \rightarrow verwende Hochfrequenz-Wechselspannung $U(t) = U_0 \sin(\omega t - \phi_0)$
- Linac (linear accelerator): Driftröhren im Vakuum mit abwechselnder Polung an HF-Sender angeschlossen



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

Phasenfokussierung

- Problem: Geschwindigkeit muss genau auf Driftlänge abgestimmt werden, um "Aufschaukeln" von Abweichungen zu verhindern → geschickte Selbstregulierung der Phase φ
- Lösung: "Reite" hinter Scheitelpunkt der Welle: zu viel Energie → Phase kleiner → weniger Beschleunigungsspannung (und umgekehrt)

Zeit t

Zyklotron

- Problem: Linac kann nicht beliebig lang sein (Technik, Kosten, ...)
 - → Kreisbeschleuniger
- Zyklotron (E. O. Lawrence, M. S. Livingston, 1930)
 - Starkes Magnetfeld (bis 2 Tesla) lenkt Teilchen auf Kreisbahnen
 - Beschleunigung zwischen Dförmigen Polen mit HF-Sender
 - Energien bis ca. 20 MeV (Protonen: β = pc/E ≈ 0.02)





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

65

Zyklotronfrequenz

• Ansatz: Lorentzkraft (E=0): $ec{F}=m\dot{ec{v}}=eec{v} imesec{B}$

• O. b. d. A.: Bewegung in x-y-Ebene, B-Feld nur in z:

$$m\begin{pmatrix} \dot{v}_{x} \\ \dot{v}_{y} \\ \dot{0} \end{pmatrix} = e\begin{pmatrix} v_{x} \\ v_{y} \\ 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ B \end{pmatrix} = e\begin{pmatrix} v_{y}B \\ -v_{x}B \\ 0 \end{pmatrix}$$

- Gekoppelte Dgl. erster Ordnung \rightarrow ableiten & einsetzen: $\ddot{v}_x = \frac{eB}{m}\dot{v}_y = -\left(\frac{eB}{m}\right)^2 v_x, \qquad \ddot{v}_y = -\frac{eB}{m}\dot{v}_x = -\left(\frac{eB}{m}\right)^2 v_y$
- Lösungen: $v_x = v_0 \cos(\omega_Z t \phi_0)$, $v_y = v_0 \sin(\omega_Z t \phi_0)$ • Charakteristische Zyklotronfrequenz: $\omega_Z = \frac{eB}{m}$

Synchrotron

• Noch höhere Strahlenergien: Bahnradius R (für v≈c) $evB = m\frac{v^2}{R} \Rightarrow R = \frac{mv}{eB} \approx \frac{E}{eBc}$

Zahlenbeispiel: E = 1 TeV, B = 4T \rightarrow R = 834m

- Lösung: ein Magnet → viele schmale Ablenkmagnete
- Beschleunigung bei konstantem Radius: Magnetfeld synchron mit Energie hochfahren ("ramping")
 → "Synchrotron" (E.M. McMillan, V. Veksler, 1945)

Anwendungen

- Protonenstrahl für Fixed-Target-Experimente
- Nutzung der Synchrotronstrahlung als Röntgenquelle

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



Synchrotron

- Komponenten:
 - Vorbeschleuniger zur Strahlinjektion, z. B. Linac
 - Evakuierte Strahlröhre
 - Beschleunigungsstrecke: Hohlraumresonator ("cavity")
 - Ablenkmagnete: Dipol (häufig supraleitend)
 - Fokussiermagnete: Quadrupol (+ weitere Korrekturmagnete)
 - Gepulste Extraktionsmagnete ("kicker")

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

Synchrotronstrahlung

Beschleunigte Ladung emittiert Strahlung

- (Unerwünschter) Nebeneffekt in Teilchenphysik
- Anwendung: hochbrilliante Röntgenstrahlung für: Biologie, Materialwissenschaften, ...
- Leistung Hertz'scher Dipol (relativistisch):

$$P = \frac{e^2c}{6\pi\varepsilon_0} \frac{1}{(mc^2)^4} \frac{E^4}{R^2}$$

Energieverlust pro Umlauf (ständige Ablenkung):

$$\Delta E = P \cdot \Delta t = P \cdot \frac{2\pi R}{c} = \frac{e^2}{3\varepsilon_0} \frac{1}{(mc^2)^4} \frac{E^4}{R}$$

- 1/m⁴: wichtig für Elektronen, vernachlässigbar für Protonen
- E⁴/R: wichtig für hohe Energien und kleine Radien

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

69

Synchrotronstrahlung





Speicherring ("Collider")

- Idee: beschleunige zwei Pakete von Teilchenstrahlen in entgegengesetzter Richtung (z. B. Teilchen/Antiteilchen in derselben Vakuumröhre)
- Kollisionsrate: mehrere MHz
- Reaktionsrate $\dot{N}_R = \sigma \cdot \mathscr{L}$ mit Luminosität Zahl $\mathscr{L} = f \cdot N \cdot \frac{n_1 n_2}{4\pi \sigma_x \sigma_y}$ $\int_{\substack{\text{Umlauf-frequenz und Zahl Pakete}} Strahlfläche}$


Beispiele für Speicherringe

Name	Teilchen	Strahl- energie	Umfang	Laufzeit
LEP (CERN, Schweiz)	Elektron - Positron	45-105 GeV	26,7 km	1989-2000
KEKB (KEK, Japan)	Elektron - Positron	8 GeV (e⁻) 3.5 GeV (e⁺)	3,0 km	ab 1999
PEP-II (SLAC, USA)	Elektron - Positron	9.0 GeV (e⁻) 3.1 GeV (e⁺)	2,2 km	1999-2008
HERA (DESY, Hamburg)	Elektron (Positron) - Proton	27,5 GeV (e) 920 GeV (p)	6,3 km	1992-2007
Tevatron (Fermilab, USA)	Proton - Antiproton	800-980 GeV	6,3 km	1987-2009
Large Hadron Collider (CERN)	Proton-Proton Blei-Blei	7 TeV (pp) 2.8 TeV/n (PbPb)	26,7 km	ab 2008
International Linear Collider	Elektron - Positron	>250 GeV	Länge: 32 km	2020?

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

73

Fermilab und das Tevatron



CERN & Large Hadron Collider



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

75

Themen für Vorträge

- Teilchenstrahlen in der Medizin
- Was kann man mit Synchrotronstrahlung untersuchen?
- Neutrinostrahlen: Erzeugung und Anwendung

Teilchendetektoren

Einleitung

- Ziel: möglichst vollständige Vermessung der Produkte einer Wechselwirkung zwischen Elementarteilchen
 - Energie und Impuls (möglichst) aller Sekundärteilchen
 - Teilchenidentifikation ("ID")
 - Detektor: Kombination aus spezialisierten Subdetektoren
- Literatur:
 - K. Kleinknecht: Detektoren für Teilchenstrahlung (Teubner 2005) → stark aktualisierte 4. Auflage
 - C. Grupen: Teilchendetektoren (Spektrum 1993)

Nachzuweisende Teilchen

Teilchen, Symbol	Einordnung	Ruhemasse (MeV/c²)	Elektrische Ladung (e)
Photon, Y	Lichtquant	0	0
Elektron, e⁻	geladenes Lepton ("leichtes Teilchen")	0.511	-1
Positron, e⁺	Antiteilchen des Elektrons	0.511	+1
Neutrino, v	neutrales Lepton (3 Flavors)	>0, <0.002	0
Myon, µ±	geladenes Lepton (etwa: schweres Elektron)	105.7	±1
Pion, π^0 , π^{\pm}	Meson ("mittelschweres Teilchen", Aufbau: Quark-Antiquark)	π ⁰ : 135.0 π [±] : 139.6	0, ±1
Proton, p	Baryon ("schweres Teilchen", Aufbau: 3 Quarks)	938.3	+1
Neutron, n	Baryon	939.6	0

rot: nach heutigem Wissen elementar Hadronen = Mesonen + Baryonen Moderne Physik (PK 23a), HU Berlin, Sommersemester 2008 79

Prinzipieller Detektoraufbau



Kapitel 5.1

Wechselwirkung von Elementarteilchen mit Materie



Geladene Teilchen



 Hadronen: zusätzlich Kerneffekte (Anregung, Spaltung, Spallation von Neutronen, ...)

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



Strahlungslänge Energieverlust von

Elektronen/Photonen im Limit hoher Energien (>> 1 MeV):

 $\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}x} = -\frac{E}{X_0}$



- Materialkonstante: Strahlungslänge X₀ (Massenbelegung = Länge mal Dichte)
 - Elektronen: Strahlintensität auf 1/e reduziert (Haupteffekt: Bremsstrahlung)
 - Photonen: ca. 50% Wahrscheinlichkeit für Paarbildung

Elektronen: Bremsstrahlung

Material	X₀ (g/cm²)	
H ₂	61.3	
Wasser	36.1	
Aluminium	24.0	
Eisen	13.8	
Blei	6.4	

Kapitel 5.2

Impuls- und Energiemessung

Prinzip der Impulsmessung

 Krümmungsradius im homogenen Magnetfeld einer Spule (engl.: solenoid) proportional zu p_T

$$\vec{F}_{L} = \frac{e}{m}\vec{p} \times \vec{B} = \frac{e}{m}\begin{pmatrix} -p_{T}\sin\phi\\ p_{T}\cos\phi\\ p_{Z} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0\\ 0\\ B \end{pmatrix} = \frac{eBp_{T}}{m}\begin{pmatrix} \cos\phi\\ \sin\phi\\ 0 \end{pmatrix} \text{ mit } \vec{p} = \begin{pmatrix} -p_{T}\sin\phi\\ p_{T}\cos\phi\\ p_{Z} \end{pmatrix}$$
$$\vec{F}_{Z} = \frac{mv^{2}}{R}\begin{pmatrix} \cos\phi\\ \sin\phi\\ 0 \end{pmatrix} = \frac{p_{T}^{2}}{mR}\begin{pmatrix} \cos\phi\\ \sin\phi\\ 0 \end{pmatrix}$$
$$\vec{F}_{L} = \vec{F}_{Z} \Rightarrow R = \frac{p_{T}}{eB}$$
$$\textbf{Zahlenwerte: } p_{T} = 50 \text{ GeV/c,}$$
$$B = 2 \text{ T} \rightarrow R = 83,4 \text{ m (Übung)}$$

Spurrekonstruktion



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

Beispiel: Siliziumdetektoren



- pn-Übergang in dotiertem Halbleiter ("Diode in Sperrrichtung") → Bildung einer "Verarmungszone" ohne freie Ladungsträger
- Ionisierende Strahlung: Elektron-Loch-Paare \rightarrow 3.6 eV pro Paar (Bandlücke in Silizium)
- Anwendung: "Vertexdetektor" → hohe Ortsauflösung nah an Ort der Wechselwirkung



Anlegen einer "Biasspannung" vergrößert Verarmungszone



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

Vieldraht-Proportionalkammer



• Teilchendurchgang: Ionisation in "Zählgas" (z.B. Argon)

 Elektrische Spannung: Elektronen und Ionen driften zu Elektroden → Lawine: Verstärkung



- Ortsauflösung: Messung der Ladungsverteilung pro Draht
- Variante: "Driftkammer" → verbesserte Auflösung durch Messung der Driftzeit zur Elektrode

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

Kathode

89

Prinzip der Energiemessung

• Nachweis mittels Kalorimeter ("Wärmemesser"):

- Teilchen wechselwirkt mit Materie (große Dichte) → Ursprungsteilchen zerstört → Teilchenschauer
- Energie des Schauers proportional zu Energie des Ursprungsteilchens (aber: teils große Fluktuationen)



Simulation elektromagnetischer Schauer

- Elektromagnetisches Kalorimeter: für e⁺, e⁻, γ
 → Ziel: Schauer möglichst vollständig absorbieren: 10-20 X₀
- Hadronisches Kalorimeter: für π, K, p, n, ...
 → Kerneffekte: charakteristische Länge: nukleare Absorptionslänge λ (z. B. Schauer in Eisen: λ ≈ 10 X₀)

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

91

Szintillatoren

 Vermessung der Schauerenergie: Szintillationseffekt, z.B. in Plastikszintillator



Lichtdetektion

 Lichtdetektion mit Sekundärelektronenvervielfacher (photomultiplier, PM): Photoeffekt und Verstärkung



- Homogenes Kalorimeter: Szintillator absorbiert Schauer, z.B. NaI(Tl), Bleiglass (alternativ: Ionisation in flüssigen Edelgasen, z.B. Argon)
- Samplingkalorimeter: Schichten aus massivem Absorber (z. B. Eisen, Blei) und Plastikszintillator

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

93

Kapitel 5.3

Teilchenidentifikation

Cherenkov-Effekt

• Geladene Teilchen mit v > c/n (n Brechungsindex des Mediums) emittieren "Cherenkov-Strahlung" (vergleichbar mit Mach-Kegel bei Überschallflugzeug)



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

Anwendungen

Schwellenzähler: Geschickte Wahl des Radiator-Materials zur Unterscheidung z.B. von 10 GeV/c Pionen und Protonen

$$n_p = \frac{1}{\beta_p} = \frac{E_p}{p_p} = 1.0044$$

 $n_\pi = \frac{1}{\beta_\pi} = \frac{E_\pi}{p_\pi} = 1.0001$

→ z. B. Freon 14: n = 1.0005(FCKW, nicht mehr verwendet)

Rekonstruktion von Cherenkov-Ringen \rightarrow Messung des Cherenkov-Winkels



Cherenkov-Ringe in Super-Kamiokande

Kapitel 5.4

Moderne Teilchendetektoren an Speicherringen

Grundprinzip

- Prinzipieller Aufbau ähnlich:
 - Detektoren zwiebelschalenartig um Kollisionspunkt
 - Vertexdetektor Spurfindung Kalorimetrie Myon-ID
 - Möglichst gute Abdeckung des gesamten Raumwinkels ("4π-Detektor")
- Technologische Herausforderung:
 - CDF-II (2001): 10x10x10 m³, 1 Million Auslesekanäle
 - ATLAS (2008): 25x25x40 m³, 100 Millionen Auslesekanäle
 - Gleichzeitig: Präzision der Spurfindung ca. 10 μm



Beispiel: ATLAS-Experiment



Themen für Übung

- Positronenemissionstomographie (PET)
- Triggersysteme oder: Wie fischt man die 1000 interessanten Kollisionen aus mehreren Millionen?

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

101

Kapitel 6

Grundlagen der Teilchenphysik

Bosonen und Fermionen

- Spin: interner Freiheitsgrad von Teilchen, der sich wie Drehimpuls verhält (punktförmig → es dreht sich nichts!)
 - Fermionen: Spin ħ/2, 3ħ/2, 5ħ/2, ...
 - Bosonen: Spin ħ, 2ħ, 3ħ, ...
- Paulisches Ausschließungsprinzip: keine zwei Fermionen im selben Quantenzustand
- Standardmodell: alle Teilchen Fermionen, alle Wechselwirkungen vermittelt von Bosonen

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

103

Quantenfelder

- Klassisches Feld: jedem Punkt im Raum wird zu jedem Zeitpunkt ein odere 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 $\alpha = e^2/(4\pi\epsilon_0\hbar c) = 1/137$)

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

105

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: $n \rightarrow p e^{-} v_e$
- 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

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

107

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⁻, v_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. $\pi^+ = u\overline{d}$, $K^0 = d\overline{s}$
- Probleme mit naivem Quarkmodell:
 - Δ⁺⁺ = uuu mit Spin 3/2 → drei identische Fermionen (gegen Pauli-Prinzip)
 - Nicht beobachtet: einzelne Quarks, uu (Ladung 4/3 e), ...
- Lösung (Gell-Mann, Fritzsch, 1972): Quarks besitzen neuen internen Freiheitsgrad Farbladung ("Color")



Tief-inelastische Streuung

- Frage: existieren Quarks in der Natur? (oder nur praktisches Klassifizierungschema?)
- 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?



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

113

Resultate

Wirkungsquerschnitt, normiert auf Mott-Streuung (punktförmiges Proton)



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

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 Austauschteilchen

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

115

Kapitel 6.2

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 GeV/c²

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

117

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 ⁶⁰Co → schwache WW verletzt Parität (vergleichbar mit: rechte Hand ≠ linke Hand)



Kapitel 6.3

Standardmodell der Elementarteilchenphysik

Überblick

• Teilchen im Standardmodell (+ Antiteilchen): Spin 1/2 ħ

Generation	Quarks	Leptonen
1	Up (u) Down (d)	Elektron-Neutrino (v _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 ħ

WW	wirkt auf	Eichbosonen
Schwache WW	alle Teilchen	W- und Z-Bosonen
Elektromag- netische 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 → elektroschwache WW ("gute" Theorie) mit Photon, W und Z als Eichbosonen
- Offene Frage: Warum ist Photon masselos, aber W/Z-Bosonen massiv? → später: Higgs-Mechanismus

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

121

Geladene und Neutrale Ströme

- Strom = bewegte Ladung
- Schwache WW:
 - Geladener Strom: elektrische Ladung ändert sich an Vertex, z.B. Myonzerfall μ⁻ → e⁻ ν_e ν_μ → Austausch von geladenem W-Boson
 - Neutraler Strom: Ladung konstant am Vertex, z.B.
 ν
 [¬] μ e[−] → ν
 [¬] μ e[−] → Austausch von neutralem Z-Boson





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

123

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)

Kapitel 6.3

Standardmodell der Elementarteilchenphysik

Wiederholung

• Teilchen im Standardmodell (+ Antiteilchen): Spin 1/2 ħ

Generation	Quarks	Leptonen
1	Up (u) Down (d)	Elektron-Neutrino (v _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 ħ

WW	wirkt auf	Eichbosonen	
Schwache WW	alle Teilchen	W- und Z-Bosonen	Vereinigt zur
Elektromag- netische WW	geladene Teilchen	Photon	schwachen WW
Starke WW	Quarks	8 Gluonen	

Quantenchromodynamik

- Theorie für starke WW: Quantenchromodynamik (QCD)
- Austauschteilchen: 8 Gluonen mit Farbladung (im Gegensatz zum ungeladenen Photon in Elektrodynamik)
 → viel kompliziertere Dynamik _{V(r)}
- Vergleiche Coulomb-Potenzial $V_{\text{Coulomb}}(r) \propto -\frac{\alpha}{r}$ mit Potenzial der QCD: $V_{\text{QCD}}(r) \propto -\frac{\alpha_S(r)}{r} + kr$



- "Confinement" (Analogie: Feder mit Federkonstante k)
 → keine freien Quarks
- → genug Spannungsenergie: Bildung von qq-Paaren Moderne Physik (PK 23a), HU Berlin, Sommersemester 2008

127

Asymptotische Freiheit



Die Massenfrage

- Wie bekommen Teilchen (und W– und Z–Bosonen) ihre Massen?
- Lösung im Standardmodell: Higgs-Mechanismus
 - Peter Higgs (1964): Postuliere neues Quantenfeld, dass Vakuum ausfüllt, mit zugehörigem Teilchen: Higgs-Boson (Spin 0) → noch nicht experimentell nachgewiesen
 - Löst zwei (unterschiedliche) Probleme auf einmal: Massen für Fermionen und W- und Z-Bosonen
 - Aber: Wert der Masse immer noch freier Parameter
 - Leichtestes Quark (Up): m_u ≈ 1–3 MeV/c²
 - Schwerstes Quark (Top): mt ≈ 172 GeV/c², ca. Masse eines Goldatoms

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

129

Analogie: Higgs-Mechanismus



Gäste bei einer Party (= Higgs-Feld)

Wie Teilchen Masse bekommen:



Prominenter betritt den Raum (= Teilchen)



Prominenter kommt schwer voran (= Masse)

Wie das Higgs-Teilchen Masse bekommt:



Jemand streut ein Gerücht (= Anregung des Higgs-Felds)



Gerücht verbreitet sich (= massives Higgs-Teilchen)

Higgs-Suchen

 LEP (bis 2000): Higgs-Massen unter 114 GeV/c² ausgeschlossen, erste Anzeichen bei 115 GeV/c²?

• Tevatron (ab 2001): intensive Suche



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

131

Kapitel 6.4

Schlüsselexperimente der Teilchenphysik

Novemberrevolution



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

133

Gluonentdeckung

- Elektron-Positron-Collider
 PETRA bei DESY (1979):
 - Beobachtung von Ereignissen mit e⁺e⁻ → 3 Jets
 - Interpretation:
 - 2 Quarks und 1 Gluon produziert
 - Neutralisierung der Farbladung ("Hadronisierung") durch Erzeugung neuer Teilchen
 - Beobachtet: 3 Bündel von Teilchen ("Jet")





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

134

W- und Z-Entdeckung

- Energie in Elektron-Positron-Collidern um 1980 nicht ausreichend zur Produktion von W/ Z-Bosonen → erster Proton-Antiproton-Collider SppS (CERN, ab 1982)
- Zerfall W → ev_e/µv_µ (ungefähr in Ruhe): geladenes Lepton und "fehlende Energie"



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

W- und Z-Entdeckung

 Z → ee/µµ: Paar von geladenen Leptonen → Rekonstruktion der invarianten Masse



[C. Rubbia, Nobel Lecture, nobelprize.org]

Zahl der leichten Neutrinos

- Elektron-Positron-Collider LEP (CERN, ab 1989): E_{CMS} = 90 GeV
 → massenhafte Erzeugung von Z-Bosonen
- Z-Zerfall in ee, μμ, ττ, qq̄, νν̄ (unsichtbar) → vergleiche Form der Z-Resonanz im Spektrum der invarianten Masse mit Vorhersagen → 3 (leichte) Neutrinoflavors
- Konsistenz im Standardmodell:
 3 Generationen f
 ür Leptonen und Quarks



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

Neutrinomasse

- Idee: massive Neutrinos → Mischung (analog zu CKM)
 → ein Neutrinotyp kann in anderen Typ "oszillieren"
- Super-Kamiokande (Kamioka, Japan): Wasser-Cherenkov-Detektor



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

Kosmische



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

139

Standardmodell: Offene Fragen

- Ist der Higgs-Mechnismus in der Natur realisiert?
- SM liefert keine Erklärung für freie Parameter (Teilchenmassen, CKM-Matrix)
- Probleme mit Beschreibung von Prozessen oberhalb ca.
 1 TeV
- Vorgriff: SM-Teilchen: nur
 4% der Materie im
 Universum





Präsenzübung

 Welche der folgenden Zerfälle sind nicht erlaubt und warum? Welche Wechselwirkung vermittelt die erlaubten Zerfälle?

$$\mu^+ \rightarrow e^+ v_e \, \star$$
 (Leptonenzahlerhaltung)
 $K^+ \rightarrow e^+ v_e \, \star$ (schwach)
 $n \rightarrow p e^- \overline{v}_e \, \star$ (schwach)
 $\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma \, \star$ (elektromagnetisch)
 $\gamma \rightarrow e^+ e^- \, \star$ (Impulserhaltung)
 $e^+ e^- \rightarrow \gamma \gamma \, \star$ (elektromagnetisch)

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

141

Präsensübung

 Welche der folgenden Zerfälle sind nicht erlaubt und warum? Welche Wechselwirkung vermittelt die erlaubten Zerfälle?

$$\begin{array}{cccc} p &
ightarrow & \pi^+ \pi^0 & imes$$
 (Baryonenenzahlerhaltung)
 $\pi^- &
ightarrow & K^0 e^- ar v_e & imes$ (Energieerhaltung)
 $K^- &
ightarrow & \pi^0 e^- ar v_e & m{\prime}$ (schwach)
 $t &
ightarrow & W^+ b & m{\prime}$ (schwach)
 $t &
ightarrow & Zc & imes$ (keine Flavor- ohne Ladungsänderung)
 $\Delta^{++} &
ightarrow & p\pi^+ & m{\prime}$ (stark)

Themen für Übung

- Das Wu-Experiment zur Paritätsverletzung
- Entdeckung des Top-Quarks
- Weltuntergang durch den LHC?

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

143

Kapitel 7

Beobachtung des Weltalls
Beobachtung des Weltalls

- Drei Klassen von Botenteilchen: Photonen, Neutrinos, geladene Teilchen
- Photonen → traditionelle Astronomie
 - Weites Spektrum von Radiowellen bis TeV-Gammastrahlung
 → viele Nachweismöglichkeiten (Teleskope, Satelliten)
 - Geradlinige Ausbreitung (bis auf Gravitationseffekte)
 → Richtungsinformation
 - Absorption bestimmter Wellenlängen → Elemente im Weltall
- Neutrinos:
 - Quellen: Sonne, Supernovae
 - Geradlinige Ausbreitung, aber schwieriger Nachweis

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

145

Milchstraße bei 9 Wellenlängen



Geladene Teilchen

- Hauptsächlich Protonen (89%) und Heliumkerne (10%) aber auch schwerere Kerne bis Eisen (1%)
- Ablenkung in kosmischen Magnetfeldern → keine Richtungsinformation
- Primärteilchen induziert Schauer in Atmosphäre
- Messung direkt (Ballon, Satellit) oder indirekt (Luftschauerarray)



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

147

Kapitel 7.1

Teleskope und Satelliten

Radioteleskope

- Wellenlängenbereich: ca. 1 mm 30 m
 - < 1 mm: Absorption in Atmosphäre, >30 m: Reflexion
 - Große Wellenlänge: ungenaue Winkelauflösung, z.B.

$$\sin \theta_R = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{d} \Rightarrow \theta_R \approx 1,22 \cdot \frac{0,21 \,\mathrm{m}}{300 \,\mathrm{m}} \approx 0.05^\circ$$

- Fokussierung mit Hohlspiegeln (rund oder parabolisch):
 - Arecibo: Durchmesser d = 300 m (statisch)
 - Effelsberg: Durchmesser d = 100 m (beweglich)
- Nachweis mit Mikro-/Radiowellenempfängern: kleine Signale → Empfänger heliumgekühlt zur Rauschreduktion

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

149

Radioteleskope



[Arecibo, Puerto Rico]





Teleskopanordnungen

- Verbesserung der Auflösung: Teleskopanordnungen, z.B.
 Very Large Array (VLA)
 - Messe Korrelation zwischen
 Einzelsignalen → Interferenz
 - Auflösung wie Einzelteleskop mit Durchmesser = größter Abstand zwischen Teleskopen (bis zu 36 km) → Auflösung < 1 Bogensekunde (= 1/3600 Grad)



[VLA, New Mexico]

 Noch höhere Auflösung: Vernetzung von zehn 25-m-Teleskopen von Hawaii bis Virgin Islands

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

151

Optische Teleskope

- Wellenlängen: ca. 0,3-2 μm (optisch und nahes IR)
- Auflösungsgrenze:
 Turbulenzen in Atmosphäre
 → Standort Hochgebirge
- Spiegeldurchmesser ≤ 10 m
 → mechanische Stabilität
- Schlüsseltechnologien:
 - CCD (charge coupled device)
 - Aktiv regulierende Spiegel



[Mauna-Kea-Vulkan, Hawaii, ca. 4200 m]

Satellitenexperiment

- Satelliten-Teleskope
 - Keine Störung durch Atmosphäre
 - Kleinere Durchmesser
- Beispiele:
 - Hubble Space Telescope: optisch und nahes IR
 - Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP): Mikrowellenhintergrund (λ = 1,9 mm)
 - Chandra: Röntgenteleskop

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





[Chandra]

153

Kapitel 7.2

Entfernungsmessungen im Weltall

Trigonometrische Parallaxe

Parallaxe:

- Scheinbare Verschiebung "naher" Objekte relative zu weit entfernten Objekten ("Fixsterne")
- Entfernungen im Universum: Parallaxesekunde (Parsec, pc)
- I pc = 3,086 · 10¹⁶ m
- Alte Einheit: 1 Lichtjahr (LJ) = 0,946 · 10¹⁶ m = 0,307 pc
- Limit: Winkelauflösung des Teleskops → D < 1 kpc



 $\tan p \approx p = r/D$

mit r = $149,6 \cdot 10^9$ m = 1 AU (astronomical unit)

und $p = 1'' = 1/3600 \cdot 2\pi/360^{\circ}$

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

155

Farbe-Leuchtkraft-Beziehung

- Hertzsprung-Russell-Diagramm: Beziehung von Farbe (Temperatur) und Leuchtkraft
- Sterne der Hauptreihe: Gleicher Prozess (Fusion von Wasserstoff zu Helium) → gleiche Leuchtkraft



violett \leftarrow Farbe \rightarrow rot

Spektroskopische Parallaxe

- Scheinbare Helligkeit (apparent magnitude) nimmt mit Entfernung ab → Eichung der "absoluten Helligkeit" (absolute magnitude, scheinbare Helligkeit, wenn Objekt 10 pc entfernt wäre)
 - Leuchtkraft L (abgestrahlte Energie pro Zeit)
 → Fluss durch Kugel mit Radius D: S = L/(4πD²)
 - Scheinbare Helligkeit m und absolute Helligkeit M (D_M = 10 pc)

$$m - M = -2, 5 \cdot \log_{10}\left(\frac{S_m}{S_M}\right) = -2, 5 \cdot \log_{10}\left(\frac{D_M}{D_m}\right)^2 = 5 \cdot \log_{10}(D_m/\text{pc}) - 5$$

 Neuer Sternhaufen: Messe Farbe und scheinbare Helligkeit vieler Sterne der Hauptreihe → vertikale Verschiebung zu bekannter Hauptreihe → Entfernung (geeignet bis zu 10 Mpc)

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

157

"Standardkerze" Supernova

- Supernovae (SN) vom Typ Ia
 - Nach Ende der Kernfusion: Sterne werden zu "weißen Zwergen" → stabil so lange Pauli-Prinzip gegen Gravitation wirkt (bis zu 1,4 Sonnenmassen, Chandrasekhar-Limit)
 - Doppelsternsystem: weißer Zwerg kann Masse von Partnerstern annehmen ("Akkretion") → Masse überschreitet Chandrasekhar-Limit → Gravitationskollaps → unkontrollierte Fusion von Kohlenstoff und Sauerstoff → Explosion
 - Alle Typ-Ia-SN haben ≈ gleich Masse → ≈ gleiche absolute Helligkeit
 - Messung der scheinbaren Helligkeit → genauste
 Entfernungsmessung bis zu ≈200 Mpc (5% Unsicherheit)

Kapitel 8

Big-Bang-Kosmologie

Kapitel 8.1

Hubble-Gesetz und Rotverschiebung

Hubble-Gesetz

- Edwin Hubble (1928):
 - Fast alle Galaxien bewegen sich von der Erde weg
 - Relative Geschwindigkeit v proportional zu Entfernung D

 $v = H_0 \cdot D$

- Hubble-Konstante heute: H₀ = 73⁺³-4 km s⁻¹ Mpc⁻¹
- Geschwindigkeitsmessung durch Dopplereffekt: Auseinanderbewegung → Rotverschiebung von Spektrallinien
- Interpretation der Allgemeinen Relativitätstheorie: nicht Galaxien bewegen sich im Raum voneinander weg, sondern Raum-Zeit selbst expandiert

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

161

Spektrallinien von Wasserstoff



Relativistischer Dopplereffekt

	Sender entfernt sich	Empfänger entfernt sich
Klassisch	Wellenlänge größer: $\lambda' = \lambda(1 + oldsymbol{eta})$	Ausbreitungsgeschwindigkeit kleiner: $\lambda'=rac{\lambda}{1-eta}$
	Zeitdilatation des Senders: $\lambda''=rac{\lambda'}{\sqrt{1-eta^2}}$	Zeitdilatation des Empfängers: $\lambda^{\prime\prime}=\lambda^\prime\sqrt{1-eta^2}$
Relativistisch	Gesamteffekt: $\lambda^{\prime\prime}=\lambda\sqrt{rac{1+eta}{1-eta}}$	Gesamteffekt: $\lambda^{\prime\prime}=\lambda\sqrt{rac{1+eta}{1-eta}}$

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

163

Rotverschiebung

- Definition: Rotverschiebung $z := \frac{\lambda' \lambda}{\lambda} \quad \Leftrightarrow \quad z + 1 = \frac{\lambda'}{\lambda}$ • Für $\beta \ll 1$: $\sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}} \approx 1 + \beta \Rightarrow z \approx \beta$
- Geschwindigkeit aus Rotverschiebung $v = zc = H_0 \cdot D$ (Näherung für z << 1)
- Anwendung der Rotverschiebung
 - Spektralverschiebung einfach messbar → Abstandsmessung
 - Endliche Lichtgeschwindigkeit: Blick in die Vergangenheit
- Größte gemessene Rotverschiebung: z ≈ 7 (IOK-1) → Entfernung 12.9 Milliarden LJ ≈ 4 Gpc → nur 750 Millionen Jahre nach Urknall!

Kapitel 8.2

Homogenes isotropes Universum

Kosmologisches Prinzip

- Theorien der Gravitation:
 - Klassische Theorie (Newton) → Näherung für kleine Massen und Geschwindigkeiten
 - Derzeit gültig: Allgemeine Relativitätstheorie (ART, Einstein)
- Kosmologisches Prinzip: auf den größten Längenskalen ist das Universum ...
 - Homogen: gleiche Dichte von Masse/Energie
 - Isotrop: Von jedem Punkt im Universum sieht das Universum in jede Richtung gleich aus
- Ziel: Weltmodell nach kosmologischem Prinzip

Klassisches Modell: Kinematik

Modell: Kugel mit radialer Expansion (oder Kontraktion)

- Ortsvektor für Punkt in Kugel zur Zeit t_0 : $\vec{r}(t_0) = \vec{x}$
- Radiale Expansion: $\vec{r}(t) = a(t) \cdot \vec{x}$ (a = Skalenfaktor, a(t₀) = 1)
- Geschwindigkeit: $\vec{v} = \dot{\vec{r}}(t) = \dot{a}(t) \cdot \vec{x} = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)} \cdot \vec{r} =: H(t) \cdot \vec{r}$ (H(t) = Expansionsrate)

• Relative Geschwindigkeit zwischen zwei Punkten \vec{r} , $\vec{r} + \Delta \vec{r}$

$$\Delta \vec{v} = \vec{v}(\vec{r} + \Delta r) - \vec{v}(\vec{r}) = H(t) \cdot \Delta \vec{r}$$

 \rightarrow vgl. Hubble-Gesetz: v = H₀ · D

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

167

Klassisches Modell: Dynamik

- Gravitationskräfte treiben Expansion/Kontraktion
 - Masse einer Kugel mit Radius x bei t = t₀: $M(x) = \frac{4\pi}{3} \cdot \rho_0 \cdot x^3$ (ρ_0 = Dichte bei t₀)

Masse konstant bei Expansion → Dichte nimmt ab

$$M(t) = \frac{4\pi}{3} \cdot \rho(t) \cdot r^3(t) = M(x) \Rightarrow \rho(t) = \frac{\rho_0}{a^3(t)}$$

• Bewegungsgleichung (Newton): $\ddot{\vec{r}}(t) = -\frac{G \cdot M(t)}{r^2(t)}$

$$\frac{\ddot{r}(t)}{r(t)} = \frac{\ddot{a}(t)}{a(t)} = -\frac{4\pi G}{3} \cdot \rho(t) = -\frac{4\pi G}{3} \cdot \frac{\rho_0}{a^3}$$

- → Integration: Gleichung für Expansionsrate
- \rightarrow Multipliziere mit $2 \cdot \dot{a} \cdot a$, denn

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(-\frac{1}{a}\right) = \frac{\dot{a}}{a^2}, \quad \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\dot{a}^2 = 2\dot{a}\ddot{a}$$

Klassisches Modell: Dynamik

 Expansionsrate bis auf dimensionslose Konstante K bestimmt (später als Raumkrümmung interpretiert)

$$\dot{a}^2(t) = \frac{8\pi G}{3} \cdot \frac{\rho_0}{a(t)} - Kc^2 \quad \Rightarrow \quad H^2(t) = \left(\frac{\dot{a}(t)}{a(t)}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \cdot \rho(t) - \frac{Kc^2}{a^2(t)}$$

- K < 0: rechte Seite (RS) immer positiv = ständige Expansion
- K = 0: RS positiv = ständige Expansion, Expansionsrate → 0
- K > 0: RS kann 0 werden = Expansion und Kontraktion
- K = 0: definiere kritische Dichte und Dichteparameter (Konvention: t = t₀ = jetzt)

$$\rho_{\rm krit} = \frac{3H_0^2}{8\pi G}, \quad \Omega_0 = \frac{\rho}{\rho_{\rm krit}}$$

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

169

Korrekturen durch ART

- Allgemeine Relativitätstheorie (ART):
 - Expansionsrate bestimmt durch alle Energieformen: Masse,
 Strahlung, ... → Massendichte wird Energiedichte und Druck
 - Kosmologische Konstante Λ:
 - Eingeführt durch Einstein, um Universum ohne Expansion zu beschreiben, später als "größe Eselei [seines] Lebens" verworfen
 - Heute: Interpretation als "dunkle Energie" → fördert Expansion des Universums
 - ART + kosmolog. Prinzip → Friedmann-Lemaître-Gleichungen

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + \frac{3p}{c^2}\right) + \frac{\Lambda}{3}$$
$$H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{Kc^2}{a^2} + \frac{\Lambda}{3}$$

ART = geometrische Feldtheorie Energie verformt Raumzeit → Gravitationskraft Expansion der Raumzeit selbst (in nichts anderes eingebettet) → Analogien: Ameise auf Gummiband/Luftballon, Rosinen im Kuchen, ... K = Raumkrümmung: K > 0 (Ω₀ > 1): sphärisch (2D-Analogie: Kugel) K = 0 (Ω₀ = 1): flach K < 0 (Ω₀ < 1): hyperbolisch

 $\Omega_0 = 1$

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

(2D-Analogie: Sattelfläche)

171

Interpretation mittels ART



• Kosmologische Daten: Universum ist flach (bis auf lokale "Beulen") \rightarrow Energiedichte im Universum = kritische Dichte ($\Omega_0 = 1$)

Kosmische Rotverschiebung

- Kurze Abstände: Rotverschiebung durch Relativbewegung (Dopplereffekt)
- Kosmologische Abstände: Raumausdehnung dominiert
- Lichtwellenlänge wächst mit Raumausdehnung, also mit Skalenfaktor a (jetzt: $a = 1, \lambda = \lambda_{beobachtet}$) $\Delta \lambda = \Delta a$

$$\frac{\Delta a}{\lambda} = \frac{\Delta a}{a} \Rightarrow \lambda_{\text{emittiert}} = C \cdot a(t_{\text{emittiert}}) = \lambda_{\text{beobachtet}} \cdot a(t_{\text{emittiert}})$$
• Rotverschiebung: $z = \frac{\lambda_{\text{beobachtet}}}{\lambda_{\text{emittiert}}} - 1 = \frac{1}{a} - 1$

 Übersetzung in altes Hubble-Gesetz (nur für H = H₀ = const, d.h. z << 1, ansonsten stark modellabhängig!)

$$D = \int_{t_{\rm em}}^{t_{\rm beob}} \frac{c \cdot dt'}{a(t')} = \int_{a(t_{\rm em})}^{a(t_{\rm beob})} \frac{c \cdot da'}{a' \cdot \dot{a}'} = \int_{a(t_{\rm em})}^{1} \frac{c \cdot da'}{a'^2 \cdot H_0} = \frac{c}{H_0} \left(\frac{1}{a(t_{\rm em})} - 1\right) = \frac{z \cdot c}{H_0}$$

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

173

Kapitel 8.3

Entwicklung des frühen Universums

Geschichte des Universums

- Fortschreitende Zeit: Energie/ Temperatur nehmen ab (E = k_BT → T[K] ≈ 11605 · E[eV]):
- Wichtige Epochen:
 - † < 10⁻⁴³ s: Urknall
 - t < 10⁻³⁴ s: Kosmische Inflation
 - t < 1 s: Baryogenese</p>
 - t ≈ 3 min: Nukleosynthese
 - t ≈ 380.000 Jahre: Entkopplung Materie-Strahlung
 - t ≈ 10⁹ Jahre: Erste Sterne und Galaxien

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



Rotverschiebung & Temperatur

 Photonen aus dem frühen Universum (Mikrowellenhintergrund) → Schwarzkörperstrahlung

$$u(\boldsymbol{\omega}) = \frac{\boldsymbol{\omega}^2}{\pi^2 c^3} \frac{\hbar \boldsymbol{\omega}}{\exp\left[\frac{\hbar \boldsymbol{\omega}}{k_B T}\right] - 1}$$

- Expansion des Universums:
 - Rotverschiebung der Photonen: $\omega_{beob} = \omega_{em} \cdot a = \omega_{em}/(1+z)$
 - Photonendichte : $dn(\omega_{beob}) = dn(\omega_{em}) \cdot a^3 = dn(\omega_{em})/(1+z)^3$
 - Resultat: beobachtetes Spektrum hat dieselbe Form, mit geringerer Temperatur: T_{beob} = T_{em}/(1+z)
 - → Rotverschiebung Maß für Temperatur im Universum

175

Urknall und Planck-Epoche

Zustand unendlicher (Massen-/Energie-)Dichte:

- Skalenfaktor a = 0
- Universum nicht notwendigerweise punktförmig, falls
 Universium bei Urknall ∞ ausgedehnt: lim_a(∞ · a) = ∞
- Keine Theorie für $t < t_{Pl} = 5 \cdot 10^{-44}$ s ("Planck-Epoche")
 - (Übung) Planck-Masse m_{pl}: Comptonwellenlänge eines Teilchens mit m_{Pl} = Schwarzschildradius (Ereignishorizont eines schwarzen Loches) → m_{pl}c² = 1.22 · 10¹⁹ GeV
 - Lichtausbreitung in t_{Pl} : Planck-Länge $l_{Pl} = 1.6 \cdot 10^{-35}$ m
 - Kürzeste bekannte natürliche Zeit-/Längenskala: Gravitations- und Quanteneffekte gleich stark

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

177

Die erste Sekunde

- Abnahme der Energiedichte im Universum nach Urknall
 - GUT-Skala (grand unified theory), ca. 10¹⁶ GeV: QCD und elektroschwache WW gleich stark
 - Elektroschwache Skala (≈ 100 GeV):
 - Higgs-Mechanismus: Massen der Elementarteilchen
 - Massive W- und Z-Bosonen entstehen
 - Neutrinos "entkoppeln" aus Gleichgewicht

$$p + e^- \leftrightarrow n + v_e$$
$$p + \bar{v}_e \leftrightarrow n + e$$

- → kosmischer Neutrinohintergrund (WMAP 2008: erste Evidenz)
- QCD-Skala (≈ 200 MeV): Confinement von Quarks setzt ein
 → Bildung von Hadronen

Baryogenese

- Ungelöste Frage #1: Wenn der Urknall gleich viele Quarks und Antiquarks erzeugt, warum habe sie sich nicht alle vernichtet (mittels qq̄ → Photonen)?
 - Urknall → Gleichgewicht: n_B = n_{Anti-B}
 - Heute beobachtet $\eta := \frac{n_B n_{\bar{B}}}{n_V} \approx 10^{-9}$
 - Warum ist ein Baryon in einer Milliarde übriggeblieben?
- Drei Bedingungen (A. Sakharov, 1967) → müssen alle erfüllt sein für Baryogenese
 - Prozess mit Baryonenzahlverletzung
 - Verletzung der Symmetrie zwischen Teilchen/Antiteilchen

Reaktionen außerhalb des thermischen Gleichgewichts
 Moderne Physik (PK 23a), HU Berlin, Sommersemester 2008
 179

Primordiale Nukleosynthese

- Prozesse in ersten drei Minuten:
 - Deuteriumbildung und Dissoziation: $p + n \leftrightarrow D + \gamma$
 - Neutronzerfall: $n \rightarrow pe^- \bar{v}_e$
- T \approx 8 · 10⁸ K: Photonenergie zu gering zur Dissoziation
 - Verhältnis von Neutronen zu Protonen: ca. 1:7
 - Deuterium: sofortige Weiterreaktion zu Helium (viel größere Bindungsenergie)
 - Vorhersage des Massenanteils von Helium:

$$Y = \frac{4n_{\text{He}}}{4n_{\text{He}} + n_{\text{H}}} = \frac{2n_n}{n_p + n_n} = \frac{2\frac{n_n}{n_p}}{1 + \frac{n_n}{n_p}} \approx 0.25$$

mit $n_{\text{H}} = n_p - n_n, n_{\text{He}} = \frac{n_n}{2} \rightarrow \text{experimentell bestätigt}$
Moderne Physik (PK 23a), HU Berlin, Sommersemester 2008 180

Primordiale Nukleosynthese

- Messung des (absoluten) Vorkommens von Helium und Deuterium + kernphysikalische Rechnung
 - Anteil von baryonischer Materie an Gesamtenergie eines flachen Universums ($\Omega_0 = \rho/\rho_{krit} = 1$)

$$\Omega_b = rac{
ho_b}{
ho_{
m krit}} pprox 0.04$$

- Ungelöste Frage #2: Woraus besteht der Rest?
- Nach drei Minuten:
 - Übergang strahlungsdominiertes Universum (meiste Energie steckt in Photonen) → materiedominiertes Universum
 - Verlangsamung der Reaktionsrate, Plasma mit neuem
 Gleichgewicht durch "Rekombination" Kern+e ↔ Atom + γ

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

181

Entkopplung Strahlung-Materie

- Entkopplung der Photonen ("Universum wird durchsichtig")
 - Abschätzung: Grundzustandsenergie Wasserstoff 13,6 eV (150.000 K)
 - 10⁹ mal mehr Photonen als Baryonen: 0,3 eV (3000 K) ausreichend → 380.000 Jahre nach Urknall
 - Photonen breiten sich bis heute im Universum aus → kosmische Hintergrundstrahlung (cosmic microwave background, CMB) ≈ Fingerabdruck des frühen Universums
 - Rotverschiebung: $T_{beob} = T_{em}/(1+z) = 2,7 \text{ K} \rightarrow z \approx 1000$
 - CMB vorhergesagt von G. Gamov (1946), entdeckt von A. Penzias, R. Wilson (1965)

COBE und WMAP



Polarisation des CMB

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



183

COBE-Resultate



WMAP-Resultate

- Temperaturschwankungen = Dichteschwankungen: Photonen aus Gegenden mit mehr Materie stärker rotverschoben (kälter)
- Interpretation mit kosmologischen Modellen → Extraktion kosmologischer Parameter, z. B. Energie im Universum:
 - 4% baryonische Materie
 - 21% dunkle Materie
 - 75% dunkle Energie



Dunkle Materie

- WMAP: 21% der Energie im Universum durch dunkle Materie (DM)
- Weitere Hinweise, z.B. Rotationsgeschwindigkeit von Galaxien \rightarrow Galaxien besitzen Halo aus DM



- Kandidaten für DM:
 - Neutrinos: fast masselos, nur schwache WW → relativistisch, "heiße DM"
 - WIMPs (weakly interacting massive particles): schwere stabile Teilchen (\approx 100 GeV/c²) in Theorien jenseits des Standardmodells (z.B. Supersymmetrie) \rightarrow "kalte DM"

DM und Strukturbildung

- Bildung von Clustern von Galaxien → dominiert durch DM-Gravitation
- Vergleich von Beobachtungen (z. B. Sloan Digital Sky Survey) mit Simulationsrechnungen (10¹⁰ Teilchen seit t = 10⁷ y)
 - Heiße DM → Gravitation kann Materie schlecht zusammenhalten → kleine Strukturen als beobachtet
 - Kalte DM → Strukturgröße entspricht Beobachtungen



[http://www.mpa-garching.mpg.de/millennium/] ersemester 2008 187

Moderne Physik (PK 23a), HU Berlin, Sommersemester 2008 187

Dunkle Energie

- 75% der Energie im Universum: "Gravitationsdruck" → Expansion des Universums gegen Gravitationskräfte
 - Praktische Lösung: kosmologische Konstante = konstante geringe Energiedichte (10⁻¹⁷ J/cm³) → Ursache?
 - Erklärungsversuch I: Vakuumenergie der Quantenmechanik bei Planck-Skala (10¹⁰³ J/cm³)
 → 120 Größenordnungen zu groß
 - Erklärungsversuch II: neues Quantenfeld mit geringer Masse (≈ 10⁻³³ eV) → Spekulation: "Quintessenz" (Name: klassisches 5. Element)

Big-Bang-Kosmologie: Probleme

• Horizont-Problem:

- Kontinuierliche Expansion: Bereiche des Universums mit Winkelabständen > 1° bei Urknall nicht kausal verbunden (Informationsaustausch mit endlicher Lichtgeschwindigkeit)
- Aber (COBE, WMAP): CMB isotrop bis auf O(10⁻⁵)
- Flachheits-Problem:



- Messung Energiedichte heute: $\Omega_0 = \rho / \rho_{\text{krit}} = 1,0052 \pm 0,0064$
- Expansion: labiles Gleichgewicht bei Ω₀ = 1 → heutiger Wert nur, wenn Ω(10⁻⁴³ s) - 1 < 10⁻⁶⁰!



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

Kosmische Inflation

- Kosmische Inflation (A. Guth, 1980):
 - 10⁻³⁴ s nach Urknall: kosmologische Konstante dominiert Energiedichte im Universum
 - Universum expandiert für kurze Zeit exponentiell:

$$H^{2} = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^{2} = \frac{\Lambda}{3} \Rightarrow \dot{a} = \sqrt{\frac{\Lambda}{3}}a \Rightarrow a(t) = C \cdot \exp\left[\sqrt{\frac{\Lambda}{3}} \cdot t\right]$$

- Ursache: Vakuumenergie von neuem Quantenfeld ("Inflaton")?
- Inflation Lösung für beide Probleme:
 - Horizont: Expansion vergrößert kausal zusammenhängende Gebiete → gesamtes sichtbares Universum vor Inflation kausal verbunden
 - Flachheit: Expansion "glättet" jede Raumkrümmung

ACDM-Kosmologie

- Heutiges Standardmodell der Kosmologie: "ΛCDM"
 - Flaches Universum
 - Inflation
 - Kosmologische Konstante Λ
 - Kalte dunkle Materie (cold dark matter, CDM)
- Kompatibel mit allen Beobachtungen, aber offene Fragen:
 - Kandidaten f
 ür dunkle Materie (WIMPs? → Entdeckung am LHC?)
 - Ursache der kosmologischen Konstante?
 - Ursache der Inflation?

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

191

Kapitel 8.4

Experimente zu Dunkler Materie

WIMPs und Supersymmetrie

- WIMPs: schwere ungeladene Teilchen, stabil
- WIMP-Kandidaten z.B. in Theorie der Supersymmetrie
 - Supersymmetrie = Symmetrie zwischen Fermionen und Bosonen (die letzte verbleibende Symmetrie)
 - Partnerteilchen zu jedem Standardmodellteilchen
 - Fermionen (Spin 1/2) → Spin-0-Partner ("Squarks" und "Sleptonen")
 - Eichbosonen (Spin 1) → Spin-1/2-Partner ("Gauginos")
 - Leichtestes supersymmetrisches Teilchen stabil → WIMP-Kandidat: neutrales Gaugino ("Neutralino")

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

193

DM-Suche an Beschleunigern





DM-Suche ohne Beschleuniger

- Idee: WIMP-Wechselwirkung mit Atomkern und Elektron → Ionisation und Wärme durch Rückstoß
- Beispiel CDMS-II (cold dark matter search):
 - Detektor in Soudan-Mine (Minnesota)
 → Abschirmung kosmische Strahlung
 - Ionisation und Rückstoß in Germanium- und Siliziumblocks bei 10 mK (gegen thermische Bewegung)
 - Bisher keine Hinweise auf WIMPs

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



CDMS-Detektormodul



[http://cdms.berkeley.edu/] 195

Kapitel 9

Astroteilchenphysik

Überblick

- Untersuchung von teilchenphysikalischen Vorgängen im Universum
 - Quellen kosmischer Strahlung und Beschleunigungsmechanismen
 - Transport und Ablenkung durch interstellares Medium
- Detektoren mit Methoden aus der Teilchenphysik
 - Luftschauerarrays
 - Gammastrahlenteleskope
 - Neutrinoteleskope

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

197

Kapitel 9.1

Energiespektrum der kosmischen Strahlung

Kosmische Strahlung

• Entdeckung (V. Hess, 1912):

- Ballon in bis zu 5 km Höhe
- Resultat: Gasionisation nimmt mit Höhe zu → "Höhenstrahlung"
- Ca. 1/3 der natürlichen Strahlenbelastung am Erdboden
- Quellen: Sonne, weitere intra- und extragalaktische Quellen



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

199

Energie geladener Teilchen

- Direkte Messung (< 10⁵ GeV): Ballons, Satelliten, ISS
 - Absorption in Atmosphäre → große Höhen (>30 km)
 - Teilchenphysikdetektoren:
 Silizium, Kalorimeter, Cherenkov
- Indirekte Messung (≥ 10⁵ GeV): Luftschauerarrays
 - WW mit Atmosphäre: ausgedehnte Luftschauer
 - Großflächige Arrays →
 Sampling des Luftschauers





Pierre-Auger-Observatorium

- Standort: Malargüe (Argentinien)
- Hybriddetektor:
 - 1600 Wasser-Cherenkov-Detektoren (1,5 km Abstand)
 → 3000 km² (> Saarland)
 - 4 Detektoren f
 ür Fluoreszenzlicht aus Luftschauer
- Messungen von Richtung, Energie und chemischer Zusammensetzung (Fe oder H)?





Energiespektrum

- Unterhalb von E = 10 GeV: Ablenkung durch Sonnenwind und Erdmagnetfeld
- Oberhalb von 10 GeV: Intensität (= Teilchen pro Energie, Fläche, Raumwinkel und Zeit) folgt Potenzgesetz

$$I(E) = \frac{\mathrm{d}^4 N}{\mathrm{d}E \,\mathrm{d}A \,\mathrm{d}\Omega \,\mathrm{d}t} \sim E^{-\gamma}$$

→ Quellen nicht thermisch (Planck'sches Strahlungsgesetz: exponentielle Intensitätsabnahme)

- < 10^7 GeV: γ = 2.7
- $\geq 10^7$ GeV: $\gamma = 3.0 \rightarrow$ "Knie" im Energiespektrum
- \geq 4 · 10⁹ GeV: γ < 3.0 \rightarrow "Knöchel" im Energiespektrum
- ≥ 5 · 10¹⁰ GeV: "GZK-Cutoff"

Energiespektrum

• Knie und Knöchel:

- Ursache: keine eindeutige Lehrmeinung
- Erklärungsversuche: Teilchen entkommen aus galaktischen Magnetfelder, Änderung des Beschleunigungsmechanismus
- GZK-Cutoff (Greisen, Zatsepin, Kuz'min): ca. 5 · 10¹⁹ GeV
 - Protonen aus kosmischer Strahlung reagieren mit CMB-Photonen → resonante Produktion von Pionen

 $p + \gamma \rightarrow \Delta^+ \rightarrow p \pi^0 \qquad p + \gamma \rightarrow \Delta^+ \rightarrow n \pi^+$

→ Teilchen mit höheren Energien müssen von Quelle mit Abstand < 75 Mpc stammen, um nicht absorbiert zu werden

Experimentell bestätigt (HiRes Fly's Eye 2007, Auger 2008)

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



205

Hochenergetische Photonen

- Ziel: Suche nach Punktquellen (γ nicht abgelenkt)
- Kosmische Photonen mit E > 100 GeV → Luftschauer mit Cherenkov-Kegel um Schauerachse
- Beispiel: H.E.S.S. (High Energy Stereoscopic System)
 - 4 Spiegelteleskope in Hochebene nahe Gamsberg, Namibia
 - Nachweis des Cherenkov–Lichts



[http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/HESS.html] Moderne Physik (PK 23a), HU Berlin, Sommersemester 2008



207

Neutrino-Astronomie

- Suche nach Punktquellen kosmischer Neutrinos
- Reaktion $v_{\mu} + \text{Kern} \rightarrow \mu + X$
 - Cherenkov-Licht des µ mit Photomultiplier nachweisen
- Detektoren mit guten optischen Eigenschaften (= durchsichtig)
 - Wasser: Baikalsee, Antares (Mittelmeer),
 - Eis: AMANDA, IceCube (Südpol)





Kosmische Beschleuniger

Kosmische Beschleuniger

- Beobachtetes Energiespektrum geladener Teilchen: Potenzgesetz I(E) ~ $E^{-\gamma}$ bis 10¹¹ GeV
- Universum enthält hochenergetische Photonen und Neutrinos
- Suche nach kosmischen Beschleunigern:
 - Punktquellen?
 - Produktionsmechanismen?
 - Beschleunigungsmechanismen?

Pulsare

- Beobachtung: "Pulsare" (pulsating stars)
 - Schnell rotierende Neutronensterne → gerichtete
 Energieabstrahlung (vgl. Leuchtturm) im Radiowellenbereich
- Entstehung von Neutronensternen
 - Nach Supernova (SN) kollabieren Überbleibsel unter Gravitation, Radius schrumpft: 10⁶ km → 20 km
 - Extrem hohe Dichten (10¹³ g/cm³, vergleichbar mit Atomkern) → Umwandlung aller Elektronen und Protonen in Neutronen energetisch günstiger: p+e⁻ → n+v_e
 - Pauliprinzip verhindert Neutronzerfall: alle gebundenen Zustände besetzt, nicht genügend Energie für freie Elektronen

Moderne Physik (PK 23a), HU Berlin, Sommersemester 2008, Vorlesung 11

211

Pulsare

- Drehimpulserhaltung:
 - Drehimpuls Kugel: L = 2/5 ω mR² $\rightarrow \frac{\omega_{\text{Neutronenstern}}}{\omega_{\text{Stern}}} = \frac{R_{\text{Stern}}^2}{R_{\text{Neutronenstern}}^2}$
 - Rotationsfrequenz: Tage → Millisekunden
- Magnetischer Fluss: $\int \vec{B}_{\text{Stern}} \cdot d\vec{A}_{\text{Stern}} = \int \vec{B}_{\text{Neutronenstern}} \cdot d\vec{A}_{\text{Neutronenstern}}$

B

- Zahl der Feldlinien durch Oberflächenelement konstant, Oberfläche schrumpft mit R² → Magnetfelder bis zu 10⁸ Tesla (vgl. LHC, MRI: < 10 Tesla)
- Starke veränderliche Magnetfelder induzieren starke elektrische Felder → Pulsare = Beschleuniger



Moderne Physik (PK 23a), HU Berlin, Sommersemester 2008, Vorlesung 11

Aktive Galaxienkerne



Aktive Galaxienkerne

- Aktive Galaxienkerne (active galactic nuclei, AGN):
 - Viele Klassen von Galaxien mit aktivem Kern (Quasare, quasistellare Objekte, Blazare, ...)
 - Radiowellenbild: Kern + Strahlungskeulen + ausgedehnte Jets (bis zu 1 Mpc)
 - Energiespektrum: Potenzgesetz I ~ $E^{-\gamma}$ (\rightarrow nicht thermisch)
 - Typisch: variable Leuchtkraft



SMBH

- Schwarze Löcher in der Allgemeinen Relativitätstheorie:
 - Singuläre Lösung der ART-Gleichungen → Gravitationsfeld so stark, dass Materie und EM-Strahlung nicht entkommt
 - Grenze des BH: Ereignishorizont (Radius: Schwarzschildradius)
 - Nur drei Quantenzahlen: Masse, Ladung, Drehimpuls (alle anderen Strukturen verschwinden in Singularität)
- Supermassive schwarze Löcher (super-massive BH, SMBH) in Galaxienzentren erklären alle AGN-Klassen
 - Gravitative Energiegewinnung durch "Akkretion"
 - Unterschiede: umgebende Hostgalaxien, Beobachtungswinkel (z. B. Blazar → Jet auf Erde gerichtet)

Moderne Physik (PK 23a), HU Berlin, Sommersemester 2008, Vorlesung 11

215

Akkretion

Abschätzung der Energie eines AGN: Leuchtkraft 10³⁹ J/s, Lebensdauer 10⁷ Jet Jahre → Gesamtenergie: 10⁵³ J Energiequelle: Gravitation Akkretions- \Box Kernfusion: E = $\epsilon \cdot mc^2$ mit Umwandlungsscheibe effizienz $\varepsilon < 1\%$ (8 MeV freiwerdende Energie pro Fusion) \rightarrow m > 10³⁸ kg = 10⁸ SMBH Sonnenmassen \rightarrow braucht mehr Brennstoff als beobachtete Masse ($10^5 - 10^8 M_{\odot}$) ✓ Gravitation (Materie "fällt" in SMBH) → Akkretionsscheibe: potentielle Energie umgesetzt in Wärme (Reibung) \rightarrow 5% Umwandlungseffizienz

Moderne Physik (PK 23a), HU Berlin, Sommersemester 2008, Vorlesung 11
Beschleunigung in AGN-Jets



- Wichtige Prozesse:
 - Schockwellenbeschleunigung
 - Hadronische und EM-Schauer
 - Inverser
 Compton-Effekt
 - Synchrotronstrahlung

Moderne Physik (PK 23a), HU Berlin, Sommersemester 2008, Vorlesung 11

217

Beschleunigung an Gaswolken

- Vielfache Streuung an magnetischen Gaswolken mit Relativgeschwindigkeit u → Reflexion in Magnetfeld
 u parallel zu v: ΔE₁ = ¹/₂m(v+u)² ¹/₂mv² = ¹/₂m(2uv+u²)
 u antiparallel zu v: ΔE₂ = ¹/₂m(v-u)² ¹/₂mv² = ¹/₂m(-2uv+u²)
 Energiegewinn: mu² → ^{ΔE}/_E = 2^{u²}/_{v²} → quadratisch in u, v (Fermi-Beschleunigung "zweiter Art")
 - Im Prinzip hohe Energien, aber u klein → Energiegewinn pro Kollision klein → ineffizient als Beschleuniger

Schockwellenbeschleunigung

 Schockwellenbeschleunigung: Energiegewinn eines Teilchens mit Geschwindigkeit v an einer Schockfront



$$\Delta E = \frac{1}{2}m(v + (u_1 - u_2))^2 - \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m(2v(u_1 - u_2) + (u_1 - u_2)^2) \approx mv(u_1 - u_2)$$
• Relativistisch: $\frac{\Delta E}{E} = \frac{4}{3}\frac{u_1 - u_2}{v} \rightarrow \text{linear in } u_1 - u_2, v$
 $\rightarrow \text{Fermi-Beschleunigung "erster Art"}$

• Beschleunigung bis zu 10⁵ GeV

Moderne Physik (PK 23a), HU Berlin, Sommersemester 2008, Vorlesung 11

219

Hochenergetische Photonen

- Produktion hochenergetischer Photonen:
 - Inverser Compton-Effekt: hochenergetisches Elektron und "weiches" Photon → "hartes" Gammaquant

Compton-Effekt

Inverser Compton-Effekt





- EM– und hadronische Kaskadenzerfälle (vgl. Kalorimeter), Zerfall $\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma$
- Synchrotronstrahlung von bewegten geladenen Teilchen in kosmischen Magnetfeldern

Neutrinoproduktion



Moderne Physik (PK 23a), HU Berlin, Sommersemester 2008, Vorlesung 11

Suche nach Punktquellen

- H.E.S.S.: Identifikation zahlreicher Punktquellen hochenergetischer Photonen:
 - Galaktisches Zentrum
 - Supernovae (und deren Reste), Pulsare



Moderne Physik (PK 23a), HU Berlin, Sommersemester 2008, Vorlesung 11

221

Suche nach Punktquellen

- Höchstenergetische geladene Teilchen → etwa geradlinige Ausbreitung → Richtungsinformation
- Auger 2007: Korrelation mit bekannten AGNs → höchste Energie stammen von extragalaktischen Quellen



Moderne Physik (PK 23a), HU Berlin, Sommersemester 2008, Vorlesung 11

223

Kapitel 10

Teilchenphysik, Astroteilchenphysik und Kosmologie im 21. Jahrhundert

Physik des 20. Jahrhunderts

- Kleine Längenskalen: Quantenphysik (Planck, Bohr, Heisenberg, Schrödinger, ...) → Struktur der Materie
 - Teilchenphysik: Quantenfeldtheorie → Untersuchung immer kürzerer Längenskalen (d.h. höherer Energien)
 - Bausteine der Natur: Atom → p/n/e → Quarks/Leptonen
- Große Längenskalen: Allgemeine Relativitätstheorie (Einstein) → Struktur der Raum-Zeit
- Bisher keine akzeptierte Theorie, die auf allen Längenskalen gültig ist ("Theory of Everything") → Quantentheorie der Gravitation

Moderne Physik (PK 23a), HU Berlin, Sommersemester 2008, Vorlesung 12

225

SM der Teilchenphysik

- Standardmodell der Teilchenphysik (SM)
 - Experimentell mit hoher Präzision bestätigt
 - Bisher noch nicht entdeckt: Higgs-Boson → Tevatron? LHC?
- Offene Fragen und Probleme
 - Teilchenspektrum: warum 12 Teilchen in 3 Generation?
 - Erklärung für Massen und Kopplungen der Teilchen?
 - Kein Kandidat für dunkle Materie
 - Keine Gravitation
- SM = "effektive Theorie" für Energien unterhalb ca. 1 TeV (vgl. Newton'sche Mechanik für v<<c)

SM der Kosmologie

- Allgemeine Relativitätstheorie (ART) mit hoher Präzision bestätigt: Lichtbeugung, schwarze Löcher, expandierendes Universum, … → Grundpfeiler des SM der Kosmologie (ΛCDM)
- Probleme:
 - Warum ist Gravitationskraft so schwach?
 - Keine Erklärungen für kosmische Inflation und Wert der kosmologischen Konstante Λ
 - Keine Quantentheorie der Gravitation zur Behandlung von Singularitäten (Urknall, schwarze Löcher)
- ART = "effektive Theorie" für große Längenskalen

Moderne Physik (PK 23a), HU Berlin, Sommersemester 2008, Vorlesung 12

227

Längen- und Energieskalen

- Skalen im Standardmodell der Teilchenphysik:
 - QCD: Confinement der Quarks \rightarrow 10⁻¹⁵ m, 200 MeV
 - Elektroschwache WW: Masse der Eichbosonen → 10⁻¹⁸ m, 100 GeV
- Planck-Skala: 10⁻³⁵ m, 10¹⁹ GeV → "Hierarchieproblem": warum ist die elektroschwache Skala << Planck-Skala?



Supersymmetrie

- Symmetrieprinzip = Paradigma der Theoriebildung:
 Postuliere Symmetrie → leite Theorie ab
- Supersymmetrie (SUSY) = Symmetrie zwischen Bosonen und Fermionen → zu jedem SM-Teilchen gibt es ein Partnerteilchen
 - Bisher verträglich mit allen Beobachtungen
 - Enthält DM-Kandidat
 - Vereinigung der Kräfte
- SUSY-Energieskala: 1-10 TeV(?) → "Teraskala"
- Bisher keine Beobachtung von SUSY-Teilchen \rightarrow LHC?

Moderne Physik (PK 23a), HU Berlin, Sommersemester 2008, Vorlesung 12

229

Vereinigung der Kräfte

- Ziel: Vereinigung der elektroschwachen und starken Kraft → Grand Unified Theories (GUT)
 - Idee: SM ist in umfassendere Theorie "eingebettet"
 - Vorhersagen: leichte Neutrinos, Protonzerfall (experimentell: >10³⁰ Jahre)
- Mit Supersymmetrie: Vereinigung der Kräfte an der GUT-Skala: ca. 10¹⁶ GeV





[Nature] 230

Stringtheorie

- Idee: punktförmige Teilchen → Strings
- String = Saite (offen oder geschlossen),
 d.h. eindimensionales
 Objekt mit
 Eigenschwingungen
- Typische Länge von Strings: Planck-Länge (10⁻³⁵ m)
- Stringtheorie = Quantentheorie von Strings



Moderne Physik (PK 23a), HU Berlin, Sommersemester 2008, Vorlesung 12

231

Stringtheorie

• String-Wechselwirkungen:



- "Realistische" Stringtheorien beinhalten:
 - Supersymmetrie: "Superstrings"
 - Extra-Dimensionen (typisch: 10D = 4D-Raumzeit + 6D)
- Anregungszustände der Strings = Elementarteilchen
 - SUSY-Teilchenspektrum qualitativ vorhergesagt
 - Anregungen mit Spin 0 (Higgs) bis Spin 2 (Graviton) → Stringtheorie beschreibt Gravitation

Extra-Dimensionen

- A. Einstein (1905): 3D-Raum +
 Zeit = 4D-Raumzeit
- Kaluza und Klein (1919): 5D-Raumzeit → an jedem Punkt im 3D-Raum gibt es eine "kompaktifizierte" (aufgerollte) Raumdimension
- Stringtheorie: An jedem Punkt im 3D-Raum gibt es eine kompaktifizierte 6D-Mannigfaltigkeit





Moderne Physik (PK 23a), HU Berlin, Sommersemester 2008, Vorlesung 12

233

234





Moderne Physik (PK 23a), HU Berlin, Sommersemester 2008, Vorlesung 12

235

Ausblick

- Teilchenphysik, Astroteilchenphysik und Kosmologie: gut getestete Modelle:
 - Standardmodell der Teilchenphysik
 - ΛCDM-Kosmologie
- Viele offene Fragen am Anfang des 21. Jahrhunderts: Revolution im Weltbild?

