

# Einführung in die Teilchenphysik (Bakkalaureat)

Walter Grimus\*

Fakultät für Physik, Universität Wien

Boltzmannngasse 5, A-1090 Wien

6. Oktober 2010

---

\*E-mail: [walter.grimus@univie.ac.at](mailto:walter.grimus@univie.ac.at)

# Definitionen und Abkürzungen

$m_p$  = Masse des Protons,  $m_n$  = Masse des Neutrons,  $m_e$  = Masse des Elektrons  
( $Z, A$ ): Kern mit Ordnungszahl  $Z$  und Massenzahl  $A$

# 1 Von Atomen zu Teilchen

## 1.1 Strahlung und Radioaktivität

- November 1895 Conrad Wilhelm Röntgen entdeckt die „X-Strahlen“ (Röntgen-Strahlen) mit Hilfe einer Kathodenstrahlröhre.

Was passierte zwischen 1.3.1896 (Entdeckung der Radioaktivität) und 4.12.1930 (Paulis Neutrino-Hypothese)? Siehe A. Pais [1] (siehe auch [2, 3]).

- 1. März 1896 Entdeckung der „Uran-Strahlen“ durch Henri Becquerel (später Radioaktivität genannt). Becquerel untersucht Idee, dass X-Strahlen mit Phosphoreszenz zusammenhängen; Sonnenlicht zur Anregung von Kaliumuranyldisulphat ( $\text{K}_2\text{UO}_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) zu Phosphoreszenz; Photoplatten zeigen jedoch Umriss des Minerals auch ohne vorherige Sonnenbestrahlung → Effekt kommt vom Uran, hängt nicht mit spezieller U-Verbindung zusammen.
- 1897 Entdeckung des Elektrons:
  - 1896 Arbeiten von Pieter Zeeman: Aufspaltung von Spektrallinien im Magnetfeld → Effekt durch Bewegung eines „Ions“ im Atom mit  $e/m \sim 10^3 \times (e/m)|_{\text{H}^+}$ .
  - 7.1.1897 Erste Aussage über die Existenz eines subatomaren Teilchens durch Johann Emil Wiechert in einem Vortrag in Königsberg: Kathodenstrahlen → Teilchen mit Masse 2000 bis 4000 Mal kleiner als der des H-Atoms.
  - April 1897 Bestimmung von  $e/m$  aus Kathodenstrahlen durch Walter Kaufmann in Berlin.
  - 30.4.1897 Vortrag von Joseph John Thomson in London: gute Bestimmung von  $e/m$  aus Kathodenstrahlen.
  - 1899 J.J. Thomson:  $m_e \sim 3 \times 10^{-26}$  g (ungefähr Faktor 30 zu groß) aus  $e/m$  und Bestimmung der Elementarladung (erste Anwendung der Nebelkammer (1895) von C.T.R. Wilson).
  - 1910 Robert Andrews Millikan: genaue Bestimmung der Elementarladung
- 1898 Marie Curie: Auch Thorium strahlt (etwas früher von Carl Nathaniel Schmidt in Erlangen gefunden), Intensität der „Becquerel-Strahlen“ vergrößert sich mit der Menge des im Mineral enthaltenen Urans.  
Spekulation einer *externen Energiequelle* der Radioaktivität → *Erste Energiekrise*.  
Marie und Pierre Curie: Entdeckung des Poloniums → Begriff der Radioaktivität.  
M. Curie, P. Curie, Gustave Bémont: Entdeckung des Ra.  
Ernest Rutherford: Uranstrahlen bestehen aus (mindestens) zwei Komponenten,  $\alpha$  and  $\beta$ ,  $\beta$ -Komponente durchdringender → Becquerel hat  $\beta$ -Komponente gesehen (des U-Tochterkerns  $^{234}\text{Th}$ )
- 1899  $\beta$ -Strahlen sind Elektronen.

- 1900 Paul Villard: Ra ist Quelle sehr durchdringender Strahlung  $\rightarrow$   $\gamma$ -Strahlung.  
E. Rutherford: Erste Halbwertszeit eines radioaktiven Zerfalls bestimmt,  
 $T_{1/2}(\text{Th-Emanation} \equiv {}^{220}\text{Rn}) \simeq 1 \text{ min.}$

**Das Zerfallsgesetz:**  $N(t)$  = Anzahl der zur Zeit  $t$  vorhandenen Atome,  $N(0) \equiv N_0$ ,  
 $dN(t) = -\lambda N(t)dt \Rightarrow$

$$\boxed{N(t) = N_0 e^{-\lambda t}, \quad \tau \equiv \frac{1}{\lambda} = \frac{T_{1/2}}{\ln 2}} \quad (1)$$

$T_{1/2}$  ist die Halbwertszeit,  $\tau$  heißt Lebensdauer,  $\Gamma \equiv \hbar\lambda$  heißt Zerfallsbreite,  $\ln 2 \simeq 0.69315$ .

- 1902 E. Rutherford, Frederick Soddy: "transformation theory"  $\leftrightarrow$  Radioaktivität durch spontane Transmutation von gewissen Atomsorten.
- 1903 P. Curie, Albert Laborde: 1 g Ra heizt 1.3 g Wasser von  $0^\circ\text{C}$  auf  $100^\circ\text{C}$  in einer Stunde!
- 1903 Erste Verwendung des Wortes „Atomenergie“ durch Rutherford und Soddy.
- 1908 E. Rutherford, Hans Geiger; E. Rutherford, Thomas Royds:  $\alpha \equiv \text{He}^{++}$ .
- 1914 E. Rutherford, Edward Neville da Costa Andrade:  $\gamma$ -Strahlung elektromagnetisch, daher kein prinzipieller Unterschied zu Röntgenstrahlen.

**Bemerkungen zur ersten Energiekrise:** Französische Akademie der Wissenschaften 1775, siehe [2], S.105, Energiesatz auf Wärme ausgedehnt im 19. Jahrhundert. Antoine Laurent Lavoisier: Erhaltung der Materie in chemischen Prozessen.

Einige endliche Halbwertszeiten schon bekannt, jedoch die freiwerdende Energie bei manchen Zerfällen enorm!

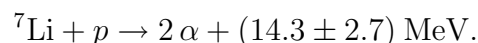
A. Einstein (1905):  $E_0 = Mc^2$  („Gibt ein Körper Energie  $L$  in Form von Strahlung ab, so verkleinert sich seine Masse um  $L/V^2$ “ ( $V \equiv c$ )).

Warum spielte Einsteins Arbeit keine Rolle bei Diskussion?

1. Spezielle Relativitätstheorie nur langsam aufgenommen.
2. Genauigkeit bei Massenbestimmungen nicht ausreichend.
3. Problem des Halbwertszeit komplett ungelöst, erst durch QM verstanden.

Erst 1932, nach der Entdeckung des Neutrons, Test von  $E_0 = Mc^2$  durch Bindungsenergie möglich.

1932 John Douglas Cockroft, Ernest Thomas Sinton Walton:



Erste Reaktion ausgelöst durch  $p$  aus Beschleuniger (0.7 MeV)!

Bemerkung: 1924 Bohr, Kramers und Slater: Energieerhaltung und Kausalität gelten nur statistisch in Quantenübergängen. In 1925 Energie-Impulserhaltung in individuellen Prozessen nachgewiesen in der Compton-Streuung durch A.H. Compton und A.W. Simon.

**Physikalische Einheiten in Mikrophysik:** Energieeinheit Elektronvolt

1 eV = Elementarladung  $\times$  1 Volt  $\simeq 1.602 \times 10^{-19}$  Joule

1 keV =  $10^3$  eV, 1 MeV =  $10^6$  eV, 1 GeV =  $10^9$  eV, 1 TeV =  $10^{12}$  eV

Typische Energien in Atomhülle: eV, z.B. Ionisierungsenergie des H-Atoms (Rydberg-Energie) ist  $m_e c^2 \alpha^2 / 2 \simeq 13.606$  eV,  $\alpha \simeq 1/136.037$  ist die Feinstrukturkonstante

Typische Energien in Atomkern: MeV

Natürliche Einheiten: „ $c = \hbar = 1$ “  $\Rightarrow$  Massen in eV, Längen und Zeiten in  $1/\text{eV}$

$m_e = 0.511 \text{ MeV}/c^2$ , bzw. einfach  $m_e = 0.511 \text{ MeV}$ ,  $m_p = 938.272 \text{ MeV}/c^2$

Umrechnung Länge  $\leftrightarrow$  Energie durch  $\hbar c \simeq 197.327 \text{ MeV fm}$  (1 fm =  $10^{-15}$  m)

Umrechnung Zeit  $\leftrightarrow$  Energie durch  $\hbar \simeq 6.5821 \times 10^{-22} \text{ MeV s}$

Sichtbares Licht: 700 nm  $\hat{=}$  1.77 eV – 400 nm  $\hat{=}$  3.10 eV

Umrechnung Temperatur  $\leftrightarrow$  Energie durch Boltzmann-Konstante  $k = 8.617 \times 10^{-5} \text{ eV K}^{-1}$

Raumtemperatur: 300 K  $\hat{=}$   $38.68^{-1}$  eV

## 1.2 Die Anfänge der Kernphysik

- 1909 H. Geiger, Ernest Marsden untersuchen auf Anregung von Rutherford Streuung von  $\alpha$  aus  $^{222}\text{Rn}$  an Metallfolie  $\rightarrow$  1  $\alpha$  von 8000 gestreut um mehr als  $90^\circ$ .
- 1910 H. Geiger: Bestimmung des mittleren  $\alpha$ -Streuwinkels.
- 1911 E. Rutherford schlägt Atommodell mit Kern vor (theoretisches Papier!): Ladung  $Ze$  im Zentrum umgeben von Sphäre mit gleichverteilten Elektronen mit Gesamtladung  $-Ze \rightarrow$  Rutherfordsche Streuformel

$$\sigma(\theta) = \frac{(ZeQ)^2}{4m^2v^4 \sin^4(\theta/2)}, \quad (2)$$

wobei  $v$ ,  $m$ ,  $Q$  Geschwindigkeit, Masse und Ladung des  $\alpha$ -Teilchens sind. Formel beschreibt Daten von Geiger und Marsden.

- 1912 Bestätigung von Gl. (2) durch weitere Messungen von Geiger und Marsden mit  $\alpha$ -Energien  $\sim 5$  MeV.  
Bemerkung:  $\sigma(\theta)$  einer Fläche (im cgs-System  $\text{cm}^2$ ). Es sei  $I$  ein Strom von einfallenden Teilchen (Einheit  $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). Dann ist  $I\sigma(\theta)d\Omega$  die Anzahl der pro Sekunde in das Raumwinkelement  $d\Omega$  gestreuten Teilchen, wenn *ein* Streuzentrum angenommen wird.
- 1911 M. Curie, Solvay-Konferenz: Thermische, optische, elastische, magnetische und andere Phänomene scheinen von der peripheren Struktur des Atoms abzuhängen, radioaktive Phänomene stellen eigene Welt ohne Zusammenhang mit den vorigen Phänomenen dar  $\rightarrow$  aus tieferer Region des Atoms.  
E. Rutherford:  $\alpha$ -Zerfall kommt von nuklearer Instabilität.  
F. Soddy: Elemente mit verschiedenem Atomgewicht  $A$ , die chemisch identisch sind (siehe z.B. Rn-Isotope), nicht nur bei radioaktiven Elementen sondern vor allem bei stabilen.

- 1913 Niels Bohr: Auch  $\beta$ -Zerfall Kernprozess: 1)  $\beta$ -Teilchen haben hohe Energie; 2) es gibt Substanzen, die sich nur in radioaktiven Eigenschaften und der Massenzahl  $A$  unterscheiden, in anderen physikalischen und chemischen Eigenschaften aber gleich sind.  
F. Soddy: Begriff Isotope (Zu diesem Zeitpunkt noch lange kein Neutron bekannt!).
- 1919 E. Rutherford:  $\alpha$ -H-Streuung, Messung der Rückstoßprotonen  $\rightarrow$  Abweichung vom  $1/r^2$ -Kraftgesetz bei  $r \simeq 3.5 \times 10^{-13}$  cm (entdeckt durch Variation der  $\alpha$ -Energie, bei H Coulombschwelle am niedrigsten, mit 5 MeV leicht durchdringbar).
- 1920 Sir Arthur Stanley Eddington: Stellare Energie durch Kernfusion von Wasserstoff zu Helium.
- 1921 James Chadwick, E.S. Bieler:  $\alpha$ -H-Streuung, "...but merely show that forces are of great intensity . . . It is our task to find some field of force which will reproduce these effects."  
Geburt der *starken Wechselwirkung*?
- \* Bemerkung: Zu diesem Zeitpunkt Struktur des Kerns unklar, aus Protonen und Elektronen bestehend gedacht; außerdem nur elektromagnetische Kräfte bekannt ("pitfalls of simplicity").
- 1932 J. Chadwick: Entdeckung des Neutrons

$$M_X = Am_H + (A - Z)m_e - \frac{B}{c^2} \longrightarrow M_X = Zm_p + (A - Z)m_n - \frac{B}{c^2}$$

- 1938 Hans Bethe: "Energy production in stars"

### 1.3 Von $A$ bis $Z$

- 1815 William Prout: Atomgewichte ganzzahlige Vielfache einer fundamentalen Einheit, welche er im H-Atom vermutete (Proutsche Regel).
- 1864 Lothar Meyer: Elemente sortiert nach Atomgewicht  $A$  und Wertigkeit.
- 1869 Dmitri Ivanovich MendeléeV:  $A$ -Werte von 72 Elementen zur Verfügung  $\rightarrow$  Elemente angeordnet nach  $A \Rightarrow$  Periodizität von Eigenschaften.  
Jedoch viele Ausnahmen: Co vor Ni, Ar vor K, Te vor I im Periodensystem bei Betrachtung der chemischen Wertigkeit, bezüglich Atomgewicht  $A$  jedoch umgekehrte Reihenfolge.
- 1911 Charles Glover Barkla: Für Röntgenstreuung ist die Anzahl der streuenden Elektronen per Atom näherungsweise  $A/2$  für  $A \lesssim 32$ .
- 1913 Antonius Johannes van den Broek: Amateurphysiker (Theoretiker), drei Arbeiten zum Periodensystem (eine 1907, zwei 1913), in letzter Arbeit kommt er zur Hypothese, dass die Ordnungszahl im Periodensystem mit der Kernladungszahl  $Z$

identisch ist, jedoch  $Z$  im Allgemeinen nicht  $A/2$ .

Reaktion von Soddy: Damit im bewirkt  $\alpha$ -Zerfall  $Z \rightarrow Z - 2$ ,  $\beta$ -Zerfall  $Z \rightarrow Z + 1$  im Periodensystem.

Damit auch Weg frei für Erklärung von „Irregularitäten“ wie  $A \simeq 35.5$  für Cl (stabile Isotope  $^{35}\text{Cl}$  mit 75.77%,  $^{37}\text{Cl}$  mit 24.23% Häufigkeit  $\rightarrow A \simeq 35.48$ ).

- 1914 E. Rutherford:  $Z \simeq A/2$  näherungsweise für viele Elemente im Periodensystem. Henry Gwyn Jeffreys Moseley: Präzisionsmessungen an  $K_\alpha$ -Röntgenspektren zum Test der Hypothese von van den Broek angeregt durch N. Bohr (falls Hypothese von van den Broek richtig, dann muss Co eine um Eins größere Kernladung als Ni haben); Messung von der Frequenz  $\nu(Z)$  von  $K_\alpha$  für 21 Elemente, experimentelle Analyse  $\rightarrow$  Gesetz, dass  $[4\nu(Z)/3R]^{1/2}$  ( $R = \text{Rydberg-Konstante}$ ) um eins zunimmt bei  $Z \rightarrow Z + 1 \Rightarrow$  Formel vom Balmer-Typ:

$$\nu(Z) = R(Z - \sigma)^2 \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right); \quad (3)$$

für Ca ist  $Z = 20 \Rightarrow \sigma = 1$ .

- \* Bemerkung:  $K$ -Schale:  $n = 1$ ,  $L$ -Schale:  $n = 2$ ,  $K_\alpha$  erzeugt durch elektronischen Übergang  $L \rightarrow K$ ;  $K$ -Schale enthält zwei Elektronen, daher wird eine Kernladung abgeschirmt und  $\sigma = 1$ .

## 1.4 Quantenmechanik, Spin und Quantenfeldtheorie

- 1922 Otto Stern, Walther Gerlach: Aufspaltung eines Strahls von Ag-Atomen im inhomogenen Magnetfeld  $\rightarrow$  Richtungsquantelung des Drehimpulses,  $\vec{F} = \vec{\nabla}(\vec{\mu} \cdot \vec{B})$
- 1923 Luis de Broglie: Materiewellen ( $\lambda = h/p$ )
- 1925 Paulisches Ausschließungsprinzip: Elektronen im Atom  $\rightarrow$  4 Quantenzahlen

anomaler Zeeman-Effekt  $\rightarrow$  Landé-Regel  $\rightarrow$  „Zweideutigkeit“  
 $\downarrow$   
Stoners Regel  $\rightarrow$  Ausschließungsprinzip

Werner Carl Heisenberg: „Matrizenmechanik“

Max Born, Pascual Jordan:  $[q, p] = i\hbar$

Georg Eugen Uhlenbeck, Samuel Abraham Goudsmit: Spin des Elektrons (Elektron hat Drehimpuls, Landé-Faktor  $g = 2$  für Elektron)

Born, Heisenberg, Jordan: Drehimpulskommutator

- 1926 Pauli: Diskretes Spektrum des H-Atoms  
Schrödinger-Gleichung („Quantisierung als Eigenwertproblem“)  
Born: Wahrscheinlichkeitsinterpretation der QM
- 1927 Dirac: Quantisierung des Photonfelds als unendlich viele harmonische Oszillatoren  $\rightarrow$  Erzeugungs- und Vernichtungsoperatoren für Photonzustände  $\rightarrow$  QED

Pauli-Matrizen,  
Clinton Davisson, Lester Germer: Wellennatur des Elektrons  
Heisenberg: Unschärferelationen

- 1928 Dirac-Gleichung (Paul Adrien Maurice Dirac)

## 1.5 Der $\beta$ -Zerfall und die zweite Energiekrise

- 1914 James Chadwick:  $\beta$ -Strahlung kontinuierlich, Widerspruch zum 2-Teilchenzerfall  $A \rightarrow B + \beta$ , wo das Elektron eine fixe Energie haben müsste.

**Energiekrisen der Radioaktivität:** Zwei Krisen!

**Erste Krise:** Wo kommt die Energie beim radioaktiven Zerfall her? Nach 1910 allgemein angenommen, dass Energie erhalten und Energiequelle im Atominneren ist.

**Zweite Krise:** Im  $\beta$ -Zerfall Energie und Impuls anscheinend nicht erhalten. Diese Krise hält von 1914 bis 1930 an. Nach dem Ersten Weltkrieg viele Experimente zum  $\beta$ -Spektrum.

- 1922 Liese Meitner, Versuch einer Erklärung des kontinuierlichen  $\beta$ -Spektrums:  $\beta$ -Teilchen kommt mit voller Energie  $E_0$  aus Kern, kann Energie durch  $\gamma$ -Produktion verlieren, die Gammas produzieren durch innere Konversion andere  $\beta$ -Teilchen mit  $E < E_0$ .
- 1927 Charles Drummond Ellis, William Alfred Wooster: mittlere im Zerfall von  $^{210}\text{Bi}$  freigesetzte Energie liegt in der Mitte des kontinuierlichen  $\beta$ -Spektrums, nicht am oberen Rand (kalorimetrisches Experiment,  $^{210}\text{Bi}$  hat praktisch kein  $\beta$ -Linienspektrum aus innerer Konversion).
- 1929 L. Meitner und Wilhelm Orthmann bestätigen dieses Resultat, damit für Pauli veritable Energiekrise vorhanden.
- 4.12.1930 W. Pauli in einem Brief (S. 315): Postulierung des „Neutrons“ (später durch Fermi Neutrino genannt).

**Bedeutung von Paulis Hypothese:**

1. Im Kern gibt es elektrisch geladene neutrale Teilchen („Neutronen“) mit Spin  $1/2$ .
2. Im  $\beta$ -Zerfall werden ein Elektron *und* ein „Neutron“ emittiert, so dass Energie und Impuls erhalten bleiben.

Zu Punkt 1:  $^{14}\text{N}$  erfüllt Bose-Statistik (aus Spektroskopie bekannt), aber im alten Bild besteht  $^{14}\text{N}$  aus 14  $p$  and 7  $e^- \Rightarrow$  Fermi-Statistik.

Paulis Hypothese löst gleichzeitig die zweite Energiekrise und das  $^{14}\text{N}$ -Problem (dieser Kern besteht nun aus 14 Protonen, 7 Elektronen und 7 „Neutronen“  $\Rightarrow$  Bose-Statistik), gibt aber falsche Struktur des Kerns, identifiziert Neutrino, das erst beim Zerfall entsteht, als Kernbestandteil  $\rightarrow$  durch Entdeckung des Neutrons Korrektur dieses Bildes.



- 1933 W. Pauli erzählt bei Solvay-Konferenz zum ersten Mal in einer Diskussion, die abgedruckt wurde, über seine Idee.
- 1933 Enrico Fermi: „Tentativo di una teoria della emissione di raggi  $\beta$ “ (“Tentative theory of decay”), S.418  $\rightarrow$  Hamilton-Operator für schwachen Zerfall, erlaubt Übergänge

$$\begin{aligned}
 \beta^- : & \quad (Z, A) \rightarrow (Z + 1, A) + e^- + \bar{\nu}, \\
 \beta^+ : & \quad (Z, A) \rightarrow (Z - 1, A) + e^+ + \nu, \\
 \varepsilon : & \quad e^- + (Z, A) \rightarrow (Z - 1, A) + \nu.
 \end{aligned} \tag{4}$$

Elektroneneinfang wird durch  $\varepsilon$  bezeichnet.

Bemerkung: Fermis Theorie beschreibt nicht alle  $\beta$ -Zerfälle richtig, jedoch Geburt der *schwachen Wechselwirkung*.

- 1956 Frederick Reines und Clyde Lorrain Cowan: Telegramm an Pauli, in dem sie den Nachweis von Antineutrinos aus Savannah River-Reaktor bekannt geben (Experiment dauerte ca. 5 Jahre); Nachweis in Wasser mit Lösung von  $\text{CdCl}_2$  und Reaktion  $\bar{\nu} + p \rightarrow n + e^+$ , spontan  $e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$ , um  $\sim 100 \mu\text{s}$  zeitverzögert  $n + {}^{113}\text{Cd} \rightarrow \gamma + {}^{114}\text{Cd}$ , Nachweis der Gammas (Koinzidenz!) durch Szintillation. Tsung Dao Lee, Chen Ning Yang: “Question of Parity Conservation in Weak Interaction”, allgemeine Theorie von Paritätsverletzung in schwacher Wechselwirkung (10 Terme, Fermi: ein P-erhaltender Term); Vorschlag zur Feststellung von Paritätsverletzung:  $\beta$ -Zerfall eines polarisierten Kerns, sei  $\theta$  Winkel zwischen Polarisationsrichtung und Elektronimpuls, dann folgt aus  $N(\theta < 90^\circ) - N(\theta > 90^\circ) \neq 0$  Paritätsverletzung.

Bemerkung:  $\mathcal{P}$  Paritätsoperator,  $\vec{J}$  Drehimpulsoperator,  $\vec{P}$  Impulsoperator  $\Rightarrow \mathcal{P}\vec{P}\mathcal{P} = -\vec{P}$ ,  $\mathcal{P}\vec{J}\mathcal{P} = \vec{J}$  ( $\vec{P}$  ist Vektor,  $\vec{J}$  ist Axialvektor).

- 1957 Entdeckung der Paritätsverletzung durch Chien-Shiung Wu, E. Ambler, R. Hayward, D. Hoppes, R. Hudson an  ${}^{60}\text{Co} \rightarrow {}^{60}\text{Ni}$  ( ${}^{60}\text{Co}$  hat Spin 5!). Robert Eugene Marshak, Ennackel Chandy George Sudarshan; Richard Phillips Feynman, Murray Gell-Mann:  $(V - A)$ -Theorie (Vektor- minus Axialvektorstrom, Hamiltonoperator hat Struktur  $(V - A) \times (V - A)$ , Fermi hatte  $V \times V$ ).

## 1.6 Die Entdeckung des Neutrons

- 1920 E. Rutherford: Idee eines „Neutrons“, in dem das Elektron viel stärker gebunden ist als im H-Atom.
- 1930 Walter Bothe, Herbert Becker:  $\alpha + \text{Be}$  gibt sehr harte Strahlung, die dicke Pb-Schicht durchdringt.
- 1931 Irène und Frédéric Joliot-Curie: Be-Strahlung durch Paraffinschicht auf Ionisationskammer  $\rightarrow$  Ionisationsstrom durch Rückstoßprotonen, Rückstoßkerne auch in anderen Gasen (N, Kr).

- 1932 James Chadwick: Rückstoßkerne entstehen durch Zusammenstoß mit neutralem Teilchen der Masse  $m \simeq m_p$ , d.h., Be-Strahlung besteht aus Neutronen  $n$  produziert durch  $\alpha + {}^9\text{Be} \rightarrow {}^{12}\text{C} + n$ .

### Kinematik der Reaktion der elastischen Neutron-Kern-Streuung:

$$\frac{1}{2} m \vec{v}_0^2 = \frac{1}{2} m \vec{v}_1^2 + \frac{1}{2} M \vec{v}^2, \quad m \vec{v}_0 = m \vec{v}_1 + M \vec{v} \Rightarrow \frac{v}{v_0} = \frac{2 \cos \vartheta}{1 + M/m}, \quad (5)$$

wobei  $M$  die Masse des Kerns,  $m$  die Masse des Teilchens aus Be-Strahlung (Neutron) und  $\vartheta$  der Winkel zwischen einfallender Strahlung und dem Impuls des Rückstoßkerns ist. Die Geschwindigkeiten des Neutrons vor und nach dem Stoß sind  $\vec{v}_0$  und  $\vec{v}_1$ , die Geschwindigkeit des Rückstoßkerns ist  $\vec{v}$ . Aus Vorwärtsstreuung an H und N erhält man

$$\frac{v_H}{v_N} = \frac{m + M_N}{m + M_H}. \quad (6)$$

Daraus Bestimmung von  $m$  durch Chadwick auf ca. 10% genau.

## 1.7 Begriffe

**Atomphysik:** Physik der Atomhülle  $\rightarrow$  Energieniveaus und Spektroskopie, chemische Bindung, Periodensystem, Quantenoptik, Bose-Einstein-Kondensation, ...

**Kernphysik:** Physik des Atomkerns  $\rightarrow$  Energieniveaus, Zerfälle, Kernreaktionen, ...

**Teilchenphysik:** Physik von Teilchen, nicht der Strukturen wie Atome und Atomkerne. Die meisten Teilchen sind nicht Bestandteile von Atomen. Überlapp von Atom- und Teilchenphysik beim Positronium, Atomen aus exotischen Teilchen, ...

**Astroteilchenphysik:** Verschmelzung von Astrophysik und Kosmologie mit Teilchenphysik (astrophysikalische Fragestellungen, bei welchen Teilchenphysik benötigt wird, z.B. Abstrahlung von Neutrinos aus Sternen und Supernovae, frühes Universum, ...)

Verwechslung von Atom-, Kern- und Teilchenphysik: Atombombe, abstruse Begriffe wie „Atomanlage“, „Atomtests“, „Nuklearanlage“.

## 1.8 Teilchenphysik zwischen Kernphysik und Standardmodell

### Kosmische Strahlung:

- 1911 Viktor Hess: Strahlung in 1000 m Höhe intensiv wie am Boden
- 1912 Viktor Hess: Serie von bemannten Ballonexperimenten bis 5000 m  $\rightarrow$  Strahlung 9 mal intensiver als auf dem Erdboden  $\rightarrow$  extraterrestrische Höhenstrahlung (kosmische Strahlung)

Ab Mitte der 20er Jahre viele Experimente mit Höhenstrahlung als Teilchenquelle, ab 30er Jahre Beschleuniger (Robert Jemison Van de Graaf; Rolf Wideröe; Cockroft und Walton; Ernest Lawrence, Stanley Livingston und Milton White in Berkeley)

## Yukawa-Theorie: 1934

Skalares Teilchen (Meson) mit Masse vermittelt starke Wechselwirkung:

$$\left(\Delta - m^2\right) \frac{e^{-mr}}{r} = -4\pi \delta^{(3)}(\vec{r}) \quad \Rightarrow \quad \text{Reichweite } a = \frac{\hbar}{mc}.$$

Massenabschätzung  $m \sim 200 m_e$ , Meson vielleicht in Höhenstrahlung.

## Teilchen und Ideen:

- 1931 Carl David Anderson: Entdeckung des Positrons in Nebelkammer
- 1937 C.D. Anderson, S.H. Neddermeyer: „Entdeckung des Myons“, Verwechslung mit dem Yukawa-Teilchen.  
Ettore Majorana: Neutrino eigenes Antiteilchen? („Majorana-Neutrino“).
- 1947 Cecil Frank Powell et al.: Knick in Mesonspur (Photoemulsion), primäres Meson  $\pi$ , sekundäres Meson  $\mu$  ( $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu \Rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+ + 2\nu$ ).  
(Photoemulsion schon ca. 1925 von österreichischer Physikerin Marietta Blau benützt.)
- 1950  $\pi^0$
- 1952  $\Delta$ -Resonanz.
- 1946 - 1953 Neue Familien von Mesonen und Baryonen (V-Teilchen, „seltsame“ Teilchen):  $K^\pm$ ,  $K^0$ ,  $\bar{K}^0$ ;  $\Lambda$ ,  $\Sigma^{+,0,-}$ ,  $\Xi^{0,-}$ .
- 1953 Beginn der Nukleonresonanzspektroskopie.  
M.Gell-Mann: Strangeness-Schema,  $S$  erhalten in starken Wechselwirkungen ( $\pi^- + p \not\rightarrow \Lambda + \pi^0$  „stark“ verboten, aber  $\pi^- + p \rightarrow \Lambda + K^0$  erlaubt).
- 1954 C.N. Yang, R.L. Mills: nichtabelsche Eichtheorien.
- 1955 M. Gell-Mann, A. Pais:  $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$ , physikalische Teilchen  $K_{1,2}$  (später  $K_{S,L}$ ).  
A. Pais, O. Piccioni:  $K^0$ - $\bar{K}^0$ -Oszillationen.
- 1957 Bruno Pontecorvo: Idee der Neutrinooszillationen ( $\nu \leftrightarrow \bar{\nu}$ ).
- 1961 Beginn der Mesonspektroskopie:  $\rho$ ,  $\omega$ ,  $\eta$ ,  $K^*$ .
- 1962 L.M. Lederman, M. Schwartz, Jack Steinberger, et al., BNL:  $\nu_e \neq \nu_\mu$
- 1963 N. Cabibbo: Lagrangefunktion für „seltsame“ Teilchen.
- 1964 M. Gell-Mann, George Zweig: Quarkmodell  $\rightarrow$  systematisiert die Unzahl stark wechselwirkender „Teilchen“.  
J.H. Christenson, J.W. Cronin, V.L. Fitch, R. Turlay:  
CP-verletzender Zerfall  $K_L \rightarrow \pi\pi$ .

- 1965 M.Y. Han, Y. Nambu: Quarks haben drei verschiedene „Farben“ → Symmetriegruppe  $SU(3)_c$ .

Bemerkung: Kosmische Strahlung als Teilchenquelle (auf Meeresniveau etwa ein Proton pro Sekunde und  $m^2$ ) für experimentelle Teilchenphysik ab 50erjahre abgelöst durch Beschleuniger.

### Der Weg zum Standardmodell:

- 1961 S.L. Glashow: SM (Vereinigung von elektromagnetischer und schwacher Wechselwirkung in einer Eichtheorie) ohne Higgs-Mechanismus
- 1964 P.W. Higgs und andere: Higgs-Mechanismus (Massen von Fermionen und Eichbosonen durch spontan gebrochenen Eichsymmetrie).
- 1967 Steven Weinberg: SM masselose Eichtheorie mit Higgs-Mechanismus
- 1968 Abd us-Salam: SM masselose Eichtheorie mit Higgs-Mechanismus
- 1970 S.L. Glashow, J. Iliopoulos, L. Maiani: GIM-Mechanismus, Vorhersage des Charm-Quarks → keine flavor-verändernden neutralen Ströme.
- 1971 Gerardus 't Hooft: Renormierbarkeit von spontan gebrochenen Eichtheorien, aufbauend auf Arbeiten von M. Veltman.
- 1973 M. Kobayashi, T. Maskawa: CP-Verletzung ergibt sich von zwanglos im SM, falls drei Generationen (Familien) von Fermionen existieren (Nobelpreis 2008).  
CERN: Entdeckung neutraler Ströme in der Gargamelle-Blasenkammer ( $\nu + p \rightarrow \nu + p$ ).
- 1974 S.Ting et al., BNL, B. Richter et al., SLAC:  $J/\psi = \bar{c}c$ .
- 1977 SLAC, M.L. Perl et al.:  $\tau$ -Lepton.
- 1977 FNAL:  $\Upsilon = \bar{b}b$  (Bottom-Quark).
- 1983 C. Rubbia et al., CERN,  $p\bar{p}$ -Collider:  $W$  und  $Z$ -Boson nachgewiesen bei den vom SM vorhergesagten Massen.
- 1989 LEP (CERN): Nur drei Generationen von „leichten“ Fermionen (6 Leptonen, 5 Quarks,  $t$ -Quark fehlt noch).
- 1995 FNAL: Top-Quark nachgewiesen im CDF-Experiment.

Stand des SMs bei Inbetriebnahme des LHC (2009): nur Higgsteilchen fehlt noch.

## Literatur

- [1] A. Pais, *Radioactivity's Two Early Puzzles*, Rev. Mod. Phys. 49 (1977) 925
- [2] A. Pais, *Inward Bound*, Oxford University Press, Oxford (1988)
- [3] K.-E. Zimen, *Strahlende Materie*, Bechtle Verlag, München (1987)
- [4] B.R. Martin, *Nuclear and Particle Physics*, John Wiley & Sons, Chichester (2006)
- [5] H. Friedmann, *Natürliche Radioaktivität*, Shaker Verlag, Aachen (2003)