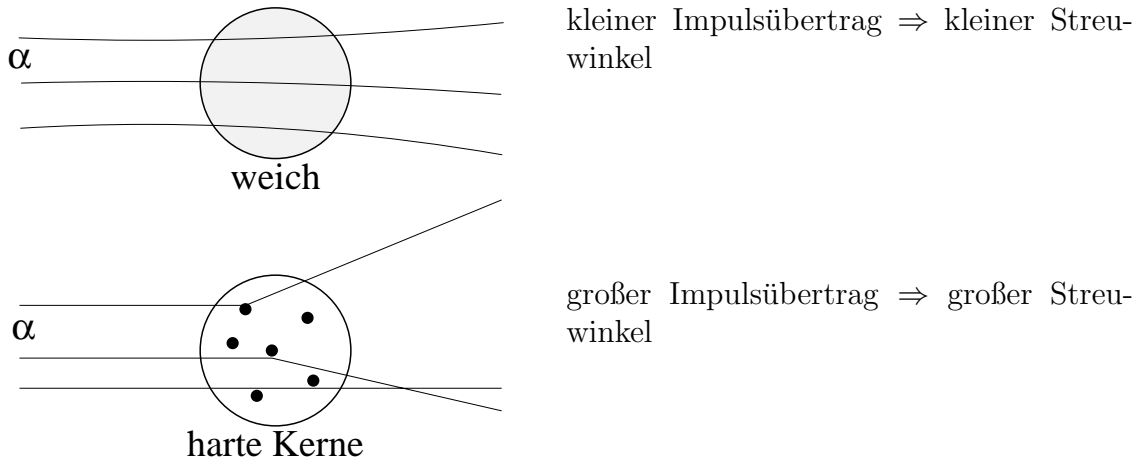


# Kapitel 2

## Kurzer geschichtlicher Überblick

Im folgenden wird ein kurzer (sehr unvollständiger) Überblick über die Entwicklungen gegeben, die zu unserem heutigen Verständnis der Kern- und Teilchenphysik geführt haben (siehe auch E. Segré: 'Große Physiker und ihre Entdeckungen', Piper 1981). Das Gewicht liegt mehr auf den experimentellen Befunden. Es wurde bereits darauf hingewiesen, dass die Basis für die theoretische Beschreibung der Materie die Quanten- und die spezielle Relativitätstheorie sind.

- um 400 v.Ch. Griechische Philosophen entwickeln Vorstellungen über das Wesen der Materie (spekulativ, nicht empirisch):
- Demokrit, Leukipp: kleinste, unteilbare Bausteine, 'Atome'
  - Anaxagoras: 'ganzheitliche' Vorstellung ('Samen im Samen')
  - Aristoteles: kontinuierliche Materie
  - Pythagoras: Atome  $\leftrightarrow$  Symmetrien
- Renaissance: Einführung kontrollierter Experimente (Wiederholbarkeit)
- 19.Jahrh.: Erste empirische Hinweise auf atomare Struktur der Materie (Dalton, Clausius, Maxwell, Boltzmann, Wiener, Avogadro, ...):
- kinetische Gastheorie
  - Gesetz der multiplen Proportionen:  $16\text{g O} + 2\text{g H} = 18\text{g H}_2\text{O}$
- 1897 Identifizierung des Elektrons ( $e/m$ ) durch Thomson
- 1896 Becquerel: Entdeckung der radioaktiven Strahlung (danach Entdeckung von  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -Strahlung)
- 1910 Millikan: Bestimmung der Elementarladung  $e$
- 1911 Rutherford's Atommodell: das Atom besteht aus einem Kern mit positiver Ladung  $Ze$  und einer Hülle mit negativer Ladung  $-Ze$ .  
Versuche mit  $\alpha$  Strahlung:



1919 Rutherford:  ${}_7\text{N}^{14} + \alpha \rightarrow {}_8\text{O}^{17} + \text{p}$  (Nachweis des Protons)

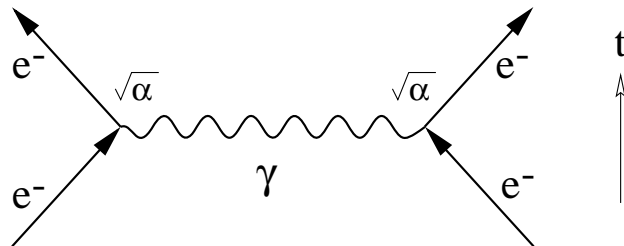
1932 Chadwick: Entdeckung des Neutrons  $\Rightarrow$  Erklärung der Isotope (gleiches Element, unterschiedliche Masse)

**Damit sind die Atombausteine bekannt!**

> 1928 Entwicklung der Quantenelektrodynamik (QED) (Bjorken, Drell [22])

Das elektromagnetische Feld wird quantisiert, nicht mehr durch Potential dargestellt wie in der Schrödinger-Gleichung:

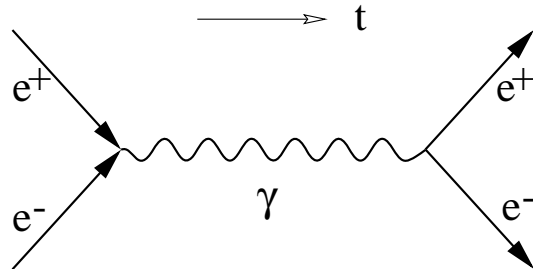
- Feldquant:  $\gamma = \text{Photon}$
- Kraft: durch Teilchenaustausch, zum Beispiel Elektron-Elektron-Streuung ('Feynman-Diagramm'):



- Kopplungsstärke: Feinstrukturkonstante  $\alpha \sim e^2$ :

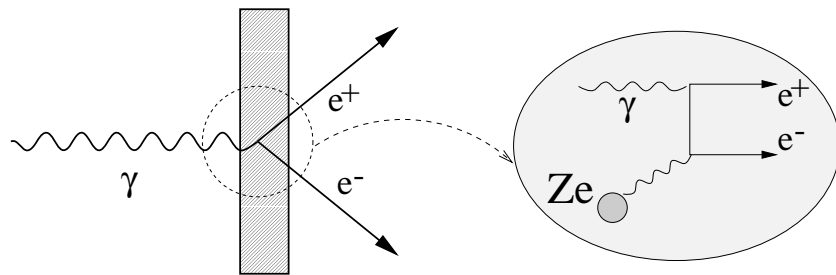
$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c}$$

Das gleiche Diagramm mit der Zeitrichtung von links nach rechts bedeutet die Vernichtung und Erzeugung von Teilchen ( $e^-$ ) und Antiteilchen ( $e^+$ ):

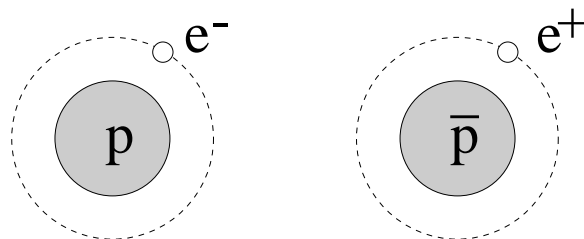


1928

Dirac: Gleichung des freien Elektrons (= relativistische Schrödinger-Gleichung für Spin-1/2-Teilchen), 2 Lösungen  $\Rightarrow$  Teilchen - Antiteilchen,  
z.B. Paarerzeugung in dem Coulomb-Feld eines Kerns:



$\Rightarrow$  Materie - Antimaterie (Umkehrung der Quantenzahlen),  
z. B. H und Anti-H:



Im Kosmos gibt es überwiegend Materie! Warum?

1932

Anderson: Entdeckung des Positrons ( $e^+$ )

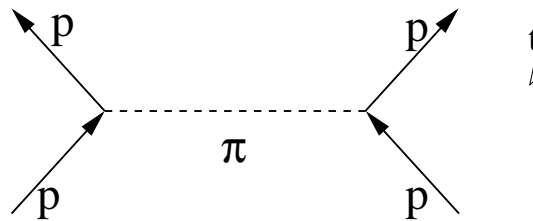
1934

Yukawa: Meson-Theorie der Kernkräfte.

Experimentelle Beobachtungen: Kernkräfte sind

- ladungsunabhängig:  $WW(p-p) = WW(n-p)$
- kurzreichweitig  $\sim 10^{-15}$  m
- stark im Vergleich zur elektromagnetischen WW (p-p nicht abstoßend!)

Betrachte z.B. elastische p-p Streuung (oder n-n, p-n, n-p), die analog zur QED durch ein ausgetauschtes Teilchen ( $\pi$ -Meson) vermittelt werden soll:



Elastisch  $\Rightarrow$  Energieübertrag  $E_\pi = 0$ , woraus folgt:

$$m_\pi^2 = E_\pi^2 - \vec{p}_\pi^2 < 0 !!$$

Das ausgetauschte Pion hätte danach ein negatives Massenquadrat!? Man sagt, daß das Austauscheteilchen sich nicht 'auf der Massenschale' befindet und nennt es 'virtuell'. Man kann das so interpretieren, daß der Energieübertrag  $\Delta E$  während einer kurzen Zeit  $\Delta t$  eine Unschärfe  $\Delta E \geq m_\pi$  hat (wir lassen hier  $\hbar$  und  $c$  in den Formeln):

$$\Delta E \cdot \Delta t \approx \hbar \rightarrow \Delta t \approx \frac{\hbar}{m_\pi c^2}$$

Die Zeit  $\Delta t$  wird durch die Zeit, die das Pion braucht, um von einem Proton zum anderen zu kommen, abgeschätzt. Die Protonen haben den Abstand  $R$ , die typische Reichweite der Wechselwirkung:

$$R \approx c \cdot \Delta t \approx \frac{\hbar}{m_\pi c}$$

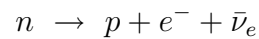
Die Reichweite entspricht also der Compton-Wellenlänge des Austauscheteilchens. Da man  $r \approx 10^{-15}$  m = 1 fm gemessen hat, kann man die Masse des  $\pi$ -Mesons abschätzen ( $\hbar c \approx 200$  MeV fm):

$$m_\pi \approx 200 \text{ MeV}/c^2$$

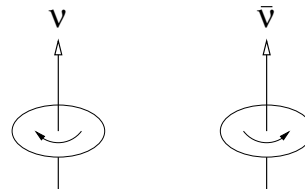
1937

Myon ( $=\mu$ ) entdeckt,  $m_\mu \approx 106 \text{ MeV}/c^2$  (tatsächlich 'schweres Elektron' = Lepton)

- 1947  $\pi$ -Meson entdeckt,  $m_\pi \approx 140 \text{ MeV}/c^2$   
 Mesonenaustausch ist eine effektive Beschreibung der Kernkräfte; heute durch 'Farbkraft' ('Quantenchromodynamik', QCD) erklärt.
- > 1950 Viele neue Teilchen und 'Resonanzen' werden gefunden ("Teilchenzoo"):  
 - K,  $\rho$ ,  $\omega$ , ...: Mesonen ( $\hat{=}$  Pion)  
 -  $\Lambda$ ,  $\Delta$ ,  $\Sigma$ , ...: Baryonen ( $\hat{=}$  Proton, Neutron)
- Teilchen werden in Beschleunigern erzeugt, nicht nur in kosmischer Strahlung.
- 1955 Entdeckung des Anti-Protons ( $= \bar{p}$ ) durch Segré, Chamberlain, Wiegand, Ypsilantis.
- 1957 Paritätsverletzung in schwacher WW gefunden  $\Rightarrow$  keine Spiegelsymmetrie der Naturgesetze  
 $\beta$ -Zerfall (Pauli's Neutrino-Hypothese 1931, gefunden von Reines 1957):



Teilchen links-händig — Anti-Teilchen rechts-händig:



Aber Invarianz bei 'CPT'-Transformation:

(Teilchen  $\leftrightarrow$  Anti-Teilchen) + (Raum-Spiegelung) + (Zeit-Spiegelung)

- 1964 Quarkmodell (Gell-Mann und Zweig):  
 Hadronen = Mesonen + Baryonen sind aus u, d, s Quarks aufgebaut:  
 - Baryonen:  $qqq$  ( $p = |uud\rangle$ ;  $n = |udd\rangle$ )  
 - Mesonen:  $q\bar{q}$  ( $\pi^+ = |u\bar{d}\rangle$ )  
 Vorhersagekraft: Entdeckung des  $\Omega^- = |sss\rangle$
- 1969 Tiefinelastische Elektron-Proton - Streuung  $\Rightarrow$  körnige Struktur der Nukleonen (wie Rutherford - Experiment)

### 'nach 1974' - Ära

- 1974 4. Quark entdeckt ( c = charm )
- 1975 3. Lepton (=  $\tau$ ) entdeckt ( Leptonen: e,  $\mu$ ,  $\tau$  )

1977	5. Quark entdeckt ( b = bottom )
1979	Gluon entdeckt (bei DESY), Austauschteilchen der starken Wechselwirkung = Quantenchromodynamik (entspricht dem Photon in der QED). Für die Entwicklung der Theorie der Quantenchromodynamik (QCD) erhielten Gross, Politzer und Wilczek 2004 den Nobelpreis.
1983	$W^+$ , $W^-$ , $Z^0$ entdeckt (im CERN, Nobelpreis 1984 Rubbia und van der Meer), Austauschteilchen der elektro-schwachen Wechselwirkung = Quantenflavourdynamik. Damit wird die Glashow-Weinberg-Salam - Theorie (GSW-Theorie, Nobelpreis 1979) der Vereinheitlichung der elektromagnetischen und der schwachen Wechselwirkung experimentell bestätigt. Nobelpreis 1999: t'Hooft und Veltmann: 'Renormierbarkeit nicht-abelscher Eichtheorien'.
1989	Anzahl Neutrinos = 3 (bei LEP) $\Rightarrow$ 3 Fermionen-Generationen; in dieser Zeit ( $\geq 1967$ ) wurde eine kleine, aber nicht-verschwindende, Masse der Neutrinos etabliert (Voraussetzung für Neutrino-Oszillationen (Davis, Koshiba Nobelpreis 2002))
1995	6. Quark entdeckt ( t = top )

Wir kennen jetzt wahrscheinlich alle elementaren (?) Fermionen = Leptonen und Quarks. Zusammen mit den Quantenfeldtheorien für die Wechselwirkungen ergibt sich zur Zeit ein abgerundetes Bild:

### Standard-Modell der Elementarteilchenphysik

Wie in Tabelle 2.1 dargestellt, treten die Quarks und Leptonen in 3 verschiedenen Generationen auf, die sich durch die Massen der Teilchen unterscheiden. In jeder Generation tritt jeweils ein Quark mit der Ladung (in Einheiten der Elementarladung)  $2/3$  und  $-1/3$  und jeweils ein Lepton mit Ladung  $-1$  und  $0$  auf. Jedes Quark wird durch eine 'Flavour'-Quantenzahl (u, d, c, ...) und durch eine 'Colour'-Quantenzahl (r, b, g) charakterisiert. Die 3 Colours sind die Ladungen der starken Wechselwirkung. Zu jedem Fermion gibt es noch das Anti-Fermion, so daß es insgesamt  $(3 \times 6 + 6) \times 2 = 48$  elementare Bausteine gibt.

Durch die Farbkräfte werden die Quarks in Hadronen gebunden. Hadronen sind entweder Baryonen, die aus 3 Quarks (qqq) bestehen, oder Mesonen, die aus Quark und Antiquark ( $q\bar{q}$ ) bestehen. Zum Beispiel:

Baryonen (qqq)		Mesonen ( $q\bar{q}$ )	
p	uud	$\pi^+$	$u\bar{d}$
n	udd	$\pi^-$	$\bar{u}d$
$\Lambda$	uds	$K^+$	$u\bar{s}$
.		$K^0$	$d\bar{s}$
.		.	.
.		.	.

Tabelle 2.1: Elementare Fermionen: Quarks und Leptonen

	Quarks	Leptonen
Ladung	$\frac{2}{3}$ $-\frac{1}{3}$	-1    0
1. Generation	$u_r, u_b, u_g$ $d_r, d_b, d_g$	$e^-$ $\nu_e$
2.	$c_r, c_b, c_g$ $s_r, s_b, s_g$	$\mu^-$ $\nu_\mu$
3.	$t_r, t_b, t_g$ $b_r, b_b, b_g$	$\tau^-$ $\nu_\tau$

Tabelle 2.2: Wechselwirkungen

Wechselwirkung	Austauschteilchen	Masse	Spin-Parität	Reichweite	relat. Kopplungsstärke	Typ. WQ	typ. Lebensdauer
Gravitation	Graviton ?	0	$2^+$	$\infty$	$10^{-40}$	-	-
Elektromagn. WW	Photon	0	$1^-$	$\infty$	$10^{-2}$	10 nb	$10^{-20}$ s
schwache WW	$W^+, W^-, Z^0$	90 GeV	$1^-, 1^+$	$10^{-18}$ m	$10^{-5}$	$10^{-8}$ nb	$10^{-8}$ s
starke WW	8 Gluonen	0	$1^-$	$10^{-15}$ m	$\approx 1$	$10^4$ nb	$10^{-23}$ s

Die Wechselwirkungen sind in Tabelle 2.2 zusammengestellt. Die Wechselwirkungen unterscheiden sich durch ihre Reichweiten, die Kopplungsstärken und die typischen Wirkungsquerschnitte und Lebensdauern. Die letzten drei Größen sind miteinander verknüpft: je stärker die Kopplung umso größer sind die Wirkungsquerschnitte und umso kürzer sind die Lebensdauern.

Die elektromagnetische und die schwache Wechselwirkung sind durch die GSW-Theorie zu einer elektro-schwachen Wechselwirkung vereinheitlicht worden.

Die Wechselwirkungen werden durch Austauschteilchen, die den Spin  $s=1$  bzw. beim Graviton  $s=2$  haben, vermittelt. Insgesamt gibt es davon 13, wovon das Graviton bisher hypothetisch ist. Mit den elementaren Fermionen und einem theoretisch geforderten Teilchen mit Spin  $s=0$  (Higgs-Teilchen) gibt es also 62 elementare Teilchen.

Das Higgs-Teilchen ist das letzte Teilchen des Standardmodells, das bisher nicht nachgewiesen wurde. Die Suche ist bei den bisherigen Beschleunigern, insbesondere auch bei denen mit den bisher höchsten Energien, LEP im CERN und Tevatron im Fermi-Lab (USA), nicht erfolgreich gewesen. Am 'Large Hadron Collider' (LHC) im CERN, der 2008 in Betrieb gehen soll, müsste dieses Teilchen gefunden werden oder die Theorie müsste nicht unerheblich modifiziert werden.

**Ausblick:** Obwohl das Standardmodell experimentell mit sehr hoher Präzision bestätigt wurde, beantwortet es nicht alle Fragen (z.B.: Warum haben Elektronen und Protonen bis auf das Vorzeichen exakt die gleiche Ladung?). Aktuelle Experimente suchen unter Anderem nach einer möglichen Substruktur von Quarks und Leptonen oder nach dem Ursprung der Asymmetrie von Materie und Anti-Materie im Universum. Die Theoretiker beschäftigen vor allem die Frage, ob alle Wechselwirkungen, einschließlich der Gravitation, vereinheitlicht werden können. Spätestens hier wird deutlich, dass Probleme der Teilchenphysik und Probleme der Kosmologie zusammenhängen und gemeinsam gelöst werden müssen. In der Kosmologie ist zur Zeit das wichtigste Problem, dass etwa 99% des Energieinhaltes der Universums unbekanntem Ursprungs ist (Suche nach 'Dunkler Materie' und 'Dunkler Energie'). Für die 'Dunkler Materie' bietet die Teilchenphysik Kandidaten im Rahmen einer 'Supersymmetrie' genannten Theorie. Die Hoffnung ist, diese 'SUSY-Teilchen' am LHC zu finden.