

Meilensteine der E-Teilchen-Physik

1897 Thomson Entdeckung des Elektrons e^- (e/m Messung)

1900 Planck Quantisierung der elektromag. Strahlung
 1905 Einstein Erklärung des photoel. Effekts
 1923 Compton Compton-Effekt: $\lambda \rightarrow \lambda'$ in γe^- Streuung
 $\rightarrow$ Entdeckung des Photons γ

1911 Rutherford Kern des Wasserstoff-Atoms $\rightarrow$ Entdeckung d. Protons p

1932 Chadwick Entdeckung des Neutrons n

1930 Pauli Postulat des Neutrinos ν

genügt, um "Welt" zu erklären

aber: wie erklärt man die Entwicklung des Universums
 in unsere "Welt" ?

... und viele weitere Fragen ...

... und außerdem:

1927 Dirac Postulat des Anti-Elektrons

1931 Anderson Entdeckung des Positrons e^+

1934 Yukawa Postulat von Mesonen als Träger der Kernkraft

((Idee: Kernteilchen (p, n) tauschen ein "Feldquant" aus (mitg. γ)

Annahme: Reichweite $\propto$ Komgröße $\propto 10^{-15} \text{ m} \approx c \cdot \Delta t \approx \frac{\hbar c}{\Delta E} \rightarrow$ Masse

Unschärfel: $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$ für beobachtbare Vorgänge

$\Rightarrow m_{\text{meson}} \approx 300 m_e \approx \frac{1}{6} m_p$

1947 Powell Entdeckung der π -Mesonen (Kernstrahlung)

1937/39 Street, Stevenson, Anderson, Neddermeyer Entdeckung der Myonen μ
 ((μ hat keine Wdr mit Kernen, $\tau \approx 2 \mu\text{s}$, $m_\mu \approx 200 m_e$, "schweres e^- "))

1947 Rochester, Butler Entdeckung seltsamer Teilchen

((große Lebensdauer $\tau \approx 10^{-8} \text{ s}$, große Masse $\geq 1000 m_e$))

... Entdeckung hundeter (Elementar)teilchen $\Rightarrow$ PD Booklet

((Lamb, Nobel-Rede 1955, "Der Entdecker eines neuen Teilchens erhält normalerweise einen Nobelpreis - inzwischen sollte man eher eine \$10000 Strafe verhängen"))

... Meilensteine

- 1956 Cowan, Reines Entdeckung des Neutrinos ν
- 1964 Gell-Mann, Zweig Quarkmodell der Hadronen $\Rightarrow$ Ordnung!!
- 1974 Ting, Richter Entdeckung der $Z^0 \rightarrow$ Charm-Quark c
- 1975 Perl $\rightarrow$ τ -Lepton
- 1978 Herb u.a. $\rightarrow$ $Y \rightarrow$ Bottom-Quark b
- 1983 Rubin, v.d. Meer $\rightarrow$ $W^\pm, Z$ -Bosonen
- 1995 CDF-Kollaboration $\rightarrow$ Top-Quark t
- 2000 DONUT-Koll. Nachweis des τ -Neutrinos
- 1968-2002 Homestake, Super-Kamiokande, SNO Nachweis von ν -Oszillationen
 $\Rightarrow$ Neutrinos sind massiv!

Standard-Modell (SM) der E-Teilchen und ihrer Kräfte

Konzept: "Kraft"-Teilchen vermitteln die Wechselwirkung zwischen
 "Materie"-Teilchen

$\rightarrow$ Photonen, schw. Eichbosonen, Gluonen
 (em, schwache, starke) $W^\pm$

$\rightarrow$ Leptonen und Quarks

SM: beschreibt Kräfte zwischen Konstituenten des Modells
 $\rightarrow$ "Weltformel"?

gegeben durch Lagrange-dichte $\mathcal{L}$

Lagrange-Dichte des SM

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L} = & -\frac{1}{4} W_{\mu\nu}^i W_i^{\mu\nu} - \frac{1}{4} B_{\mu\nu} B^{\mu\nu} - \frac{1}{4} G_{\mu\nu}^a G_a^{\mu\nu} & \left\{ \begin{array}{l} \text{kinetische E und Selbst-W} \\ \text{von } W^+, W^-, Z, \gamma, \text{ Gluonen} \end{array} \right. \\
 & + \sum_l \bar{L}_l \gamma^\mu (i \partial_\mu - g \frac{\tau_i}{2} W_\mu^i - g' \frac{Y_l}{2} B_\mu) L_l & \left\{ \begin{array}{l} \text{kinetische E der Leptonen} \\ \text{und ihre Ws mit} \\ W^+, W^-, Z, \gamma \end{array} \right. \\
 & + \sum_l \bar{R}_l \gamma^\mu (i \partial_\mu - g' \frac{Y_l}{2} B_\mu) R_l \\
 & + \sum_q \bar{L}_q \gamma^\mu (i \partial_\mu - g \frac{\tau_i}{2} W_\mu^i - g' \frac{Y_q}{2} B_\mu - g'' \frac{\lambda_a}{2} G_\mu^a) L_q & \left\{ \begin{array}{l} \text{kinetische E der Quarks} \\ \text{und ihre Ws mit} \\ W^+, W^-, Z, \gamma, \text{ Gluonen} \end{array} \right. \\
 & + \sum_q \bar{R}_q \gamma^\mu (i \partial_\mu - g' \frac{Y_q}{2} B_\mu - g'' \frac{\lambda_a}{2} G_\mu^a) R_q \\
 & + | (i \partial_\mu - g \frac{\tau_i}{2} W_\mu^i - g' \frac{Y_\Phi}{2} B_\mu) \Phi |^2 & \left\{ \begin{array}{l} \text{kinetische E und Selbst-W} \\ \text{des Higgs,} \\ \text{Massen von } W^+, W^-, Z, \gamma, \text{ Higgs} \\ \text{(bzw. ihre Kopplungen ans Higgs)} \end{array} \right. \\
 & - \mu^2 \Phi^\dagger \Phi - \lambda (\Phi^\dagger \Phi)^2 \\
 & - \sum_l (G_l \bar{L}_l \Phi R_l + \text{h.c.}) & \left\{ \begin{array}{l} \text{Massen der Leptonen} \\ \text{(bzw. ihre Kopplungen ans Higgs)} \end{array} \right. \\
 & - \sum_{q_1, q_2} (G_q \bar{L}_{q_1} \Phi R_{q_2} - i G_q \bar{L}_{q_2} \tau_2 \Phi^* R_{q_1} + \text{h.c.}) & \left\{ \begin{array}{l} \text{Massen der Quarks} \\ \text{(bzw. ihre Kopplungen ans Higgs)} \end{array} \right.
 \end{aligned}$$

wobei

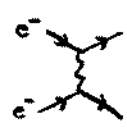
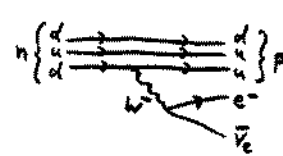
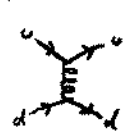
$$\begin{aligned}
 W_{\mu\nu}^i &= \partial_\mu W_\nu^i - \partial_\nu W_\mu^i - g \epsilon_{ijk} W_\mu^j W_\nu^k \\
 B_{\mu\nu} &= \partial_\mu B_\nu - \partial_\nu B_\mu \\
 G_{\mu\nu}^a &= \partial_\mu G_\nu^a - \partial_\nu G_\mu^a - g'' f_{abc} G_\mu^b G_\nu^c
 \end{aligned}$$

- Felder
- W_μ^i, B_μ : W^+, W^-, Z, γ ($i=1,2,3$) $\left\{ \begin{array}{l} W^\pm \triangleq \frac{1}{\sqrt{2}} (W^1 \mp i W^2) \\ Z \triangleq W^3 \cos \theta_w - B \sin \theta_w \\ \gamma \triangleq W^3 \sin \theta_w + B \cos \theta_w \end{array} \right.$ koppelt an L, R
 - G_μ^a : Gluonen ($a=1, \dots, 8$)
 - L_l : links-händige Lepton-Doublets ($l=1,2,3$)
 - R_l : rechts-händige Lepton-Singletts ($l=1,2,3$)
 - L_q : links-händige Quark-Doublets ($q=1,2,3$) ($q=1,2,3$) ($q=1,2,3$)
 - R_q : rechts-händige Quark-Singletts ($q=1, \dots, 6$) ($q=1, \dots, 6$) ($q=1, \dots, 6$)
 - Φ : Higgs

Kopplungen g, g', g'' : Kopplungen der Kräfte
 G_L, G_{g1}, G_{g2} : Higgs-Fermion-Kopplung (zu Fermion-Klasse)
 $\mu, \lambda > 0$: Parameter des Higgs-Potentials

und τ_i : 3 Pauli-Matrizen (Erzeugende der $SU(2)_L$)
 λ_a : 8 Gell-Mann-Matrizen (Erzeugende der $SU(3)_C$)
 Y : schwache Hyperladung (Erzeugende der $U(1)_Y$)
 f_{abc} : $8 \cdot 8 \cdot 8 = 512$ Zahlen. meistens Null: $f^{123}=1, f^{147}=f^{246}=f^{257}=f^{345}=f^{567}=f^{678}=\frac{1}{2}$
 $f^{458}=f^{678}=\frac{\sqrt{3}}{2}$; total antisym; Rest Null.

Übersicht Kräfte

Wdh	el. ungen.	schwach	stark	gravitativ
rel. Stärke	$1/137$	10^{-5}	1	10^{-40}
gegeben durch	$\alpha_{em} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c}$	$G_F = 1.166 \cdot 10^{-5} \frac{(\hbar c)^2}{GeV^2}$	$\alpha_s = \frac{g_s^2}{4\pi\hbar c}$	$\frac{G_N \cdot m_{pl}^2}{\hbar c}$
Träger der Kraft	γ	W^+, W^-, Z^0	Gluon	Graviton?
el. Ladung	0	$+\frac{1}{6} -\frac{1}{6} 0$	0	0
stark x.	0	0 0 0	ja	0
schwach x. Spin	0	ja ja ja	0	0
Plasse	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2} 1\frac{1}{2} 1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	$2\frac{1}{2} ?$
Reichweite	∞	$80 GeV$ $91 GeV$	$10^{-15} m$	∞
Typ. Feynman-Diagramm				?

confinement

Übersicht Quarks + Leptonen

Generation	1	2	3	el. Ladung [e]	schwache Ladung	starke Ladung	Spin [h]
Leptonen	ν_e e^-	ν_μ μ^-	ν_τ τ^-	0 -1	$\frac{1}{2}$ $\frac{1}{2}$	0 0	$\frac{1}{2}$ $\frac{1}{2}$
Quarks	u d	c s	t b	$+\frac{2}{3}$ $-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$ $\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$ $\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$ $\frac{1}{2}$

Spins der 'Materie'-Teilchen: $\frac{1}{2} \hbar$

→ Fermi-Dirac Statistik, d.h. Wellenfkt ungerade (→ Pauli-Ausschlussprinzip)
→ "Fermionen"

Hadronen sind aus Quarks aufgebaut: Mesonen $q\bar{q}'$ ($\pi^+ \hat{=} u\bar{d}$)
Baryonen qqq' ($p \hat{=} uud$)

Konzept: Eichsymmetrie

Eichgruppe der SM: $\underbrace{SU(3)_C}_{\text{stark}} \times \underbrace{SU(2)_L \times U(1)_Y}_{\text{elektroschwach}}$

Erinnerung: E-Dynamik

Eichtrafo $\left\{ \begin{array}{l} \phi \rightarrow \phi + \partial_\epsilon \chi(\vec{r}, t) \\ \vec{A} \rightarrow \vec{A} - \vec{\nabla} \chi(\vec{r}, t) \end{array} \right\}$ ohne Einfluss auf Lösungen der Maxwell-Gl.

→ Eichinvarianz der E-Dyn., wird $\left\{ \begin{array}{l} \vec{E} = -\vec{\nabla} \phi - \partial_t \vec{A} \\ \vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A} \end{array} \right\}$ unverändert.

QED: Dirac-Gl $\gamma^\mu (i\partial_\mu - e) \psi = 0$

Eichtrafo (Phasenänderung der Wellenfkt) $\psi'(x) = e^{ie\chi(x)} \psi(x) = U \cdot \psi(x) \quad (U \in U(1): U^\dagger U = 1)$

⇒ ψ' erfüllt Dirac-Gl. nach

Eichtrafo $\left\{ \begin{array}{l} \partial_\mu \rightarrow D_\mu \hat{=} \partial_\mu - ie A_\mu \\ A_\mu \rightarrow A_\mu + \frac{1}{e} \partial_\mu \chi \end{array} \right\}$

ortsabh. (lokale) Änderung der Wellenfkt → Existenz äußeren Feldes

(hier: lokale Eichinvarianz unter $U(1)$ → Existenz des em. Feldes)

→ Analogie: Wellen. globale ($\chi = \text{const}$) |||| lokale ($\chi = \chi(\vec{r}, t)$) |||| → Kraft!

QCD: $\psi \rightarrow e^{i g_s \alpha^a(\vec{r},t) t_a} \cdot \psi = U_{QCD} \cdot \psi$

$U_{QCD} \in SU(3)$: unitäre 3×3 Matrix

t_a : Generatoren der $SU(3)$, $a=1..8$

α^a : Gruppenparameter

((Farb-indizes $a,b=1..3$ unterdrückt))

μ QED: $U(1) \leftrightarrow$ el. Ladung

QCD: $SU(3) \leftrightarrow$ "Farb"-Ladung

$\rightarrow$ jedes Quark trägt genau eine Einheit der Farbladg

((wieder: lokale Eichinvarianz unter $SU(3) \rightarrow$ Existenz des Gluons))

Konzept: spontane Symmetriebrechung

Problem: masselose "Kraft"-Teilchen $\left\{ \begin{array}{l} W_1, W_2, W_3 \in SU(2)_L \\ B \in U(1)_Y \end{array} \right.$

Lösung: $\left. \begin{array}{l} \text{spontane Symmetriebrechung} \\ SU(2)_L \times U(1)_Y \rightarrow U(1)_{em} \\ \text{und Higgs-Mechanismus} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{massive } W^+, W^-, Z^0 \\ \text{masseloses } \gamma \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{l} SU(2)_L \times U(1)_Y \rightarrow U(1)_{em} \\ \text{und Higgs-Mechanismus} \end{array}} \right\} \begin{array}{l} \text{wie} \\ \text{beobachtet} \end{array} \checkmark$

aber: Higgs-Teilchen noch nicht beobachtet!

((einfaches Bild: umged. Tisch ...))

Higgs-Potential $V_H(\phi) = \frac{1}{2} \mu^2 \phi^2 + \frac{1}{4} \lambda \phi^4$

