

Physik am LHC

Tilman Plehn

University of Edinburgh

Neubeuern, 8/2008

Outline

LHC

Standardmodell

Higgs–Boson

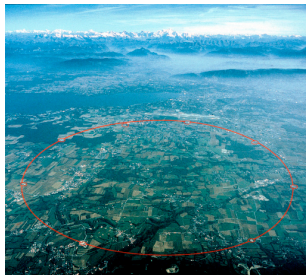
Grenzen des Standardmodells

Higgs–Suchen

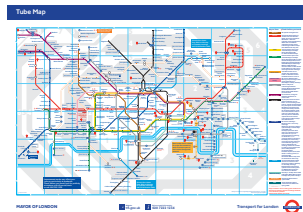
Dunkle Materie

Das größte/schwerste/tollste Experiment der Welt

- unter Genf und halb Frankreich...



- im alten 27-km-Tunnel von LEP
- 4 Detektoren: Atlas, CMS, LHCb, Alice
- je über 2000 Physiker in Atlas und CMS
- in Wahrheit soziologisches Experiment



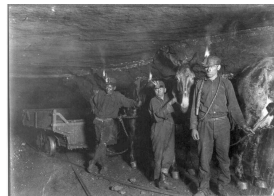
Das größte/schwerste/tollste Experiment der Welt

- Detektorbau — Materialwissenschaften
Experimentalphysik
Phänomenologie (völlig falsche Wortwahl nach Husserl!)
theoretische Physik
Mathematik...
- Zusammenarbeit/Lifestyle?

Theoretiker



Experimentalphysiker



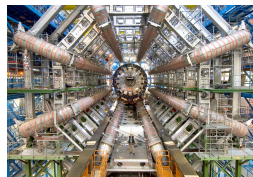
Das größte/schwerste/tollste Experiment der Welt

- Detektorbau — Materialwissenschaften
Experimentalphysik
Phänomenologie (völlig falsche Wortwahl nach Husserl!)
theoretische Physik
Mathematik...
- Zusammenarbeit/Lifestyle?

Theoretiker



Atlas



Teilchenbeschleuniger

Physik am LHC

- Einstein: Strahlenergie in Teilchenmasse $E = mc^2 \equiv m$
- Kollisionen von 7 TeV Protonen [1 GeV: Protonmasse]
 - (1) nachher: Teilchen in Ruhe
 - (2) Produktion von allem was an Proton–Bausteine koppelt
 - (3) Suche nach Strukturen im Geröll alle 25 ns
- Messung von Energien, Impulsen, Ladungen...
- Computer, Datenspeicher, Analysesoftware
- **Allround–Detektoren: messen was kommt**



Signale und Untergründe

- Signal: neue Teilchen
- Untergrund: Signale von gestern
- LHC–Physik: Signal oder Untergrund?
- Sprachregelung:
 - Discovery: 5σ Gauss [$P_B \sim 5.6 \cdot 10^{-7}$]
 - Evidence: 3σ Gauss [$P_B \sim 2 \cdot 10^{-3}$]
 - Exclusion: 95% Confidence Level [1.96 σ Gauss]

Kurze Geschichte neuer Teilchen

Entdeckungen in kosmischen Strahlen

1938 Muon: kosmische Strahlen [Anderson]

1947 Strange Quark: kosmische Strahlen [Rochester & Butler]

Entdeckung an Beschleunigern

1896 Elektron: Kathodenstrahlen [Thomson]

1974 Tau-Lepton: SPEAR, SLAC

1974 Charm-Quark: SLAC/Brookhaven [zwei Namen J/ψ]

1977 Bottom-Quark: E288, Fermilab

1979 Gluon: PETRA, DESY

1983 W/Z -Bosonen: SpS, Cern

1995 Top-Quark: Tevatron, Fermilab

Linear-Beschleuniger oder Ringbeschleuniger?

– mögliche Teilchen: Elektronen oder Protonen

– (1) Synchrotron-Strahlung: $P_{\text{synch}} \sim 1/R^2 (E/m)^4 \Rightarrow$ Protonen
 (2) Auflösung der Proton-Bausteine $\Rightarrow$ Elektronen

$\Rightarrow$ Elektronen in LEP oder Protonen in LHC [$m_p/m_e \sim 2000$]

$\Rightarrow$ Ringgröße durch Energie und Teilchenart

Standardmodell

Standardmodell der Elementarteilchenphysik

- Elementarteilchen = keine Ausdehnung/Struktur
- Fermionen: Materieteilchen

erste Generation Quarks: Up & Down [$p = (uud)$, $n = (udd)$]

erste Generation Lepton: Elektron [$He = (ppnn e^-)$]

erste Generation Neutrino: Elektron-Neutrino [$n \rightarrow p e^- \bar{\nu}$]

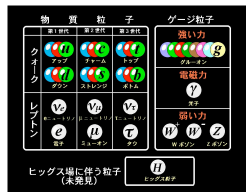
plus zwei weitere Fermion-Generationen, lediglich schwerer

- Bosonen: Wechselwirkungsteilchen

Photon	elektrische Kraft	$\sim Q_1 Q_2 / r^2$	unendlich	$m_\gamma = 0$
W/Z	schwache Kernkraft	$\sim e^{-m_W r} / r^2$	$r < 10^{-18} \text{ m}$	$m_W \sim 80 \text{ GeV}$
Gluon	starke Kernkraft	$\sim r^2$	$r > 10^{-15} \text{ m}$	$m_g = 0$
Graviton	Schwerkraft	$\sim m_1 m_2 / r^2$	unendlich	$m_G = 0$

Reichweite bestimmt durch Bosonmasse

- Symmetrien = erhaltene Ladungen/Wechselwirkungen
- zum Beispiel: Photonmasse und Gluonmasse verboten
problematisch: W/Z-Masse verboten



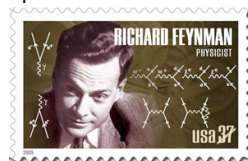
Standardmodell

Grundlage für Beschreibung aller Prozesse

- symmetrische Wirkung/Lagrangedichte $S = \int d^4x \mathcal{L}$

$$\mathcal{L}_{QED} \sim i\bar{\psi}_e \gamma_\mu \partial^\mu \psi_e - m_e \bar{\psi}_e \psi_e - e A^\mu \bar{\psi}_e \gamma_\mu \psi_e - \frac{1}{4} (\partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu)^2$$

- (1) Elektronfeld nicht konstant, also Teilchen
- (2) Elektronmasse m_e
- (3) Kopplung zweier Elektronen an ein Photon
- (4) Photonfeld nicht konstant, also Teilchen, etc.
- Feynman-Diagramme: quasi-klassische Teilchen



Spontane Symmetriebrechung

- Massen nicht vereinbar mit Symmetrie der schwachen Kernkraft
- Taschenspielertrick: Massen proportional zu neuem Boson-Feld Φ
 - (1) keine Massen für $\Phi = 0$, $\mathcal{L}$ symmetrisch
 - (2) unser Vakuum $\Phi = v$, Symmetriebrechung durch Vakuum

⇒ **Vorhersage des Higgs-Bosons** [kein WW-Teilchen]

- hohe Energien: effektiv $m = 0$, kein Problem [kein E/M]
- niedrige Energien: Teilchen unbeweglich, falsche Theorie???
- (1) **fundamentale (renormierbare) Theorie für hohe Energien**
- (2) nicht hilfreich für Chemie, Biologie, etc



Standardmodell

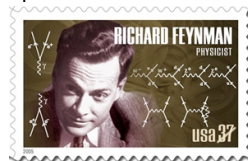
Grundlage für Beschreibung aller Prozesse

- symmetrische Wirkung/Lagrangedichte $S = \int d^4x \mathcal{L}$

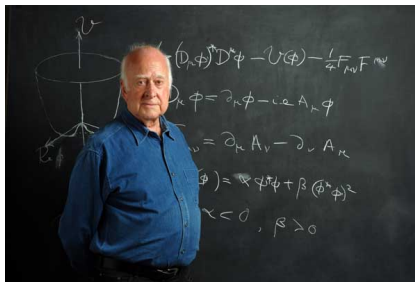
$$\mathcal{L}_{QED} \sim i\bar{\psi}_e \gamma_\mu \partial^\mu \psi_e - m_e \bar{\psi}_e \psi_e - e A^\mu \bar{\psi}_e \gamma_\mu \psi_e - \frac{1}{4} (\partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu)^2$$

- (1) Elektronfeld nicht konstant, also Teilchen
- (2) Elektronmasse m_e
- (3) Kopplung zweier Elektronen an ein Photon
- (4) Photonfeld nicht konstant, also Teilchen, etc.

- Feynman–Diagramme: quasi-klassische Teilchen



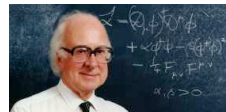
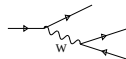
Spontane Symmetriebrechung



Higgs-Boson

Gedankenexperiment zur Unitarität

- Übergangsamplitude ist Wahrscheinlichkeit, also < 1
 - ‘Beta-Zerfall’: $\mathcal{A}(n\bar{p} \rightarrow e^- \bar{\nu}) \sim E^2$
beschrieben durch Fermi-Theorie [Zeitschrift für Physik, 1934]
Problem für $E > 600 \text{ GeV}$
 - seit 1983
Eichbosonen: $\mathcal{A}(WW \rightarrow WW) \sim E^2$
Problem für $E > 1.2 \text{ TeV}$
 - Higgs-Mechanismus
fundamentale Theorie zu hoher Energie
Higgs-Austausch unitarisierend für richtiges $g_{WWH} \sim m_W$
 - zusätzliche Fermionen $WW \rightarrow f\bar{f}$
unitär für richtiges $g_{fH} \sim m_f/m_W$
 - zusätzliches Higgs im Endzustand $WW \rightarrow WWH$
unitär für richtiges $g_{HHH} \sim m_H^2/m_W$
 - und zum guten Schluss $WW \rightarrow HHH$
unitär für richtiges $g_{HHHH} \sim m_H^2/m_W^2$
- ⇒ Higgskopplungen fixiert, Higgsmasse frei



Grenzen des Standardmodells

Experimentelle Grenzen?

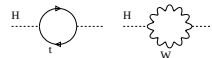
- Dunkle Materie? [klarer Hinweis auf neue Physik!]
- Quarkmischung — Flavorphysik? [new operators above 10^4 GeV?]
- Neutrinomassen und Mischung? [See-Saw bei 10^{11} GeV?]
- Materie–Antimaterie–Asymmetry? [Universum überwiegend Materie?]
- Gravitation nicht Teil des Standardmodells? [überwiegend schwach]

⇒ **experimentell inkomplett, Cutoff–Skala unvermeidlich**

Theoretische Grenzen?

- Unschärferelation $\Delta E \Delta t < \hbar$
- Quantenkorrekturen zur Higgsmasse...
...mit Cutoff–Skala des Standardmodells

$$m_H^2 \longrightarrow m_H^2 - \frac{g^2}{(4\pi)^2} \frac{3}{2} \frac{\Lambda^2}{m_W^2} \left[m_H^2 + 2m_W^2 + m_Z^2 - 4m_t^2 \right]$$



- korrigierte Higgsmasse am Cutoff Λ [nicht im Sinne des Higgs-mechanismus]
- Hierarchieproblem — Standardmodell mit $v \ll \Lambda$ instabil

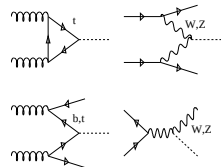
⇒ **Supersymmetrie, extra Dimensionen, Little Higgs etc**



Higgs–Suchen

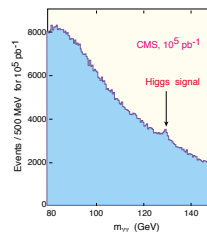
Higgs am LHC

- verschiedene Produktionskanäle
- Zerfälle in schwerstmögliche Teilchen $[g_{\chi\chi H} \sim m_\chi]$
- Signaturen je nach Higgsmasse
- Messung aller Quarks/Leptonen/Photonen aus Zerfall
- sicherlich 100+ Analysen



Beispiel–Suche

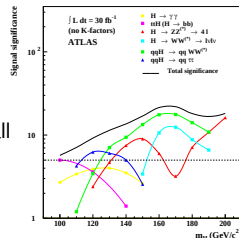
- Zerfall $H \rightarrow \gamma\gamma$
- Messung der Photonimpulse $p_\gamma = (E, p_x, p_y, p_z)$
- (invariante) Masse $p^2 = E^2 - p_x^2 - p_y^2 - p_z^2 \stackrel{!}{=} m^2$
- Rekonstruktion $m_H^2 \stackrel{?}{=} (p_{\gamma,1} + p_{\gamma,2})^2$
- Signal oder Untergrund?
- statistische Signifikanz $S/\sqrt{B} \sim \sqrt{N} \sim \sqrt{(t - t_0)}$
- aktueller Startzeitpunkt $t_0 = 10.9.2008$



Higgs–Suchen

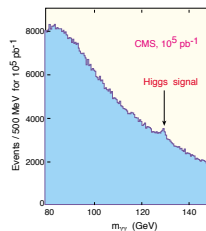
Higgs am LHC

- verschiedene Produktionskanäle
- Zerfälle in schwerstmögliche Teilchen $[g_{XXH} \sim m_X]$
- Signaturen je nach Higgsmasse
- Messung aller Quarks/Leptonen/Photonen aus Zerfall
- sicherlich 100+ Analysen



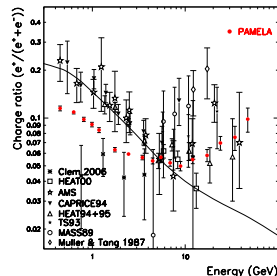
Beispiel–Suche

- Zerfall $H \rightarrow \gamma\gamma$
- Messung der Photonimpulse $p_\gamma = (E, p_x, p_y, p_z)$
- (invariante) Masse $p^2 = E^2 - p_x^2 - p_y^2 - p_z^2 \stackrel{!}{=} m^2$
- Rekonstruktion $m_H^2 \stackrel{?}{=} (p_{\gamma,1} + p_{\gamma,2})^2$
- Signal oder Untergrund?
- statistische Signifikanz $S/\sqrt{B} \sim \sqrt{N} \sim \sqrt{(t - t_0)}$
- aktueller Startzeitpunkt $t_0 = 10.9.2008$



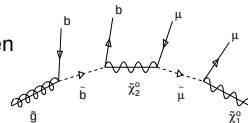
Materie im Universum

- Sterne, Planeten, Neutrinos, etc: 4%
 - weitere stabile Komponente: 22%
 - Rotationskurven
 - Gravitationslinsen
 - Bullet–Cluster–Bildchen
 - Strukturformation
 - Galaxien ohne Sterne? ...
 - produziert vor Universumsabkühlung
 - (1) sicherlich Gravitationswechselwirkung
 - (2) möglicherweise schwache Kernkraft, Kopplung an $W, Z, e^\pm$? [Pamela]
- ⇒ **LHC–Signatur in Zerfällen**



Dunkle Materie am LHC

- keine Wechselwirkung im Detektor
- Signatur: Summe aller gemessenen Impulse/Energien
- Partonen in Protonen: p_z nicht messbar
fehlende transversale Energie



⇒ Kosmologie + Teilchenphysik

Physik am LHC

Rocky Kolb's top 10 Questions about the Universe

- 10 What came before the big bang?
- 9 What is outside the Universe?
- 8 Where is the center of the Universe?
- 7 Is there intelligent life elsewhere?
- 6 Is there intelligent life here?
- 5 Is there a parallel Universe?
- 4 Is there a perpendicular Universe?
- 3 Can you parallel park in a perpendicular Universe?
- 2 Will the Cubs win the series before the end of time?
- 1 Are we responsible for this on the final exam?



Physik am LHC

Tilman Plehn

LHC

Standardmodell

Higgs-Boson

Grenzen

Higgs-Suchen

Dunkle Materie