Der Large Hadron Collider - Die "Weltmaschine" auf der Suche nach den grundlegenden Symmetrien

Michael Kobel
Institut für Kern- und Teilchenphysik, TU Dresden
Colloq Chemnitz 28.10.2009

1) **Symmetriekonzepte**
2) **Fundamentale Bausteine und Kräfte**
3) **Der Large Hadron Collider**
4) **Die Ziele der Teilchenphysik**
5) **Symmetrien der Teilchenphysik**

- Flavor- Symmetrie
  Ordnung der Teilchen
- Lokale Eichsymmetrie
  Ursache der Kräfte
- **Spontane Symmetriebrechung**
  Was ist Masse?
- Teilchen-Antiteilchen Symmetrie
  Wo ist die Antimaterie?
- Supersymmetrie
  Was ist Dunkle Materie?

Die Liebe ist die Tochter der Erkenntnis:
die Liebe ist umso glühender,
je tiefer die Erkenntnis ist.
(Leonardo da Vinci)

1) Symmetriekonzepte

Mathematische Symmetrien (Hermann Weyl)
Werkzeugkiste: Transformationsgruppen

R.P. Feynman: Ein Objekt heißt *symmetrisch*, wenn man mit ihm etwas anstellen kann, ohne es am Ende, wenn man fertig ist mit der Prozedur, geändert zu haben.

Symmetrien in der Kunst

M.C. Escher:

- Translation
- Translation & Farbänderung
- Drehung (3-zählig)
- Drehung (3-zählig) & Farbänderung
- Drehung (6-zählig) & Farbänderung

Symmetrien in der Philosophie

- **Elemente und Kräfte: 500-430 v.Chr. Empedokles**
  - Vier Elemente: **Feuer, Wasser, Erde, Luft**
  - Zwei Urkräfte: **Liebe , Haß ⇔ Mischung , Trennung**
- **Symmetrien: 427-347 v.Chr. Platon**
  - Symmetrische Körper: **Schönheit der Gesetze**

- **Kleinste Bausteine: 460-371 v.Chr. Demokrit**
  - Atome: **verschiedene Formen und Gewichte**
  - Leere: **Verbindung und Bewegung im Nichts**

2) Fundamentale Bausteine und Kräfte

1/10.000.000 1/10 1/10.000 1/10 1/1.000

$\gtrsim$ 0,01 m	10^{-9} m	10^{-10} m	10^{-14} m	10^{-15} m	$<10^{-18}$ m
Kristall	Molekül	Atom	Atomkern	Proton	Quark
					Elektron

- **4 Fundamentale Bausteine der Materie (punktförmig)**
  - Zwei „Quarks“: zu Protonen und Neutronen gebunden
    - Down: d
    - Up: u
  - Zwei „Leptonen“:
    - Elektron e: gebunden in Atomhülle
    - Neutrino ν: ungebunden, entsteht in Kernprozessen (Sonne, Radioakt.)
- **Welche Kräfte wirken zwischen den Bausteinen?**

Die fundamentalen Wechselwirkungen

- **4 fundamentale Kräfte**
  - **Elektromagnetismus**
    - **direkt erfahrbar**
    - **Basis für (fast) alles**
  - **Starke Kraft**
    - **nicht direkt erfahrbar**
    - **Bindet Quarks + Kerne**
  - **Schwache Kraft**
    - **nicht direkt erfahrbar**
    - **Kernumwandlungen (Brennen der Sterne)**
  - **Schwerkraft**
    - **direkt erfahrbar**
    - **irrelevant für Teilchen**

3) Der Large Hadron Collider LHC am CERN

Der ATLAS Detektor im Aufbau

Der ATLAS Detektor im Aufbau

Absenkung und Montage der Muon-Toroid Magnetspulen

Der ATLAS Detektor 2007/08

Montage des Spurkammersystemes
Und der Kalorimeter

Der ATLAS Detektor 2008

Letzter Schritt: Installation der Muon-Endkappen

LHC Energie

- **Gespeicherte Energie der beiden Protonenstrahlen: 2 x 350 MJ**

Wie 240 Elefanten auf Kollisionskurs

120 Elefanten mit 40 km/h **120 Elefanten mit 40 km/h**

Protonenergie: 7 TeV

Die Energie eines einzelnen Protons entspricht der einer Mücke im Anflug

Nadelöhr:
0.3 mm Durchmesser

Protonstrahlen am Kollisionspunkt:
0.03 mm Durchmesser

Bilder vom LHC

Start des LHC Projekts 2008

- **20 Dipole pro Woche installiert**
  - **Magneteinbau beendet: Anfang 2008**
  - **Erster Strahl: 10.9.08**
  - **19.9.08 Zwischenfall während Test des letzten Sektors bei 8000 A**

Zwischenfall 19. 9.2008

- **“Supraleitung” bei -271 °C ohne Widerstand und Wärme**
  - **Eine von ~10000 Verbindungen hatte winzigen Widerstand**
  - **Wird normalleitend → Lichtbogen**
  - **Schmilzt Hülle des Heliumtanks**
  - **6t Helium verdampfen in < 1 sec**
  - **Druckwelle zerstört oder verschiebt Magnete auf mehrere 100m Länge**

4) Ziele der Teilchenphysik

Warum?

- **ENERGIE ist der Schlüssel**

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar$$

Werner Heisenberg

kleine Strukturen - kleine Abstände

$$E = m \cdot c^2$$

Albert Einstein

neue und schwere Materie

$$\langle E \rangle \approx k_b \cdot T$$

Ludwig Boltzmann

hohe Temperaturen

Die Temperatur des Universums fällt mit der Zeit

Verbindung zur Kosmologie

Gemeinsame Wurzeln

- **LHC:**

Nachstellen der Prozesse zwischen Elementarteilchen

10^{-12} s nach dem Urknall

6) Bedeutung von Symmetrien

Emmi Noether
(1882-1935)

Noether Theorem:

Symmetrie $\Rightarrow$ Erhaltungsgröße

Physikalische Gesetze unabhängig von...

Verschiebung der Zeitachse $\Rightarrow$ Erhaltung der Energie

Verschiebung der Raumachsen $\Rightarrow$ Erhaltung des Impulses

Drehung der Raumachsen $\Rightarrow$ Erhaltung des Drehimpulses

6.1.) Die “Flavor” Symmetrie

- **Ergebnis der Untersuchung kleinster Strukturen:**
  - **Protonen und Neutronen bestehen aus 3 Quarks**
    - **d: Q= - 1/3, “down - flavor”**
    - **u: Q = +2/3, “up - flavor”**

  - **fast gleiche Massen** m_p**= 938,3 MeV** m_n**=939,6 MeV**
  - **genau gleiche Eigenschaften bzgl. starker Wechselwirkung**

- **Ordnungsprinzip**
  - **Vertauschungs-Symmetrie von 2 Quark-Flavors (u $\leftrightarrow$ d)**

Die Brechung der Flavor-Symmetrie

- **weitere Flavors**
  - **s: Q= - 1/3, “strange - flavor”**
  - **c: Q= + 2/3, “charm - flavor”**
- **Symmetriebrechung:**
  - **m_s, m_c » m_d, m_u**

Gell-Mann 1964: Vorhersage des Ω^-

- **1964:Gerson Goldhaber, Bryce Sheldon, Alex Fireston, David Lissauer, Jane Allardt Nachweis in Hand-vermessenen Blasenkammeraufnahmen**

…und noch eine dritte Familie !

1995: TeVatron, FNAL,Chicago
Entdeckung des Top Quarks
Masse: 173 GeV !

Scientific American, 1997

Masse in MeV bzw. in Tonnen

Alle Bausteine und Wechselwirkungen

- **Warum 3 Familien?**
- **Warum jeweils diese Wechselwirkungen („Kräfte“)?**

Vorher zu klären…

- **Wie funktionieren Kräfte und Wechselwirkungen?**

Prinzip von Kraftwirkungen

- Zu jeder Wechselwirkung gehört eine Ladung
- Nur Teilchen mit entsprechender Ladung spüren Wechselwirkung
- Wechselwirkung erfolgt über Austausch von Botenteilchen

Abstoßend

Anziehend

www.physicsmasterclasses.org/exercises/unischule/baust/bs_6fram_lv123.html

Fundamentale Kräfte

- **Jede Kraft (Wechselwirkung) hat eigene Botenteilchen**
- **Boten nur sendbar, wenn entsprechende Ladung vorhanden**

Kraft	Botenteilchen	Ladung der Materieteilchen
Starke Kernkraft	**Gluonen g**	**Starke „Farb"-Ladung** **„Rot", „Blau", „Grün"**
Schwache Kraft	**„Weakonen" (W^+,W^-,Z)**	**Schwache „Isospin"-Ladung** $I_3^W = \begin{pmatrix} +1/2 \\ -1/2 \end{pmatrix}$
Elektro-magnetismus	**Photonen γ**	**Elektrische Ladung** **Q = -1, + ⅔, -⅓, …**
Schwerkraft	**Gravitonen ?**	**Masse ?**

Was ist Ladung?

Ladung …

- … ist ***kein Stoff !***
- … beschreibt die ***Sensitivität*** von Teilchen ***bezüglich der jeweiligen Wechselwirkung***

Eigenschaften:

- **Ladungen sind *Additiv***
  Ladung(A+B) = Ladung(A) + Ladung(B)
- **Ladungen kommen nur in Vielfachen einer *kleinsten Ladung* vor**
- **Ladung ist *erhalten*,**
  d.h. sie entsteht weder neu, noch geht sie verloren

Antimaterie

- **Zu jedem Bausteinteilchen existiert ein Antiteilchen mit umgekehrten Vorzeichen von allen Ladungen**
- **Sonst sind alle Eigenschaften (Masse, Lebensdauer) gleich**

- **Aus Botenteilchen können paarweise Materie- und Antimaterieteilchen entstehen**
- **Umgekehrt können sie sich paarweise wieder zu Botenteilchen („Energie“) vernichten**

6.2) Die „Eichsymmetrien“ im Standardmodell

- **Erkenntnis 1927-1973:**
  - **Ladungen beschreiben Sensitivität von Teilchen bzgl. bestimmter *Umeichungen***
  - **Ladungserhaltung folgt aus Invarianz bezüglich dieser Umeichungen (*Eichsymmetrie*)**
  - **Umeichungen sind sogar *lokal (an jedem Ort und zu jeder Zeit anders)* möglich**
  - **Die *lokale Eichsymmetrie* wird durch Aufnahme oder Abgabe von *Eichteilchen* garantiert**
  - **Diese Eichteilchen sind die Botenteilchen der *Wechselwirkungen***

?

Das Problem der Nomenklatur

Lokale Umeichungen anschaulich

Umeichung im Elektromagnetismus $U(1)_Q$

- 1927: Dirac, Jordan, Heisenberg, Pauli, …

Ergebnis:
Fundamentalprozess („Vertex“)
Aufnahme oder Abgabe
eines Eichbosons (*Photon* γ)

Die schwache Eichsymmetrie SU(2)

- **1961 S.Glashow: Eichung der schwachen Ladung**

Neutrino: $I_3 = ½$ Elektron: $I_3 = -½$
Up-Quark: $I_3 = ½$ Down-Quark: $I_3 = -½$

Idee: (ν, e) und (u, d) unterscheiden sich *nur* durch die „Richtung“ eines Pfeils (schwache Ladung I^w)

- **lokale Umeichung**

Die starke Eichsymmetrie $SU(3)_c$

- 1973: Gross, Politzer, Wilczek, Nambu, Fritzsch…
  starke WW durch Umeichung der Farbladung

Why are all the theories of interactions so similar in their structure?

There are a number of possibilities:

- *The first is the limited imagination of physicists:*
  When we see a new phenomenon, we try to fit it in the frame-work we already have – until we have made enough experiments we don't know that it doesn't work…
  It's because physicists have only been able to think of the same damn thing, over and over again.
- *Another possibility is that it* is *the same damn thing over and over again – that Nature has only one way of doing things, and She repeats her story from time to time.*
- *A third possibility is that things look similar because they are aspects of the same thing – some larger picture underneath…*

Richard. P. Feynman, "The strange theory of light and matter"
Princeton University Press, 1985
"Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie"
Piper Taschenbuch, 9,95€

Eindeutige Vorhersagen

- Ursache jeder Wechselwirkung: Erhaltung von Symmetrien
- Ergibt eindeutiges Set von fundamentalen "Vertices"
- Alle Prozesse sind Kombination solch fundamentaler Vertices

- z.B. Beta"zerfall" des Neutrons

Anm: Pfeilrichtung ← symbolisiert Antiteilchen
Es läuft trotzdem in der Zeit nach rechts

Massen in der schwachen Wechselwirkung

- Unter Benützung experimenteller Teilchenmassen beschreibt Theorie der schwachen Kraft alles, z.B.
- langsames Brennen der Sonne
  - $p + p \rightarrow D + e^+ + \nu$ (Energiegewinn: $\Delta E = 0{,}5$ MeV)
  - Masse des Zwischenzustands $m_W = 80400$ MeV
  - Rate unterdrückt um ~ $(\Delta E / m_W)^4 > 10^{20}$

- Fundamentales Problem

(MeV)	Experim.	Theorie
m_W	80400	0
m_Z	91200	0
m_e	0,5	0
m_t	173000	0
…		

- Grund: schwache Eichsymmetrie

6.3) Spontane Symmetriebrechung

- Symmetrien erfordern masselose Teilchen
  - Erhalten Masse erst ~ 10^{-10} sec nach Urknall durch „spontane“ Symmetriebrechung
  - **LHC: Entsteht Masse durch Kopplung an ein „Higgs“ Hintergrundfeld?**
  - **Was verursacht die riesigen Massenunterschiede?** „Sandkorn .vs. Ozeandampfer“?

Die Bedeutung der Teilchenmassen

- **Größen- und Energieskala der Atome (Moleküle, Festkörper, Lebewesen, …)**

  Elektronmasse regiert atomare **Energien** und **Radien**

  - Bindungsenergie steigt mit $\mathbf{m_e}$
  - Atomdurchmesser fällt mit $1 / \mathbf{m_e}$

- **Stabilität der Nukleonen:**

  Feine Abstimmung zwischen

  - Starker Kraft
  - Elektromagn. Abstoßung der Quarks
  - Massen(differenzen): $m_d - m_u$, $m_d - m_e$

Auswirkung von Änderungen

- Die Masse der Atome kommt
  - nur ~1% aus Ruhemasse der Bausteine
  - 99% aus Energie der Quarkbindung
- Ändern von m_u ,m_d oder m_e hätte
  - kaum Effekt auf **Atommassen**
  - kaum Effekt auf **Materiedichte**
  - riesigen Effekt auf **Verhalten** der Materie
- Erniedrige m_e auf 0.025 MeV/c^2
  - Leben: 30m große Riesenwesen auf Titan?
- Erniedrige $m_d - m_e$ um 1 MeV/c^2
  - ermöglicht Umwandlung des Wasserstoffs:
  - keine Wasserstoff-Atome, n stabil
- Erniedrige $m_d - m_u$ um 2 MeV/c^2
  - Proton- und Deuteriumzerfall
  - Keine Sterne
  - nur neutrale Teilchen (n, γ, ν)

Animation: Was wäre wenn…

View Online: www.youtube.com/watch?v=p5cPg62z8xs
Download: www.teilchenphysik.de/e26/e50/e36571

- Erst nachdem der LHC geklärt hat,
  wie Teilchenmassen überhaupt entstanden sind,
  wird man erforschen können, wie ihre Werte zustande kamen.
- http://prola.aps.org/abstract/RMP/v68/i3/p951_1
  R.N. Cahn,
  „The 18 arbitrary parameters of the standard model in your everyday life“(1996)
- http://arxiv.org/abs/hep-ph/9707380
  V.Agrawal, S.M.Barr, J.F.Donoghue, D.Seckel,
  „The anthropic principle and the mass scale of the Standard Model“ (1997)
- http://arxiv.org/abs/astro-ph/9909295v2
  C. Hogan, „Why the Universe is Just So“ (1999)
- http://arxiv.org/abs/0712.2968v1
  Th Damour und J.F.Donoghue,
  „Constraints on the variability of quark masses from nuclear binding“ (2007)

Was ist Masse?

- Leeres Vakuum
  - Alle Teilchen sind masselos
  - bewegen sich mit Lichtgechwindigkeit

- Higgshintergundfeld
  - Teilchen werden durch WW mit dem Higgs-Hintergrund-Feld verlangsamt
  - Teilchen erhalten effektiv eine Masse
  - Wert hängt von der Stärke der WW mit dem Hintergrundfeld ab

- Higgs-Teilchen
  - quantenmechanische Anregung des Higgsfeldes
  - notwendige Konsequenz des Konzepts!

Mechanische Analogie zur Higgs Produktion

- Luft (~ Higgsfeld) normalerweise kaum zu spüren
  am Besten erfahrbar, wenn in Bewegung
- Objekte hoher Energie erzeugen Anregungen der Luft:

Higgs Suche bei ATLAS und CMS

→ www.atlas.ch/multimedia

- Higgs Masse unbekannt:
  - Viele Produktionsmechanismen
  - Viele mögliche Zerfälle

g g fusion

t t̄ fusion

W, Z bremsstrahlung

WW, ZZ fusion

- Nach 1-3 Jahren gut verstandener Daten: (~2011-13)
  - Higgs Boson kann bei allen Massen entdeckt werden

Wirkungsquerschnitte

- 600 000 000 Kollisionen/Sekunde
  - $\mathcal{L} \leq 10^{32} cm^{-2} s^{-1}$ in 2010 (~0.2 fb^{-1} im ersten Jahr)
  - $\mathcal{L} = 10^{33} cm^{-2} s^{-1}$ ab 2011 (30 fb^{-1} in 2–3 Jahren)
  - $\mathcal{L} = 10^{34} cm^{-2} s^{-1}$ ab 2012? (100 fb^{-1} pro Jahr)

Anforderungen an den Trigger

Bei Design-Luminosität:
Strahlkollisions-Rate: **40 MHz**
WechselWirkungs-Rate: **~ 1 GHz**
Speicher-Rate: **~ 200 Hz**

→ “online”-Reduktion: **99.9995%**

Leistungsfähiger Trigger nötig:

Selektion der **seltenen Ereignisse** aus der extrem **untergrundreichen** LHC Umgebung

Higgs Ereigniss: Longitudinale Projektion

CMS

H -> μμμμ
m(H)=150GeV
+ 20 Min bias

Electrons
Muons
Hadrons pt<2GeV
Hadrons pt>2GeV

Vorhersagekraft des Higgs-Mechanismus

- Ist die Higgs Hypothese überprüfbar? Ja!
  - **Entdecke Higgs Boson(en) *und* Messe ihre Zerfälle**
- Lernen wir was Masse ist? Ja!
  - **Die Stärke der Kopplung ans Higgsfeld**
- Sagt der Higgs Mechanismus die Massenwerte vorher? Nein!
  - **Außer: M_W / M_Z Verhältnis! Es stimmt auf besser als 1‰**

- Standardmodell Vorhersage: M_W=(80.36 ± 0.02)GeV
- Direkte Messung: M_W=(80.40 ± 0.03)GeV
- Differenz: Δ = (0.04 ± 0.04)GeV

- Fit der SM Higgs Masse: $M_H = (100^{+40}_{-30})$GeV

Massenmechanismus ohne Higgs?

- Standardmodell ohne Higgs verletzt „Wahrscheinlichkeit < 1“

  - Higgs wird bei LHC gefunden, wenn es existiert!
  - Wenn nicht, muß der LHC etwas anderes finden! („win-win“)
- ***Die Suche nach dem Ursprung der Masse wird in wenigen Jahren enden***
  - ***Präzise Vermessung*** beginnt jedoch ***erst danach (LHC+ILC)***
  - ***Dann erst*** haben wir die ***richtigen Fragen*** nach den ***Werten*** der Teilchenmassen

6.4) Materie-Antimaterie „CP“ Symmetrie

- Antimaterie = Materie mit umgekehrten Ladungen (C)
  - Genau genommen: auch gespiegelt (P)
- Teilchenphysik Experimente:
  - „CP“ Symmetrie fast immer perfekt
- CP-Verletzung im Standardmodell
  - Quarks: klein, 1 Naturkonstante
    - 1964: s-Quarks 1999: b-Quarks

Ununter-
scheidbar

Materie und
Antimaterie

Unter-
scheidbar!

    - Bei Weitem nicht groß genug für Kosmologische CP Verletzung (Antimaterie hat „nur“ ca. 99,9999999% der Materie vernichtet)
  - Neutrinos: noch unbekannt, 1-3 Naturkonstanten
    - Sind sie der Schlüssel zur Kosmologischen CP Asymmetrie?
  - Immer nötig: Teilchenmassen und mind. 3 Familien(!)

LHC: Neue Quark-Antiquark Asymmetrie?

- CP Verletzung bei Quarks mit 1 Parameter beschreibbar
  Sind alle Messungen damit verträglich?
  - Spezialisiertes Experiment für b-Quarks nahe Strahl:

	BaBar & Belle	D0/CDF II	LHCb
	PEPII / KEKB	Tevatron	LHC
Strahlen	e^+e^-	$\bar{p}p$	pp
Ab Jahr	1999	2002	2010
$\sqrt{s}$ (GeV)	10,4	2.000	14.000
σ_{bb} / σ_{qq}	1 / 4	1 / 1000	**1 / 130**
N_{qq} / s (Hz)	40	20.000	**13.000.000**
N_{bb} / s (Hz)	10	20	**100.000**
<Flugstrecke>	260 μm	450 μm	**10.000 μm**

  - Nach 1 Jahr „verstandener“ Daten:
    weiterhin verträglich **oder** neue CP Asymmetrie**?**

6.5) Supersymmetrie ?

- Botenteilchen mit den Eigenschaften von Materie?
- …und anders herum

Die letzte fehlende Symmetrie !

- Würde helfen, mehrere Theoretische Fragen zu lösen
  - “Relativ“ niedrige Higgs Masse
  - Einbindung der Gravitation
  - Vereinigung aller Kopplungen

- Leichtestes SUSY Teilchen stabil
  = Dunkle Materie (ca 3000 /m^3)?
  - ATLAS & CMS:
    Direkte Erzeugung möglich
    Nachweis: „fehlende Energie“
  - LHCb:
    „Virtueller“ Zwischenzustand
    Nachweis: sehr seltene b-Zerfälle

Supersymmetrische Teilchen -

25 % unseres Universums ?

Messbare Gravitationslinsen aus leuchtender und dunkler Materie

3000 unsichtbare, aber im Prinzip spürbare Teilchen pro Kubikmeter Universum ?

Symmetrien in der (Teilchen)physik

- Klassifizierung

  Beispiel: Gebundene Quark-Zustände

- Erhaltungsgrößen

  Beispiel: Noether Theorem,

- Ursache von Kräften

  Beispiel: lokale Umeichungen

- Vereinheitlichung der Naturkräfte

  Beispiel: Supersymmetrie

Asymmetrien sind oft Hinweise auf tiefer liegende gebrochene Symmetrien !

LHC - Die Symmetriemaschine:

- Das Fundament der Naturgesetze ist vermutlich eine perfekte, großartige

Symmetrie