Mikro- trifft Makrokosmos

- mit dem Large Hadron Collider auf der Suche nach Antworten auf fundamentale Fragen

Norbert Wermes
Physikalisches Institut
Universität Bonn

Mikrokosmos
Neugier
Makrokosmos

„Wirkliche Unwissenheit ist Mangel an Neugier. Neugier ist das Wesen aller Kultur.“

unbekannte Quelle

„Ich habe keine besondere Begabung, sondern bin nur leidenschaftlich neugierig.“

Albert Einstein (1879 – 1955)

Hauptobjekt
menschlicher Neugier ist …

… die Natur

Erde
Sonne, Mond
Planeten …

… das Universum

Olbers Paradox (1826)

Heinrich Wilhelm Olbers (1758-1840)

V. v Gogh 1888

Warum ist der Nachthimmel schwarz?

Edwin Hubble 1929

Hubble Space Telescope
1990 – 2014

Sterne leben nicht ewig
Universum endlich und expandiert
„Licht ferner Sterne ist rotverschoben“

The big Bang
15 thousand million years
1 thousand million years
300 thousand years
3 minutes
10⁻⁵ seconds
10⁻¹⁰ seconds
10⁻³⁴ seconds
10⁻⁴³ seconds
alle Kräfte
gleich stark
Quarks
Gluonen
Elektro-
schwache
Vereinigung
Protonen
Neutronen
1 GeV
Kerne
100 keV
Atome
0.25 eV
Strahlung
wird frei
Sterne
Galaxien
Strukturen
10³² degrees
10²⁷ degrees
10¹⁵ degrees
10¹⁰ degrees
10⁹ degrees
6000 degrees
18 degrees
3 degrees K
radiation
particles
heavy particles carrying the weak force
quark
anti-quark
electron
positron (anti-electron)
proton
neutron
meson
hydrogen
deuterium
helium
lithium

WIR?

The big Bang
10^{-43}s
10^{-34}s
10^{-10}s
1 µs
3 min
100 000 Jahre
1 Mrd Jahre
13.7 Mrd Jahre
„~Größe“
Zeit
10^{15}K
10^{9} K
6000 K
18K
3K
Temperatur
radiation
particles
heavy particles carrying the weak force
quark
anti-quark
electron
positron (anti-electron)
proton
neutron
meson
hydrogen
deuterium
helium
lithium

Large Hadron Collider: ~1 TeV
≅ Reaktionen wie sie
etwa 10^{-12} s nach
dem Urknall stattfanden.

eV – die Einheit für Energie, Masse, Temperatur, 1/Zeit und sogar 1/Länge

1 eV	kin. Energie d. Elektrons (1V)
1 GeV	Masse ($E=mc^2$) des Protons
185 GeV	Masse des Goldatoms
0.025 eV	Temperatur ($E = kT$) in diesem Raum
100 GeV	Zeit^{-1} ($E=\hbar/t$) der Massenerzeugung elementarer Teilchen nach dem Urknall
10^{19} GeV	„typ. Länge“ $^{-1}$ ($E = \hbar c/\ell$) des Universums zur Zeit der Vereinigung aller Kräfte ($\cong 10^{-35}$ m)
14000 GeV	Energie der Kollisionen am LHC, CERN

$$1\ \text{kWh} \approx 10^{25}\ \text{eV} = 10\ \text{Mill. Mrd. GeV}$$

(fast) Urknall im Labor ?

heißes expandierendes Universum

Teilchen-Antiteilchen Kollisionen
bei hohen Energien/Temperaturen

alle Teilchen besitzen dieselbe
Energie (Temperatur) und
reagieren “thermisch” miteinander

kontrolliert aufgezeichnete
Einzelreaktionen

Temperatur : 10 000 000 000 000 000 K ↔ 1 TeV = 1000 GeV

	1. Familie		2. Familie		3. Familie		**Ladung**
Quarks	u	up	c	charm	t	top	**+2/3**
	d	down	s	strange	b	bottom	**-1/3**
Leptonen	ν_e	e-Neutrino	ν_μ	μ-Neutrino	ν_τ	τ-Neutrino	**0**
	e	Elektron	μ	Myon	τ	Tau(on)	**-1**

… und deren Antiteilchen

1. Familie
2. Familie
3. Familie
Ladung
Quarks
u
c
t
+2/3
d
s
b
-1/3
Materie-
teilchen
Leptonen
ν_e
ν_μ
ν_τ
0
e
μ
τ
-1
Standardmodell
Anti -
Quarks
$\bar{u}$
$\bar{c}$
$\bar{t}$
-2/3
$\bar{d}$
$\bar{s}$
$\bar{b}$
+1/3
Anti-Materie-
teilchen
$\bar{\nu}_e$
$\bar{\nu}_\mu$
$\bar{\nu}_\tau$
0
Anti -
Leptonen
e^+
μ^+
τ^+
+1
gleiche
Massen
entgegen
gesetzte
Ladungen

Massen der Elementarteilchen

1. Familie

leicht

Quarks

Proton/Ne

Leptonen

stabil

dennoch …
… alle drei Familien
als „Saat“ notwendig

Was wäre wenn … ?

nach R. Cahn, RMP Coll. 1996

… das Elektron so massiv wie das Myon wäre?

Quarks

1/200

alle linearen Dimensionen schrumpfen um 1/200

Leptonen

200 mal schwerer

stabil

$$\mathbf{e} + p \rightarrow n + \nu_e$$

leicht möglich

Welt bestünde am Ende nur aus

… das u-Quark schwerer als das d-Quark wäre ?

GeV

Quarks

0.003

0.006

Proton

Neutron

$$p \rightarrow n + \cancel{e^+} + \nu_e$$

Leptonen

übrig blieben neutronenreiche Kerne und stabile Neutronen

<u>Nukleosynthese</u> ganz anders statt Wasserstoff → **$n + \nu_e$**

wenn … die zweite Familie die erste wäre ?

1. Familie

Quarks

c 1.3

s 0.2

$$c \rightarrow s + \mu + \nu_\mu$$

Leptonen

ν_μ ~0

μ 0.1

GeV

statt p ≙ (uud) → (sss) ≙ Ω^-

Kern ?

Ersatz-Wasserstoff = + μ^+

Lichtmikroskop ~ 200 nm

Elektronenmikroskop λ ~ 1/Energie
~ 0.1 nm

Beschleunigermikroskop

ELSA in Bonn (3 GeV) ~10^{-16} m

HERA in Hamburg (300 GeV) ~10^{-18} m

Institut für Strahlen- und Kernphysik der Univ. Bonn
University of Bonn
Crystal Barrel
booster synchrotron
0.5 - 1.6 GeV
LINAC 1
(20 MeV)
LINAC 2
(26 MeV)
DESY cavity
ELSA
stretcher ring
0.5 - 3.5 GeV
half cell of stretcher ring
Sobottaweg
Katzenburgweg
Nußallee

Quark-Antiquark Paare
und
Gluonen

Beschleunigung

LHC: 2 x 7000 Milliarden 1V Batterien

Kreisbahn:

- ✓ Mehrfachbeschleunigung (5 Mill. Volt/m)
- ✓ Wiederverwendung d. Strahlen
- – starke Magnete notwendig

Large Hadron Collider (LHC) in Genf

Protonenstrahlen auf 27 km langer Kreisbahn
Höchste je erreichte Beschleunigung (7 TeV pro Strahl)
Starke supraleitende Magnete (8 Tesla) zur Krümmung
erster Strahl: Dezember 2009

LHC … eine Größenordnung höhere Auflösung
eine Größenordnung „näher“ an den Urknall

CERN

Experimentgelände

100 m

ATLAS

Länge : 46 m
Durchmesser : 26 m
Gewicht : 7000 t
ca. 100 Mill. el. “Kanäle”
ca. 3000 km Kabel

CMS

Länge= 21 m
Durchmesser : 15 m
Gewicht : 12 500 t
ca. 80 Mill. el. “Kanäle”
ca. 750 km Kabel

Spuren aus Kosmischer Höhenstrahlung, aufgenommen März 2008
ATLAS Collaboration

LHC: 1236 supraleitende Dipolmagnete

größte Herausforderungen:

8 Tesla Magnetfelder über 27 km Länge – supraleitend bei 1.9 K – 700 000 Liter flüssiges Helium – gespeicherte Energie 10 GJ

Energien am LHC

- **7 TeV x 1 Proton = 0.000001 J = 0.000004 kWh**
  ≙ 100 W Lampe für 10 milliardstel sec.
  ≙ kinetische Energie einer Mücke

Aber …

- **7 TeV x $1.1 \cdot 10^{11}$ Protonen x 2808 Pakete = 350 MJ**
  ≙ ICE bei 150 km/h

pp Kollisionen

- beschleunigt werden stabile Protonen
- von Interesse sind aber nur die Kollisionen der Quarks und Gluonen

7 TeV

7 TeV

pp-Kollisionen

Elementarprozess, niedrigste Ordnung

pp-Kollisionen

Effekte “höherer Ordnung”

pp-Kollisionen

Wechselswirkung des “Rests” → underlying event

pp-Kollisionen

“Hadronisation” in messbare Teilchen

ATLAS
CMS
Run 62063, Event 2433, Orbit 15231634, BX 680
Run # 62063, event # 2433
LHCb
ALICE

μ
μ
CMS
CMS Experiment at the LHC, CERN
Date Recorded: 2009-12-14 04:46 CET
Run/Event: 124120/5686693
Candidate Dimuon Event at 2.36 TeV

ATLAS EXPERIMENT

Jet Event at 2.36 TeV Collision Energy

2009-12-14, 04:30 CET, Run 142308, Event 482137

http://atlas.web.cern.ch/Atlas/public/EVTDISPLAY/events.html

Erkennen durch genaue Messung und Computeranalyse.

$$M^2 \propto E_1 E_2 (1 - \cos \alpha)$$

painting
by
Ken Currie

Higgs-Boson

Higgs-Hintergrundfeld

aus
Garcia-Bellido et al.

Der Higgs Mechanismus (Sirup Analogie)

Hintergrundfeld (hier „Sirup“)

Vakuumphase (ungebrochene Symmetrie)
Alle Teilchen sind masselos und bewegen sich mit derselben Geschwindigkeit, der Lichtgeschwindigkeit c.

Das „Vakuum“ ist nicht „leer“, sondern mit dem Higgsfeld gefüllt (gebrochene Symmetrie)
Die Teilchen wechselwirken mit dem überall existierenden Hintergrundfeld und werden dadurch langsamer. Sie erhalten “effektiv” eine Masse, die von der Stärke ihrer Wechselwirkung mit dem Higgsfeld abhängt.

Das Higgs-Teilchen
Quantenmechanische Anregung des Higgsfeldes selbst: das Higgs-Boson
Das Higgs-Boson ist eine notwendige Konsequenz des Higgs-Hintergrundfeldes.

....

Theorie und Experiment

Parameter	Experiment	Free in fit	Theorie	m global EW fits: *Complete fit*	*Complete fit w/o exp. input in line*
M_Z [GeV]	91.1875 ± 0.0021	yes	91.1874 ± 0.0021	91.1877 ± 0.0021	$91.1974^{+0.0146}_{-0.0159}$
Γ_Z [GeV]	2.4952 ± 0.0023	–	2.4959 ± 0.0015	$2.4954^{+0.0016}_{-0.0013}$	$2.4954^{+0.0008}_{-0.0012}$
$\sigma^0_{\rm had}$ [nb]	41.540 ± 0.037	–	41.478 ± 0.014	41.472 ± 0.001	41.469 ± 0.015
R^0_ℓ	20.767 ± 0.025	–	20.742 ± 0.018	20.741 ± 0.018	20.718 ± 0.027
$A^{0,\ell}_{\rm FB}$	0.0171 ± 0.0010	–	0.01638 ± 0.0002	0.01624 ± 0.0002	0.01618 ± 0.0002
A_ℓ $^{(\star)}$	0.1499 ± 0.0018	–	0.1478 ± 0.0010	0.1472 ± 0.0009	–
A_c	0.670 ± 0.027	–	$0.6682^{+0.00045}_{-0.00044}$	$0.6679^{+0.00043}_{-0.00037}$	$0.6679^{+0.00044}_{-0.00034}$
A_b	0.923 ± 0.020	–	0.93469 ± 0.00009	$0.93464^{+0.00006}_{-0.00007}$	$0.93463^{+0.00006}_{-0.00007}$
$A^{0,c}_{\rm FB}$	0.0707 ± 0.0035	–	$0.0741^{+0.0006}_{-0.0005}$	0.0737 ± 0.0005	0.0738 ± 0.0005
$A^{0,b}_{\rm FB}$	0.0992 ± 0.0016	–	0.1036 ± 0.0007	0.1032 ± 0.0006	$0.1037^{+0.0004}_{-0.0005}$
R^0_c	0.1721 ± 0.0030	–	0.17225 ± 0.00006	0.17226 ± 0.00006	0.17225 ± 0.00006
R^0_b	0.21629 ± 0.00066	–	$0.21579^{+0.00004}_{-0.00006}$	0.21577 ± 0.00005	0.21577 ± 0.00005
$\sin^2\theta^\ell_{\rm eff}(Q_{\rm FB})$	0.2324 ± 0.0012	–	$0.23145^{+0.00011}_{-0.00016}$	0.23151 ± 0.00011	$0.23148^{+0.00013}_{-0.00010}$
M_H [GeV] $^{(\circ)}$	Likelihood ratios	yes	$82.8^{+30.2[+75.2]}_{-23.2[-41.5]}$	$119.1^{+13.4[+37.9]}_{-4.0[-4.9]}$	$82.8^{+30.2[+75.2]}_{-23.2[-41.5]}$
M_W [GeV]	80.399 ± 0.023	–	$80.384^{+0.014}_{-0.015}$	$80.370^{+0.008}_{-0.010}$	$80.365^{+0.009}_{-0.026}$
Γ_W [GeV]	2.098 ± 0.048	–	2.092 ± 0.001	2.091 ± 0.001	2.092 ± 0.001
$\overline{m}_c$ [GeV]	1.25 ± 0.09	yes	1.25 ± 0.09	1.25 ± 0.09	–
$\overline{m}_b$ [GeV]	4.20 ± 0.07	yes	4.20 ± 0.07	4.20 ± 0.07	–
m_t [GeV]	173.1 ± 1.3	yes	173.2 ± 1.2	173.6 ± 1.2	$177.9^{+11.2}_{-3.5}$
$\Delta\alpha^{(5)}_{\rm had}(M_Z^2)$ $^{(\dagger\triangle)}$	2769 ± 22	yes	2772 ± 22	2764 ± 22	2733^{+57}_{-46}
$\alpha_s(M_Z^2)$	–	yes	$0.1192^{+0.0028}_{-0.0027}$	0.1193 ± 0.0028	0.1193 ± 0.0028
$\delta_{\rm th} M_W$ [MeV]	$[-4, 4]_{\rm theo}$	yes	4	4	–
$\delta_{\rm th} \sin^2\theta^\ell_{\rm eff}$ $^{(\dagger)}$	$[-4.7, 4.7]_{\rm theo}$	yes	4.7	0.8	–
$\delta_{\rm th}\rho^f_Z$ $^{(\dagger)}$	$[-2, 2]_{\rm theo}$	yes	2	2	–
$\delta_{\rm th}\kappa^f_Z$ $^{(\dagger)}$	$[-2, 2]_{\rm theo}$	yes	2	2	–

Präzision

Theorie und Experiment

Parameter	Input value	Free in fit	Results from global EW fits: *Standard fit*	*Complete fit*	*Complete fit w/o exp. input in line*
M_Z [GeV]	91.1875 ± 0.0021	yes	91.1874 ± 0.0021	91.1877 ± 0.0021	$91.1974^{+0.0146}_{-0.0159}$
Γ_Z [GeV]	2.4952 ± 0.0023	–	2.4959 ± 0.0015	$2.4954^{+0.0016}_{-0.0013}$	$2.4954^{+0.0008}_{-0.0012}$
$\sigma^0_{\rm had}$ [nb]	41.540 ± 0.037	–	41.478 ± 0.014	41.472 ± 0.001	41.469 ± 0.015
R^0_ℓ	20.767 ± 0.025	–	20.742 ± 0.018	20.741 ± 0.018	20.718 ± 0.027
$A^{0,\ell}_{\rm FB}$	0.0171 ± 0.0010	–	0.01638 ± 0.0002	0.01624 ± 0.0002	0.01618 ± 0.0002
A_ℓ $^{(\star)}$	0.1499 ± 0.0018	–	0.1478 ± 0.0010	0.1472 ± 0.0009	–
A_c	0.670 ± 0.027	–	$0.6682^{+0.00045}_{-0.00044}$	$0.6679^{+0.00043}_{-0.00037}$	$0.6679^{+0.00044}_{-0.00034}$
A_b	0.923 ± 0.020	–	0.93469 ± 0.00009	$0.93464^{+0.00006}_{-0.00007}$	$0.93463^{+0.00006}_{-0.00007}$
$A^{0,c}_{\rm FB}$	0.0707 ± 0.0035	–	$0.0741^{+0.0006}_{-0.0005}$	0.0737 ± 0.0005	0.0738 ± 0.0005
$A^{0,b}_{\rm FB}$	0.0992 ± 0.0016	–	0.1[illegible]± 0.0007	0.1032 ± 0.0006	$0.1037^{+0.0004}_{-0.0005}$
R^0_c	0.1721 ± 0.0030		[illegible]0.00006	0.17226 ± 0.00006	0.17225 ± 0.00006
R^0_b	0.21629 ± 0.00066		[illegible]	0.21577 ± 0.00005	0.21577 ± 0.00005
$\sin^2\theta^\ell_{\rm eff}(Q_{\rm FB})$	0.2324 ± 0.0012		[illegible]	0.23151 ± 0.00011	$0.23148^{+0.00013}_{-0.00010}$
M_H [GeV] $^{(\circ)}$	Likelihood ratios	yes	82[illegible]$^{+75.2}_{-23.2[-41.5]}$	$119.1^{+13.4[+37.9]}_{-4.0[-4.9]}$	$82.8^{+30.2[+75.2]}_{-23.2[-41.5]}$
M_W [GeV]	80.399 ± 0.023	–	$80.384^{+0.014}_{-0.015}$	$80.370^{+0.008}_{-0.010}$	$80.365^{+0.009}_{-0.026}$
Γ_W [GeV]	2.098 ± 0.048	–	2.092 ± 0.001	2.091 ± 0.001	2.092 ± 0.001
$\overline{m}_c$ [GeV]	1.25 ± 0.09	yes	1.25 ± 0.09	1.25 ± 0.09	–
$\overline{m}_b$ [GeV]	4.20 ± 0.07	yes	4.20 ± 0.07	4.20 ± 0.07	–
m_t [GeV]	173.1 ± 1.3	yes	173.2 ± 1.2	173.6 ± 1.2	$177.9^{+11.2}_{-3.5}$
$\Delta\alpha^{(5)}_{\rm had}(M_Z^2)$ $^{(\dagger\triangle)}$	2769 ± 22	yes	2772 ± 22	2764 ± 22	2733^{+57}_{-46}
$\alpha_s(M_Z^2)$	–	yes	$0.1192^{+0.0028}_{-0.0027}$	0.1193 ± 0.0028	0.1193 ± 0.0028
$\delta_{\rm th} M_W$ [MeV]	$[-4,4]_{\rm theo}$	yes	4	4	–
$\delta_{\rm th}\sin^2\theta^\ell_{\rm eff}$ $^{(\dagger)}$	$[-4.7,4.7]_{\rm theo}$	yes	4.7	0.8	–
$\delta_{\rm th}\rho^f_Z$ $^{(\dagger)}$	$[-2,2]_{\rm theo}$	yes	2	2	–
$\delta_{\rm th}\kappa^f_Z$ $^{(\dagger)}$	$[-2,2]_{\rm theo}$	yes	2	2	–

Wenn das „Standardmodell“ recht hat,
liegt das Higgs zwischen 115 und 200 GeV

Allerdings wird das Higgs-Boson sehr selten
bei LHC Kollisionen erzeugt (1/100 Milliarden)

Nadel im Heuhaufen

1 aus 100 000 000 000

Anzahl der Sterne in der Milchstrasse ~ 10^{11}

… Heuhaufen

zu beachten: Simulation !!

… nochmals … was wäre wenn …

Grundzustandsenergie des Higgsfeldes

$$E_{vac} = \left(\sqrt{2}\, G_F\right)^{-1/2} = 246\,\mathrm{GeV}$$

wenn $\quad E_{vac} \to 2 \cdot E_{vac} \quad \Rightarrow \quad G_F \to \dfrac{G_F}{4}$

- Fusionsprozess in der Sonne änderte sich derart, dass
  - Sonne kleiner aber heller (höhere Temperatur)
  - Spektrum wäre ins UV verschoben

und schließlich … wozu die dritte Familie?

… wenn es nur zwei statt drei Familien gäbe …

δ ist verantwortlich für eine Brechung der Teilchen-Antiteilchensymmetrie

Materie ↔ Antimaterie

Asymmetrie

$$\begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} \\ V_{cd} & V_{cs} \end{pmatrix}$$

enthält komplexe Phase δ

ist reell, keine Phase

t = 0

t = heute

Symmetrie zwischen
Materie und Antimaterie

nur Materie

Symmetriebrechung
Materie - Antimaterie
ALICE
LHCb

Schwerionen im LHC

Dichte >> Dichte (Atomkern)
extreme Materieform

Plasma …
… aus Quarks und Gluonen

Antimaterie
0% !!

… fundamentale Fragen bleiben

- Werden die elementaren Kräfte bei hohen Energien/kleinen Abständen gleich stark ?
- Warum ist die Gravitation so schwach?
- Gibt es mehr als drei Raumdimensionen?
- Gibt es eine übergeordnete Symmetrie?
- Gibt es ein Teilchen, welches das Rätsel der Dunklen Materie erklärt?
- Warum ist das Higgs-Boson so „leicht“?

- Warum ist der Energie-/Zeitabstand zwischen der elektroschwachen Vereinigung (200 GeV) und der Vereinigung aller Kräfte (10^{19} GeV) so groß?
- Können wir das Rätsel, warum es praktisch nur Materie im Universum gibt, ganz und nicht nur ansatzweise verstehen? und weitere

Supersymmetrie (SUSY)

Symmetrie
zwischen Materieteilchen (Fermionen) und "Kraft"-Teilchen (Bosonen)

- SUSY löst einige wichtige Probleme und Fragen der Teilchenphysik

Unsere Welt

Eine neue Welt?

- Aber … SUSY Teilchen müssen schwer sein !

- Das leichteste SUSY – Teilchen kann nicht zerfallen → Kandidat für Dunkle Materie

SUSY Phänomene am LHC

LSP wechselwirkt extrem schwach und entkommt ohne Nachweis dem Detektor. Es fehlt Energie !

Dunkle Materie ist da (25%) !

Dunkle und leuchtende Materie sind messbare Gravitationslinsen für Lichtstrahlen entfernter Objekte.

Könnte sie aus LSP Teilchen bestehen?

Schwache Gravitation … entweicht ihre Stärke in extra Dimensionen?

Inspiriert von der Stringtheorie

Gibt es weitere – kompaktifizierte – Dimensionen, die wir nur nicht merken?

(Elementarteilchen)welt spürt vier, nur die Gravitation spürt alle Dimensionen und dehnt sich daher schwächer aus?

… besonders aufregend!

Fehlende Energie !!

Grund ….

Messfehler ?

Supersymmetrie ?

Extra Dimensionen?

Sonstiges?

Bis jetzt nur eine Simulation …

Das Schema der Elementarteilchen, ihre Massen und Wechselwirkungen miteinander sind wesentlich, um zu verstehen, warum die Welt so ist wie sie ist.

Fundamentale Fragen, die mit den Elementarteilchen und damit mit der Dynamik der Entstehung unserer Welt zusammenhängen, werden mit Experimenten an Beschleunigern angegangen.

Der LHC schiebt die Grenze der Sensitivität um eine Größenordnung weiter.

Als Wissenschaftler darf man „vorsichtige“ Hoffnung haben, dass man am LHC (zwar nicht sofort aber nach präzisen Messungen) etwas wirklich Neues findet.

S. Dali

„Was wir wissen, ist ein Tropfen; was wir nicht wissen, ein Ozean.“

Isaac Newton (1643 –1727)