



CERN

European Organization for Nuclear Research

Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire

Vom Quark zum Kosmos

Der Urknall im Labor

Th. Naumann
Deutsches Elektronen-Synchrotron
DESY



CERN

European Organization for Nuclear Research

Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire

Das größte Teilchenphysik- Labor der Welt

bei Genf



Das größte Experiment der Menschheit

Large Hadron Collider

LHC



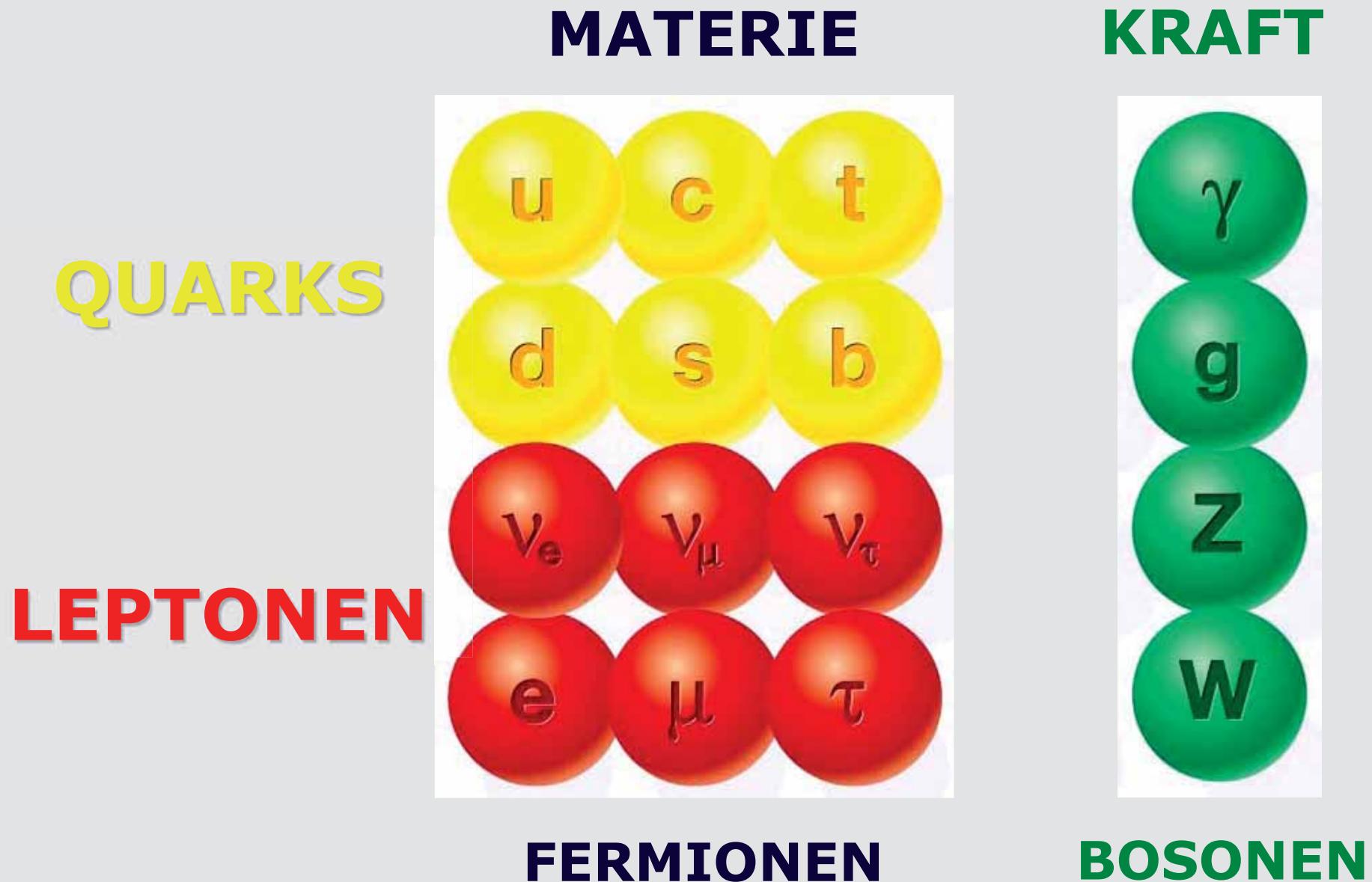
Die Fragen

Die Maschine

Die Experimente

Erste Resultate

Die Bausteine der Welt

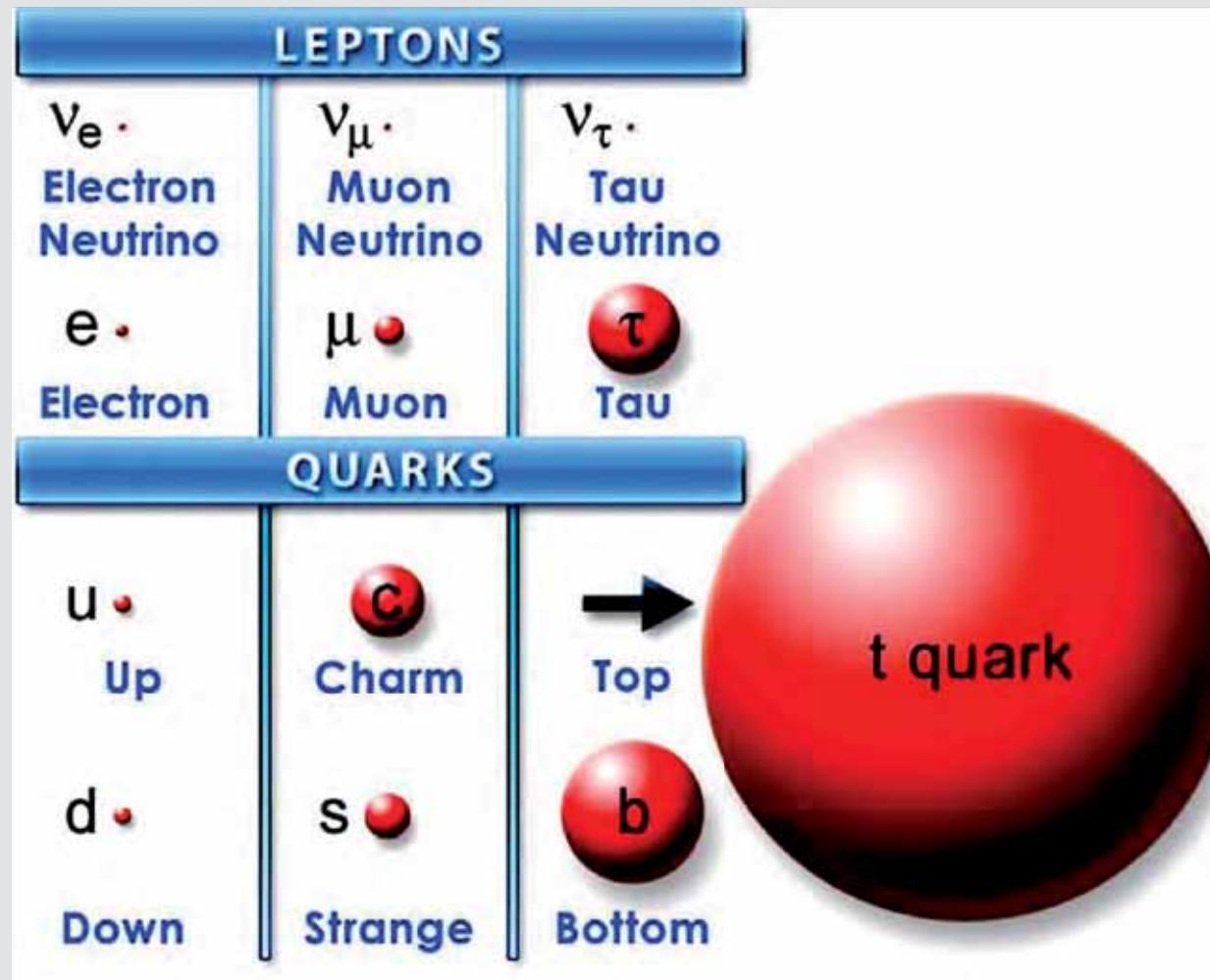


Vereinigung der Kräfte



Der Higgs- Mechanismus

Masse & Materie



Was ist der
Ursprung
der Masse?

Was
fixiert
diese
Massen?

Das Higgs-Boson



**Eine Party –
der Raum ist
voller Menschen,
dem Higgsfeld.**

Das Higgs-Boson



Einstein kommt herein
und zieht viele
Bewunderer an.

Das behindert seine Bewegung:
Er erhält eine Masse -
wie ein Teilchen, das sich
im Higgsfeld bewegt.



Higgs-Mechanismus

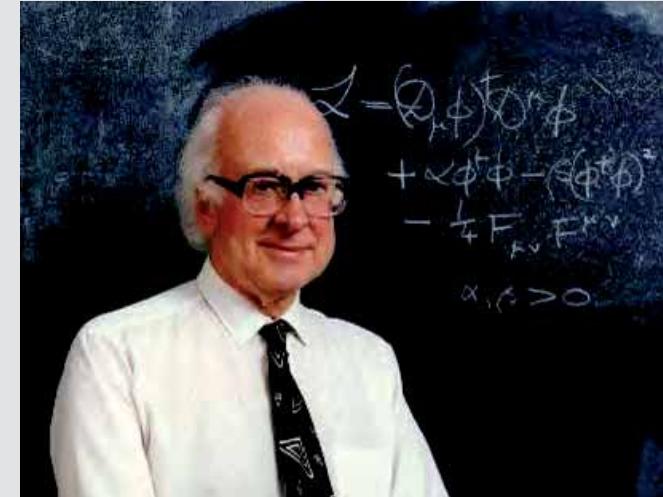
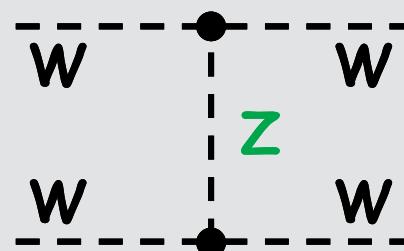
Eichtheorien:

- **Fermionen:** eichinvariant
(Masse + Wechselwirkung)
- **Bosonen:** Photon + Gluon masselos,
aber schwache Eichbosonen massiv

- **Boson Massenterm eichverletzend :**

$$m^2 A'_\mu A'^\mu = m^2 (A_\mu A^\mu + \dots)$$

- $W_L^+ W_L^-$ Streuung verletzt Unitarität
oberhalb 1 TeV, also am LHC



Peter W. Higgs , 1964:

Broken Symmetries,
Massless Particles
and Gauge Fields
[Physics Letters 12 132](#)

aber auch:

Nambu  Nobel 2008
Goldstone,
Brout, Englert, Kibble

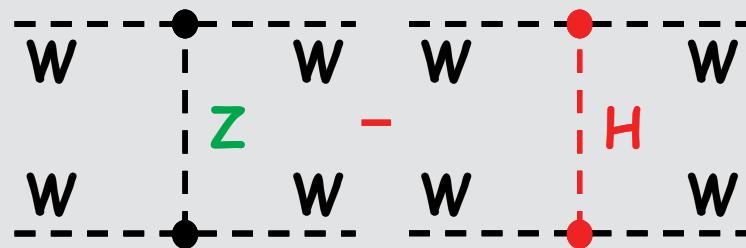
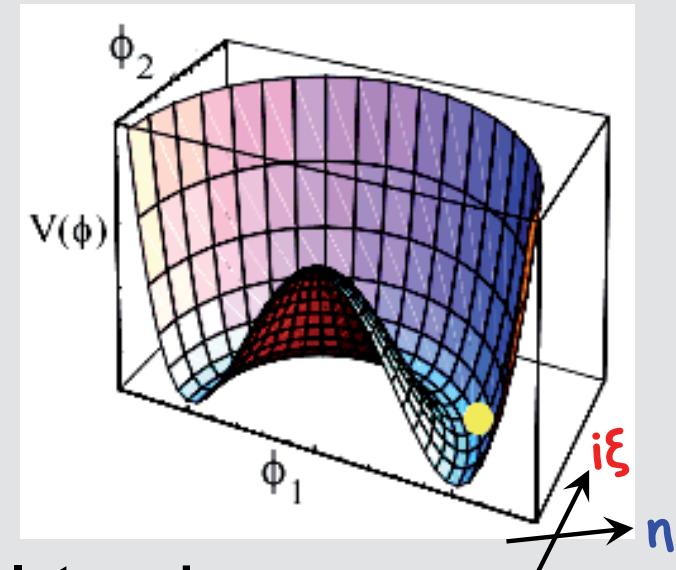
Higgs-Trick

neues skalares komplexes Higgsfeld Φ

lokale Eichtransformation

mit unphysikal. Rotationsfreiheitsgrad ξ

im **Boson-Massenterm $A_\mu A^\mu$** **kürzen** sich eichverletzende
longitudinale Polarisation mit unphysikal. Komponenten des Higgs-Potentials !



wie elm. Lorentz + Coulomb Eichung: Photon-Masse + long. Polar. weggeeicht

neues skalares Higgsfeld macht Standard-Modell konsistent + auf $10^{-4...5}$ genau

Schlußstein der Theorie - Suche am LHC!

Super- Symmetrie

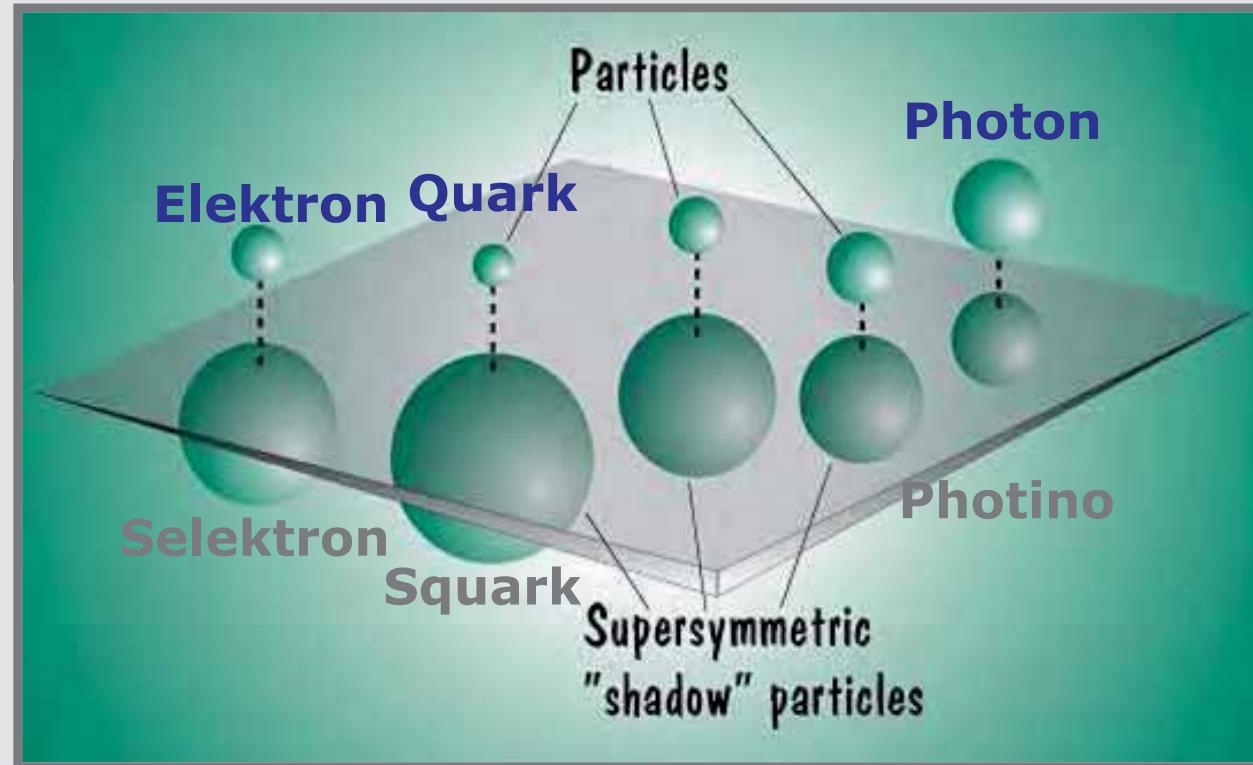
Super-Symmetrie

Fermion

Boson

Boson

Fermion



Super - Symmetrie

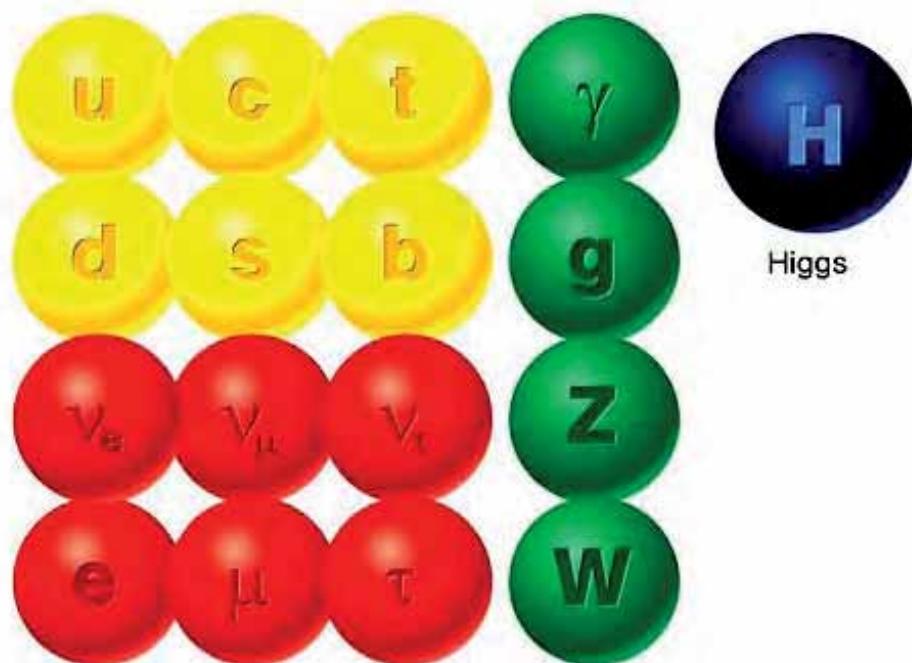
Spiegelwelt

vereinigt

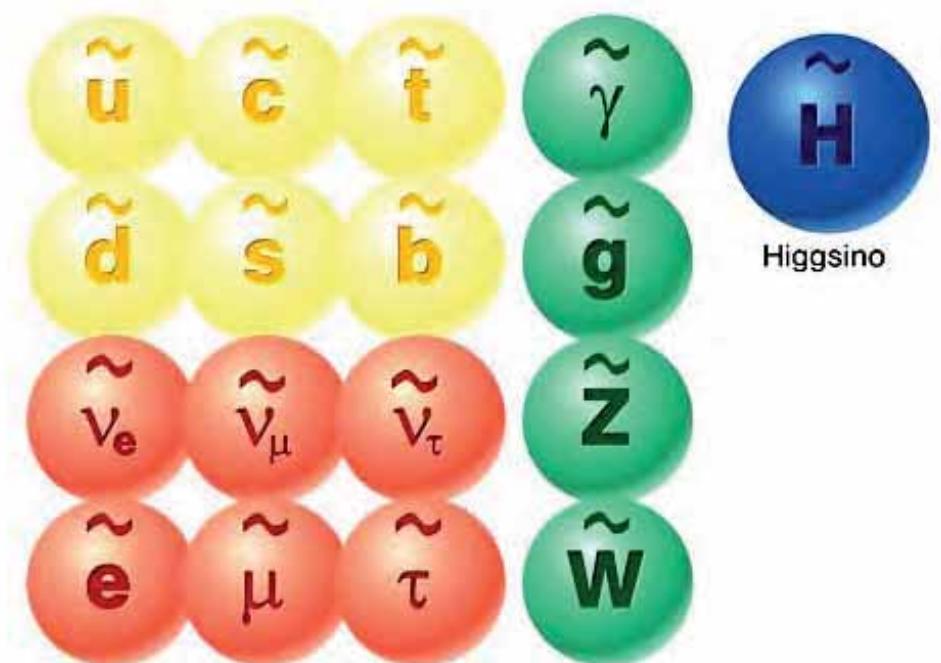
Bosonen mit Fermionen
Kraft mit Materie

Super-Symmetrie

Standard-Teilchen

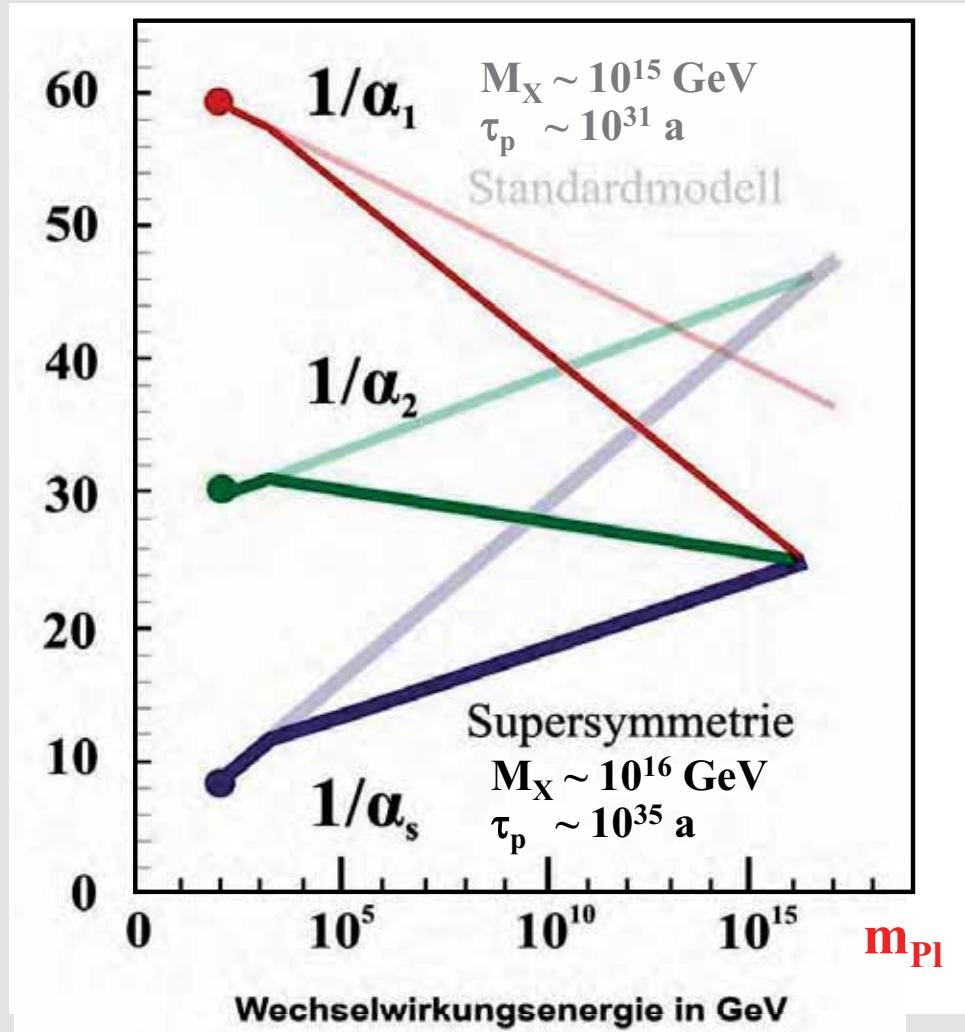


SUSY-Teilchen

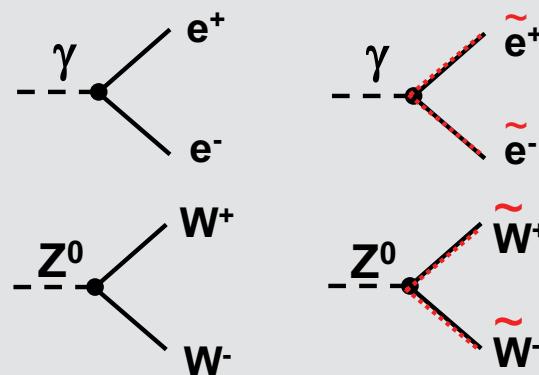


Supersymmetrie

vereint Kräfte und Kopplungen



- SUSY fügt neue Prozesse hinzu:
- ändern Energieabhängigkeit der Kopplungen
- ein Vereinigungs-Punkt bei $M_X \sim 2 \cdot 10^{16} \text{ GeV} !$
- rettet Große Vereinigung:
Proton-Lebensdauer > exptl. Limit



Selektron

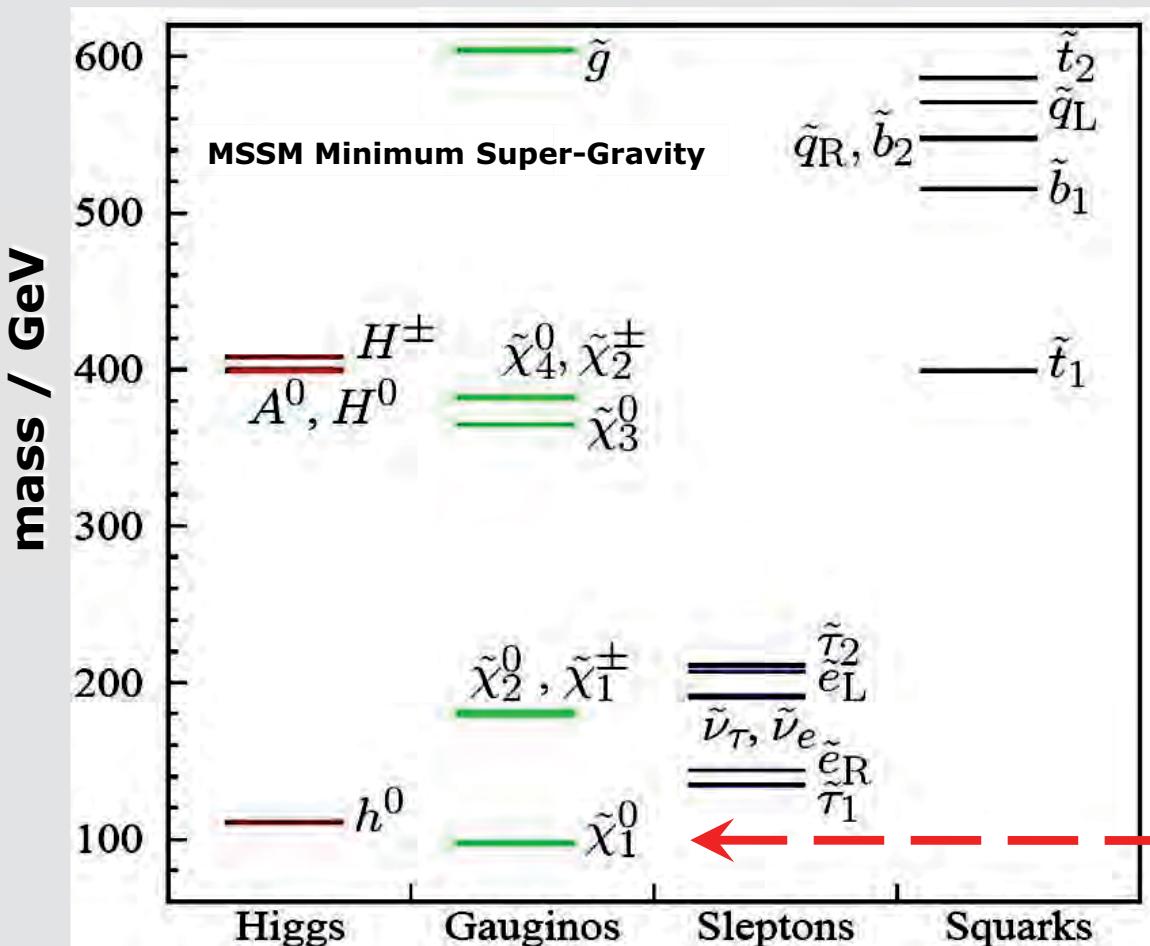
>100.000 mal
Elektron-Masse

wer
bricht
SUSY ?

Elektron



SUSY Massenspektrum



sparticle	mass limit
slepton	$\gtrsim 80$ GeV
sneutrino	$\gtrsim 40$ GeV
neutralino	$\gtrsim 46$ GeV
higgsino	$\gtrsim 100$ GeV
gluino	$\gtrsim 300$ GeV
squarks	$\gtrsim 380$ GeV

leichteste neutrale SUSY
Teilchen mischen -

Neutralino

=
Higgsino+Photino+Zino

Kandidat für

Dunkle Materie !

Suche am

LHC !

Die Dunklen Seiten des Universums

Inventar des Kosmos



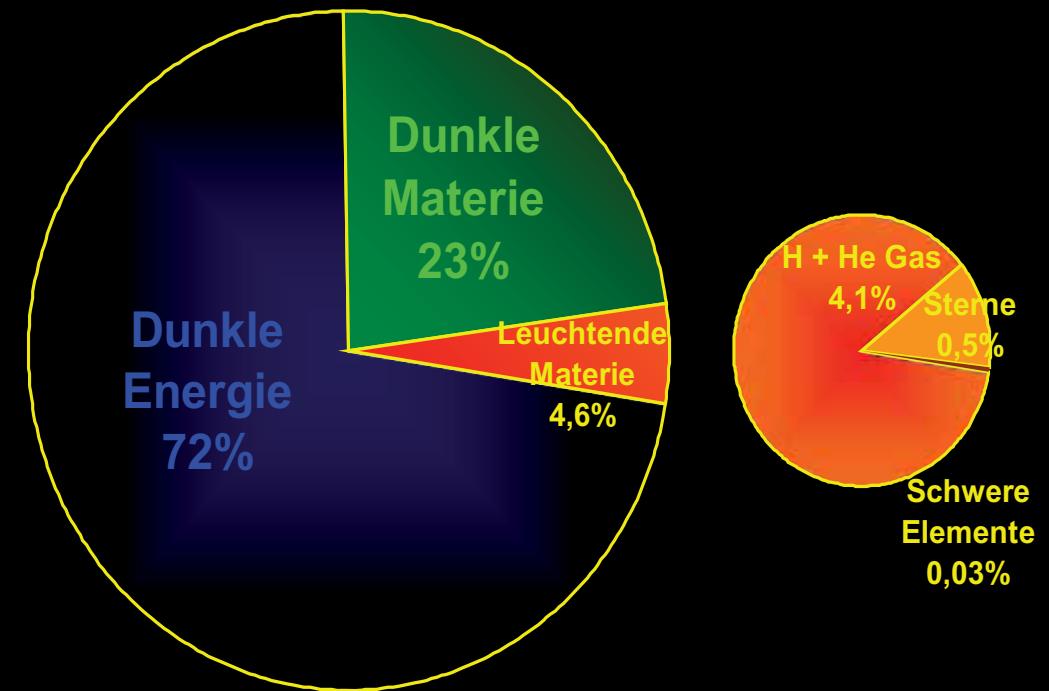
Supernovae Ia:
beschleunigte Expansion –
Was ist **Dunkle Energie**:

- Einsteins **kosmolog. Konstante Λ** ?
- skalares Feld? (s. Higgs)
- Quintessenz ?

Fundamentale skalare Felder in der Physik?

Bewegung in und von Galaxien,
Gravitationslinsen:

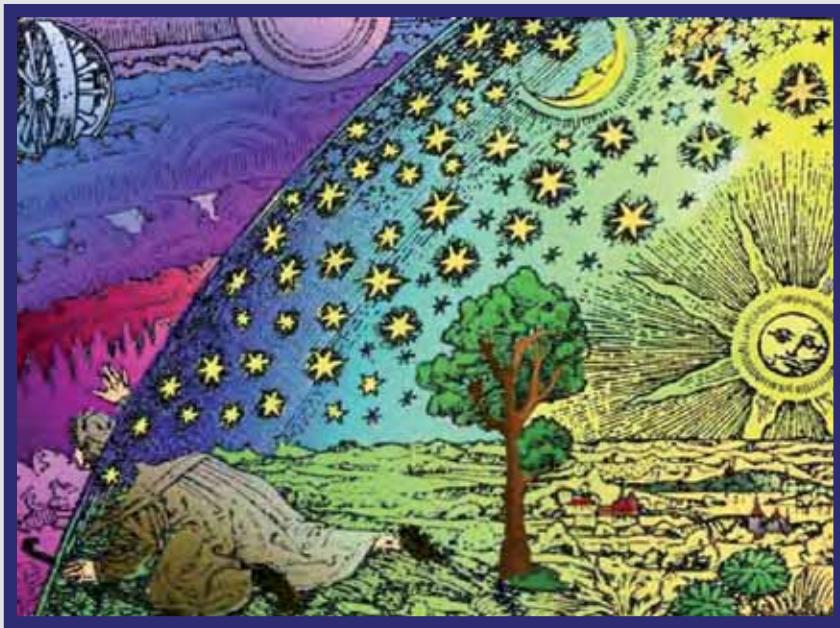
- **Dunkle Materie** rettet Newtons Gesetz
- versteckte Spiegelwelt von
Weakly Interacting Massive
Supersymmetric Particles
- bilden ein Halo von 90% der galakt. Materie



Extra Dimensionen

Ist die Welt

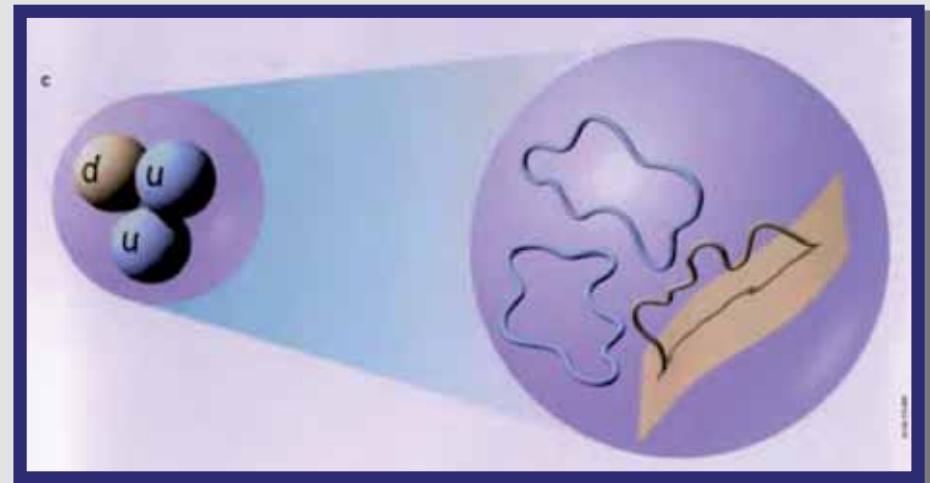
2-dimensional ...



3-dimensional ...

10-dimensional ?

Nur unsere **3 Dimensionen**
expandierten nach dem Urknall.
Weitere **6 blieben kompakt.**



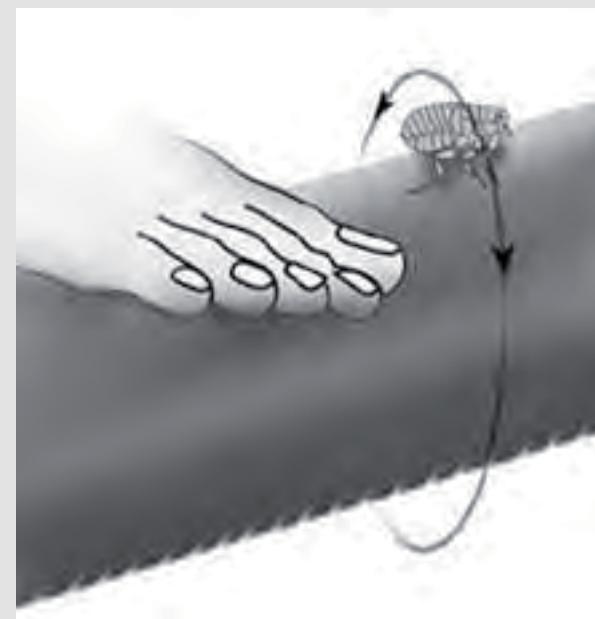
Elementarteilchen =
String-Anregungen ?

Stringradius:
Planck-Länge = 10^{-35} m
am LHC erreichbar?

Extra Dimensionen

Akrobat und Fliege auf einem Seil:

Der Akrobat kann sich nur längs des Seils bewegen.
Die Fliege jedoch kann um das Seil herum kriechen.



Extra Dimensionen



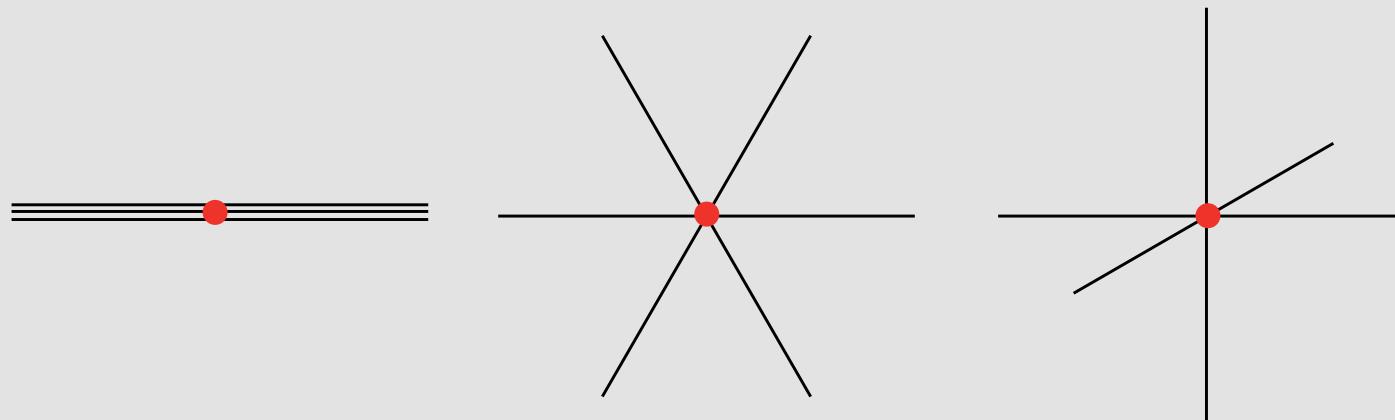
**Ein kleiner Magnet:
stärker als
die Schwerkraft
der ganzen
Erde!**



Warum ?

Extra Dimensionen: Gaußsches Gesetz

Quelle mit der Stärke von $e=6$ Kraftlinien
in n Dimensionen (elektrisch, gravitativ, ...)



Extra
Dimensionen:
Kraft fällt
schneller
mit Abstand

$$n = 1$$

$$\text{Kraft} \sim e/r^0$$

$$2$$

$$e/r^1$$

$$3$$

$$e/r^2$$

$$3+N$$

$$e/r^{2+N}$$

Extra Dimensionen

Arkani-Hamed, Dimopoulos, Dvali, 1998,99

- elm., starke + schwache Kraft wirken in (3+1) Brane

- nur Gravitation wirkt in N extra Dimensionen

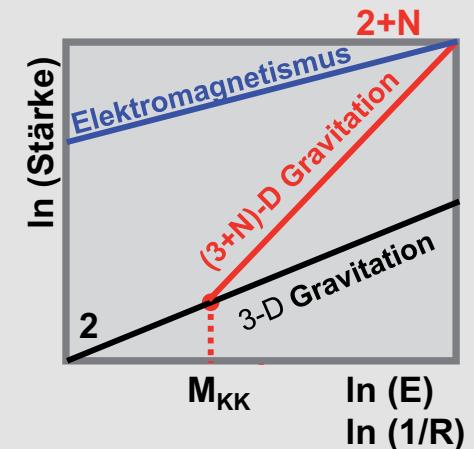
- kompaktifiziert mit Radius R
 - Modifikation von Newtons Gesetz:

$$F \sim G_N / r^2 \sim 1 / M_{\text{Pl}}^2 r^2 \sim 1 / M_{\text{KK}}^{2+N} r^{2+N}$$

- G_N , M_{Pl} ... nur effektive Konstanten
 - R , M_{KK} ... neue, fundamentale Planck-Länge, -Masse

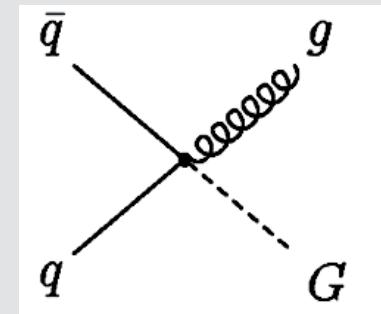
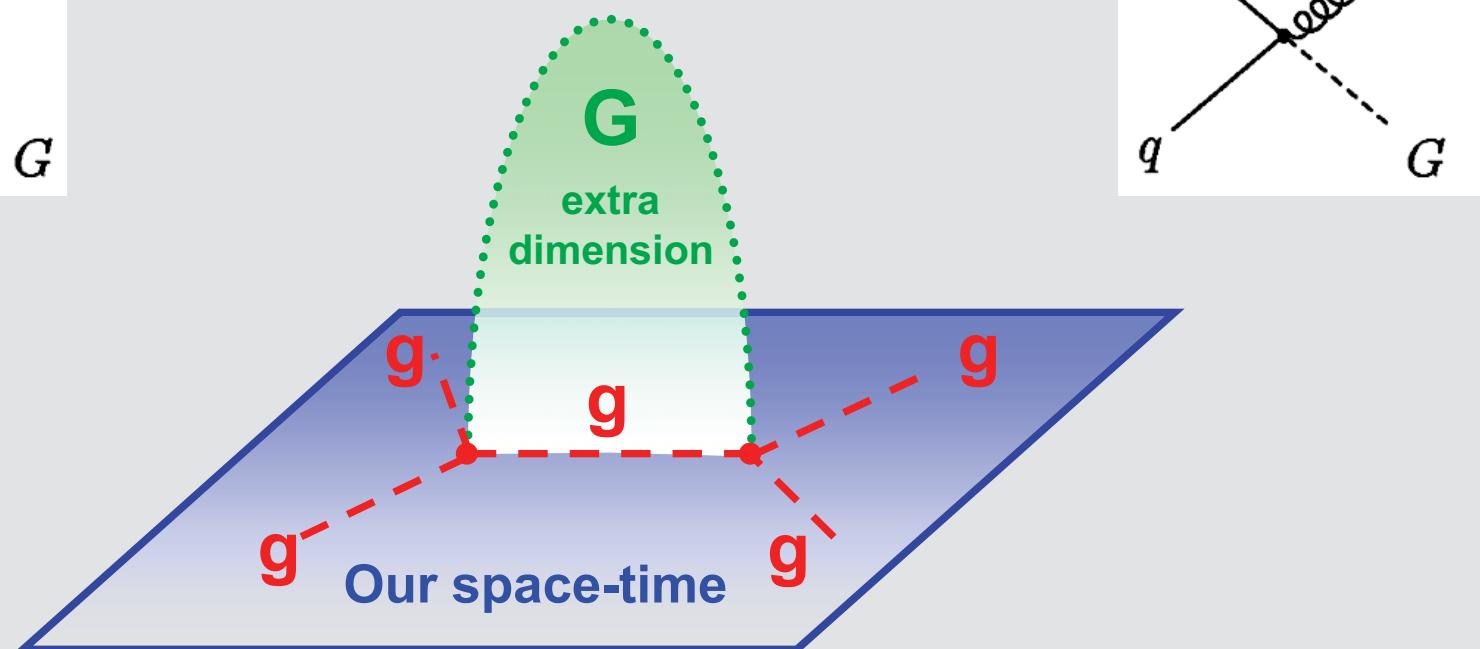
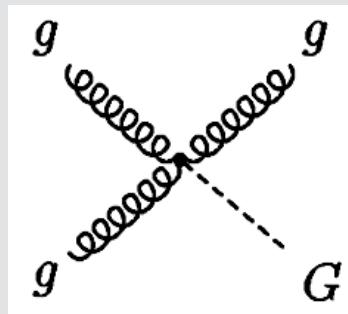
$$M_{\text{Pl}}^2 \sim G_N^{-1} \sim (10^{19} \text{ GeV})^2 \sim R^N M_{\text{KK}}^{N+2}$$

- Annahme: Gravitation wird stark bereits auf elektroschwacher Skala: $M_{\text{KK}} = 1 \text{ TeV}$. Für $N=7$ ist R einige fm.



Extra Dimensionen

Wenn **Gravitation** in Extra Dimensionen wirkt,
wird sie am LHC stark.



Energie entweicht in Extra Dimensionen.
Reaktionsraten wachsen.

Urknall im Labor

Gibt es
Extra
Dimensionen?

Ist die Natur
super-
symmetrisch?

Was ist der
Ursprung
der Masse?

Was sind
Dunkle Materie +
Dunkle Energie?



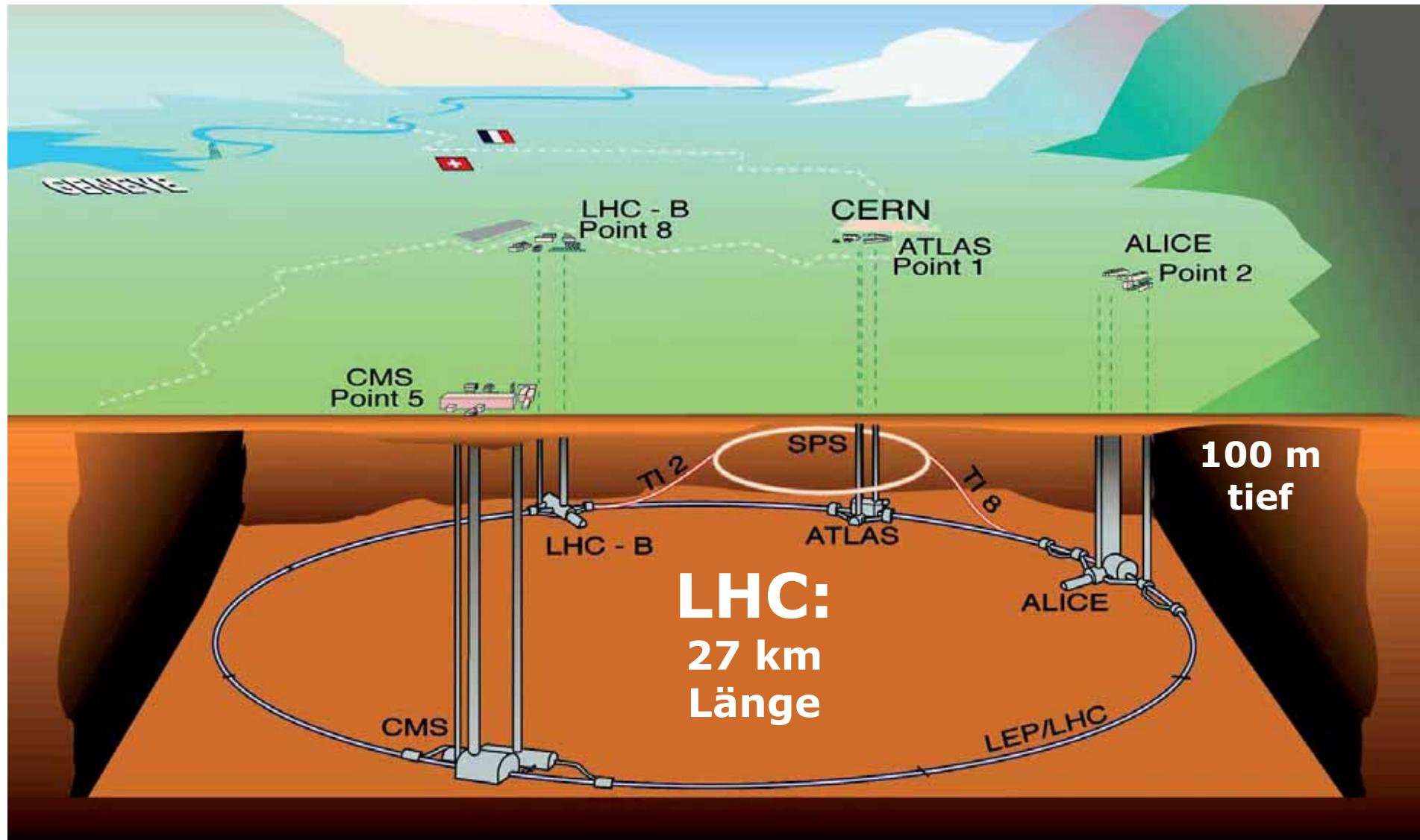
A satellite view of Earth, showing clouds and landmasses. The image is centered on the Northern Hemisphere, with the Atlantic Ocean and Europe visible. The text "LHC zoom" is overlaid on the image.

LHC
zoom



LHC

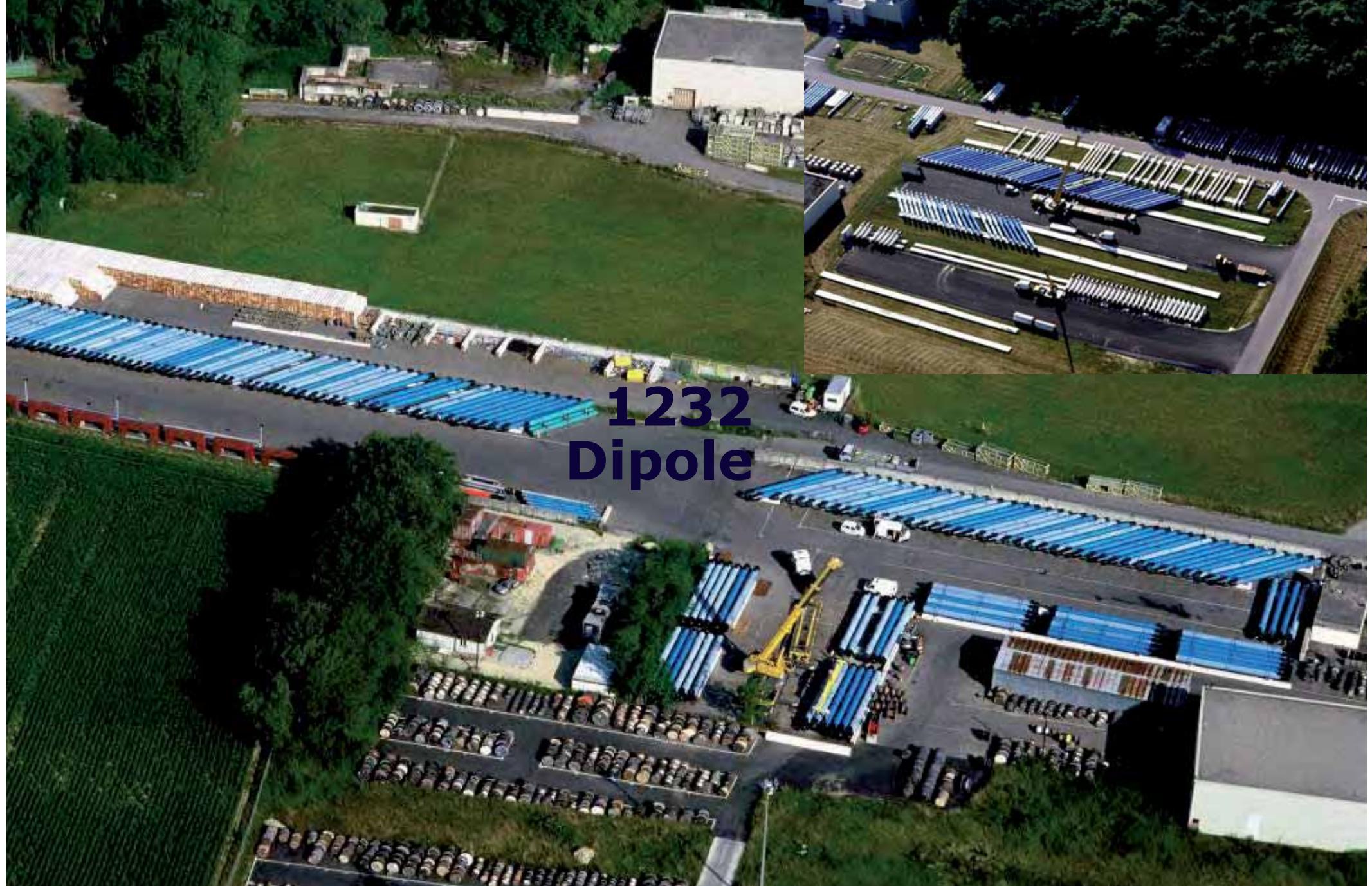
Protonen werden auf 7 TeV beschleunigt



und kollidieren in 4 Experimenten.



LHC – der Bau



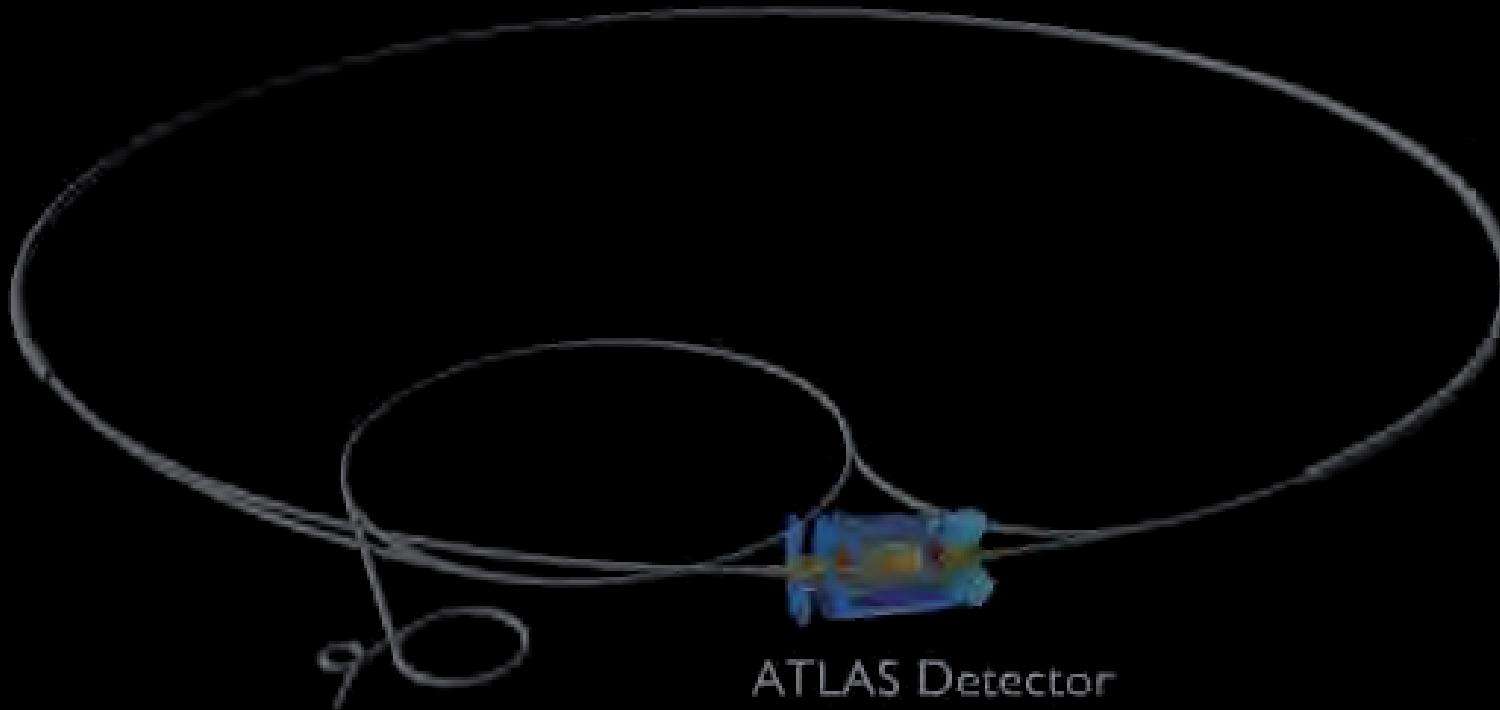




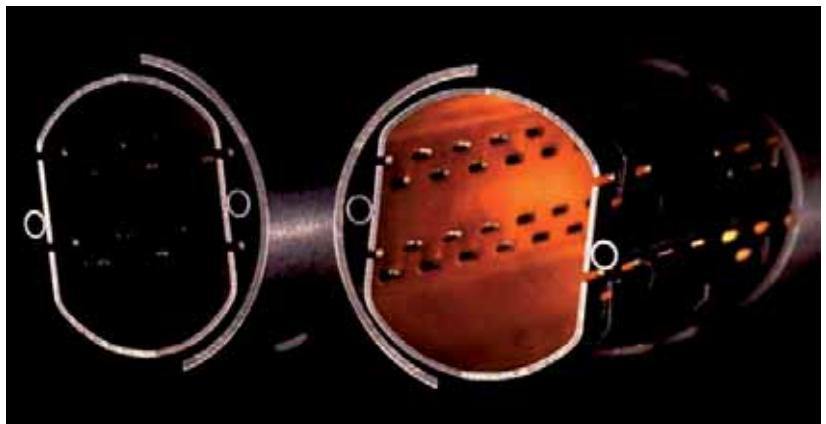
2808 Pakete mit je 10^{11} Protonen umrunden den Ring 11 245 mal pro Sekunde.
Die Pakete kollidieren 40 Millionen mal/s, die Protonen bis zu 1 Milliarde mal/s.

PLAY▶

Large Hadron Collider



Leerer und kälter als der Weltraum !



Der Druck in den Strahlrohren von 10^{-10} Torr ist ca. 10 Mal niedriger als auf dem Mond.

Das Vakuum von 9.000 m^3 hat das Volumen einer Kathedrale.



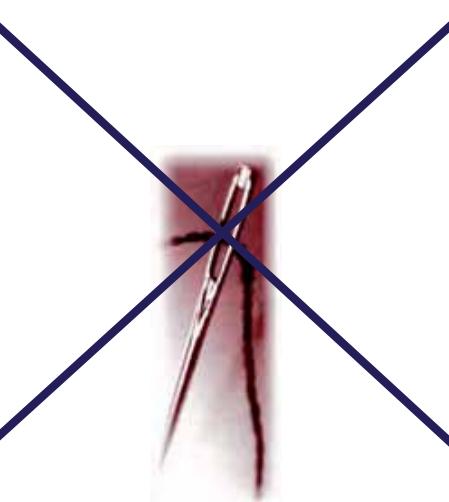
Mit einer Temperatur von 1.9 K ist der LHC kälter als der Weltraum mit 2.7 K.

10.000 t Stickstoff und 130 t Helium kühlen 37.000 t Material.

Gesamtenergie der Protonstrahlen: 2x350 MJ 240 Elefanten auf Kollisionskurs



120 Elefanten mit 40 km/h

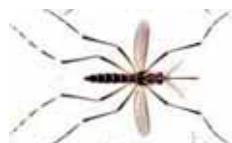


Nadelöhr:
0.3 mm Durchmesser



120 Elefanten mit 40 km/h

Protonstrahlen am Kollisionspunkt:
0.03 mm Durchmesser



Energie eines Protons
entspricht der einer
Mücke im Flug (1 µJ)





LHC: Maschine der Superlative

- **CMS Magnet:**

größter supraleitender Magnet der Welt !

6x12 m, 19 kA, **4T**:

gespeicherte Energie: 2.6 GJ , schmilzt 4 t Kupfer!



- **LHC Magnete:**

größtes supraflüssiges Kryosystem der Welt !

1232 Dipole: 15 m lang, 30 t

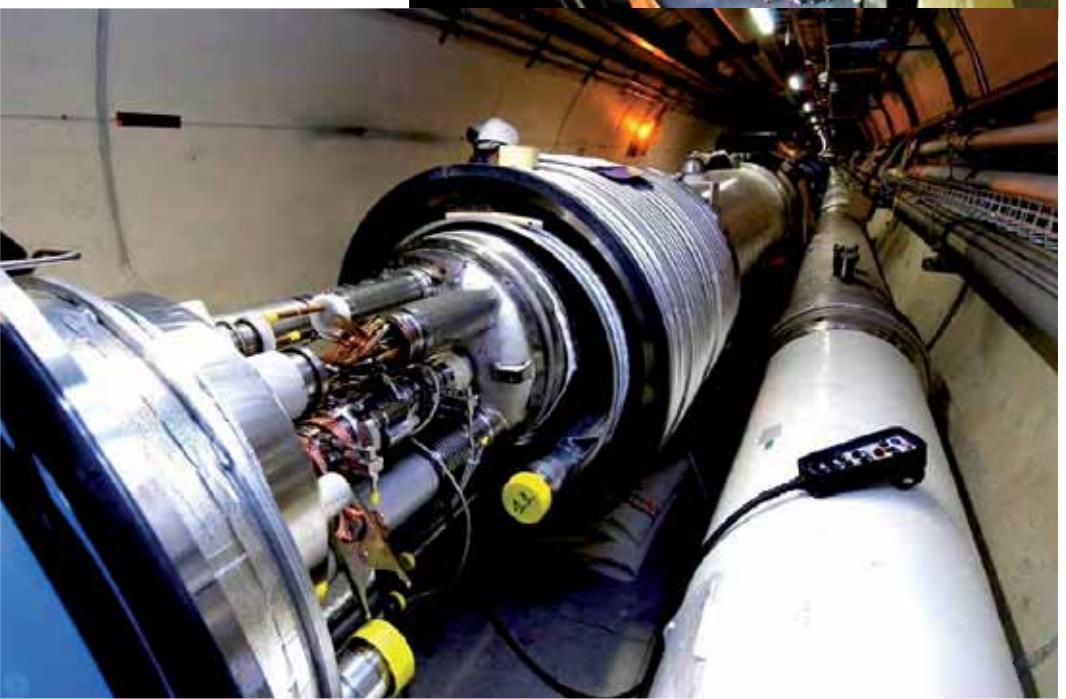
130 t He @ 1.8 K, **8.4 T**

supraflüssig: hohe thermische Leitfähigkeit

Energie: **10 GJ**

= Airbus A380 = 560 t @ 700 km/h

schmilzt 15 t Kupfer!



- **LHC Strahl:** makroskopische Energie:

$E_p = 7 \text{ TeV} = E_{\text{kin}}$ einer Mücke

$3 \cdot 10^{14} p = \text{0.5 A @ 7 TeV}$:

$E = 362 \text{ MJ}$

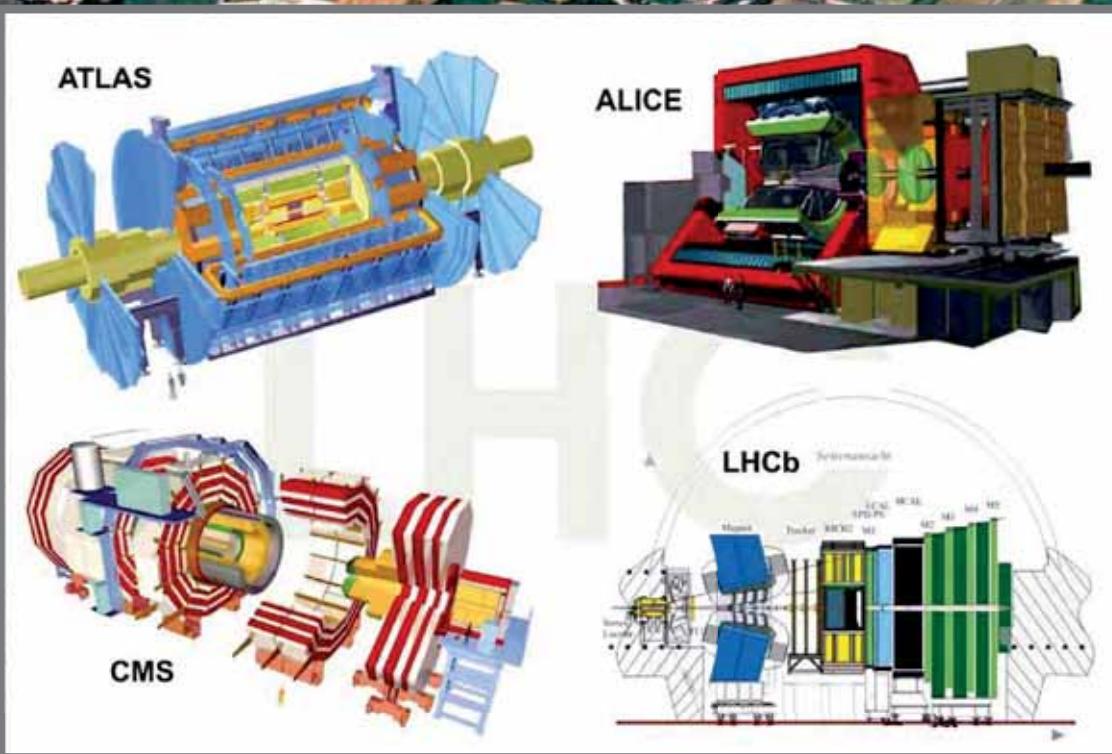
= 400 t Lok @ 150 km/h

schmilzt 0.5 t Cu / beam

25 μm Durchmesser



LHC



Experimente

Experimente

ATLAS

2.900 Physiker

174 Institutionen

38 Staaten



Kathedralen der Physik



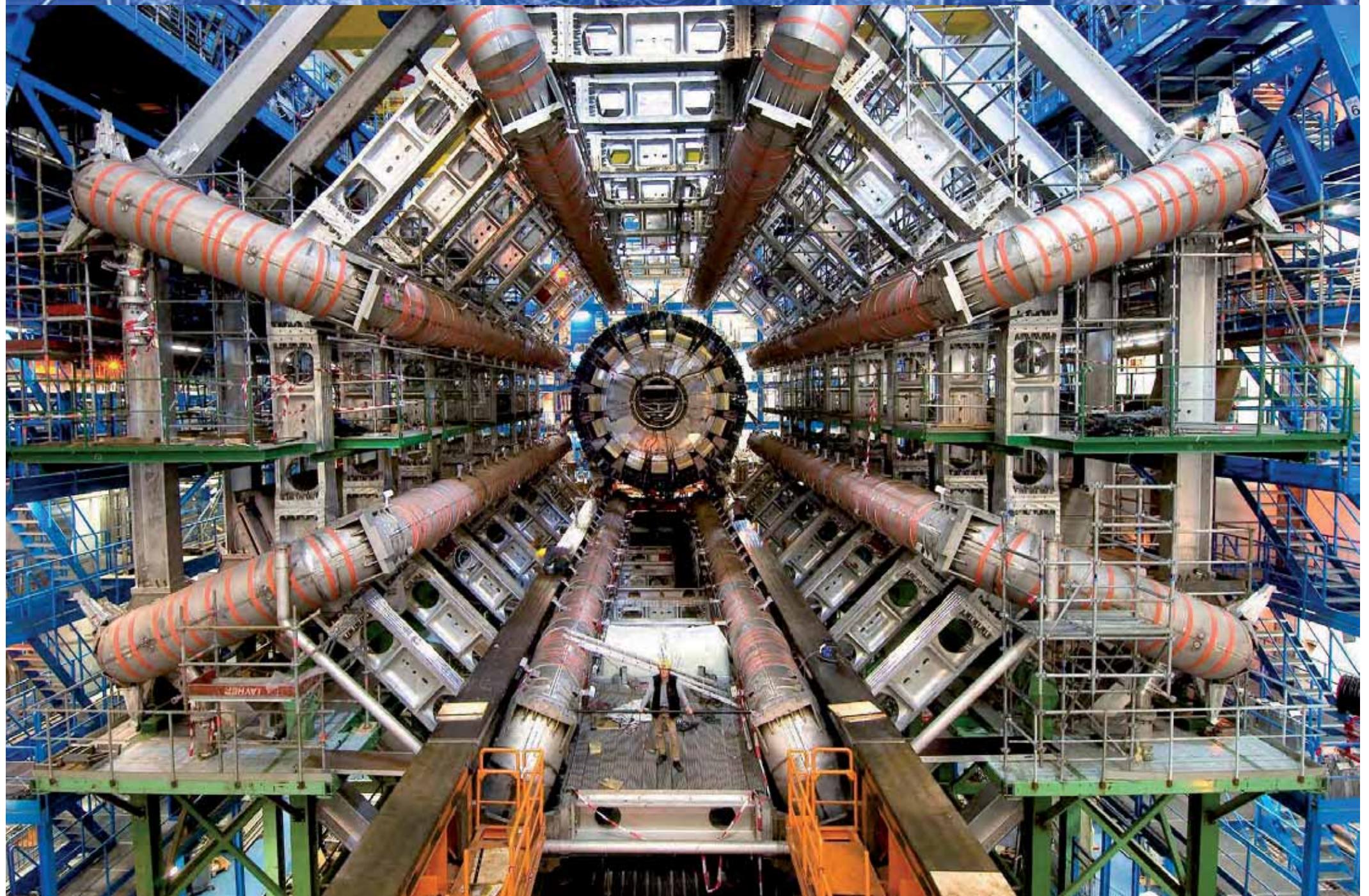


ATLAS





ATLAS Magnet



ATLAS

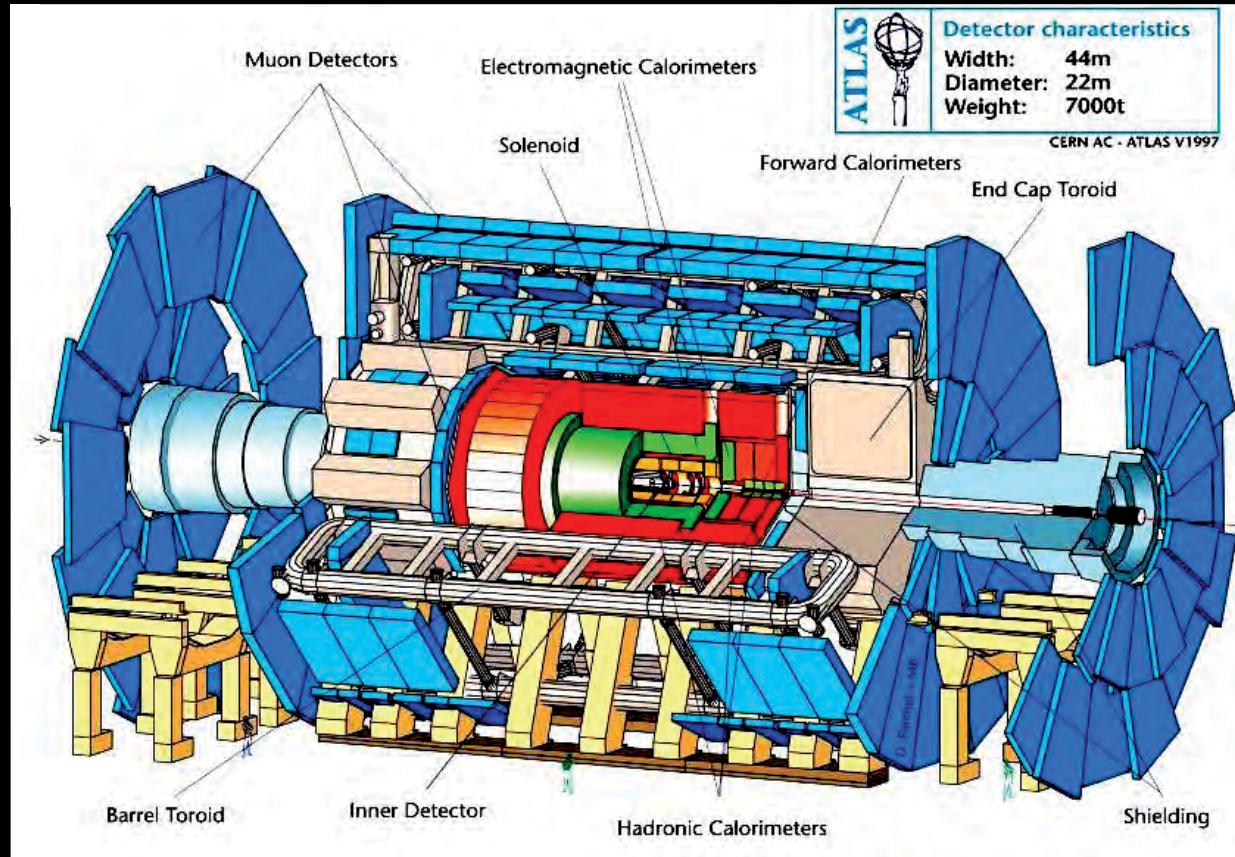


Vorwärts-Muon-Kammern

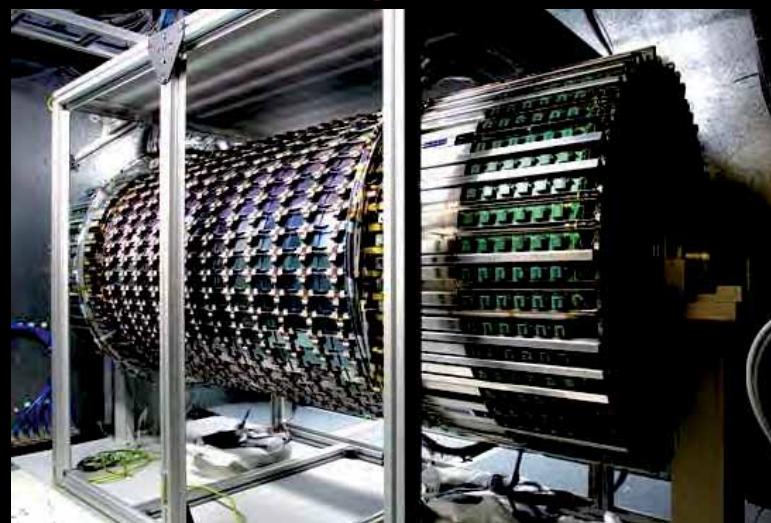


Flüssig-Argon-Kalorimeter

83 m³ flüssiges Ar

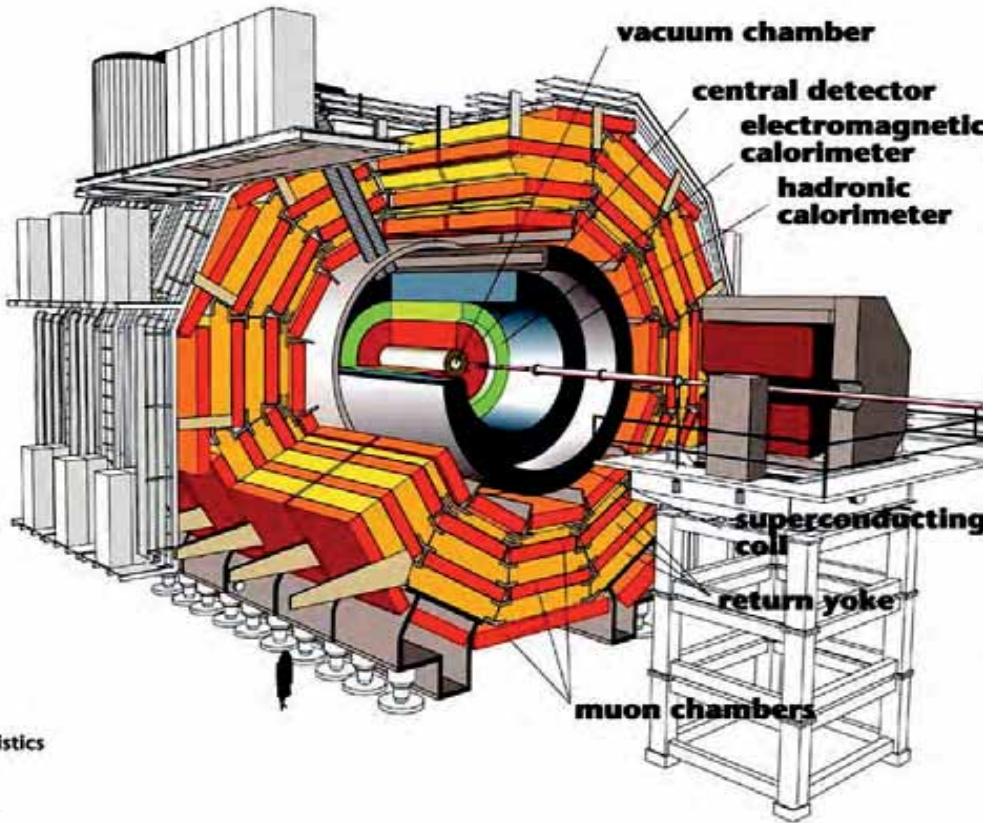


Silizium-Spurdetektor



~100 Millionen Kanäle >100 m²

CMS



Detector characteristics

Width: 22m
Diameter: 15m
Weight: 14'500t

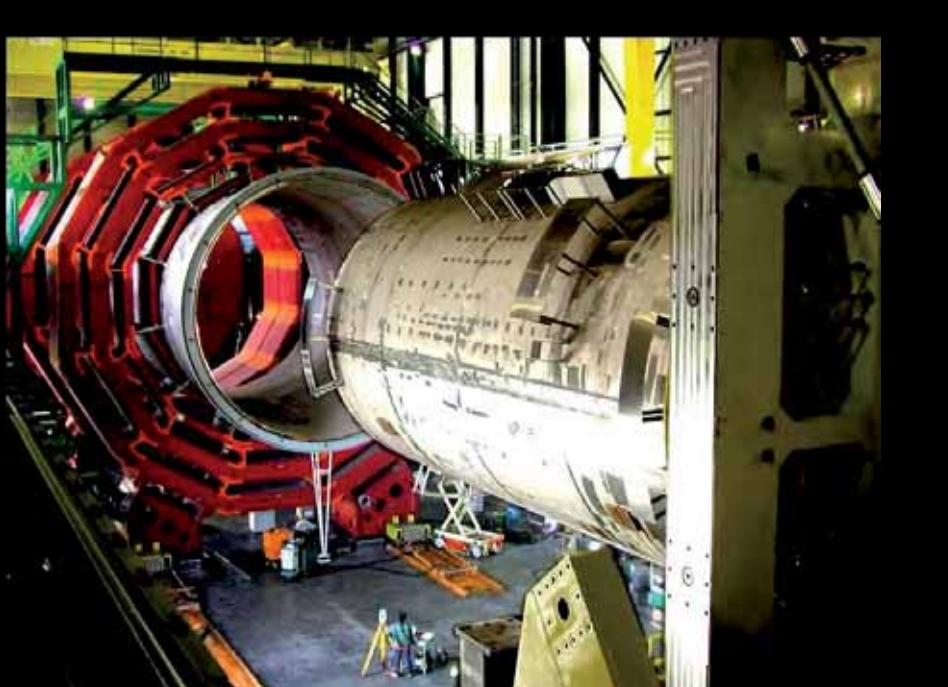
SC Magnet

6x12 m
20 kA

4 T

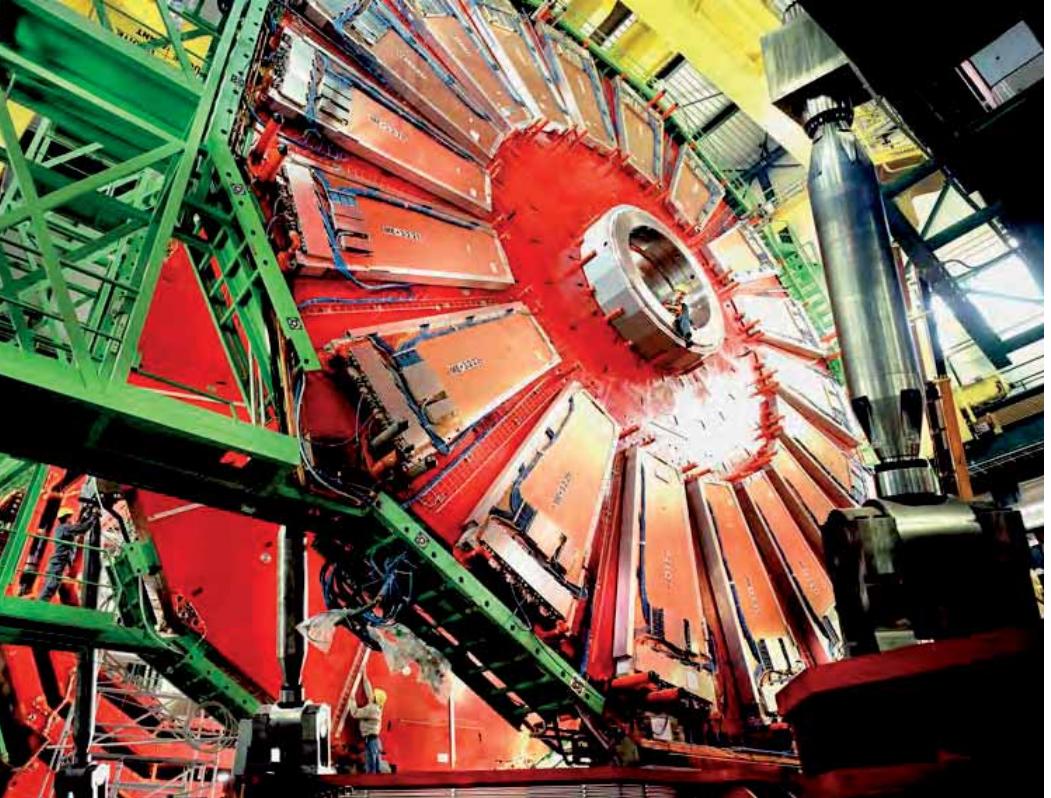
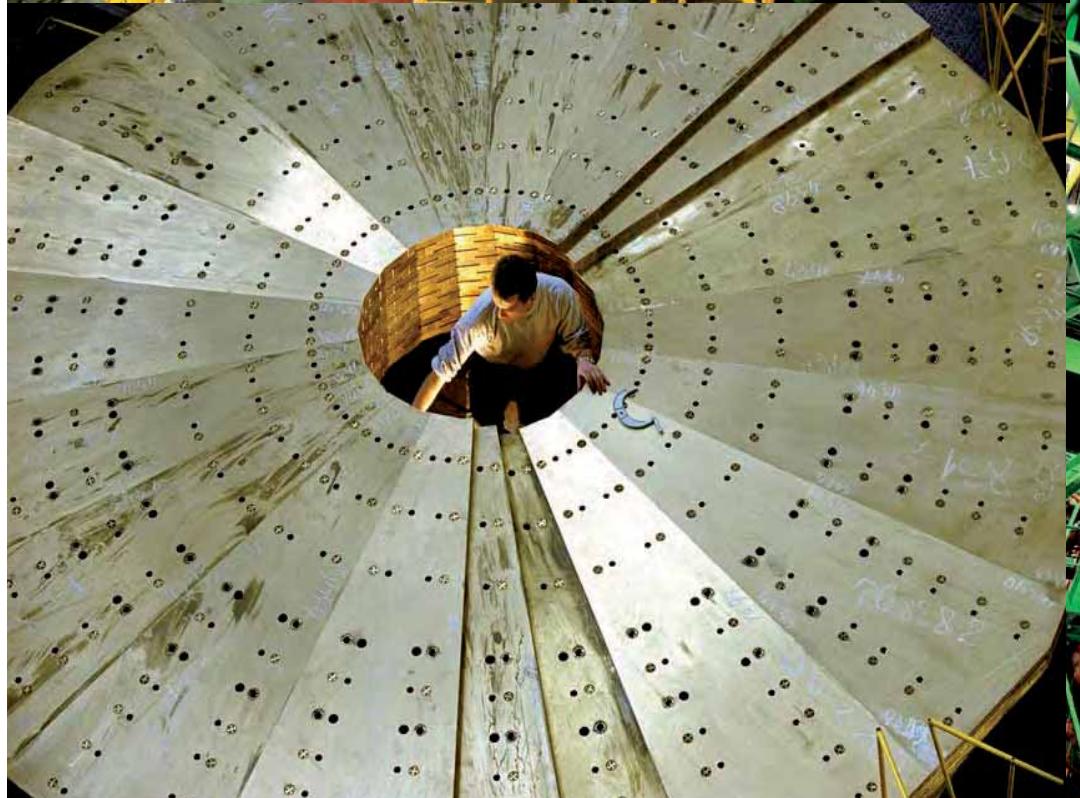
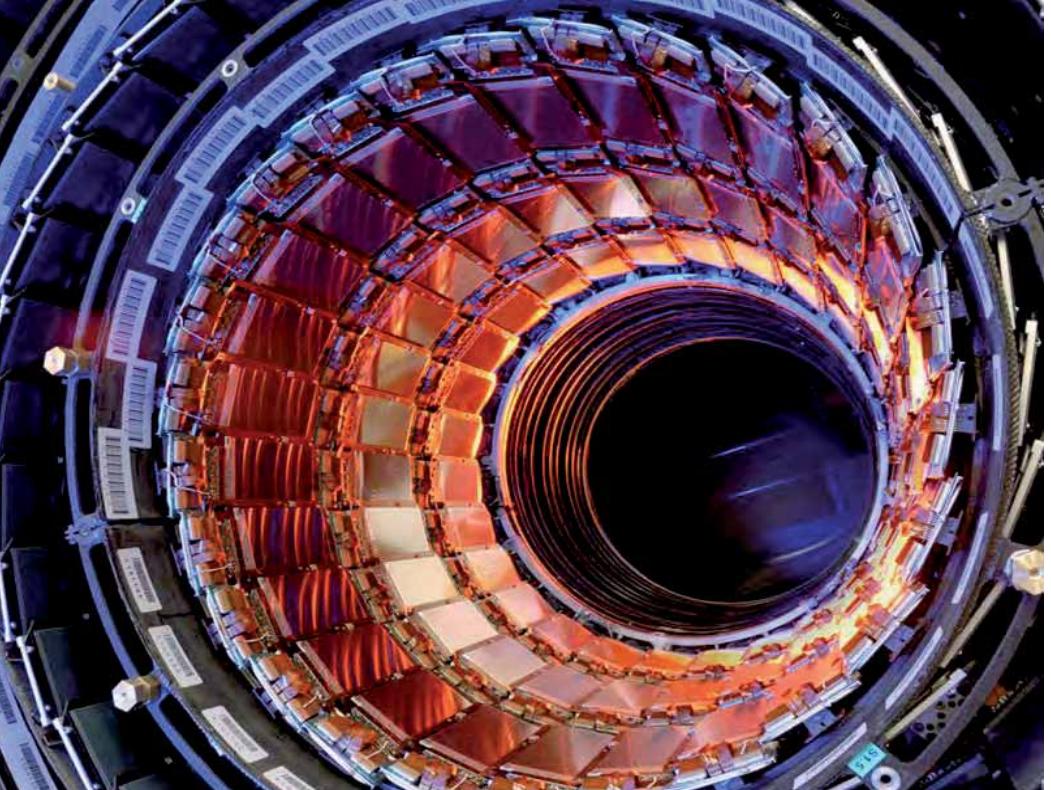
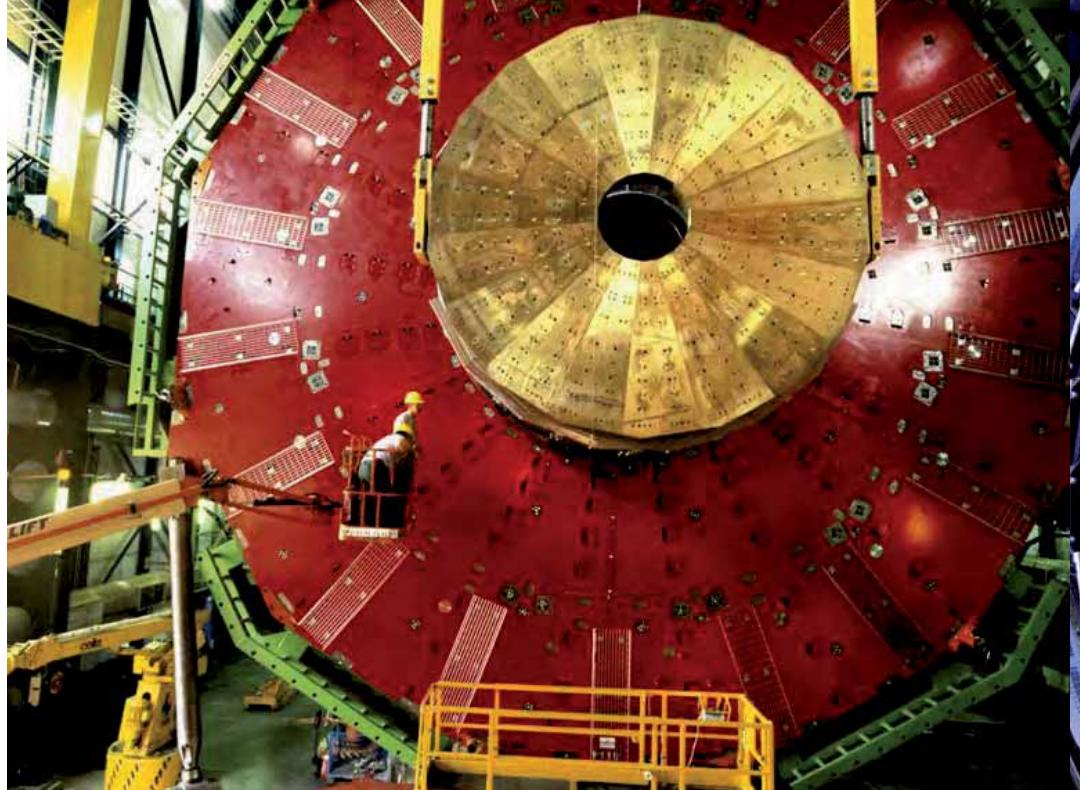
2.6 GJ

Welt-
rekord



CMS





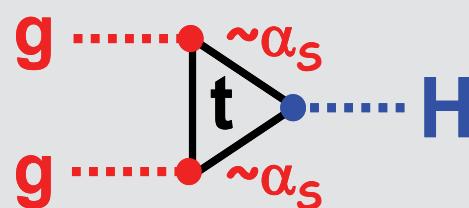
CMS



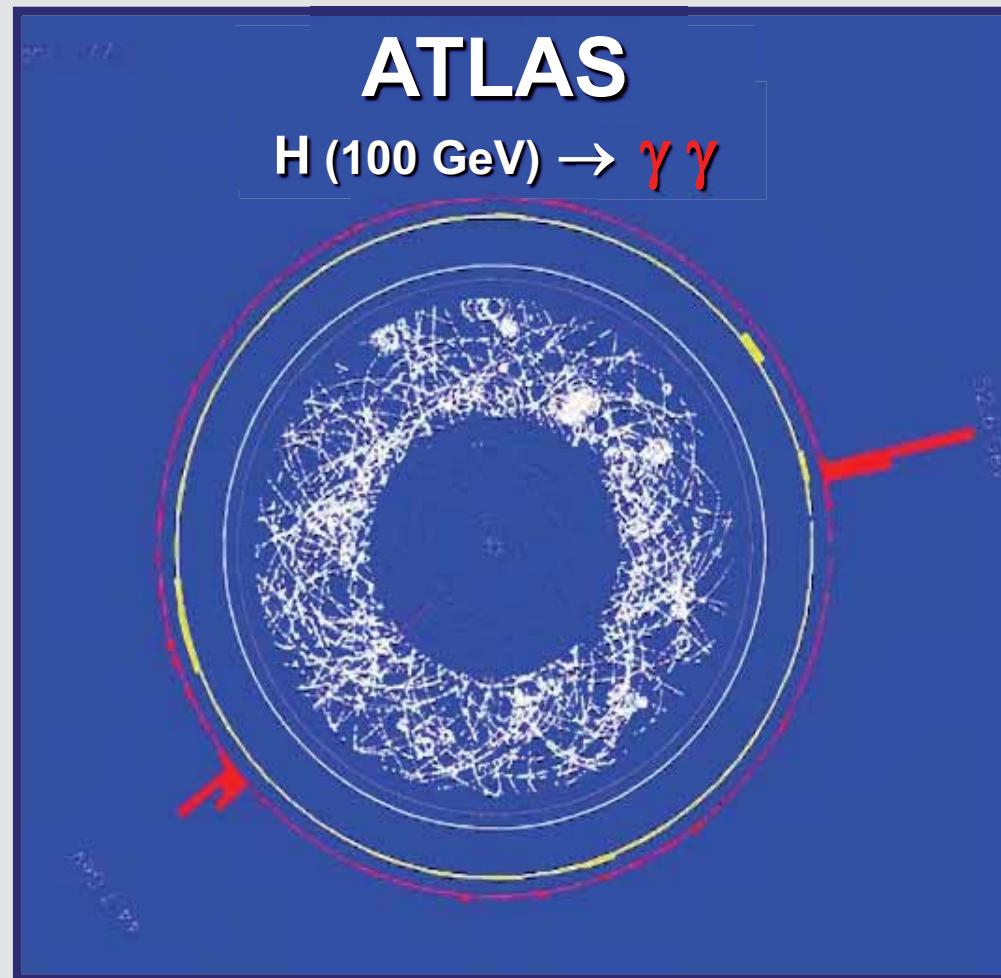
Higgs- Nachweis

Higgs-Suche

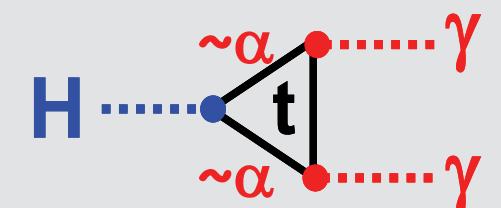
$$pp \rightarrow H X \rightarrow \gamma\gamma X$$



Produktion



Simulation im ATLAS-Detektor am LHC



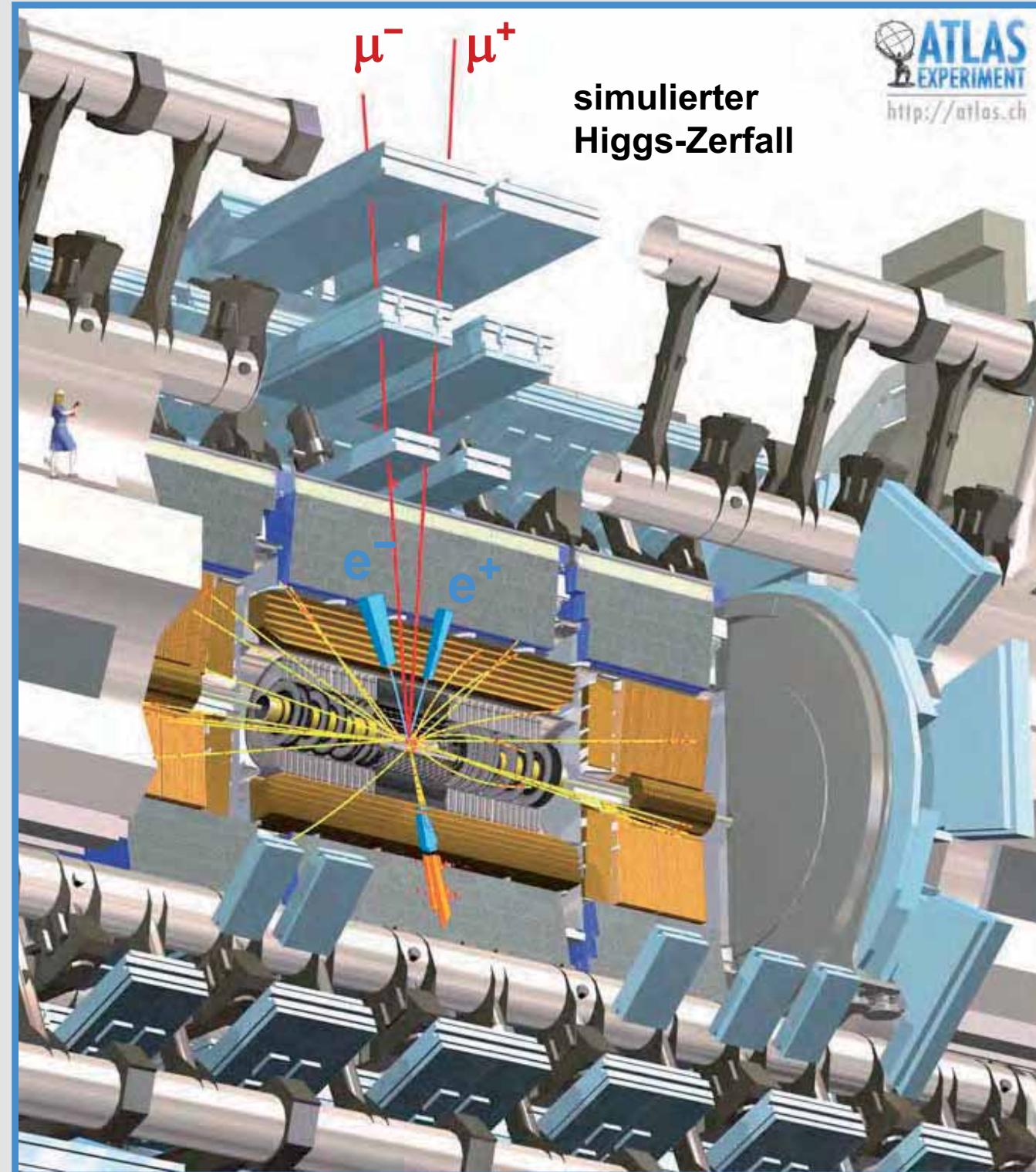
Zerfall

Higgs-Zerfall

$$H \rightarrow Z^* + Z$$

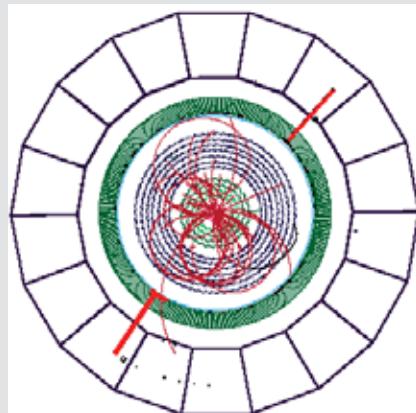
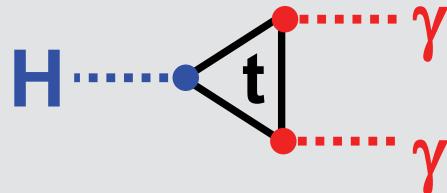
$$Z^* \rightarrow e^- + e^+$$

$$Z \rightarrow \mu^- + \mu^+$$

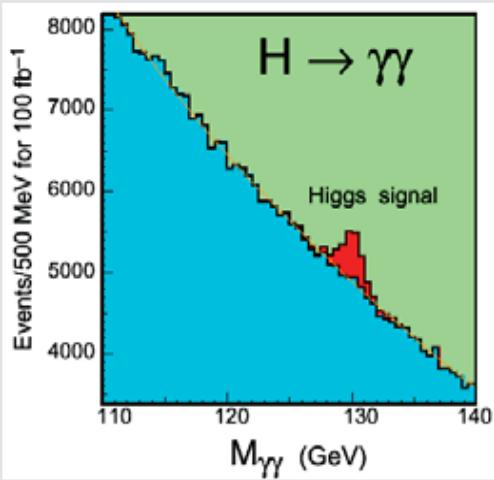


Higgs-Suche

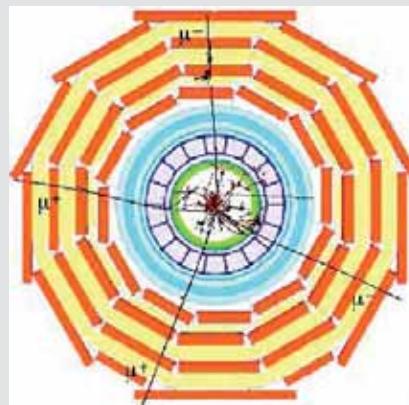
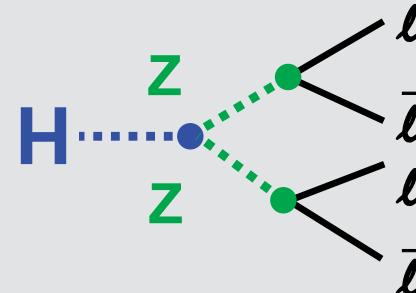
$m_H < 140 \text{ GeV}$



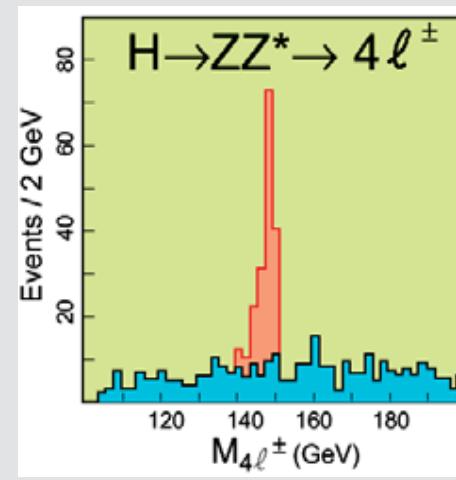
einfach, aber selten:
 $\sim \alpha^2 < 10^{-4}$



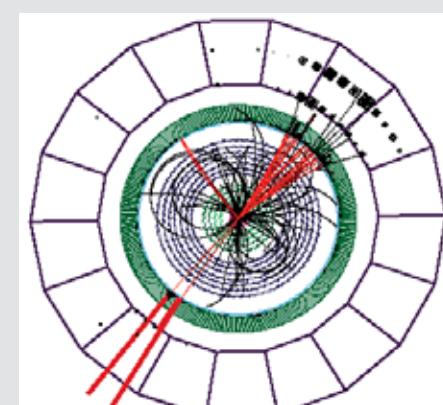
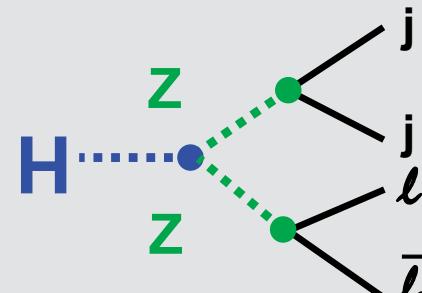
$130 < m_H < 500 \text{ GeV}$



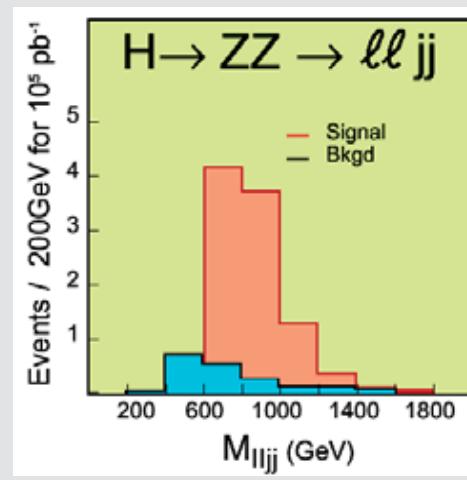
sauber, aber seltener Zerfall:
 $(\Gamma_l/\Gamma_Z)^2 \sim (3\%)^2 \sim 10^{-3}$



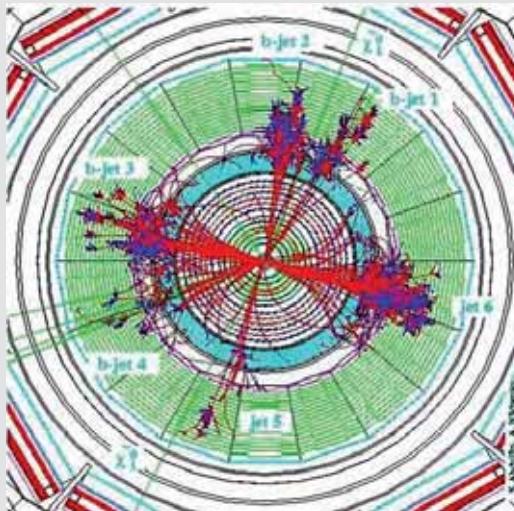
$m_H > 500 \text{ GeV}$



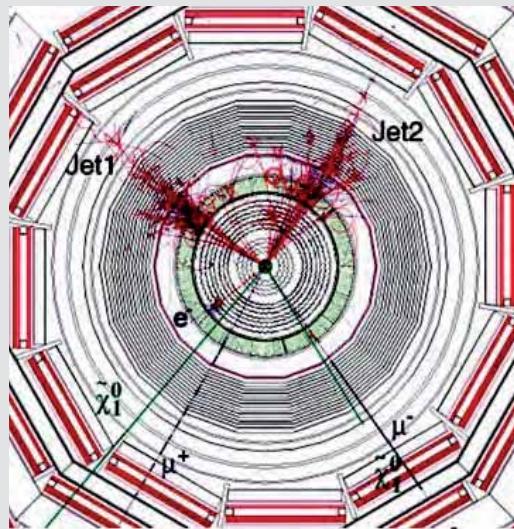
sauber, aber selten erzeugt breit



SUSY am LHC



SUSY: 6 Jets



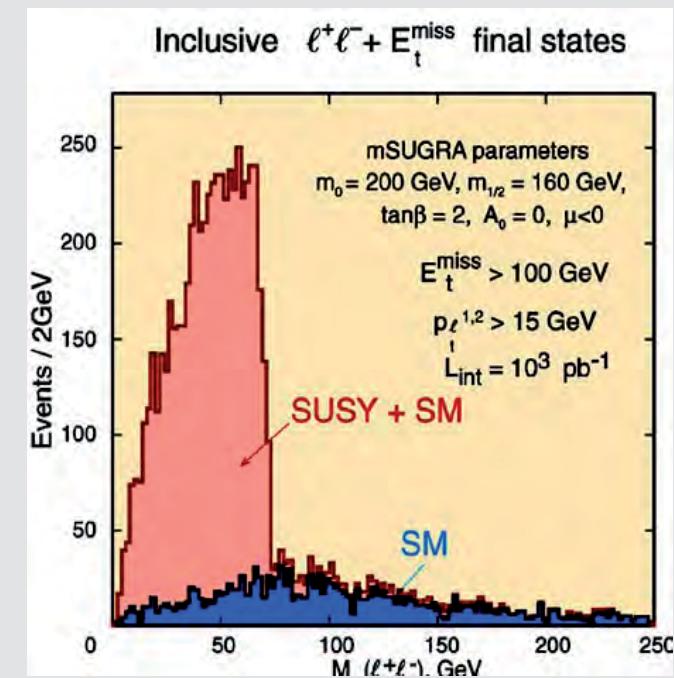
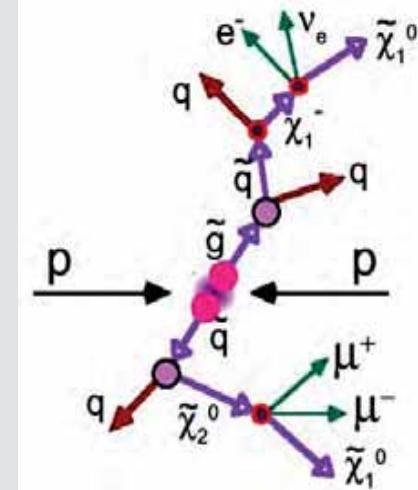
SUSY: 3 Jets + 3 Leptonen

- Produktion:

- Squarks + Gluino: stark !

- Zerfall spektakulär:

- Neutralino, der Kandidat für Dunkle Materie, entweicht: fehlende transversale Energie E_T
- viele Jets (Squarks/Gluino) und
- viele Leptonen (Sleptons)
- Kante im Dilepton-Spektrum:

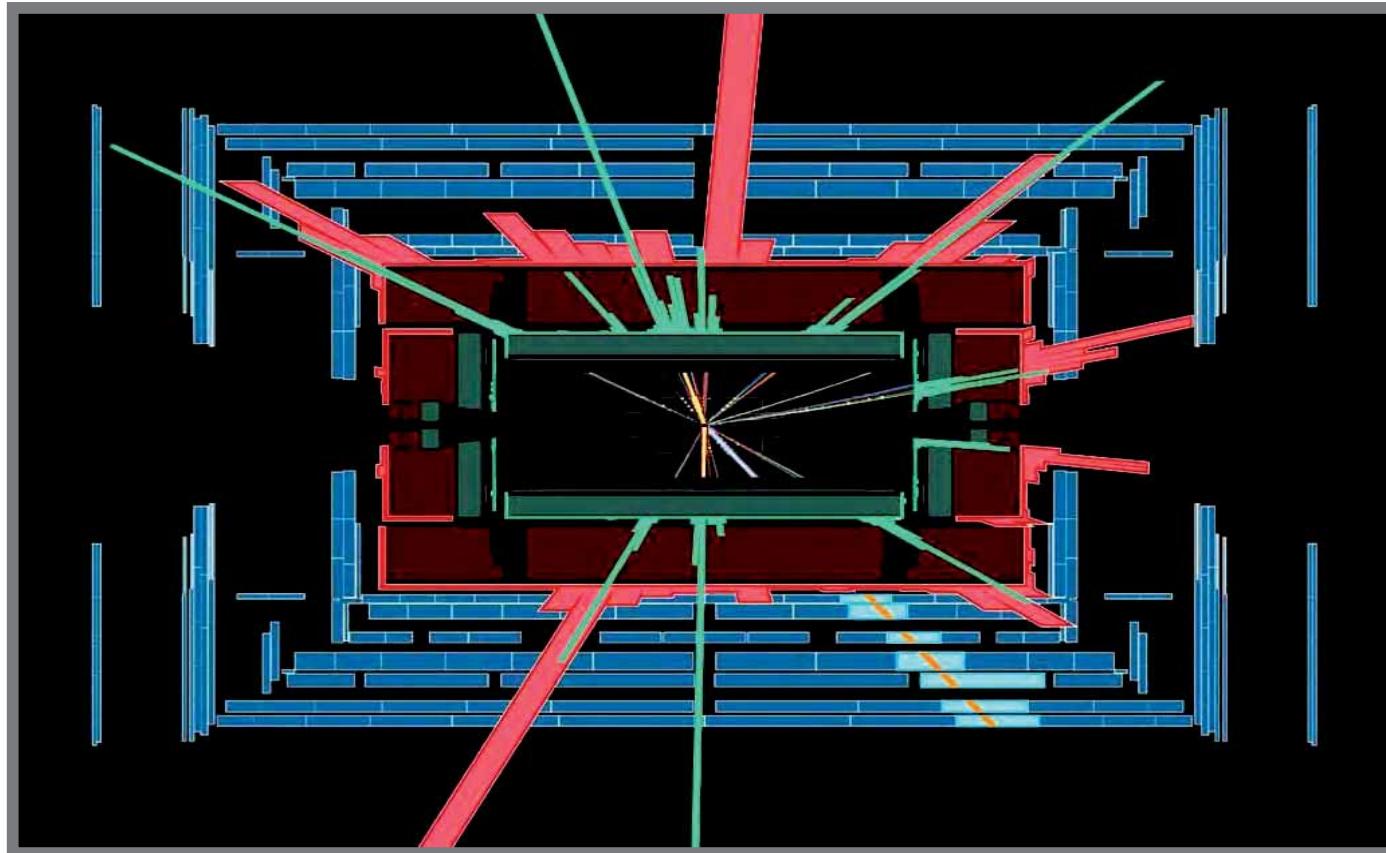


Mini Black Holes

**Gravitation wird durch extra Dimensionen stark:
Quanten-Gravitation im Labor !
verdampfen in $<10^{-27}$ s durch Hawking-Strahlung**

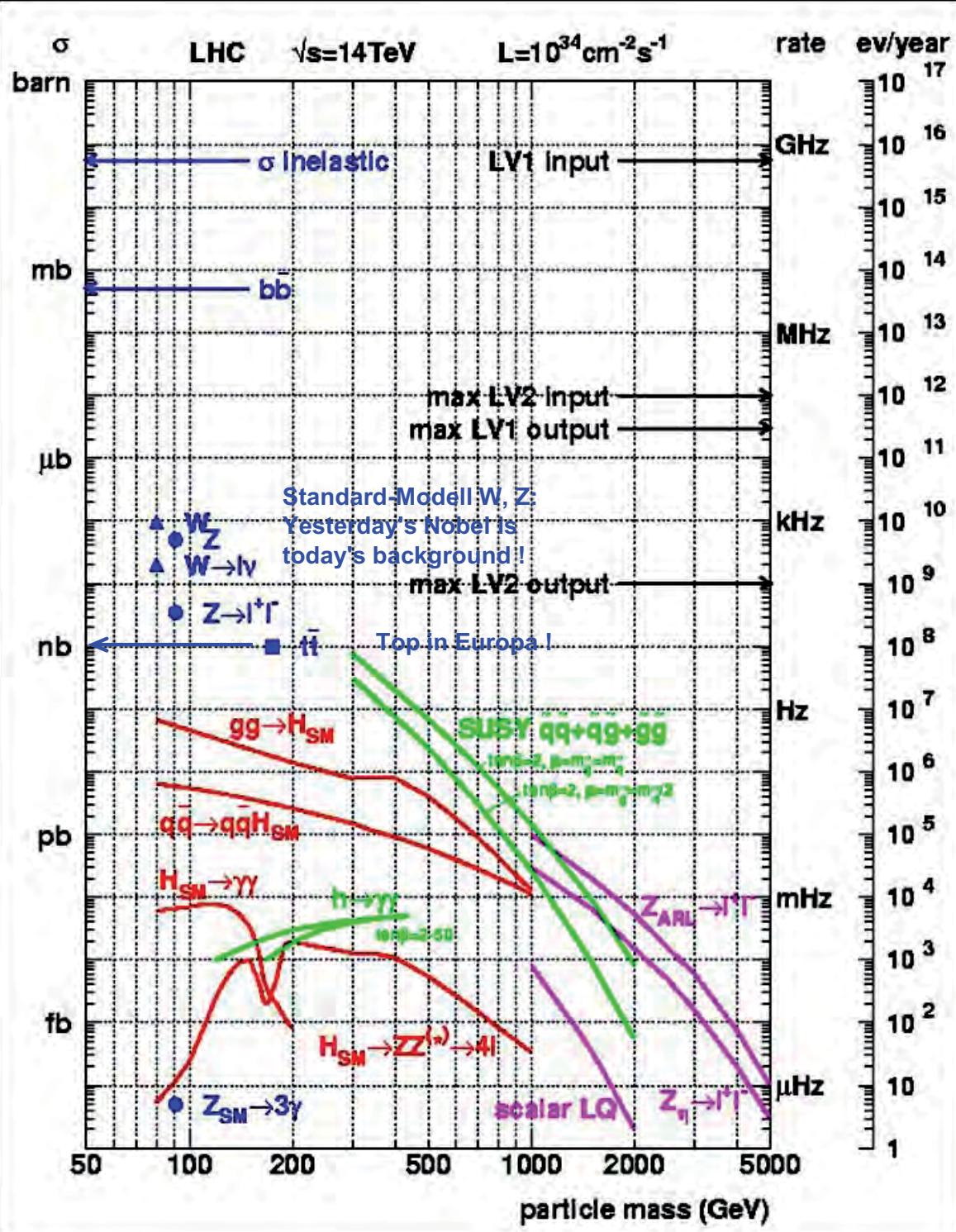
Signatur: gravitational Kopplung:

- isotroper, demokratischer Zerfall
- viele Jets, wenig fehlende Energie



simulierter Zerfall eines Mini Black Hole im ATLAS-Detektor

Datenraten



Rohdaten:
100 Millionen Kanäle
 $10^9 \text{ events/s} * 1 \text{ MB} = 1 \text{ PB/s}$

rekonstruierte Daten:
 $200 \text{ Hz} * 1.5 \text{ MB} =$
 $300 \text{ MB/s} = 1 \text{ TB/h}$
 $10^9 \text{ events/a} = 3 \text{ PB/a}$

reale + simulierte Daten
4 Experimente etc:
100 PB

extrahiere
 $\sim 10^3$ Signale/a



G r i d

WLCG - EGI - DGrid

150 Rechenzentren

>130.000 CPUs

>150 PB Disk

ATLAS first beam

20.11.09

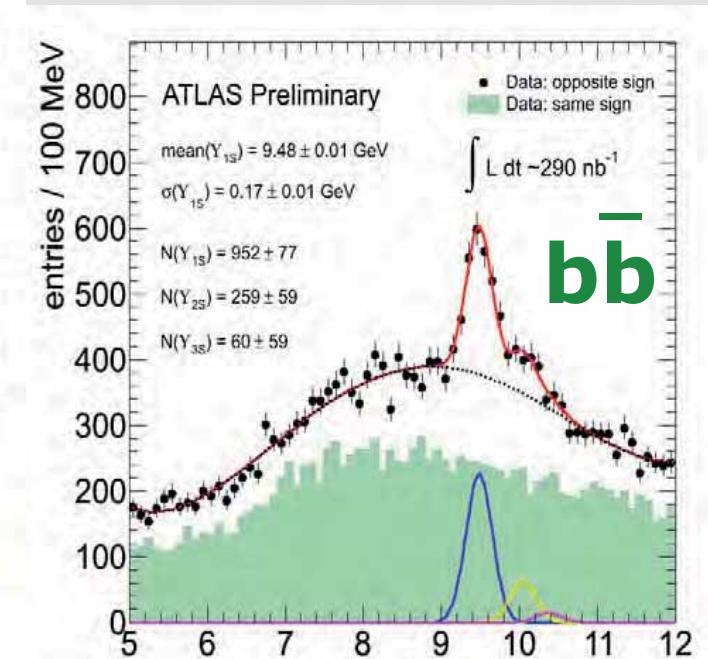
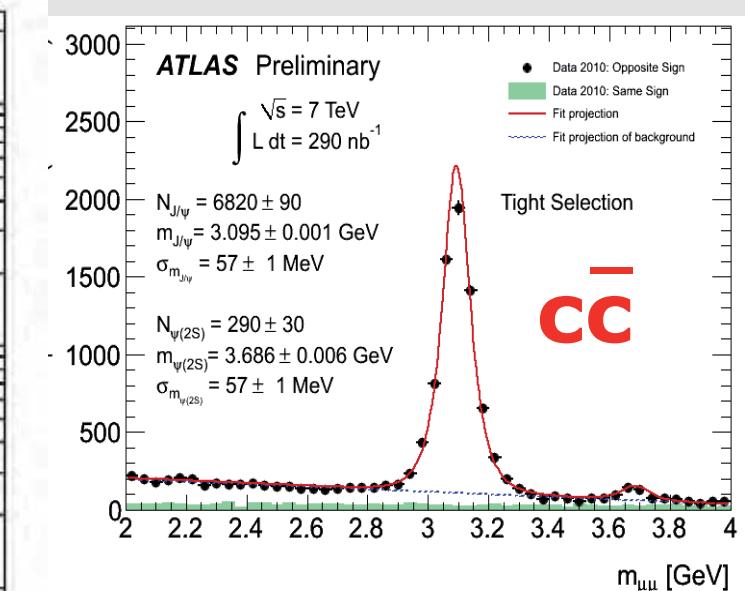
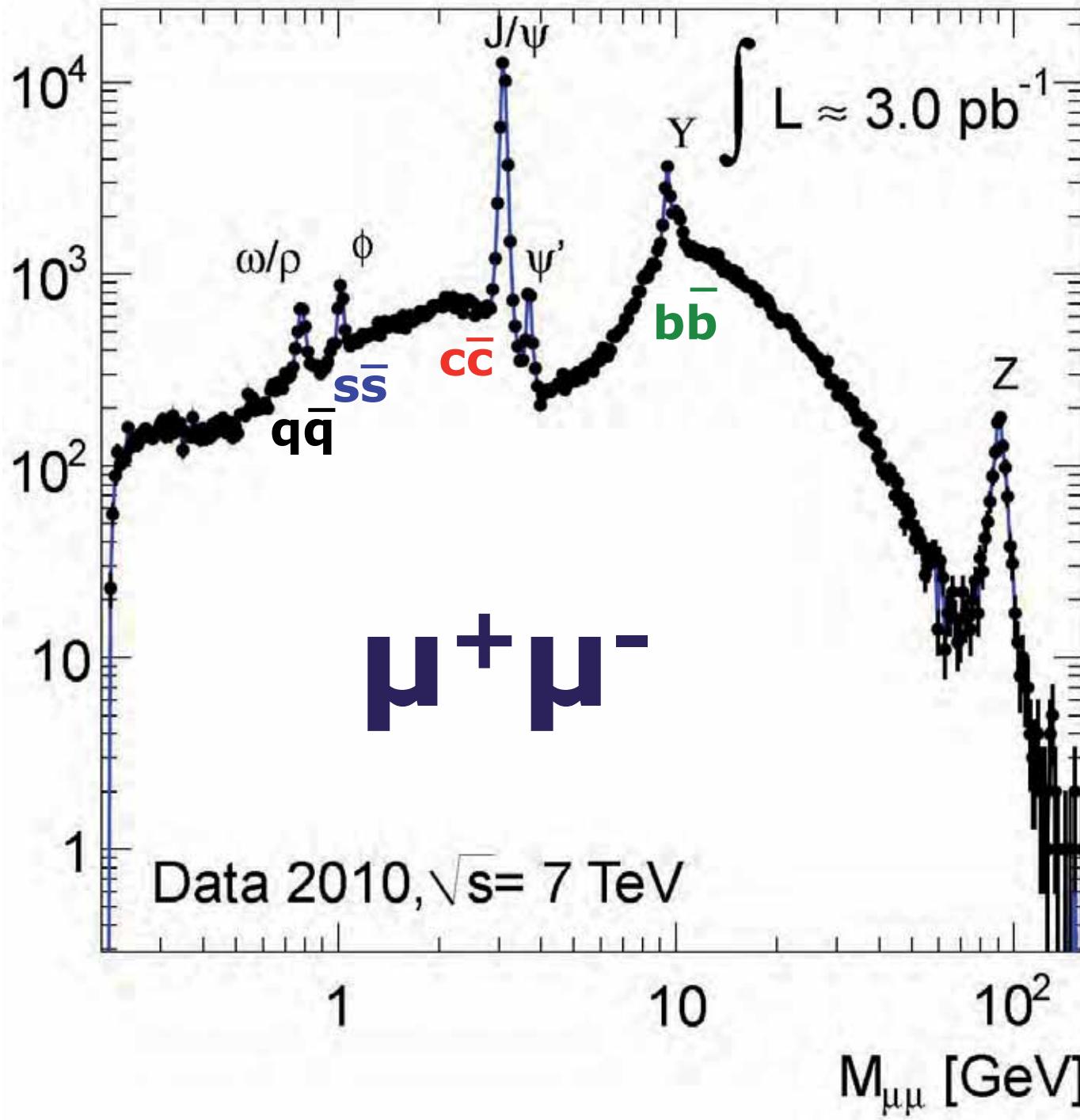


LHC First Physics

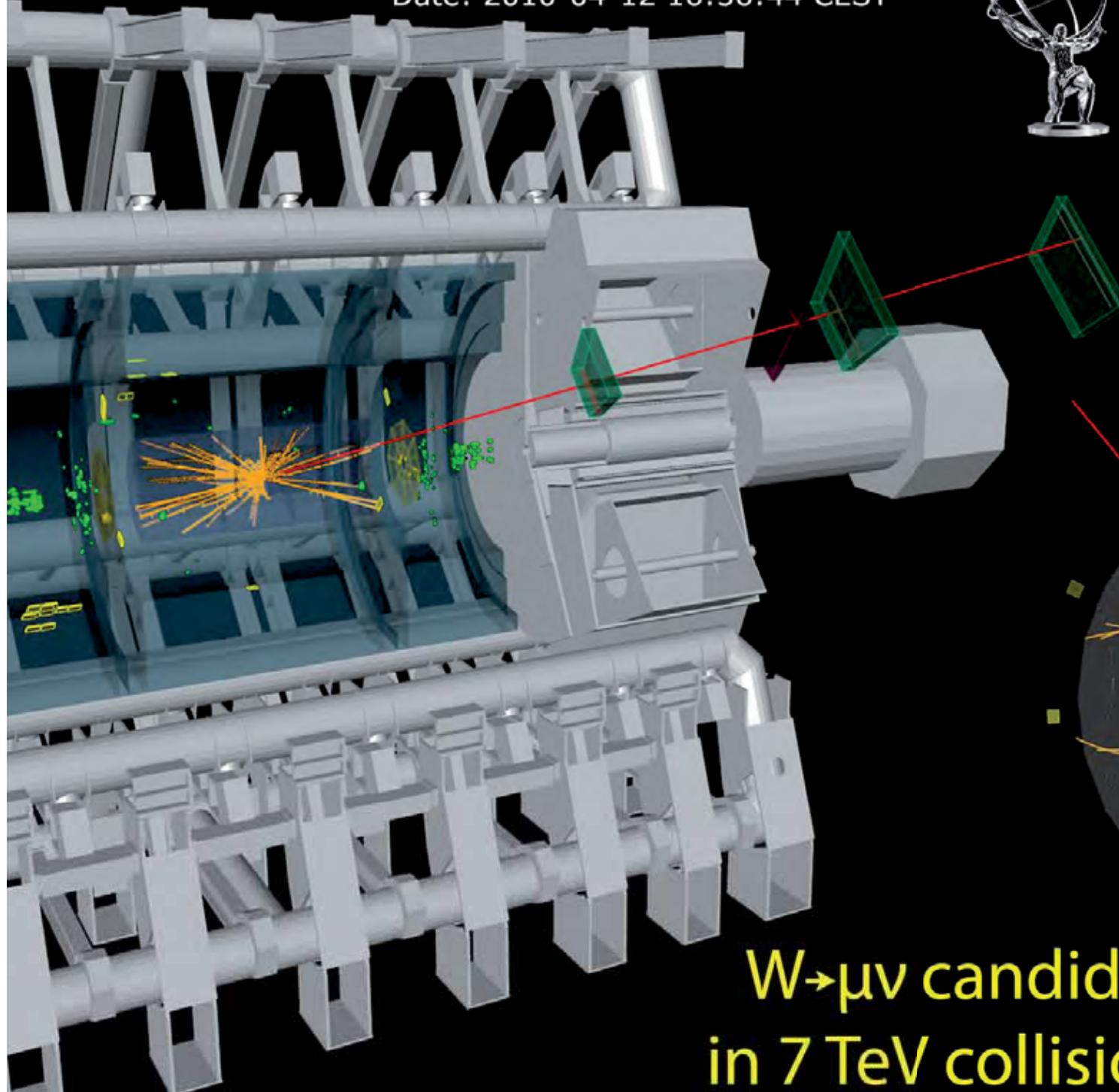
30.03.10



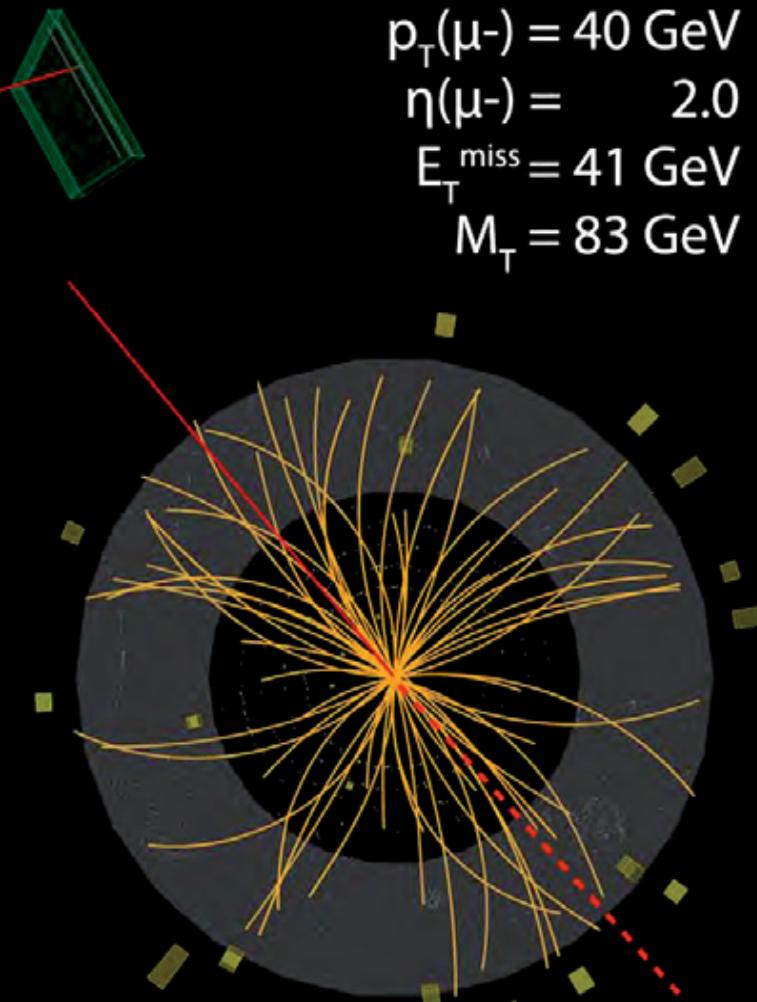
Eichung am Standardmodell



Run: 152845, Event: 3338173
Date: 2010-04-12 16:56:44 CEST



$W \rightarrow \mu\nu$ candidate
in 7 TeV collisions

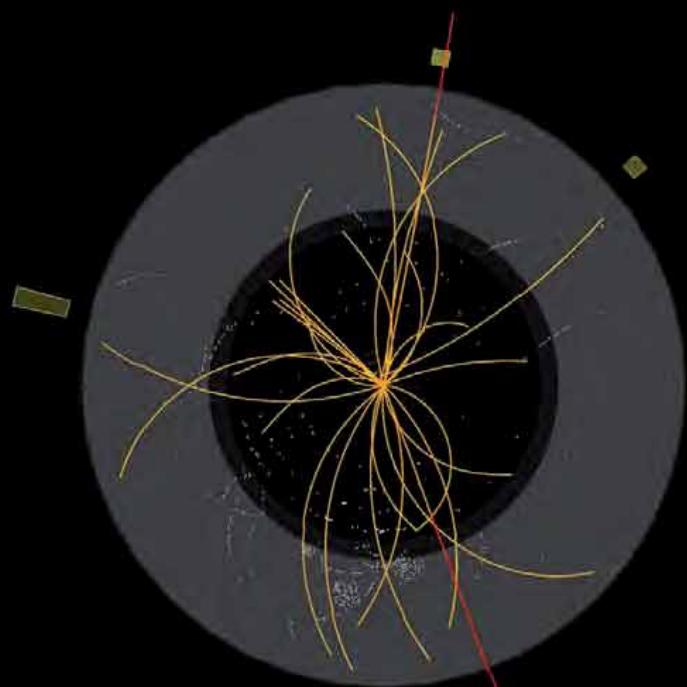


$p_T(\mu^-) = 40 \text{ GeV}$
 $\eta(\mu^-) = 2.0$
 $E_T^{\text{miss}} = 41 \text{ GeV}$
 $M_T = 83 \text{ GeV}$



ATLAS EXPERIMENT

Run: 154822, Event: 14321500
Date: 2010-05-10 02:07:22 CEST

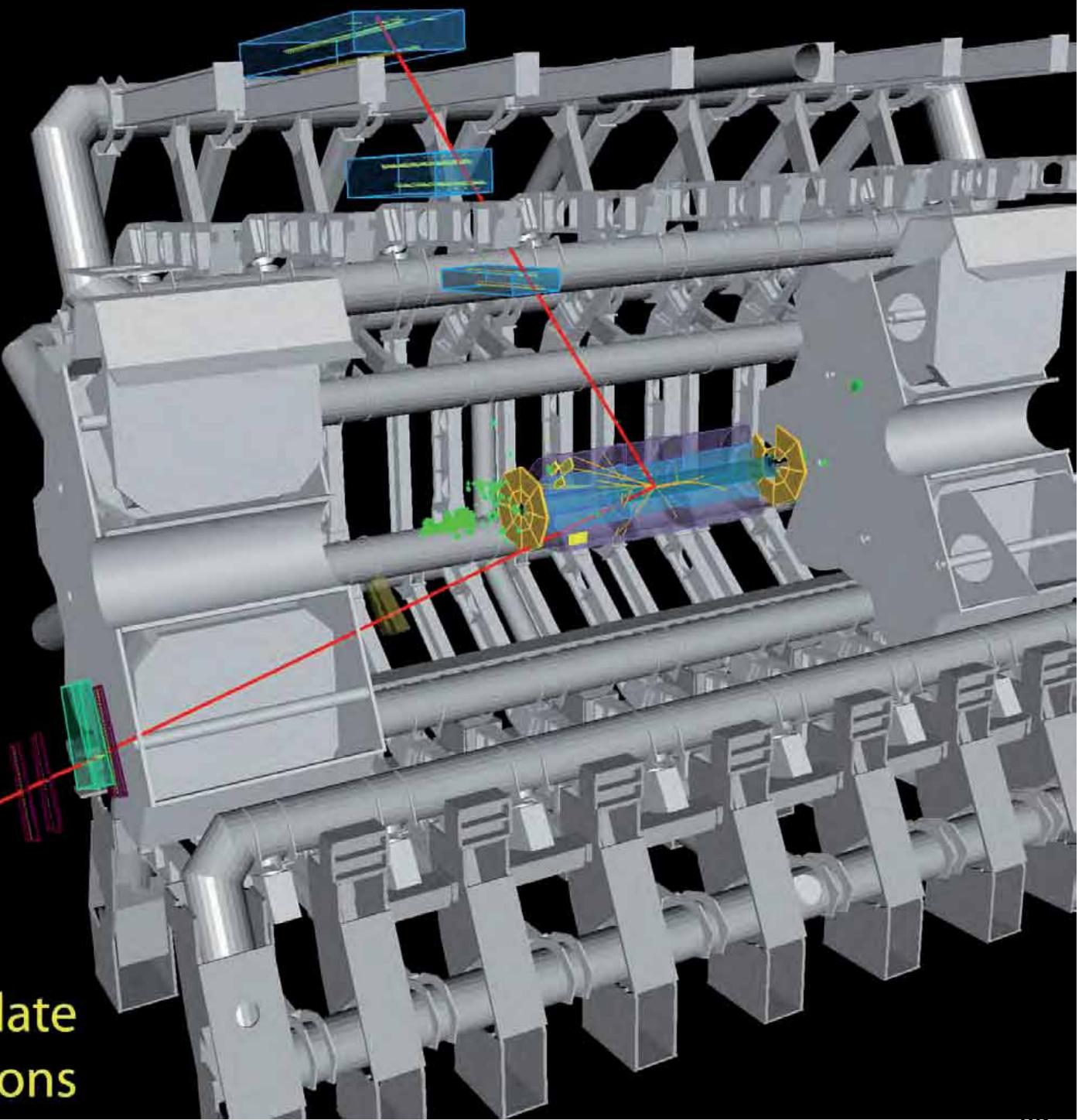


$$p_T(\mu^-) = 27 \text{ GeV} \quad \eta(\mu^-) = 0.7 \\ p_T(\mu^+) = 45 \text{ GeV} \quad \eta(\mu^+) = 2.2$$

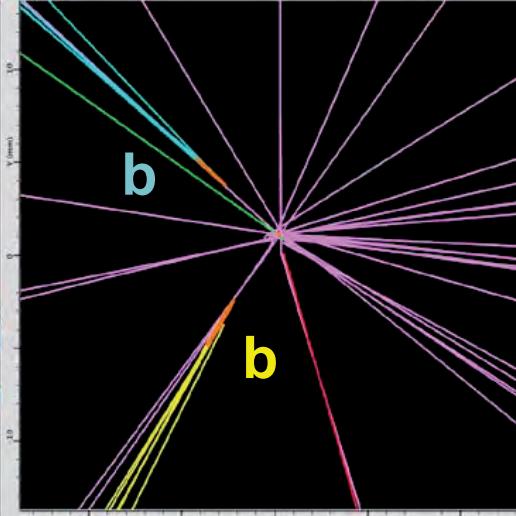
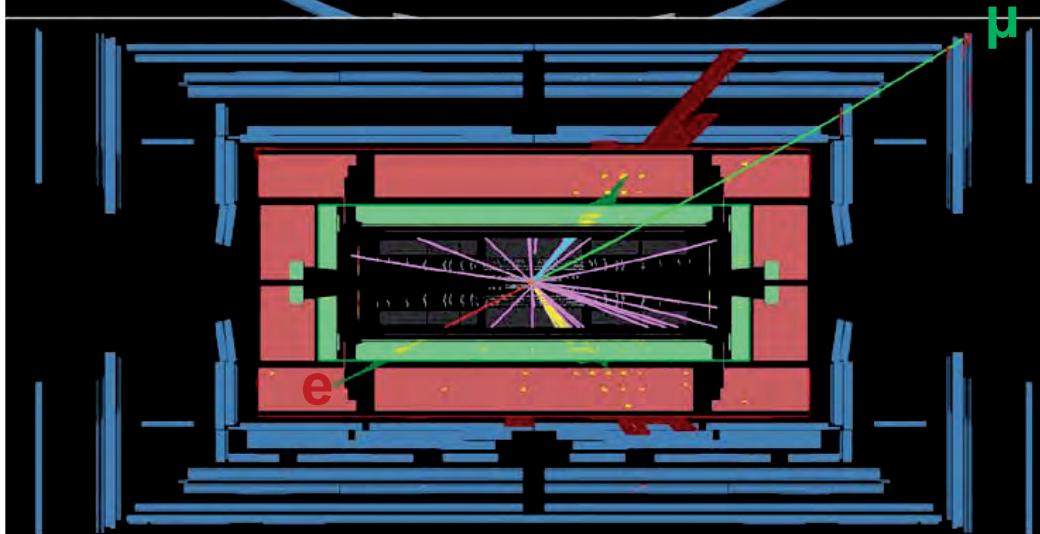
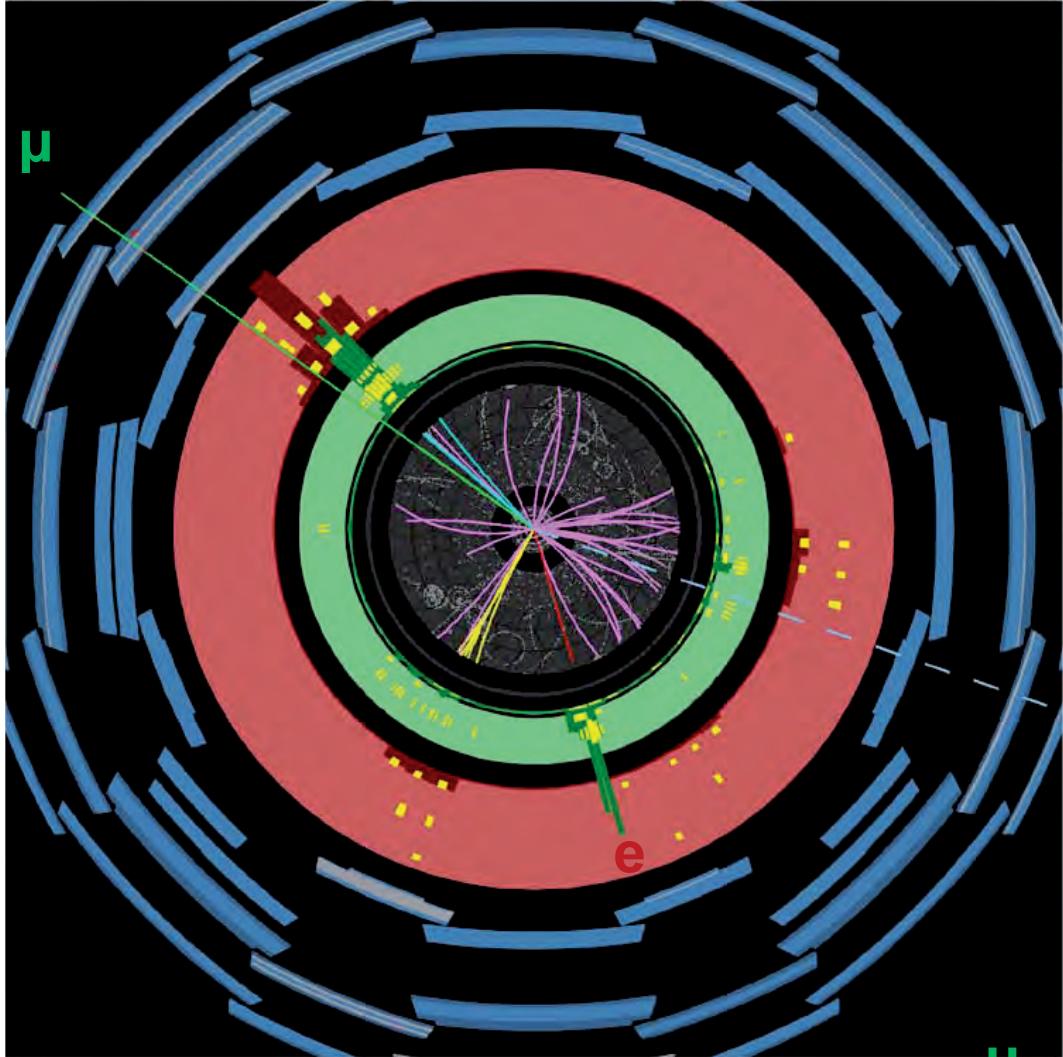
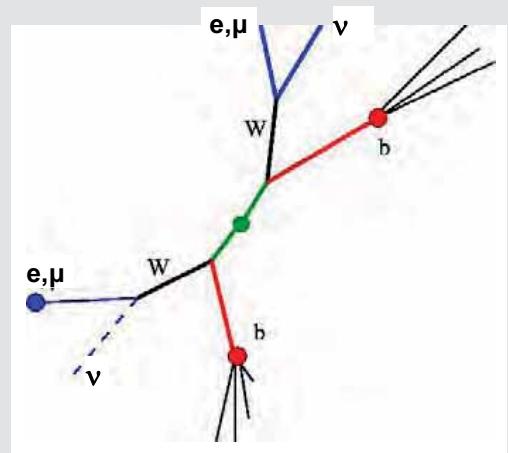
$$M_{\mu\mu} = 87 \text{ GeV}$$



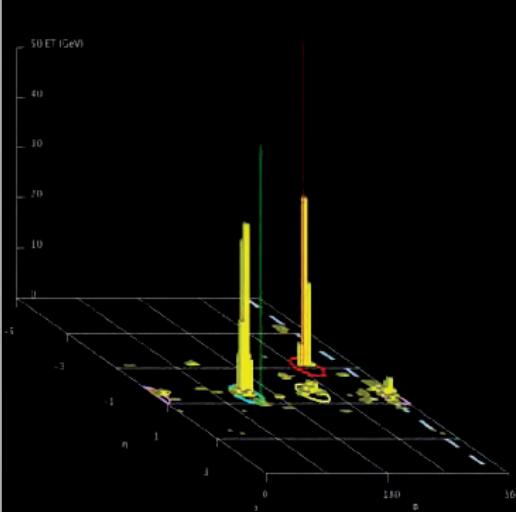
Z \rightarrow $\mu\mu$ candidate
in 7 TeV collisions



$\bar{t} t \rightarrow$
e + μ
2 b-jets



ATLAS EXPERIMENT
Run Number: 160958, Event Number: 9038972
Date: 2010-08-08 11:01:12 BST



Electron $p_T = 23$ GeV
Muon $p_T = 48$ GeV
 $E_T^{\text{miss}} = 77$ GeV
3 jets with $p_T > 20$ GeV
1 b-tag $p_T = 57$ GeV

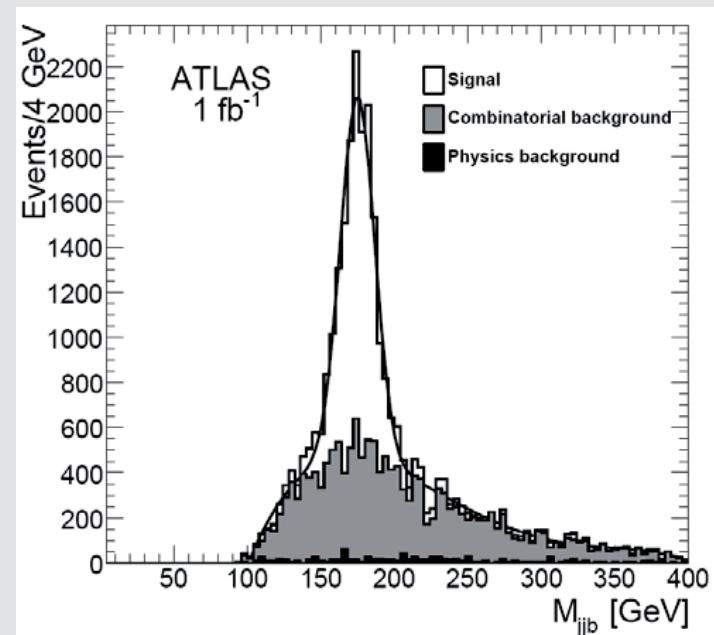
LHC 2010-11

- $E = 2 \times 3.5 \text{ TeV}$
- $10^{11} \text{ p / bunch} = \text{Design}$
Luminosität: $10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} = 1\% \text{ of design, total: } 1 \text{ fb}^{-1}$
- Kalibration + **Physik** mit Standardmodell
W, Z Bosonen: $Z \rightarrow e^+ e^-$, $\mu^+ \mu^-$
b-, t Quarks
- erstes **Top** in Europa - SUSY-artig !
- verdopple **SUSY Limits**
von 400 auf 800 GeV
- verdopple **Extra Dimension Limits**
von 1 auf 2 TeV
- Higgs Fenster um 160 GeV
- schwere **Ionen**: Quark-Gluon Plasma

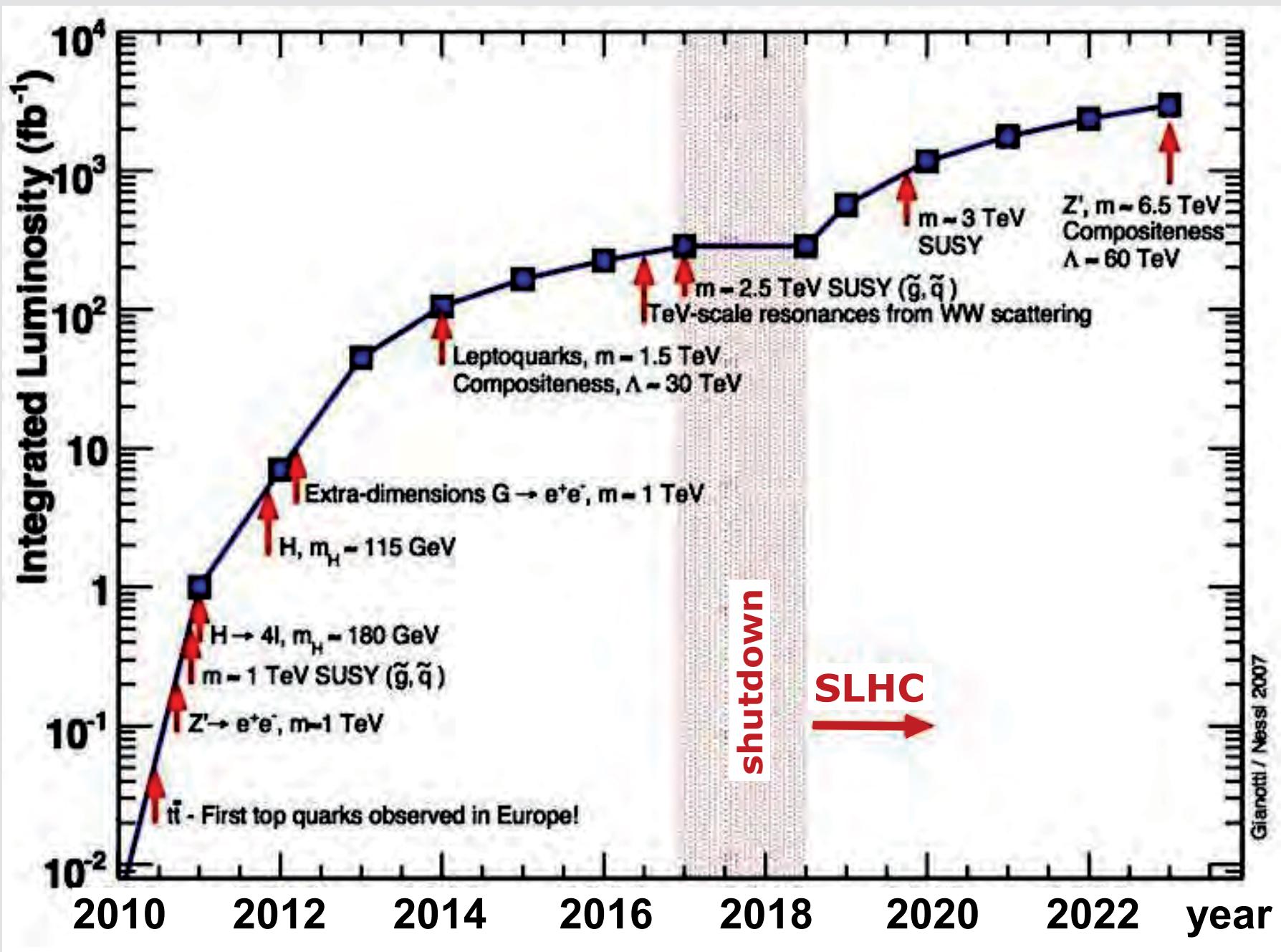
Stop 2012
Restart 2013

- $E = 2 \times 7 \text{ TeV}$

7 TeV , 1 fb⁻¹	events
$Z \rightarrow ee$	250.000
$\text{top} \rightarrow l + \text{jets}$	5.900
$\text{top} \rightarrow ll bb$	2.500
SUSY quark, 5σ m<	750 GeV
$H(160 \text{ GeV}) \rightarrow WW$	3-4 σ
W' ($m_{W'} = 1.5 \text{ TeV}$)	20
Z' ($m_{Z'} = 1.5 \text{ TeV}$)	~4



LHC Entdeckungen

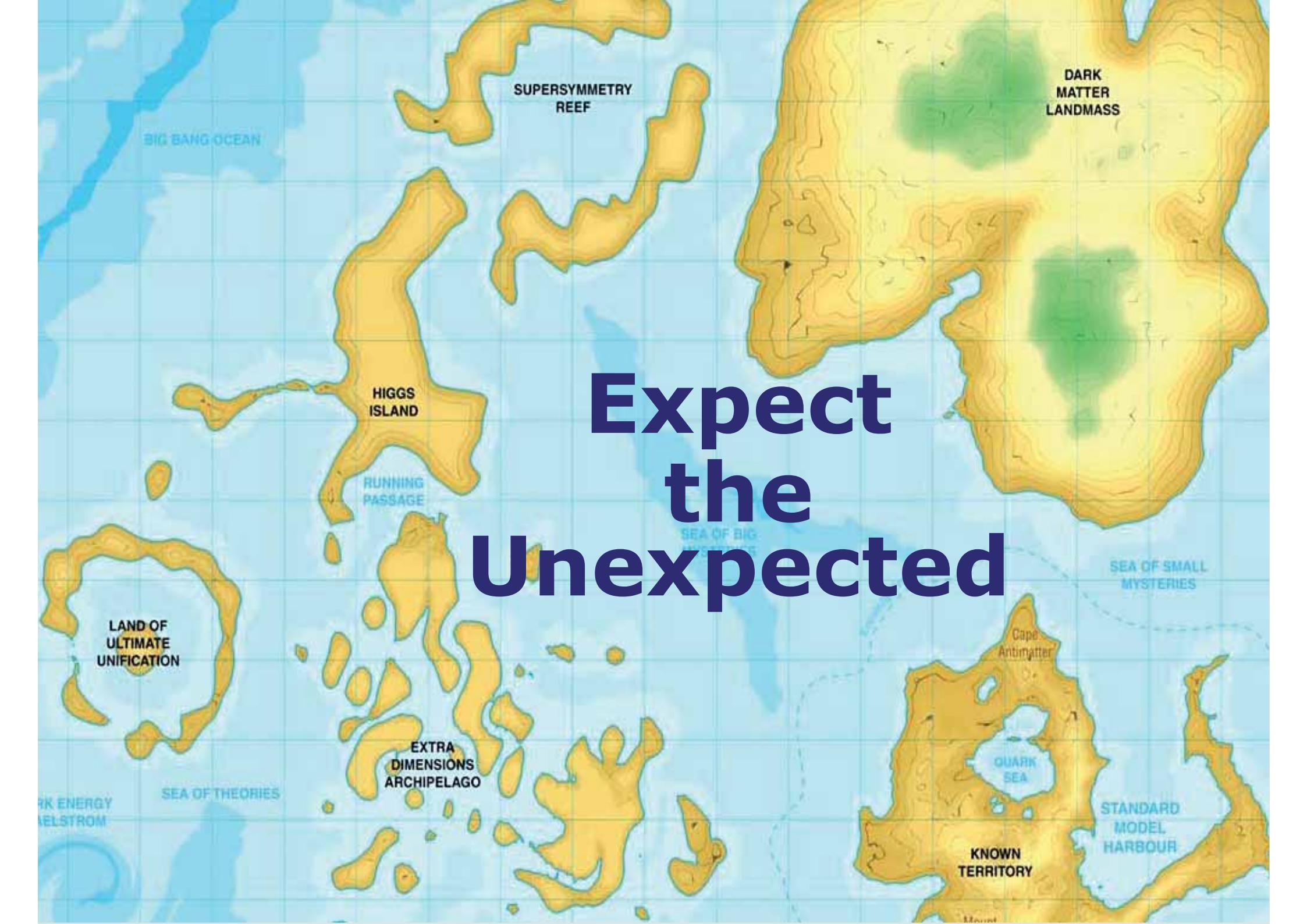


DEPARTURES
0514 EXTRA DIMENSIONS
3013 DARK MATTER
3019 HIGGS
401 DARK ENERGY
0839 SUPERSYMMETRY
42 UNIFICATION
UNKNOWN
0839 QUANTUM UNIVERSE
ALL SCIENCE



Terra Incognita zu neuen Ufern

**Kolumbus
suchte Indien.
Er entdeckte
Amerika.**



**Expect
the
Unexpected**