

Teilchenbeschleuniger LHC: Auf der Suche nach dem Ursprung der Masse



Jun. Prof. Dr. A. Straessner
TU Dresden

Kath. Studentengemeinde
TU Ilmenau
19. Januar 2010



Helmholtz Alliance

Deutsche
Forschungsgemeinschaft



DFG

- Einführung:
 - Was ist Masse?
 - Die Welt der kleinsten Teilchen
 - Das Konzept der Masse in der Teilchenphysik
 - Aktuelles zum Higgs-Boson
- Der Large Hadron Collider (LHC) und seine Experimente
- Suche nach Higgs-Bosonen und neuen Teilchen am LHC
- Zusammenfassung



- Fahrrad (10 kg) anschieben

LEICHT



- Fahrrad (10 kg) anschieben

LEICHT



- Auto (1000 kg) anschieben

SCHWER



- Fahrrad (10 kg) anschieben

LEICHT



- Auto (1000 kg) anschieben

SCHWER



- genauer: **mehr Masse bei gleicher Kraft → geringere Beschleunigung**

- Gewicht auf der Waage:

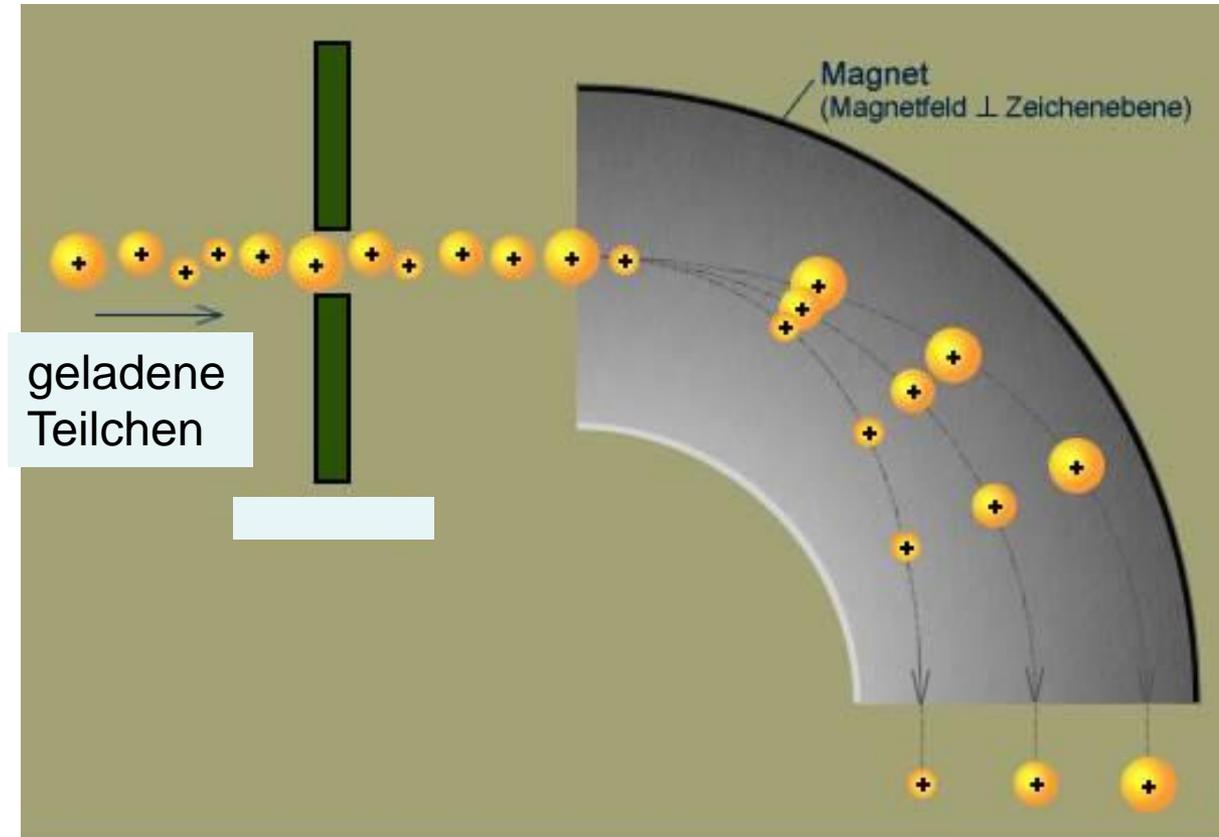


- Gewicht auf der Waage:
 - Anziehungskraft zwischen Erde und Mensch
- Gravitationskraft $\sim M_{\text{Erde}} \cdot M_{\text{Mensch}}$



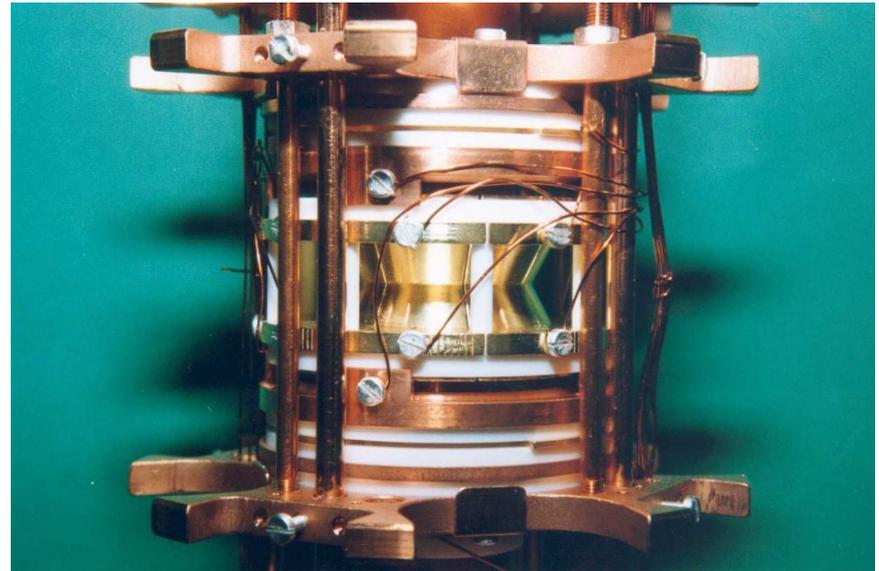
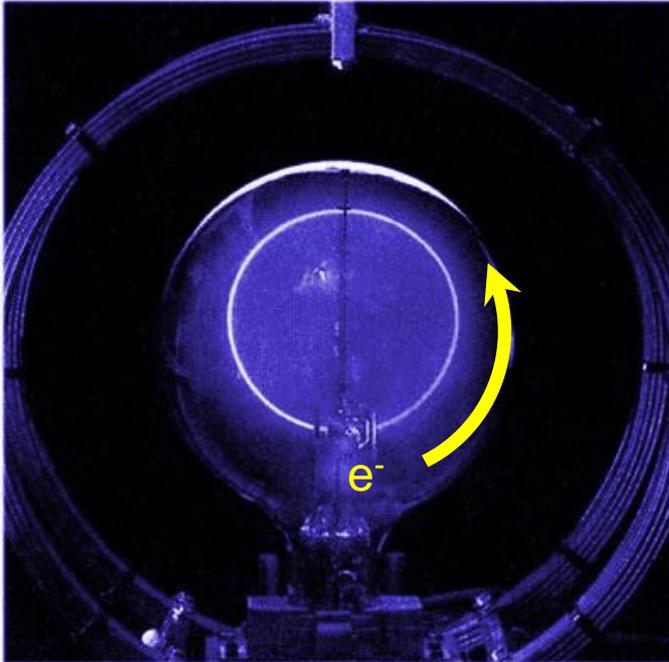
aber auch zwischen Erde und Mond:
Gravitationskraft $\sim M_{\text{Erde}} \cdot M_{\text{Mond}}$

- Flugbahn von gleich geladenen Teilchen im Magnetfeld:



- **grosse Masse** → Ablenkung durch Magnetkraft geringer → **grosser Radius**
- **kleine Masse** → Ablenkung durch Magnetkraft größer → **kleiner Radius**

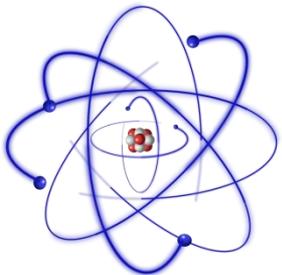
- Elektronen auf Kreisbahn im Magnetfeld → Radius um so größer je massiver das Teilchen



- präzise Messung der Masse von Elektron und Proton in Teilchenfallen

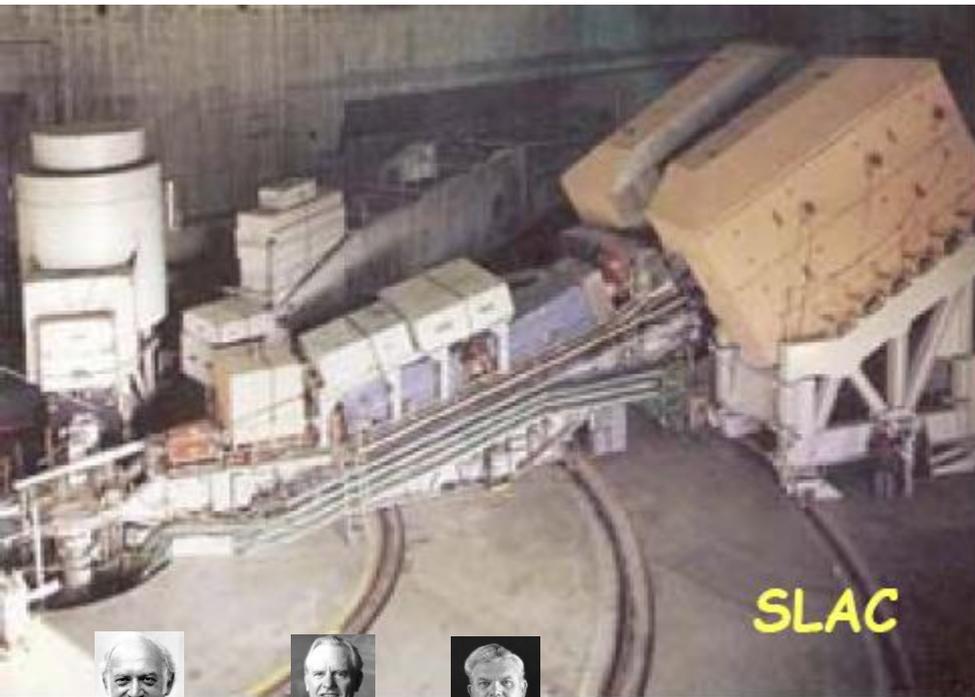


NP 1989



Masse des Protons ~ 1/12 der Masse eines Kohlenstoffatoms
Masse des Elektrons ~ 1/1800 Masse des Protons

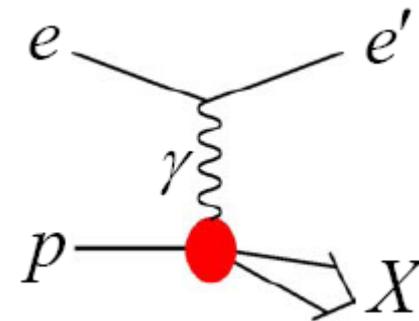
Innere Struktur der Protonen



Das Elektron ist ein Elementarteilchen
→ keine innere Struktur

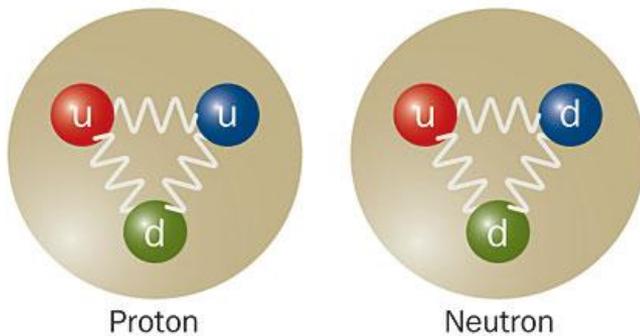
Und das Proton?

Beschuss von Protonen mit Elektronen:



NP 1990

Friedman, Kendall, Taylor 1969: punktförmige Objekte im Proton



“up” und “down” Quarks



The PARTICLE ZOO

Handmade Subatomic Particle Plushies FROM THE STANDARD MODEL OF PHYSICS & beyond!
 { ages 5 and up }

QUARKS

<p>UP QUARK A teeny little point inside the proton and neutron, it is friends forever with the down quark.</p> 	<p>CHARM QUARK A second generation quark, he is charmed, indeed.</p> 	<p>TOP QUARK This heavyweight champion doesn't live long enough to make friends with anyone.</p> 
<p>DOWN QUARK A tiny little point inside the proton and neutron, it is friends forever with the up quark.</p> 	<p>STRANGE QUARK What's so strange about this second generation quark?</p> 	<p>BOTTOM QUARK This third generation quark is puttin' on the pounds.</p> 

3 Familien von Quark-Paaren

LEPTONS

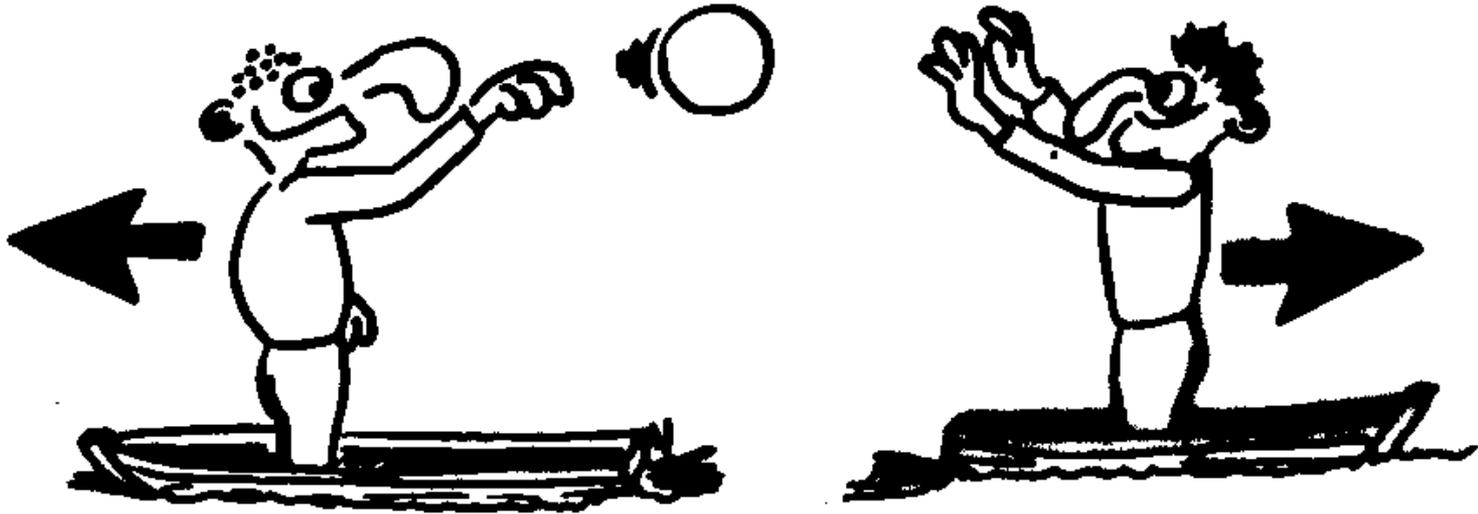
<p>ELECTRON-NEUTRINO This minuscule bandit is so light, he is practically massless.</p> 	<p>MUON-NEUTRINO Like the other 2 neutrinos, he's got an identity crisis from oscillation.</p> 	<p>TAU-NEUTRINO He's a tau now, but what type of neutrino will he be next?</p> 
<p>NEW EDITION! ELECTRON A familiar friend, this negatively charged, busy li'l guy likes to bond.</p> 	<p>MUON A "heavy electron" who lives fast and dies young.</p> 	<p>TAU A "heavy muon" who could stand to lose a little weight.</p> 

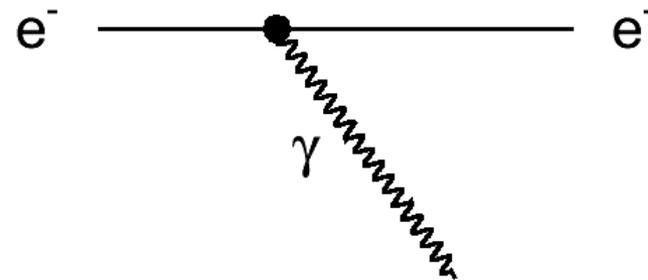
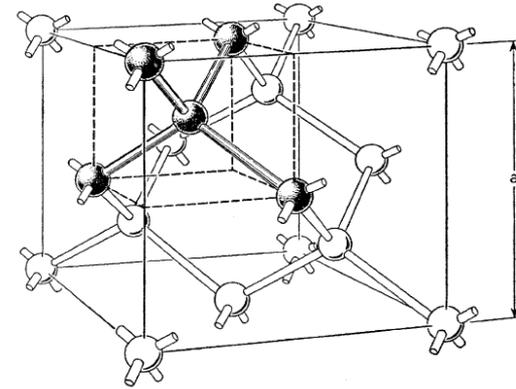
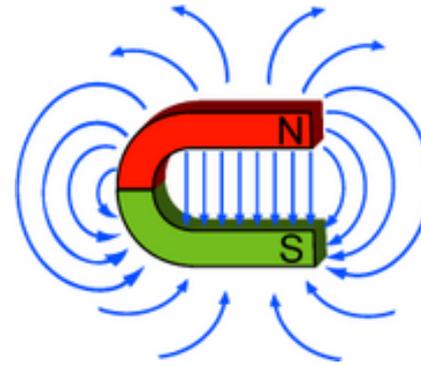
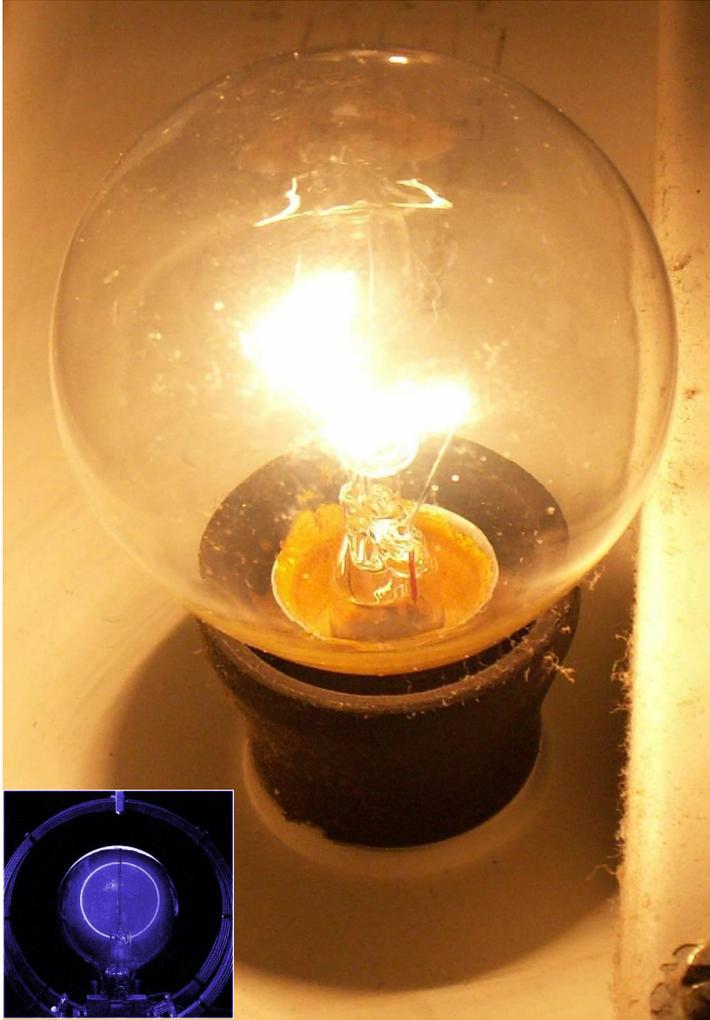
3 Familien von Leptonen und Neutrinos

Elektron und seine schweren Partner

Zu jeder Wechselwirkung zwischen Teilchen gehört eine Ladung
Stärke der Kraft ist proportional zur Ladung

Kraft wird übermittelt durch Austausch von Botenteilchen

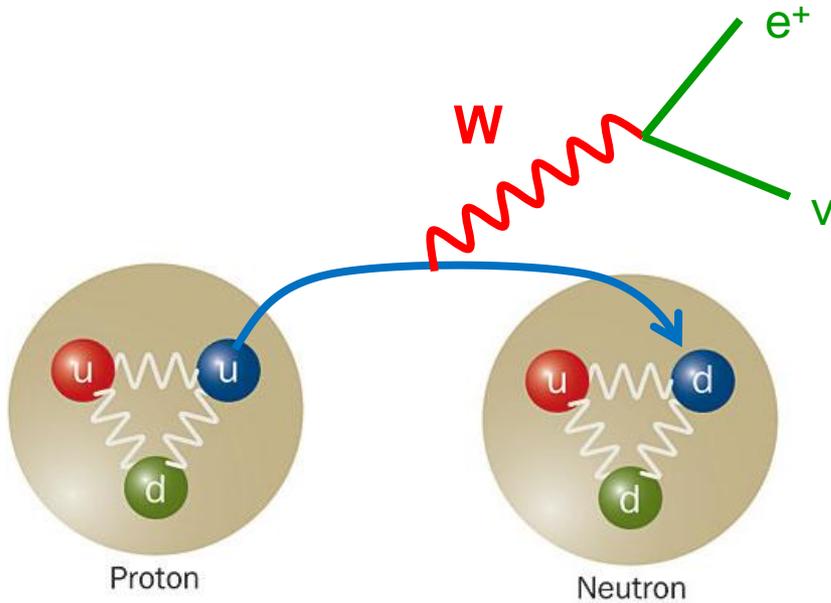
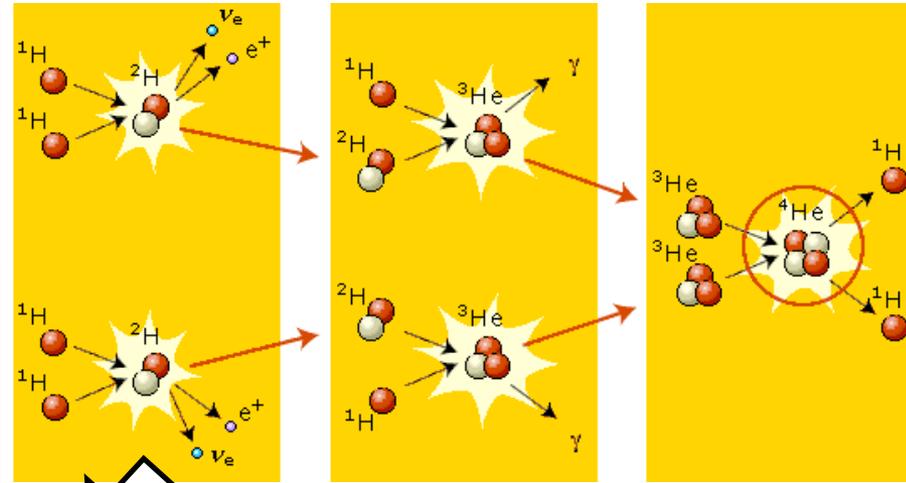
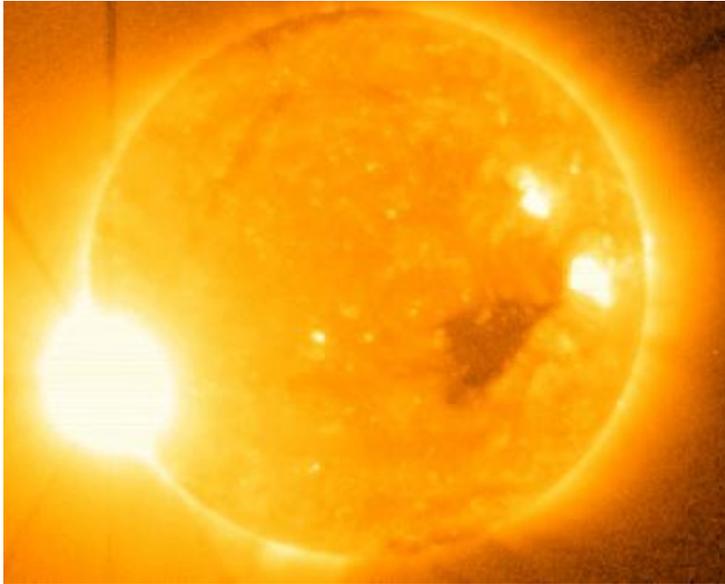




Ladung: $+n$ oder $-n$
Botenteilchen: Photon

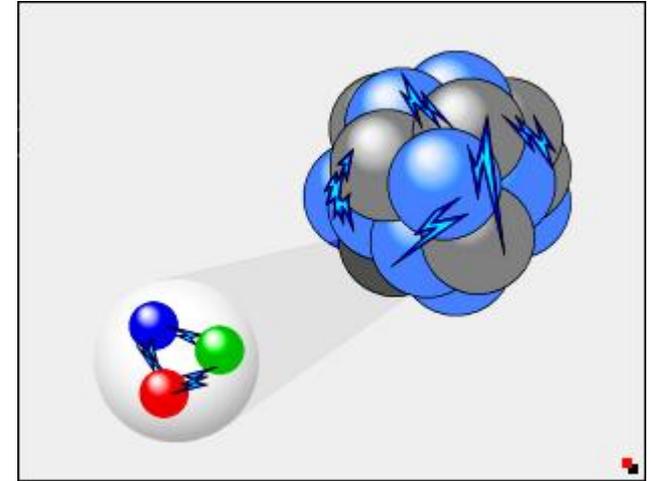
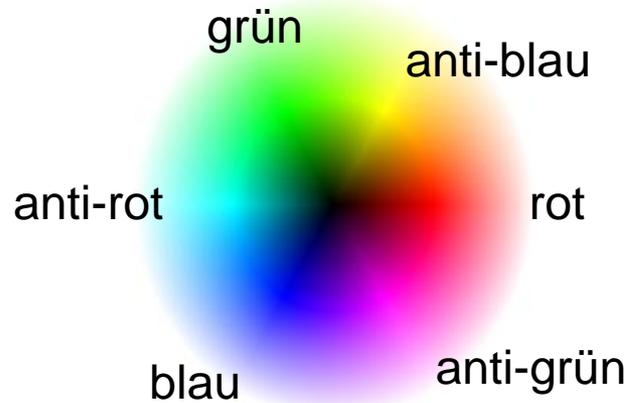
Schwache Kraft

- schwache Kraft trägt zu solaren Fusionsprozessen bei:



- schwache Ladung
- W^\pm und Z Bosonen sind die Botenteilchen der schwachen Kraft

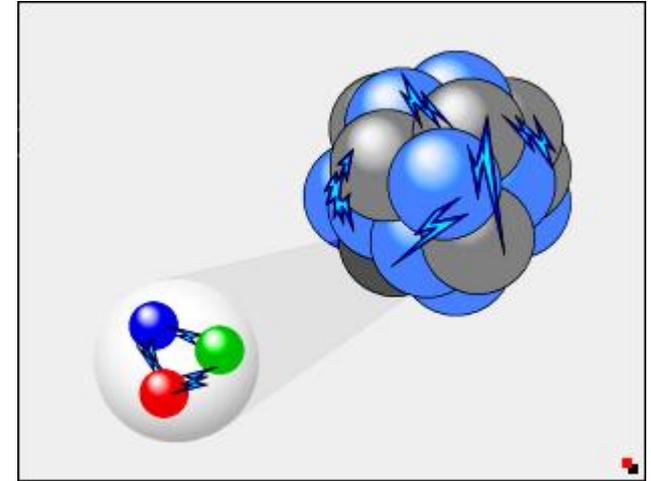
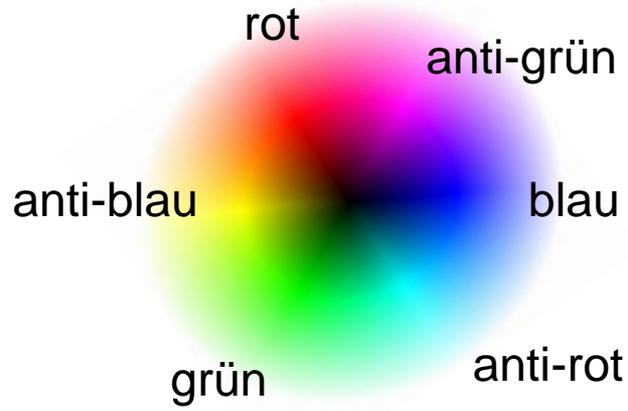
- bindet Protonen und Neutronen im Atomkern
→ Kernkraft
- bindet Quarks im Proton und Neutron
- Quarks tragen “Farbladung”:



- Botenteilchen: farbige Gluonen



- bindet Protonen und Neutronen im Atomkern
 → Kernkraft
- bindet Quarks im Proton und Neutron
- Quarks tragen “Farbladung”:



Farbrad kann gedreht werden, ohne dass sich die Kraft ändert:
 → Symmetrie

- Botenteilchen: farbige Gluonen



Das Standardmodell

PHOTON γ

His eyes red from traveling so fast, the **PHOTON** is a quanta of visible light, a wave/particle that communicates the electromagnetic force, traveling at the speed of light (duh). With a mass and electric charge of zero, it also carries microwaves, radio waves and x-rays.

Acrylic felt with poly fill for minimum mass.

●○○○○○○○○○○○ LIGHT HEAVY

\$9.75 PLUS SHIPPING

W BOSON W^-, W^+

The **W BOSON** is a messenger particle which communicates the weak force. Unlike the photon and gluon bosons, it has a mass. Like the Z boson, it is one of the most short-lived particles known, with a mere 10^{-25} second lifetime. It can be negatively charged (W^-) or positively charged (W^+). Luckily you can have both, as the toy is double-sided.

W- side
W+ side

2-SIDED

Wool felt with gravel fill for maximum mass.

●●●●●●●●●● LIGHT HEAVY

\$16 PLUS SHIPPING

Z BOSON Z

The **Z BOSON** is a very massive carrier particle for the weak force. Unlike its siblings the W^-/W^+ particles, the Z is neutrally charged. Living only 10^{-25} second, the Z quickly decays into other particles.

Discovered in 1983, the Z boson has allowed physicists to further study electroweak theory.

Wool felt with gravel fill for maximum mass.

●●●●●●●●●● LIGHT HEAVY

\$9.75 PLUS SHIPPING

elektro-schwache Wechselwirkung



NP 1979

Glashow, Salam, Weinberg

starke Wechselwirkung Quanten-Chromo-Dynamik

Grundlage der Theorien: das Symmetrieprinzip



Gross, Politzer, Wilczek



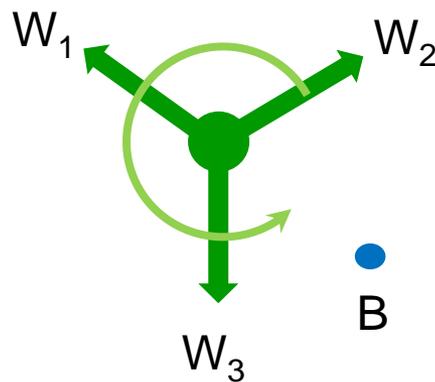
NP 2004

Woher bekommen die Teilchen ihre Masse?

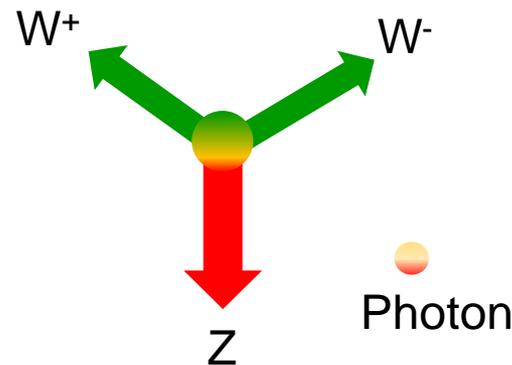
In der ursprünglichen elektroschwachen Theorie sind die Teilchen masselos

Aber: z.B. das Elektron hat eine Masse $\sim 1/1800$ der Protonenmasse
 W und Z Bosonen haben eine Masse $\sim 80-90$ x Protonenmasse

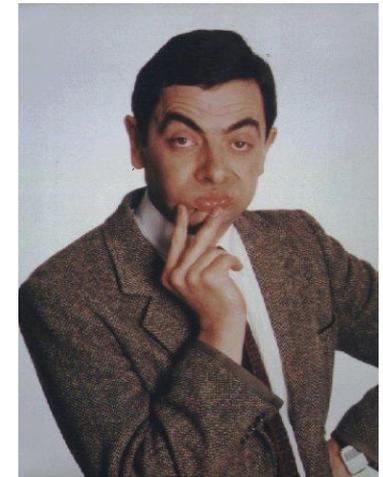
Problem der Theorie: keine Symmetrie mit massiven W- und Z-Teilchen



masselose Teilchen



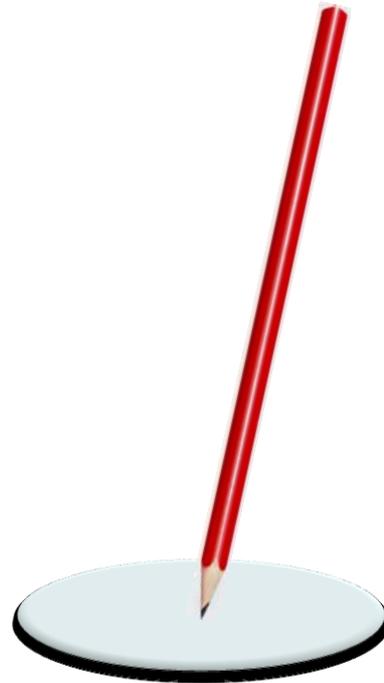
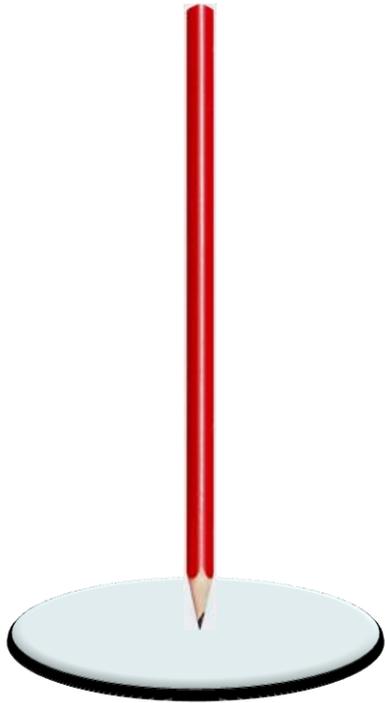
massive W- und Z-Teilchen



Erfinder im Bereich Teilchenphysik: Yoichiro Nambu



NP 2008



Die Theorie
ist symmetrisch

masselose
Teilchen



Der Zustand niedrigster Energie
ist nicht symmetrisch

Teilchen mit Masse

- Englert & Brout, Higgs und Kibble 1964: **Das Higgs-Feld bricht die Symmetrie spontan!**

$$L = -\frac{1}{2}(\nabla\varphi_1)^2 - \frac{1}{2}(\nabla\varphi_2)^2 - V(\varphi_1^2 + \varphi_2^2) - \frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}$$

BROKEN SYMMETRIES AND THE MASSES OF GAUGE BOSONS

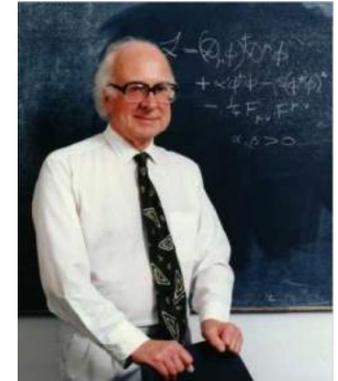
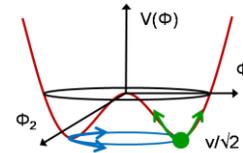
Peter W. Higgs

Tait Institute of Mathematical Physics, University of Edinburgh, Edinburgh, Scotland

(Received 31 August 1964)

- nach Symmetriebrechung: **massive W^\pm und Z Bosonen**
- Anregung des Higgs-Feldes:

Das Higgs-Boson



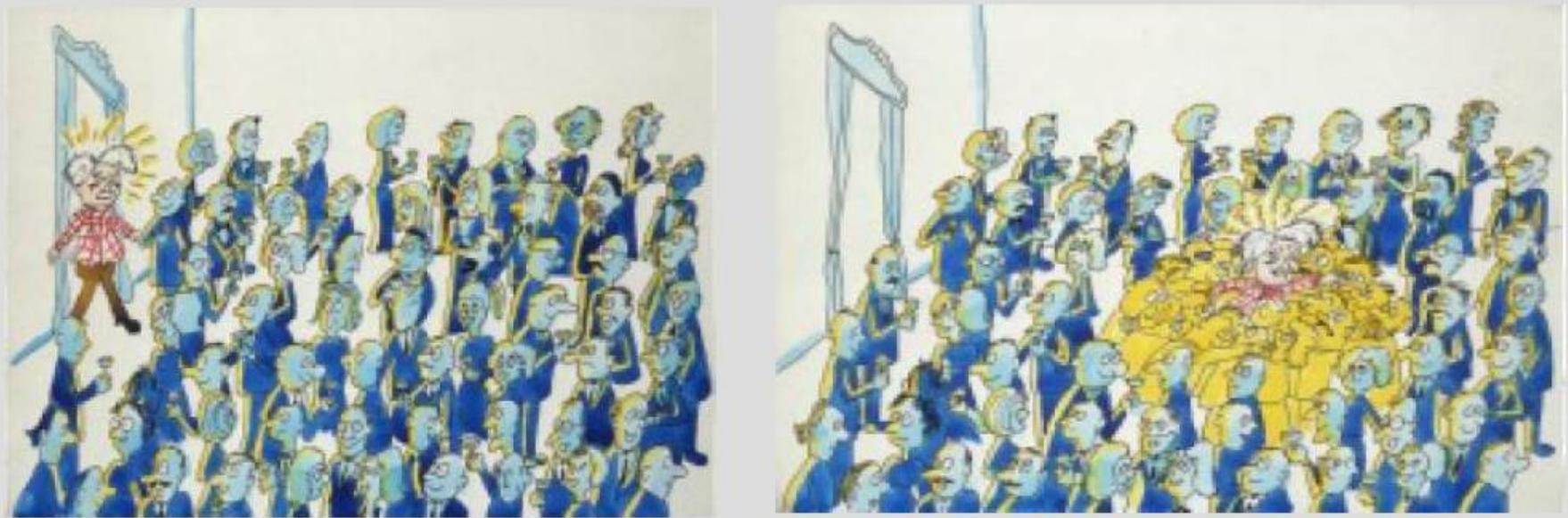
Entdeckung des Higgs-Bosons = Nachweis des Higgs-Feldes

der letzte fehlende Baustein im Standardmodell
das Higgs-Feld verleiht den Teilchen ihre Masse



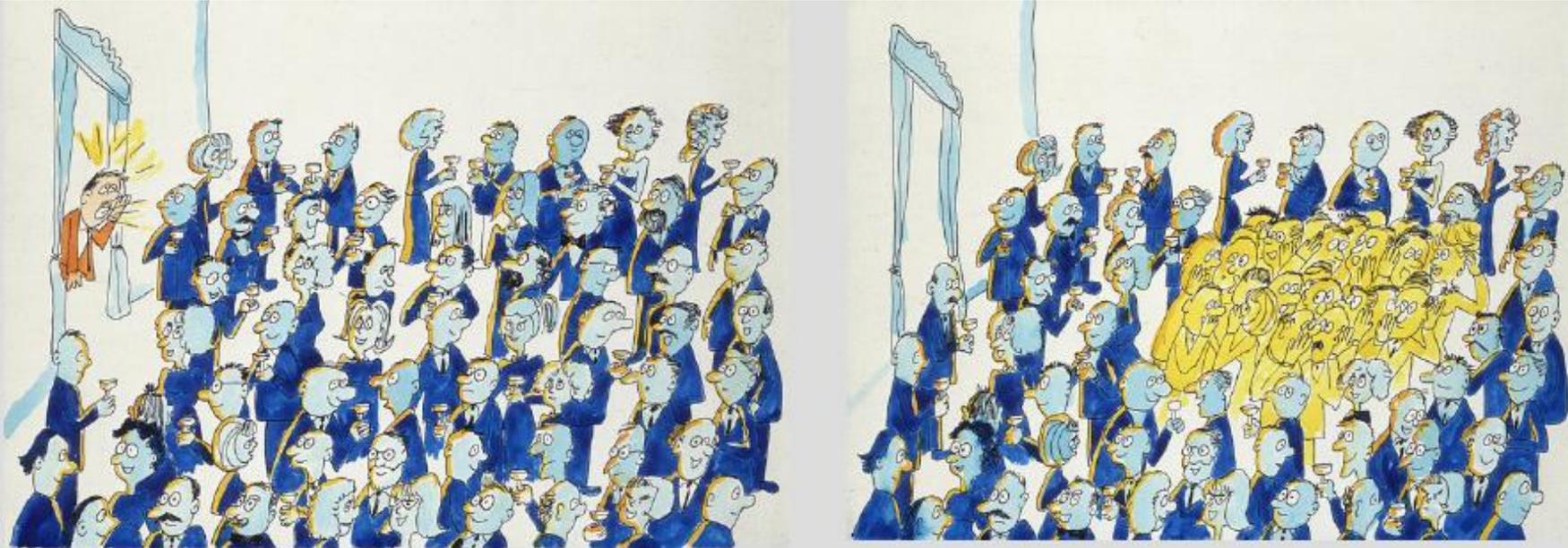
Physik: Das Higgs Feld füllt als Hintergrundfeld das gesamte Universum

Analogie: Man stelle sich einen Raum vor in dem sich Physiker während einer Cocktailparty unterhalten



Physik: Ein in der Theorie ursprünglich masseloses Teilchen erhält durch die Wechselwirkung mit dem Hintergrundfeld eine Masse.

Analogie: Ein berühmter Physiker betritt den Raum. Eine Menschentraube bildet sich um ihn herum, welche seine Geschwindigkeit verlangsamt.



Physik: Das Higgsteilchen ist der Anregungszustand des Hintergrundfeldes.

Analogie: Jemand streut ein Gerücht in den Raum. Es bildet sich wieder eine Mensentraube während sich das Gerücht verbreitet

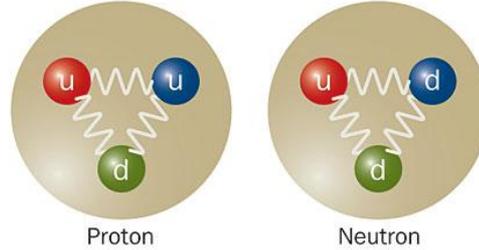


Physik: Masselose Teilchen bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit.

Analogie: Der arme Student der an diesem Abend die Cocktails reichen muss bewegt sich schnell und ungehindert durch den vollen Raum.

Sichtbare Masse im Alltag

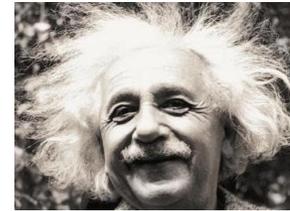
- Summe der Massen aller Elementarteilchen im Körper $\ll M_{\text{Körper}}$



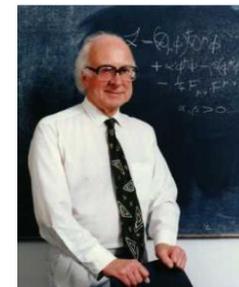
Hauptanteil sind Protonen und Neutronen im Atomkern, aber:
Masse der elementaren Bausteine (Quarks) ist 200 mal kleiner als die Protonmasse!

- Masse von Atomkernen \rightarrow Bindungsenergie der Kernkraft

$$E = mc^2$$



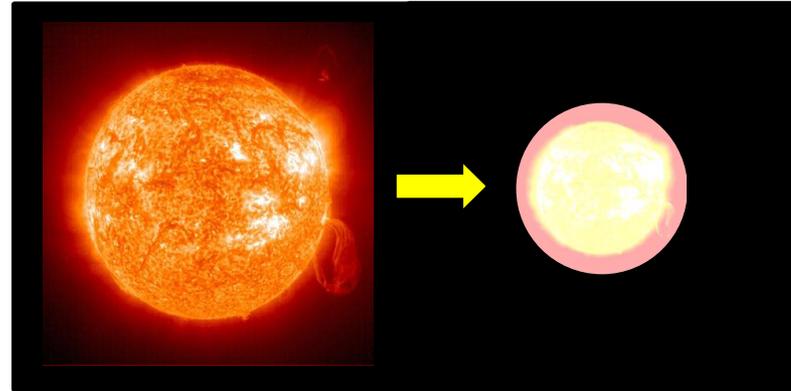
- Masse von Elementarteilchen \rightarrow Higgs-Feld



- Beispiel:

(Cahn 1996)

- Änderung des Hintergrund-Feldes \rightarrow das W-Boson wird schwerer
- Geschwindigkeit von Kernreaktionen ändert sich



- Sonne wird kleiner und heller
- Temperatur der Sonne wird höher

- Sichtbares Licht wird von grün nach ultraviolett verschoben



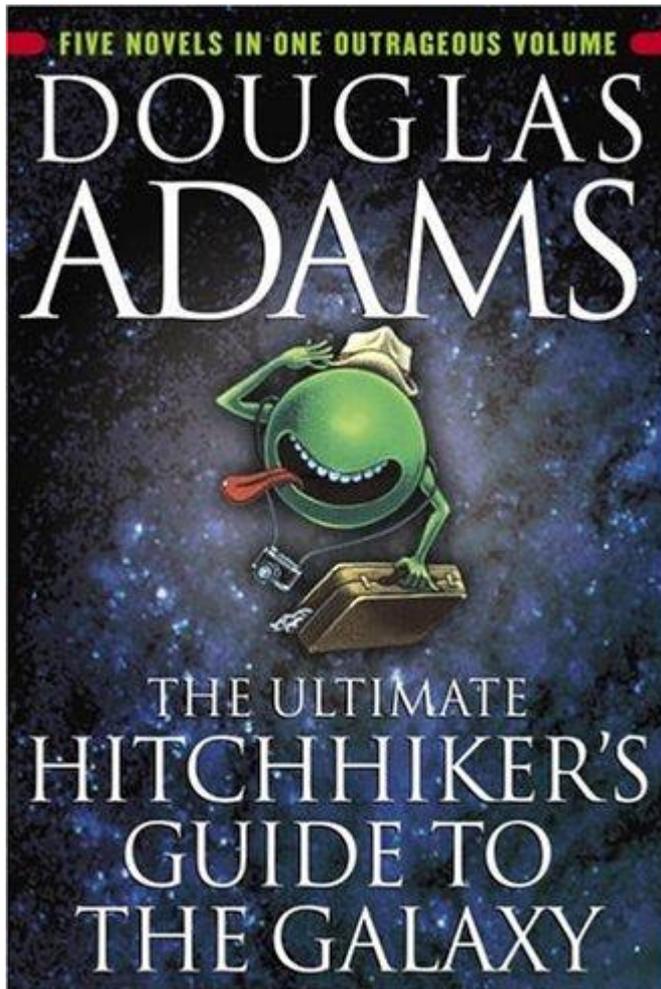
Warum sind Teilchenmassen wichtig?

→ keine Grünpflanzen



→ mehr UV-Schutz





FRONTIERS IN PHYSICS

THE HIGGS HUNTER'S GUIDE

$$h' \rightarrow \begin{cases} \tilde{h}_1 \\ \tilde{h}_2 \end{cases} \quad \frac{g m_A}{\cos \theta_w} \left(\frac{1}{2} - c_w \sin^2 \theta_w \right) \sin(\alpha + \beta) \quad \frac{g m_B^2}{m_A \sin \beta} \cos \alpha$$

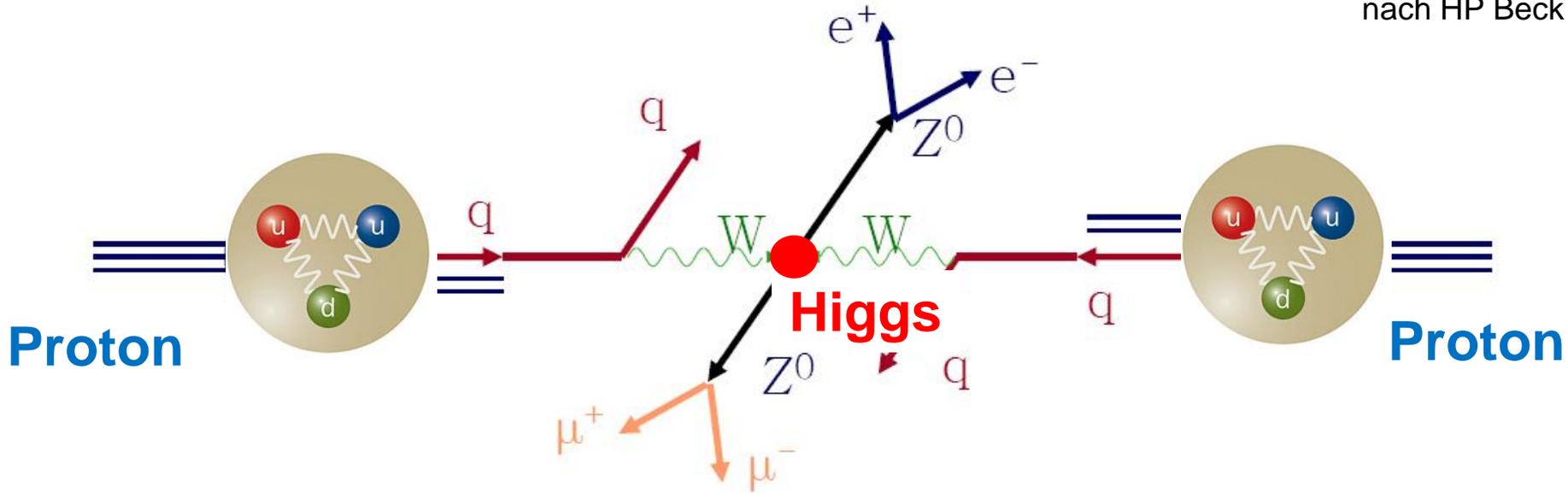
ABP

John F. Gunion
Howard E. Haber
Gordon Kane
Sally Dawson

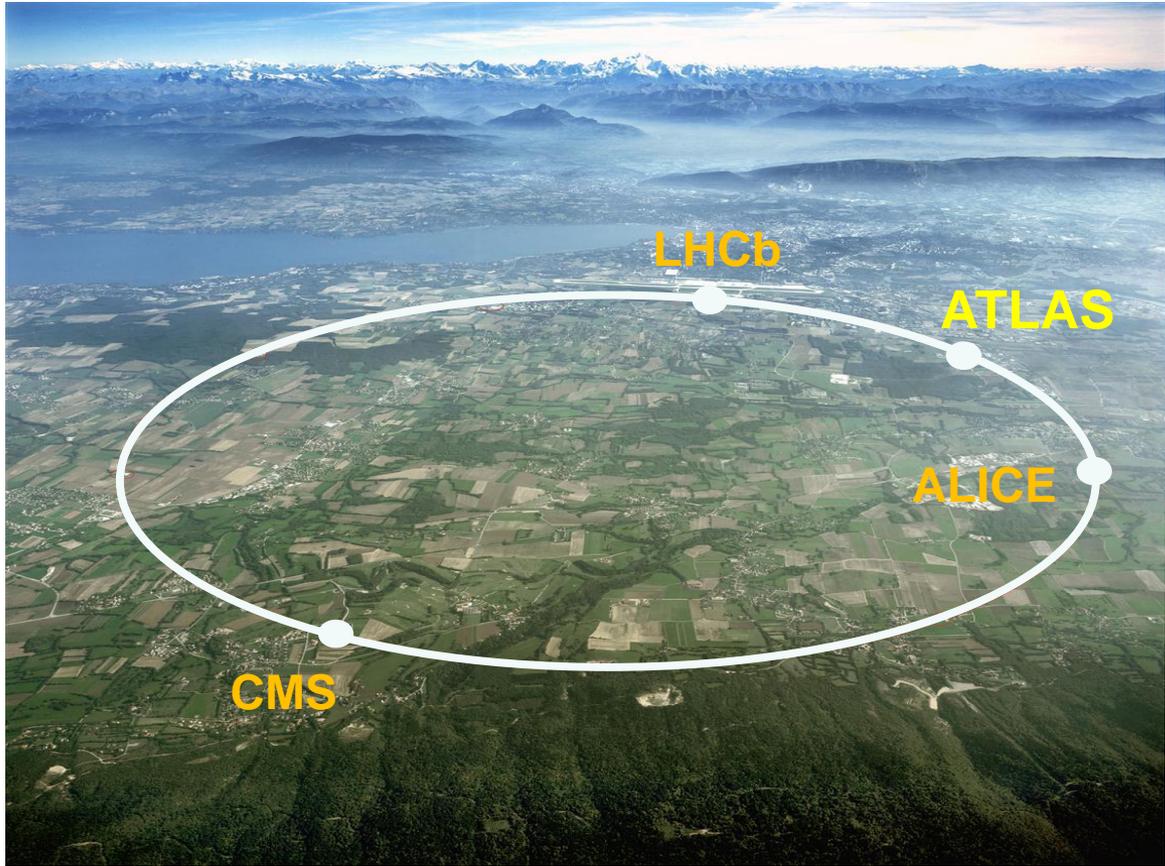
Die Suche nach dem Higgs-Boson



nach HP Beck



Der Large Hadron Collider in Genf



26.7 km Umfang
Tunnel in 50-100 m Tiefe
4 Experimente

Protonen mit 99.9999991 %
der Lichtgeschwindigkeit

- 2808 Teilchen-Pakete mit je 10^{11} Protonen pro Strahl
- alle 25 ns eine Strahl-Kreuzung mit bis zu 23 Proton-Proton-Stößen

- Energie pro Strahl: 362 MJ
→ Energie zum Schmelzen von 500 kg Kupfer

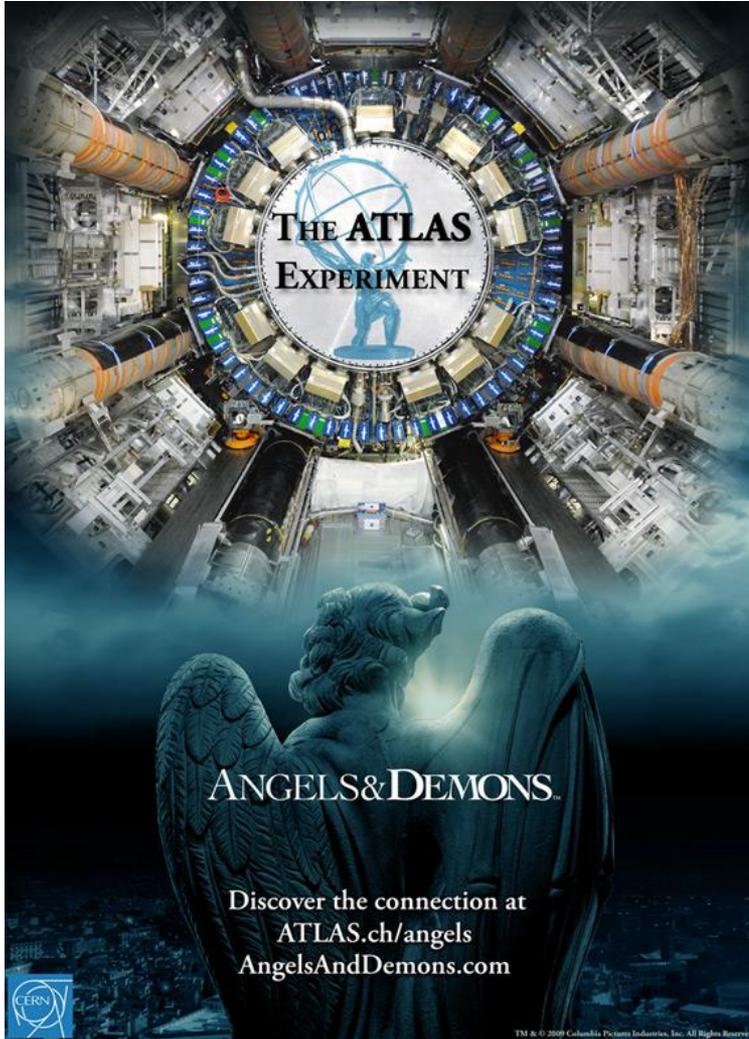




- 1232 supraleitende Dipolmagnete (15 m, 35 t):
 - gekühlt auf 1.9 Kelvin (-271 °C)
 - max. Magnetfeldstärke: 8.35 T (170.000 x Erdmagnetfeld)
- 120 t supra-fluides Helium
- gespeicherte Energie: 11 GJ
- Stromverbrauch 120 MW

Viele Besucher am CERN...





SPIEGEL ONLINE WISSENSCHAFT

NACHRICHTEN VIDEO ENGLISH EINESTAGES FORUM SPIEGEL WISSEN

Home | Politik | Wirtschaft | Panorama | Sport | Kultur | Netzwelt | Wiss

Auto

Nachrichten > Wissenschaft > Mensch & Technik

Drucken | Senden | Bookmark | Leserbrief | Merken
07.09.2008

SUPERBESCHLEUNIGER LHC

Schrift:

Die Jagd nach dem Gottesteilchen beginnt

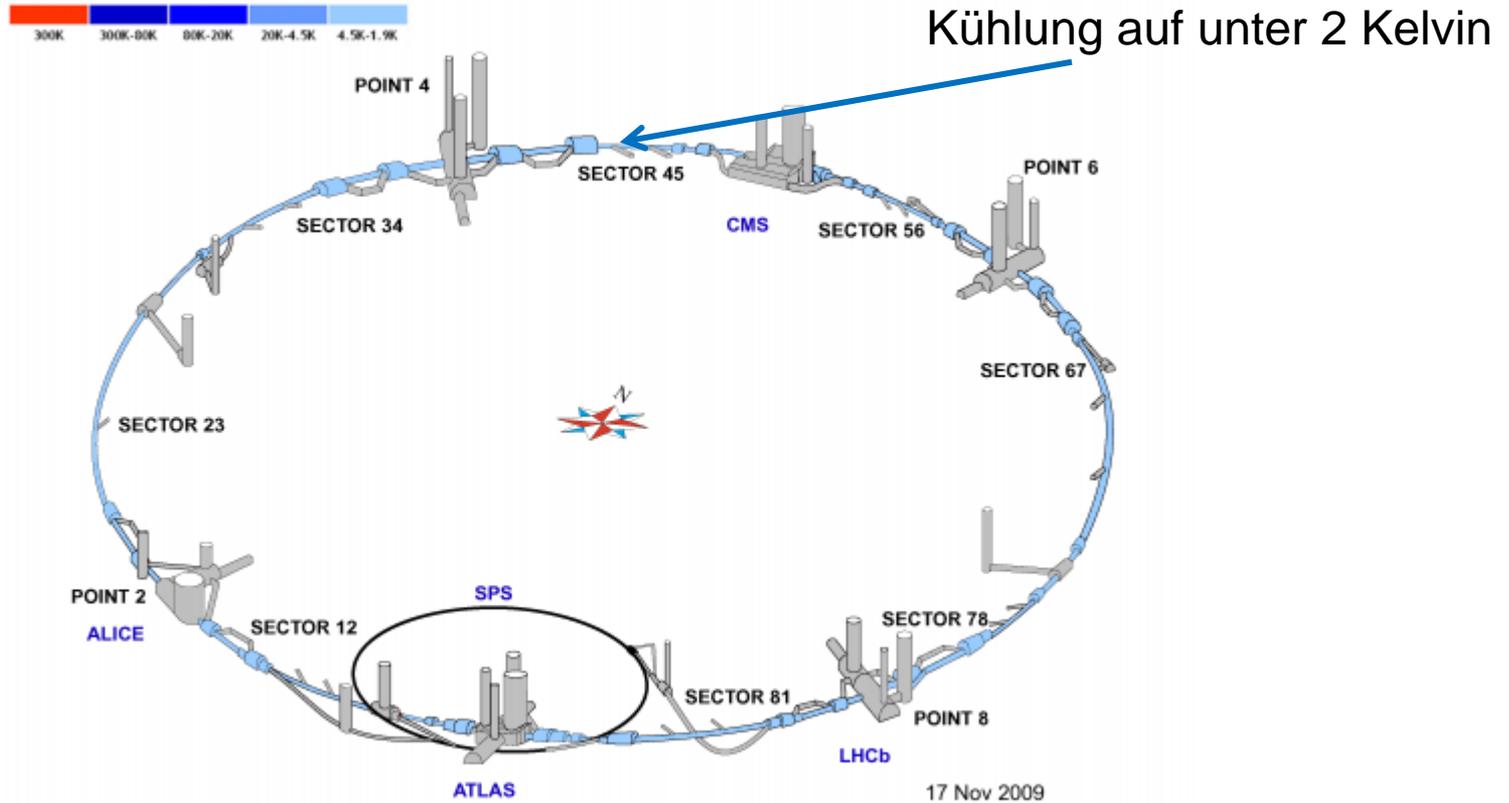
Von *Holger Dambeck*

Am Mittwoch wird der LHC-Beschleuniger in Genf angeworfen. Ein Ziel des Milliarden-Projekts: der Nachweis des Higgs-Bosons, auch Gottesteilchen genannt. Sein Erfinder Peter Higgs könnte dafür den Nobelpreis bekommen - obwohl er nur ein mittelmäßiger Physiker war.

aber: 53 Feldmagnete wurden zerstört aufgrund eines kurzgeschlossenen Supraleiters und explosionsartig entweichendem Helium



Info:
LHC 4,7 Mrd CHF
Experimente je 1,1 Mrd CHF

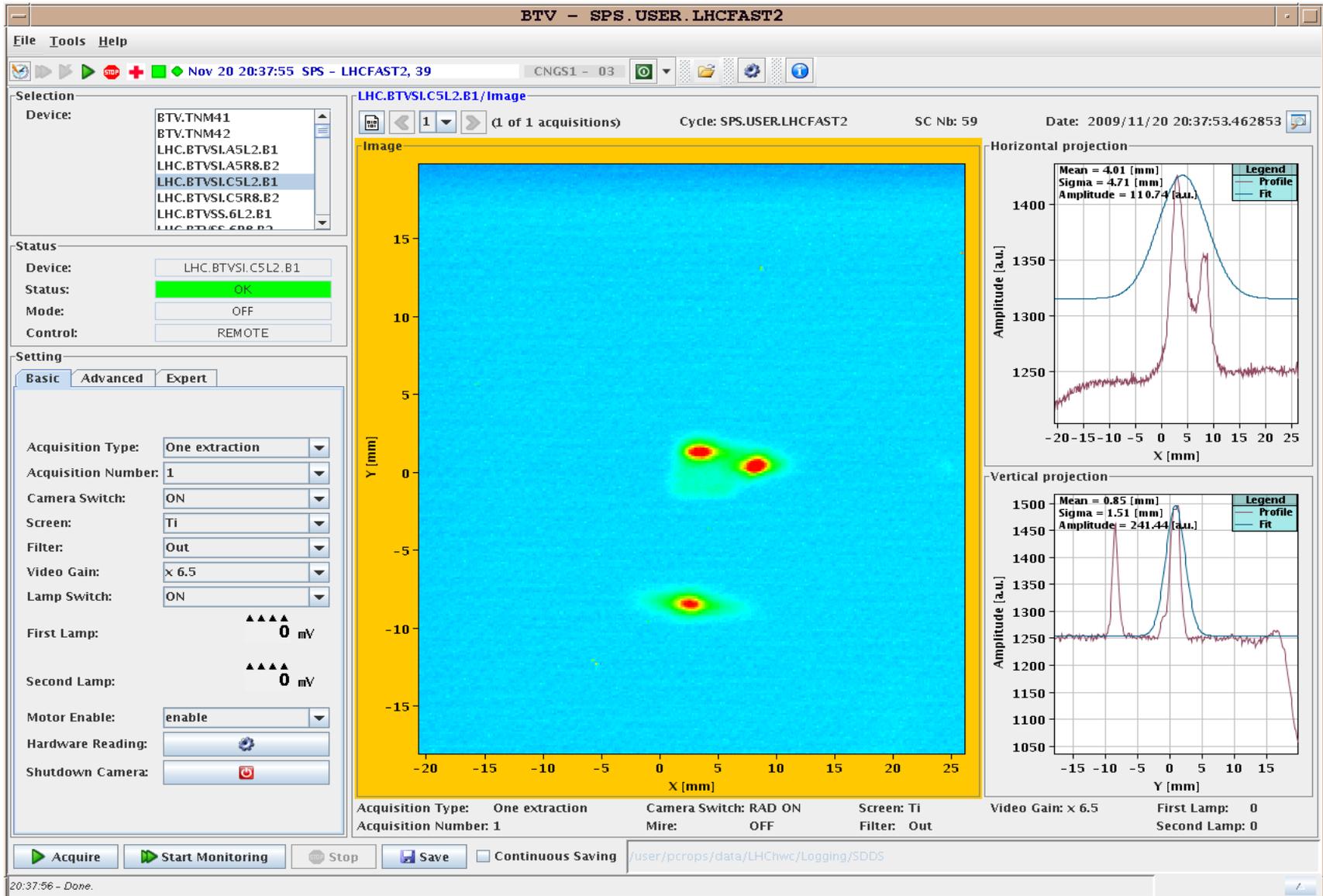


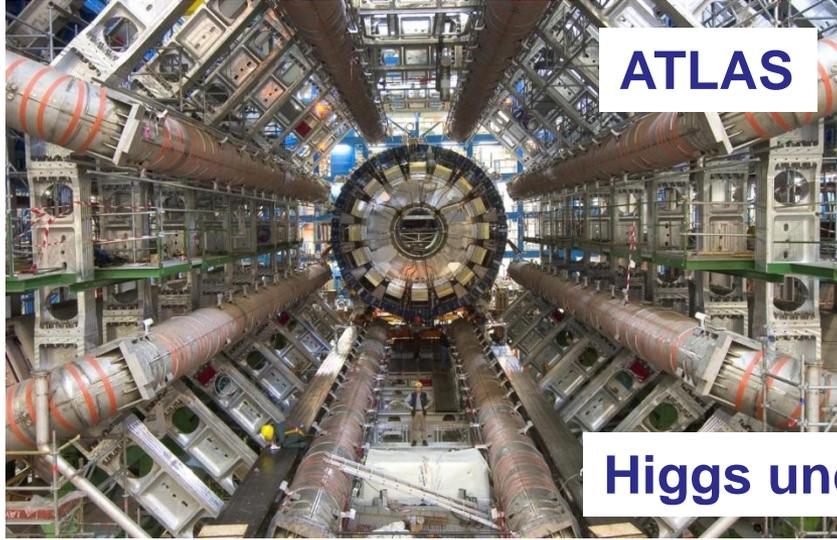
Neustart: November 2009

zunächst bei 2 x 450 GeV Einschuss-Energie,
dann **Energier rekord bei 2 x 1180 GeV**

in 2010 bei halber Maximal-Energie 2 x 3500 GeV danach 2 x 5000 GeV
nach weiteren Reparaturen (>2013) → volle Energie

Die ersten 2 vollen Umläufe des Protonstrahls:





Higgs und mehr ...

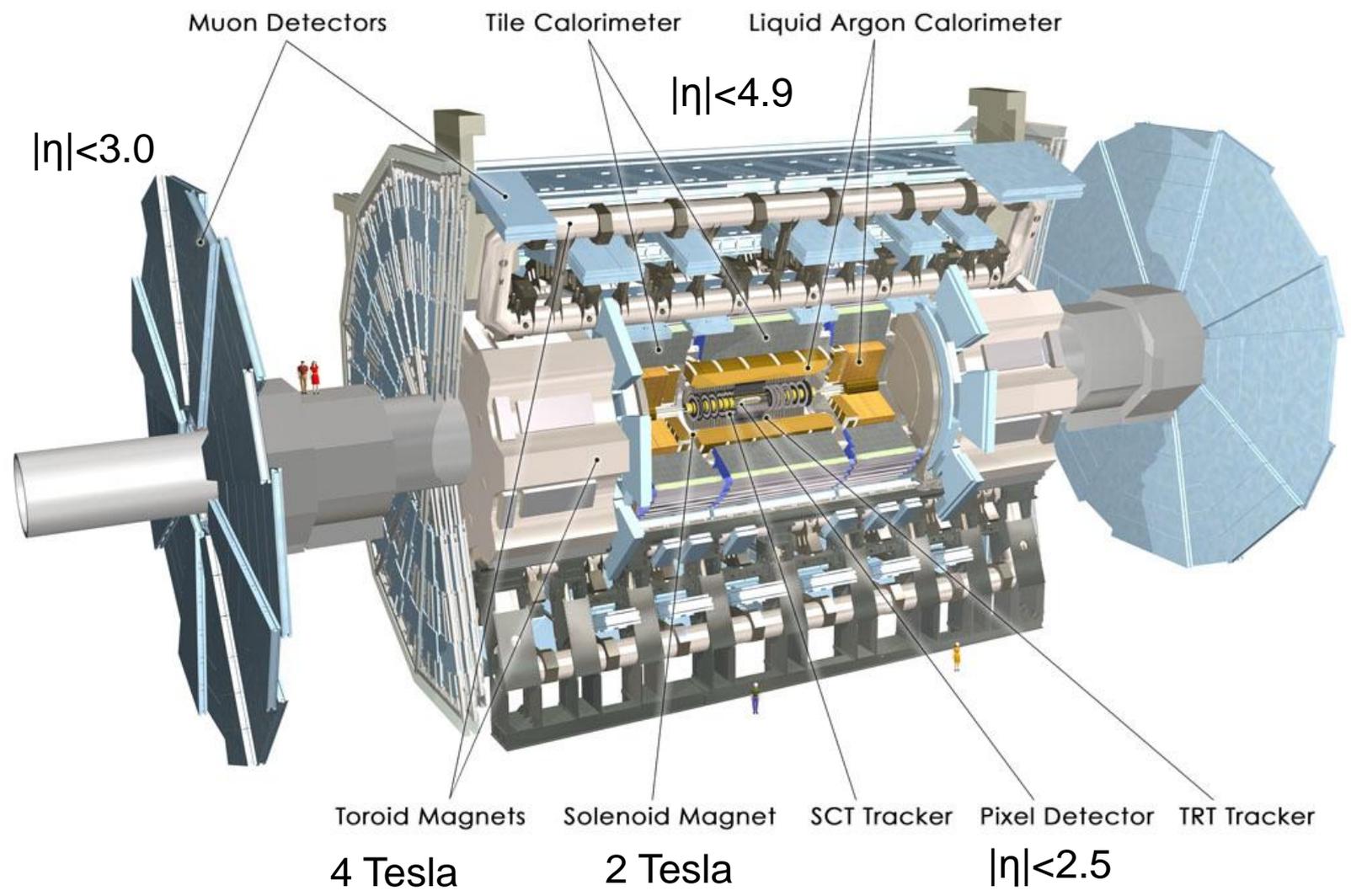


Der ATLAS-Detektor



• Größe: 46m x 22m x 22m

• Gewicht: 7000 t



$$\eta = -\ln(\tan(\theta/2))$$

ATLAS Kollaboration

(Status April 2008)

37 Länder
167 Institute (14 aus Deutschland)
2200 Wissenschaftliche Autoren insgesamt
(1750 mit PhD)



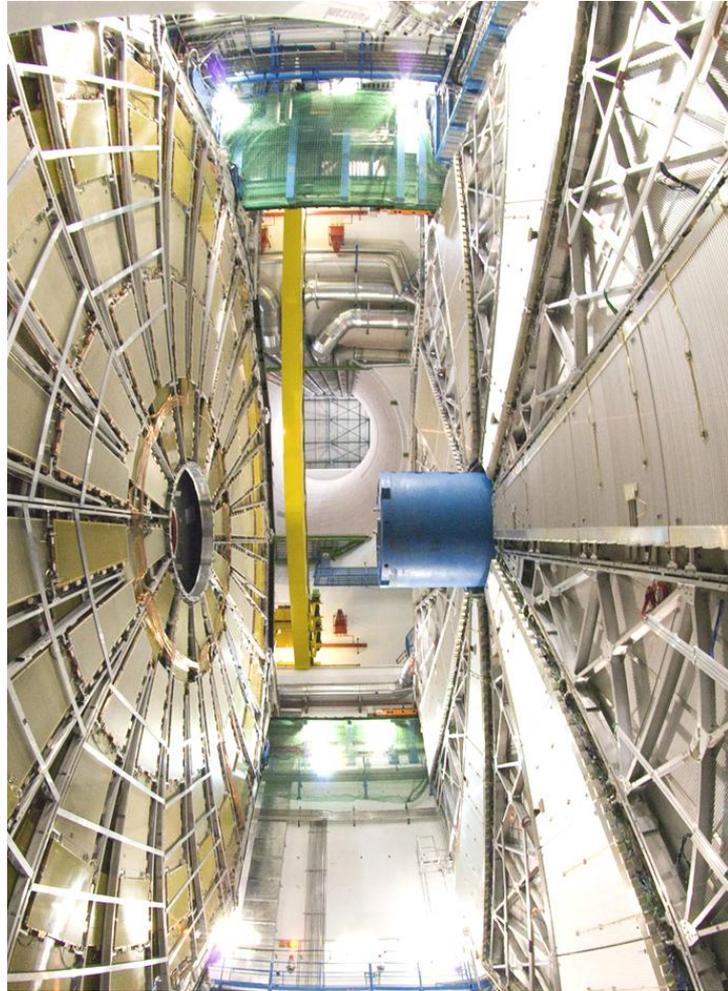
Albany, Alberta, NIKHEF Amsterdam, Ankara, LAPP Ancey, Argonne NL, Arizona, UT Arlington, Athens, NTU Athens, Baku, IFAE Barcelona, Belgrade, Bergen, Berkeley LBL and UC, **HU Berlin**, Bern, Birmingham, UAN Bogota, Bologna, **Bonn**, Boston, Brandeis, Bratislava/SAS Kosice, Brookhaven NL, Buenos Aires, Bucharest, Cambridge, Carleton, Casablanca/Rabat, CERN, Chinese Cluster, Chicago, Chile, Clermont-Ferrand, Columbia, NBI Copenhagen, Cosenza, AGH UST Cracow, IFJ PAN Cracow, **DESY**, **Dortmund**, **TU Dresden**, JINR Dubna, Duke, Frascati, **Freiburg**, Geneva, Genoa, **Giessen**, Glasgow, **Göttingen**, LPSC Grenoble, Technion Haifa, Hampton, Harvard, **Heidelberg**, Hiroshima, Hiroshima IT, Indiana, Innsbruck, Iowa SU, Irvine UC, Istanbul Bogazici, KEK, Kobe, Kyoto, Kyoto UE, Lancaster, UN La Plata, Lecce, Lisbon LIP, Liverpool, Ljubljana, QMW London, RHBNC London, UC London, Lund, UA Madrid, **Mainz**, Manchester, **Mannheim**, CPPM Marseille, Massachusetts, MIT, Melbourne, Michigan, Michigan SU, Milano, Minsk NAS, Minsk NCPHEP, Montreal, McGill Montreal, FIAN Moscow, ITEP Moscow, MEPhI Moscow, MSU Moscow, **Munich LMU**, **MPI Munich**, Nagasaki IAS, Nagoya, Naples, New Mexico, New York, Nijmegen, BINP Novosibirsk, Ohio SU, Okayama, Oklahoma, Oklahoma SU, Oregon, LAL Orsay, Osaka, Oslo, Oxford, Paris VI and VII, Pavia, Pennsylvania, Pisa, Pittsburgh, CAS Prague, CU Prague, IHEP Protvino, Regina, Ritsumeikan, UFRJ Rio de Janeiro, Rome I, Rome II, Rome III, Rutherford Appleton Laboratory, DAPNIA Saclay, Santa Cruz UC, Sheffield, Shinshu, **Siegen**, Simon Fraser Burnaby, SLAC, Southern Methodist Dallas, NPI Petersburg, Stockholm, KTH Stockholm, Stony Brook, Sydney, AS Taipei, Tbilisi, Tel Aviv, Thessaloniki, Tokyo ICEPP, Tokyo MU, Toronto, TRIUMF, Tsukuba, Tufts, Udine/ICTP, Uppsala, Urbana UI, Valencia, UBC Vancouver, Victoria, Washington, Weizmann Rehovot, FH Wiener Neustadt, Wisconsin, **Wuppertal**, Yale, Yerevan



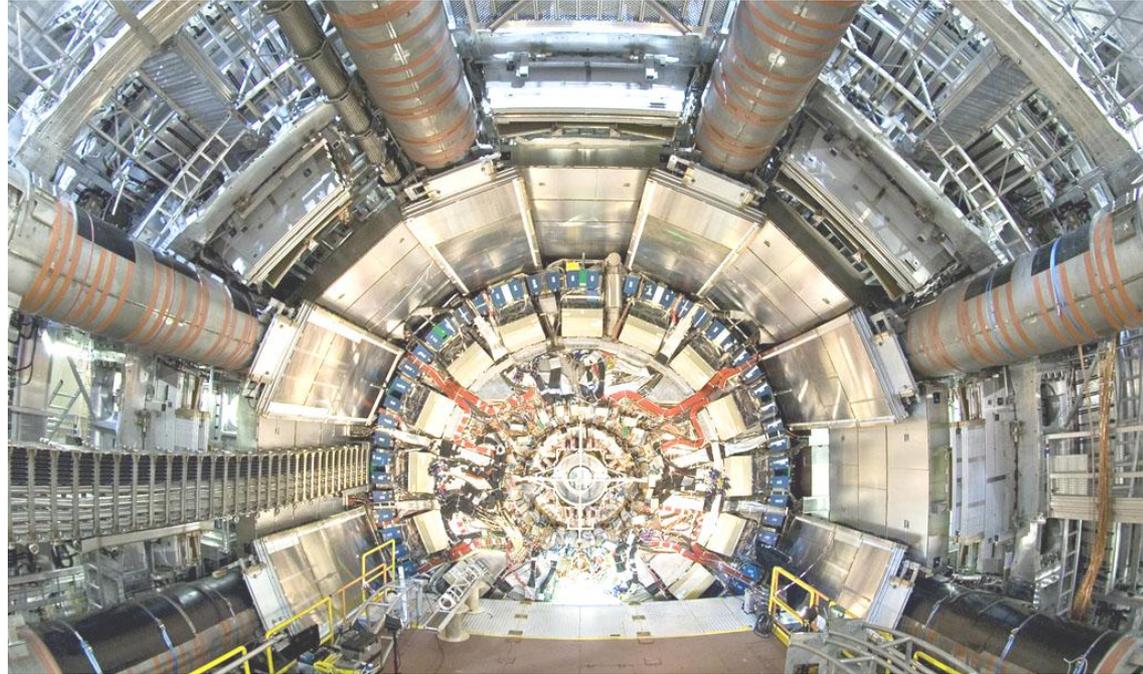
**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**



Der ATLAS-Detektor beim Aufbau



Toroid-Magnet - LAr-Kalorimeter - SCT Endkappe

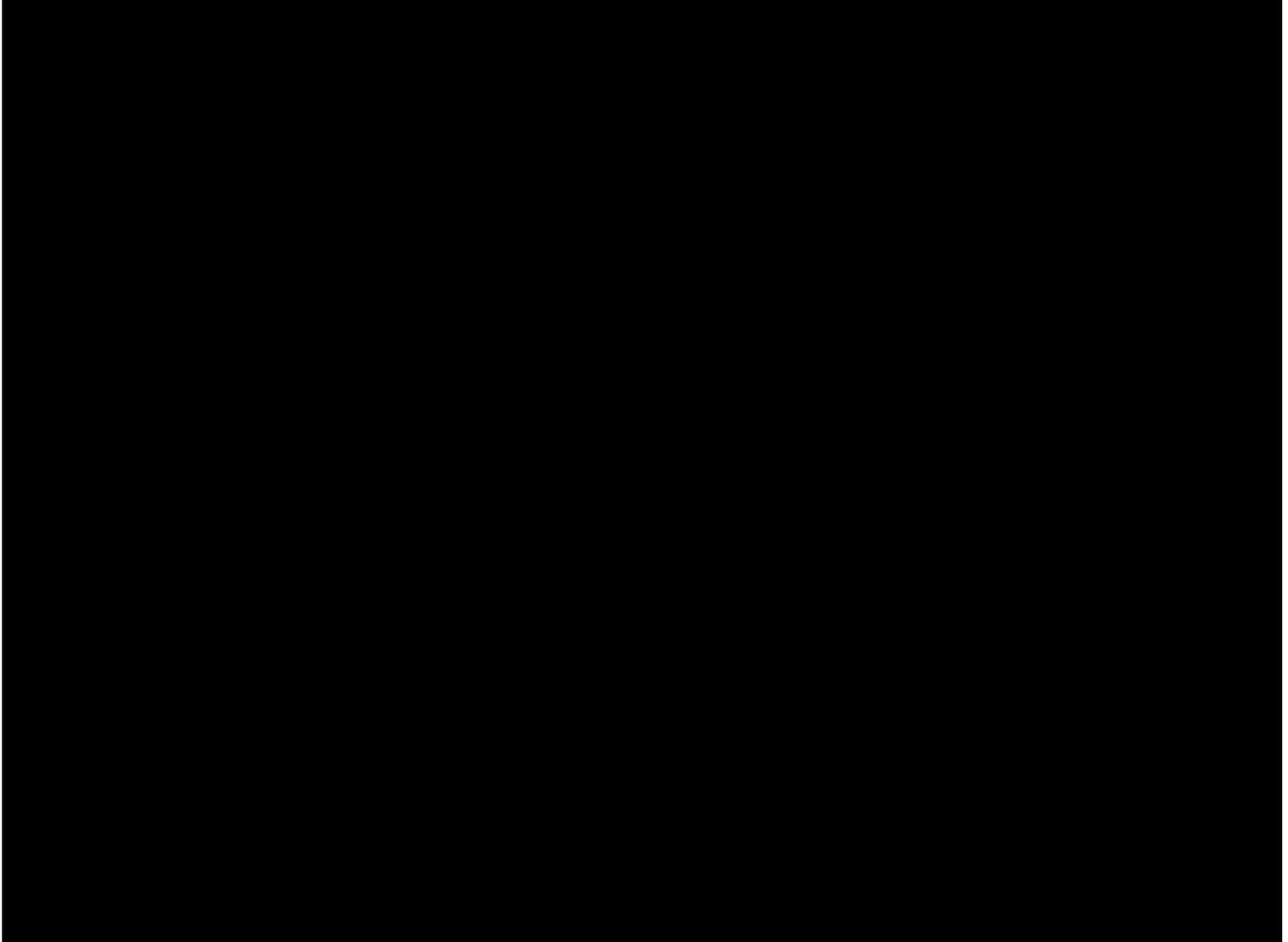


TGC und MDT Myon-Spektrometer

MDT=Monitored Drift Tubes
TGC=Thin Gap Chambers
SCT=Semiconductor Tracker



Pixel Detektor = Digitalkamera für 40 Mio Bilder pro Sekunde

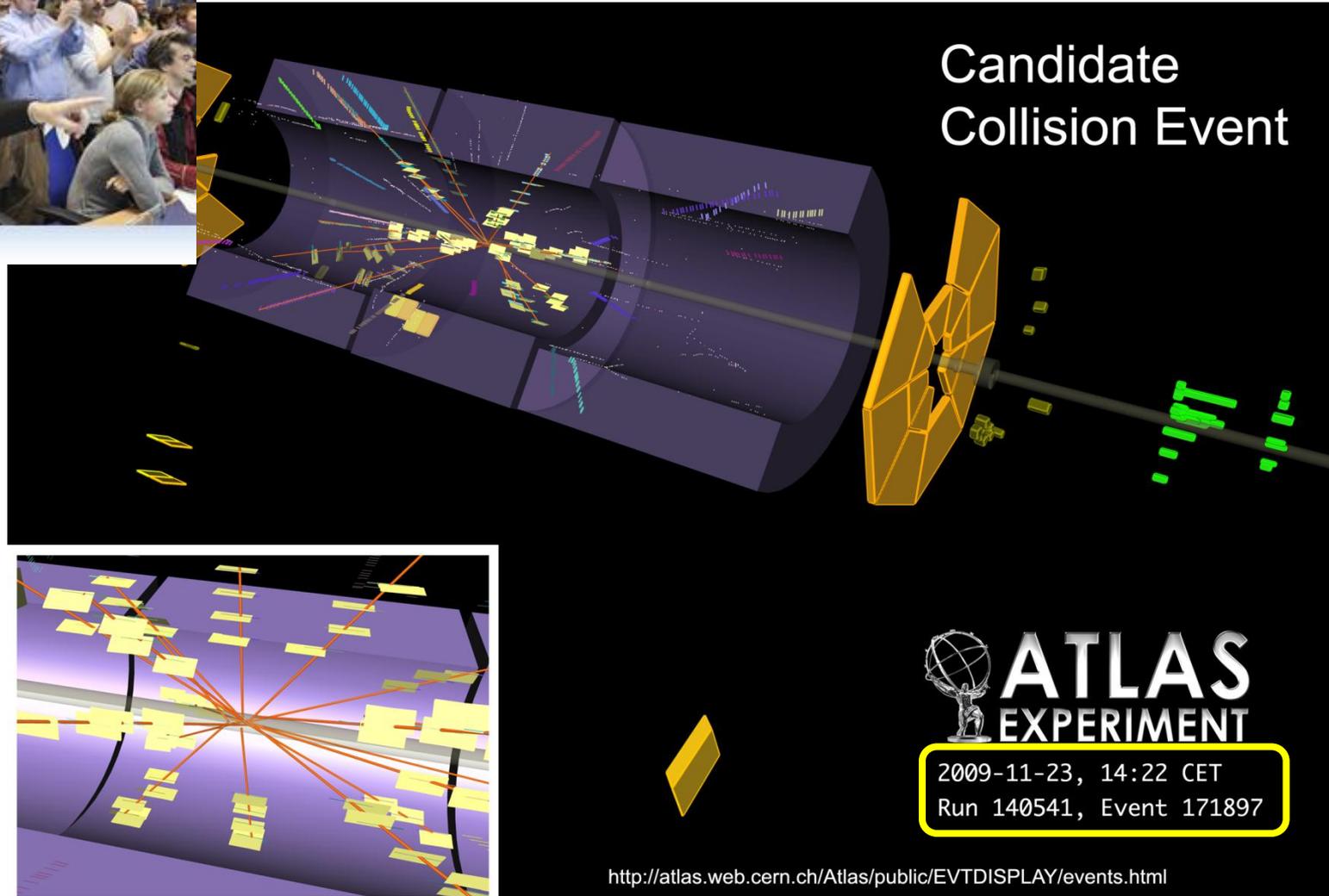


Die erste Proton-Proton-Kollision in ATLAS



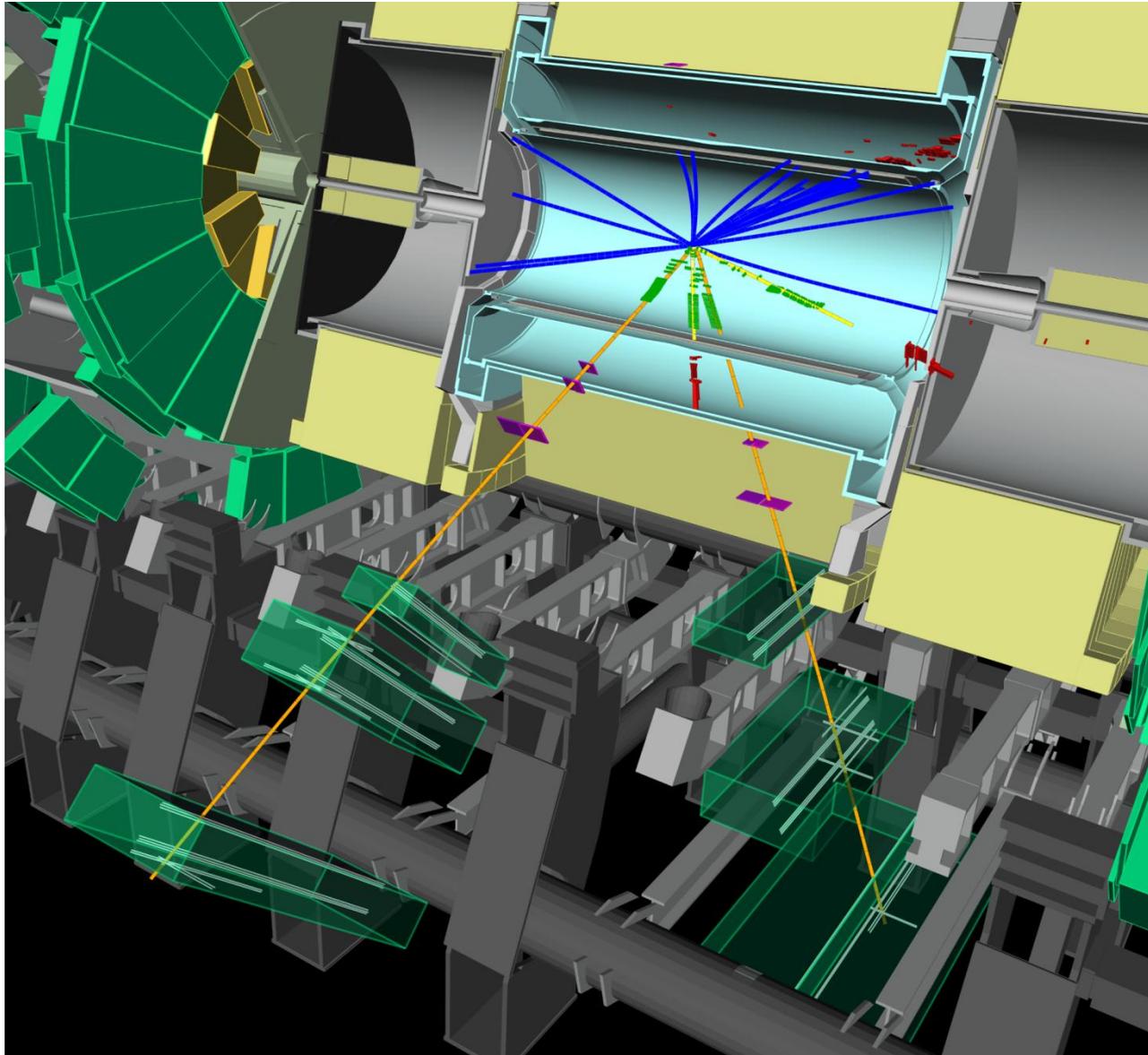
23. November 2009 um 14:22

Candidate
Collision Event



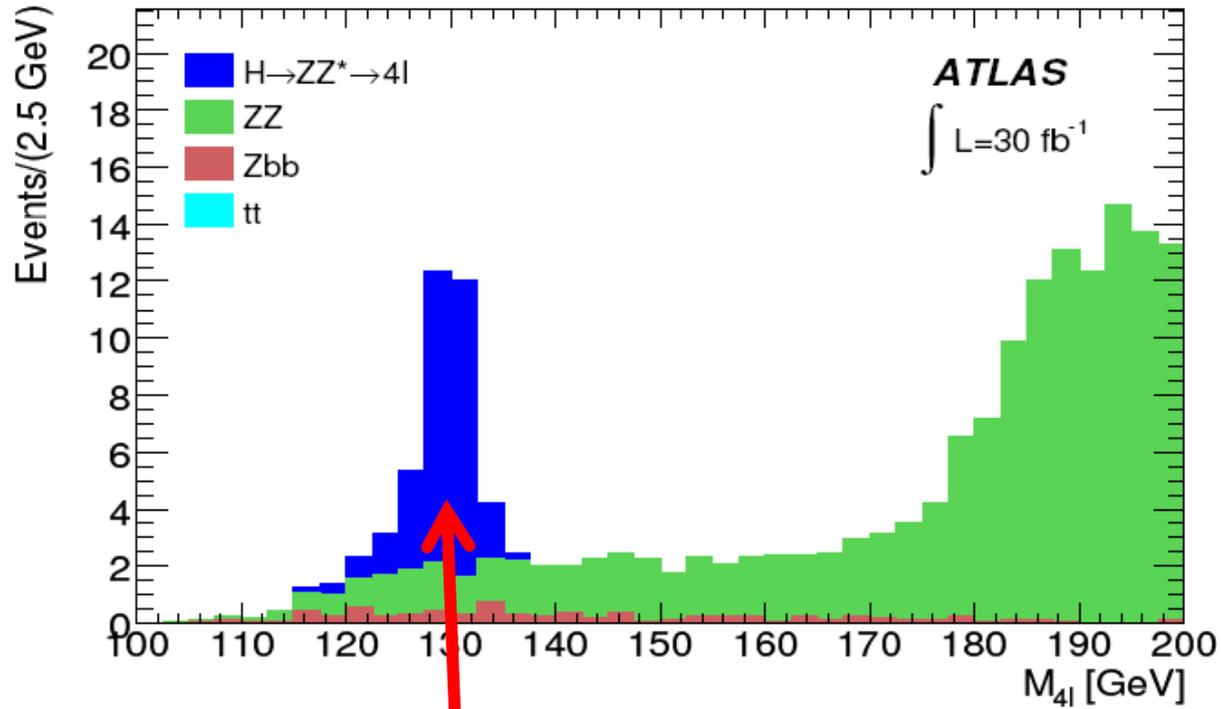


$$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\ell$$



Simuliertes Ereignis
 $H \rightarrow ZZ \rightarrow e^+e^-\mu^+\mu^-$
mit $m_H = 130 \text{ GeV}$

- Erstellen eines Massenspektrums:



Suche nach dem "Higgs peak"

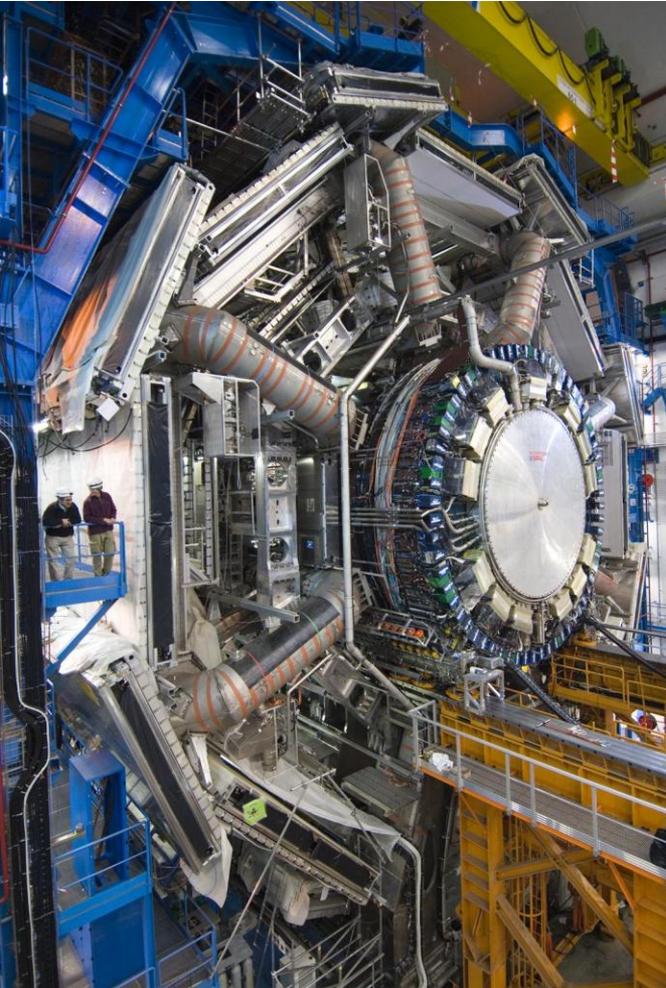
Die Higgs-Schatzkarte

schon mit anderen
Teilchendetektoren
gesucht und nichts
gefunden



Mit dem LHC wird
die ganze
Higgs-Landkarte
abgesucht

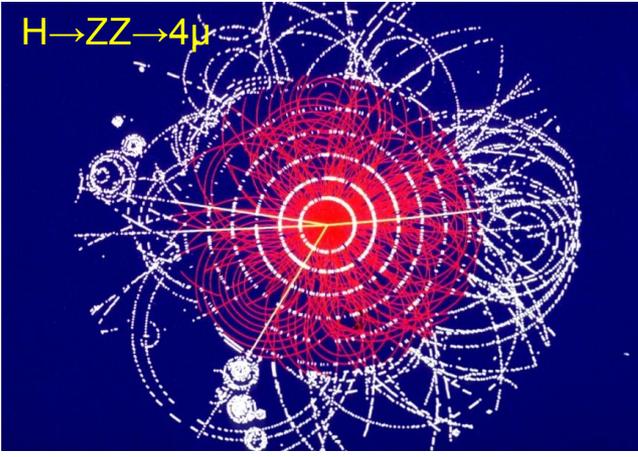
Das Higgs kann nicht entkommen ... wenn es existiert



- Der LHC und die Teilchendetektoren sind gestartet
- Entdecken wir das Higgs-Boson?
- Finden wir den Ursprung der Masse der Elementarteilchen?
- Spannende Zeiten brechen an für die Teilchenphysik



Das Higgs-Boson kann nicht entkommen...

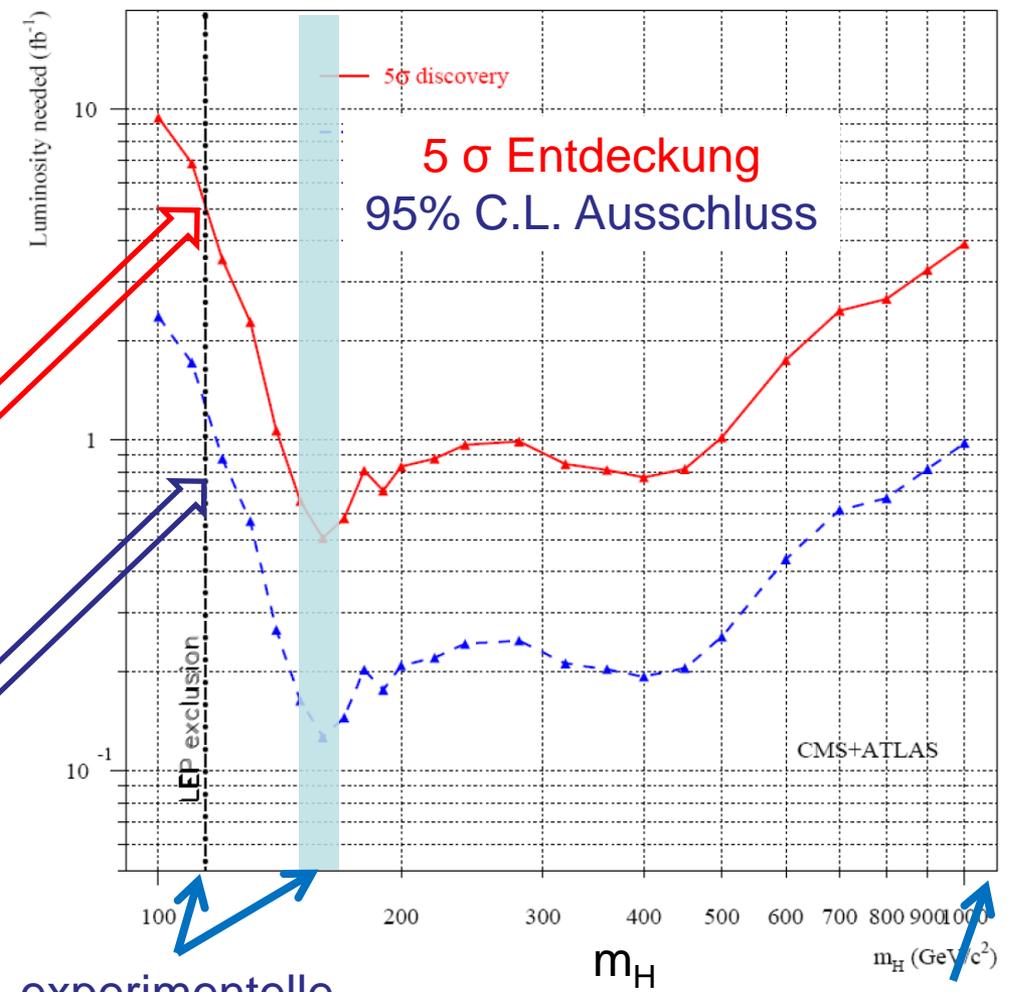


$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$

... wenn es existiert

3 sehr gute Jahre*

1 sehr gutes Jahr*



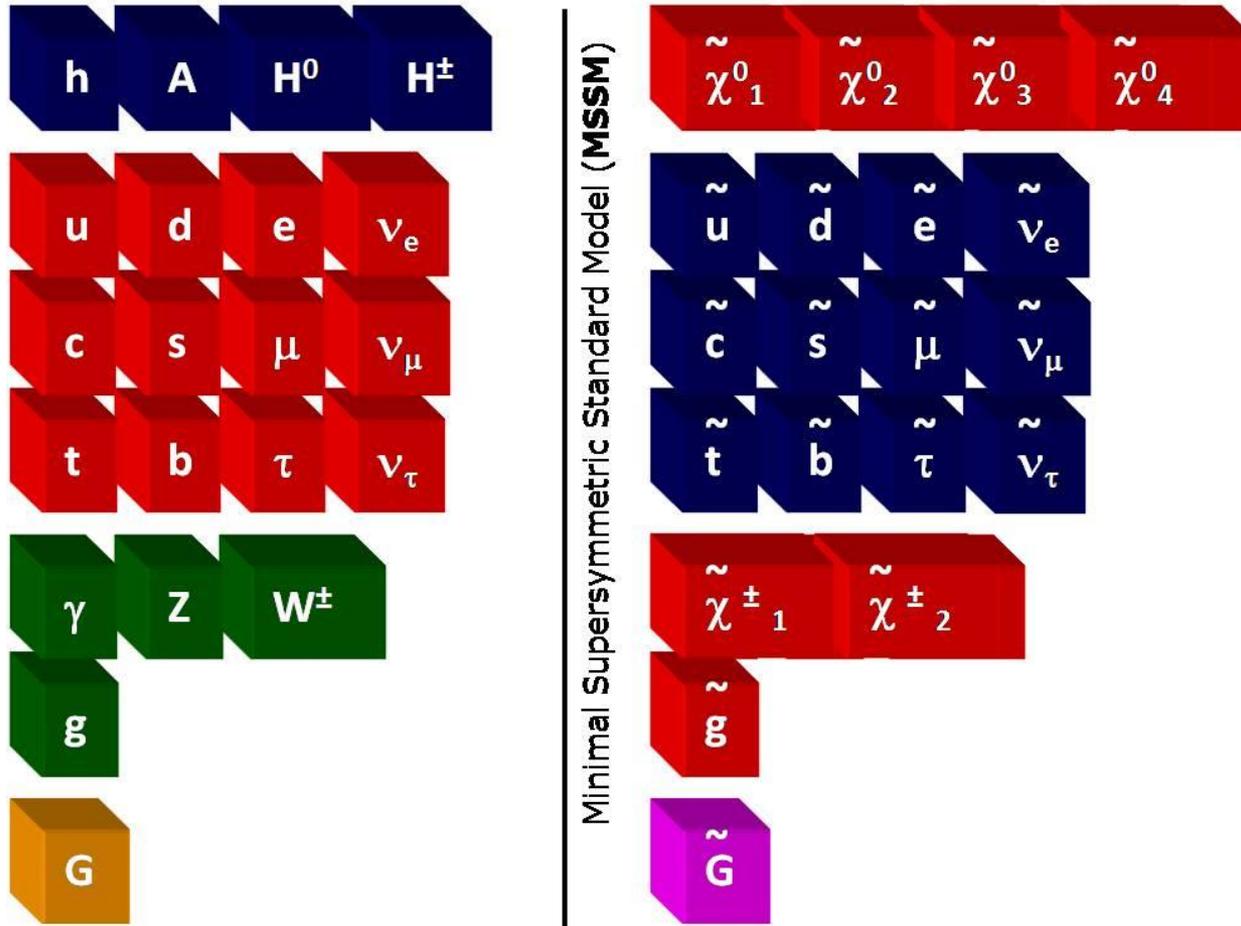
experimentelle
Ausschluss-Grenzen

theoretische
Grenze

*leider nicht das erste Jahr

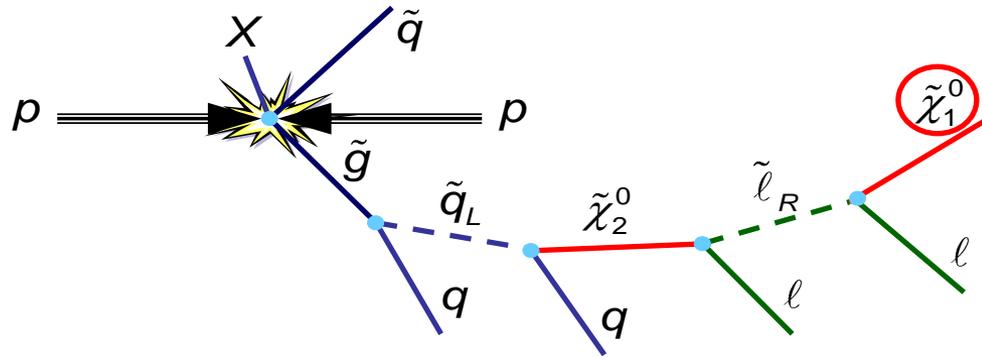
Gibt es weitere Symmetrien?

- **Supersymmetrie:** Fermion \leftrightarrow Boson
mehr Higgs-Bosonen (5 !) und ein Superpartner für jedes Teilchen

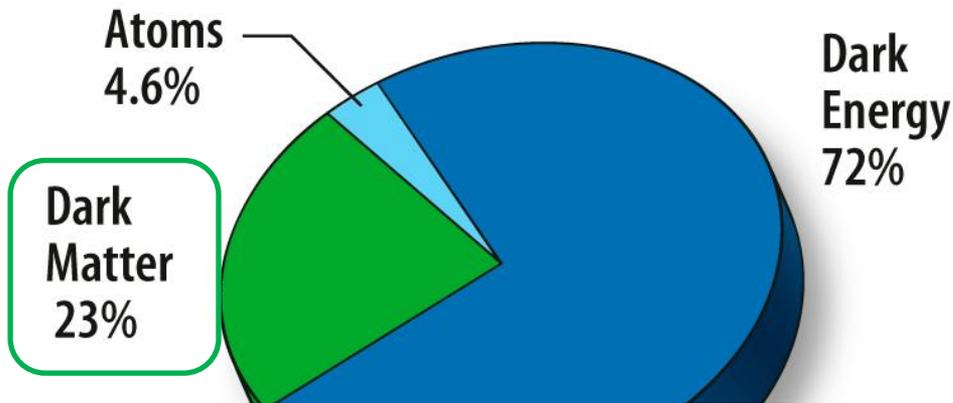
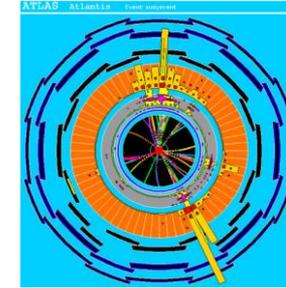


- löst einige fundamentale Theorie-Probleme mit dem Higgs-Boson des Standardmodells
- hat auch Konsequenzen in der Kosmologie

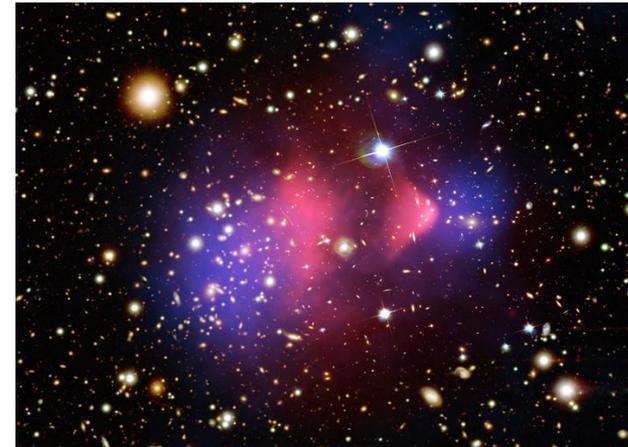
Suche nach Supersymmetrischen Teilchen



leichtestes SUSY-Teilchen entkommt
→ fehlende Energie im Detektor



nicht leuchtende, unbekannte, schwere Materiebausteine



- Teilchenphysik und Kosmologie sind eng verbunden