The background of the slide is a complex visualization of particle detector data. It features a central point from which a dense network of thin, multi-colored lines (blue, yellow, orange, and red) radiates outwards, resembling a starburst or a complex web. The lines vary in thickness and direction, creating a sense of dynamic energy. The background is a dark blue, speckled with small white squares, which likely represent individual detector elements or data points. The overall aesthetic is scientific and high-tech.

Jagd auf Higgs und Co.

Claudia-Elisabeth Wulz
Institut für Hochenergiephysik
Österreichische Akademie der Wissenschaften

Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt
Immenstaad, 29. März 2007, 20:00



Fundamentale Fragen

- **Woraus besteht das Universum? Aus welchen Teilchen besteht die Materie ?**
- **Welche Wechselwirkungen herrschen zwischen diesen Teilchen? Was hält das Universum zusammen?**
- **Woher kommen wir, wohin gehen wir?**

Die fundamentalen Wechselwirkungen

Wechselwirkung	Reichweite	Vermittler
Stark	10^{-15} m	 Gluonen
Schwach	10^{-18} m	W, Z 
Elektromagnetisch		Photon 
Gravitationell		Graviton 

Theory of Everything ?

Ziel: Vereinigung aller fundamentalen Kräfte bei hohen Energien, wie bis 10^{-43} s (Planckzeit) nach dem Urknall

Vereinigung von Elektrizität und Magnetismus -> **elektromagnetische Wechselwirkung:** J. C. Maxwell et al.

Vereinigung von elektromagnetischer und schwacher Wechselwirkung (**elektroschwache Wechselwirkung**):

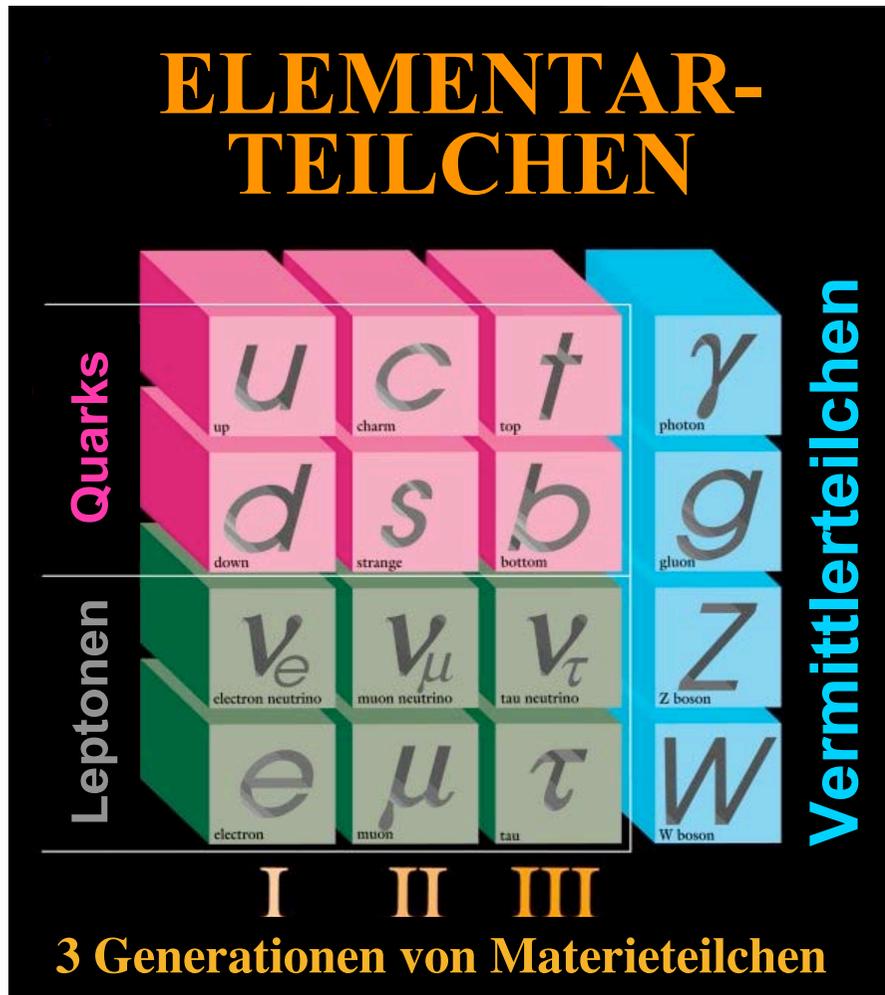
Theorie: S. Glashow, A. Salam, S. Weinberg

Experiment: C. Rubbia et al. (CERN-Experimente UA1, UA2)

Grand Unified Theories ? : inkludieren zusätzlich die **starke Wechselwirkung**

Theory of Everything ? : inkludieren auch **Gravitation**

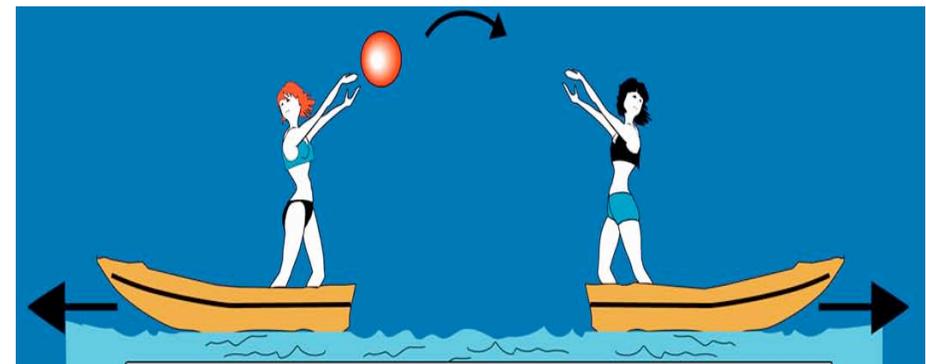
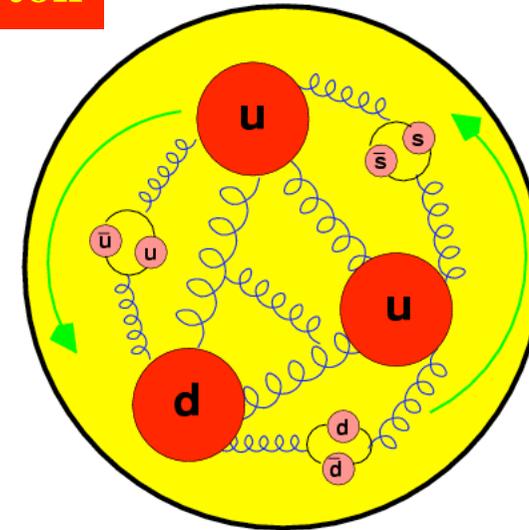
Standardmodell der Teilchenphysik



Fermilab 95-759

“Periodensystem”

Proton



**TEILCHENAUSTAUSCH IST FÜR KRAFT
VERANTWORTLICH: VERMITTLERTEILCHEN!**

Standardmodell der Teilchenphysik

Das **Standardmodell** der Teilchenphysik enthält die Materieteilchen Quarks [up, down, charm, strange, top, bottom (beauty)] und Leptonen (Elektron, Myon, Tau und ihre Neutrinos), die Vermittlerteilchen der elektroschwachen (Photon, W- und Z-Bosonen) und der starken Wechselwirkung (Gluonen). Alle diese Teilchen sind gefunden, und ihre vorhergesagten Eigenschaften wurden bisher eindrucksvoll, teilweise mit höchster Präzision, experimentell bestätigt. Jedoch fehlt noch die Entdeckung des **Higgsteilchens**, das mit dem Feld assoziiert ist, das allen anderen Teilchen (außer den Neutrinos) Masse gibt. Ebenso ist die Gravitation nicht inkludiert. Das Standardmodell muß also erweitert werden, insbesondere auch für höhere Energien als sie bisher zugänglich waren!

Offene fundamentale Fragen

Ursprung und Hierarchie der Teilchenmassen

Gibt es ein Higgs-Teilchen und was ist seine Masse?

Wie muß das Standardmodell erweitert werden?

Supersymmetrie, Grand Unified Theories, ...

Können alle Kräfte vereint werden?

Wie kann die Gravitation eingebunden werden?

Gibt es zusätzliche Dimensionen?

Gibt es eine Substruktur von Quarks und Leptonen?

Gibt es mehr als drei Teilchengenerationen?

Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie

Woraus besteht die dunkle Materie des Kosmos?

Ursprung des quantenchromodynamischen Confinement

Quark-Gluon-Plasma

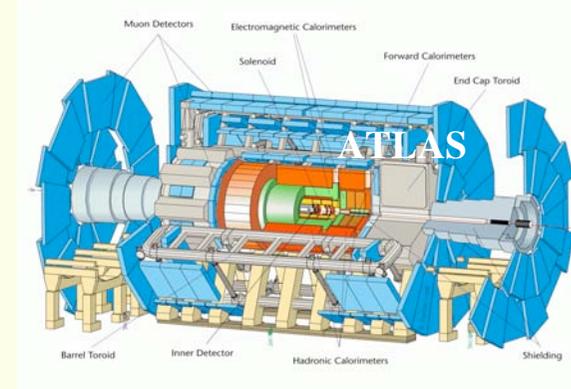
Woraus besteht die dunkle Energie?

Wie entstand das Universum?

Werkzeuge zur Beantwortung der fundamentalen Fragen

Experimente an Beschleunigern

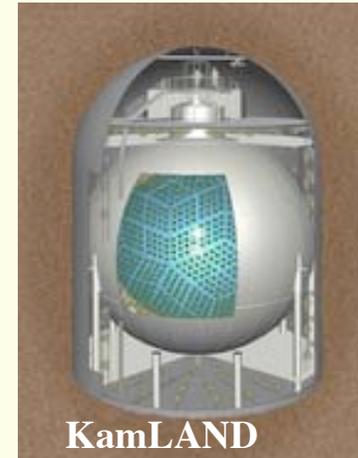
- z.B. Fermilab (USA): Tevatron
- Brookhaven (USA): RHIC
- DESY (Deutschland): HERA
- CERN (Schweiz): Large Hadron Collider (LHC)
- ?: International Linear Collider



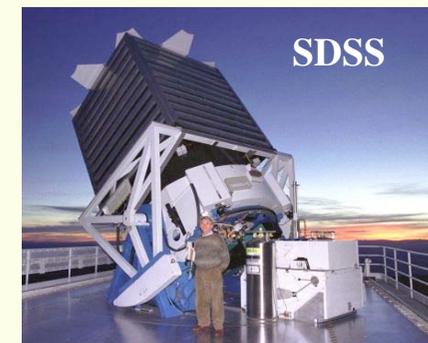
Experimente in Untergrundlaboratorien



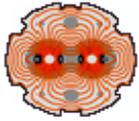
Experimente an Kernreaktoren



Raumsonden



Terrestrische Teleskope

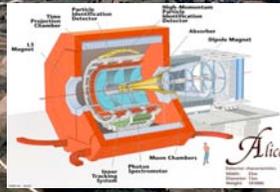


Large Hadron Collider

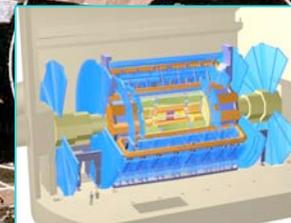
Start: 2007



ALICE



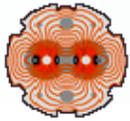
SPS



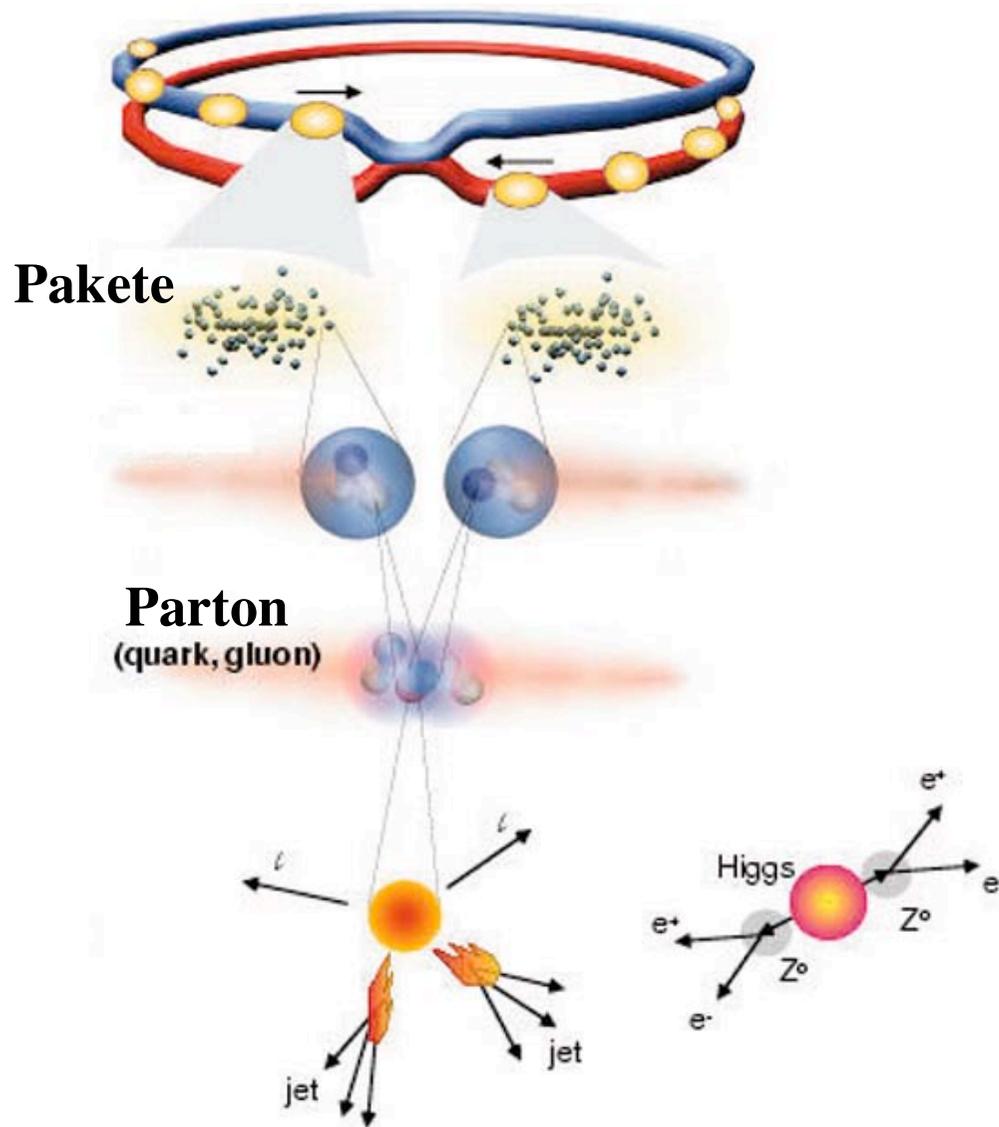
LHC



ATLAS



Parameter des Large Hadron Collider



Proton- Proton

Umfang: 27 km

Teilchenpakete: 3564 + 3564

Protonen / Paket: 10^{11}

Strahlenergie: 2 x 7 TeV

Luminosität: $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

Strahlkreuzungsintervall: 25 ns

Kollisionsrate: $10^7 \dots 10^9$ pro Sekunde

Flußdichte der Dipolmagnete: 8.33 T

Anzahl der Dipolmagnete: ca. 1200

Schwerionen (Pb-Pb, S-S, etc.)

Strahlenergie:

bis zu 5.5 TeV/Nukleonpaar

Luminosität:

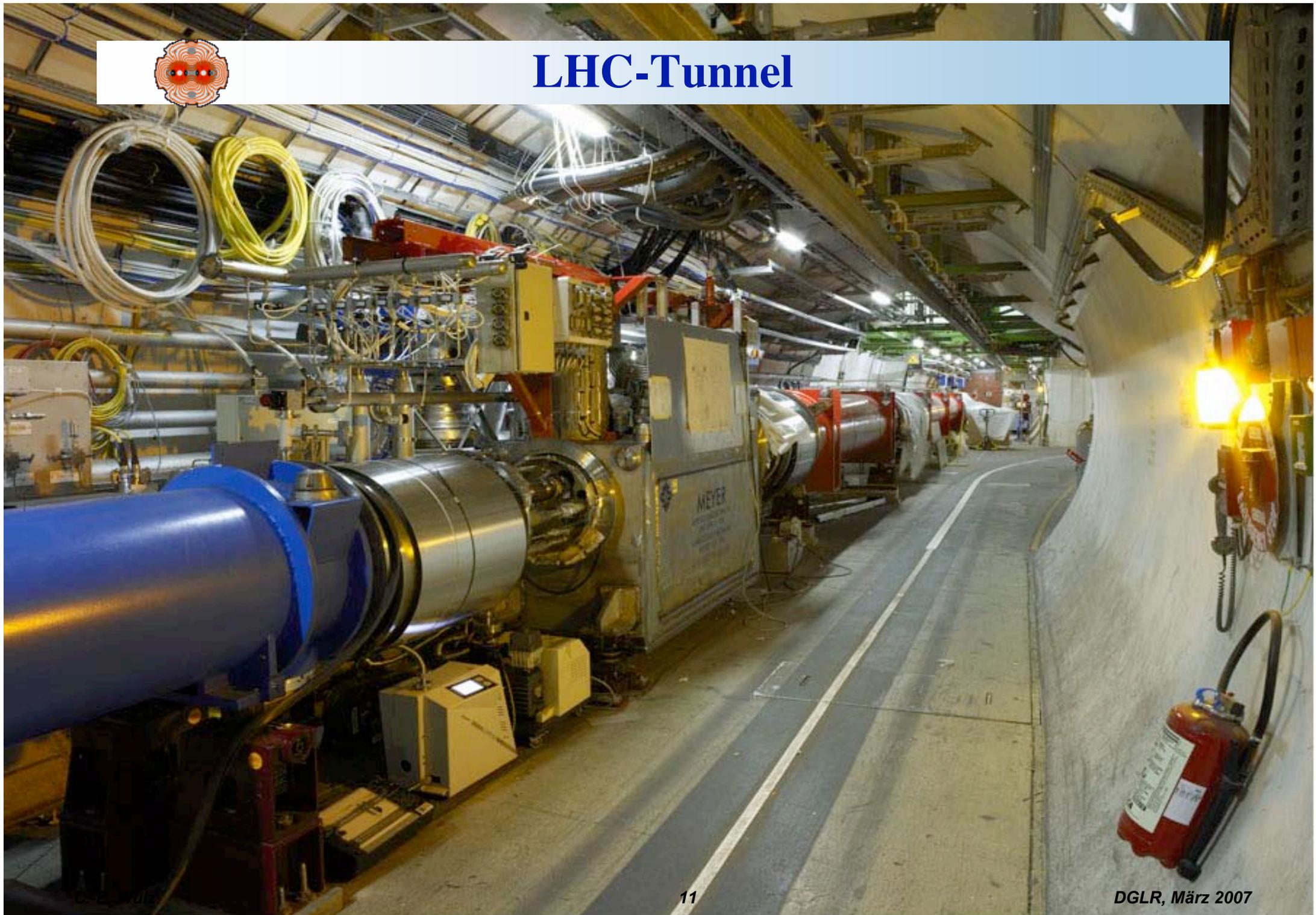
$10^{27} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ für Blei

$3 \cdot 10^{31} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ für Sauerstoff

Strahlkreuzungsintervall: 125 ns



LHC-Tunnel



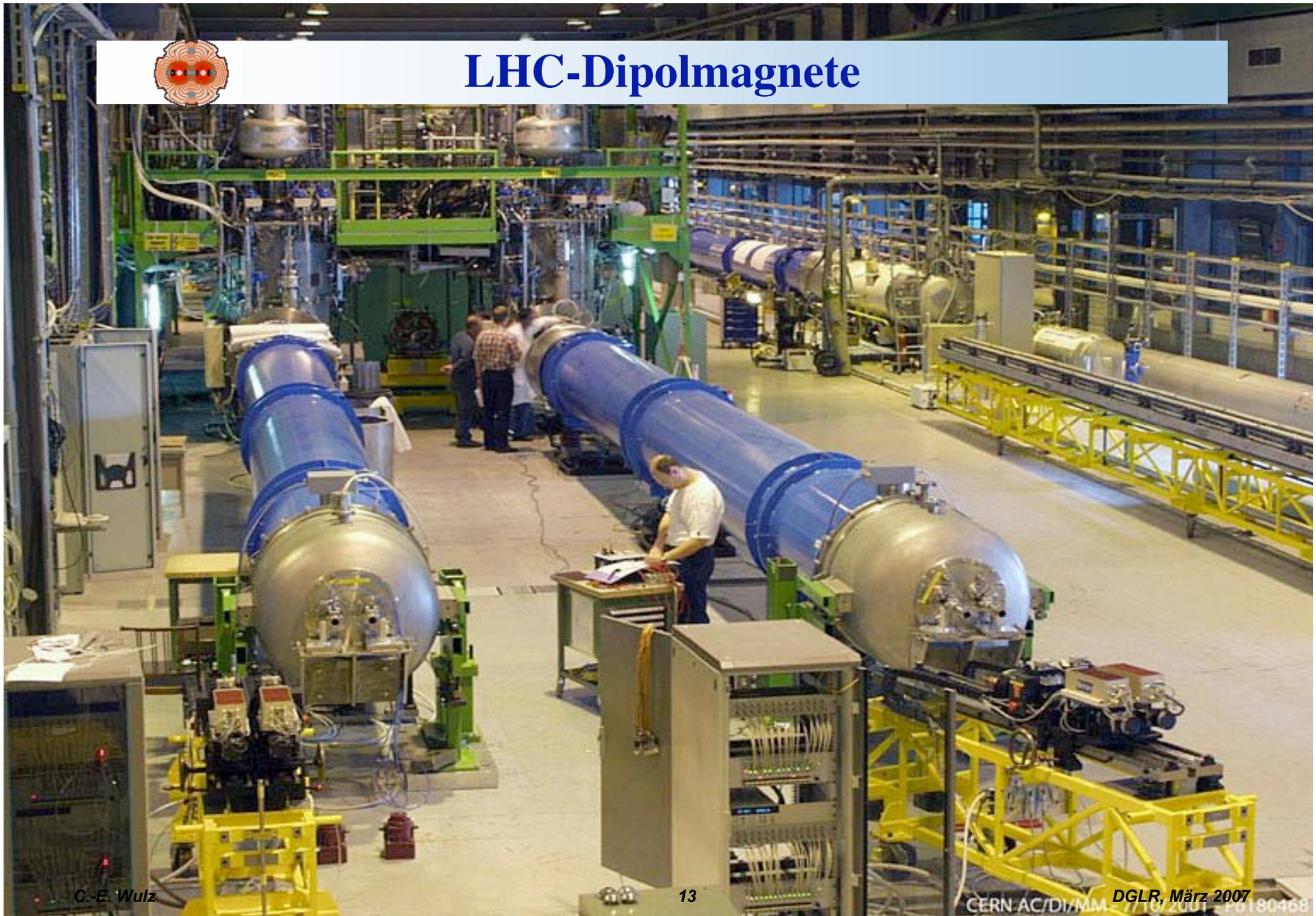


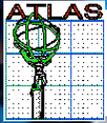
LHC-Hochfrequenzkavität



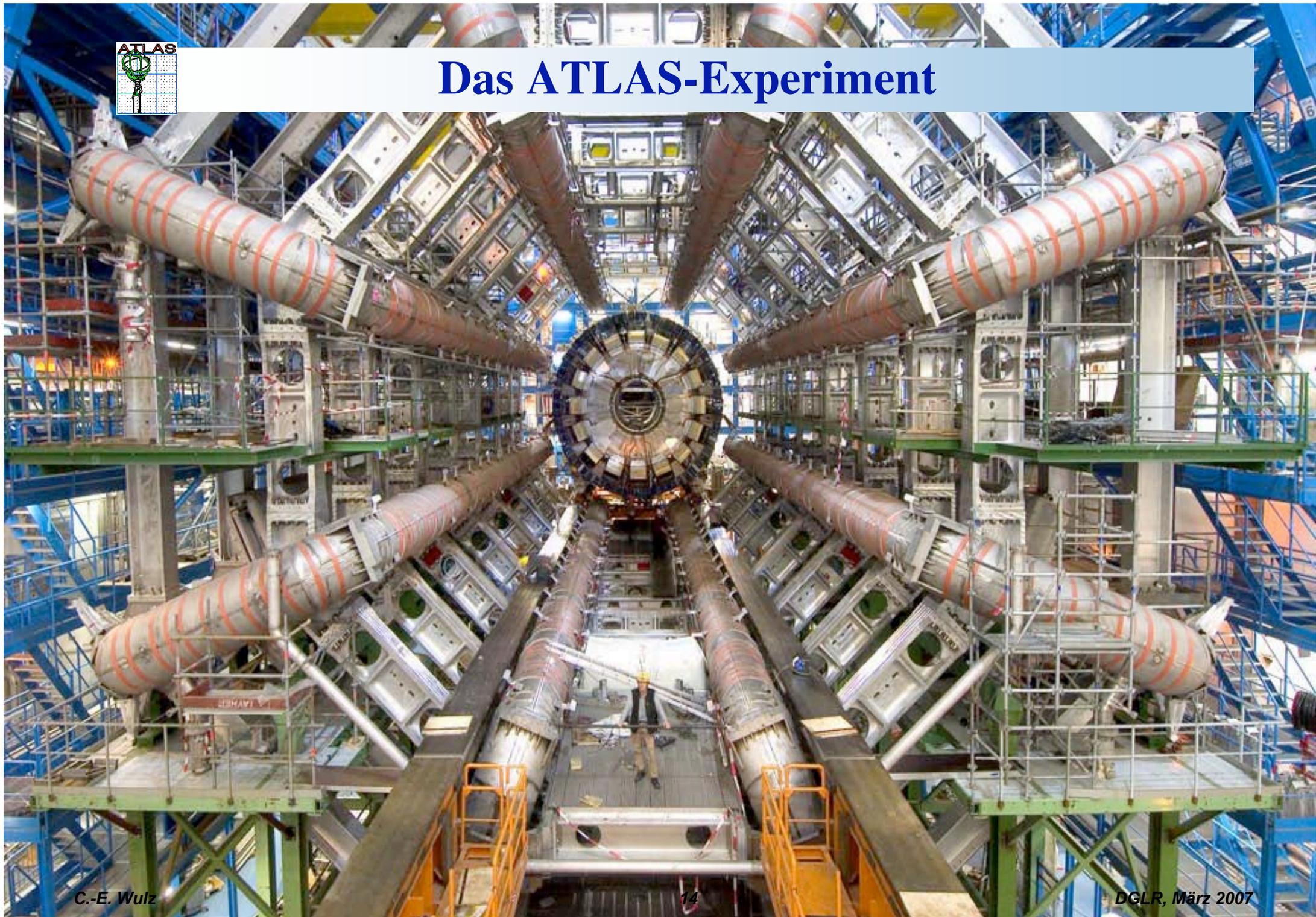


LHC-Dipolmagnete



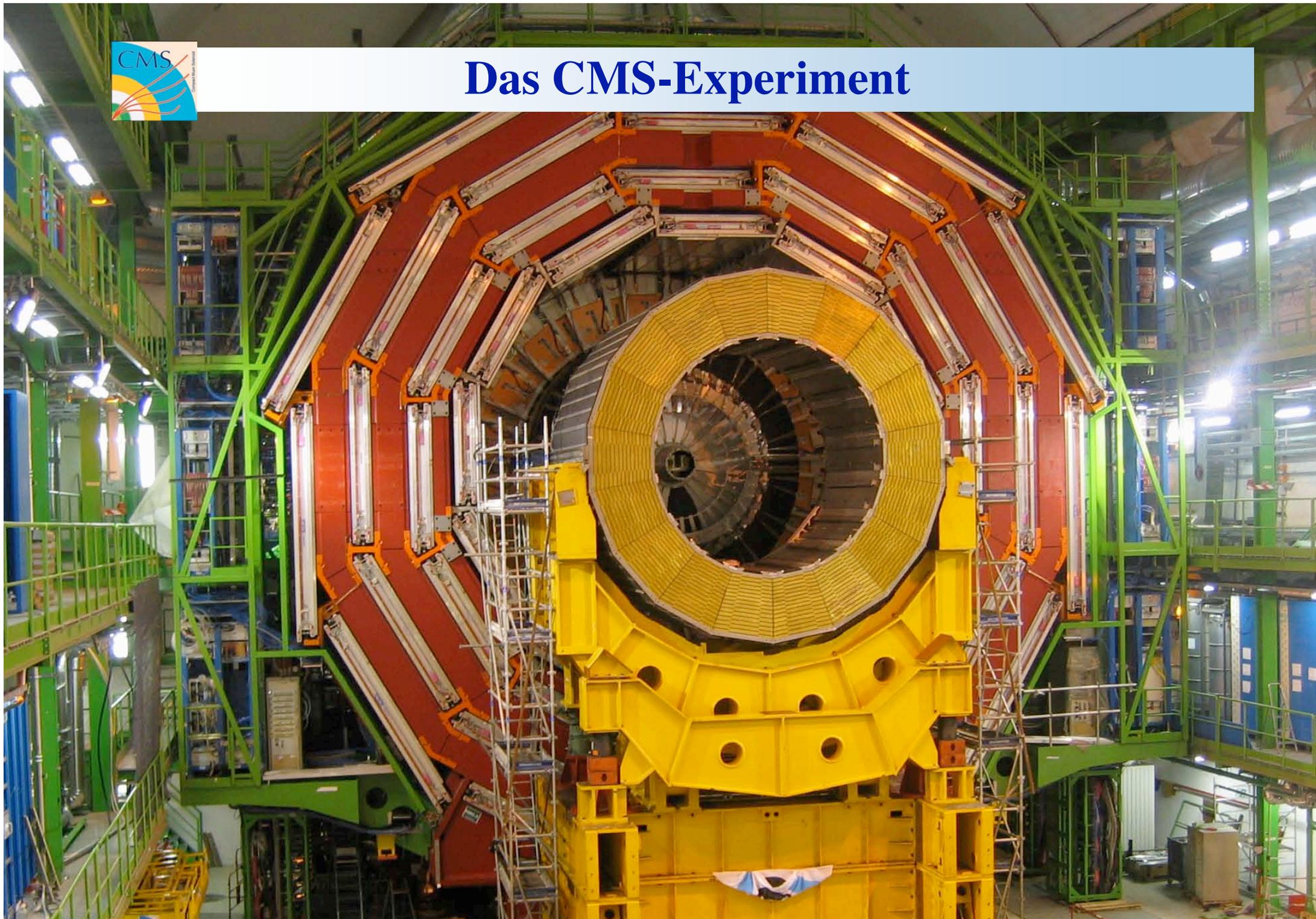


Das ATLAS-Experiment



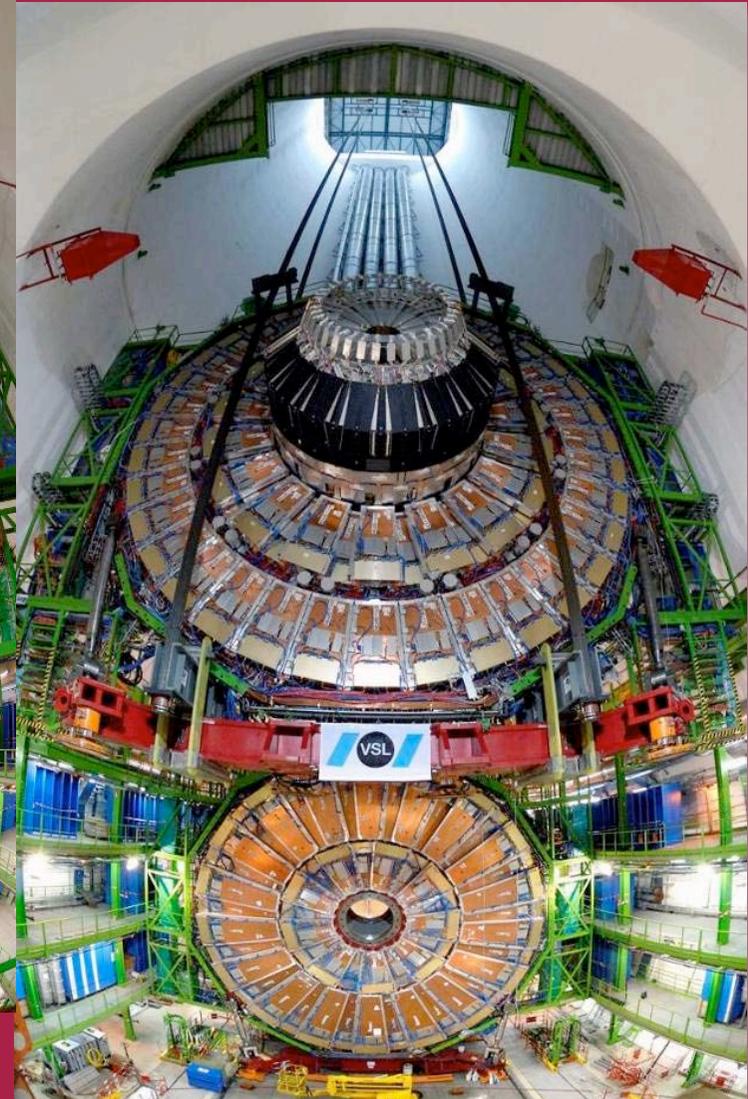
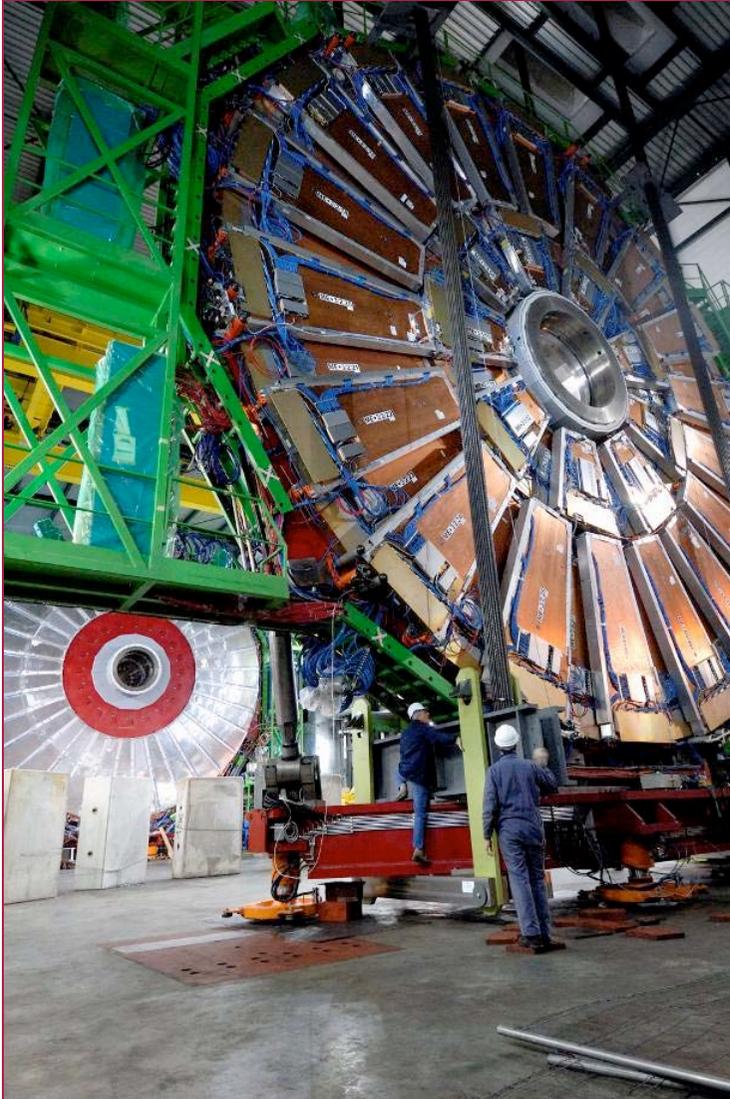


Das CMS-Experiment





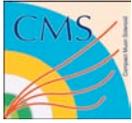
Installation der CMS-Endkappen



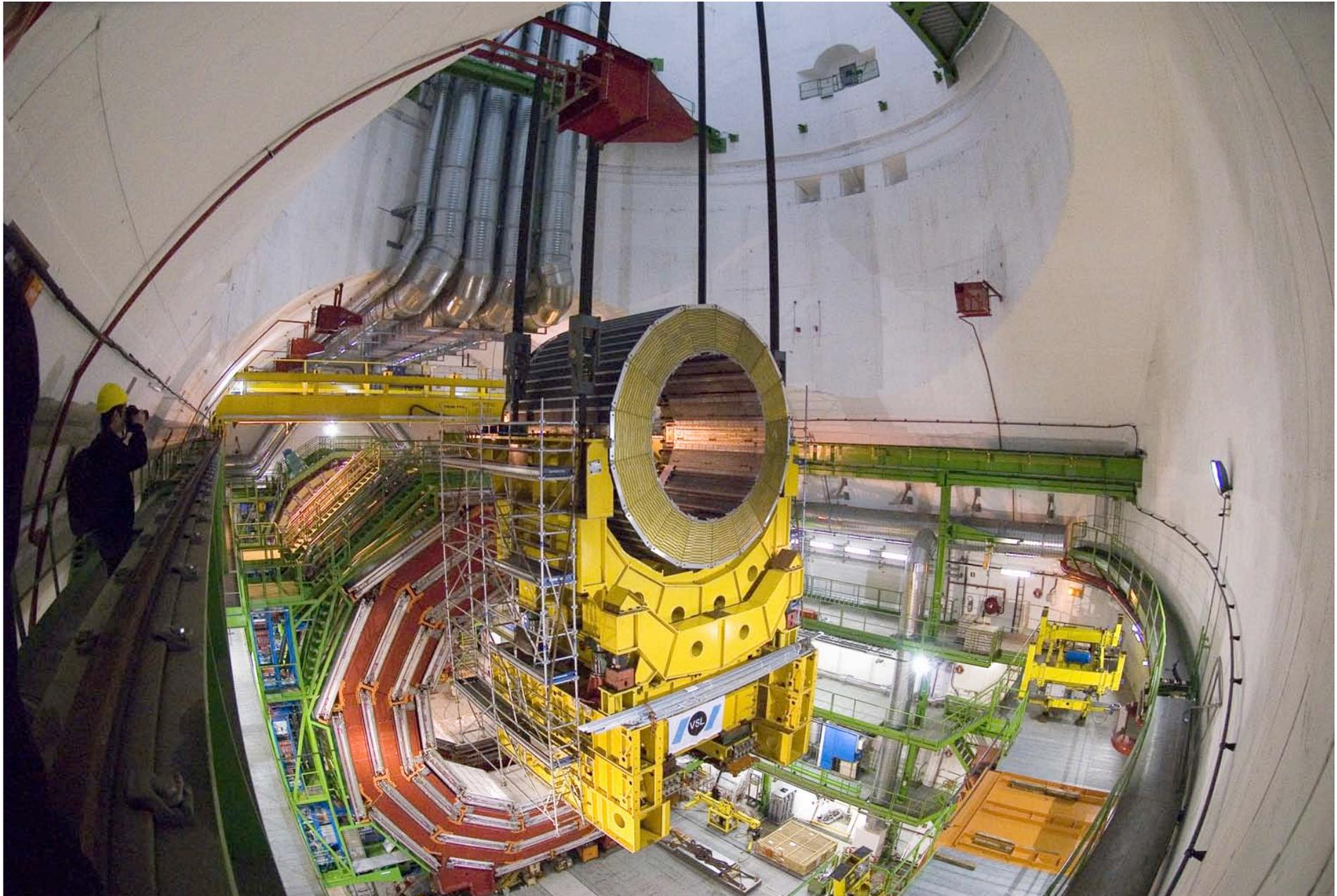


Installation des Zentralelements von CMS

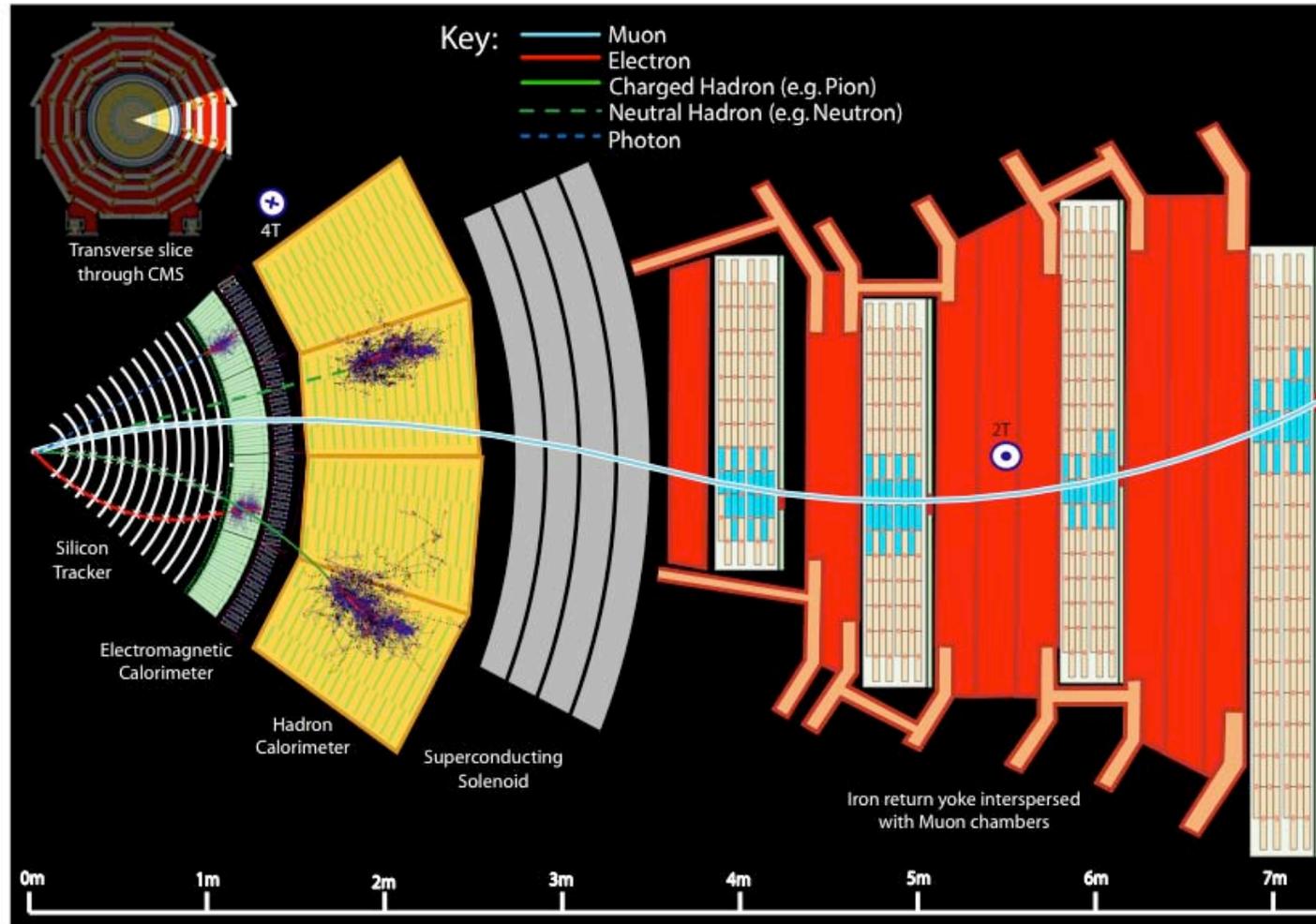




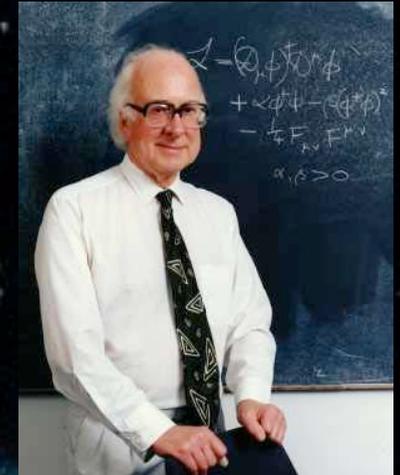
Installation des Hadronkalorimeters von CMS



Die Suche nach dem Higgsteilchen



Das Higgsboson sollte in bekannte Teilchen zerfallen. Zur Zeit können nur die Beschleunigerexperimente CDF und D0 am **Tevatron** des Fermilab (USA) nach dem Higgsteilchen suchen. Jedoch ist der erforschbare Massenbereich sehr eng. Die beste Hoffnung auf Entdeckung haben die Experimente ATLAS und CMS am **LHC**.



Warum haben Teilchen Masse ...?



$$\begin{aligned} m_\gamma &= 0 \text{ GeV}/c^2 \\ m_W &\sim 80 \text{ GeV}/c^2 \\ m_Z &\sim 91 \text{ GeV}/c^2 \end{aligned}$$

Higgsmechanismus

Erklärung für Mr. Waldegrave (Minister, GB) von David Miller



Ein Teilchen
bekommt **Masse!**

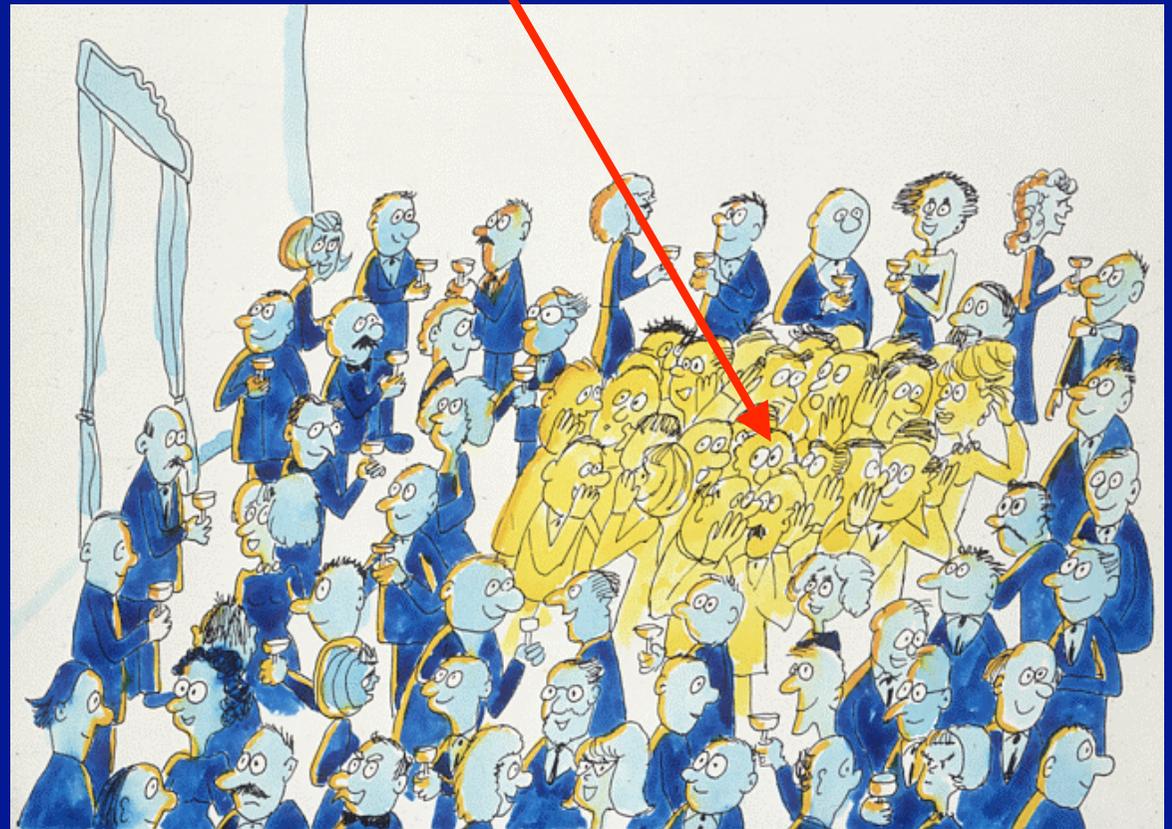
Das Higgsteilchen



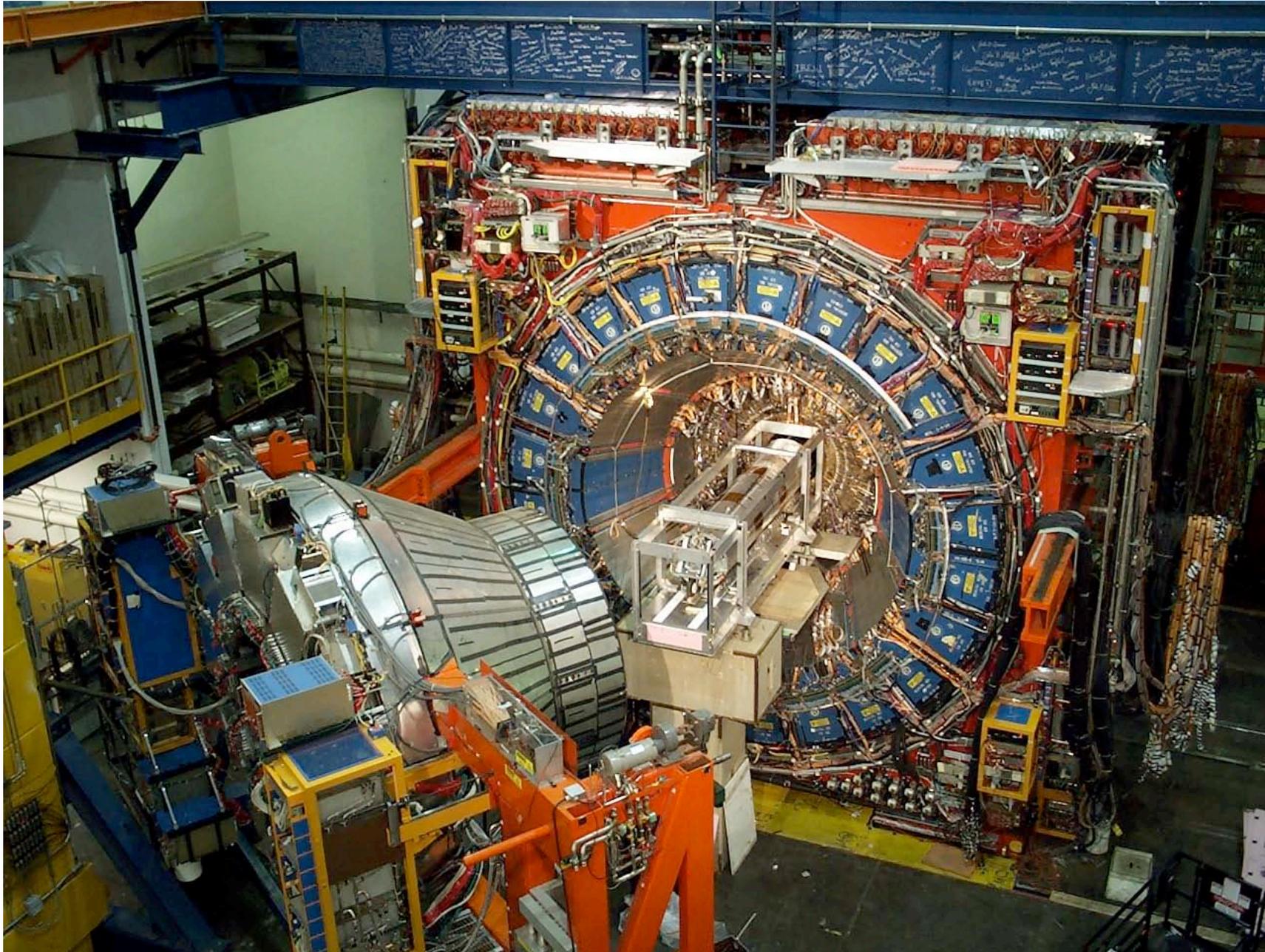
Ein Gerücht verbreitet sich

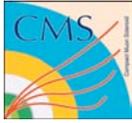
Das Standardmodell sagt jedoch die Masse des Higgsteilchens nicht vorher!

Das **Higgsteilchen** entsteht!

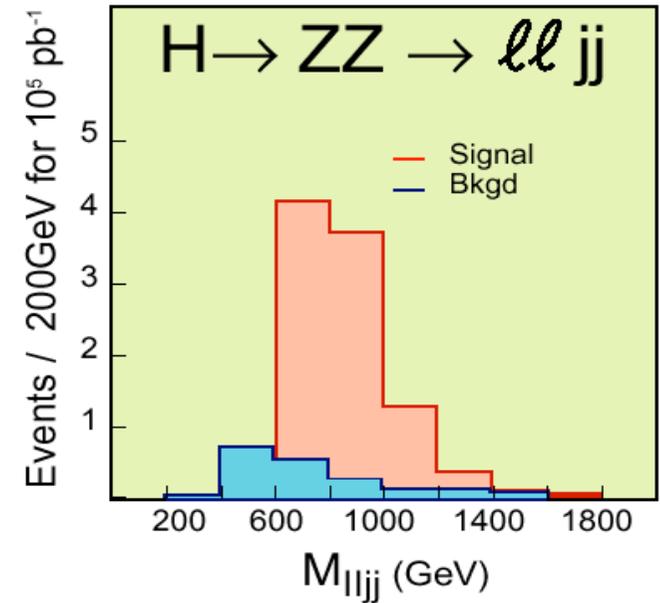
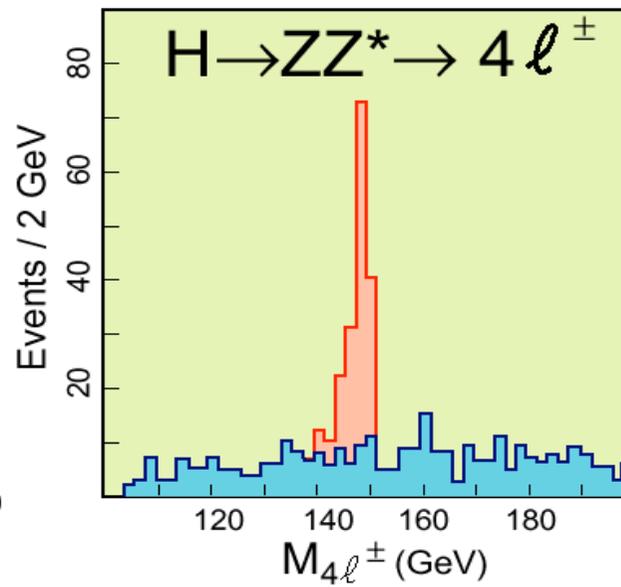
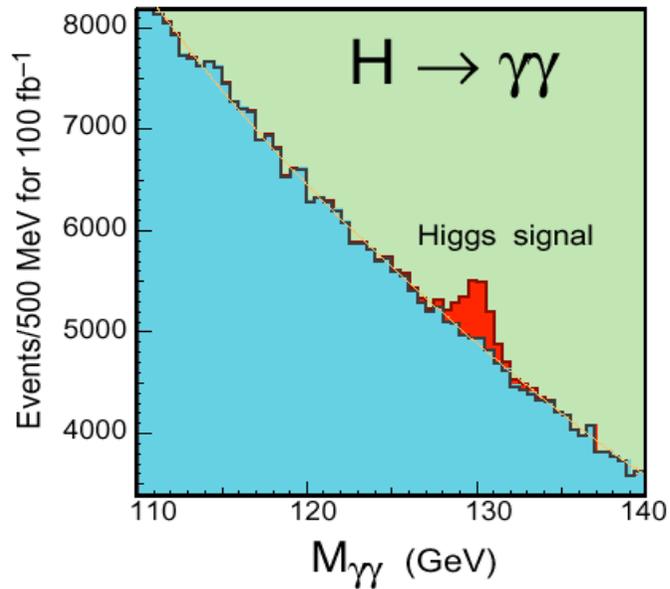
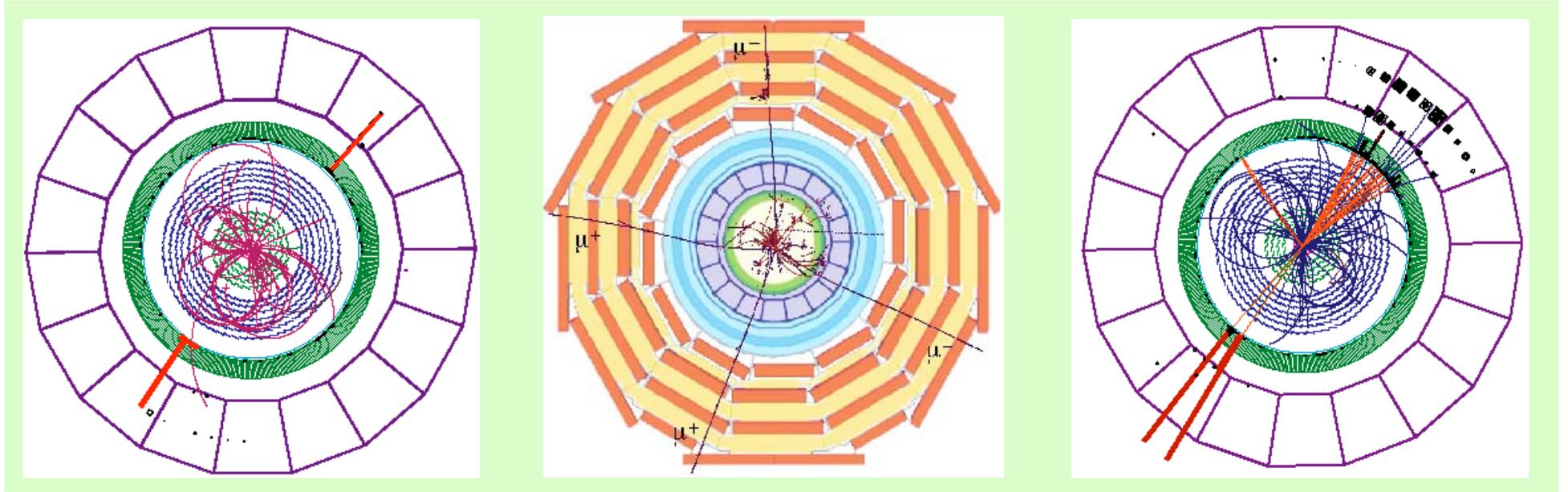


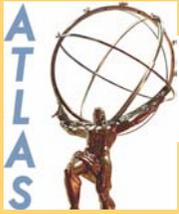
Das CDF-Experiment am Fermilab



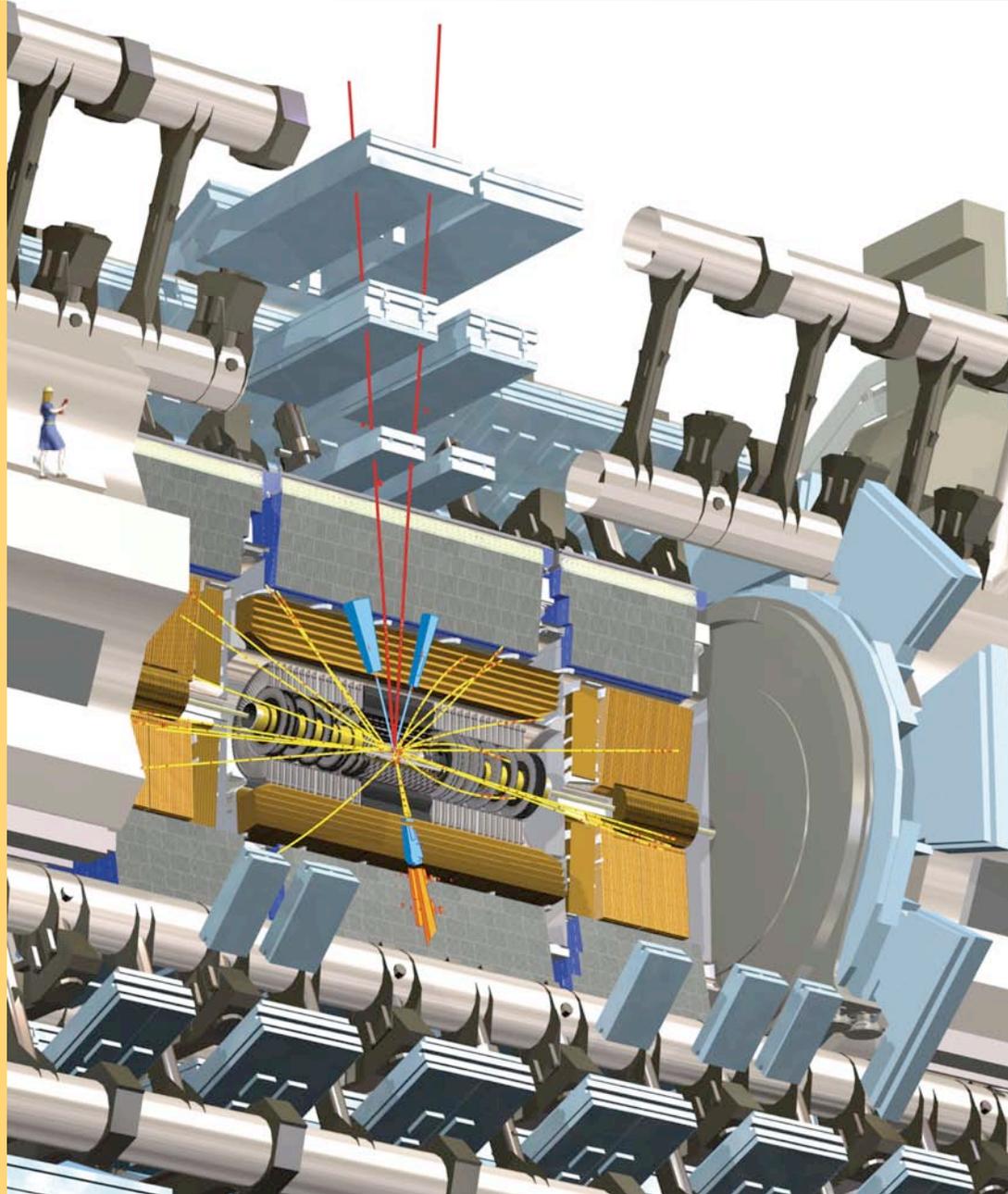


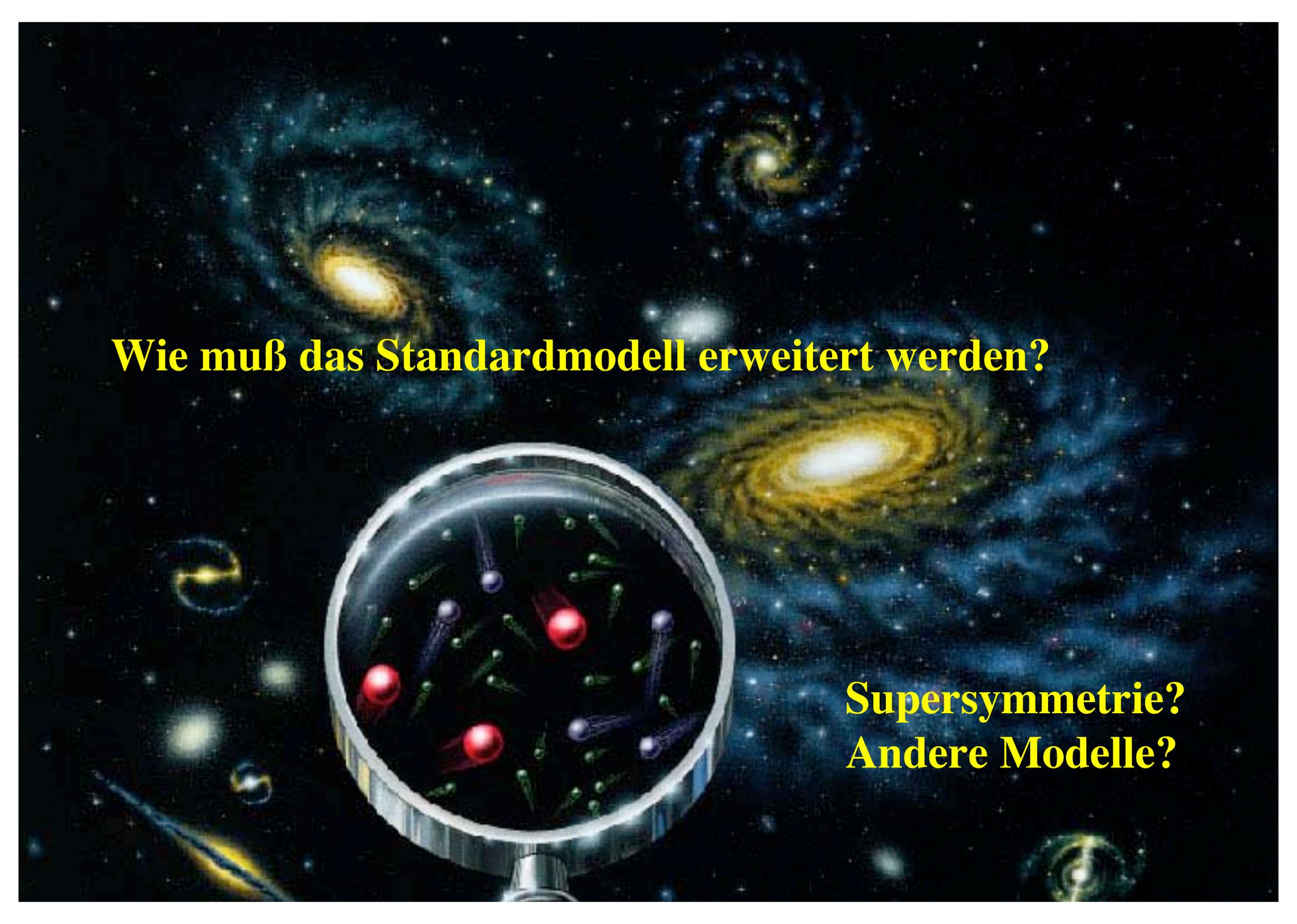
Higgs bei CMS





Higgs bei ATLAS



The image is a composite. The background is a deep space scene filled with numerous galaxies, primarily in shades of blue and yellow, scattered across a dark, star-filled sky. In the lower-left foreground, a magnifying glass is positioned, its lens focused on a detailed particle physics model. This model shows several red spheres, purple spheres, and green spheres connected by thin lines, representing a complex subatomic structure. The magnifying glass's frame is metallic and reflective.

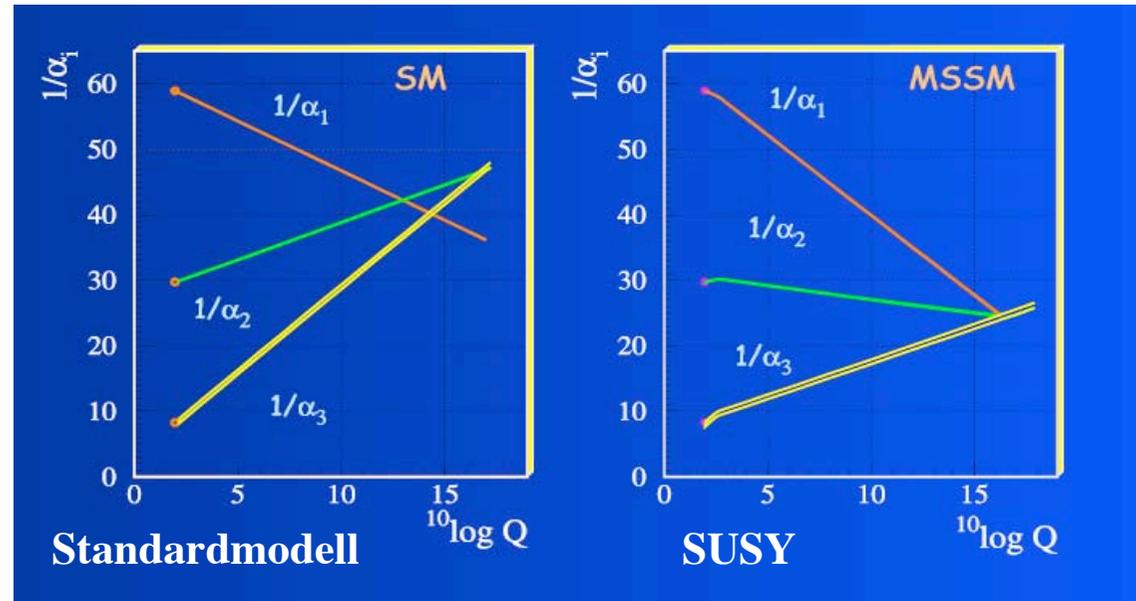
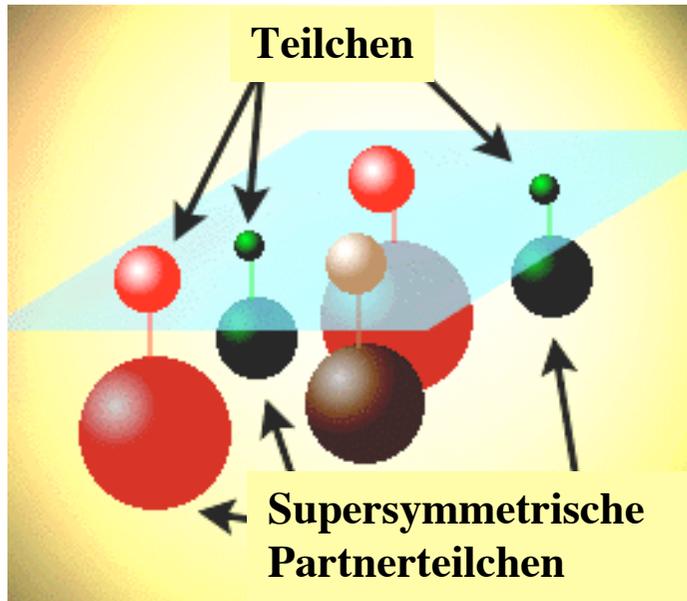
Wie muß das Standardmodell erweitert werden?

**Supersymmetrie?
Andere Modelle?**



Supersymmetrie

Zu jedem Standardmodell-Teilchen gibt es supersymmetrische Partner.



SUSY hat zwei bestechende Eigenschaften:

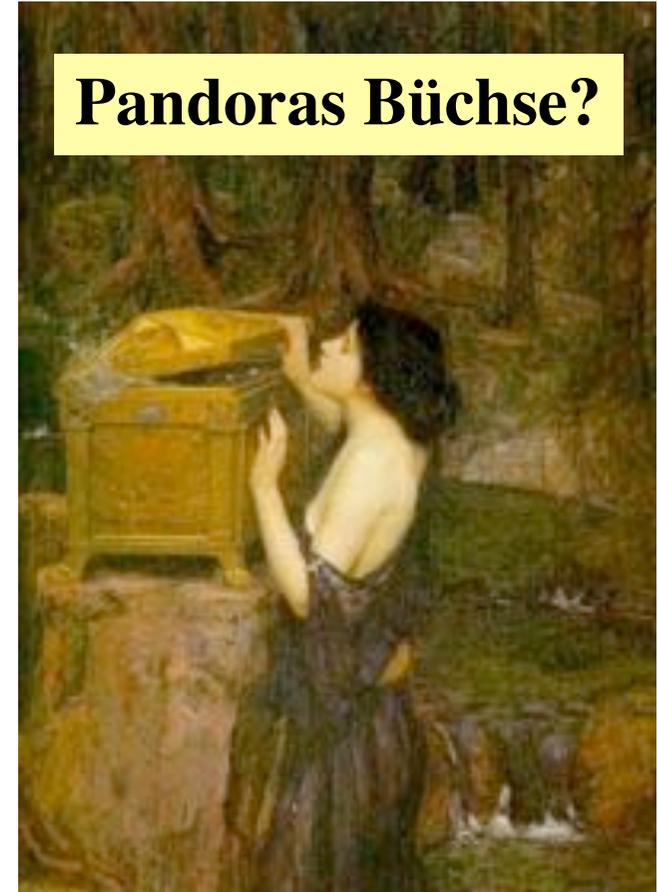
- Drei Wechselwirkungen können bei hohen Energien **vereint** werden, d.h. die Stärken (α) werden gleich.
- Es gibt einen natürlichen Kandidaten für **dunkle Materie**, das **leichteste Neutralino** (χ_1^0).



Das supersymmetrische Teilchenspektrum

Standard-Modell	Supersymmetrie
γ, Z^0, h^0, H^0	$\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_2^0, \tilde{\chi}_3^0, \tilde{\chi}_4^0$
W^+, H^+	$\tilde{\chi}_1^+, \tilde{\chi}_2^+$
$e^-, \nu_e, \mu^-, \nu_\mu, \nu_\tau$	$\tilde{e}_R^-, \tilde{e}_L^-, \tilde{\nu}_e, \tilde{\mu}_R^-, \tilde{\mu}_L^-, \tilde{\nu}_\mu, \tilde{\nu}_\tau$
τ^-	$\tilde{\tau}_1^-, \tilde{\tau}_2^-$
u, d, s, c	$\tilde{u}_R, \tilde{u}_L, \tilde{d}_R, \tilde{d}_L, \tilde{s}_R, \tilde{s}_L, \tilde{c}_R, \tilde{c}_L$
b	\tilde{b}_1, \tilde{b}_2
t	\tilde{t}_1, \tilde{t}_2

Pandoras Büchse?

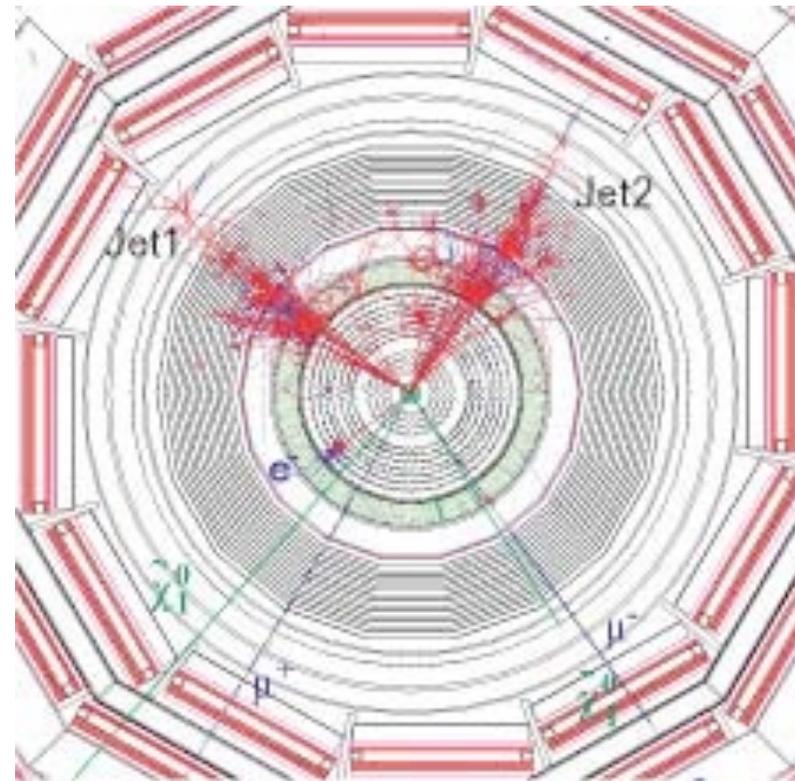
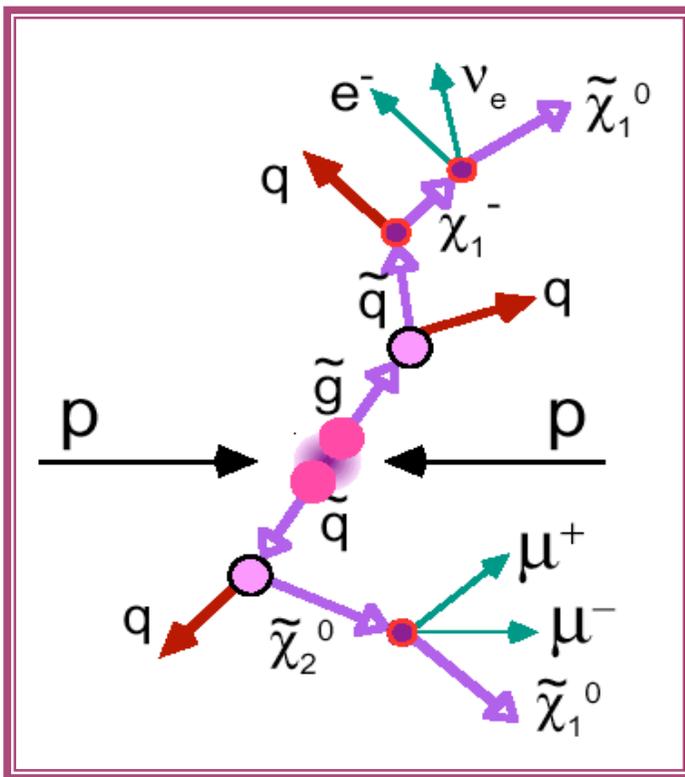


**Viele Teilchen, viele
Zerfallskanäle:
Arbeitsplatzgarantie für
Hochenergiephysiker!**



Supersymmetrisches Ereignis am LHC

Supersymmetrische Teilchen können komplexe Signaturen durch Kaskadenzerfälle aufweisen, die zu Endzuständen mit Leptonen, Jets und fehlender Energie (zum Beispiel durch Neutralinos) führen.



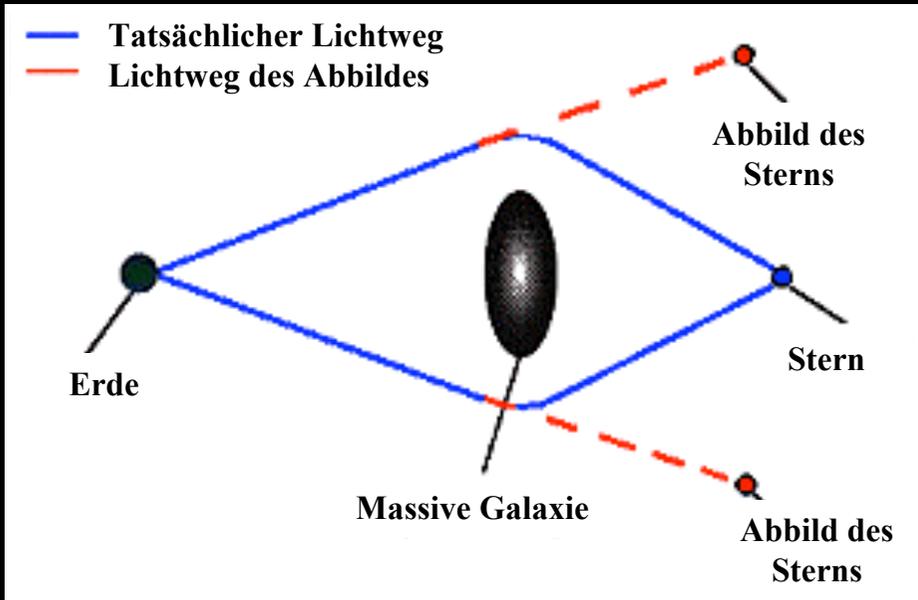
Woraus besteht die dunkle Materie?

Bekannte Materie: ~ 4%
Dunkle Materie: ~ 23%
Dunkle Energie: ~ 73%

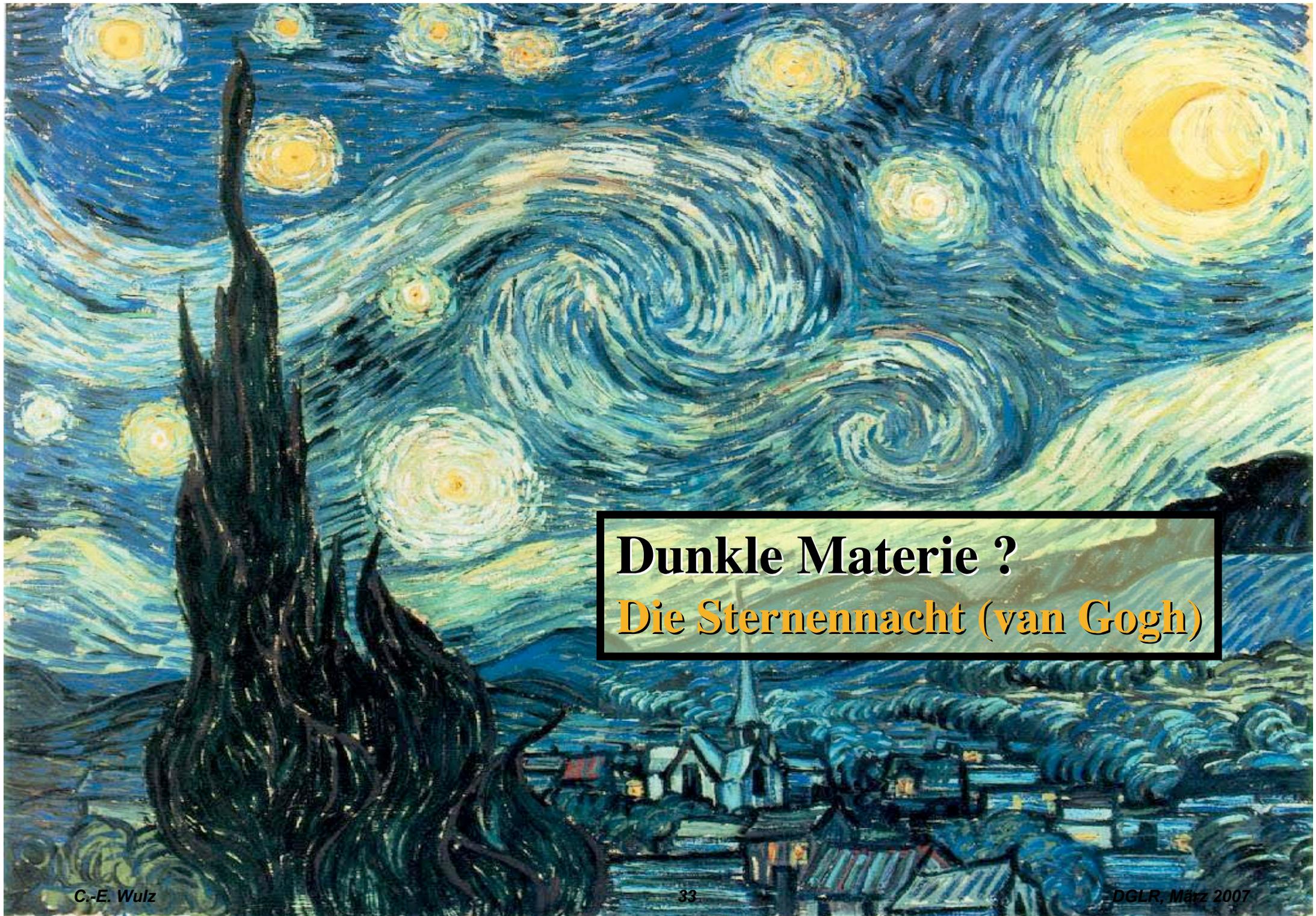
Dunkle Materie

- Ein Vergleich der **Rotationsgeschwindigkeiten** von Sternen nahe dem Zentrum von Spiralgalaxien und weiter außen liegenden Sternen ergibt, daß die Geschwindigkeiten weiter außen nicht so abfallen, wie dies aus den Gesetzen der Mechanik folgen müßte.
- Auch müßten aufgrund der hohen **Temperatur** viele Sterne auseinanderfallen, wenn nicht zusätzlich zur sichtbaren Masse noch Masse aus dunkler Materie vorhanden wäre.
- Weitere Evidenz für Dunkle Materie kommt von **Gravitationslinseneffekten**.

Gravitationslinsen



Hubble Space Telescope



Dunkle Materie ?
Die Sternennacht (van Gogh)

Suche nach dunkler Materie

Man braucht Astrophysik und Teilchenphysik!

Suche nach Neutralinos am LHC und am Tevatron

Direkte Suche:

Streuung von χ (WIMP*) an Kernen (Natriumiodid, Germanium, ...):

* Weakly Interacting Massive Particles (nichtbaryonisch, nur Gravitation)

Experimente Edelweiss, CDMS, DAMA, ...

Neutrinos (ν) sind nach heutigem Wissen nicht Bestandteil der dunklen Materie, obwohl sie Masse haben, wie vor kurzem entdeckt.

Kandidaten für einen Teil der dunklen (baryonischen) Materie können auch astronomische Objekte sein:

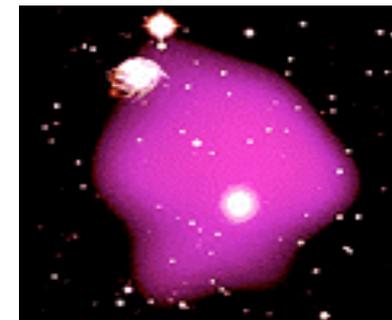
Braune (MACHOs) und weiße Zwerge*****

** Massive Compact Halo Objects

*** sehr dichter Stern, nuklearer Brennstoff verbraucht

Neutronensterne und schwarze Löcher

Gaswolken



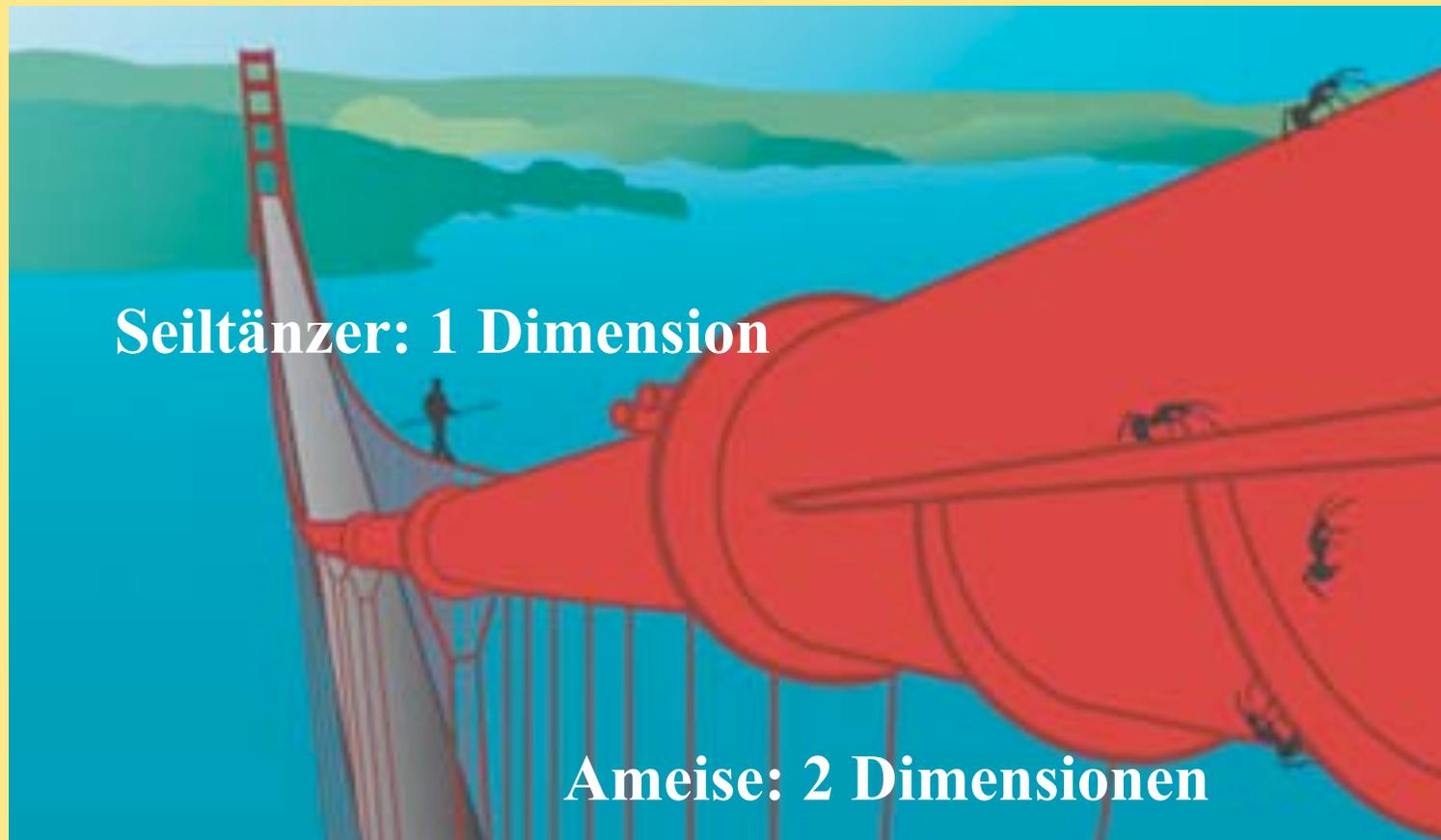
Und die Gravitation?





Zusätzliche Dimensionen

Unser bekanntes Universum: 3 Raumdimensionen + 1 Zeitdimension
Stringtheorie: mindestens 9 + 1 Dimensionen



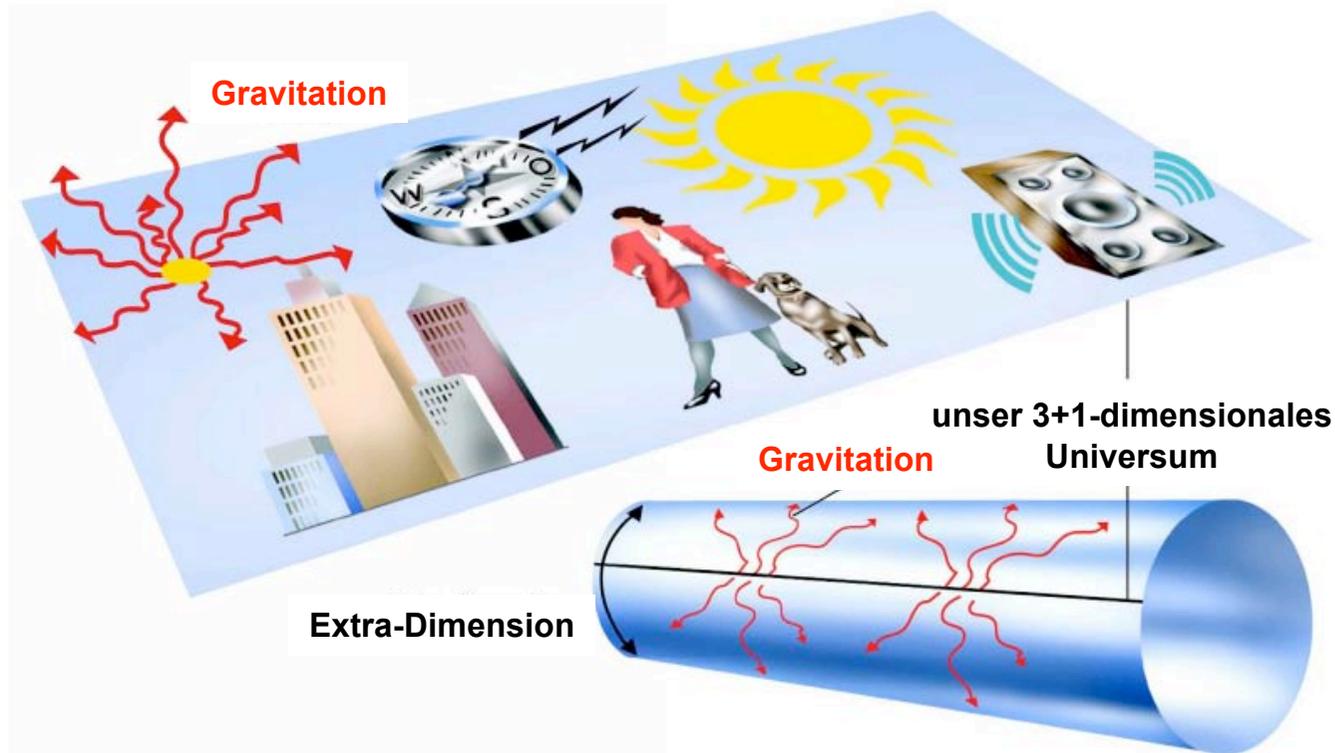
2. Dimension: aufgerollt

Gravitation und Extra-Dimensionen

Gravitation scheint 10^{-38} mal so schwach im Vergleich zur starken Wechselwirkung -> schwer vereinbar mit anderen Kräften!

Mögliches Modell:

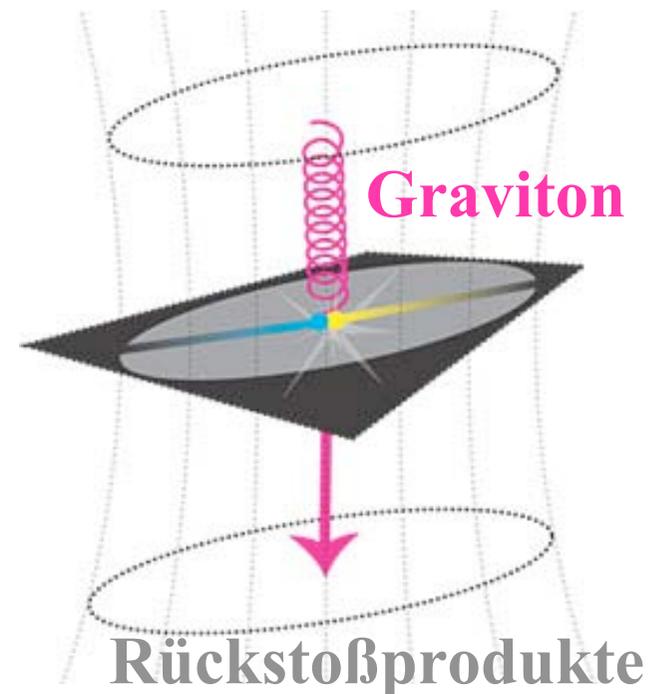
- Bekannte Teilchen leben im 3+1-dimensionalen Universum (Brane)
- **Gravitation lebt in einem höherdimensionalen Universum (Bulk)**
- Extra-Dimensionen sind aufgerollt mit Radius R



Graviton-Suche am LHC

Gravitonen, die vermutlich die Gravitation zwischen Teilchen mit Masse vermitteln, können sich ungehindert auch in den Extra-Dimensionen ausbreiten.

Mit der Energie des LHC sollte es möglich sein, WW von Teilchen in unserer Brane bei Abständen von ca. 10^{-15} m (Protondurchmesser) zu untersuchen. Diese Distanzen liegen vielleicht in der gleichen Größenordnung wie die Radien der aufgerollten Dimensionen.



Signal in den Detektoren: **fehlende Energie!**
Diese kann aber auch von Neutrinos oder Neutralinos stammen, deshalb sind Modellberechnungen nötig.

Schwarze Löcher

Wenn die Gravitation bei kleinen Distanzen groß wird, kann der LHC auch (Mini-) Schwarze Löcher produzieren!

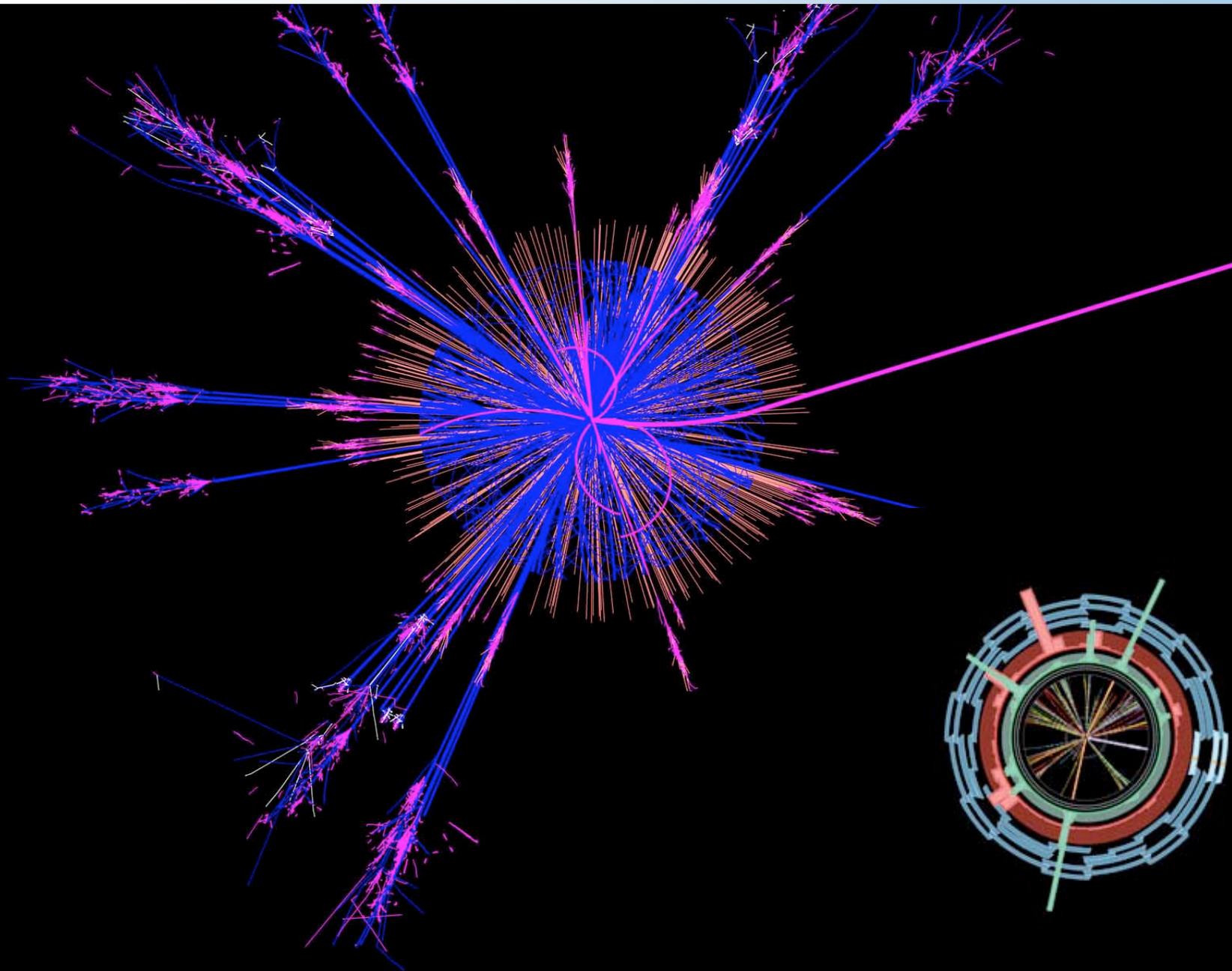
Keine Angst: Hawking zeigte, daß solche durch quantenmechanische Effekte sehr schnell verdampfen, unter Erzeugung aller möglichen Standardmodellteilchen.

Übrigens: Kosmische Strahlen haben ebenfalls genug Energie, um solche schwarzen Löcher zu produzieren!

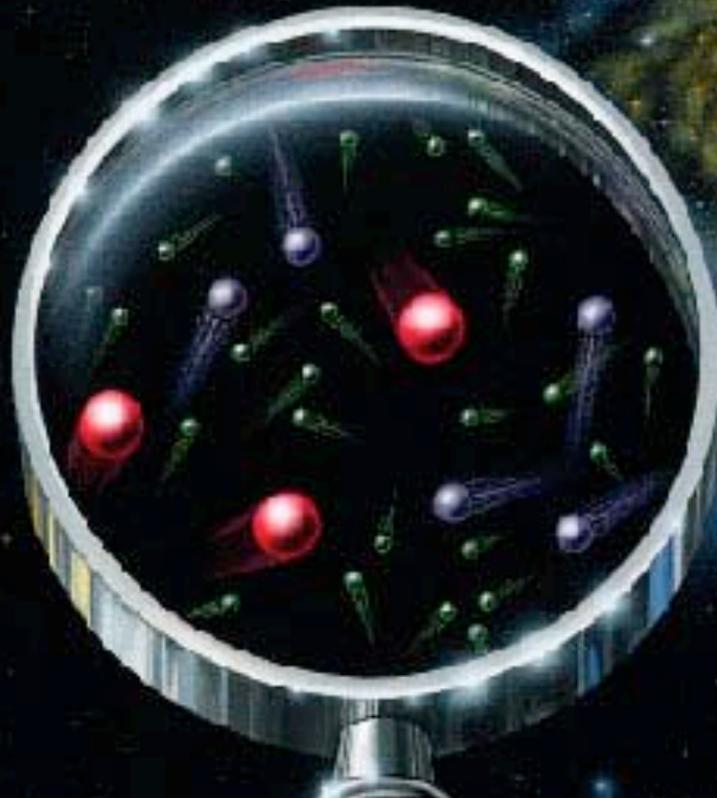
S. Hawking in CMS



Schwarzes Loch in ATLAS



Warum existieren wir?



Materie-Antimaterie-Asymmetrie

- **Warum ist die Antimaterie verschwunden?**

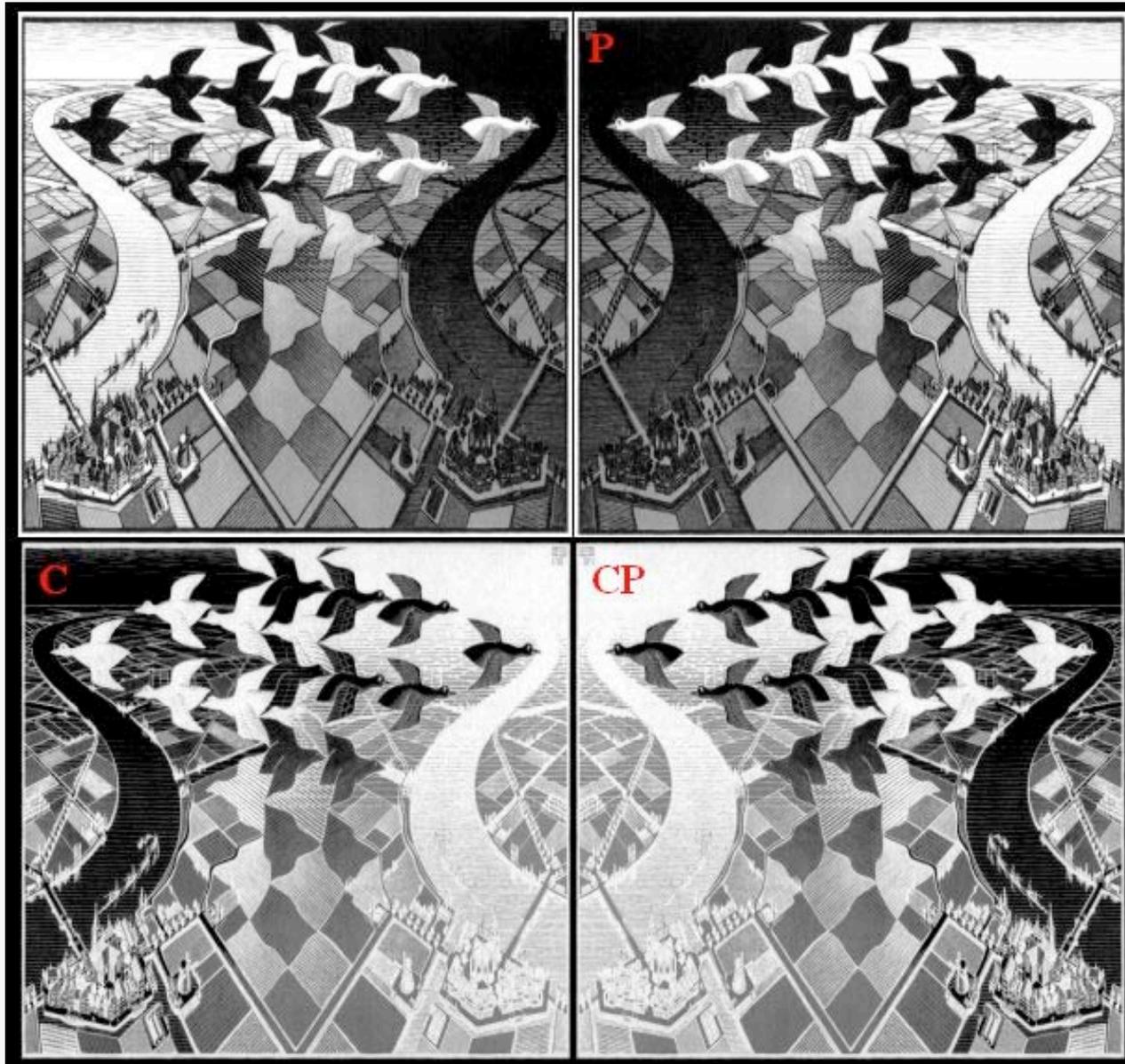
Beim Urknall wurde die gleiche Anzahl von Teilchen und Antiteilchen (z.B. Elektron, Positron) produziert, die sich eigentlich sofort vernichten hätten müssen. Jedoch wurde bis jetzt kein zusätzliches Universum aus Antimaterie gefunden, das heißt, die Natur behandelt Teilchen und Antiteilchen nicht gleich!



- **CP-Verletzung**

C: Charge Conjugation (Umkehr der Ladung), P: Parity (Parität)
Man braucht Erweiterung des Standardmodells, um CP-Verletzung quantitativ zu erklären. Ursprünglich von A. Sakharov vorgeschlagen.

CP-Verletzung - M.C. Escher



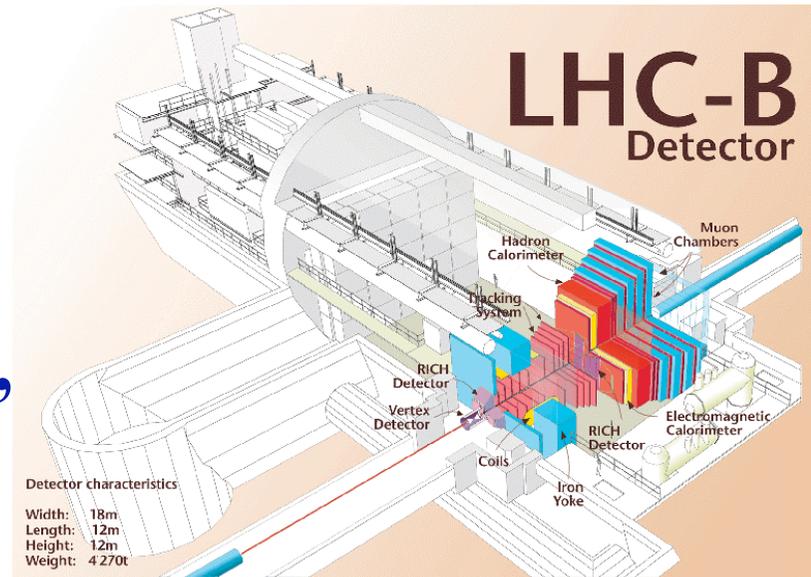
Spiegelung

Resultat
(fast) gleich
wie Original!

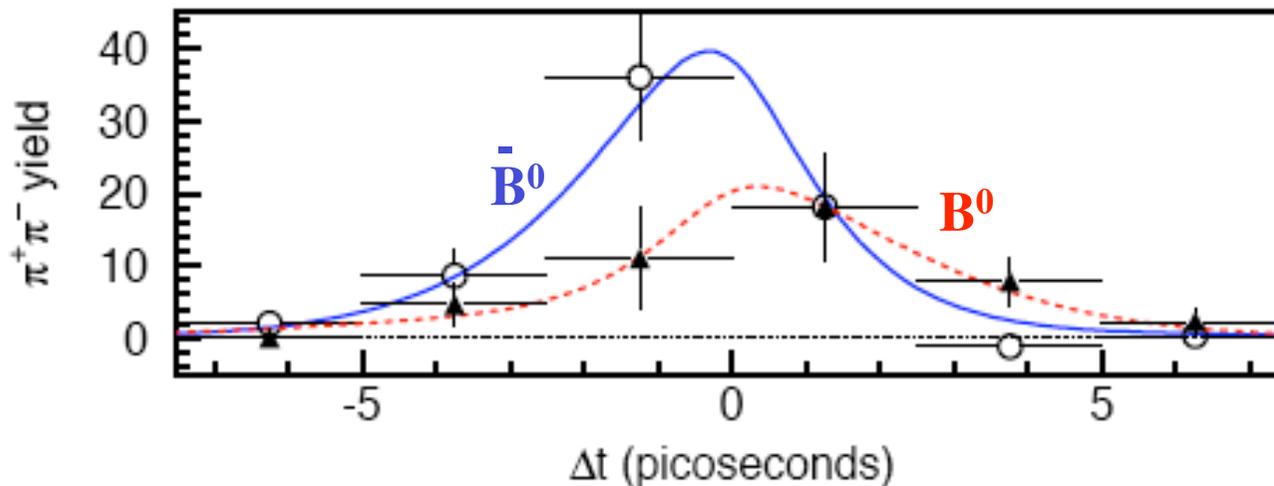
Farbumkehr

Experimente zur CP-Verletzung

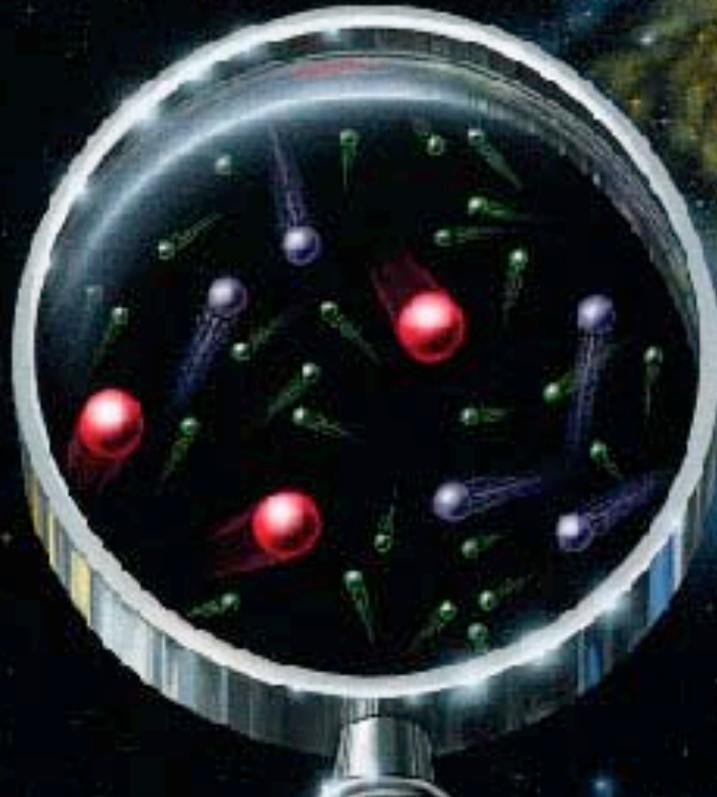
CP-Verletzung bei
Beauty-Teilchen
(Experimente
BaBar/SLAC, Belle/KEK,
LHCb/CERN)



Beispiel: Zerfallsraten für $B^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ und $\bar{B}^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$

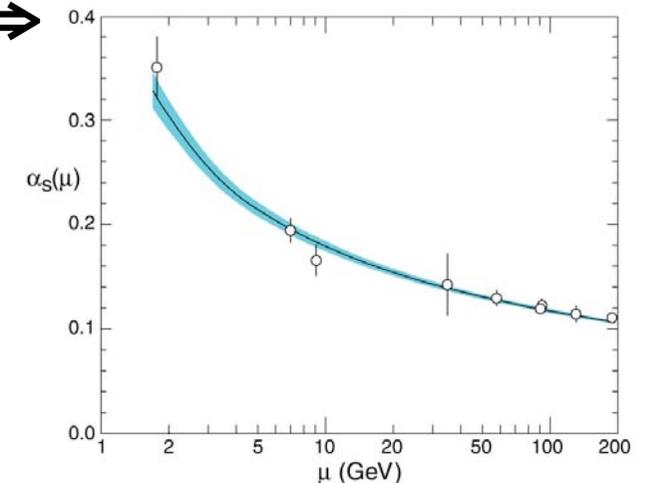
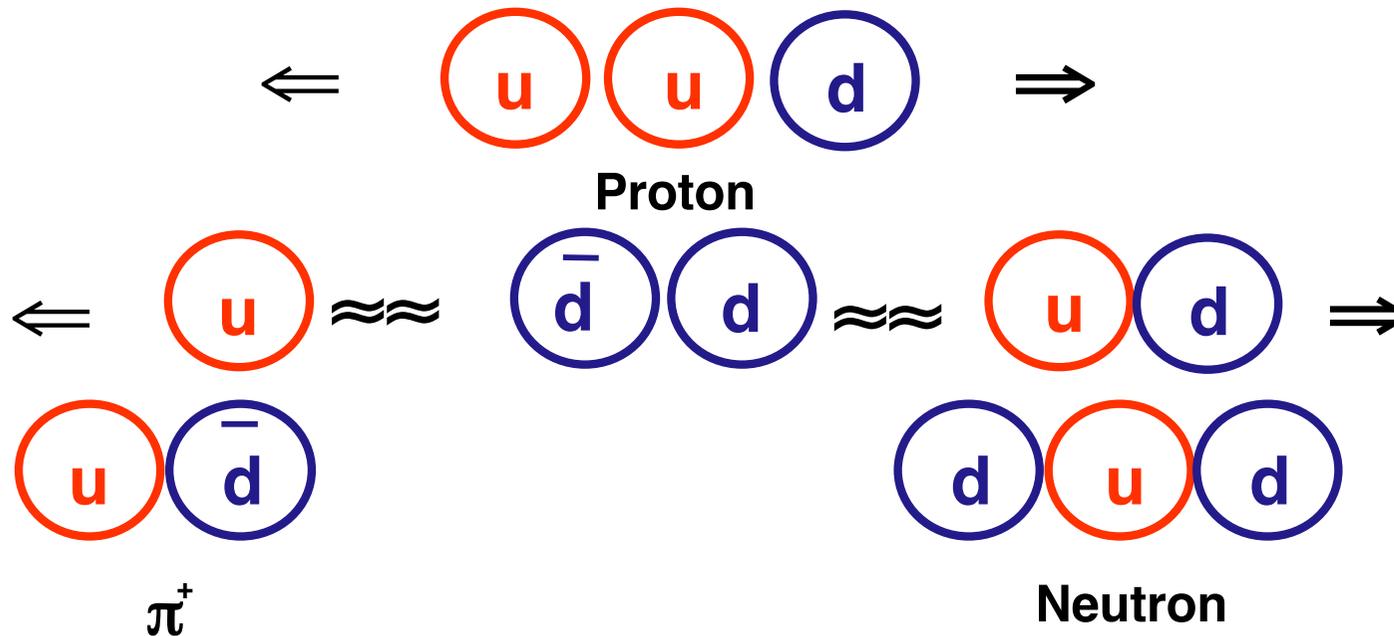
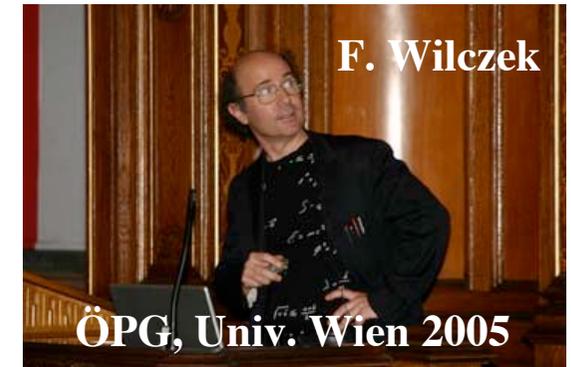


Gibt es freie Quarks und Gluonen?



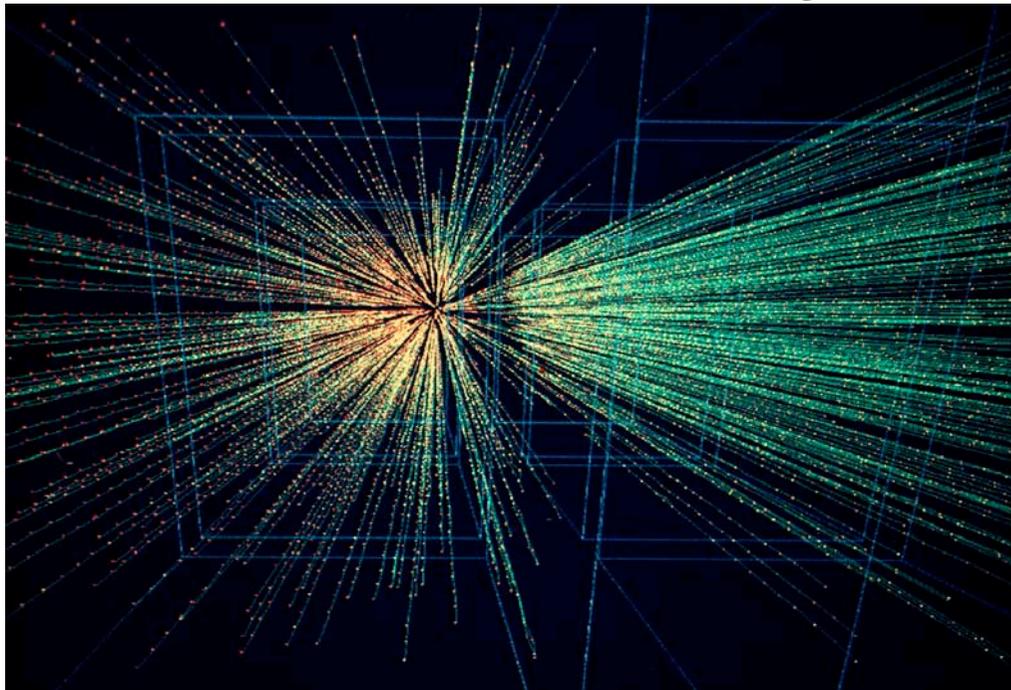
Confinement

Trotz langer Suche wurden freie Quarks oder Gluonen nie gefunden! Der Grund liegt in der “asymptotischen Freiheit” (Confinement) -> Nobelpreis 2004: Gross, Politzer, Wilczek.



Schwerionenphysik

Zweck ist Studium des **Deconfinement**. Das **Quark-Gluon-Plasma** (QGP) wurde ziemlich sicher schon bei Schwerionenexperimenten erzeugt, und zwar am CERN und am Relativistic Heavy Ion Collider in Brookhaven. Die Energie reicht jedoch nur gerade aus. Bei LHC wird das QGP routinemäßig erzeugt werden. Das Spezialexperiment **ALICE** ist am LHC zum Studium des QGP vorgesehen.

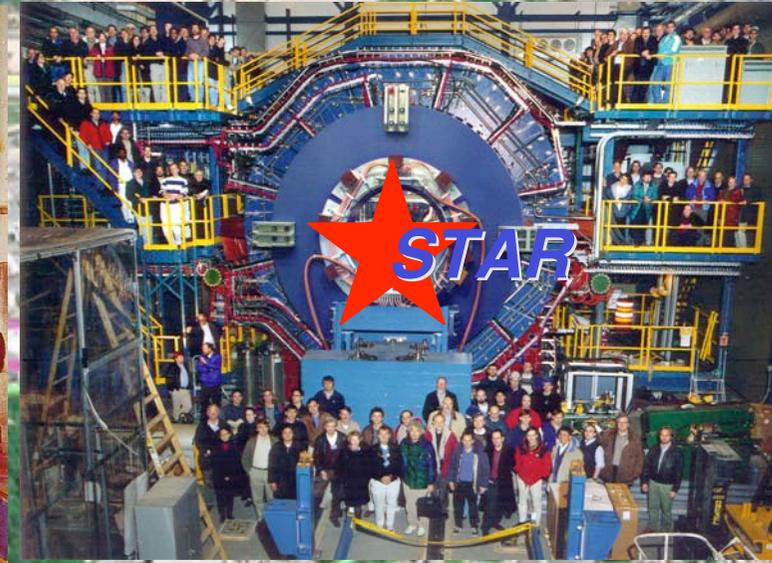


**Pb-Pb-Kollision
im NA49-Experiment
des CERN**

**Im Mittel 1500 Spuren,
bei LHC 50000!**

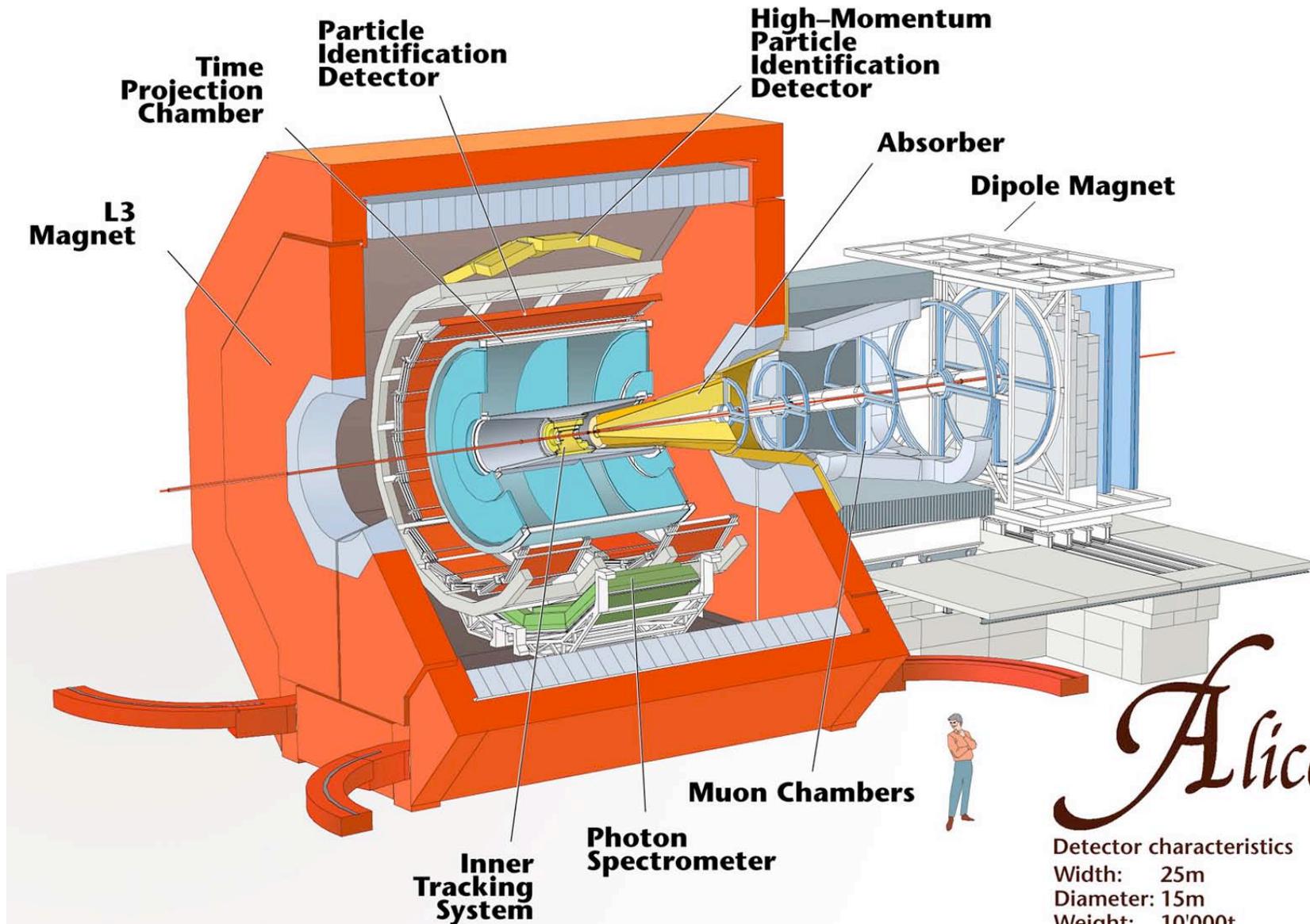
RHIC

Experimente am RHIC





ALICE

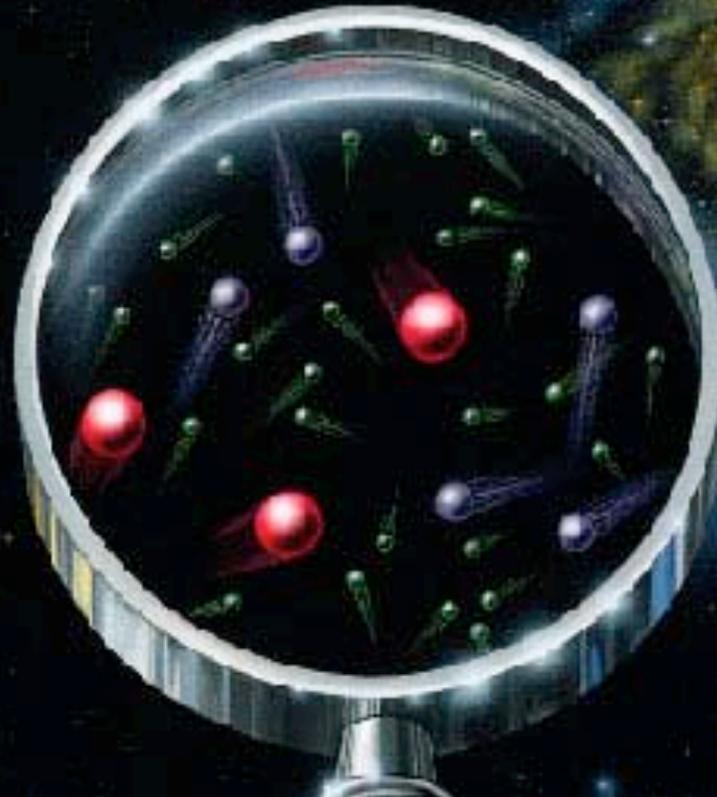


Alice

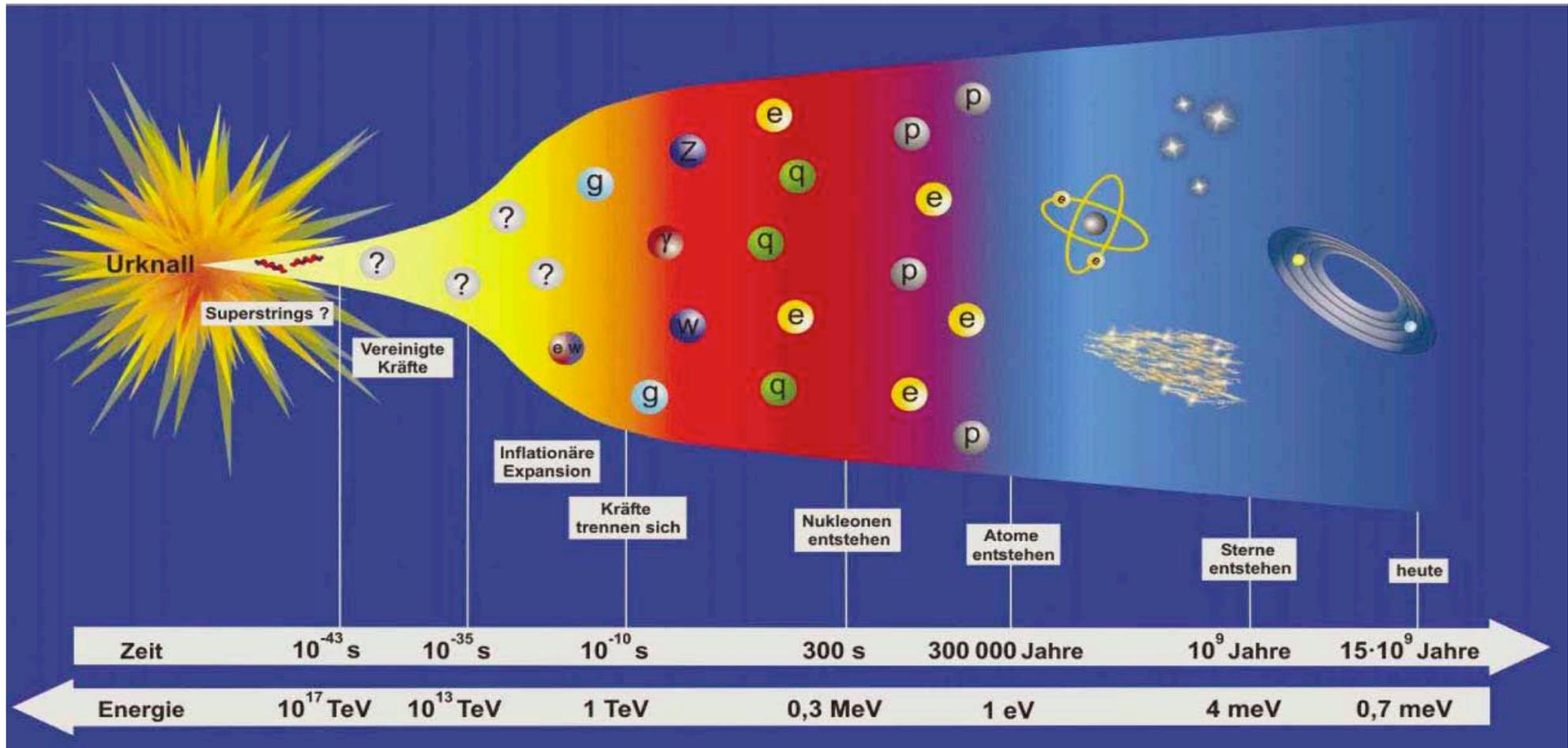
Detector characteristics
Width: 25m
Diameter: 15m
Weight: 10'000t

CERN AC - ALICE

Wie ist die Welt entstanden und wie wird sie sich weiterentwickeln?



Blick zurück zum Urknall



Bester Teilchenbeschleuniger: Weltall!

Terrestrische Beschleuniger:

können Bedingungen bis 10^{-10} s nach dem Urknall erzeugen

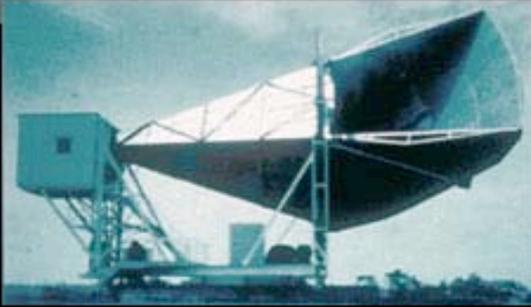
Entstehung des Weltalls



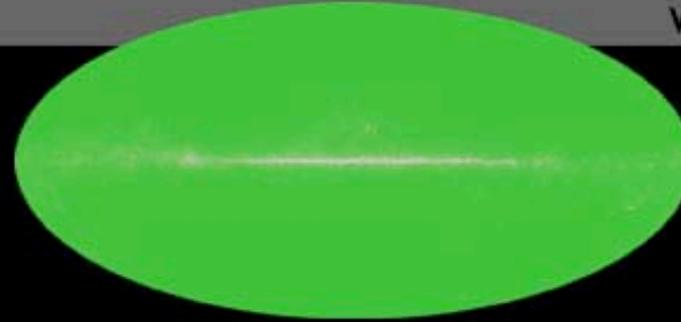
- Anfang:** **Big Bang!**
- 10^{-35} s - 10^{-43} s :** Kräfte sind teils oder ganz vereint, Temperatur über 10^{32} K.
- 10^{-43} s:** Gravitation trennt sich von den anderen drei Kräften
- 10^{-35} s:** Die starke Kraft trennt sich von den anderen Kräften - Quarks und Antiquarks dominieren das Universum (mehr Quarks als Antiquarks - Asymmetrie! Das Universum dehnt sich extrem schnell aus (inflationäre Expansion). Temperatur 10^{27} K.
- 10^{-10} s:** Alle vier Kräfte sind getrennt. Temperatur 10^{15} K.
- 10^{-4} s:** Protonen und Neutronen bilden sich. Temperatur 10^{13} K.
- 0.01 s:** Elektronen und Positronen bilden sich.
- 3 min.:** Atomkerne entstehen. Temperatur 10^9 K.
- 300000 Jahre:** Atome entstehen. Das Universum wird transparent und füllt sich mit Licht (heute: Rotverschiebung - Mikrowellenbereich -> Kosmische Hintergrundstrahlung: heute sichtbar!). Temperatur 3000 K.
- 1 Milliarde J.:** Galaxien entstehen
- 14 Mill J. (heute):** Temperatur 3K.

Kosmische Hintergrundstrahlung

1965



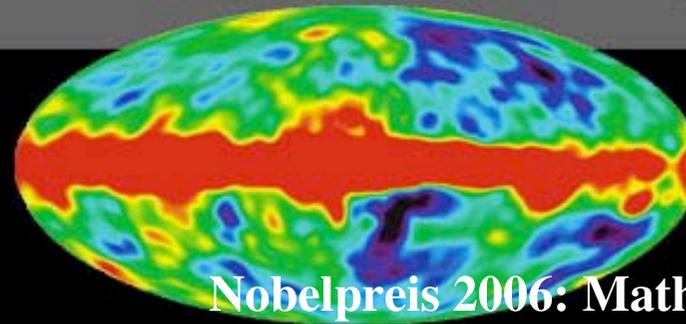
Penzias and
Wilson



1992

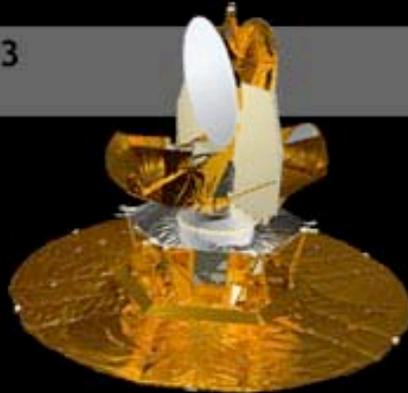


COBE

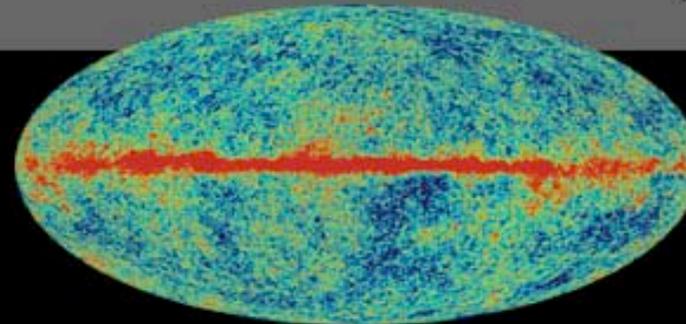


Nobelpreis 2006: Mather, Smoot

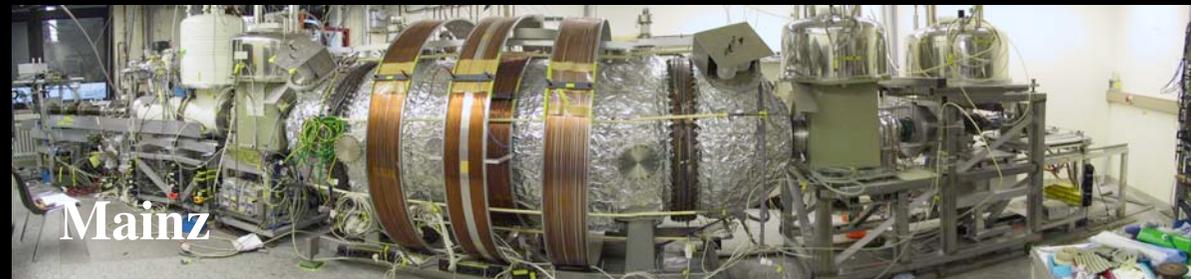
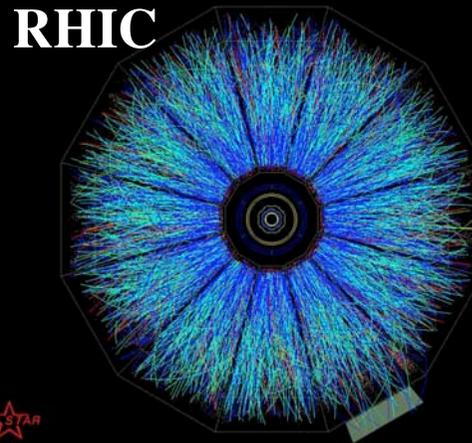
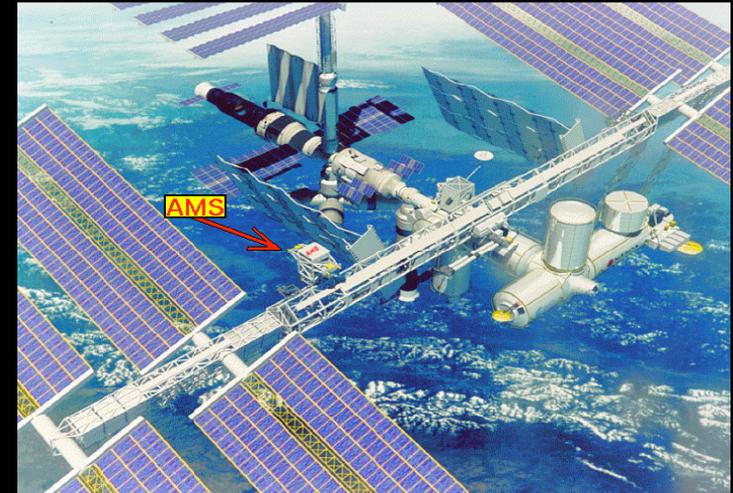
2003



WMAP



Experimente der Astroteilchenphysik



ZUSAMMENFASSUNG

In den letzten Jahrzehnten wurde das Verständnis der Physik entscheidend verbessert.

Jedoch ... viele Antworten auf fundamentale Fragen fehlen noch!

Teilchenphysik, Astrophysik und Kosmologie müssen gemeinsam zu ihrer Beantwortung beitragen.

Der Large Hadron Collider wird ein wichtiges Werkzeug sein.

WIR LEBEN IN INTERESSANTEN ZEITEN!

URL und Danksagung

URL:

<http://wwwhephy.oeaw.ac.at/p3w/trigger/globalTrigger/trans/Higgsjagd.pdf>

Bildmaterial:

**CERN, Fermilab, DESY, KEK, SLAC, BNL, NASA, ESA,
Connections Group, Purdue University, TIME, u.a.**

**Dank der DGLR und Georg Willich für die Einladung,
sowie Hansgeorg Wulz!**

Danke für Ihre Aufmerksamkeit!