



Genf

LHC

# Der Teilchenbeschleuniger am CERN in Genf

CERN

27 km

Frankreich

# CERN 1954-2004



Conseil Européen pour la  
Recherche Nucléaire

European Center for  
Particle Physics



Sur le terrain du futur institut nucléaire



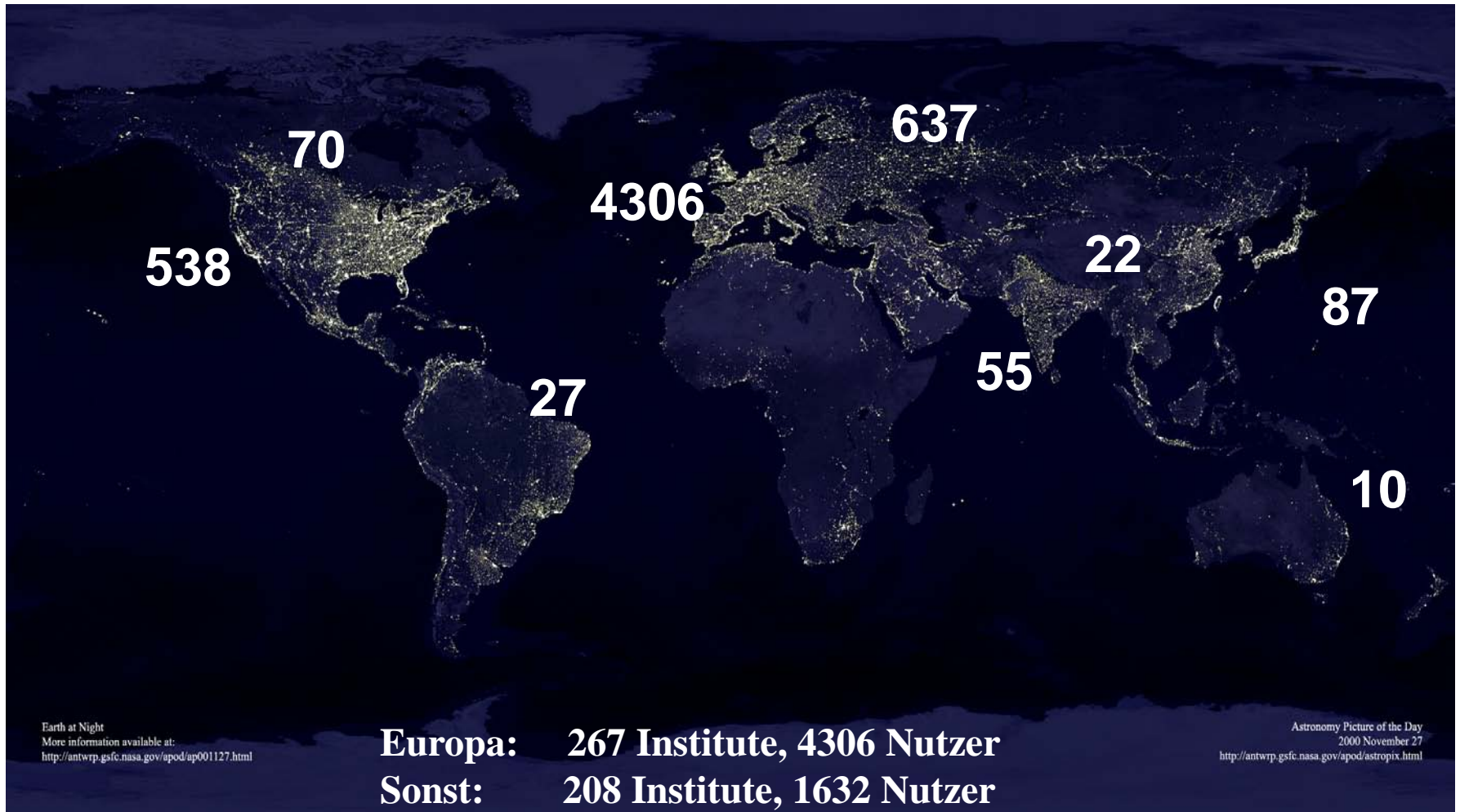
Sous la conduite de M. A. Picot, les membres du Conseil européen pour la recherche nucléaire se sont rendus hier à Meyrin pour reconnaître le terrain où s'élèvera le Centre nucléaire (voir en Dernière heure)

(Photo Freddy Bertrand, Genève)

La Suisse du 30 octobre 1953



# CERN-Nutzer



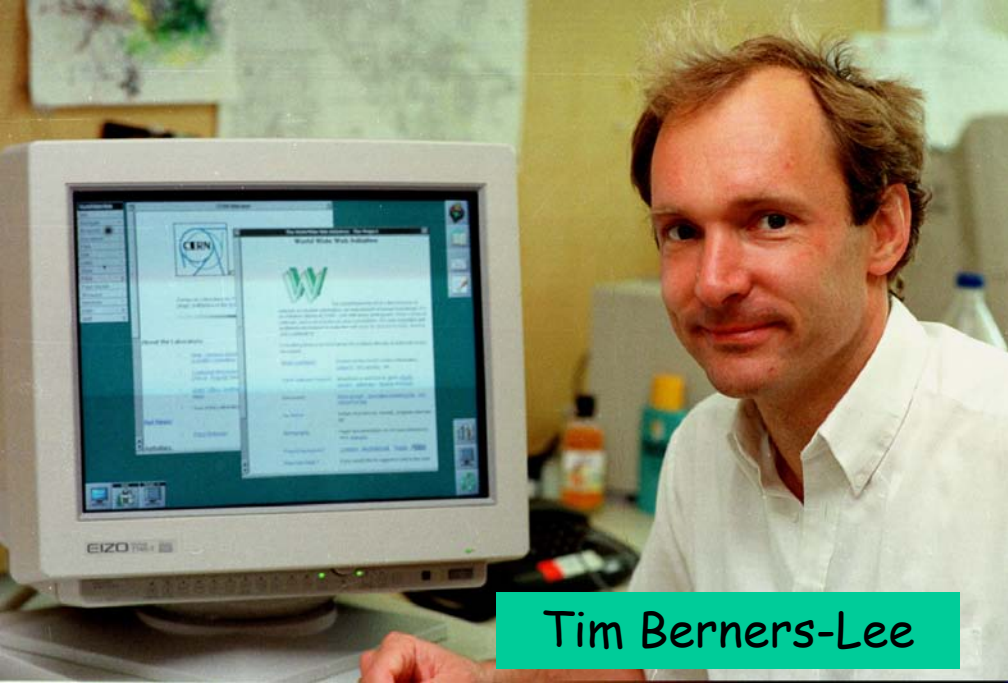
Earth at Night  
More information available at:  
<http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap001127.html>

Astronomy Picture of the Day  
2000 November 27  
<http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/astropix.html>

# CERN 1954-2004



- Weltgrößtes Labor für Elementarteilchenphysik  
6000 Wissenschaftler  
800 Millionen Euro / Jahr



Tim Berners-Lee

CERN 1954-2004



Spin-Off

World Wide Web

- eine Erfindung bei CERN

Internet für alle!

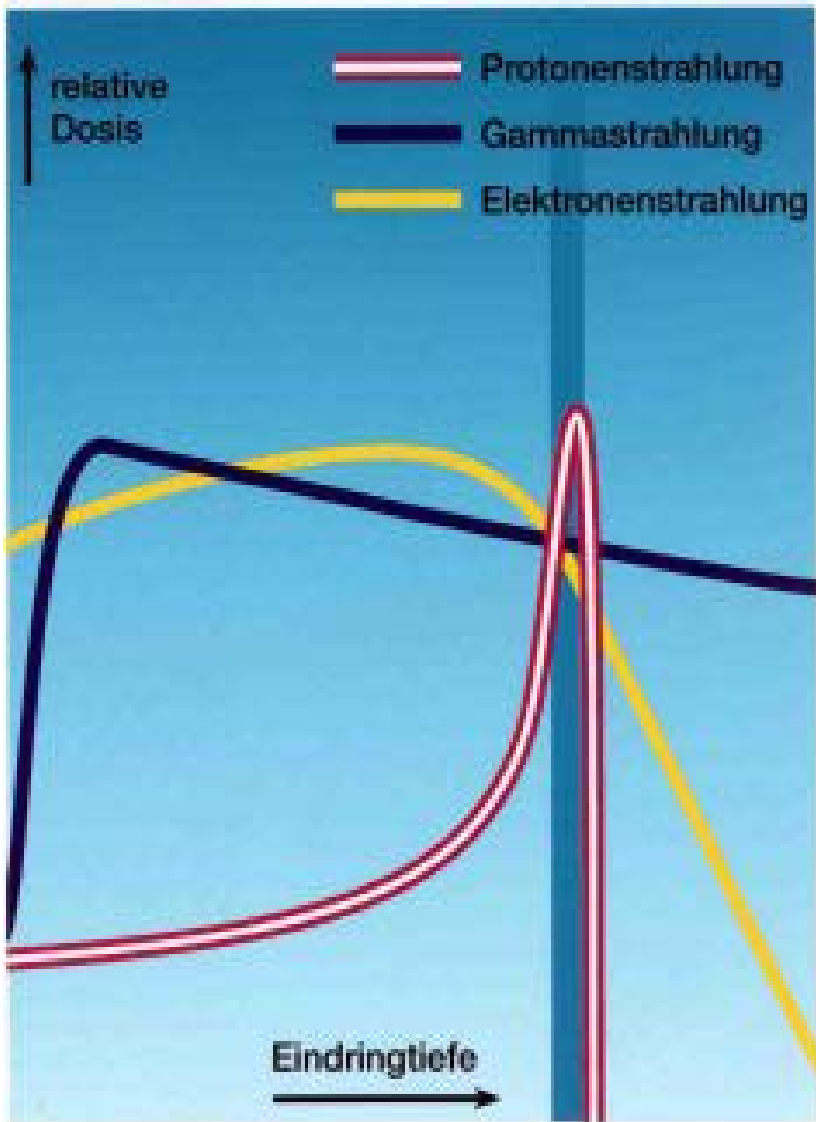
Das WWW wurde 1990 am CERN erfunden, um den Daten- und Informationsaustausch innerhalb der Forschergruppen effektiver zu gestalten.

Rasch breitete es sich auf andere Wissenschaftszweige aus. Heute ist es ein wichtiger Bestandteil der globalen Infrastruktur (300 Millionen Nutzer).

Lehren:

- Spitzenforschung erfordert Entwicklung neuer Methoden und Produkte, die weit einsetzbar sind.
- Universitäten und Forschungszentren sind wichtige Entwickler und Multiplikatoren zur Verbreitung neuer Techniken.

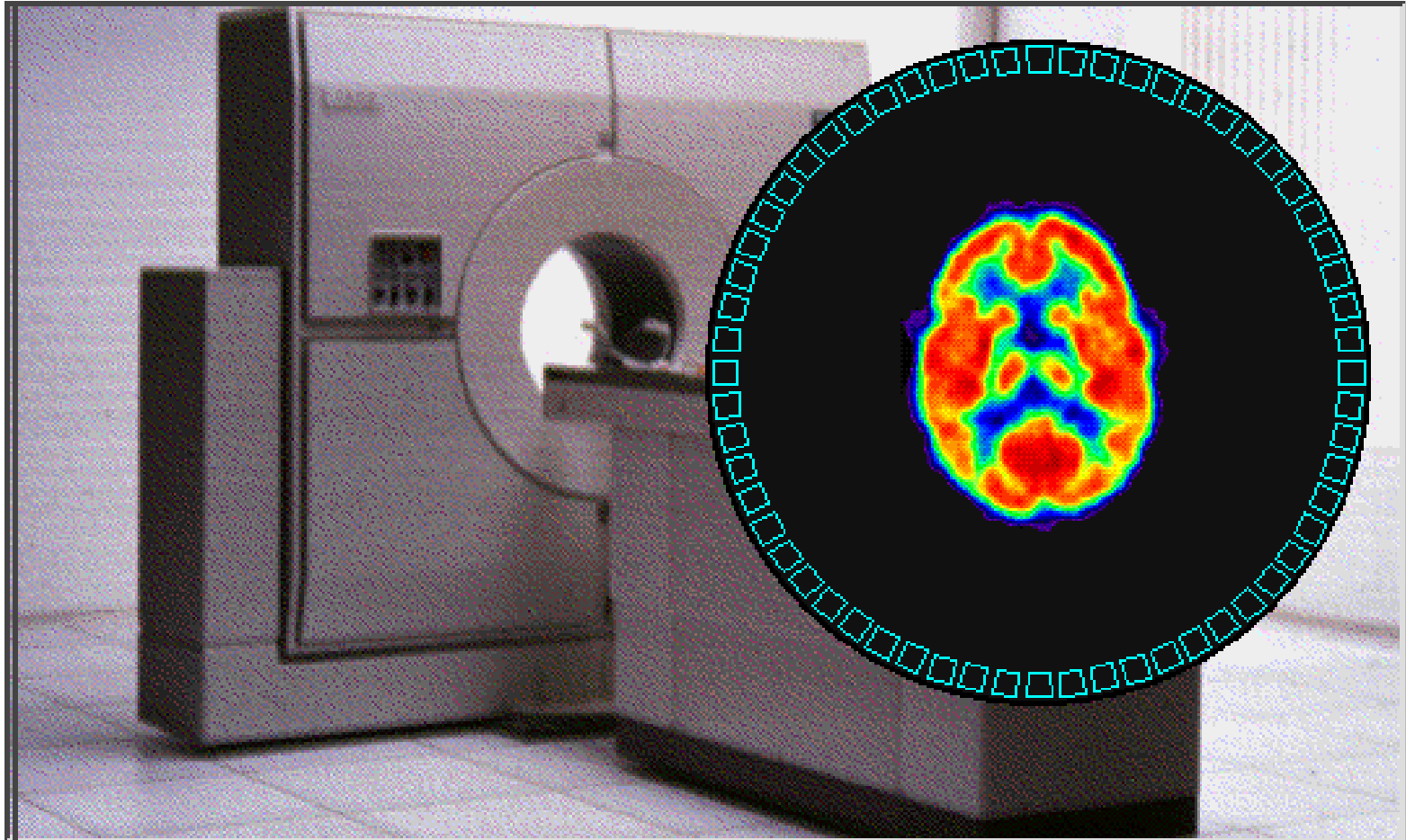
# Tumor-Bestrahlung mit leichten Ionen



Mit leichten Ionen lässt sich die Bestrahlung so dosieren, dass der Tumor zerstört wird, ohne das gesunde Gewebe zu schädigen.



# PET Funktionsweise



# CERN 1954-2004

## Prominenz



**Nobelpreisträger**  
**C. Rubbia (1984),**  
**S. Ting (1976),**  
**G. Charpak (1992)**  
**(Teilchendetektor)**



**Carlo Rubbia und Simon van der Meer**  
**Nobelpreis 1984 (Entdeckung W und Z )**



# Langjährige Zusammenarbeit CERN - RWTH



22. November 2004 - Aula I im Hauptgebäude, Templergraben 55, RWTH Aachen

## Verleihung der Ehrendoktorwürde der RWTH an

**Prof. C. Rubbia und Prof. S.C.C. Ting**  
anlässlich des 50-jährigen Bestehens von CERN



**Carlo Rubbia**  
Nobelpreis 1984

**16:15**

**Prof. H. Schopper: 50 Jahre CERN -  
Wissenschaftliche Erfolge und  
Völkerverständigung**

**17:00**

**Prof. G. Flügge: Laudatio**

**17:20**

**Prof. B. Rauhut (Rektor der RWTH):  
Honorary Doctorate to C. Rubbia and S.C.C. Ting**

**17:30**

**Prof. C. Rubbia: The Future of Energy**

**18:00**

**Prof. S.C.C. Ting: The Anti Matter Universe**

**Kontakt:** Prof. G. Flügge

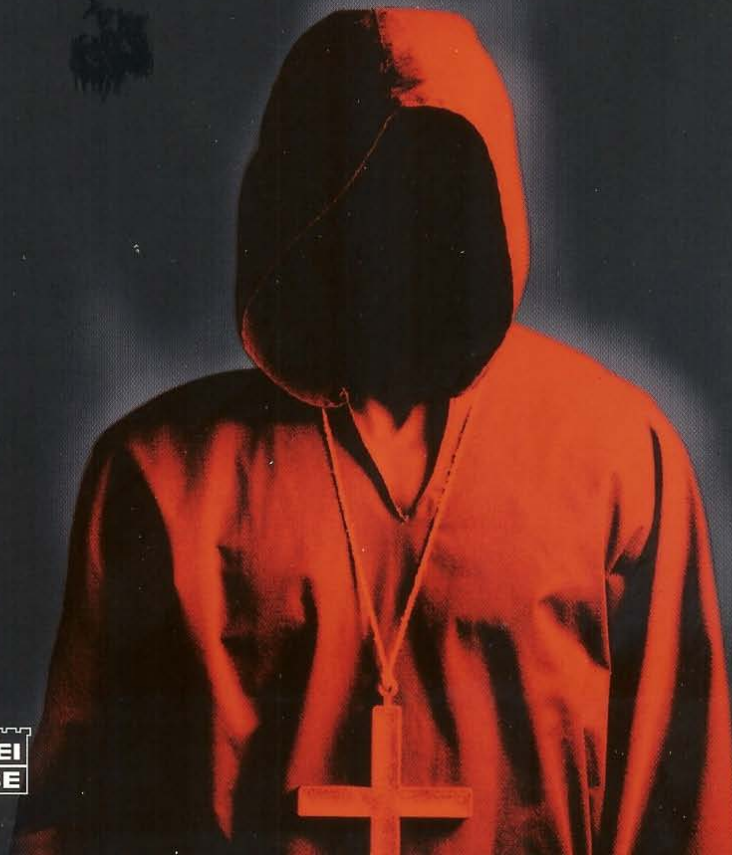


**Samuel C.C. Ting**  
Nobelpreis 1976

DAN BROWN

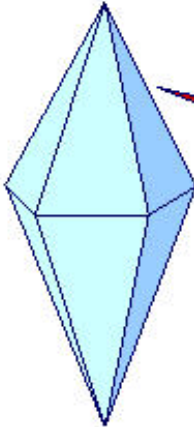
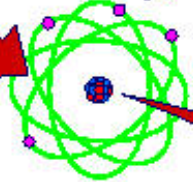


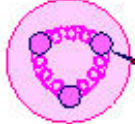


# ILLUMINATI

THRILLER



BASTEI  
LÜBBE

# Die Struktur der Materie

Kristall Molekuel	Atom	Atom-Kem	Elementar- teilchen	
 	 <b>Keme</b>	 <b>Mesonen</b>  <b>Baryonen</b> <b>Proton Neutron</b>	 <b>Leptonen</b> $e, \mu, \tau, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$  <b>Quarks</b> $u, c, d, s, b, t$	
1 cm	$10^{-8}$ cm	$10^{-12}$ cm	$10^{-13}$ cm = 1 fm	?

Elektromagnetische Wechselwirkung)

Kernkraft = starke Wechselwirkung

# Die 4 Grundbausteine des Sonnensystems

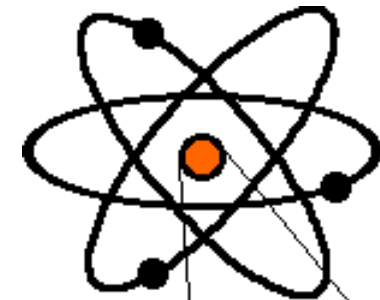
$\left( \begin{array}{c} \nu_e \\ e^- \end{array} \right)$  Neutrino  
Elektron } Leptonen

$\left( \begin{array}{c} u \\ d \end{array} \right)$  up-Quark  
down-Quark

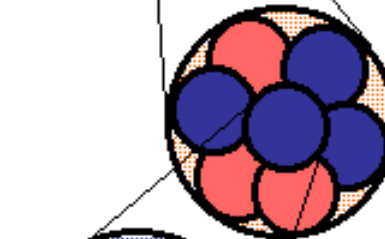
Kernbausteine = Nukleonen:

$p = \text{Proton} = u + u + d$

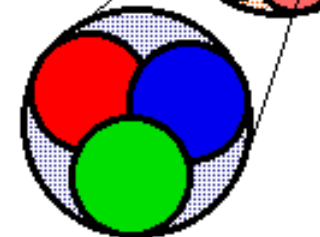
$n = \text{Neutron} = u + d + d$



Atom aus  
Elektronen  
und Kern



Kern aus  
Nukleonen



Nukleon aus  
Quarks

Grundbausteine sind punktförmig : “Elementarteilchen“

# Standardmodell der Teilchenphysik

Materie:

viele Teilchen

Leptonen:  $\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}$   $\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}$   $\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}$

Quarks:  $\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$   $\begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}$   $\begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$

instabil!

Wechselwirkungen: Austauschpartikel:

elektromagnetisch:

Photon	$\gamma$	masselos
Z-Boson	Z	91 GeV
W-Boson	$W^+$ $W^-$	80 GeV

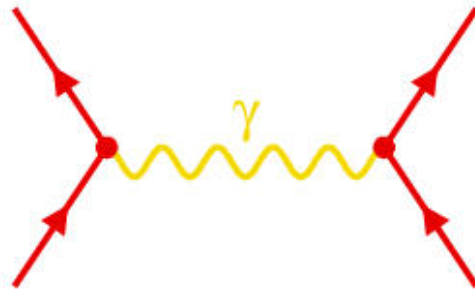
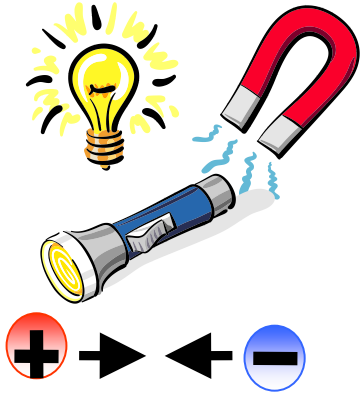
schwach:

stark:

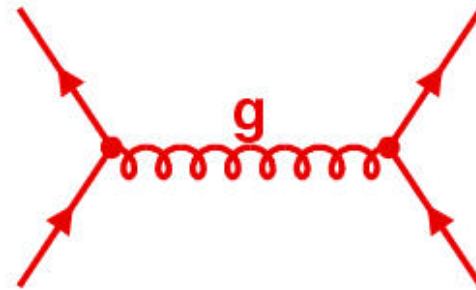
Gluon	g	masselos
-------	---	----------

Experimentellen Daten werden akkurat beschrieben!

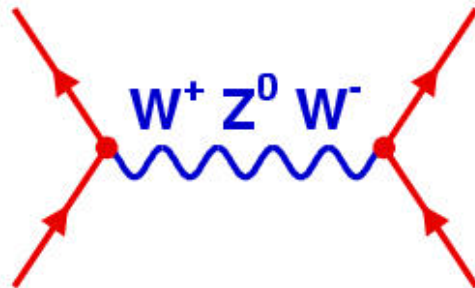
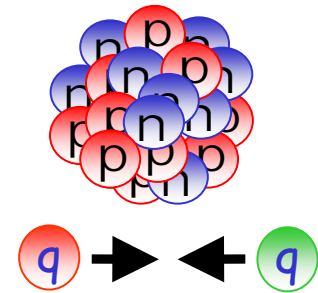
# Fundamentale Wechselwirkungen



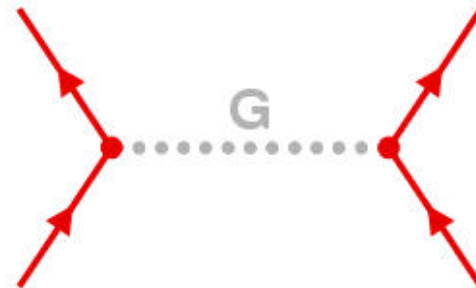
elektromagn. Kraft



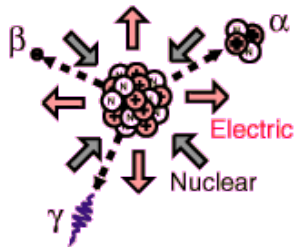
starke Kraft



schwache Kraft



Gravitation



**schwächste 'Kraft'**  
im Mikrokosmos völlig  
unbedeutend

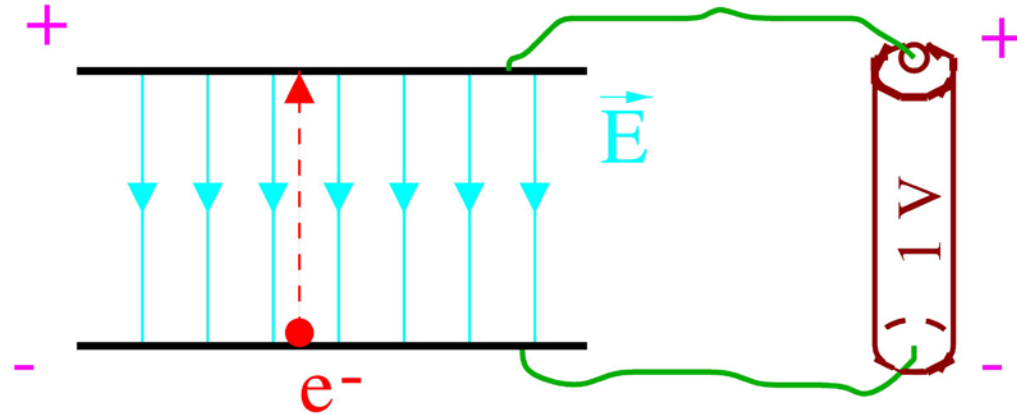


# Energie und Masse

## Energie-Einheit

$eV$  = Elektronenvolt

$$1 GeV = 10^9 eV \approx 10^{-10} J$$



## Energie und Masse



$$E = m c^2$$

$c = 300000 \text{ km/s}$

Energie kann in Masse umgewandelt werden und umgekehrt !

Protonmasse  $\hat{=} 1 GeV$

# Teilchenbeschleuniger

Untersuchung **kleinster**  
**Materiestrukturen** oder  
**schwerer Teilchen**

verlangt

Beschleunigung von  
Teilchen auf  
höchste Energien

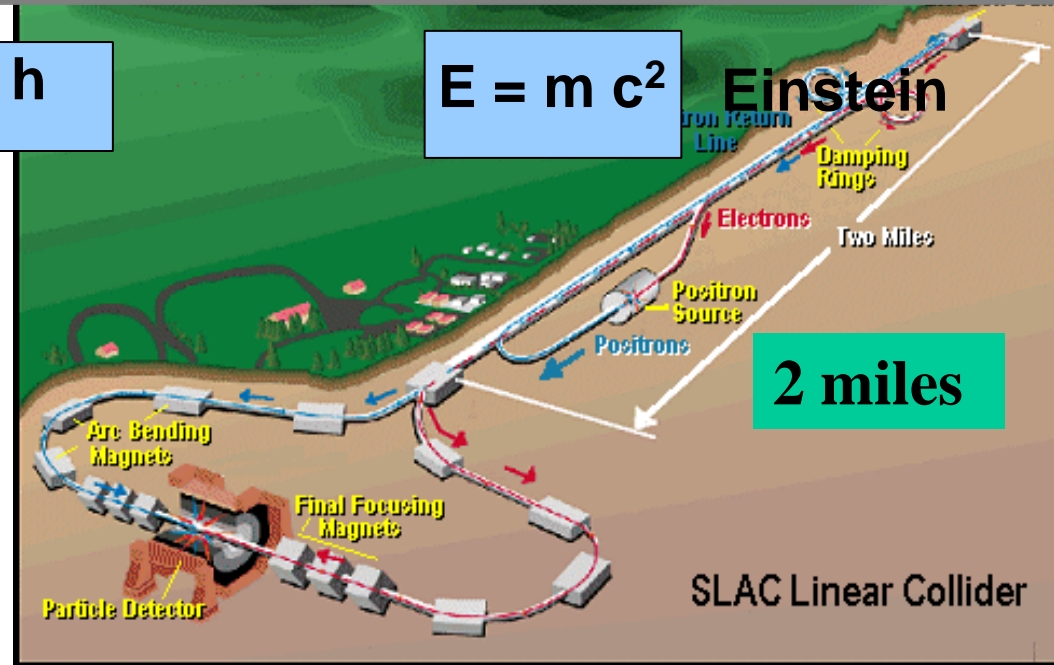
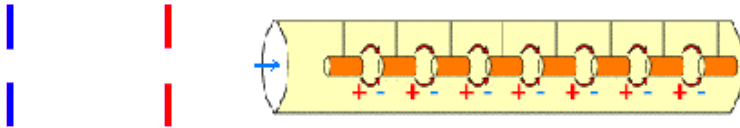
Heisenberg'sche  
Unschärferelation

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq h$$

$$E = m c^2$$

Einstein

Linearbeschleuniger :



Wiederholtes Beschleunigen:

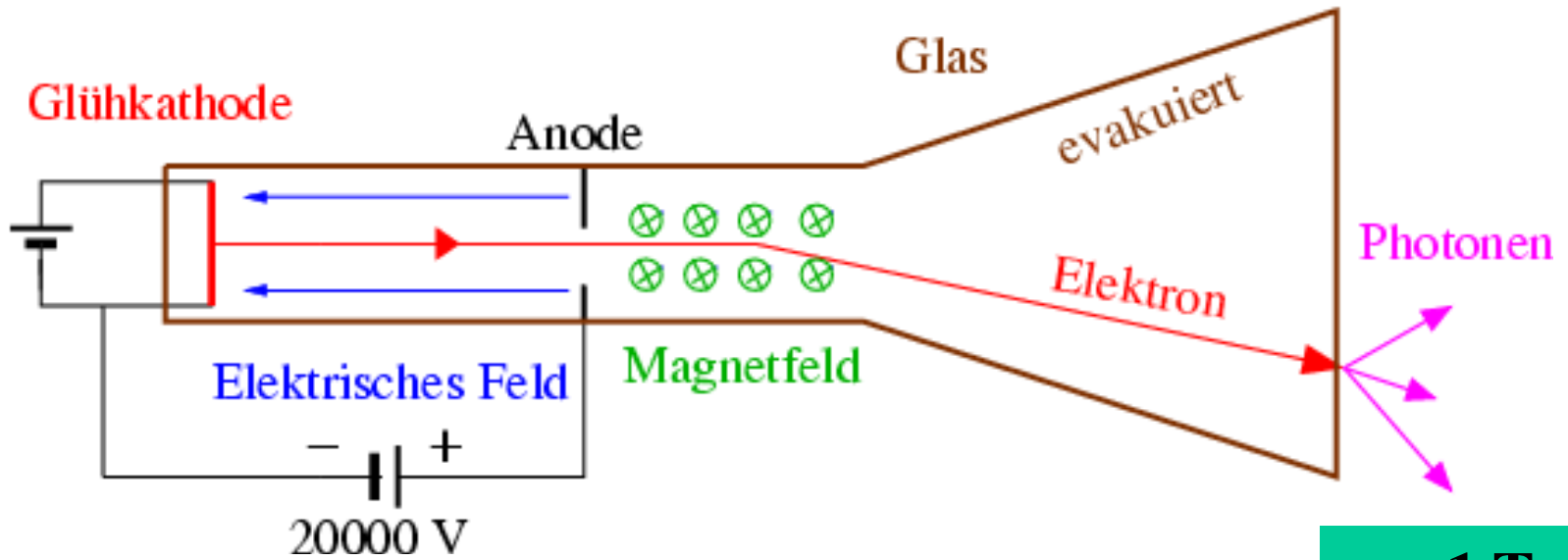
1 000 eV =	$10^3$ eV = 1 keV
1 000 000 eV =	$10^6$ eV = 1 MeV
1 000 000 000 eV =	$10^9$ eV = 1 GeV
1 000 000 000 000 eV =	$10^{12}$ eV = 1 TeV

**Stanford Linear Accelerator**  
**ca. 50 GeV**

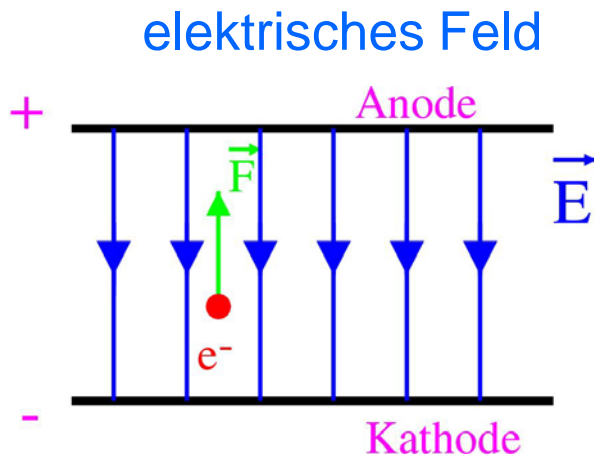


# Teilchenbeschleuniger: Elektronen: 20 keV

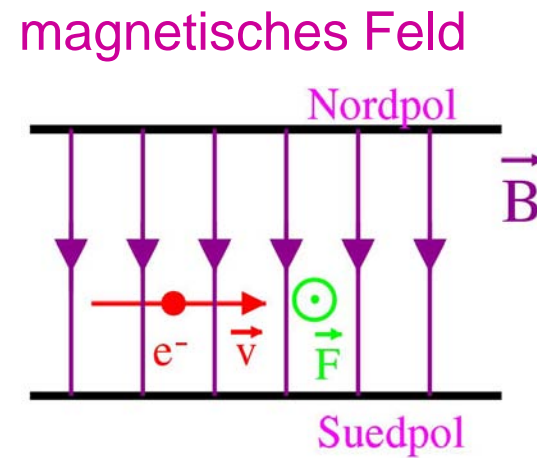
Erzeugung Beschleunigung Ablenkung Kollision



ca. 1 Tesla  
= 1 T



beschleunigt oder lenkt ab

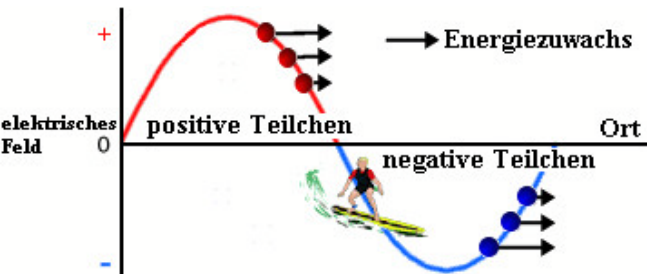
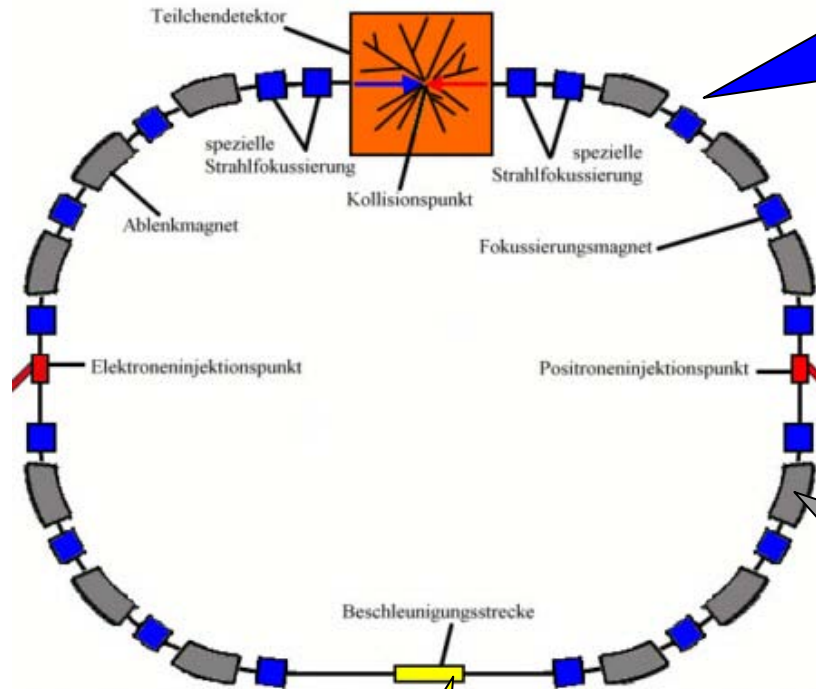


lenkt (stark) ab



# Teilchenbeschleuniger

## Weiterentwicklung zu Kreisbeschleunigern und Kollidern



# Teilchenbeschleuniger

Grosse  
Beschleuniger-  
Zentren  
weltweit:



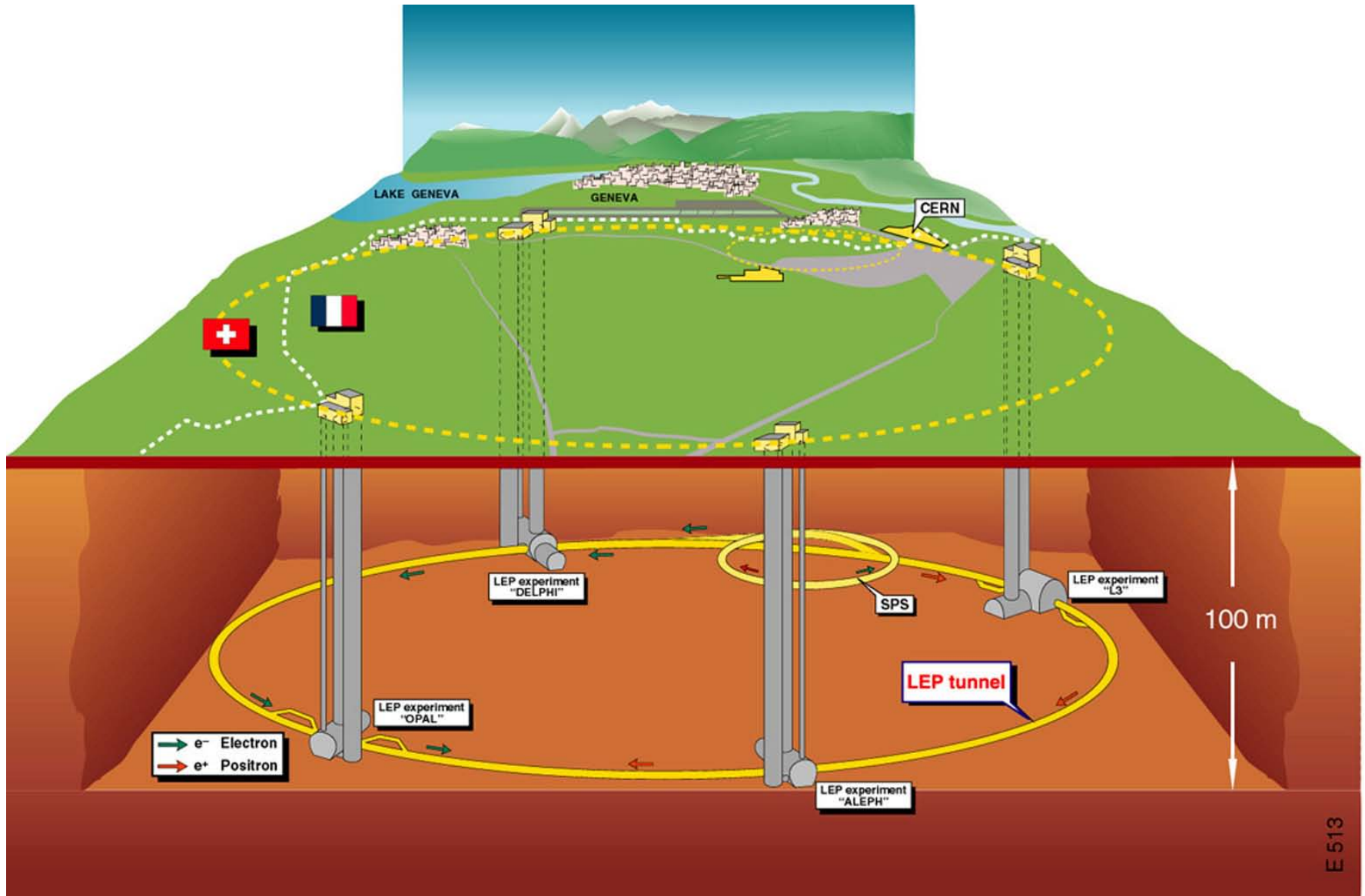
**physikalische Entdeckungen/Verständnis**



**Durchbruch bei Detektor- und/oder Beschleunigertechnologie**

# Elektron-Positron-Kollider LEP am CERN

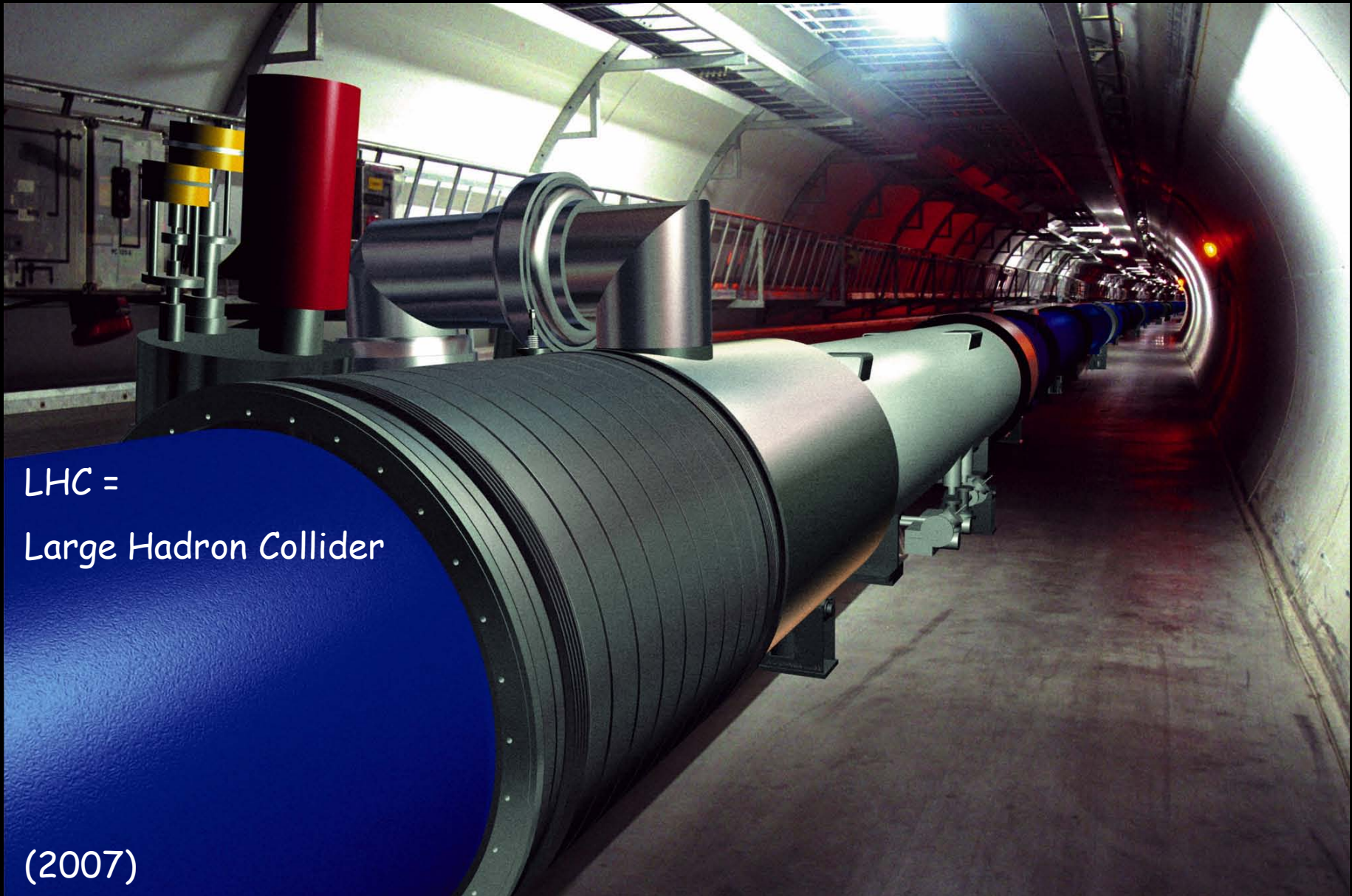
## 200 GeV



1.2

# Der weltgrößte Teilchenbeschleuniger LHC

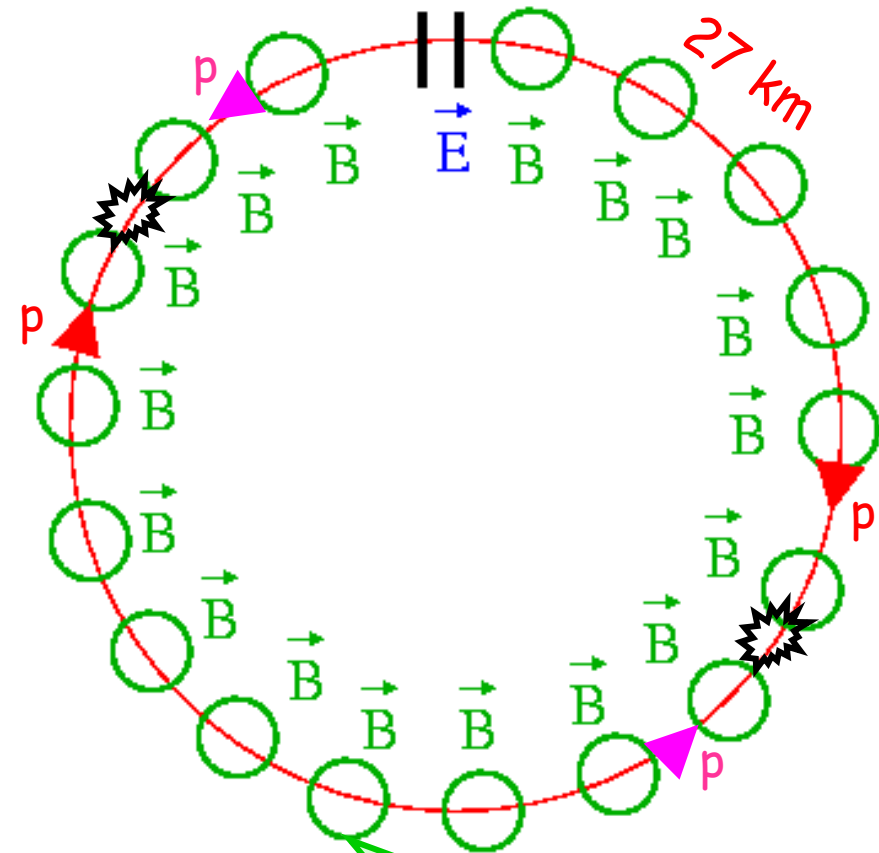
Eine „Zeitmaschine“ für die Reise zurück zum Urknall



LHC =  
Large Hadron Collider

(2007)

# LHC = Large Hadron Collider



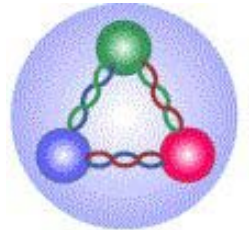
1200 Dipolmagnete,  
supraleitend  
je 14 m lang,  $B = 8$  Tesla

Large

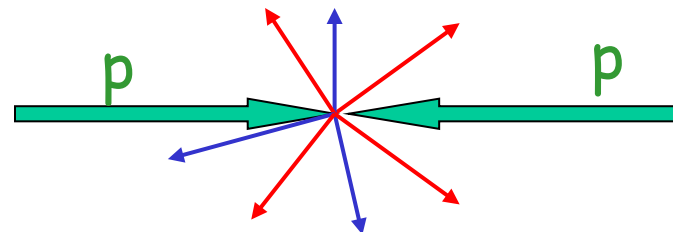
27 km,  
14000 GeV  
= 14 TeV

Hadron

Proton



Collider



Größe  
wächst mit  
Energie!

# Cryogenic magnet test station



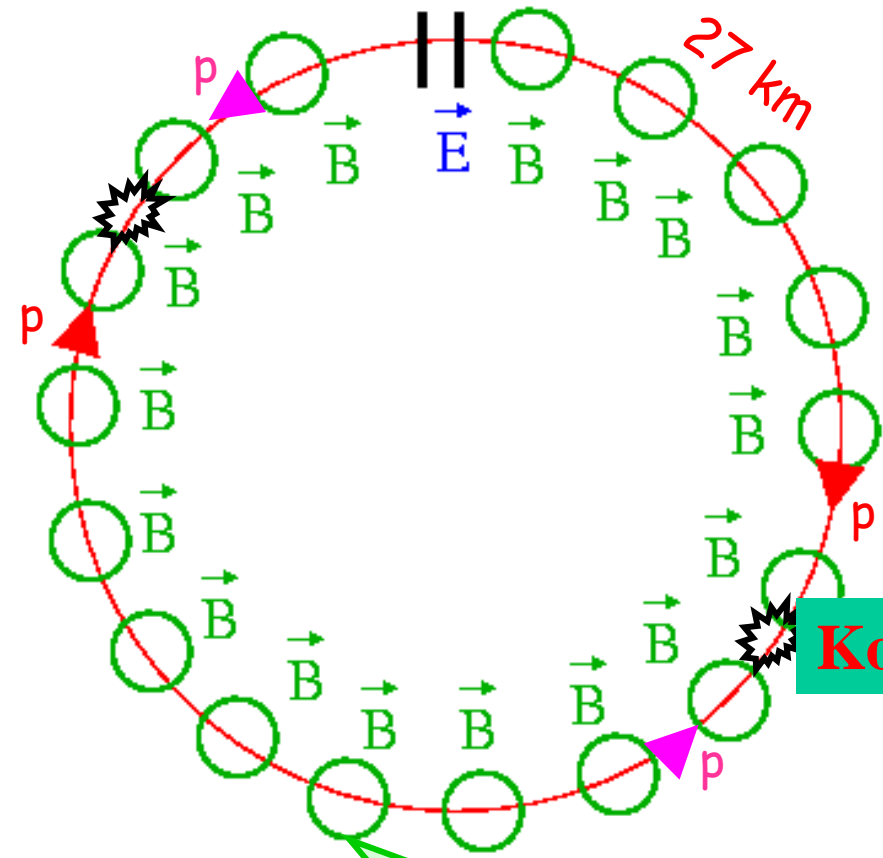




# Fertiges Beschleunigersegment



# LHC = Large Hadron Collider

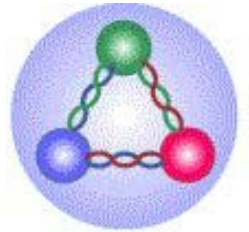


Large

27 km,  
14000 GeV  
= 14 TeV

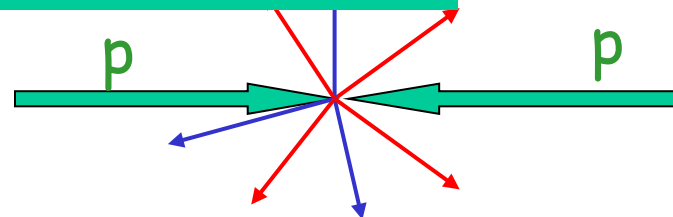
Hadron

Proton



**Kollisionpunkte → Detektoren**

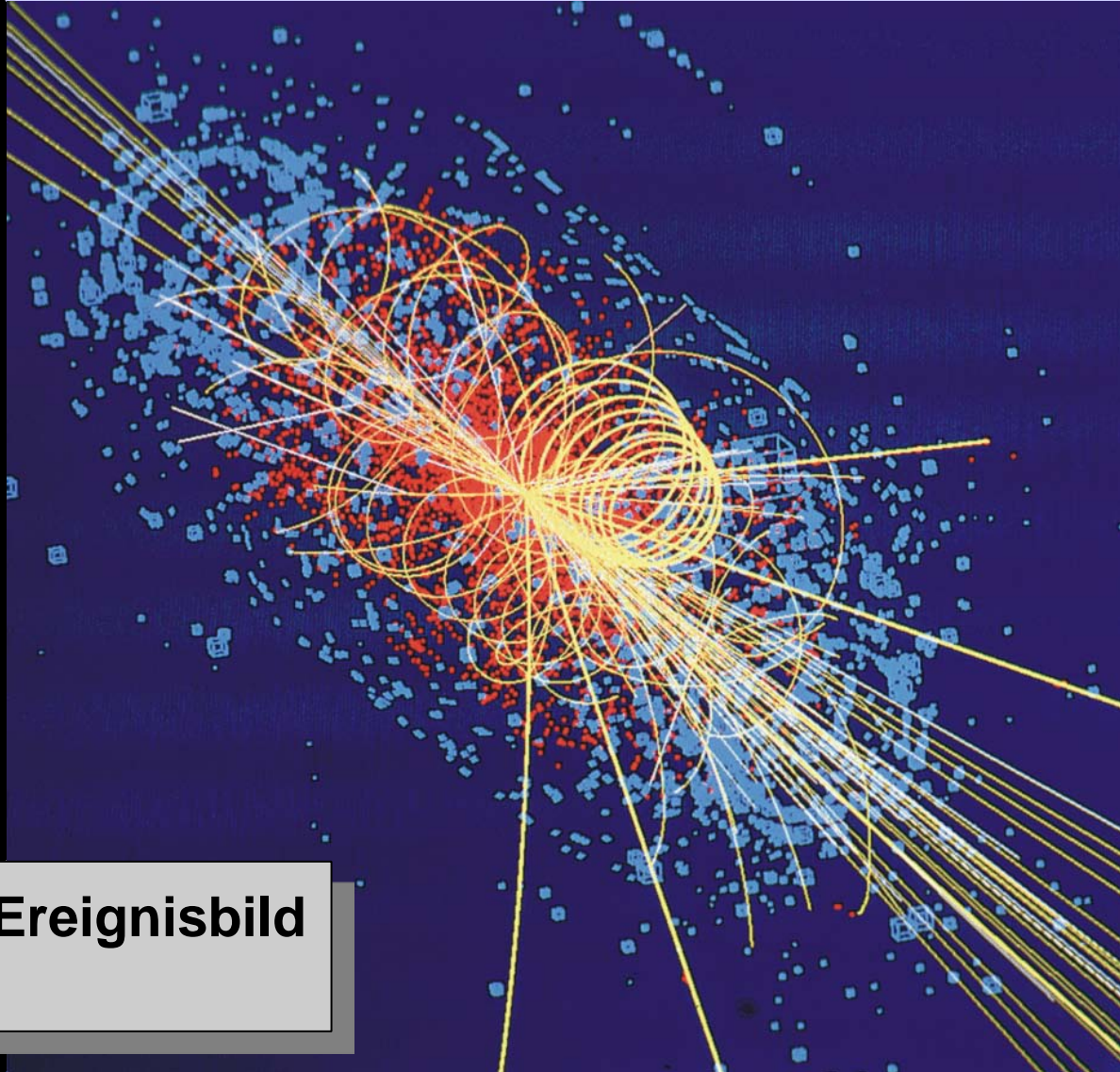
Collider



1200 Dipolmagnete,  
supraleitend  
je 14 m lang,  $B = 8$  Tesla

Größe  
wächst mit  
Energie!

# *"Bilder"* der Teilchenkollisionen

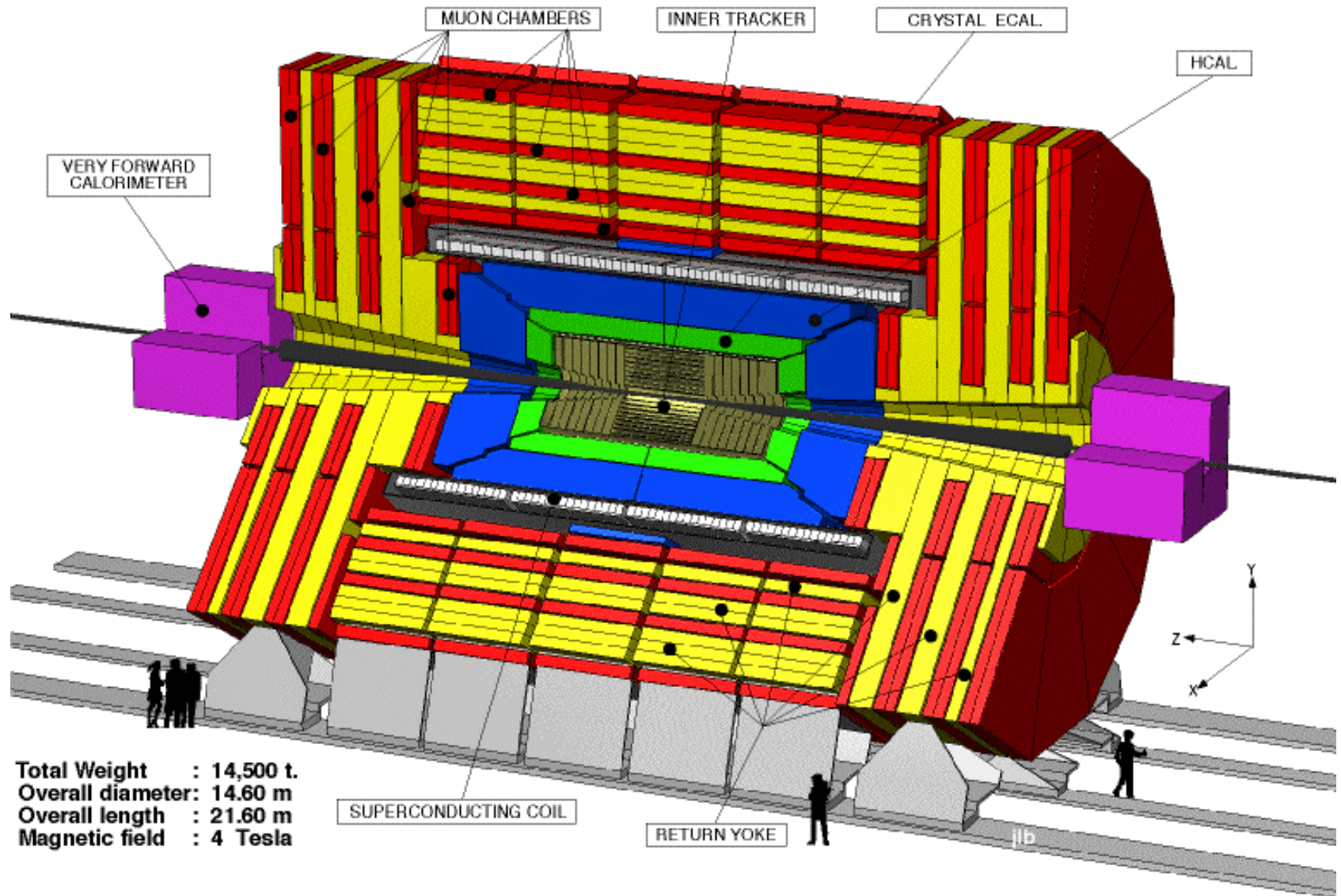


typisches Ereignisbild  
in 2007 ...

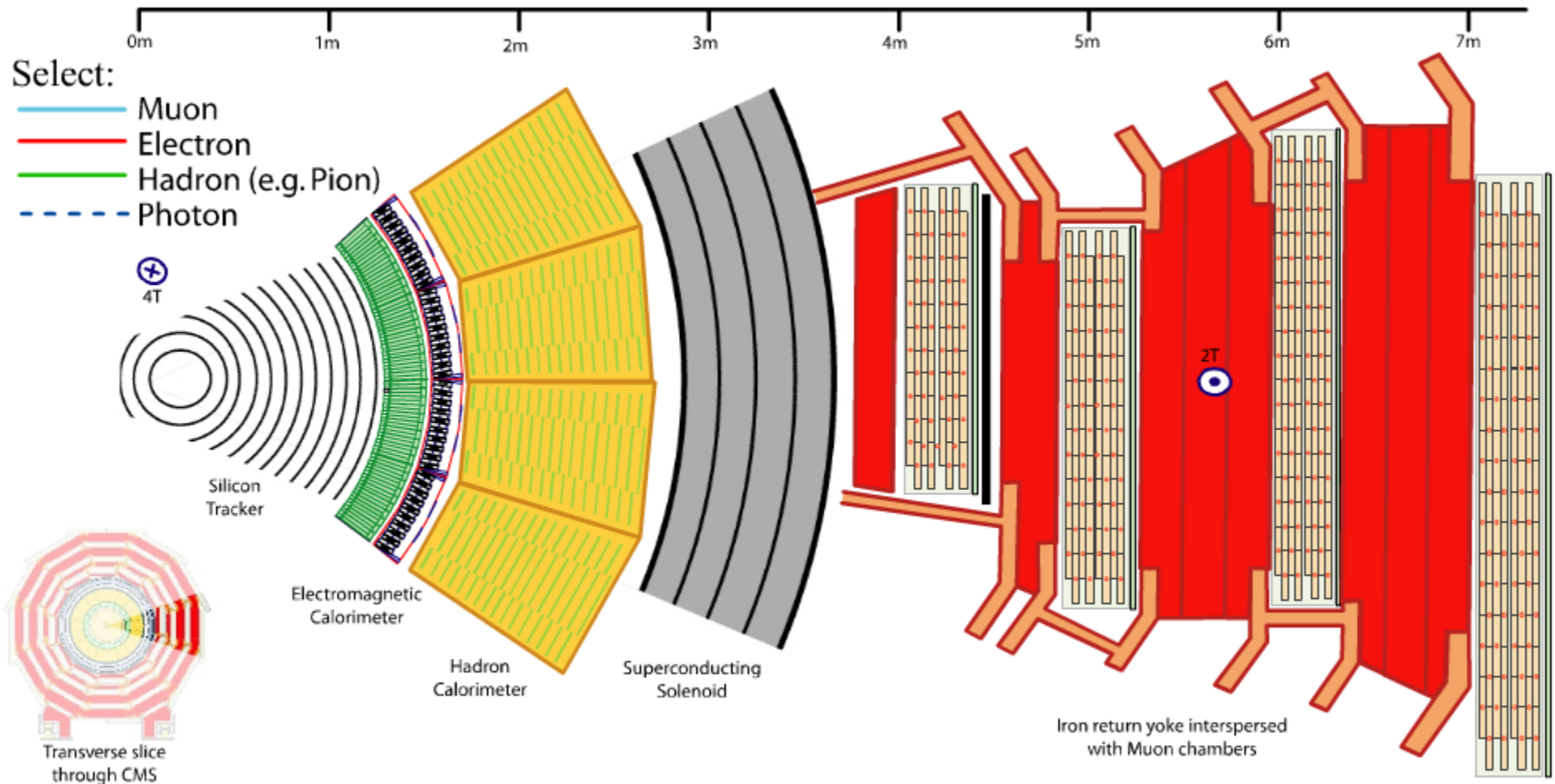
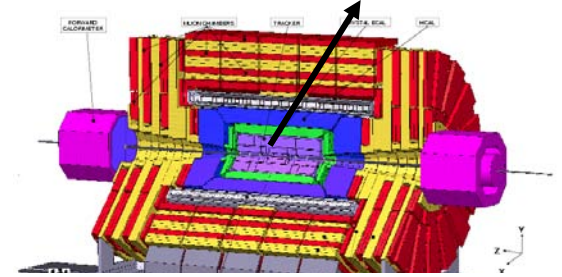
# Zukunft: CMS-Detektor am LHC (Large Hadron Collider) ab 2007

## Proton-Proton-Beschleuniger Schwerpunktsenergie 14 000 GeV

### CMS-Detektor



# CMS-Detektor: Funktionsprinzip

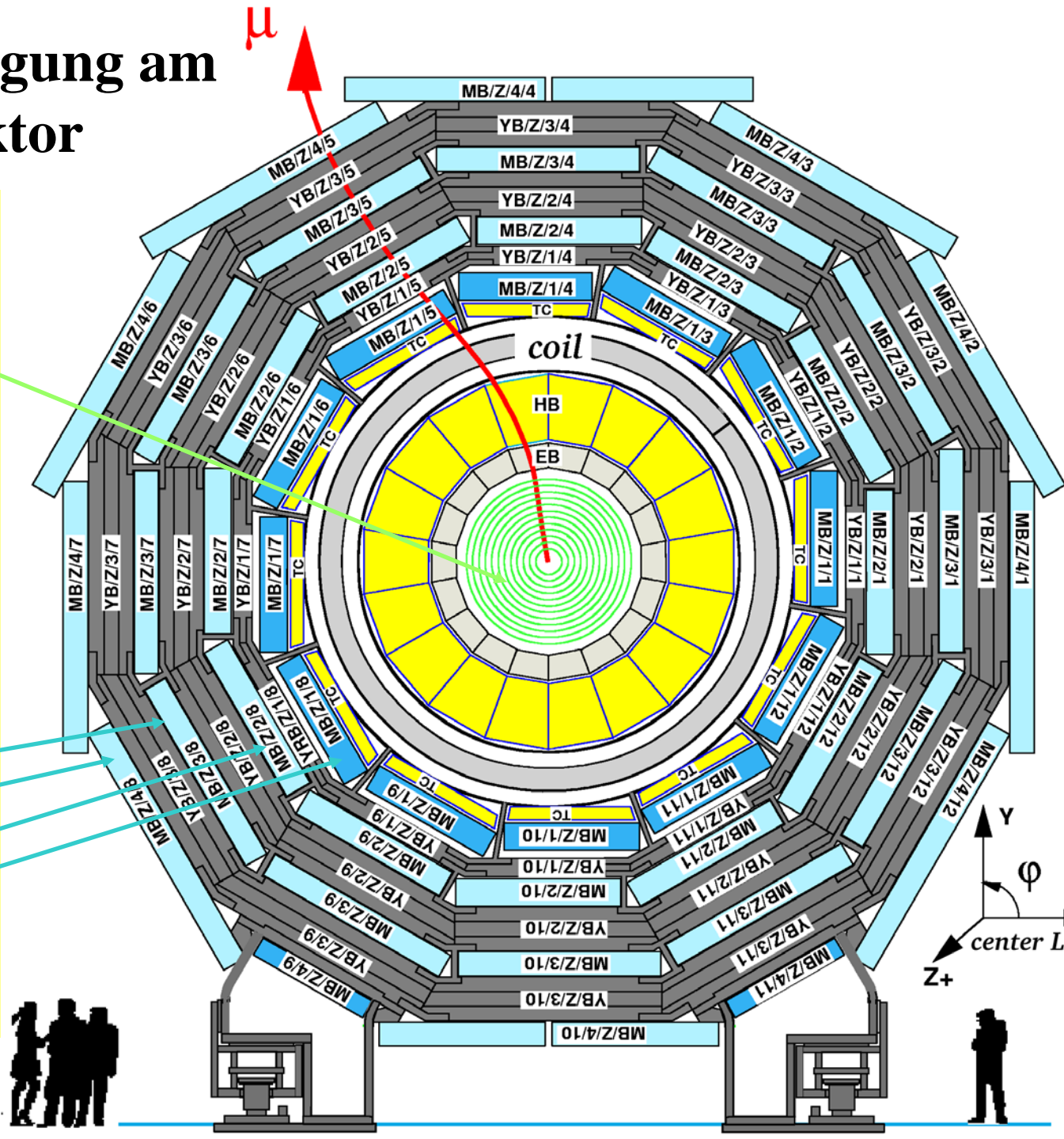


Größe wächst mit Teilchenenergie!

# Aachener Beteiligung am CMS Detektor

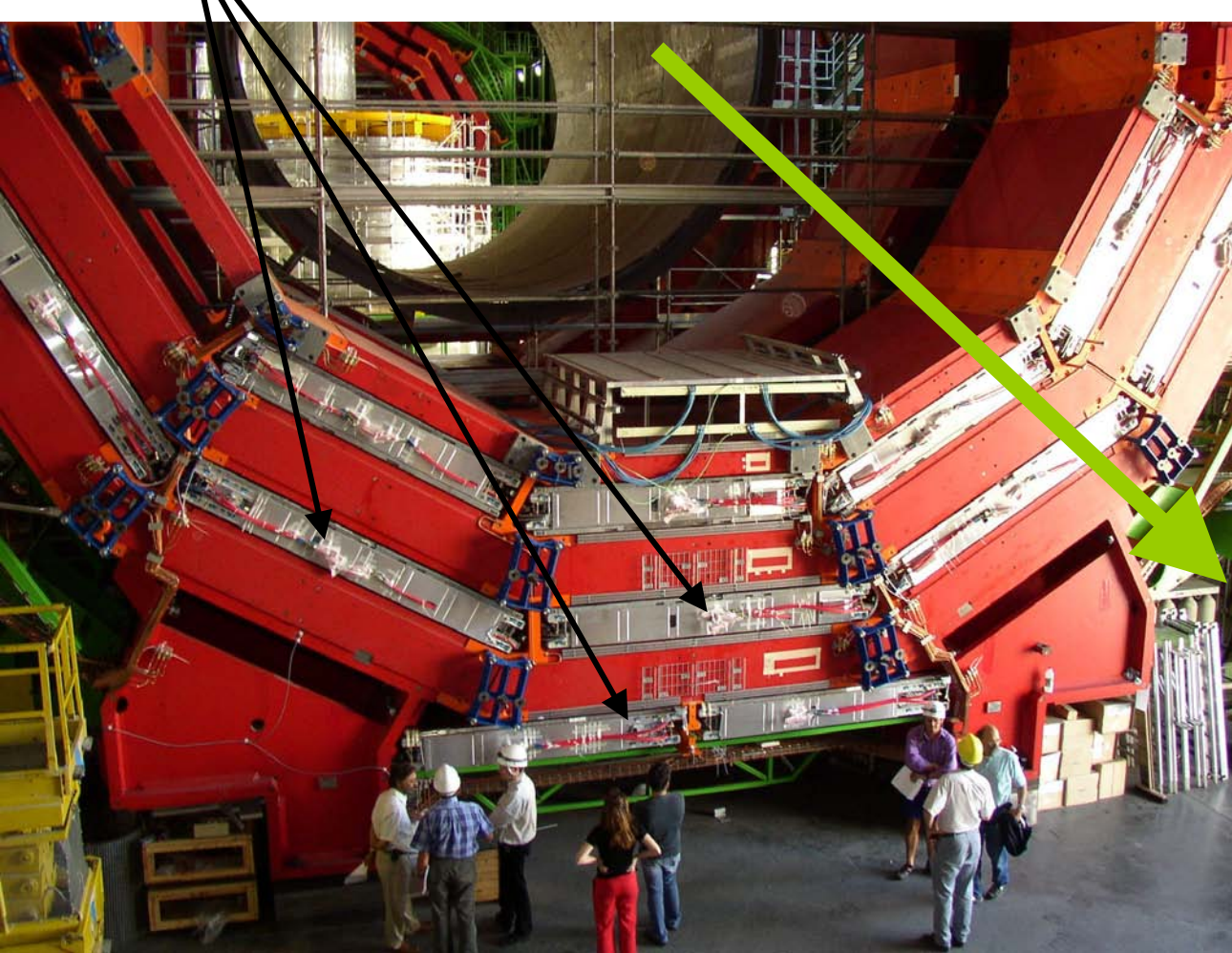
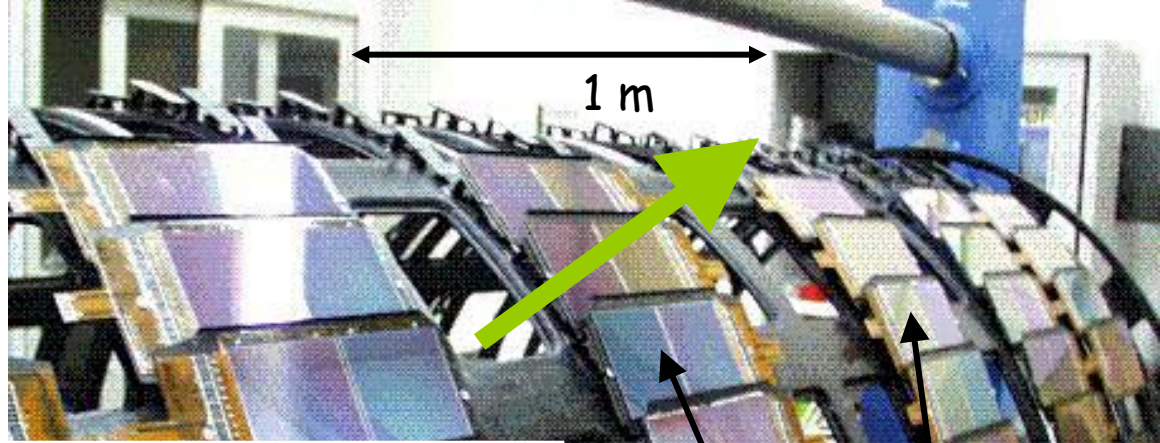
- Innere Spur-kammern (Silizium)

- Myon-Detektor



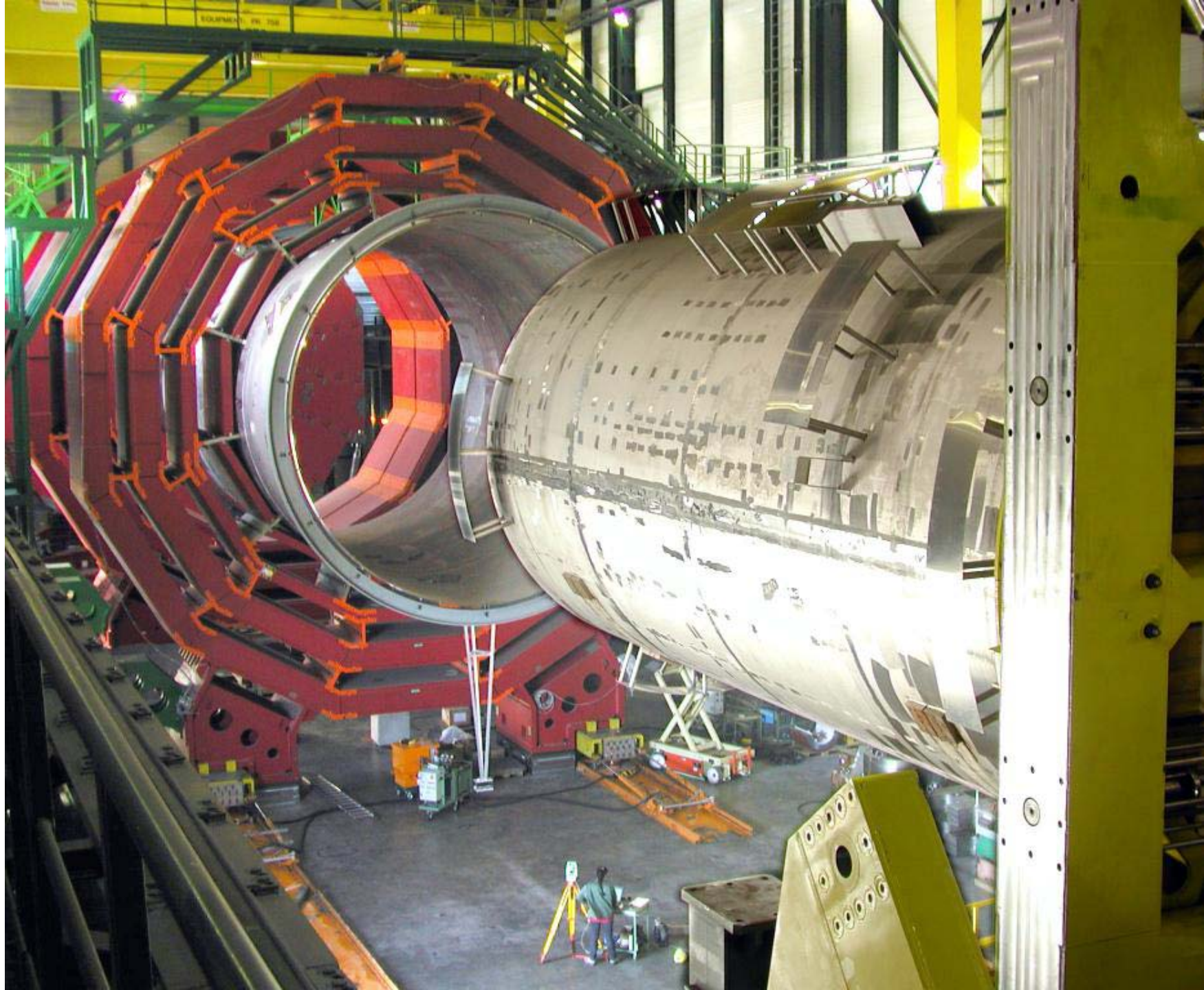
# CMS-Detektor: Aachener Beteiligung

großflächige  
Myondetektoren



hochauflösende  
Silizium-Detektoren

# CMS-Detektor am LHC





**CMS  
Caverne  
80 m  
unter  
der  
Erde**



# Das Standardmodell der Teilchenphysik

3 „Familien“

## Materie-Teilchen:

Leptonen:  $\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}$        $\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}$        $\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}$

Quarks:  $\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$        $\begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}$        $\begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$

leicht

schwer

sehr schwer

? Higgs ?

## Kräfte = Wechselwirkungen:

- stark:            **Gluon g**            masselos
- elektromagn.: **Photon  $\gamma$**             masselos
- schwach:        **W-,Z-Boson**            sehr schwer

### Offene Fragen:

- Teilchenmassen ??
- Gravitation ??
  - Higgs-Boson
  - Supersymmetrie

# Die Massen der Elementarteilchen

Beispiele:

## EXPERIMENT

$$m_e = 510.9989 \text{ keV}$$

$$\frac{m_W}{m_Z} = \frac{80.451 \pm 0.033 \text{ GeV}}{91.188 \pm 0.002 \text{ GeV}} \\ = 0.8823 \pm 0.0004$$

# Die Massen der Elementarteilchen

Beispiele:

EXPERIMENT

$$m_e = 510.9989 \text{ keV}$$

$$\frac{m_W}{m_Z} = \frac{80.451 \pm 0.033 \text{ GeV}}{91.188 \pm 0.002 \text{ GeV}} \\ = 0.8823 \pm 0.0004$$

THEORIE

$$m_e = 0$$

$$\frac{m_W}{m_Z} = \frac{0}{0}$$



# Die Massen der Elementarteilchen

P.Higgs

Beispiele:

**EXPERIMENT**

$$m_e = 510.9989 \text{ keV}$$

$$\frac{m_W}{m_Z} = \frac{80.451 \pm 0.033 \text{ GeV}}{91.188 \pm 0.002 \text{ GeV}} \\ = 0.8823 \pm 0.0004$$

**ERWEITERTE  
THEORIE**

$$m_e = \dots > 0$$

$$\frac{m_W}{m_Z} = \frac{\dots > 0}{\dots > 0} \\ = 0.8812 \pm 0.0014$$



Bisher nicht gefunden:

$$m_{\text{Higgs}} > 114 \text{ GeV}$$

⇒ Neues Teilchen: „Higgs“

**LHC !**



# Der Higgs-Mechanismus - eine Analogie (I)



Higgs-Hintergrundfeld  
erfüllt den Raum



Ein **Teilchen**  
im Higgs-Feld...



... Widerstand gegen  
Bewegung ...  
**Trägheit** ↔ **Masse**

# Der Higgs-Mechanismus - eine Analogie (II)

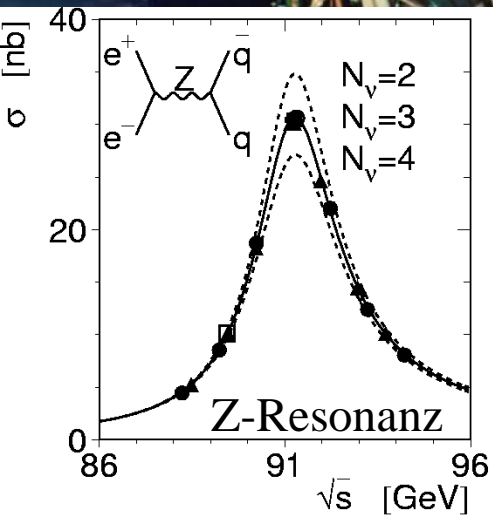
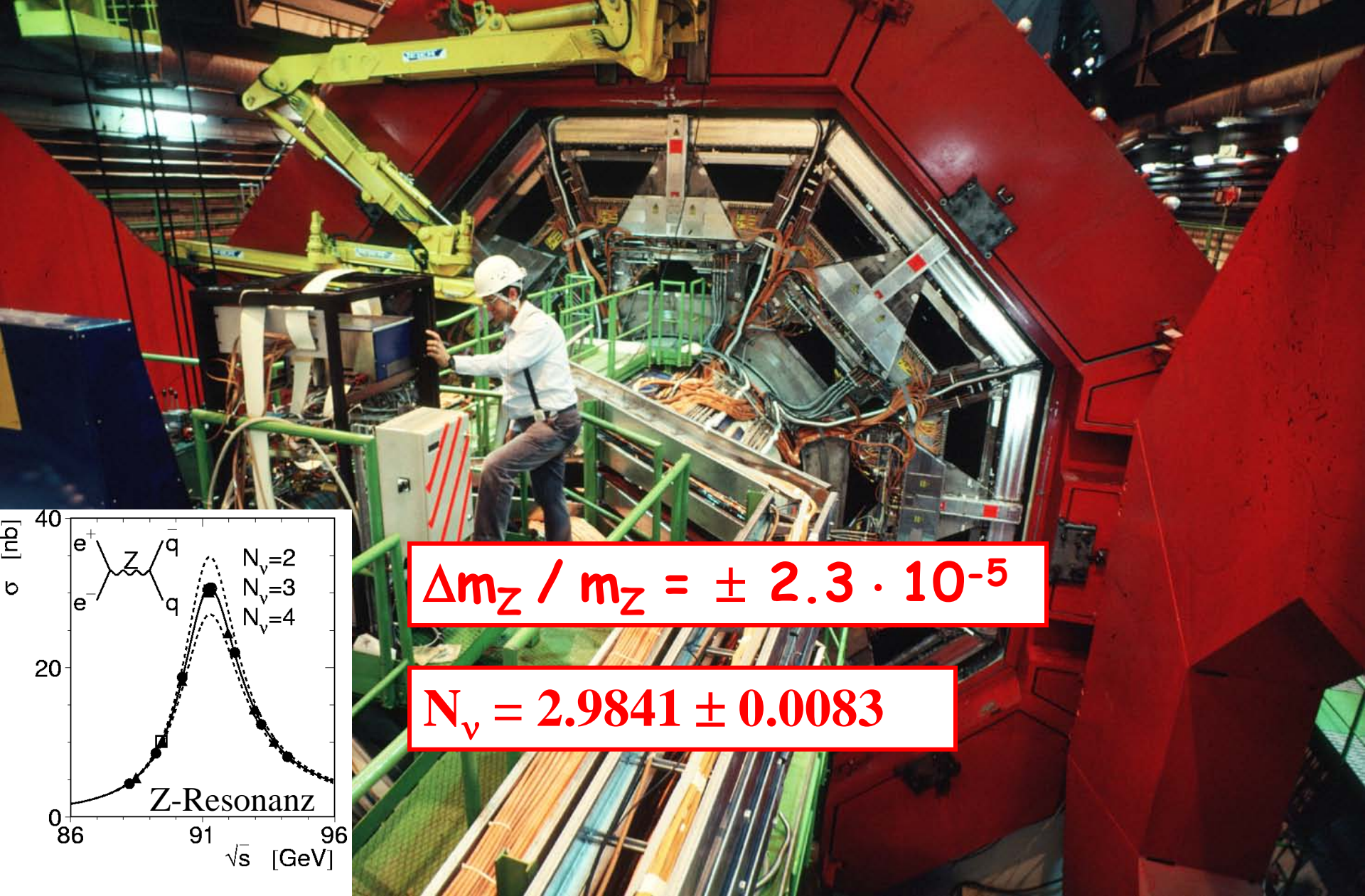


**Anregung des  
Hintergrundfeldes**



**angeregtes Higgs-Hintergrundfeld  
 $\triangleq$  massives Higgs-Bosons**

# LEP-Detektor L3

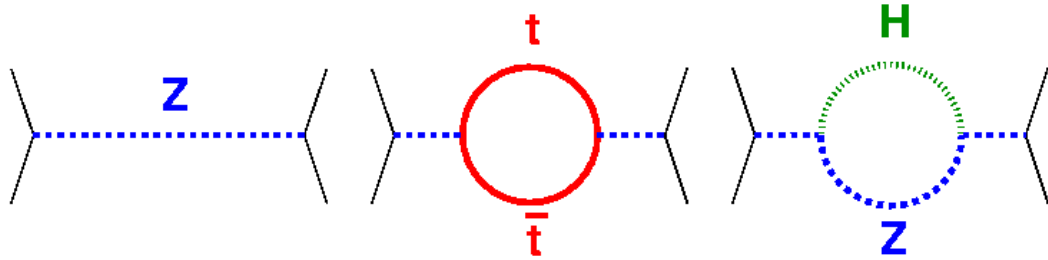


$$\Delta m_Z / m_Z = \pm 2.3 \cdot 10^{-5}$$

$$N_V = 2.9841 \pm 0.0083$$



# Vorhersage der Higgs-Masse

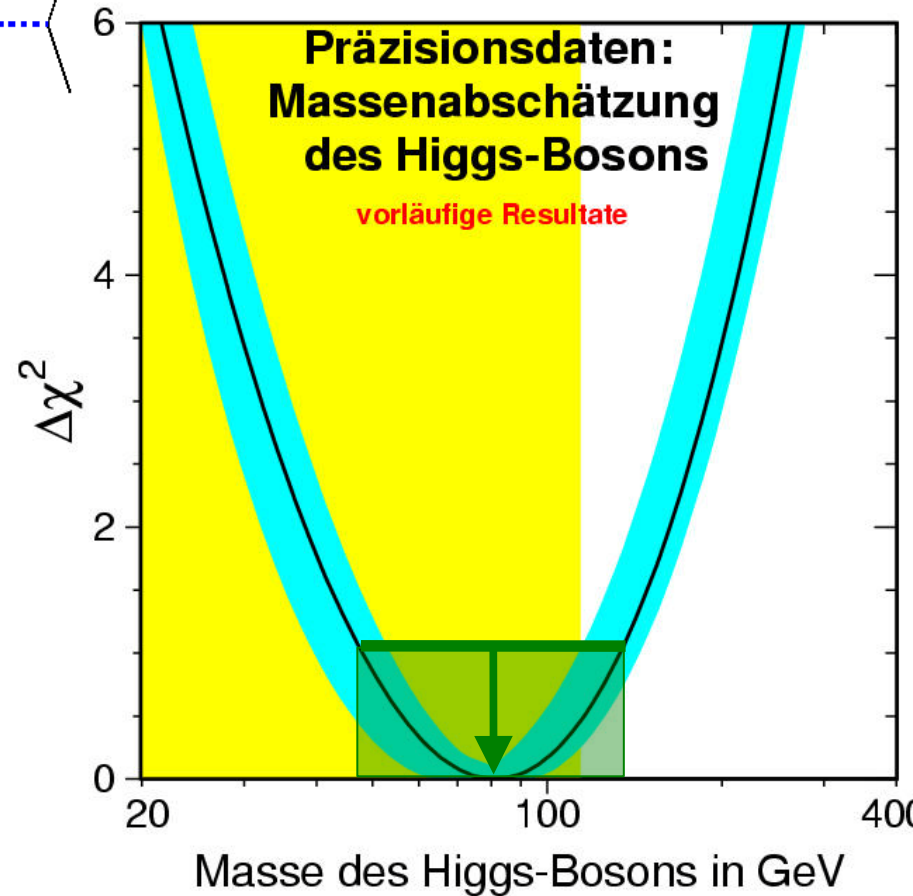


$$M_Z^2 = M_Z^2 \text{ 0.Ordnung} \cdot (1 + \Delta)$$

$$\Delta = \dots M_t^2 \dots + \dots \ln M_H \dots$$

inzwischen  
gemessen

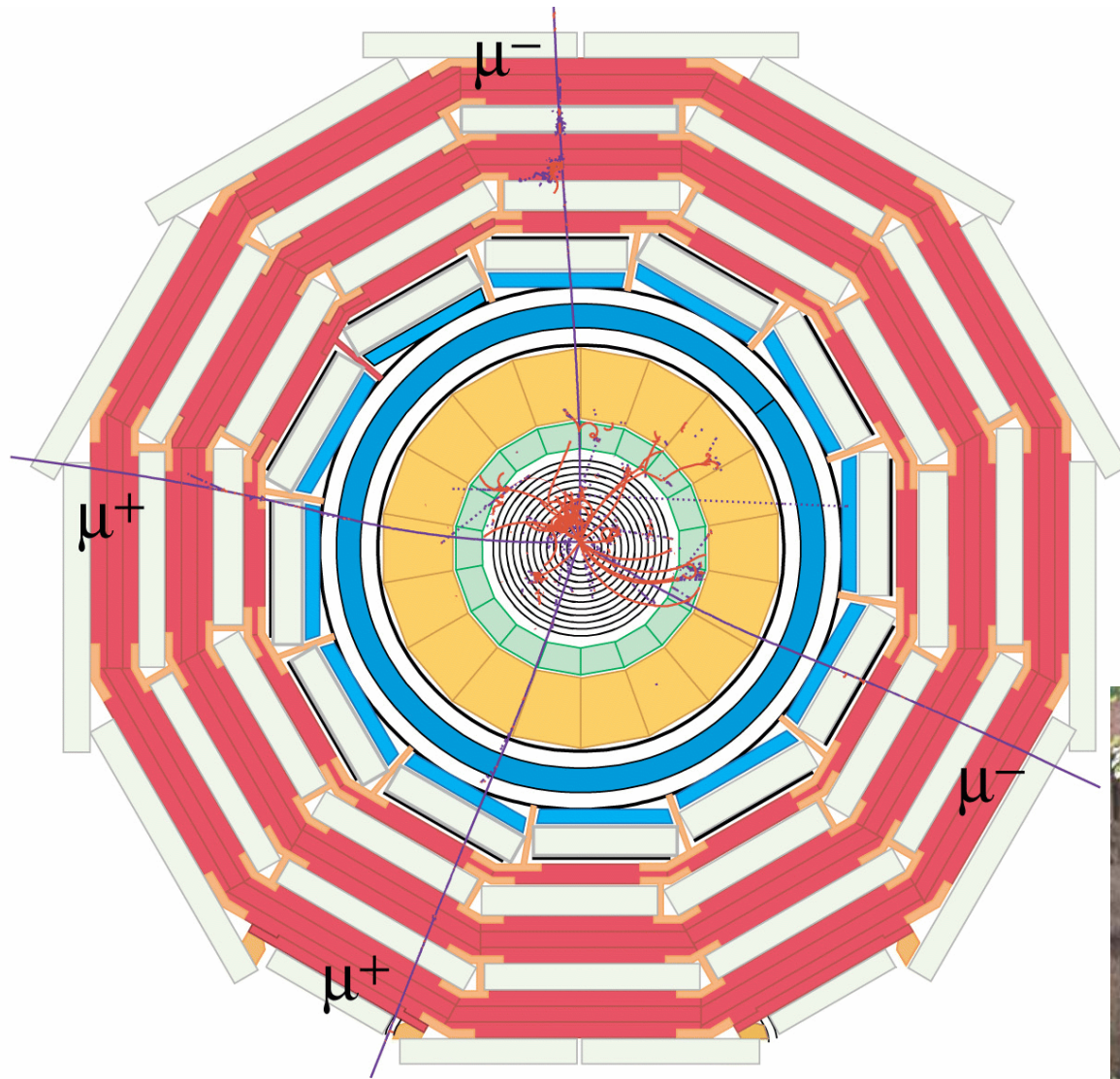
Vergleich Präzisionsmessung ↔ Korrektur  
⇒ Vorhersage der Higgs-Masse



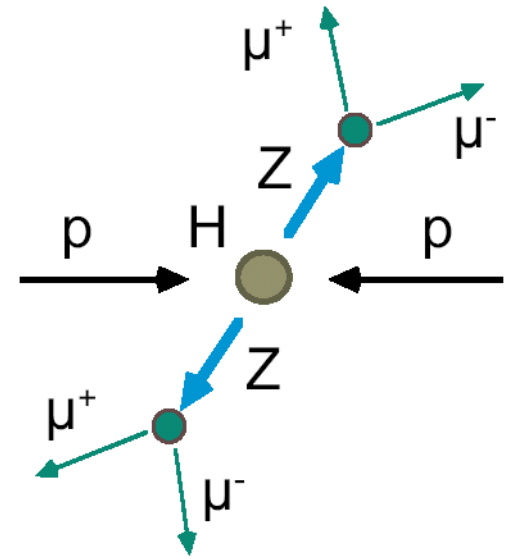
experimentell  
ausgeschlossen

theoretische  
Unsicherheit

# Die Suche nach dem Higgs

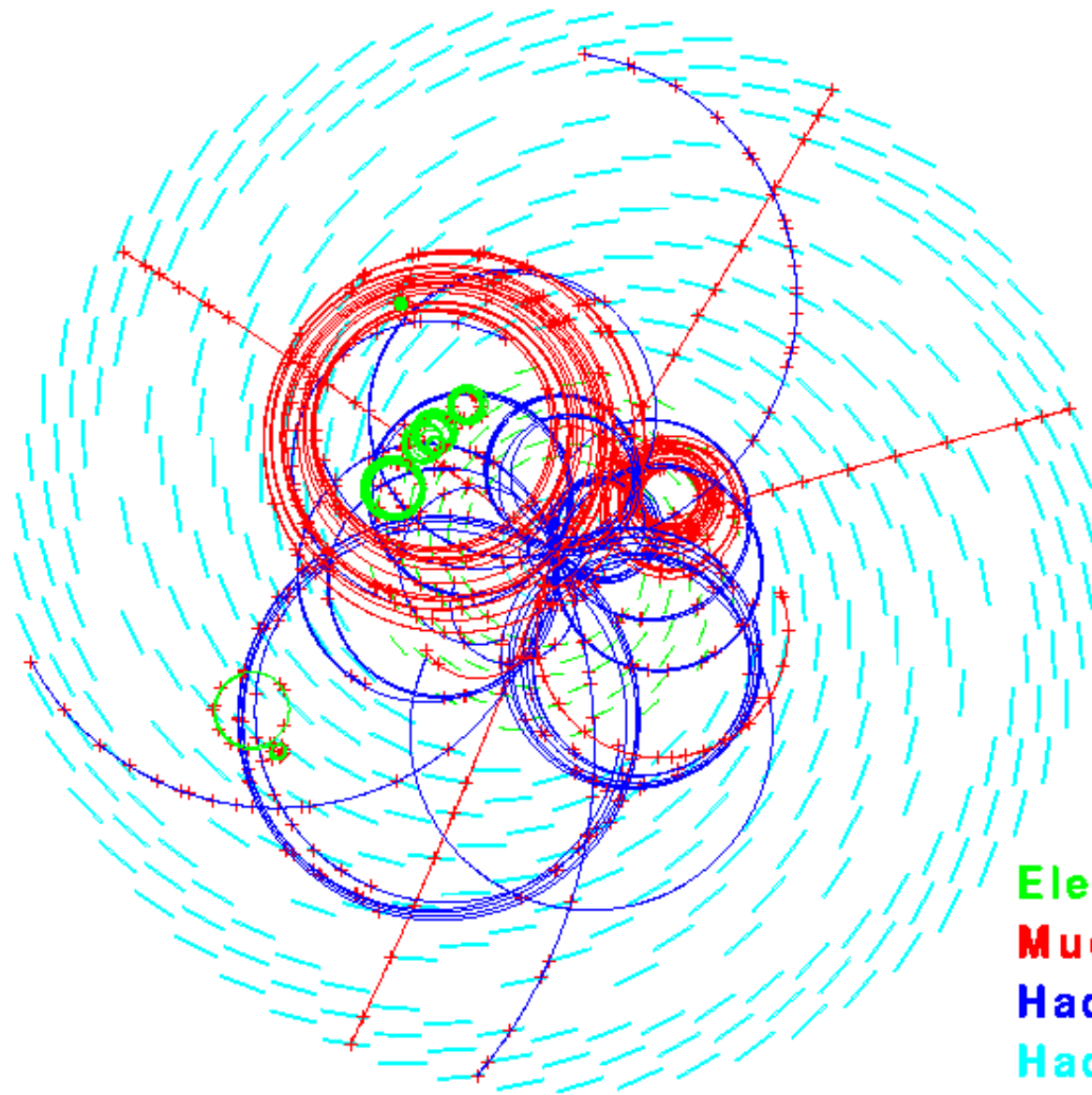
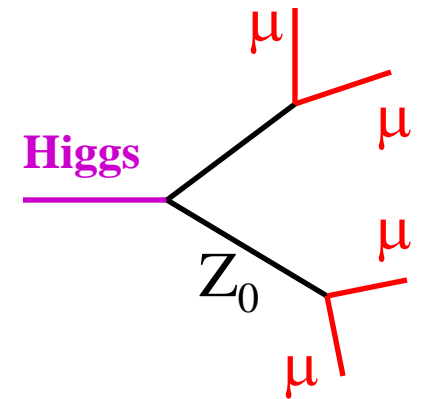


EXPERIMENTUM CRUCIS



# CMS

$H \rightarrow \mu\mu\mu\mu$   
 $m(H) = 150 \text{ GeV}$



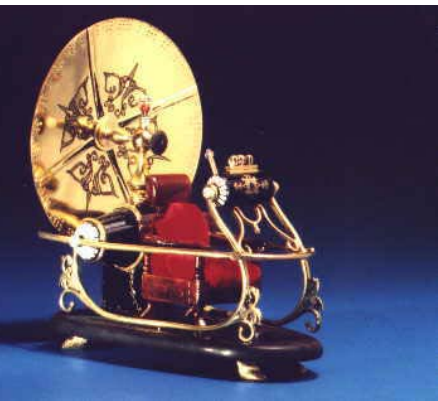
**Electrons**

**Muons**

**Hadrons  $p_t < 2 \text{ GeV}$**

**Hadrons  $p_t > 2 \text{ GeV}$**

- Elementarteilchen
- CERN
- Beschleuniger LHC
- Urknall

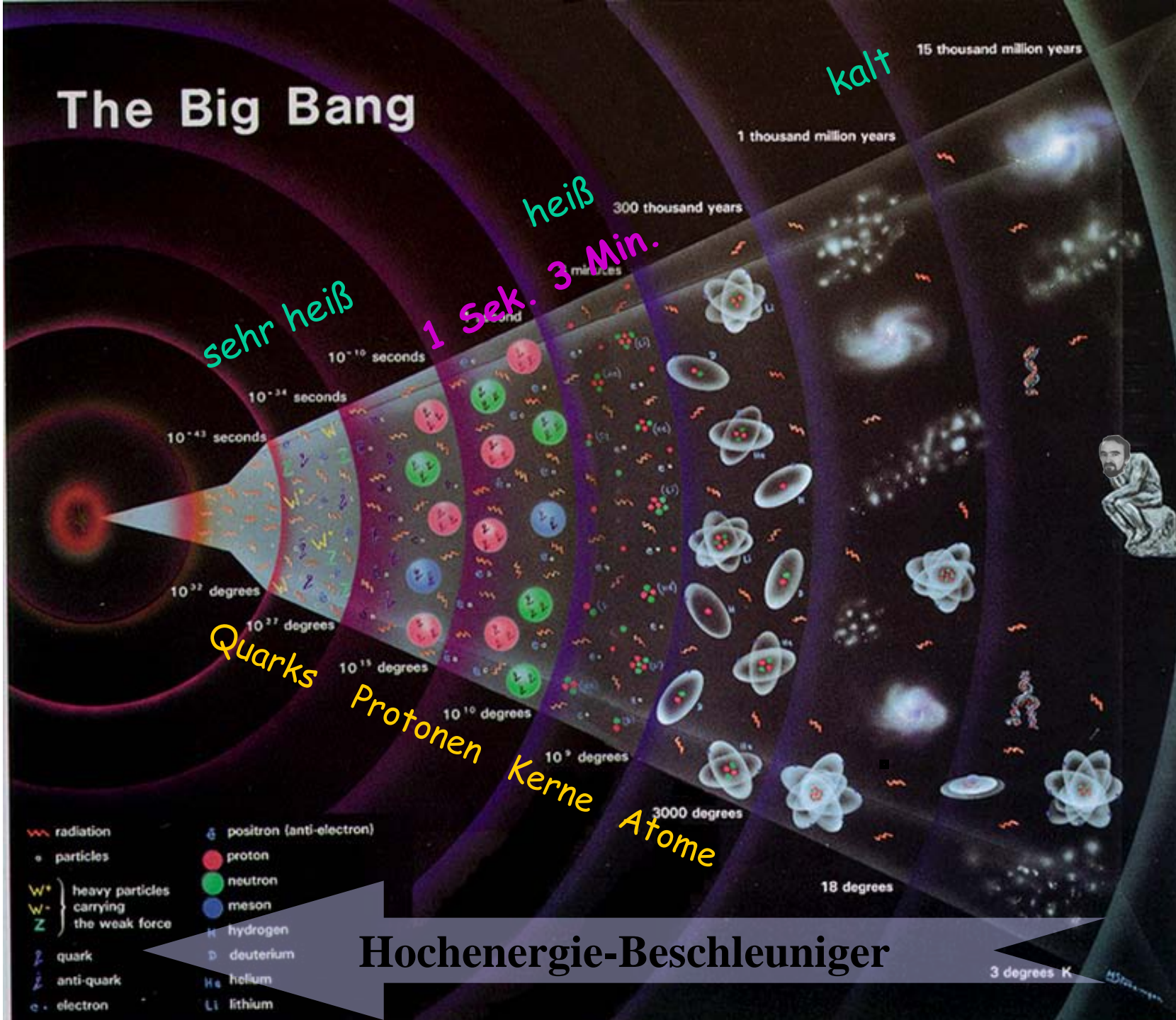


- „Zeitmaschine“ ?

Frühes Universum und Teilchenphysik  
Dunkle Materie

D  
E  
R  
U  
R  
K  
N  
A  
L  
L

# The Big Bang



Hochenergie-Beschleuniger

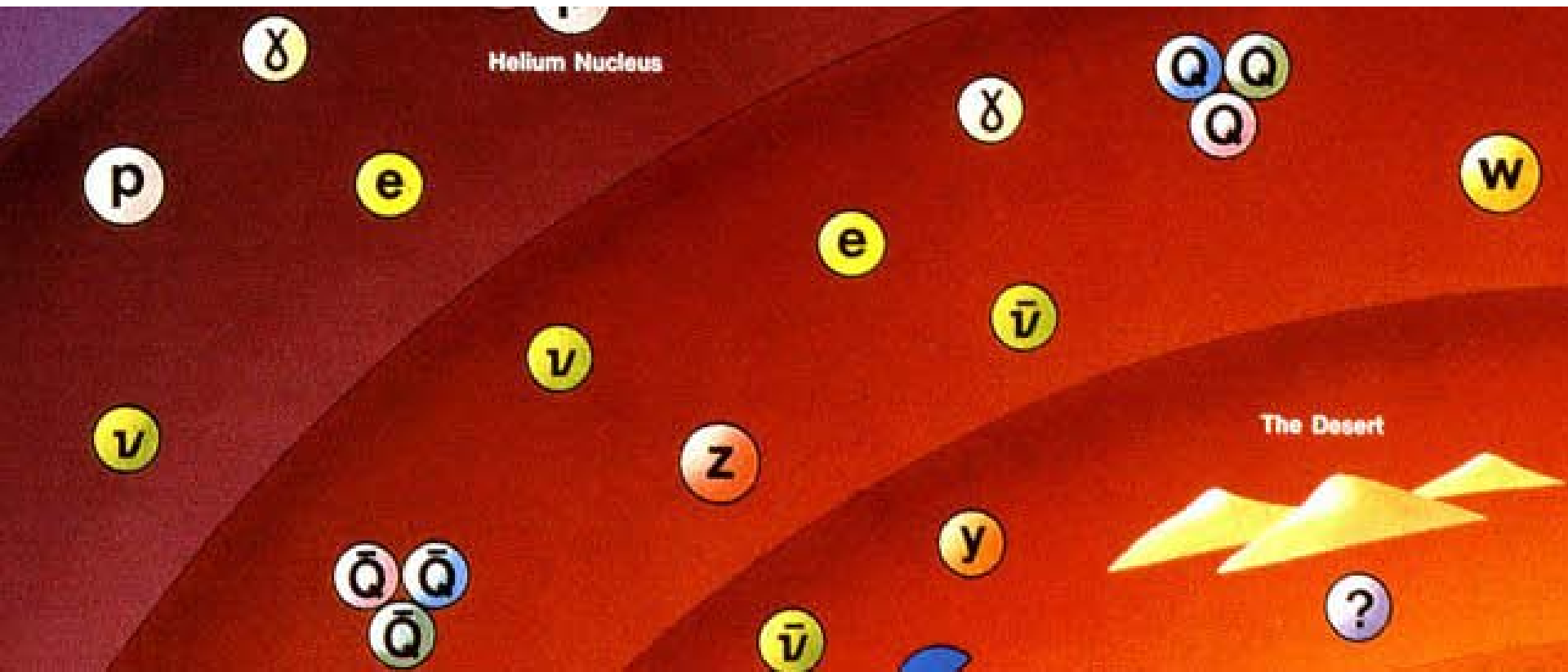


# Elementarteilchen im frühen Universum

$t = 10^{-10}$  s

$E = 100$  GeV

Teilchenbeschleuniger!



Heiße Elementarteilchen-Suppe !

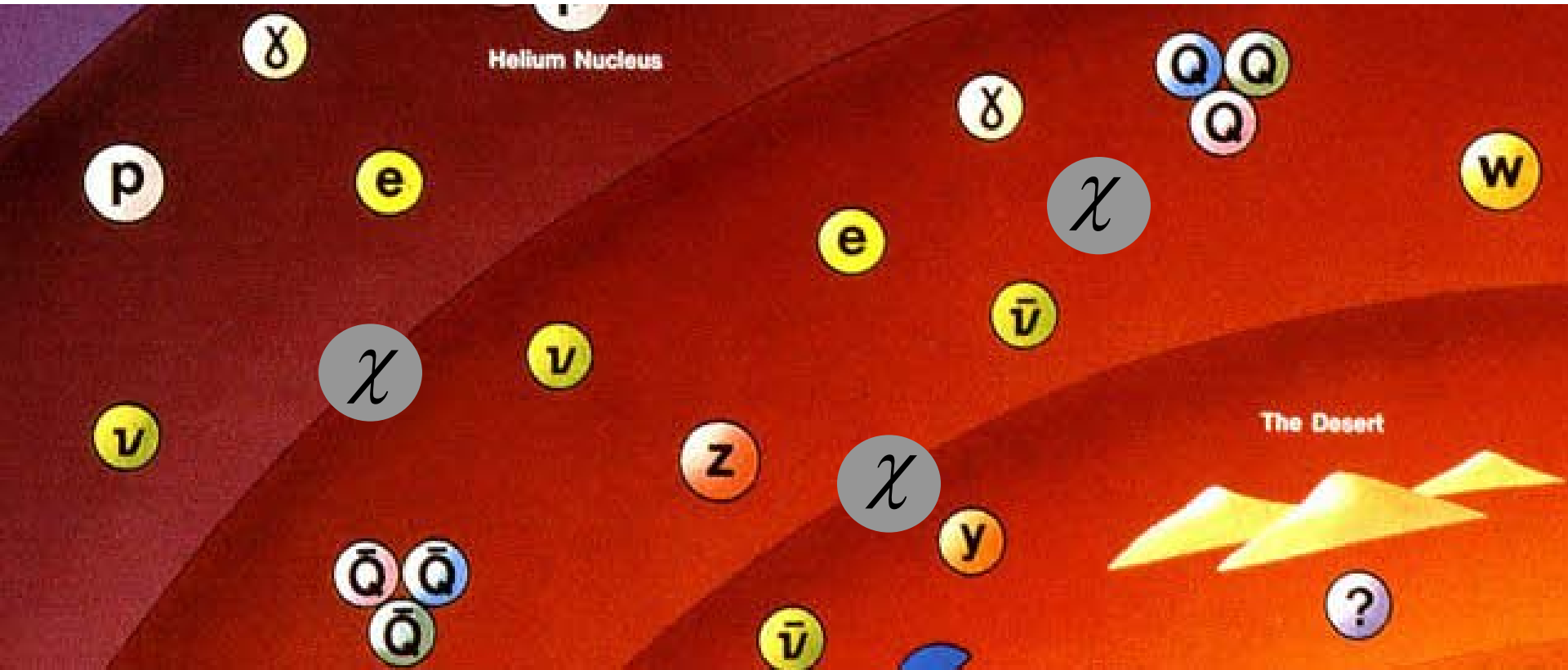
Welche Teilchen gibt es ? Wie wechselwirken sie ?

# Elementarteilchen im frühen Universum

$t = 10^{-10}$  s

$E = 100$  GeV

Teilchenbeschleuniger!



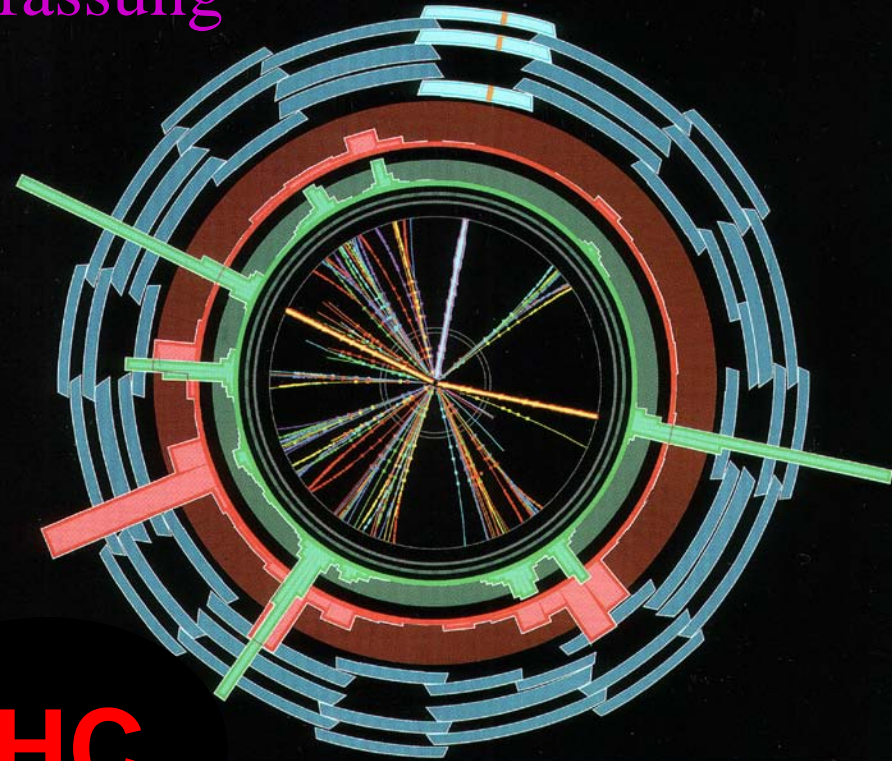
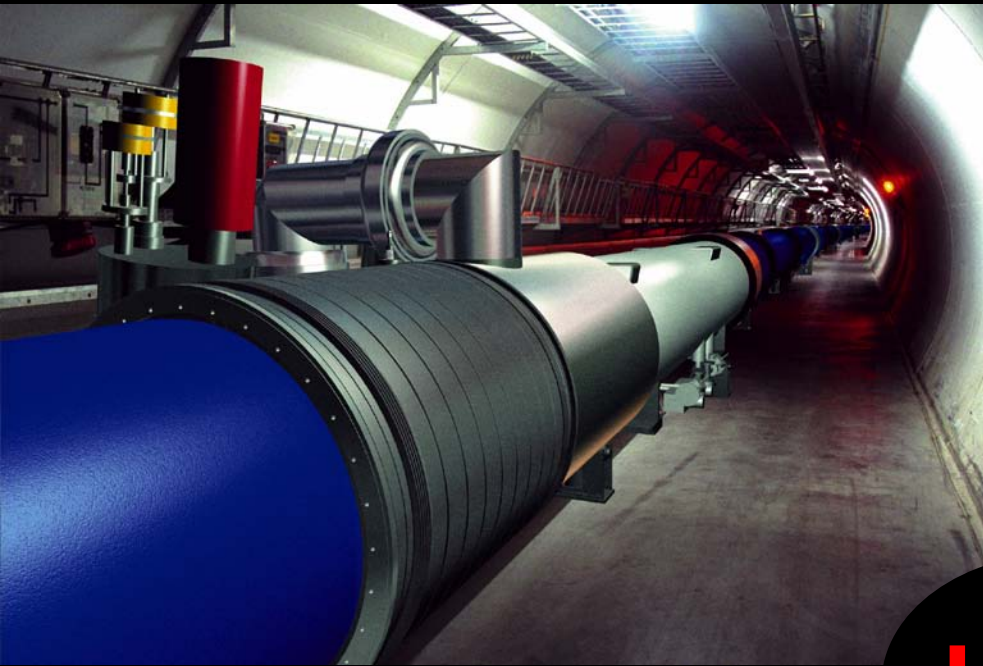
Heiße Elementarteilchen-Suppe !

Welche Teilchen gibt es ? Wie wechselwirken sie ?

Dunkle Materie = Neutralinos  $\chi$  ???

LHC !

# Zusammenfassung



**LHC**

- wir wollen verstehen,
- „was die Welt im Innersten zusammenhält“
  - wie das frühe Universum sich entwickelte





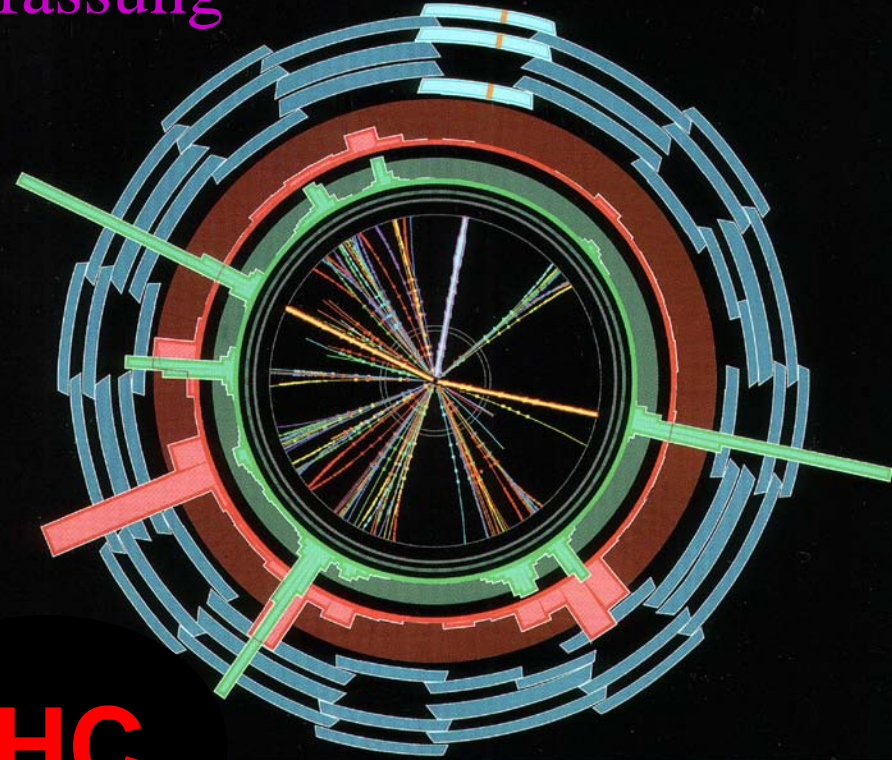
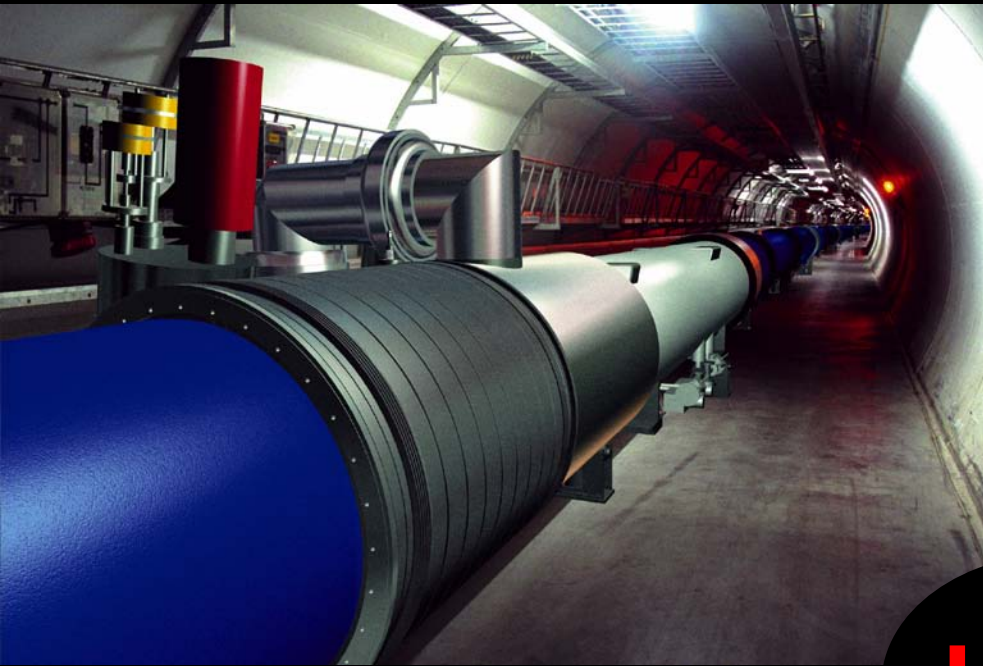
## Arbeiten am Teststrahl



Besuch von  
Ministerin Bulmahn



# Zusammenfassung



**LHC**

- wir wollen verstehen,
- „was die Welt im Innersten zusammenhält“
  - wie das frühe Universum sich entwickelte

