

Die Suche nach dem "Gottes-Teilchen"

Helmut Koch
Ruhr-Universität Bochum

(Für einen Teil der Folien Dank an meinen Kollegen
Prof. Wiedner/Bochum)

Enkirch, den 7.11.2013

Gliederung

- Einleitung
- Aufbau der Materie
- Entwicklung des Universums
- Teilchenbeschleuniger
- Teilchendetektoren
- Nachweis des Higgs-Teilchens
- Zusammenfassung und Ausblick

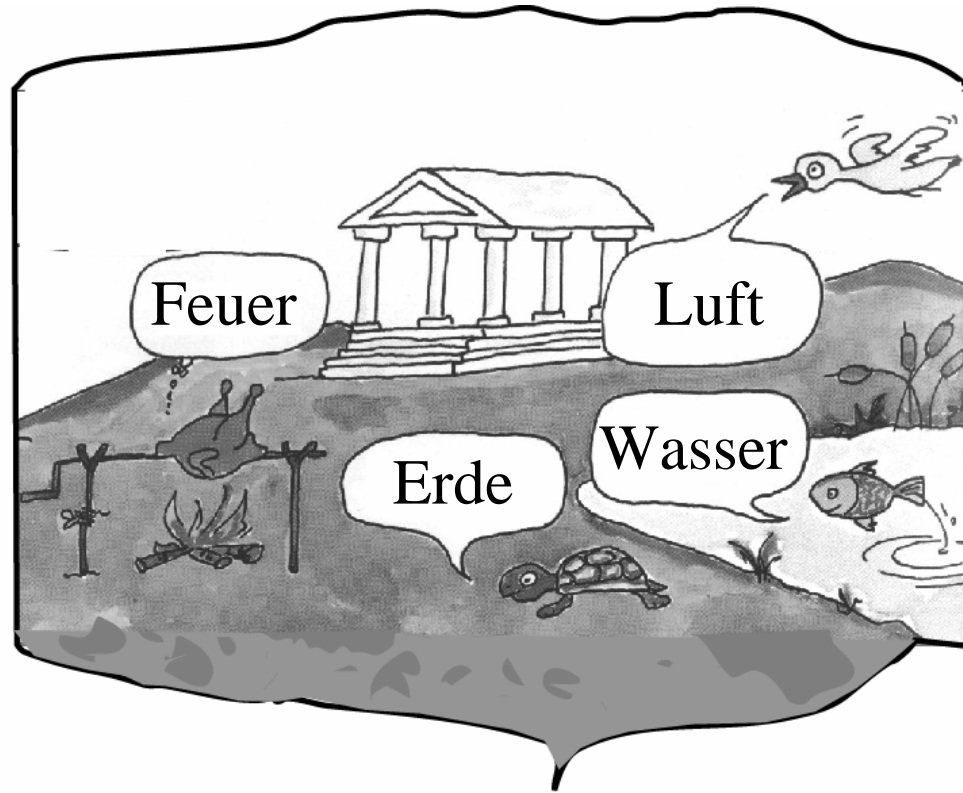
Der diesjährige Nobelpreis für Physik wird den theoretischen Physikern Francois Englert und Peter Higgs verliehen für ihre Arbeiten zur Frage, wie die Masse von Elementarteilchen(Quarks) erzeugt wird.



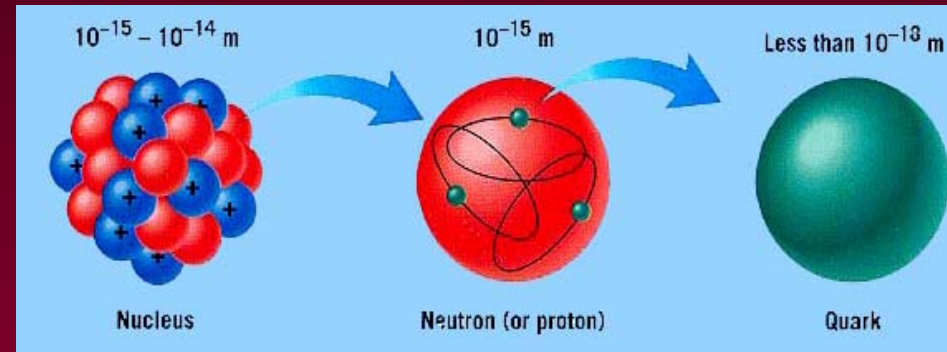
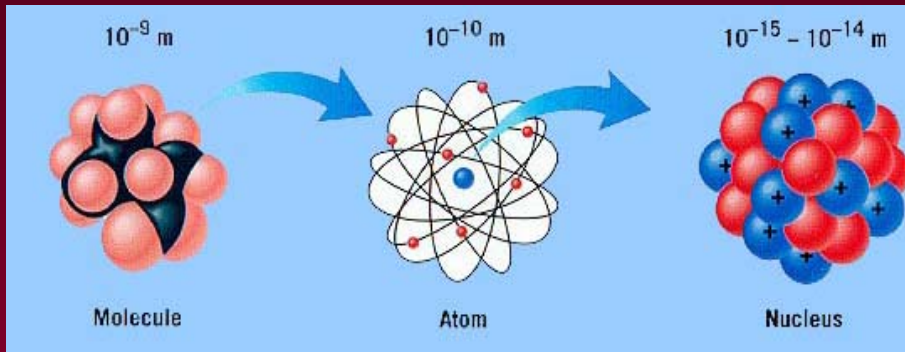
Die Arbeiten datieren bereits aus dem Jahr 1964

Aufbau der Materie

Das Weltbild der Antike (Griechenland)



Bestandteile der Materie



Three families of particles

	1	2	3	
Electric charge				
+2/3	u UP	c CHARM	t TOP	Q u a r k s
-1/3	d DOWN	s STRANGE	b BOTTOM	
0	ν_e ELECTRON- NEUTRINO	ν_μ MUON- NEUTRINO	ν_τ TAU- NEUTRINO	L e p t o n s
-1	e ELECTRON	μ MUON	τ TAU	

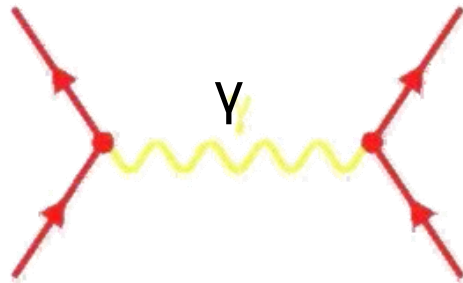
nur diese 4 Teilchen
werden eigentlich
'gebraucht'

Stabil (sehr) kurzlebig

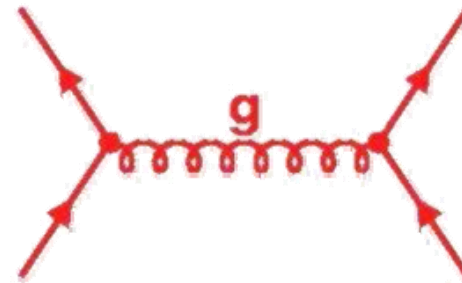
Die Quarks treten nicht isoliert auf, sondern nur in Clustern
(Hadronen)

Beispiel: Proton = uud-Cluster

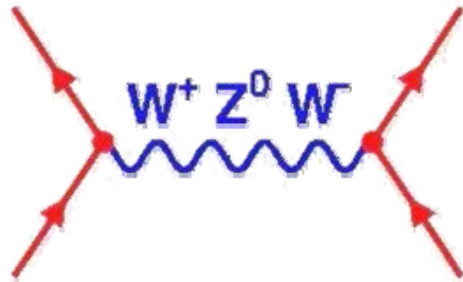
Die fundamentalen Kräfte



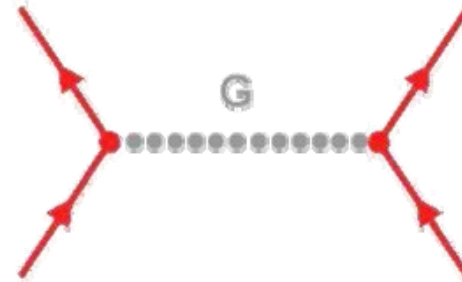
Elektromagnetische Kraft



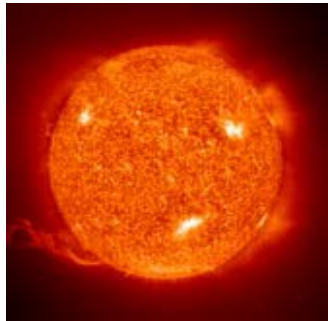
Starke Kraft



Schwache Kraft



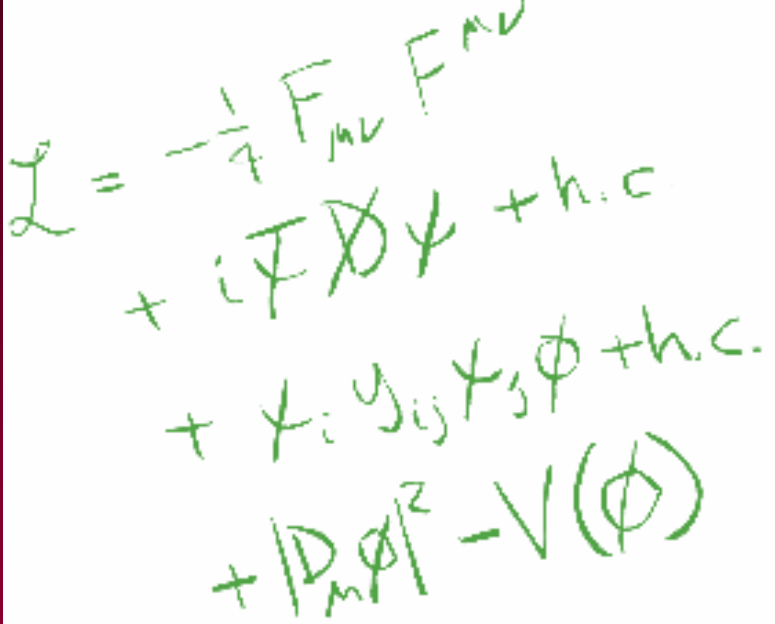
Gravitation



Experimente der letzten 70 Jahre

→ Standardmodell der Teilchenphysik (SM) (!Weltformel!)

Benötigt unbedingt ein Feld,
das den Teilchen Masse
verleiht(Higgs-Feld)



The image shows a handwritten mathematical equation representing the Lagrangian of the Standard Model of particle physics. The equation is written in green ink on a white background. It consists of four terms stacked vertically, separated by plus signs. The first term is $-\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$. The second term is $+ i\bar{\psi} \not{D} \psi + h.c.$. The third term is $+ \bar{\psi}_i Y_{ij} \psi_j \phi + h.c.$. The fourth term is $+ |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$. Below the equation, there is a small caption in blue text that reads "Mathematical representation of the Standard Model of particle physics."

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + i\bar{\psi} \not{D} \psi + h.c. + \bar{\psi}_i Y_{ij} \psi_j \phi + h.c. + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$

Mathematical representation of the Standard Model of particle physics.

Nicht voll befriedigende Situation:

Parameter der Teilchen nicht erklärt

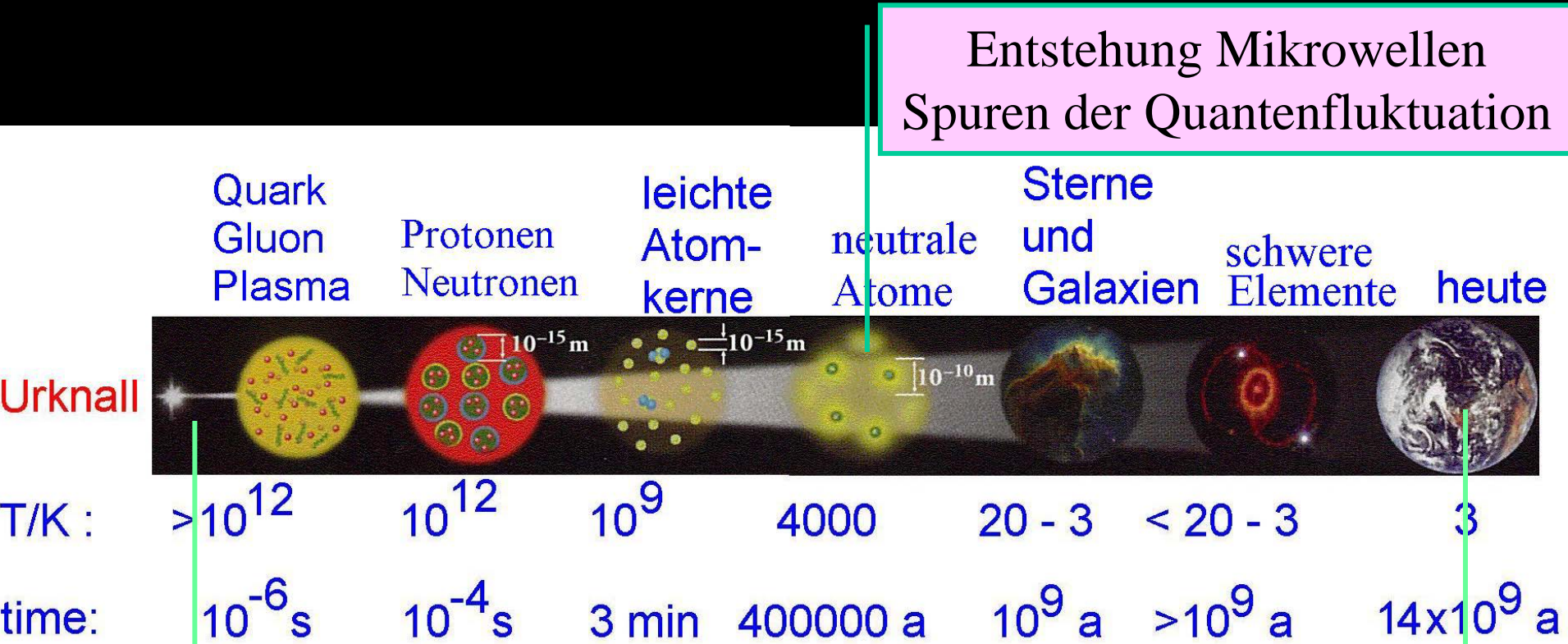
Gravitation nicht kompatibel mit SM

Möglicherweise noch nicht alle Teilchen gefunden,

z. B. die Teilchen der dunklen Materie

Entwicklung des Universums

Geschichte des Universums



Entstehung Mikrowellen
Spuren der Quantenfluktuation

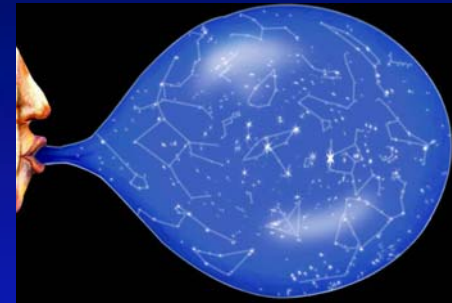
Inflation Quantenfluktuationen

Verteilung der Galaxien
Spuren der Quantenflukt.

Woher wissen wir das?

Die 'Big Bang' Theorie erklärt auf natürliche und einfache Weise, warum ...

1) sich alle Galaxien voneinander weg bewegen



2) alle Sterne aus Wasserstoff und Helium bestehen, im Verhältnis $\sim 3:1$

3) warum das Universum gleichmässig mit Mikrowellenstrahlung gefüllt ist

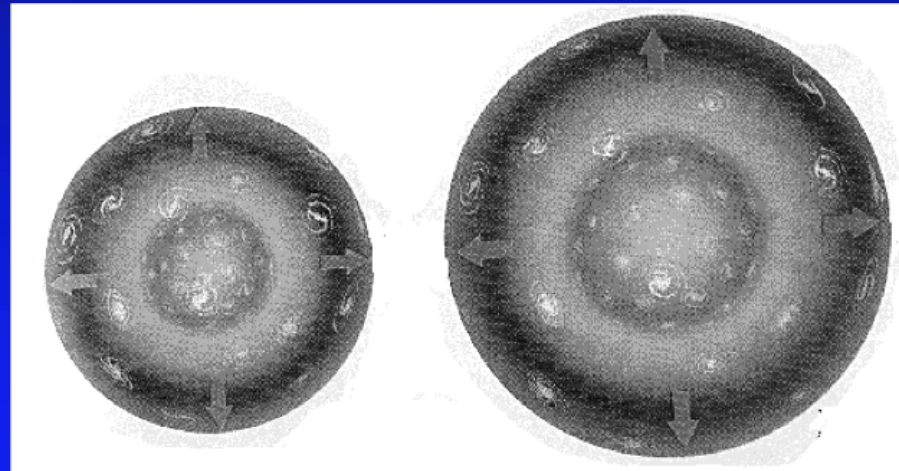
Alle Altersbestimmungen stimmen innerhalb der Fehlergrenzen überein.
Das genaueste Alter: **13,700,000,000 Jahre ($\pm 2\%$).**

Wie kann man
die ersten Geschehnisse des Universums
im Labor studieren?

Das Universum dehnt sich nach dem Big Bang aus.

Wenn unser Universum heute sehr groß und kalt ist

dann - rückblickend in der Zeit -



muss das Universum viel kleiner und heisser gewesen sein ...

Sehr viel kleiner, sehr viel heisser

Energie $\sim 10^{72}$ J



Welche Naturgesetze gelten hier

Größe des Universums x 100

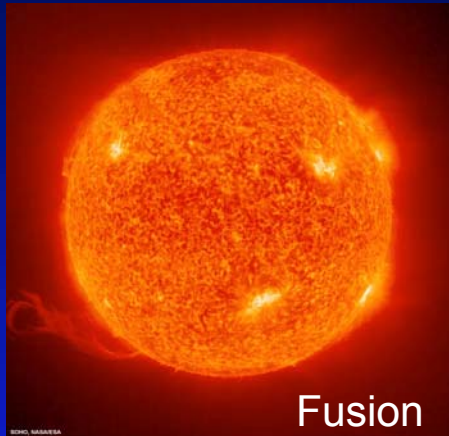
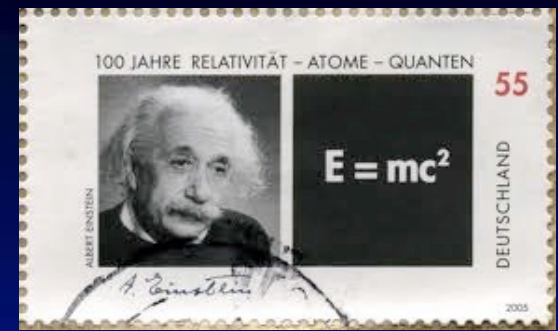
$$\text{bei } t = \frac{1}{1,000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000} \text{ s}$$

Um solche Temperaturen zu erzeugen,
muss man **viel Energie auf kleinstem Raum** konzentrieren.

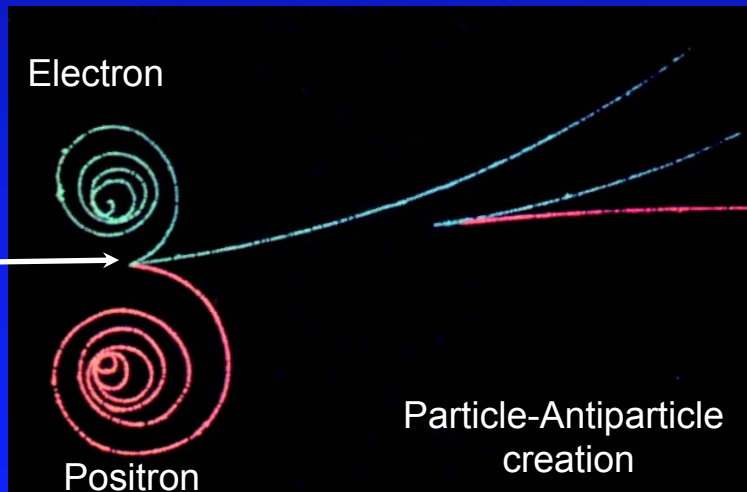
Dazu benutzt man Elementarteilchen (z.B. Protonen),
die auf (fast) Lichtgeschwindigkeit **beschleunigt** werden,
und dann miteinander **kollidieren**.

Und dann schaut man, was bei diesen Kollisionen so alles
erzeugt wird (“mini Big Bang”).

$$E = mc^2$$

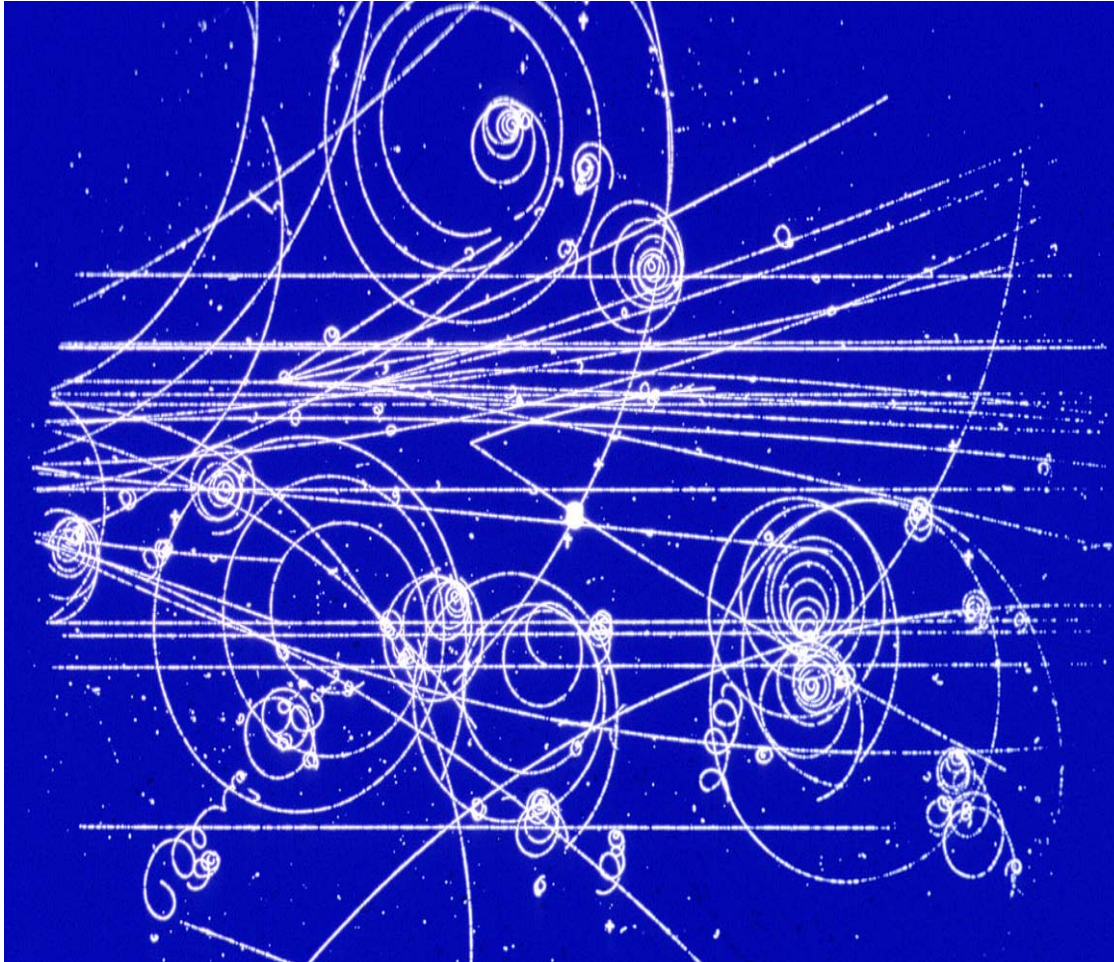


$$m \square E$$



$$E \square m$$

Ein Teilchenstrahl trifft auf Wasserstoff ...



Bildaufnahme einer
Blasen-kammer:

Geladene Teilchen
hinterlassen eine Spur von
Blasen (vergleichbar zu den
Kondensstreifen der
Flugzeuge)

Teilchenbeschleuniger

CERN (Centre de Recherche Nucleaire)

Größtes, nicht-militärisches Forschungslabor in der Welt, seit 1954, stetig im Wachstum (4 Nobelpreise)

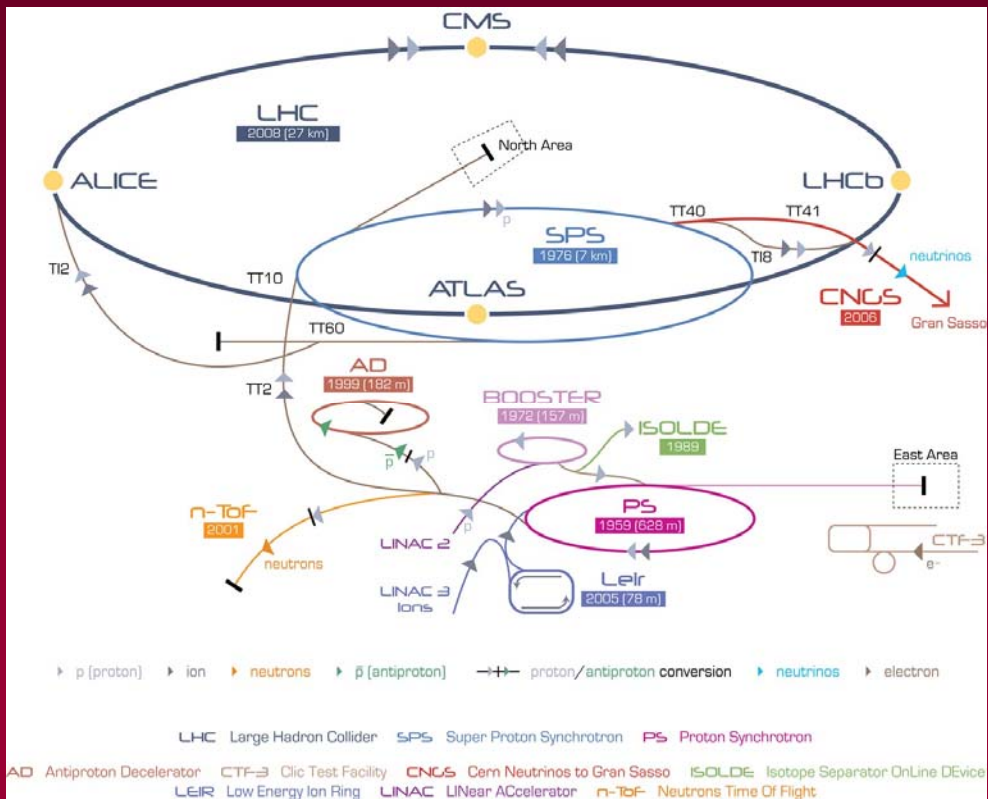
Lage: Grenze Schweiz/Frankreich

20 europäische Mitgliedsstaaten + Assoziierte Mitglieder (USA, Russland, Japan, Indien, ...)

2500 permanente Mitarbeiter, überwiegend Physiker, Ingenieure, Techniker (Bau und Betrieb der Beschleuniger)

8000 Wissenschaftler aus aller Welt als Besucher (Bau und Betrieb der Detektoren/Datenauswertung)

Jährliches Budget ≈ 700 Mio €

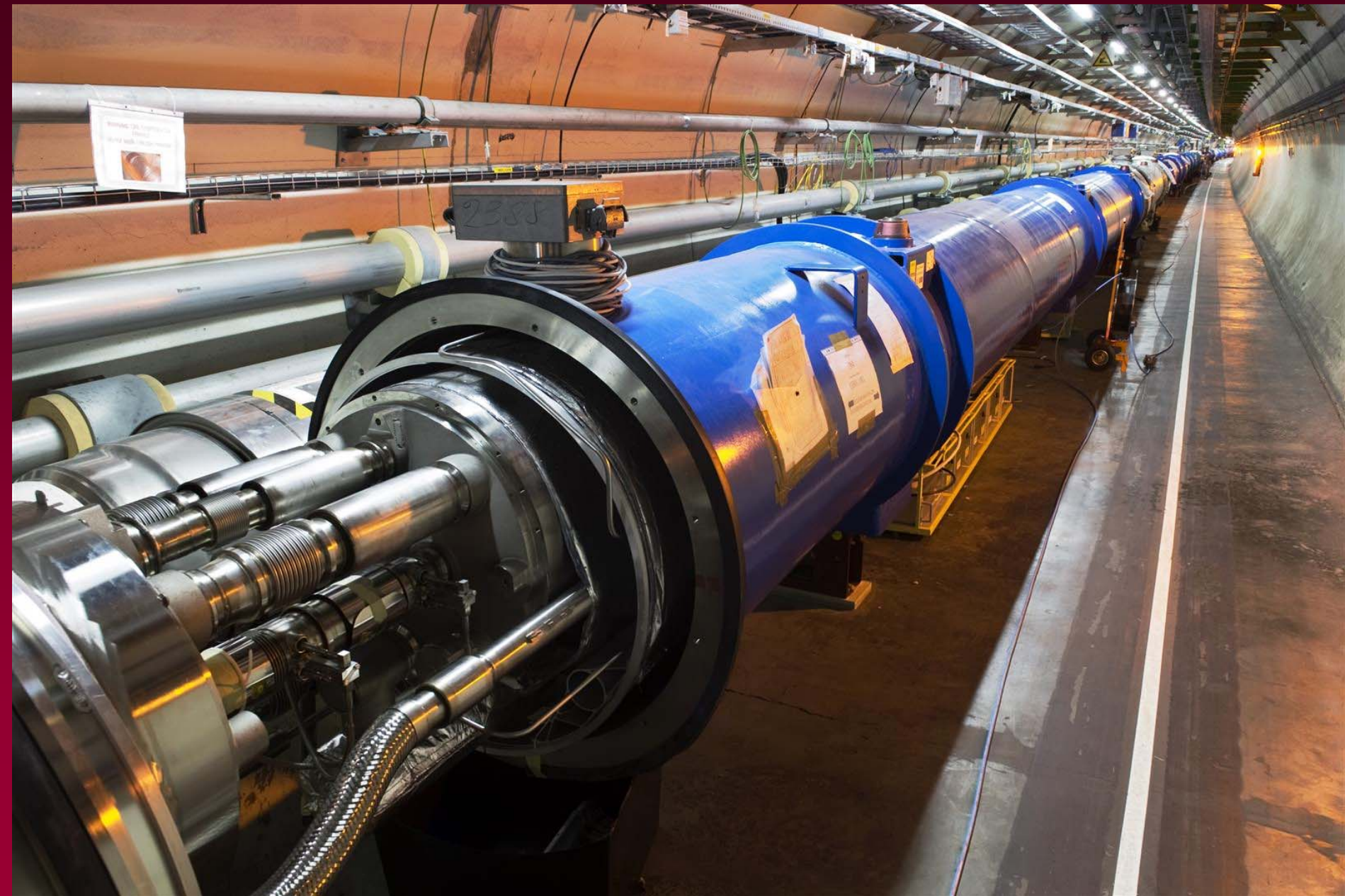


CERN und LHC (CERN)





CERN und LHC – Der Large Hadron Collider



Der Large Hadron Collider (LHC)

- 27 km Umfang, ca. 100 m unter der Erde
- Beschleunigung von Protonen in zwei gegenläufigen Strahlen bis 7 TeV, von Schwerionen bis 2.7 TeV/u
- Kollision dieser Strahlen und Detektion der Reaktionen an einigen Stellen (Atlas, CMS, Alice, LHCb, ...)
- Herzstück des Beschleunigers:

Ca. 1600 supraleitende Magnete (Dipole + Quadrupole)

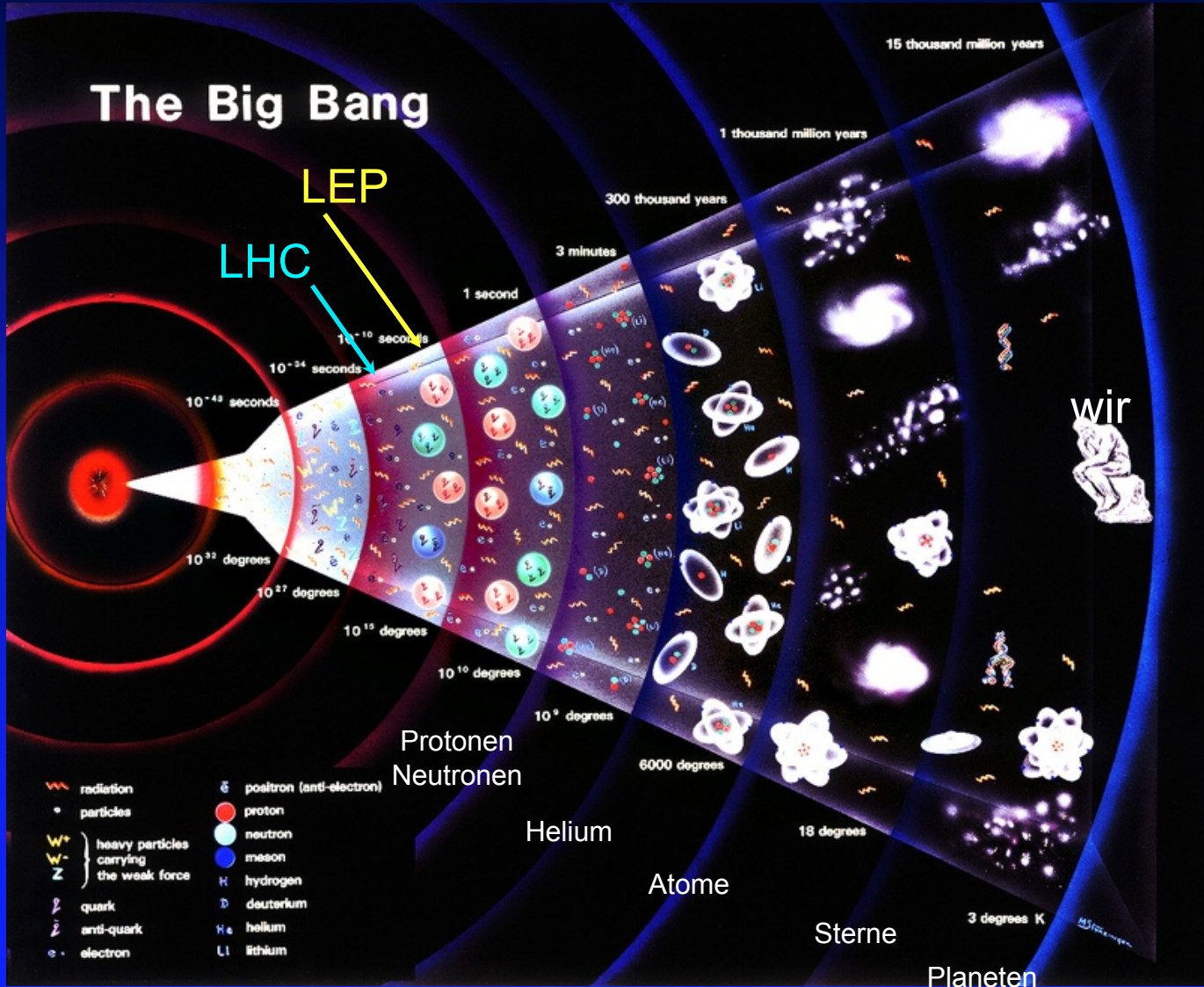
Magnetfeld: 8.3 T, Stromstärke: 11700 A, Stromverbrauch: 120 MW

10080 t flüssiger Stickstoff, 60 t flüssiges He ($-271.3^{\circ}\text{C} = 1.9^{\circ}\text{K}$)

- Vakuum (6500m³ Volumen): 10^{-13} atm
- Präzision bei Vermessung: $\ll 1$ mm
- Kosten: 4,7 Milliarden CHF
- Beschleunigungszeit der Protonen bis zur Höchstenergie: ≈ 20 min
- Speicherzeit ca. 24 h
- 11245 Umläufe/s, 2800 Teilchenpakete (à 10^{11} Teilchen), Abstand zwischen Paketen: 20×10^{-9} s
20 Kollisionen pro Paket, 600 Mio Kollisionen/s

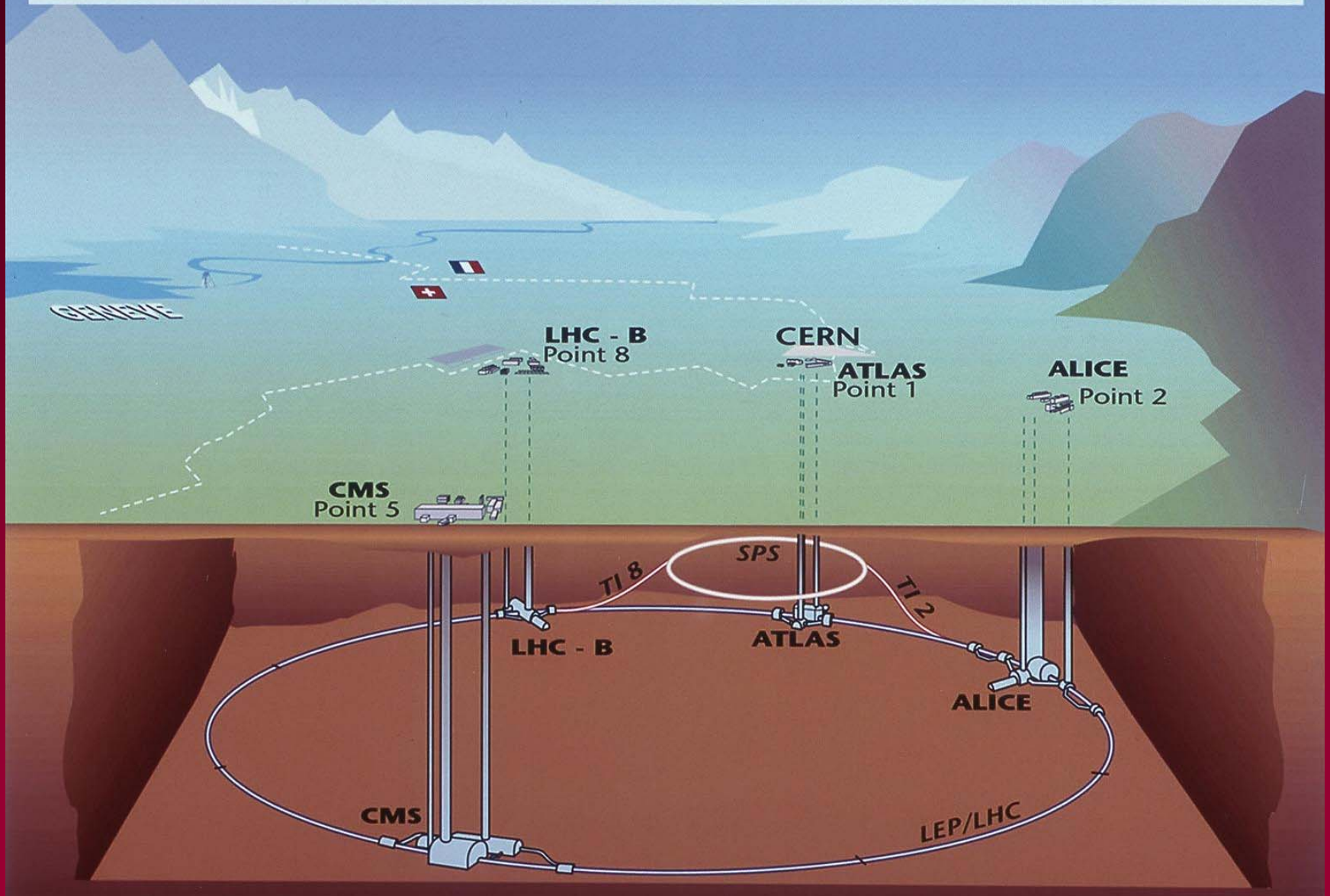
LHC: Spitzentechnologie bei Supraleitung, Kühlung, Geodäsie, Datenverarbeitung

Alle Materie wurde in der ersten Sekunde des Urknalls erzeugt



CERN und LHC – Der Large Hadron Collider

Overall view of the LHC experiments.



Teilchendetektoren

CMS

Total weight 14000 t
Overall diameter 15 m
Overall length 28.7 m

ECAL 76k scintillating PbWO₄ crystals

HCAL Scintillator/brass Interleaved ~7k ch

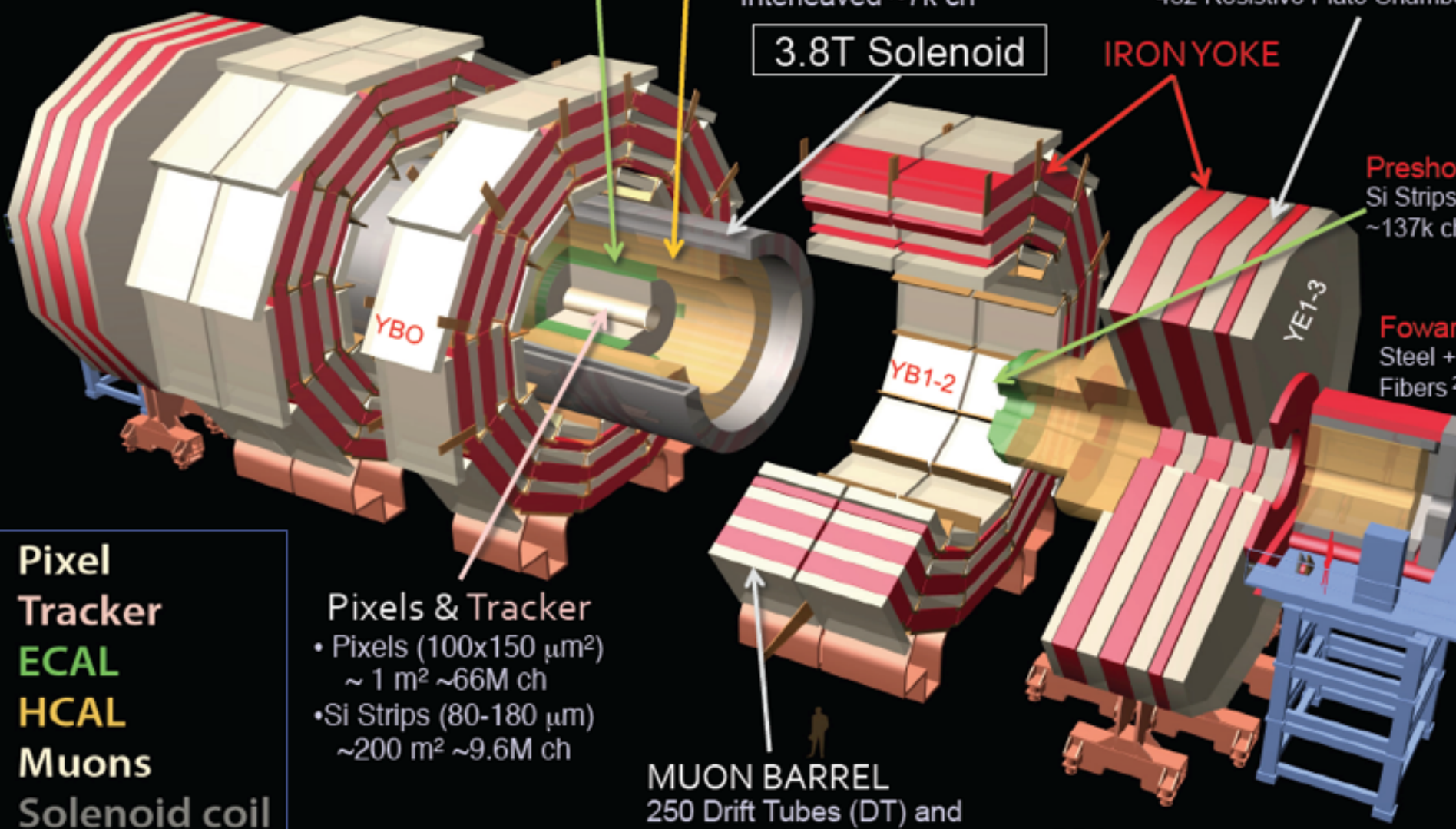
3.8T Solenoid

IRON YOKE

MUON ENDCAPS
473 Cathode Strip Chamber
432 Resistive Plate Chamber

Preshower
Si Strips
~137k ch

Forward
Steel + Fibers

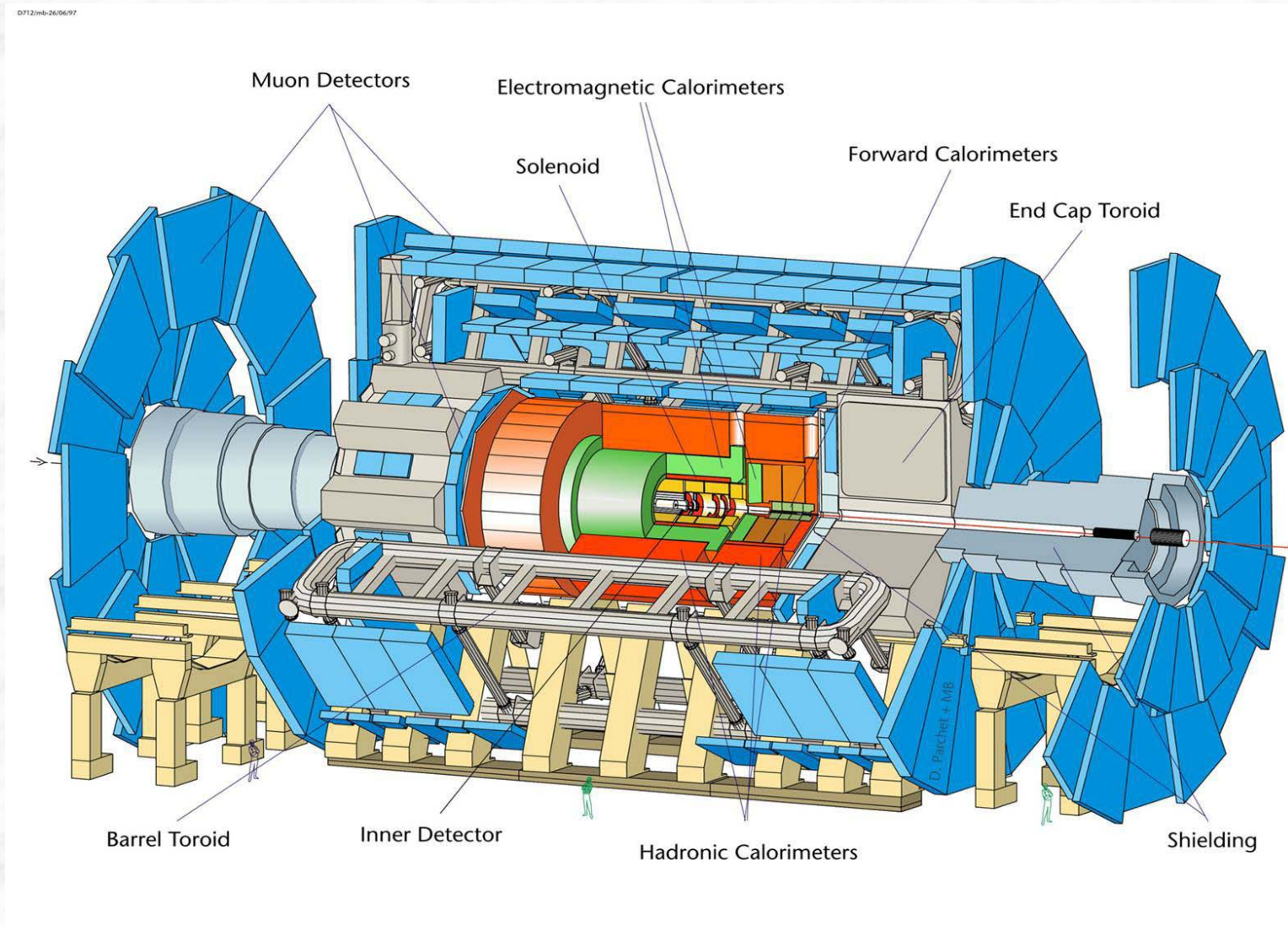


Pixel Tracker
ECAL
HCAL
Muons
Solenoid coil

Pixels & Tracker
• Pixels (100x150 μm²)
~ 1 m² ~66M ch
• Si Strips (80-180 μm)
~200 m² ~9.6M ch

MUON BARREL
250 Drift Tubes (DT) and
480 Resistive Plate Chambers (RPC)

Der ATLAS-Detektor



Durchmesser

Gesamte Länge (incl. Myondetektoren)

Gesamtgewicht

25 m

46 m

7000

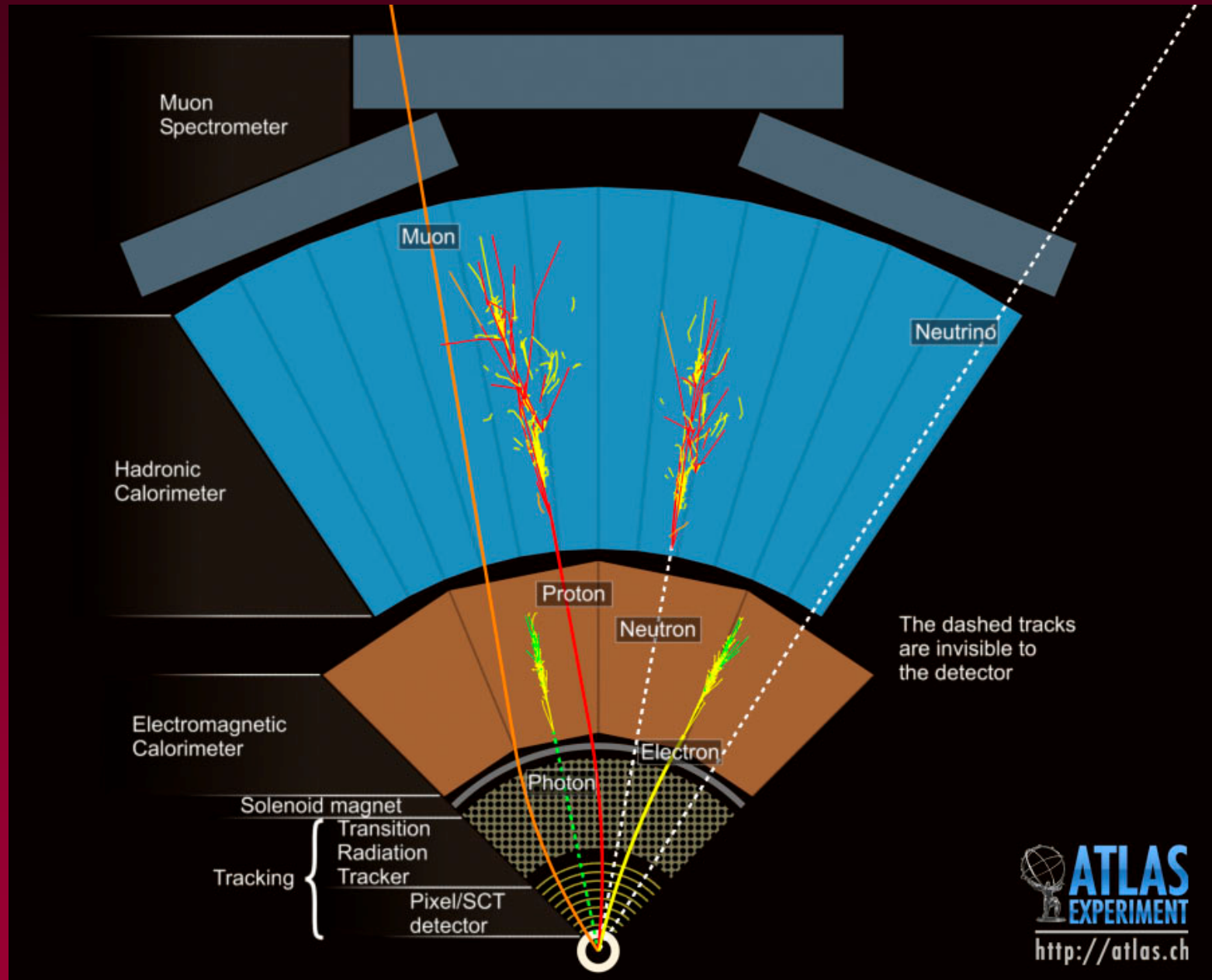
t

200 Mio. Auslesekanäle

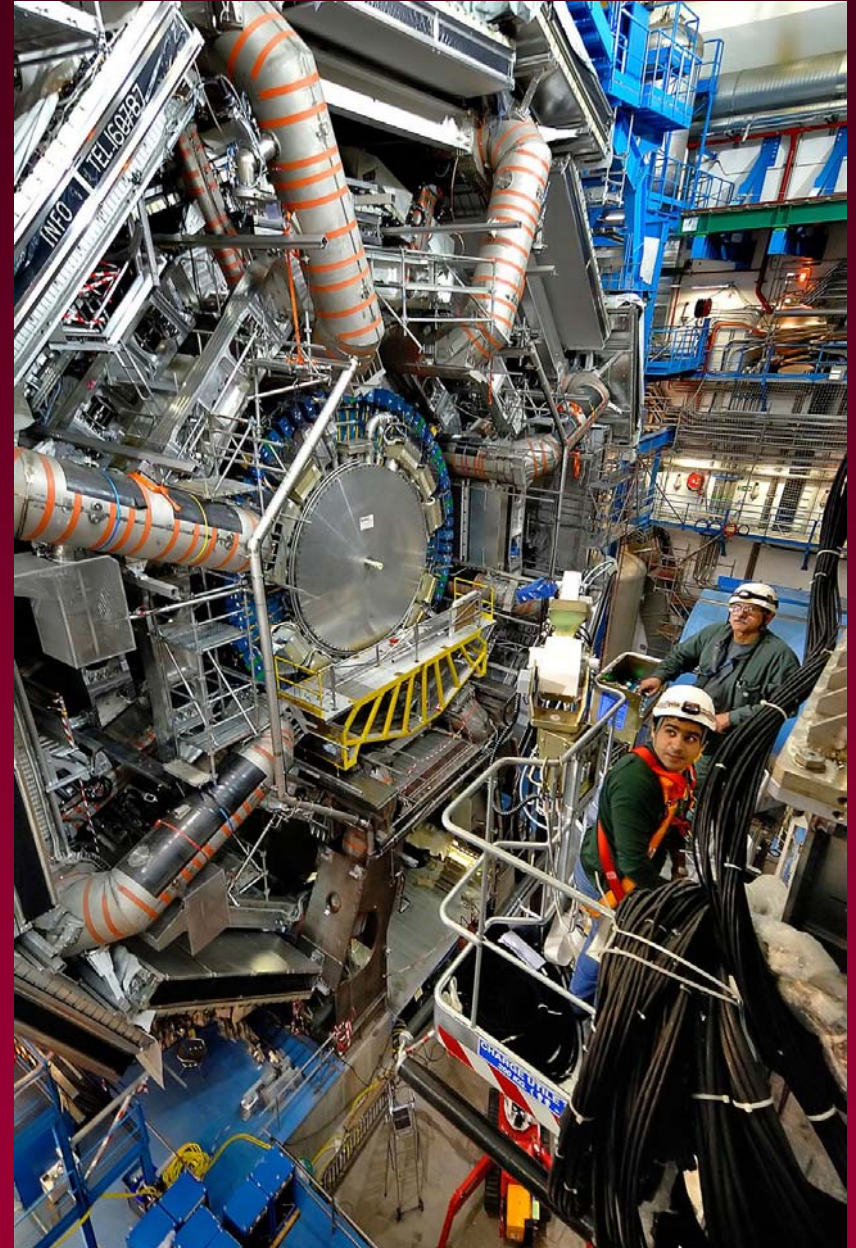
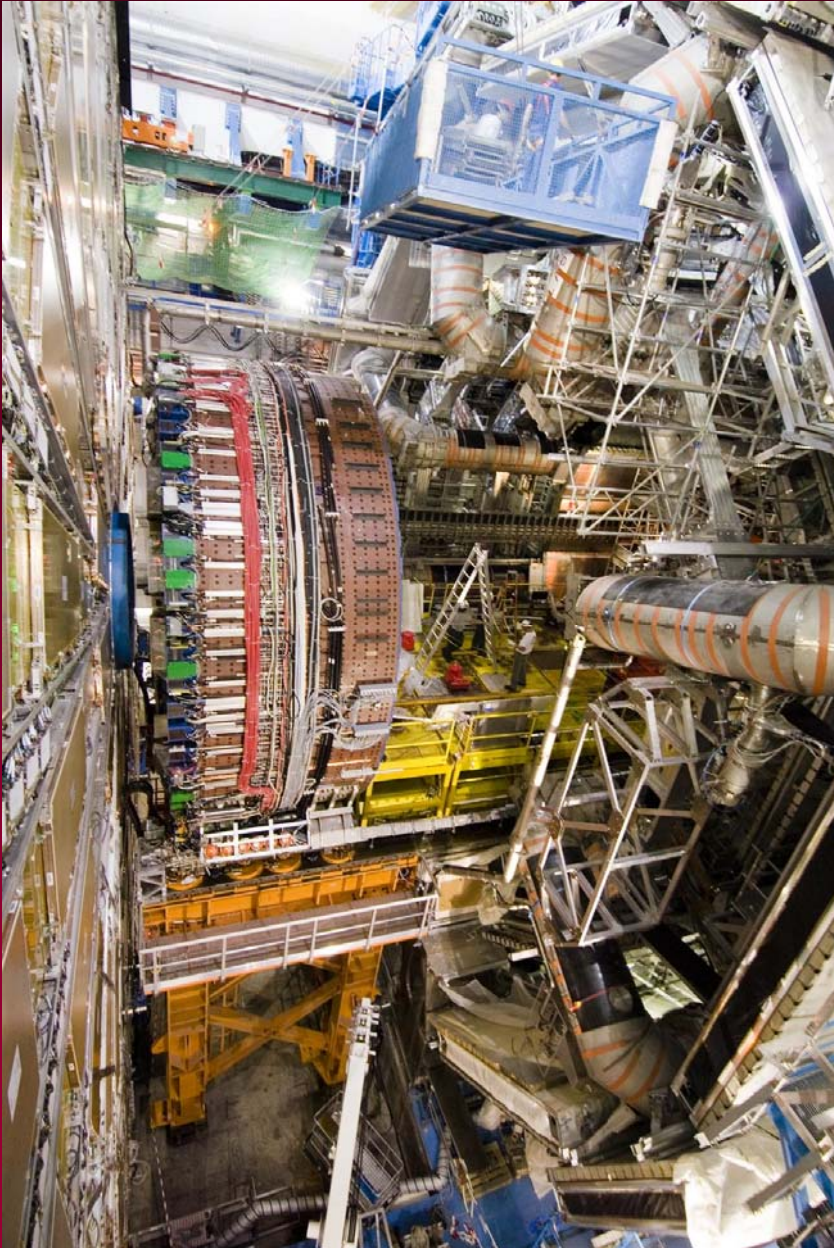
40 Mio. Mal pro Sekunde

aufnahmebereit

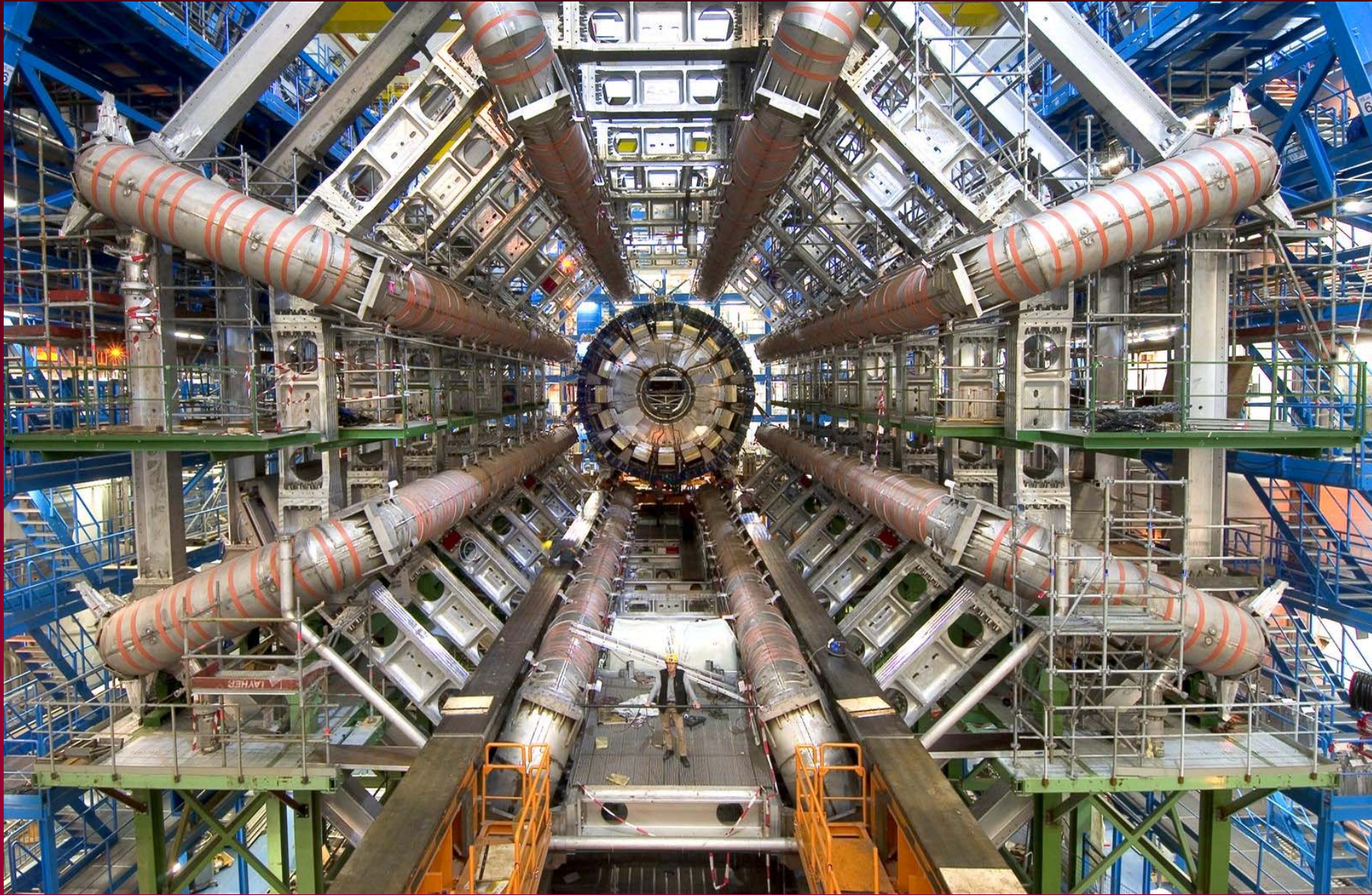
CERN und LHC (ATLAS)

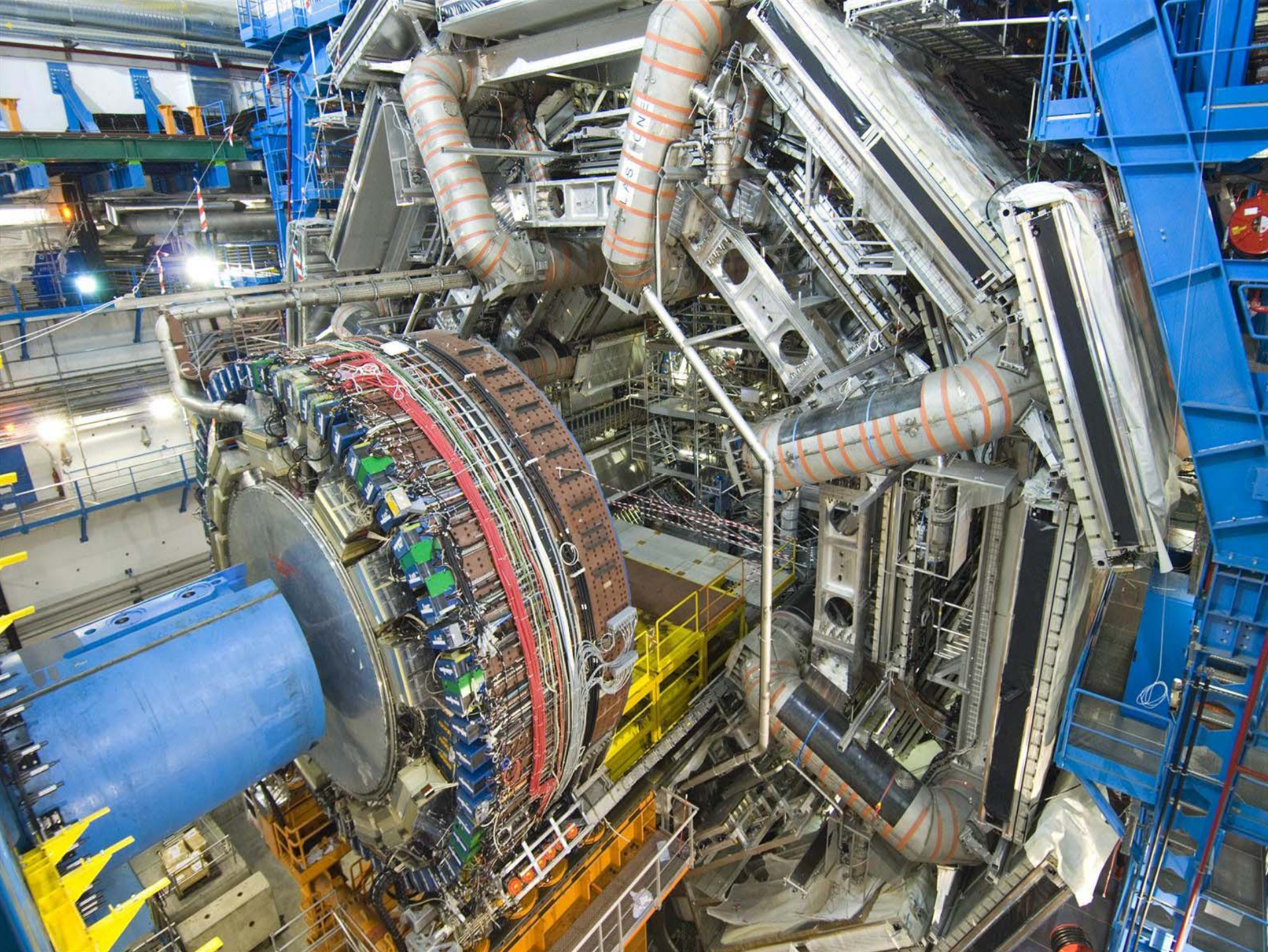


CERN und LHC (ATLAS)

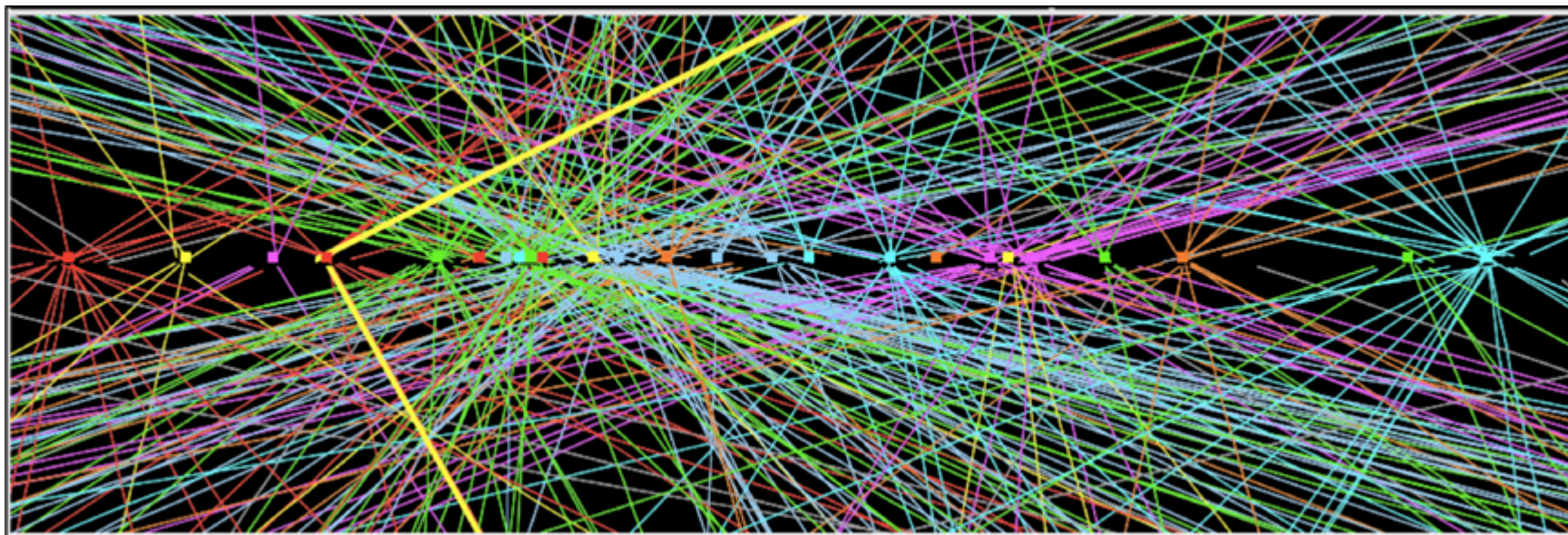


CERN und LHC (ATLAS)

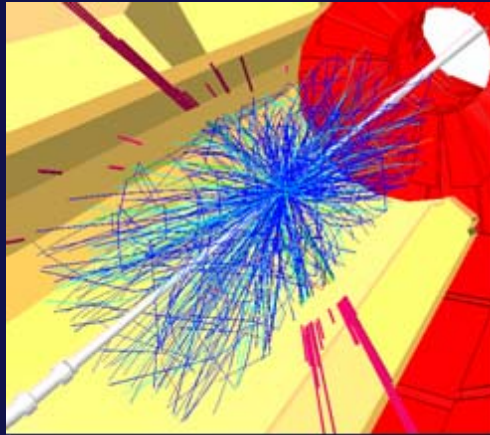




$Z \rightarrow \mu\mu$ event from 2012 data with 25 reconstructed vertices

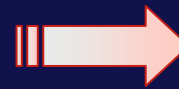


Datenraten



~ 100 Millionen Kanäle
Digitalkamera ~ 14 Million Pixel
CMS nimmt 40 Million "Digitalbilder" pro Sekunde !!

Datenmenge pro Jahr: **mehrere Petabytes**
1 Petabyte = 10^9 MB = 10^{15} Byte
~1.500.000 CDs mit 600 MB



GRID-Computing !
Weltweite Kollaboration



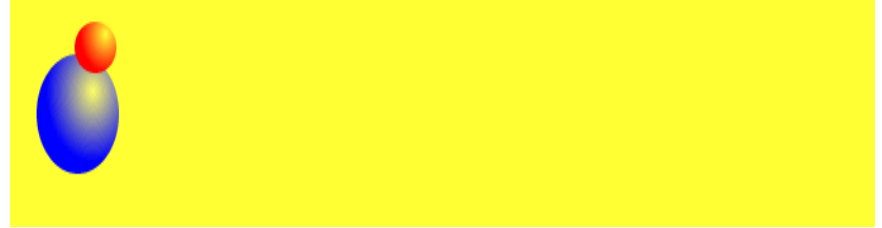
WWW wurde 1990 am CERN erfunden

Nachweis des Higgs- Teilchens

Das Prinzip der Massenerzeugung

Leerer Raum (Vakuum)

Alle Teilchen sind masselos und bewegen sich mit derselben Lichtgeschwindigkeit.



Higgs-Hintergrundfeld

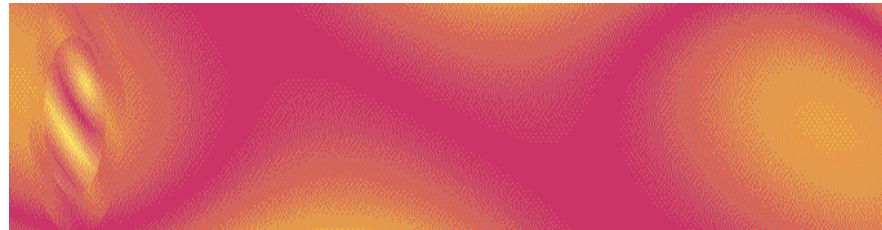
Die Teilchen wechselwirken mit dem Higgs-Hintergrundfeld und bewegen sich langsamer. Sie erhalten so effektiv eine Masse. Die Größe der Masse hängt von der Stärke der Wechselwirkung mit dem Hintergrundfeld ab.



Eine Konsequenz: das Higgs-Teilchen

Eine Anregung des Higgs-Feldes

Die Existenz des Higgs-Teilchen wird vom Standard-Modell gefordert, es konnte jedoch erst jetzt nachgewiesen werden. **Komplettiert das Modell.**







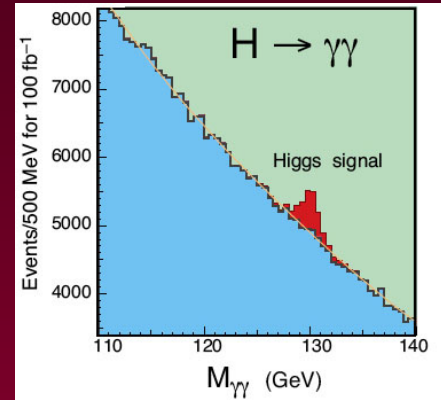
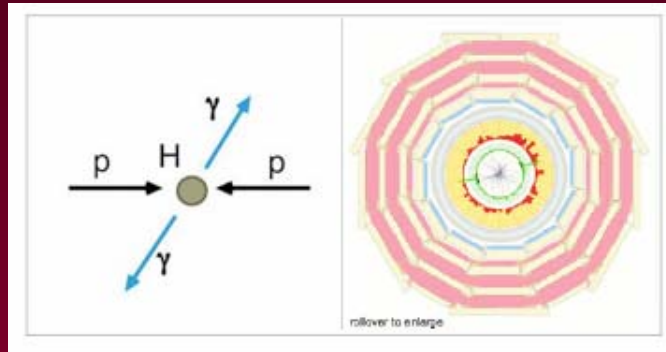
**A quasi-political Explanation of the Higgs Boson;
for Mr Waldegrave, UK Science Minister 1993.**

CERN und LHC (Gesuchte Ereignisse [Simulationen])

Gesuchte Ereignisse (Simulationen)

Suche nach Higgs-Teilchen:

$$m_{\text{Higgs}} < 140 \text{ GeV}/c^2 \quad : \quad H \rightarrow \gamma\gamma$$



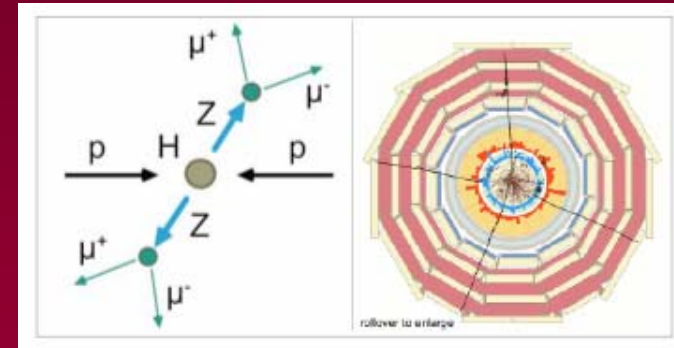
$$150 \leq m_{\text{Higgs}} \leq 180 \text{ GeV}/c^2$$

$$: \quad H \rightarrow W^+W^-$$

$$140 \leq m_{\text{Higgs}} \leq 180 \text{ GeV}/c^2$$

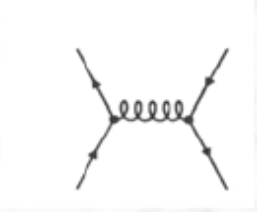
$$: \quad H \rightarrow ZZ$$

$$\hookrightarrow \ell^+\ell^-$$

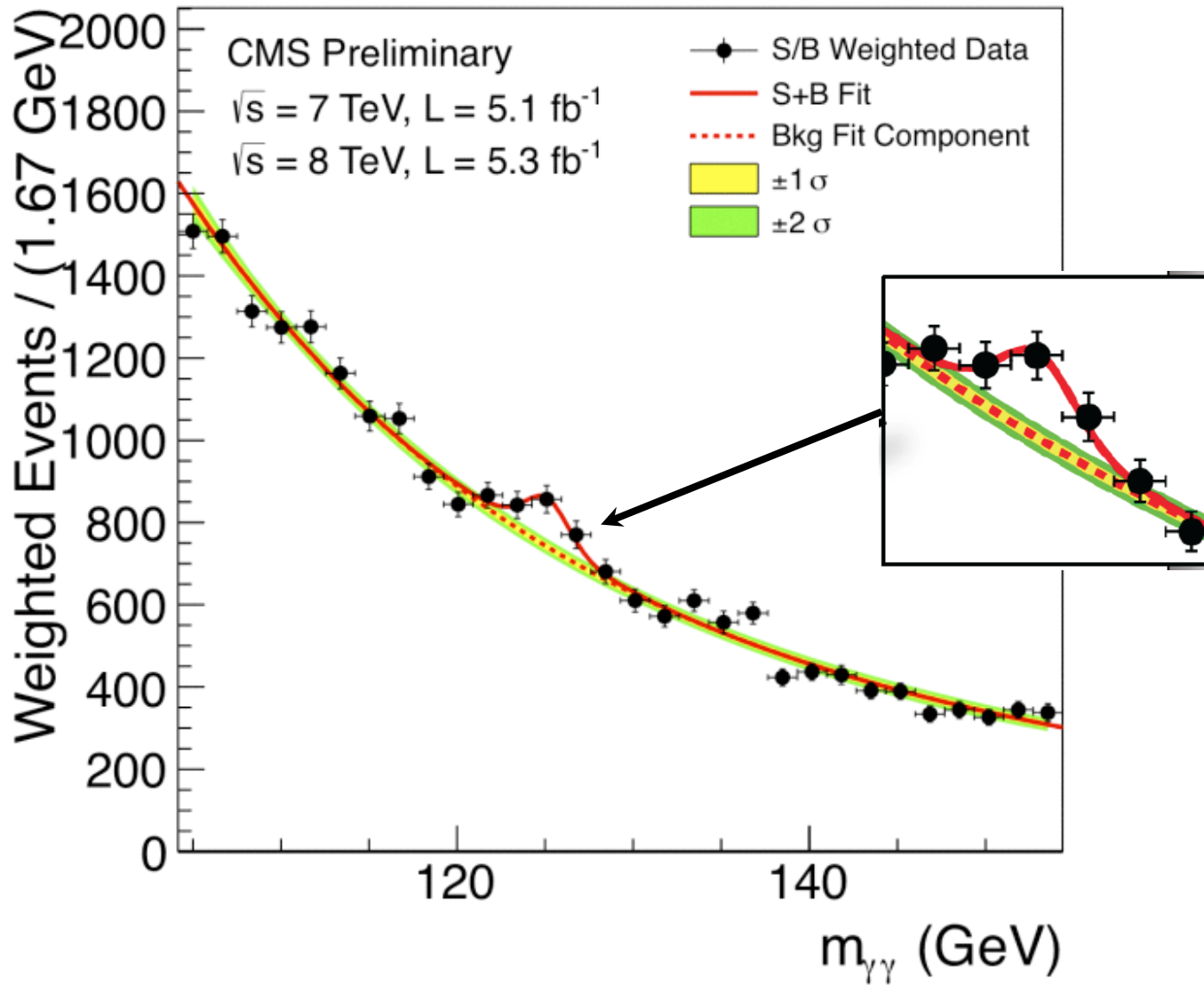


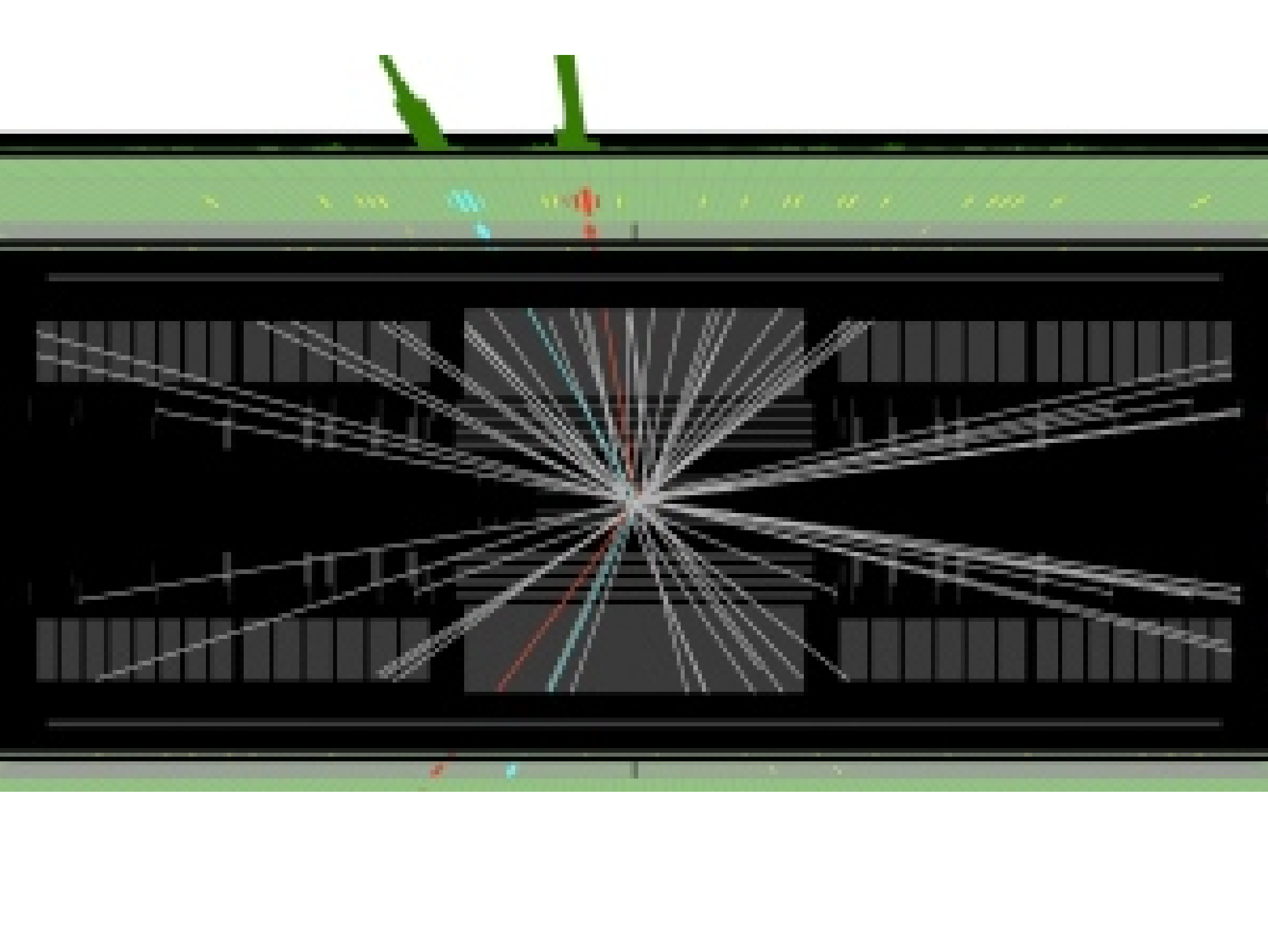
Reaktionsraten am LHC

Events / sec for $\mathcal{L} = 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$

<ul style="list-style-type: none"> • Inelastische Proton-Proton Reaktionen: • Quark -Quark/Gluon Streuungen mit großen transversalen Impulsen 		1 Milliarde / sec	~100 Millionen/ sec
<ul style="list-style-type: none"> • b-Quark Paare • Top-Quark Paare 		5 Millionen / sec	8 / sec
<ul style="list-style-type: none"> • $W \rightarrow e \nu$ • $Z \rightarrow e e$ 		150 / sec	15 / sec
<ul style="list-style-type: none"> • Higgs (150 GeV) • Gluino, Squarks (1 TeV) 		0.2 / sec	0.03 / sec

Das CMS $\gamma\gamma$ Resultat





$\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}, L \leq 5.1 \text{ fb}^{-1}$ $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}, L \leq 19.6 \text{ fb}^{-1}$

CMS Preliminary $m_H = 125.7 \text{ GeV}$
 $\rho_{SM} = 0.65$

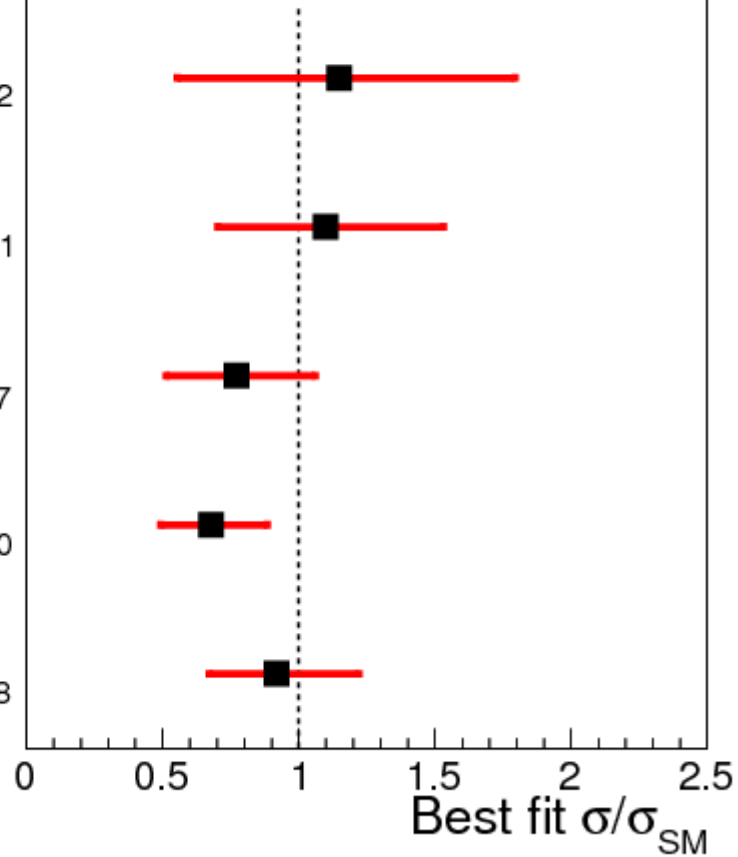
$H \rightarrow bb$
 $\mu = 1.15 \pm 0.62$

$H \rightarrow \tau\tau$
 $\mu = 1.10 \pm 0.41$

$H \rightarrow \gamma\gamma$
 $\mu = 0.77 \pm 0.27$

$H \rightarrow WW$
 $\mu = 0.68 \pm 0.20$

$H \rightarrow ZZ$
 $\mu = 0.92 \pm 0.28$



Zusammenfassung und Ausblick

Messprogramm am LHC(Hochenergie-Front)

Ziele der Experimente:

– Suche nach Higgs-Teilchen (Verantwortlich für Massen von Quarks)
Erledigt!

– Suche nach Physik jenseits des Standardmodells

Beispiele: – Supersymmetrische Teilchen

Kandidaten für dunkle Materie

– Suche nach dunkler Materie

(Fehlender Impuls in einem pp-Ereignis)

– Suche nach Extra-Dimensionen

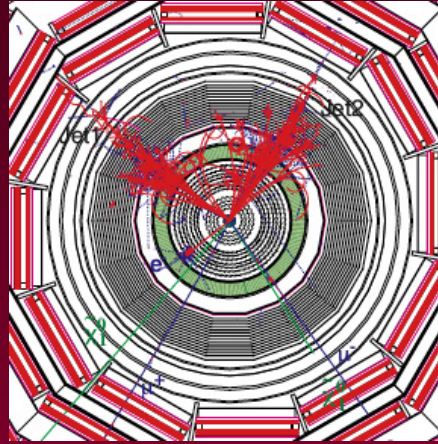
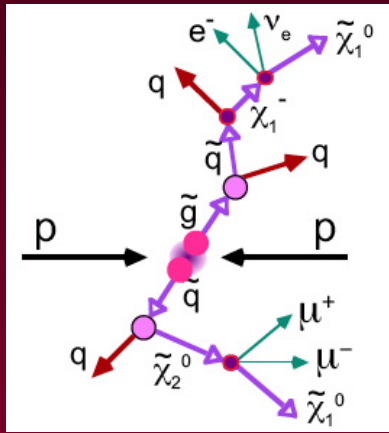
(Verschieben von Gravitonen in andere
Dimensionen/Fehlender Impuls)

– Untersuchungen zur dunklen Energie/Baryon-
Antibaryon-Verhältnis

CERN und LHC (Gesuchte Ereignisse [Simulationen])

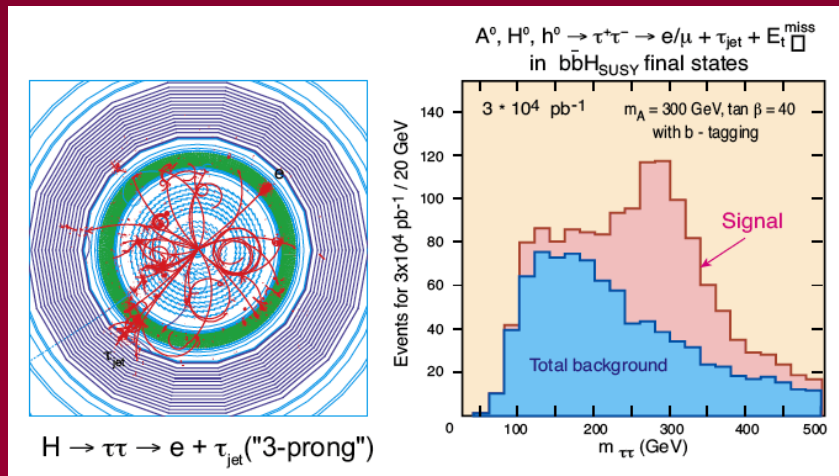
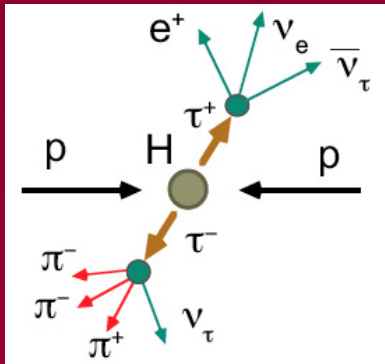
Suche nach supersymmetrischen Teilchen (SUSY):

$$pp \rightarrow \tilde{q}\tilde{g} \rightarrow 3 \text{ Leptonen} + 2 \text{ LSP}$$



Suche nach supersymmetrischen Teilchen (H_{SUSY}):

5 H_{SUSY} -Teilchen vorhergesagt



Andere Messprogramme(Präzisions-Front),z.B.
Paul-Scherrer Institut(Schweiz)

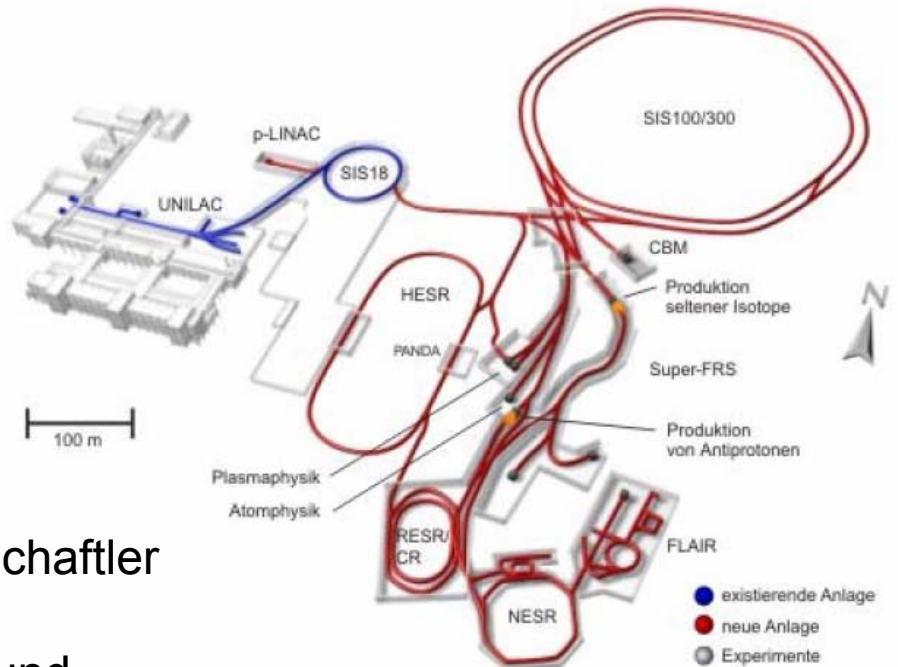


SuperKEKB(Japan)



FAIR=Facility for Antiprotons and Heavy Ion Research,Darmstadt

Erweiterung der bisher bestehenden Forschungseinrichtung GSI



16 teilnehmende Staaten, 3000 Wissenschaftler
aus 40 Ländern, Fertigstellung 2017.
Grundlagenforschung mit Antiprotonen und
Schweren Ionen

**Danke für Ihre
Aufmerksamkeit**