



# Vom Higgs-Boson zur Weltformel

**Claudia-Elisabeth Wulz**

Institut für Hochenergiephysik der ÖAW  
c/o CERN, Genf

**Fachhochschule Villach**

17. Dez. 2013



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)

In a recent note<sup>1</sup> it was shown that the Goldstone theorem,<sup>2</sup> that Lorentz-covariant field theories in which spontaneous breakdown of symmetry under an internal Lie group occurs contain zero-mass particles, fails if and only if the conserved currents associated with the internal group are coupled to gauge fields. The purpose of the present note is to report that, as a consequence of this coupling, the spin-one quanta of some of the gauge fields acquire mass; the longitudinal degrees of freedom of these particles (which would be absent if their mass were zero) go over into the Goldstone bosons when the coupling tends to zero. This phenomenon is just the relativistic analog of the plasmon phenomenon to which Anderson<sup>3</sup> has drawn attention: that the scalar zero-mass excitations of a superconducting neutral Fermi gas become longitudinal plasmon modes of finite mass when the gas is charged.

The simplest theory which exhibits this behavior is a gauge-invariant version of a model used by Goldstone<sup>2</sup> himself: Two real<sup>4</sup> scalar fields  $\varphi_1, \varphi_2$  and a real vector field  $A_\mu$  interact through the Lagrangian density

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

where

$$\nabla_\mu \varphi_1 = \partial_\mu \varphi_1 - e A_\mu \varphi_2,$$

$$\nabla_\mu \varphi_2 = \partial_\mu \varphi_2 + e A_\mu \varphi_1,$$

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu,$$

$e$  is a dimensionless coupling constant, and the metric is taken as  $-+++$ .  $L$  is invariant under simultaneous gauge transformations of the first kind on  $\varphi_1 \pm i\varphi_2$  and of the second kind on  $A_\mu$ . Let us suppose that  $V(\varphi_1^2) = 0$ ,  $V''(\varphi_1^2) > 0$ ; then spontaneous breakdown of U(1) symmetry occurs. Consider the equations (derived from (1) by treating  $\Delta\varphi_1$ ,  $\Delta\varphi_2$ , and  $A_\mu$  as small quantities) governing the propagation of small oscillations

508

about the "vacuum" solution  $\varphi_1(x) = 0$ ,  $\varphi_2(x) = \varphi_0$ :

$$\partial^\mu \{ \partial_\mu (\Delta\varphi_1) - e \varphi_0 A_\mu \} = 0, \quad (2a)$$

$$\{ \partial^2 - 4\varphi_0^2 V''(\varphi_0^2) \} (\Delta\varphi_2) = 0, \quad (2b)$$

$$\partial_\nu F^{\mu\nu} = e \varphi_0 \{ \partial^\mu (\Delta\varphi_1) - e \varphi_0 A_\mu \}. \quad (2c)$$

Equation (2b) describes waves whose quanta have (bare) mass  $2\varphi_0 \{ V''(\varphi_0^2) \}^{1/2}$ ; Eqs. (2a) and (2c) may be transformed, by the introduction of new variables

$$B_\mu = A_\mu - (e\varphi_0)^{-1} \partial_\mu (\Delta\varphi_1), \\ G_{\mu\nu} = \partial_\mu B_\nu - \partial_\nu B_\mu = F_{\mu\nu}, \quad (3)$$

into the form

$$\partial_\mu B^\mu = 0, \quad \partial_\nu G^{\mu\nu} + e^2 \varphi_0^2 B^\mu = 0. \quad (4)$$

Equation (4) describes vector waves whose quanta have (bare) mass  $e\varphi_0$ . In the absence of the gauge field coupling ( $e = 0$ ) the situation is quite different: Equations (2a) and (2c) describe zero-mass scalar and vector bosons, respectively. In passing, we note that the right-hand side of (2c) is just the linear approximation to the conserved current: It is linear in the vector potential, gauge invariance being maintained by the presence of the gradient term.<sup>5</sup>

When one considers theoretical models in which spontaneous breakdown of symmetry under a semisimple group occurs, one encounters a variety of possible situations corresponding to the various distinct irreducible representations to which the scalar fields may belong; the gauge field always belongs to the adjoint representation.<sup>6</sup> The model of the most immediate inter-

roduction of vector gauge fields and the consequent breakdown of manifest covariance.<sup>3</sup> This, of course, represents a departure from the assumptions of the theorem, and a limitation on its applicability which in no way reflects on the general validity of the proof.

In this note we shall show, within the framework of a simple soluble field theory, that it is possible consistently to break a symmetry (in the sense that  $\sum_k t_{ijk} \langle 0 | A_k | 0 \rangle \neq 0$ ) without requiring that  $A(x)$  excite a zero-mass particle. While this result might suggest a general procedure for the elimination of unwanted massless bosons, it will be seen that this has been accomplished by giving up the global conservation law usually

GLOBAL CONSERVATION LAWS AND MASSLESS PARTICLES\*

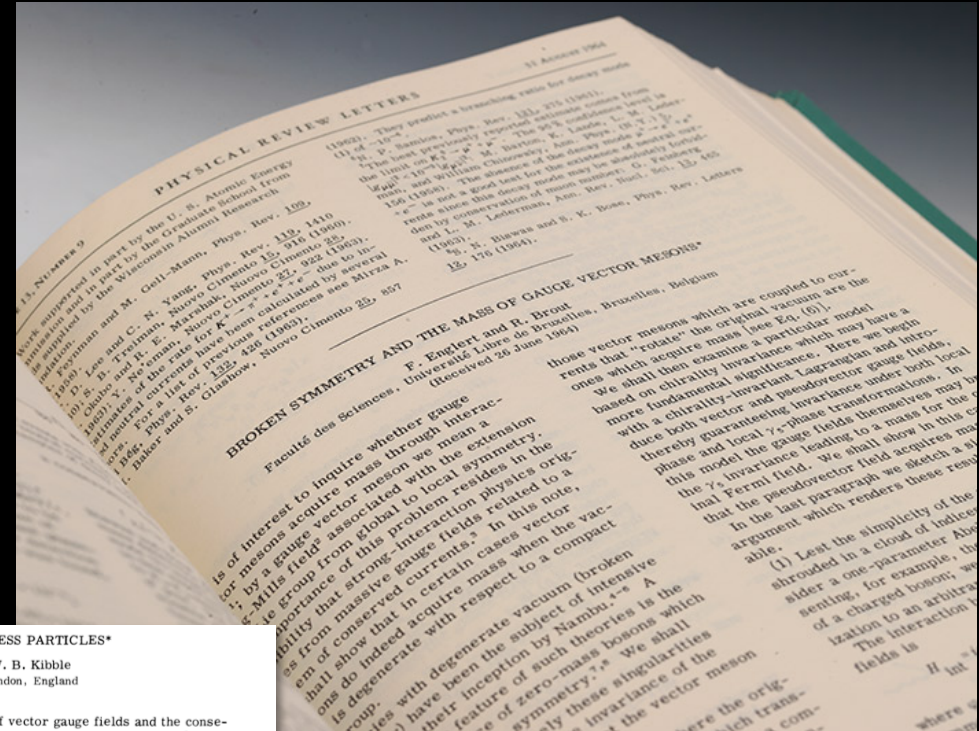
G. S. Guralnik,<sup>†</sup> C. R. Hagen,<sup>†</sup> and T. W. B. Kibble  
Department of Physics, Imperial College, London, England  
(Received 12 October 1964)

$$[Q_i, A_j(x)] = \sum_k t_{ijk} A_k(x),$$

and if it is possible consistently to take  $\sum_k t_{ijk} \langle 0 | A_k | 0 \rangle \neq 0$ , then  $A_j(x)$  has a zero-mass particle in its spectrum. It has more recently been observed that the assumed Lorentz invariance essential to the proof<sup>2</sup> may allow one the hope of avoiding such massless particles through the in-

585

# F. Englert, R. Brout Juni 1964



# G. Guralnik, T. Kibble, C. Hagen Oktober 1964

282

# P. Higgs August 1964





4. Juli 2012



DONNERSTAG, 5. JULI 2012 | DIE PRESSE.COM | PREIS: 2,00 EURO | 76.1500

**Die Presse** KUNSTLIEBE Kulturpolitik. Die Österreicher gehen wenig ins Museum. Ein Experte gibt Tipps, wie man die Liebe neu wecken kann. SEITE 23

FREI SEIT 1848

**Physik.** Am Kernforschungszentrum CERN in Genf hat man das lange gesuchte Teilchen gefunden, das allen anderen erst Masse verleiht, das Higgs-Boson. Ganz sicher ist man sich allerdings noch nicht.

**Happy Higgs Day**

„Es geht darum, die Welt zu verstehen“

Portrait des Tages. Wie der Brite Peter Higgs vom Außenseiter zur Gaijionsfigur wurde.

**Neues Elementarteilchen**

Das Teilchen mit einer Masse von 125 Gigaelectronvolt ist entdeckt worden, was Physiker am Kernforschungszentrum CERN im Schweizervorort Genf, dem Europäischen Beschleuniger Large Hadron Collider, am 4. Juli 2012 mit dem Entdecken des lange gesuchten Higgs-Bosons bewies, das als zentrale Bausteine für das nach ihm benannte Teilchen, das Higgs-Feld, einfließen oder mit ihm in Kontakt treten werden, um sich Masse zu verschaffen.

Der prominenteste der fünf ist die Britin Peter Higgs (a. Porträt unten), nach ihm wurde aber benannt. Er schlug vor, dass allen anderen Teilchen ein Feld einstrahlt – das Higgs-Feld – mit dem Teilchen interagieren, je mehr, desto ihre unterschiedliche Masse. Man ist es aber in der Quantenphysik so, dass jedes Feld ein eigenes Teilchen ausstrahlt, so, wie das elektromagnetische Feld ein Photon ausstrahlt. Aber bald kann

... nur aus dem Zerfallsgeschehen auf sie schließen.

Ein belgisches Institut zu überwinden, ergab die Europäische Kernforschungsorganisation CERN (Genf) 1966 an das hier die größten und komplexesten Maschinen, die je gebaut wurden, drei Milliarden Euro mussten mobilisiert werden. Dazu machten sich manche Physikerinnen einen dicken Namen: Das Mirakel war das Teilchen des Higgs, das alle anderen Teilchen des Universums ihre Masse verleiht. Das Teilchen wurde ein schwarzes Loch entstehen und die Erde verschlingen. Dazu kam es nicht, aber ein Teil der Anlage existiert, seit 2010 ging die Arbeit los, um das Teilchen zu finden. Die Wissenschaftler haben das Teilchen gefunden, das alle anderen Teilchen ihre Masse verleiht. Das Teilchen wurde ein schwarzes Loch entstehen und die Erde verschlingen. Dazu kam es nicht, aber ein Teil der Anlage existiert, seit 2010 ging die Arbeit los, um das Teilchen zu finden. Die Wissenschaftler haben das Teilchen gefunden, das alle anderen Teilchen ihre Masse verleiht.

**Entdeckt? Nein, nur beobachtet!**

Aber diese erzählen sich durch andere Personen. Man muss also Higgs-Signale von Hintergrundstrahlung unterscheiden, und zwar die. Die Genes heißt „J. S. Higgs“, die gibt die Teilchenwissenschaften an, wie es ist, man auf der Suche sein. „Wir sind bei 125“, berichten Robert Schindler (Physik), die Kollegen von Atlas bei CERN.

Aber ganz sicher, dass die Teilchen, die man in den Speichern haben – und die eine Masse von 125 Gigaelectronvolt haben





10. Dez. 2013  
Stockholm



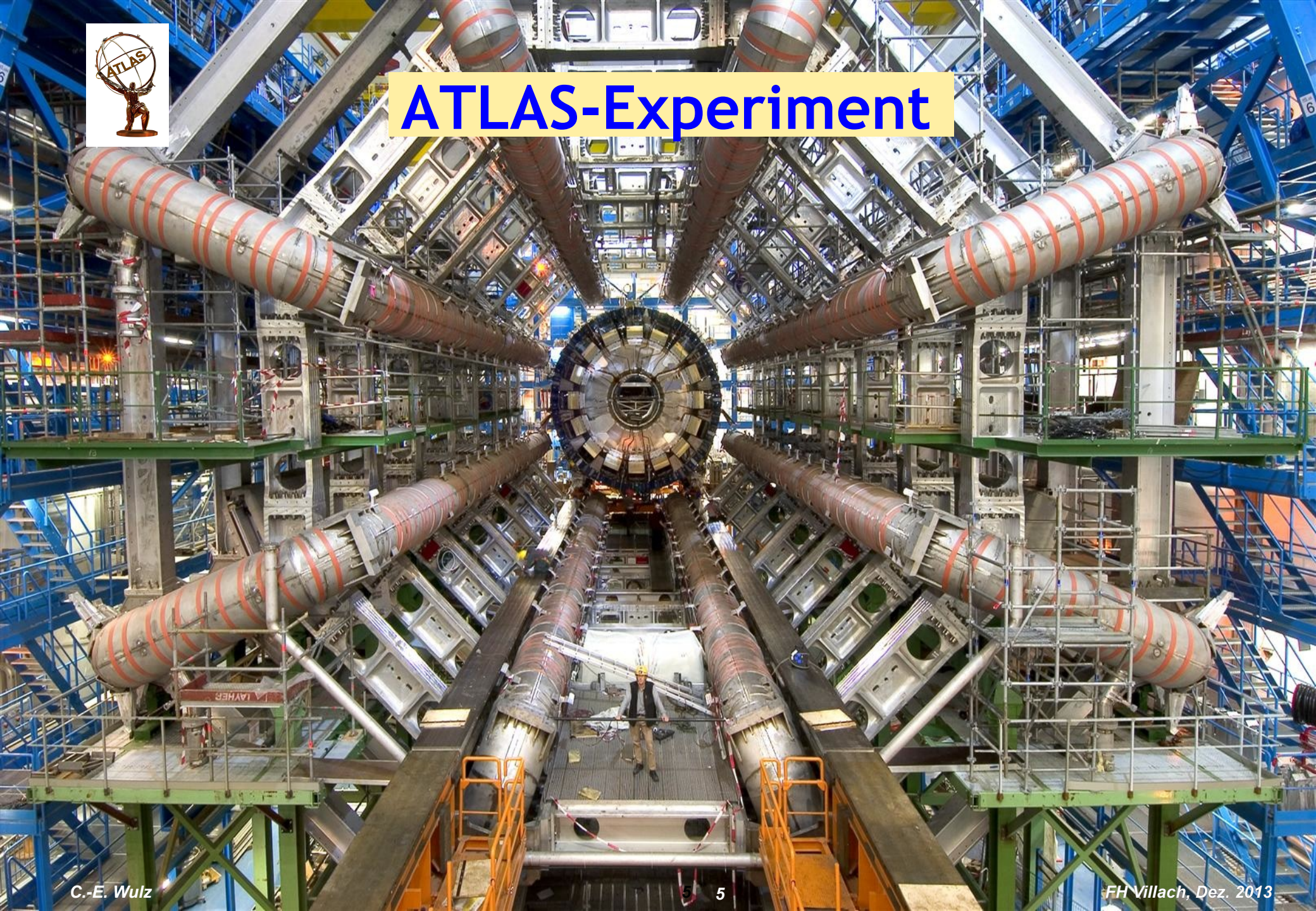
“for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN’s Large Hadron Collider.”







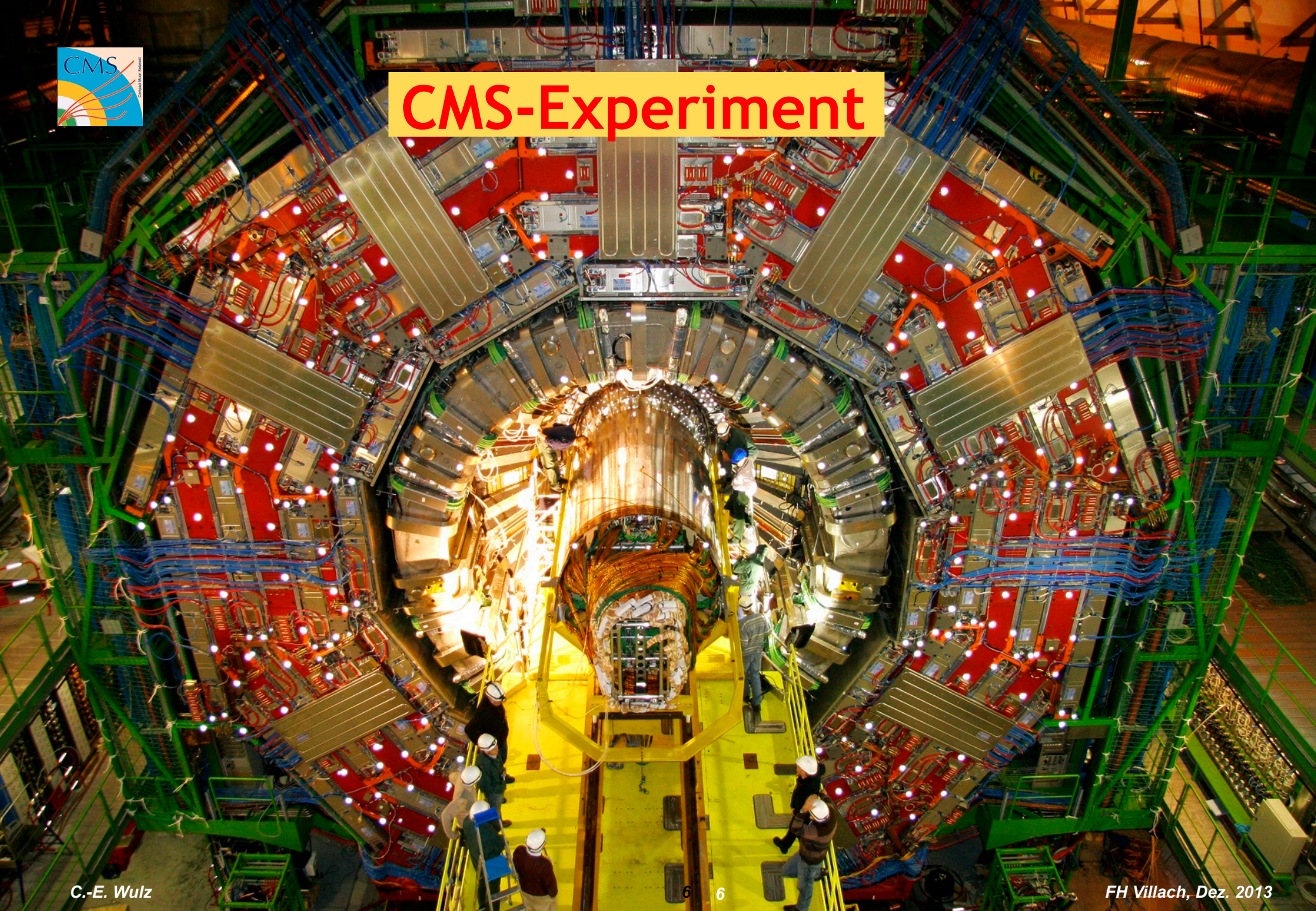
# ATLAS-Experiment





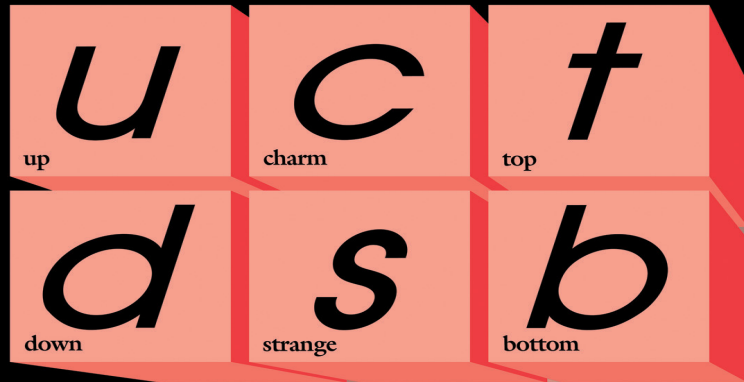


# CMS-Experiment

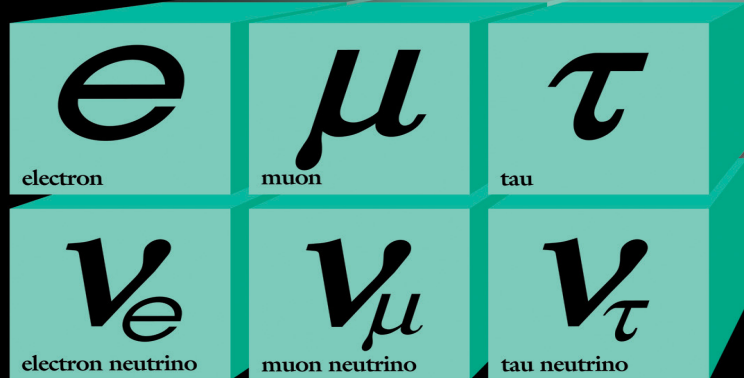
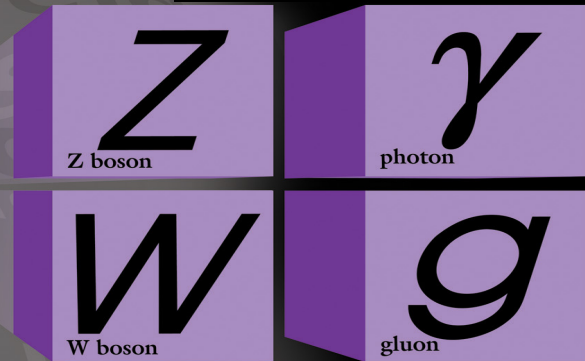




# Quarks



# Kraftteilchen



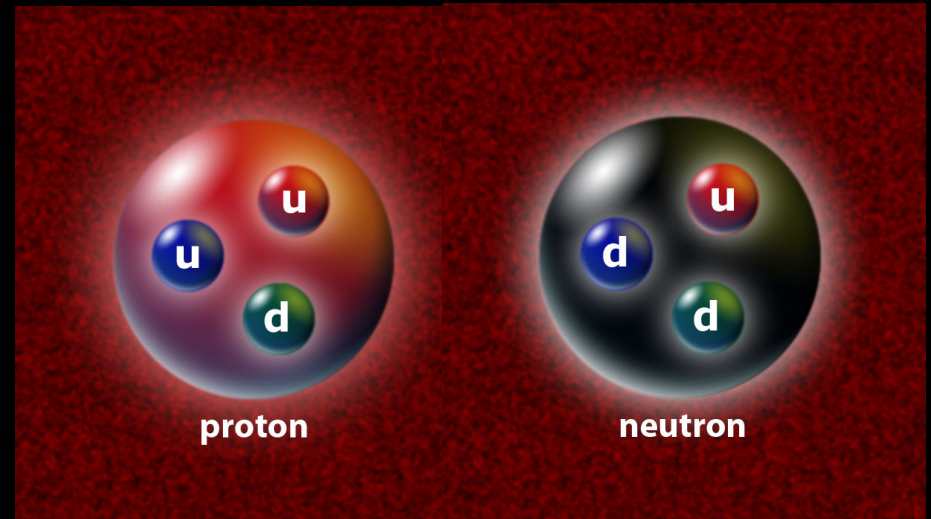
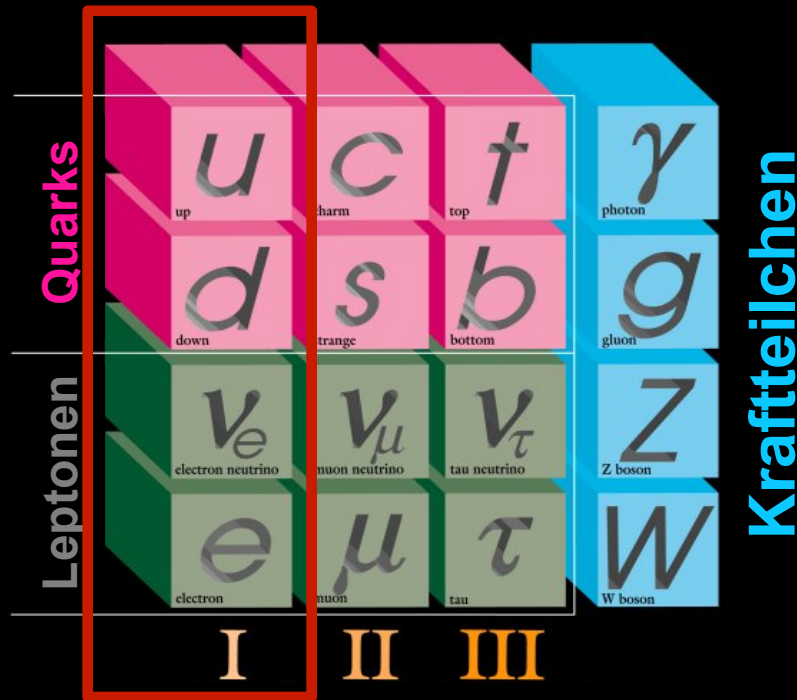
# Leptonen

# Standardmodell



# Aufbau der Materie

Nur die 1. Generation von Quarks und Leptonen spielt Rolle beim Aufbau normaler Materie. Die anderen existierten nur kurz nach dem Urknall. Heute treten sie nur in der kosmischen Strahlung auf oder werden in Beschleunigern erzeugt.



## 3 Generationen von Materieteilchen



# MARIO'S TIME MACHINE™

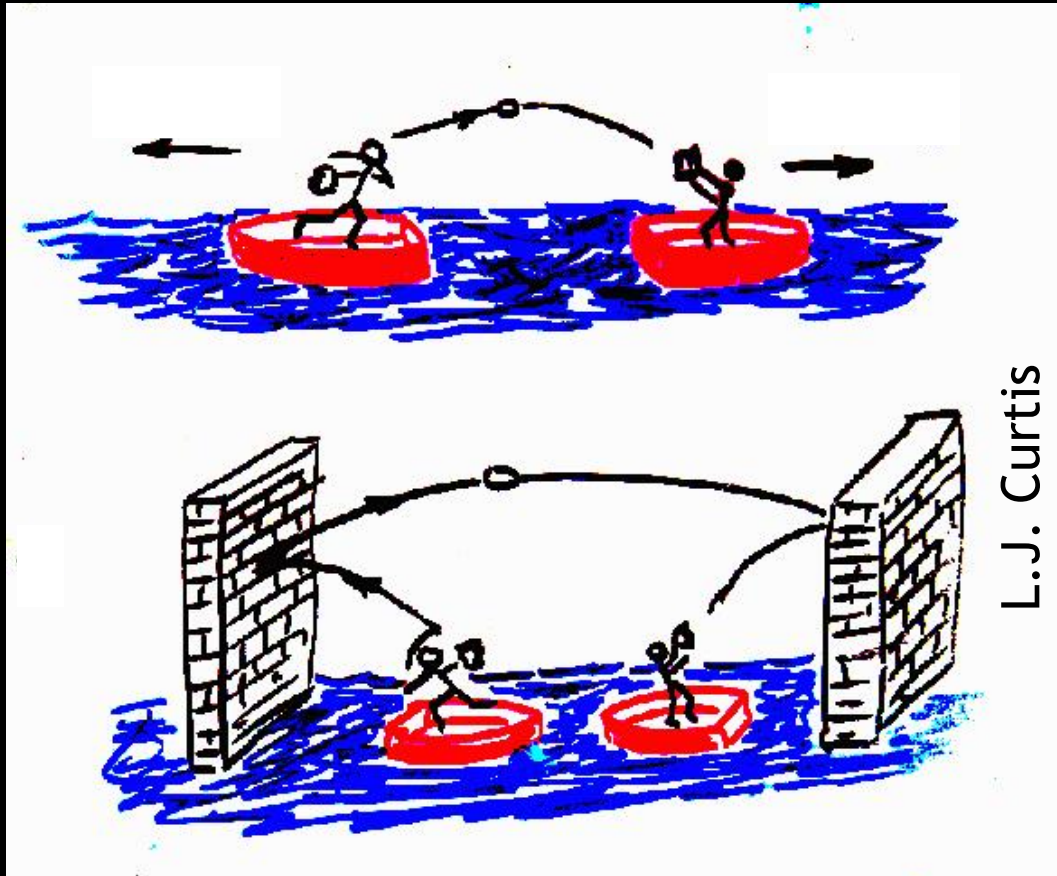


Der LHC ist eine Zeitmaschine,  
genau so wie Teleskope oder  
Raumsonden!

LICENSED BY  
**Nintendo**  
THE SOFTWARE TOOLWORKS



# Kraftteilchen



## Eichbosonen

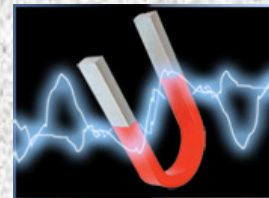
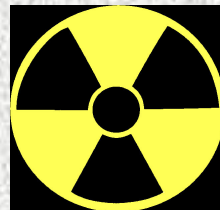


Teilchenaustausch ist für Kraft verantwortlich.

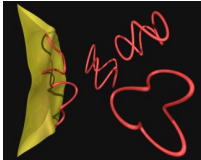


# Die fundamentalen Kräfte

KRAFT	RELATIVE STÄRKE	REICHWEITE	VERMITTLER
Stark	1	$10^{-15}$ m	Gluonen (8)
Schwach	$10^{-6}$	$10^{-18}$ m	$W^+$ , $W^-$ , Z
Elektromagnetisch	$10^{-2}$	unendlich	Photon
Schwerkraft	$10^{-38}$	unendlich	Graviton (?)





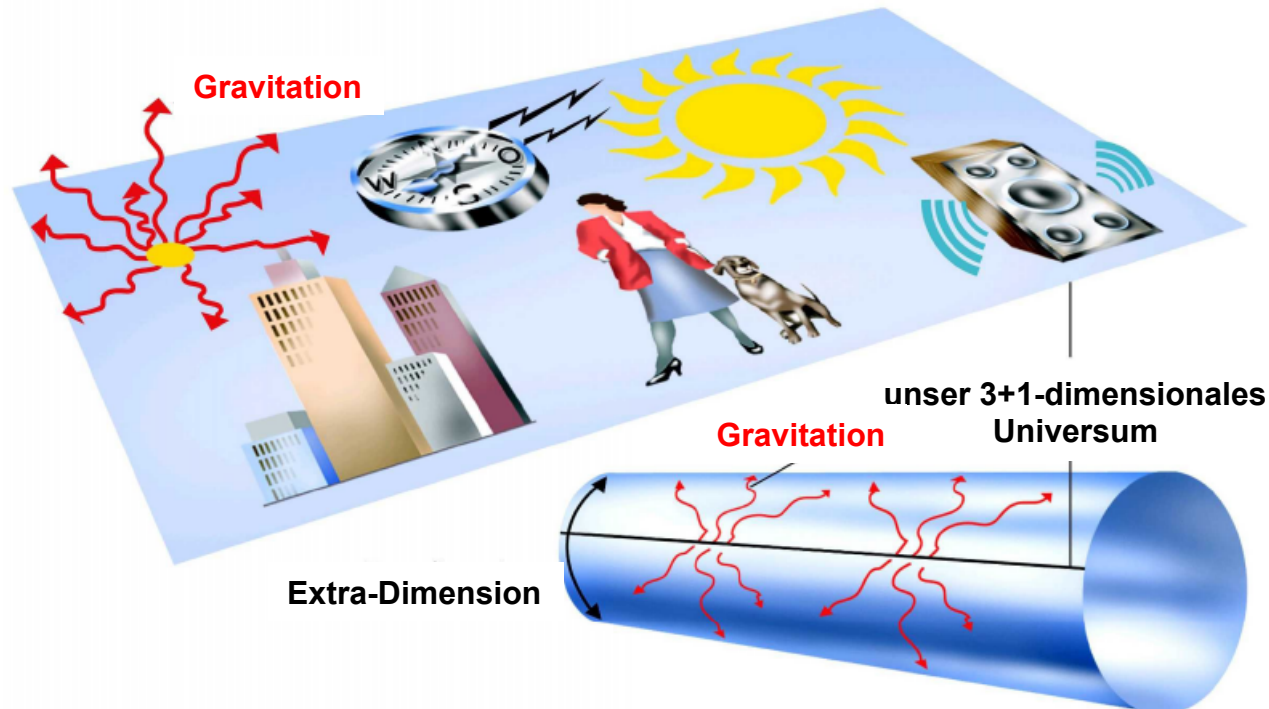


# Gravitation und Extradimensionen

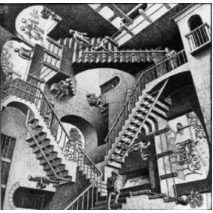
Gravitation scheint  $10^{-38}$  mal so schwach im Vergleich zur starken Wechselwirkung -> schwer vereinbar mit anderen Kräften!

**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

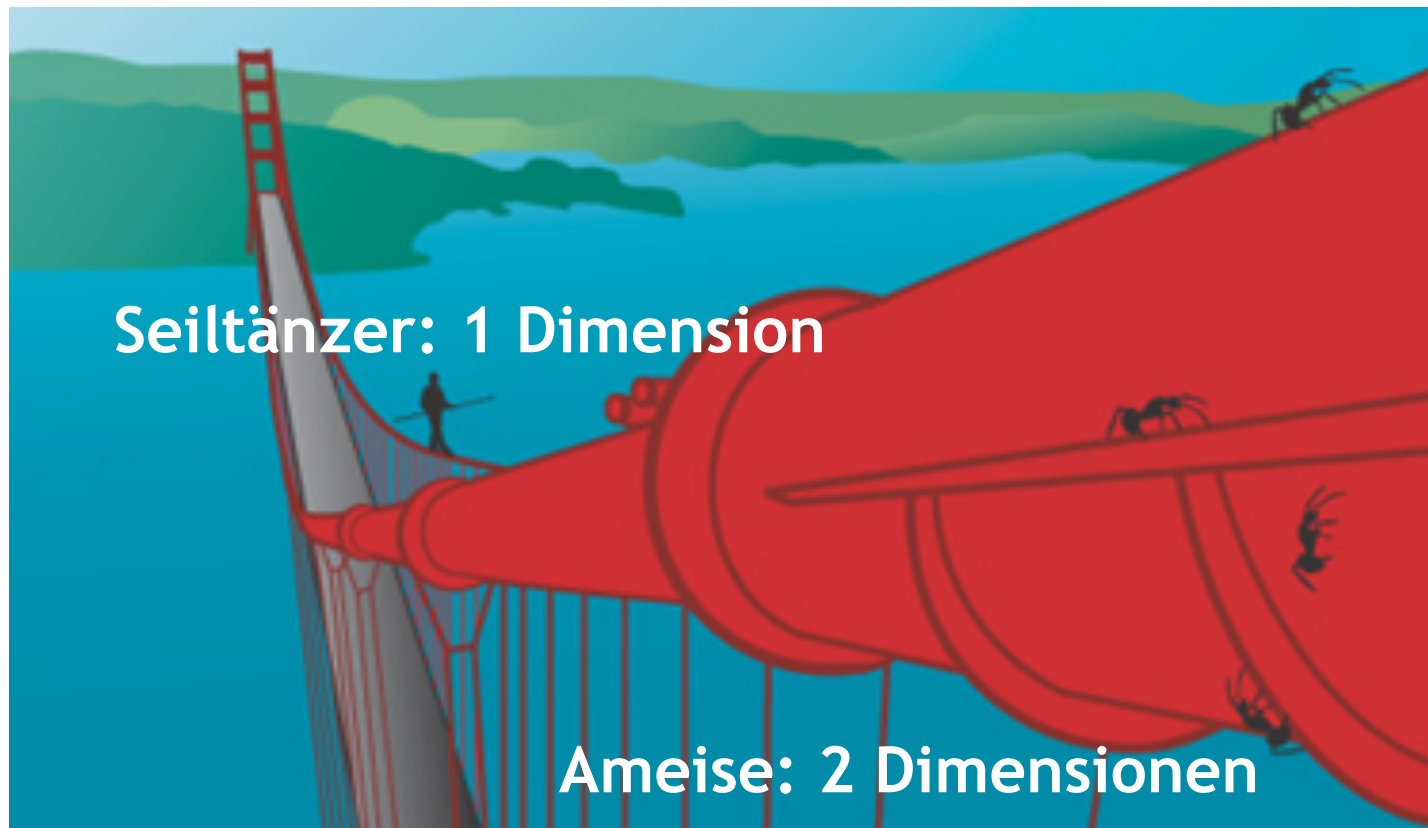






# Extradimensionen

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



2. Dimension: aufgerollt



# Schwarze Löcher

Wenn die Gravitation bei kleinen Distanzen stark wird, kann der LHC auch (Mini-) Schwarze Löcher ( $\emptyset 10^{-18}\text{m}$ ) produzieren!



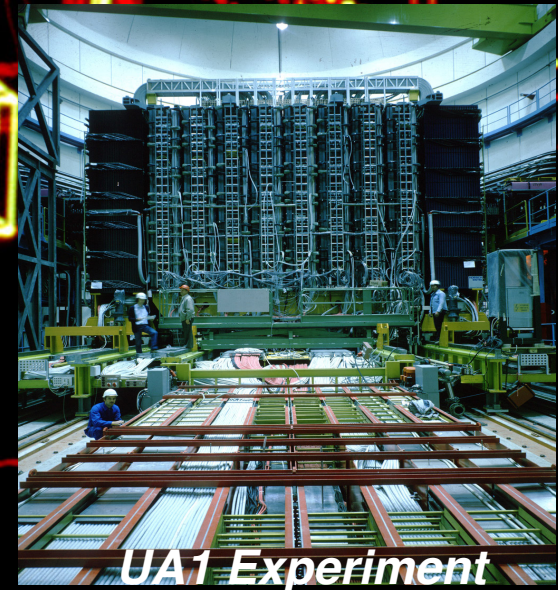
Sie sollten jedoch durch quantenmechanische Effekte sehr schnell ( $\sim 10^{-35}$  s) verdampfen (Hawking-Strahlung), unter Erzeugung aller möglichen Standardmodellteilchen. Bisher wurden jedoch keine Schwarzen Löcher gefunden.



# Entdeckung der W und Z am CERN

## Zerfall eines Z-Teilchens in 2 Elektronen

Elektroschwache Wechselwirkung





# Erzeugung von Masse durch Higgs-Mechanismus

$$\mathcal{L} = (D_\mu \phi)^\dagger D^\mu \phi - V(\phi) - \frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$

- Ohne Higgs-Mechanismus wären alle Teilchen des Standardmodells **masselos**, wenn man Invarianz (Symmetrie) verlangt.
- Masse entsteht erst durch die Wechselwirkung mit dem **Higgs-Feld**. Teilchen mit Masse werden in diesem Feld „gebremst“.
- Das gesamte Universum ist von diesem Higgs-Feld durchdrungen. Weil es überall im Universum ist, merkt man davon nichts.
- „Schwingungen“ (lokale Verdichtungen) dieses Higgs-Feldes erscheinen als **Higgs-Teilchen**, dessen Nachweis am LHC am CERN gelungen ist. Die Masse des Higgs-Teilchens selbst war a priori nicht bekannt, aber alles deutete darauf hin, dass es relativ leicht sein musste.

Peter Higgs

$$\chi < 0, \beta > 0$$





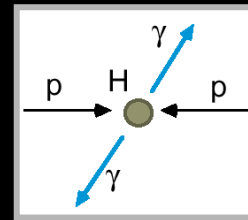
# LHC und die Experimente





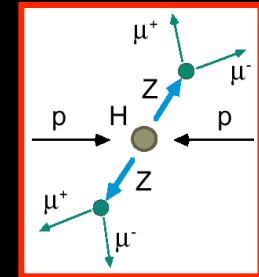
# Wie sucht man nach dem Higgs-Teilchen?

Da das Higgs-Teilchen extrem kurzlebig ist, zerfällt es im Detektor, und zwar in bekannte Teilchen wie Photonen ( $\gamma$ ), Z, W, Taus ( $\tau$ ), b-Quarks, etc. Diese Zerfallskanäle hat man bis jetzt vornehmlich untersucht:



$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

$$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4e \text{ oder } 4\mu \text{ oder } 2e+2\mu$$



$$H \rightarrow WW \rightarrow 2e2\nu \text{ oder } 2\mu2\nu$$

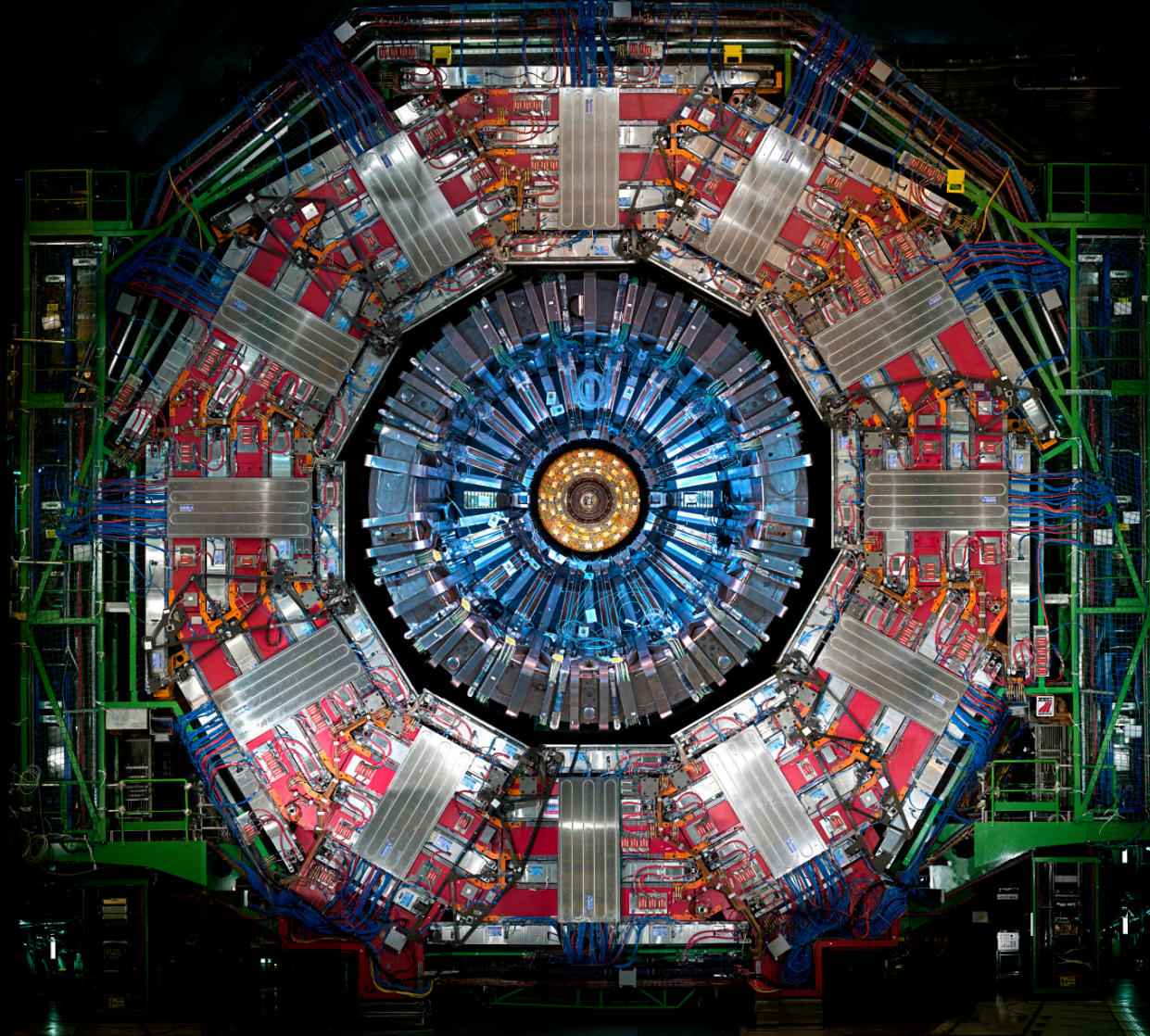
$$H \rightarrow bb$$

$$H \rightarrow \tau\tau$$

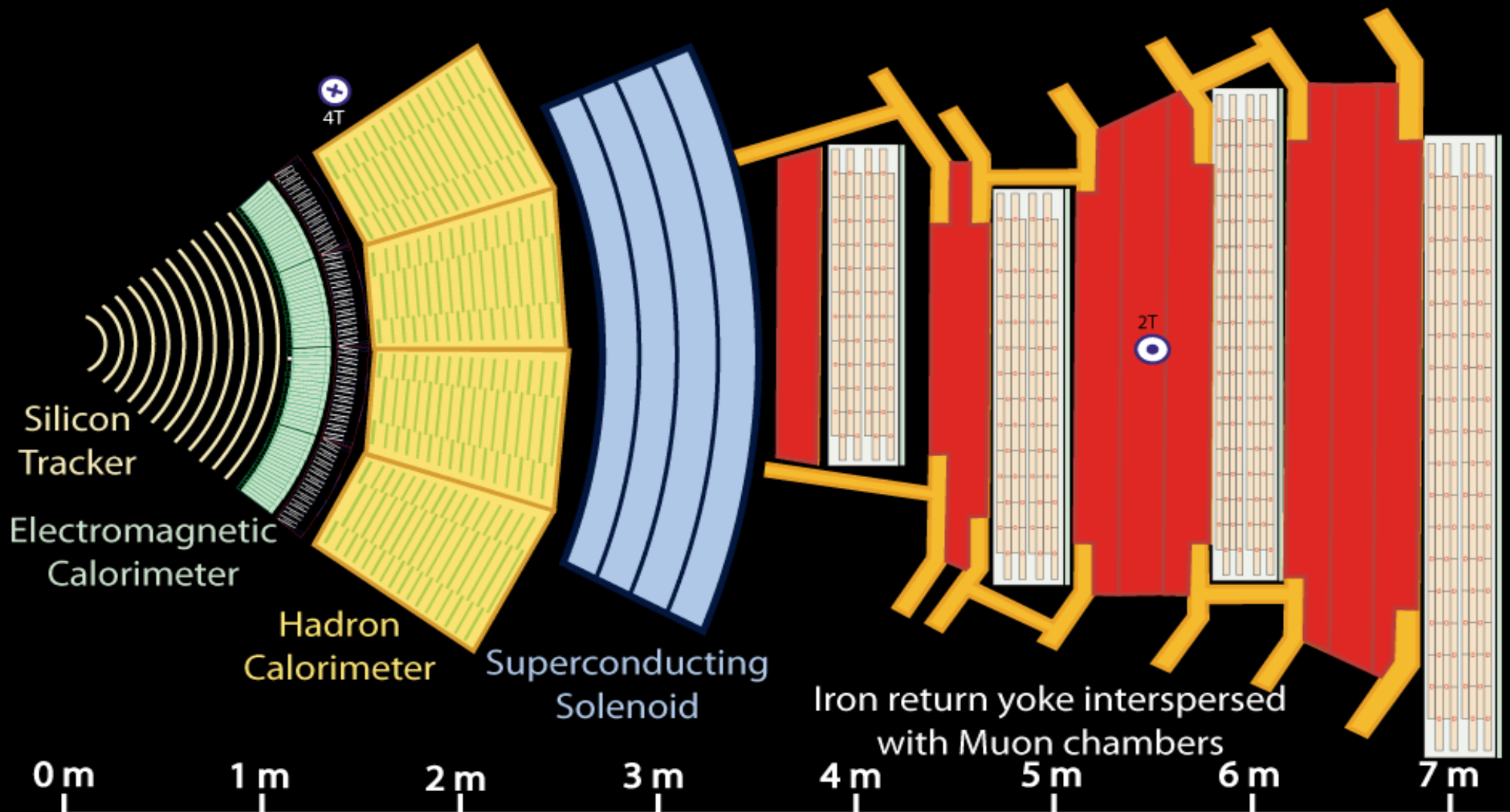
Andere Teilchen können im Detektor wie ein Higgs-Boson aussehen und somit ein “Signal” vortäuschen  $\rightarrow$  **Untergrund**.



# Querschnitt des CMS Experiments



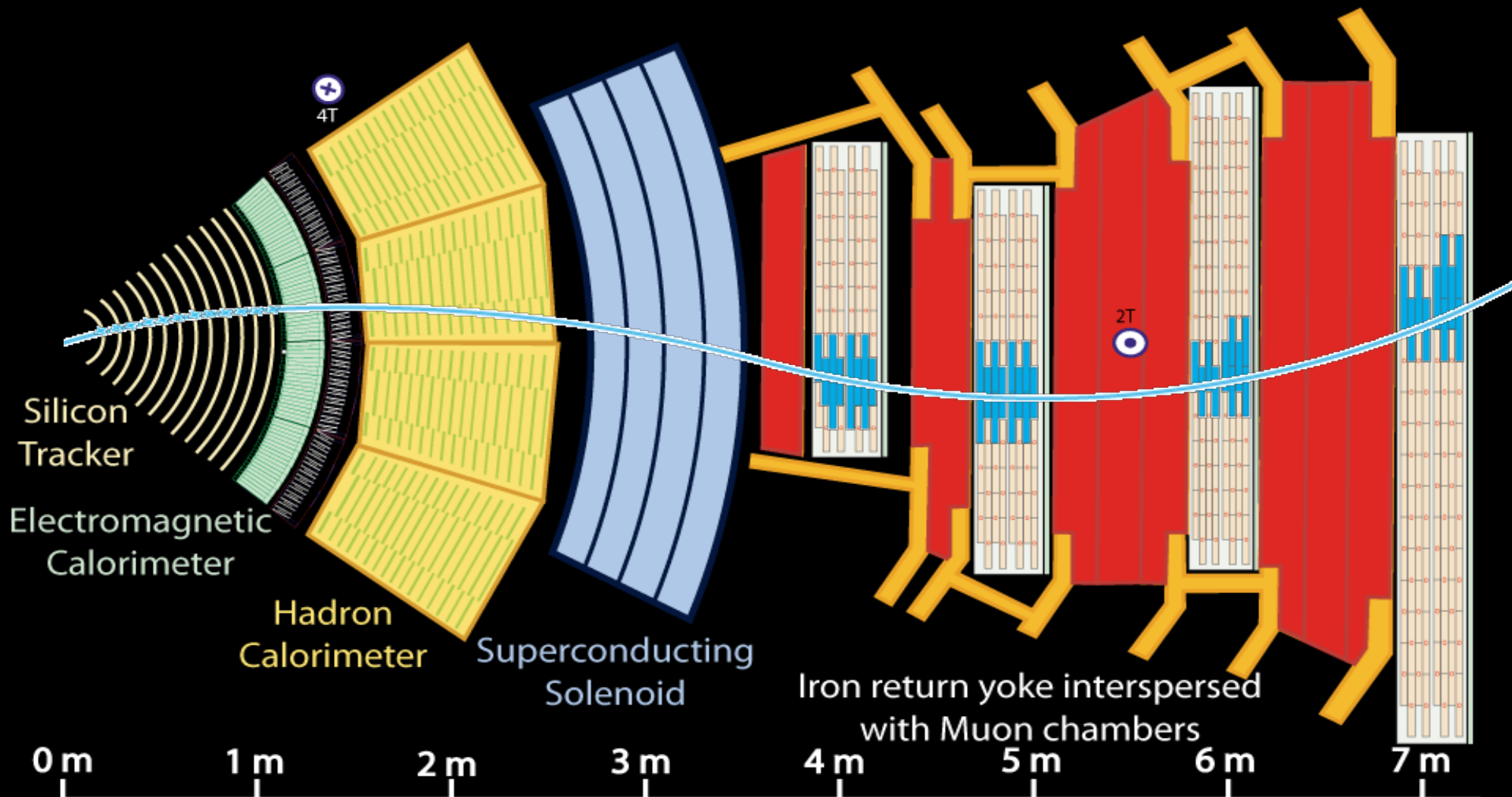




Key:

- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
- - - Photon

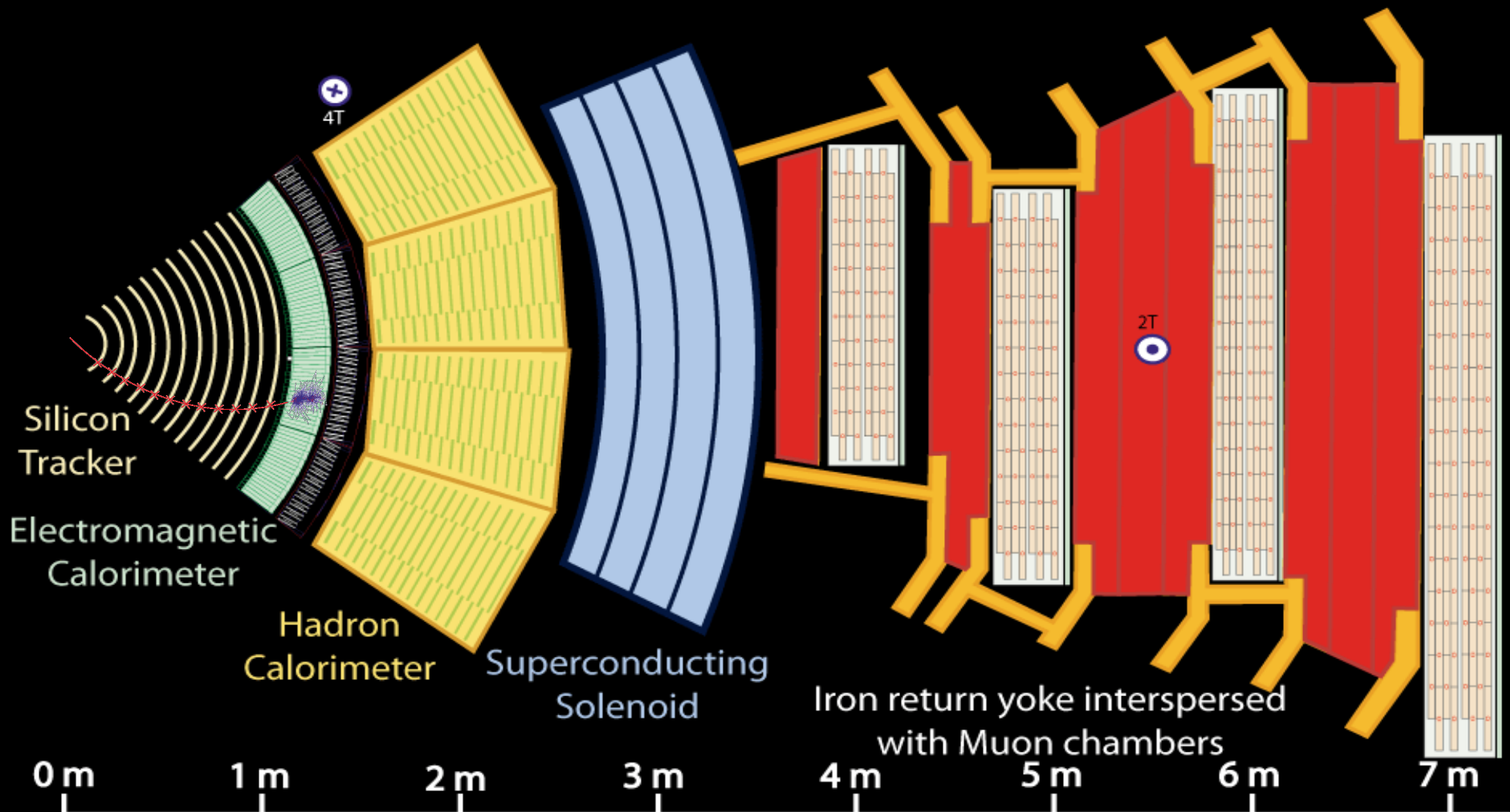




Key:

- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
- - - Photon

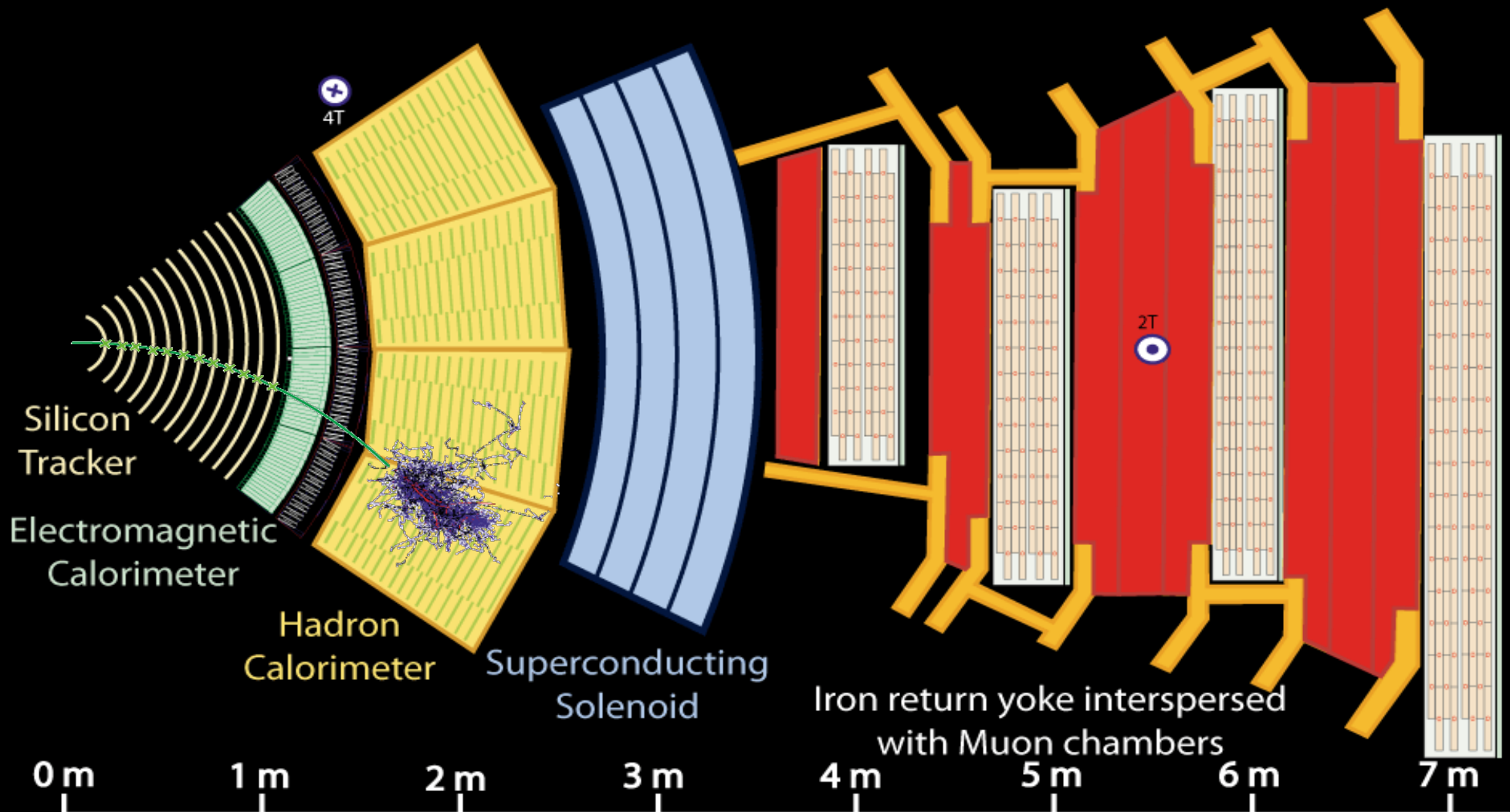




Key:

- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
- - - Photon

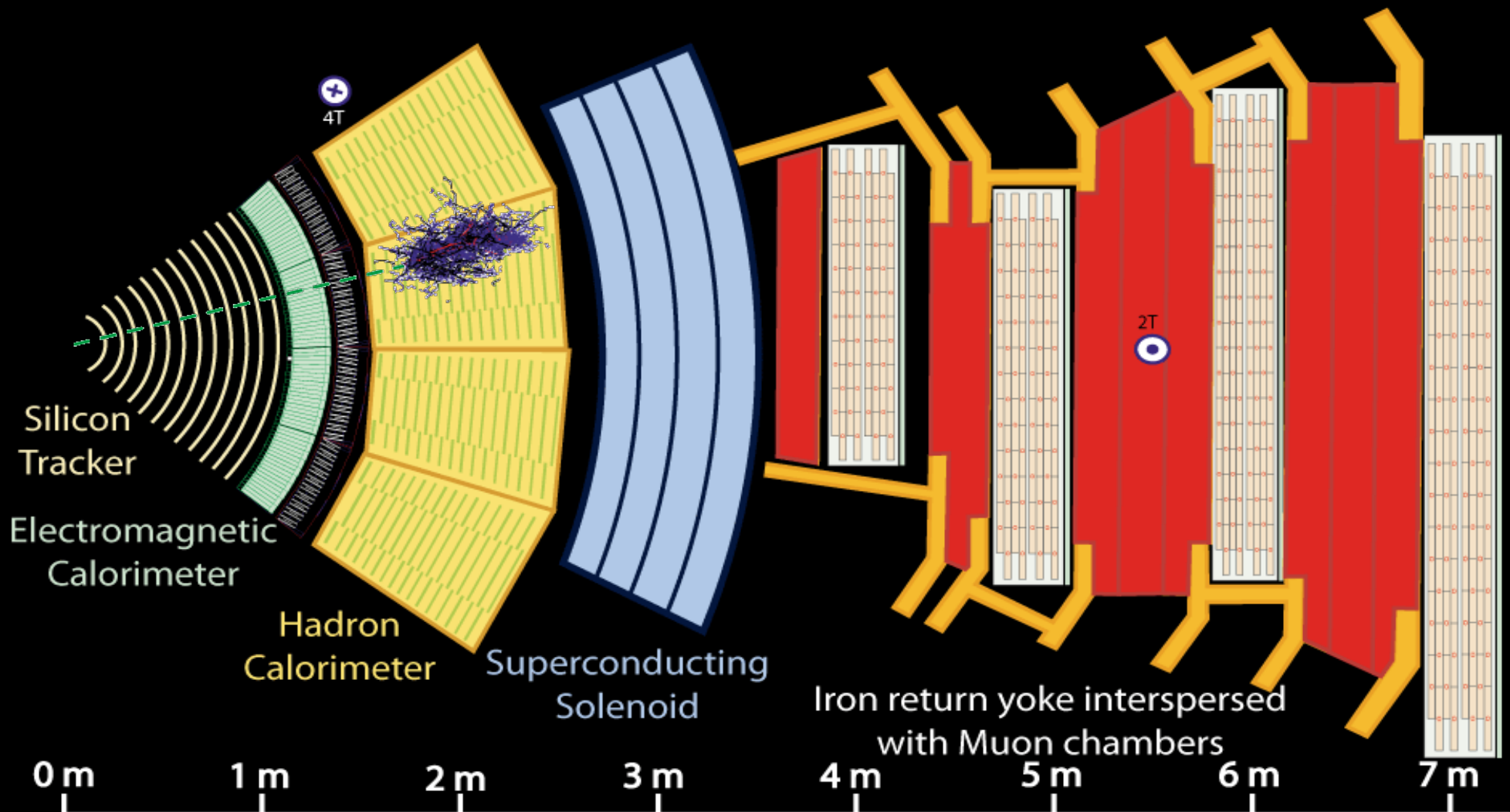




Key:

- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
- - - Photon

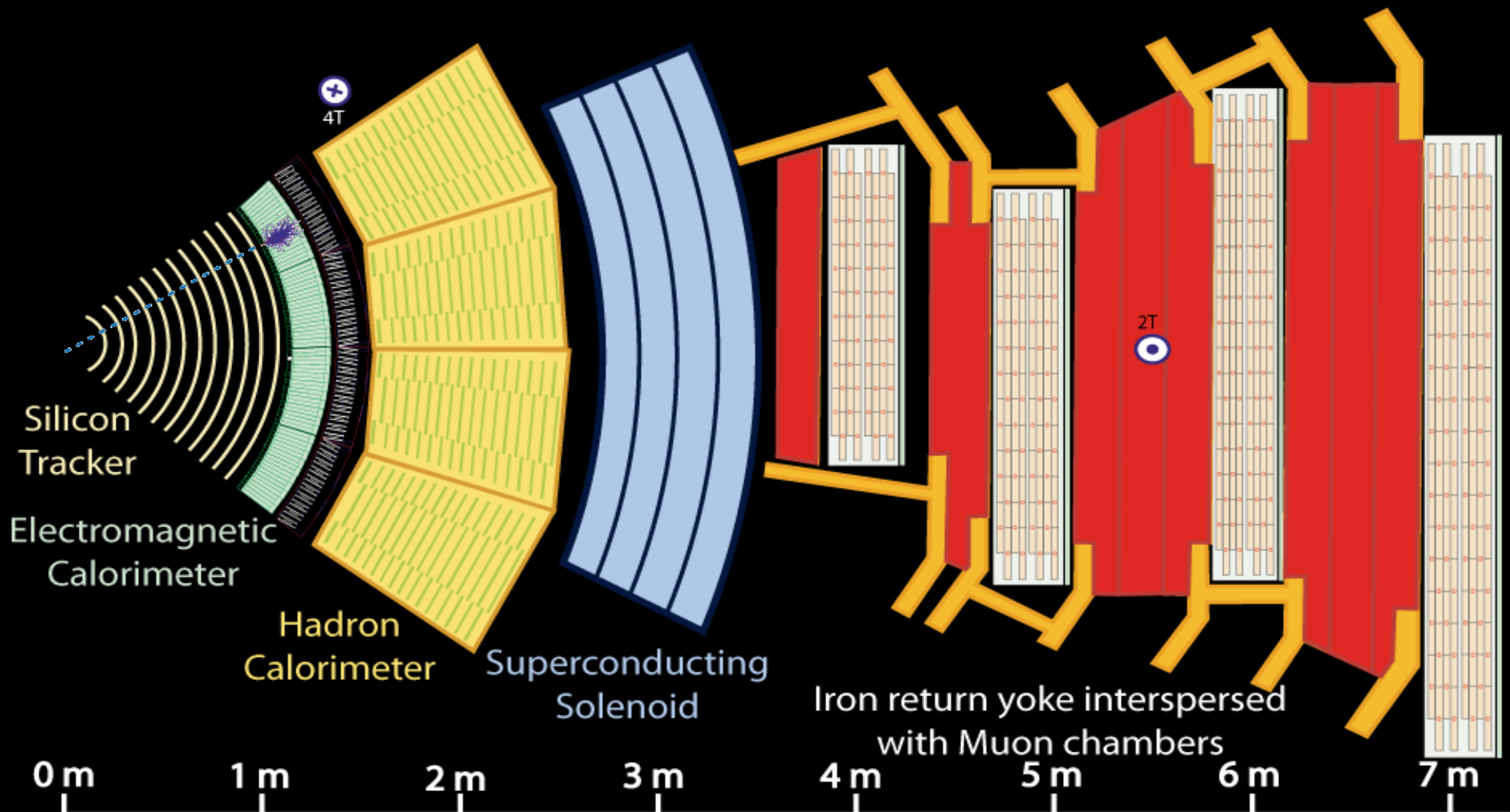




Key:

- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
- - - Photon

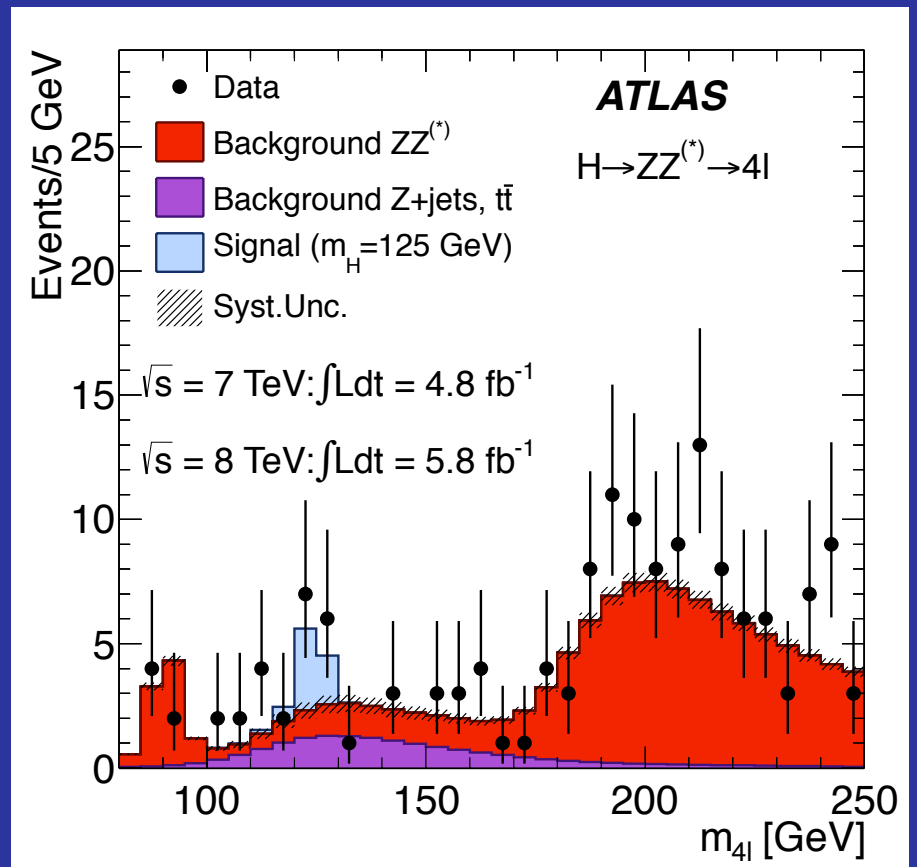
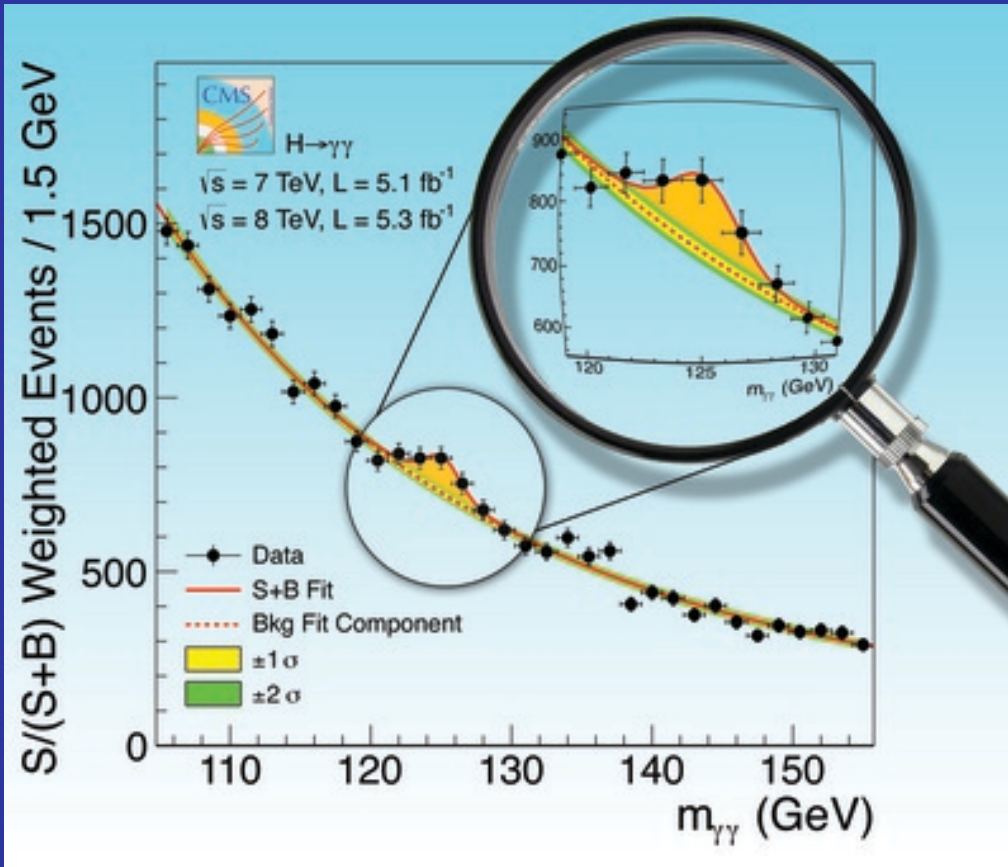




Key:

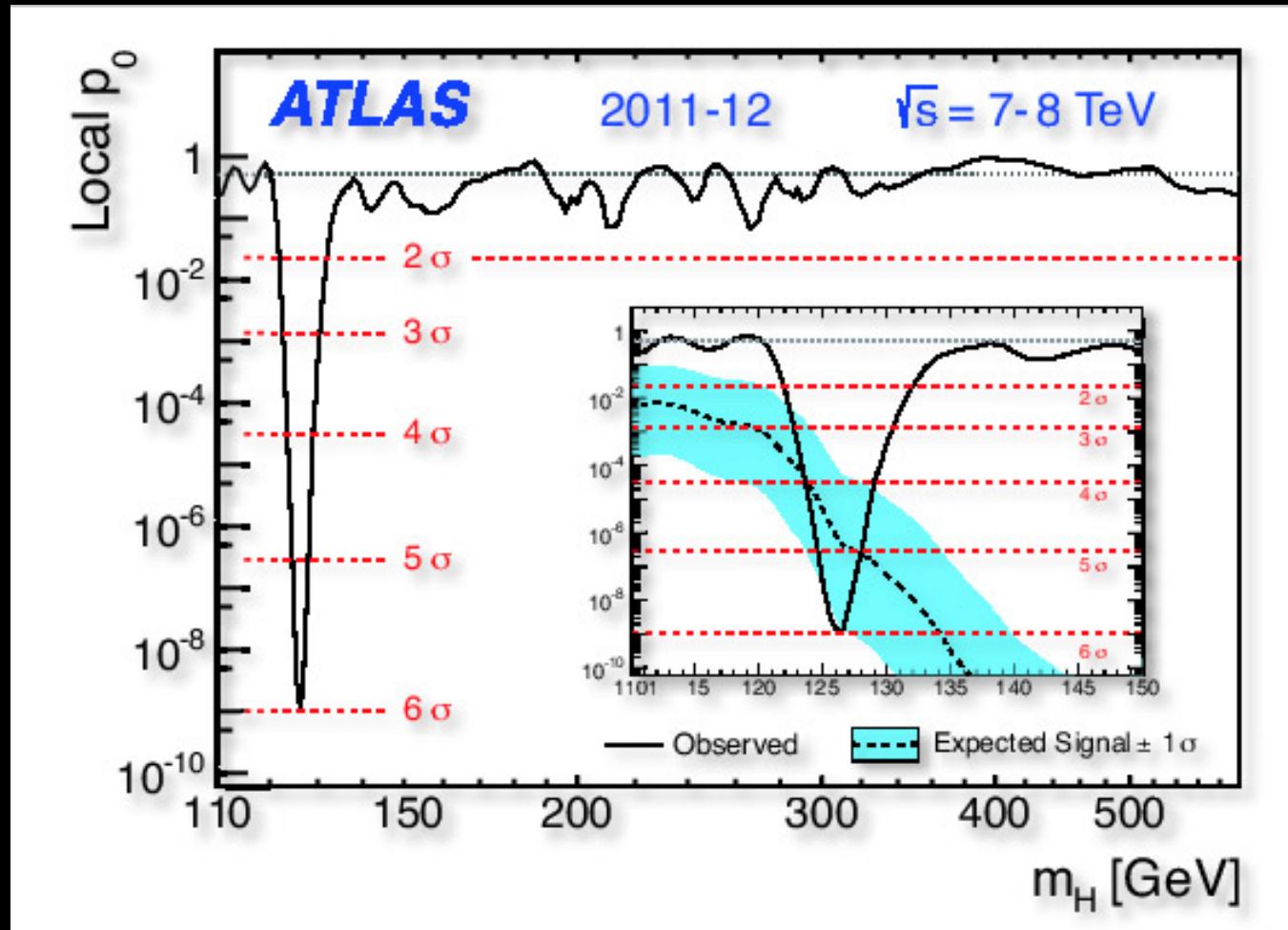
- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
- - - Photon

# Masse des Higgs-Bosons ( $\approx 125$ GeV )



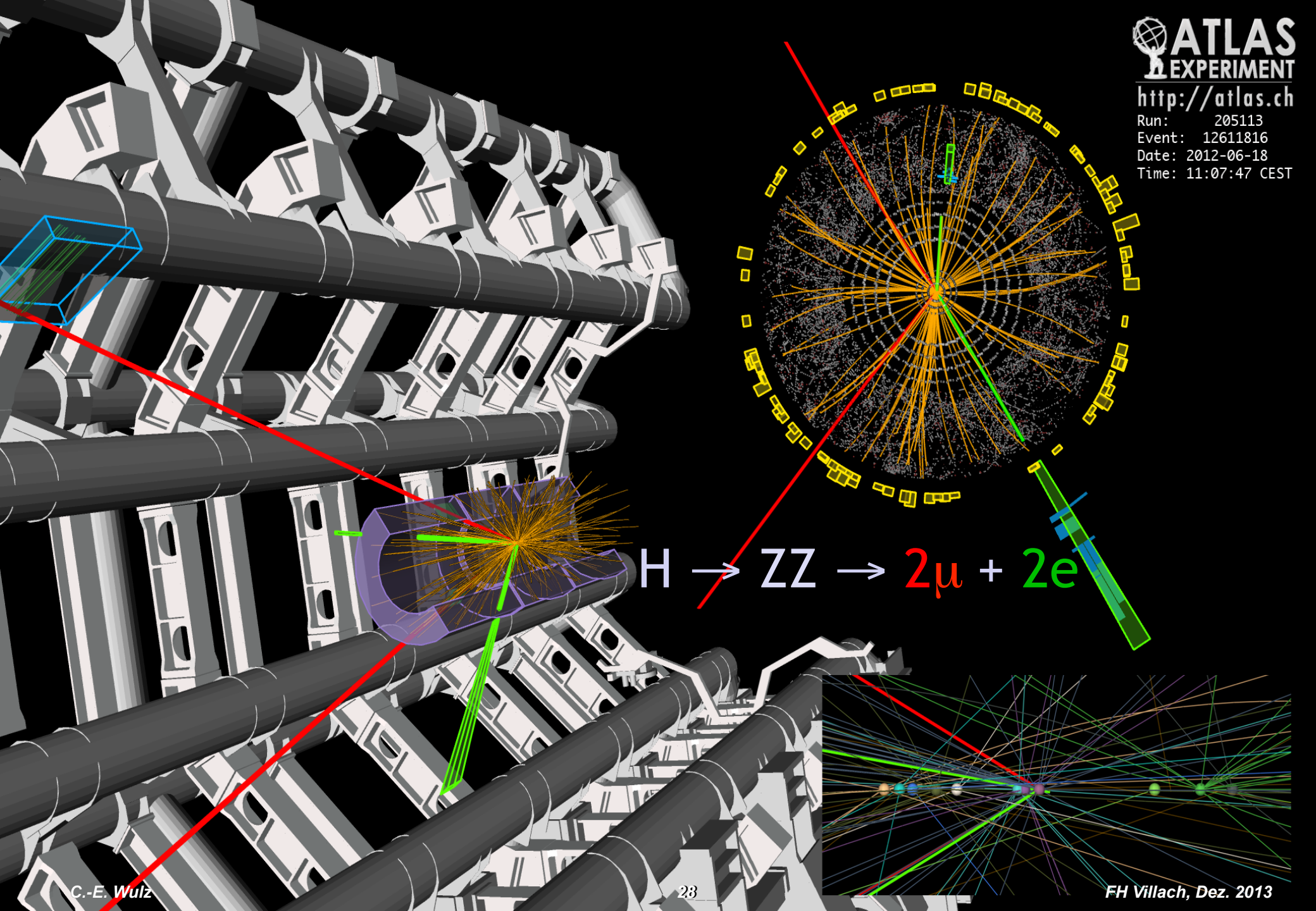


# Signifikanz der Resultate



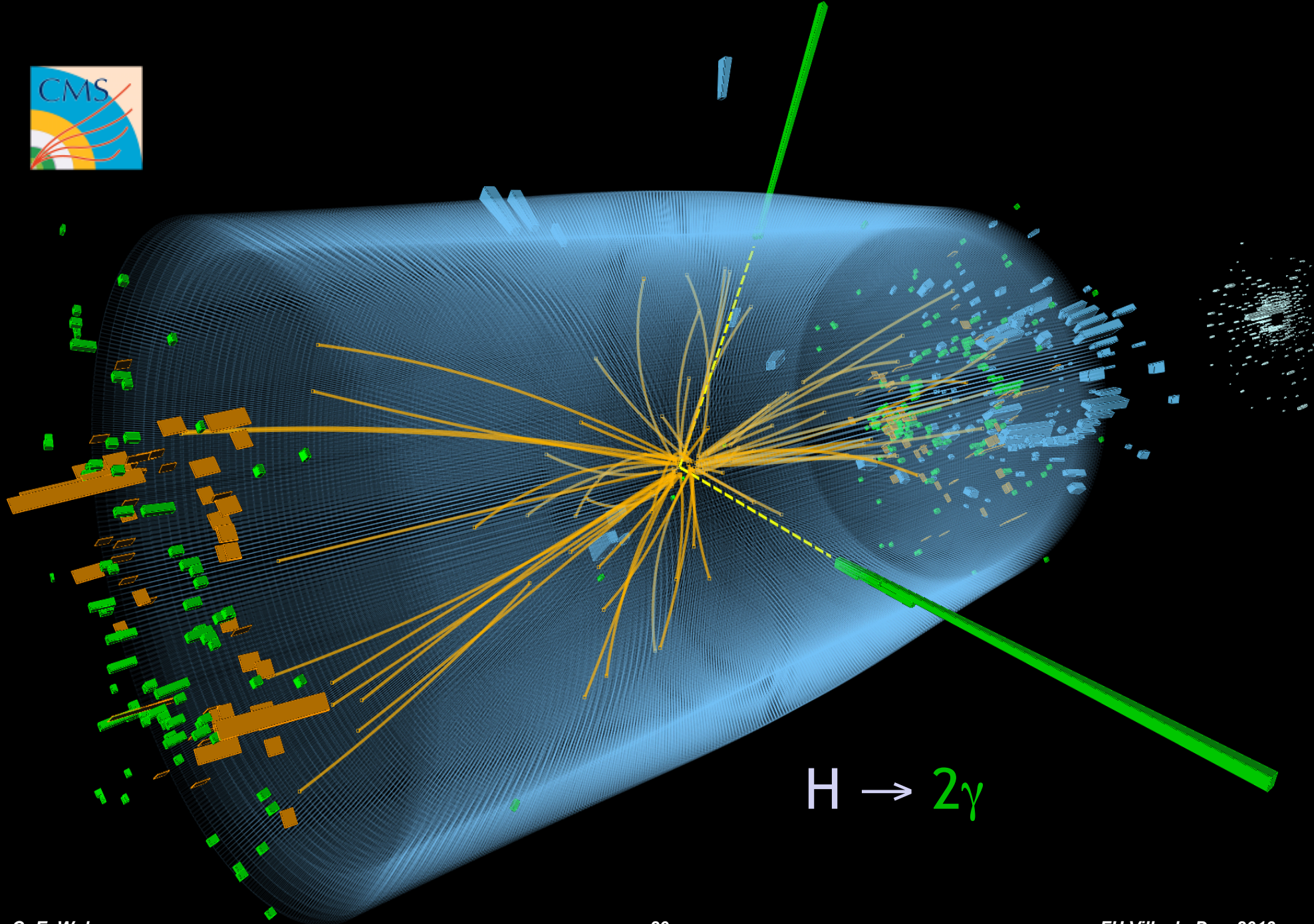
**p-Wert:**

Wahrscheinlichkeit, dass Untergrund wie Signal aussieht.  
5.9 Sigma ( $\sigma$ ) entspricht 1 : 600 Millionen.



$$H \rightarrow ZZ \rightarrow 2\mu + 2e$$





$$H \rightarrow 2\gamma$$



# Ungelöste (und ein gelöstes) Rätsel

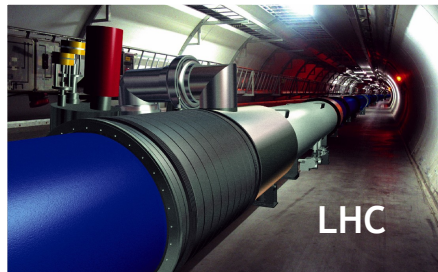
- ✓ ? Warum hat das Universum Substanz? -> Higgs-Teilchen
- Woraus besteht das Universum? -> Wir kennen nur 5% (Atome), Rest ist dunkle Materie und dunkle Energie.
- Wie muss das Standardmodell der Teilchenphysik erweitert werden? -> Supersymmetrie, Stringtheorie? Gibt es zusätzliche Raumdimensionen?
- Gibt es eine "Weltformel"?



# Anlagen zur Beantwortung dieser Fragen

## Teilchenbeschleuniger

z.B. LHC, RHIC, KEK-B



## Undergrundlaboratorien und -experimente

z.B. Gran Sasso, Kamiokande, IceCube

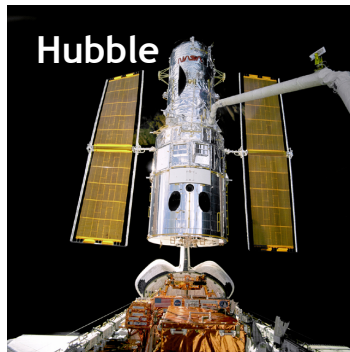
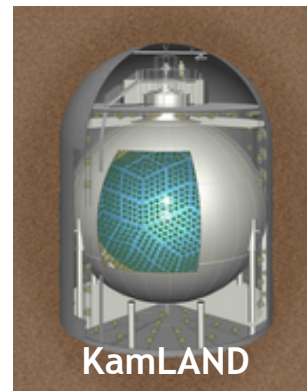
## Experimente mit kosmischen Strahlen

z.B. Auger



## Experimente an Kernreaktoren oder mit radioaktiven Quellen

z.B. KamLAND, Double-CHOOZ, Katrin, Atominstitut



## Raumsonden

z.B. FERMI, Hubble, Planck



## Terrestrische Teleskope

z.B. ALMA, VLT



# 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 mit den Gesetzen der Mechanik kompatibel sind.



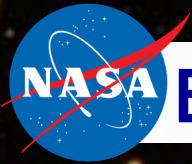
Fritz Zwicky

Auch müssten aufgrund der hohen **Temperatur** viele Sterne auseinander fallen, wenn nicht zusätzlich zur sichtbaren Masse noch Masse aus dunkler Materie vorhanden wäre.



Vera Rubin





## Erster direkter Nachweis der dunklen Materie

Die normale Materie (rot, emittiert Röntgenlicht) wurde abgebremst, während die dunkle Materie (blau, durch Gravitationslinseneffekt bestimmt) bei der Kollision der beiden Galaxienhaufen sich ungehindert weiterbewegen konnte.



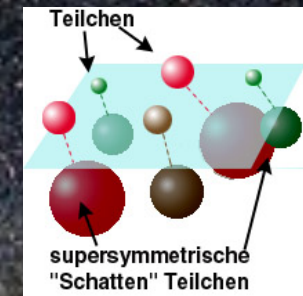
Kollision von zwei Galaxienhaufen im Bullet Cluster (2006)



# Was ist die dunkle Materie ?

WIMPS (weakly interacting massive particles,  
MACHOS (massive astrophysical compact halo  
objects), ... ?

Supersymmetrie sagt ein Teilchen voraus, das  
ein WIMP sein könnte: das leichteste **Neutralino**



MACHOS sind astronomische Objekte aus normaler  
(baryonischer) Materie wie:

**Braune und weiße Zwerge** (z.B. Supernovae Ia)  
**Neutronensterne** (Kollaps nach Supernova-Explosion)  
**Schwarze Löcher**

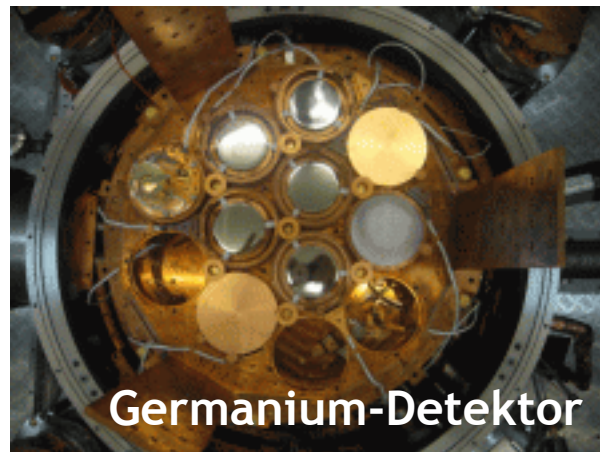
... **Verbindung von Astrophysik und Teilchenphysik!**



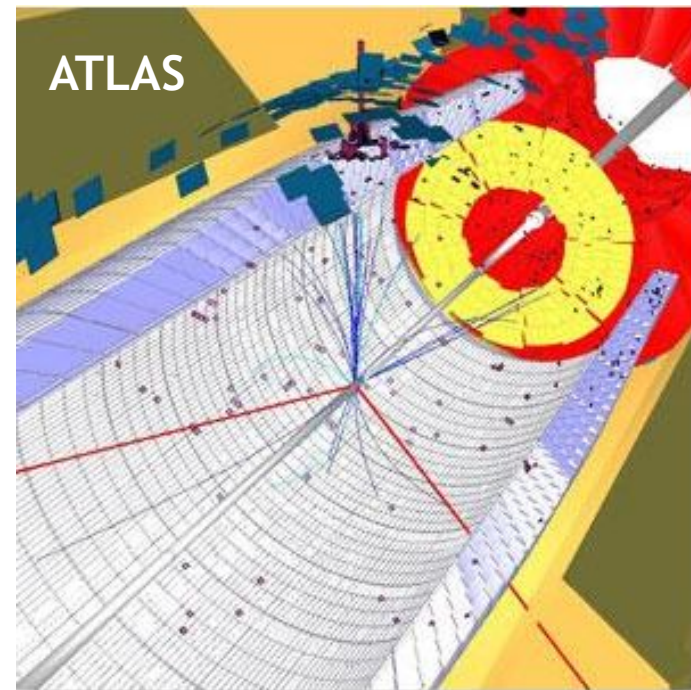
# Suche nach WIMPS

Suche nach Neutralinos (ATLAS, CMS am LHC)

Streuung von WIMPS an Atomkernen (Experimente Edelweiss, CDMS, DAMA, ...)



Germanium-Detektor



Neutrinos sind nach heutigem Wissen nicht Bestandteil der dunklen Materie, obwohl sie nicht masselos sind.

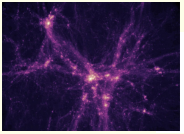




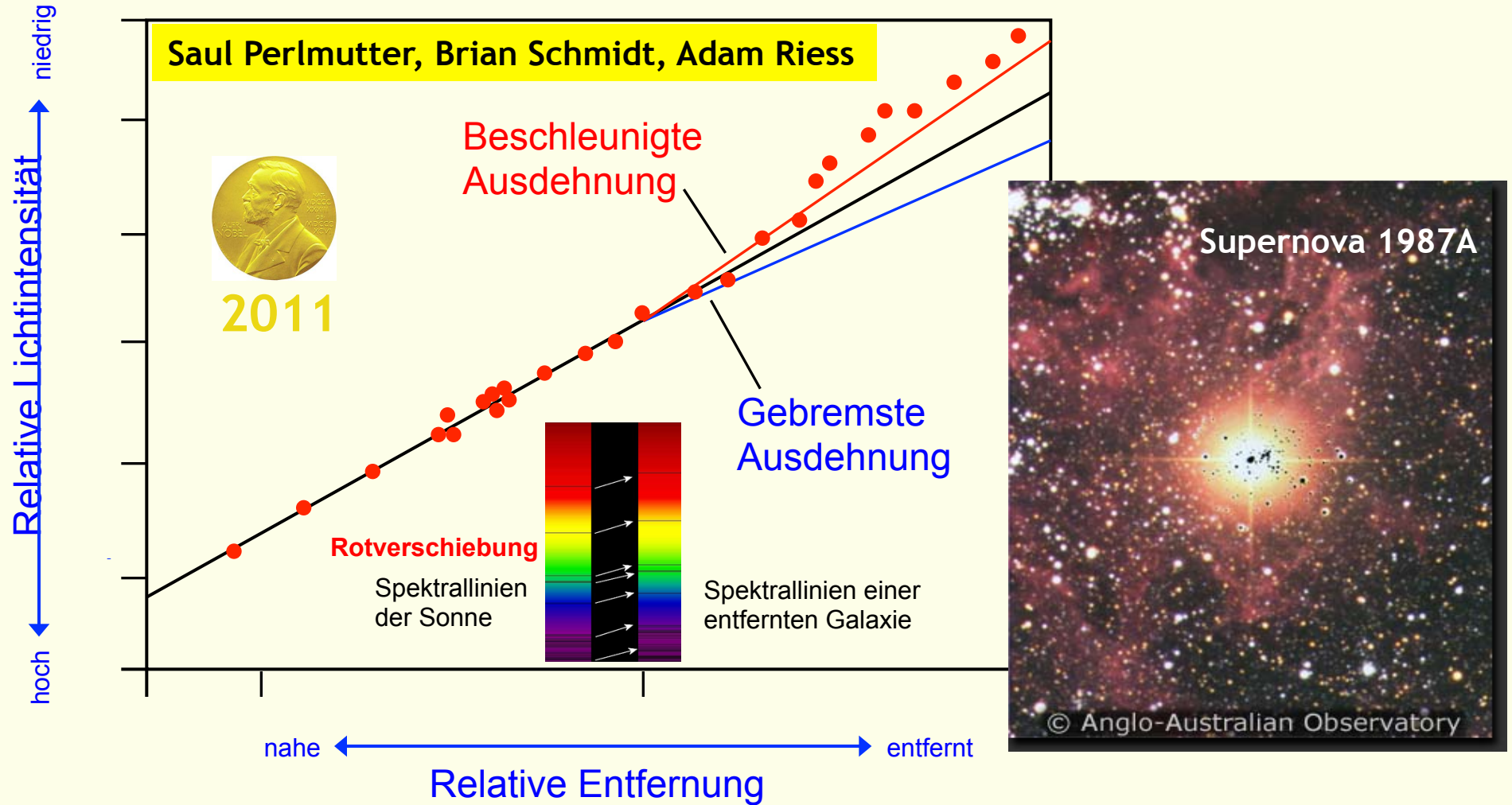
# AMS auf der ISS





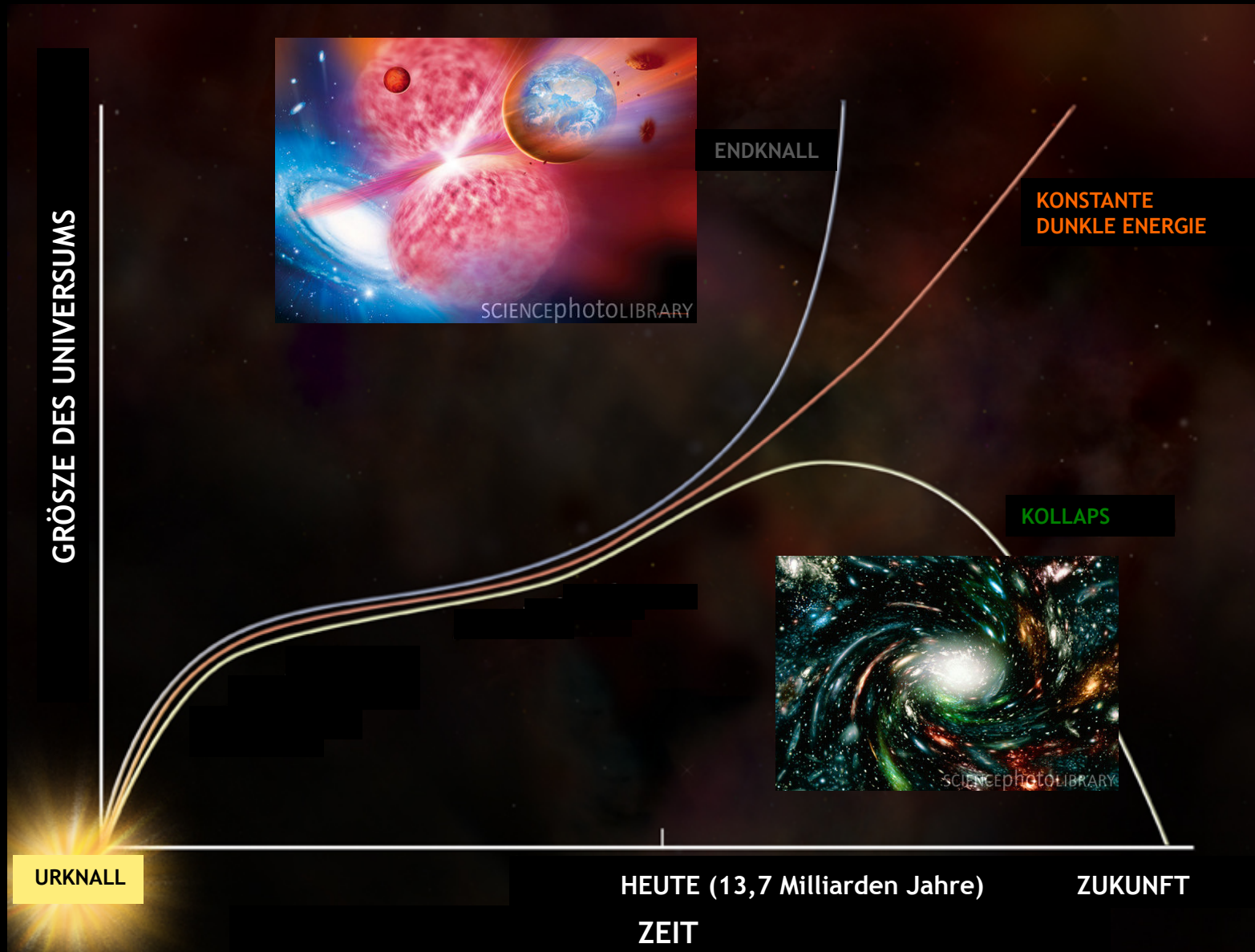


# Entdeckung der dunklen Energie (1998)



**Beobachtungen von Supernovae ergaben, dass eine mysteriöse Kraft - dunkle Energie - das Universum immer schneller auseinander treibt!**

# Entwicklung des Universums



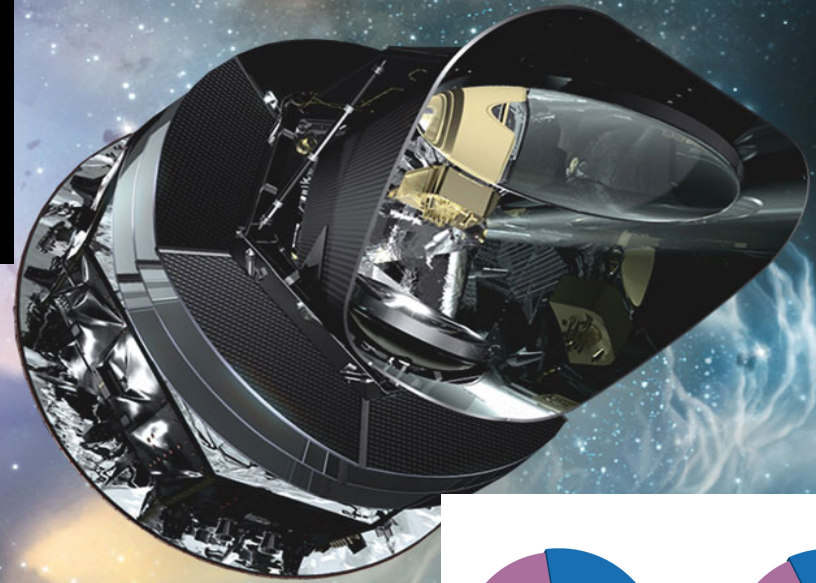
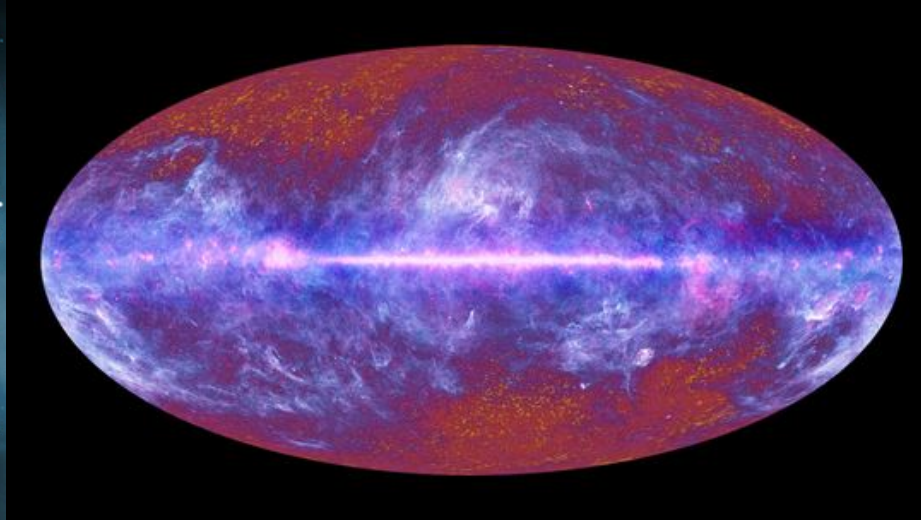


# DARK ENERGY SURVEY

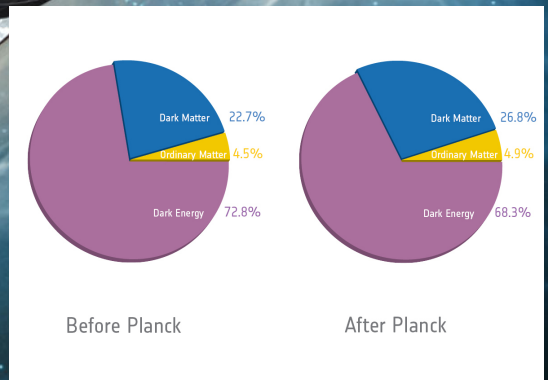
Cerro Tololo, Chile



# Planck-Satellit



14. Mai 2009 -  
23. Okt. 2013

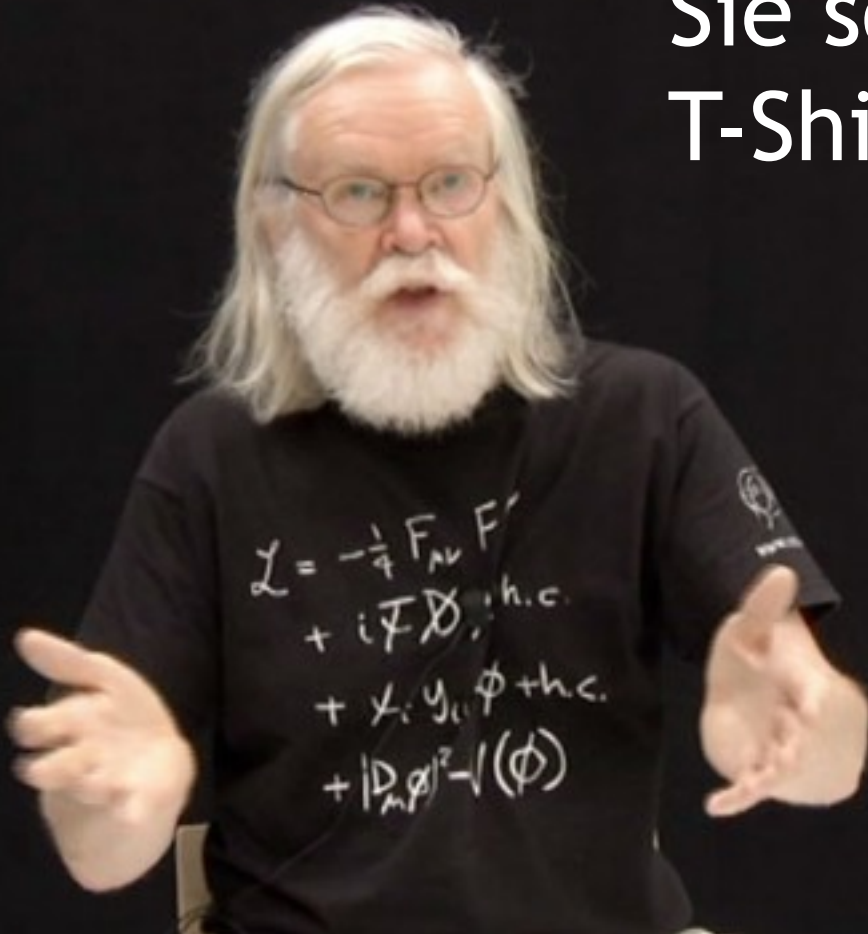




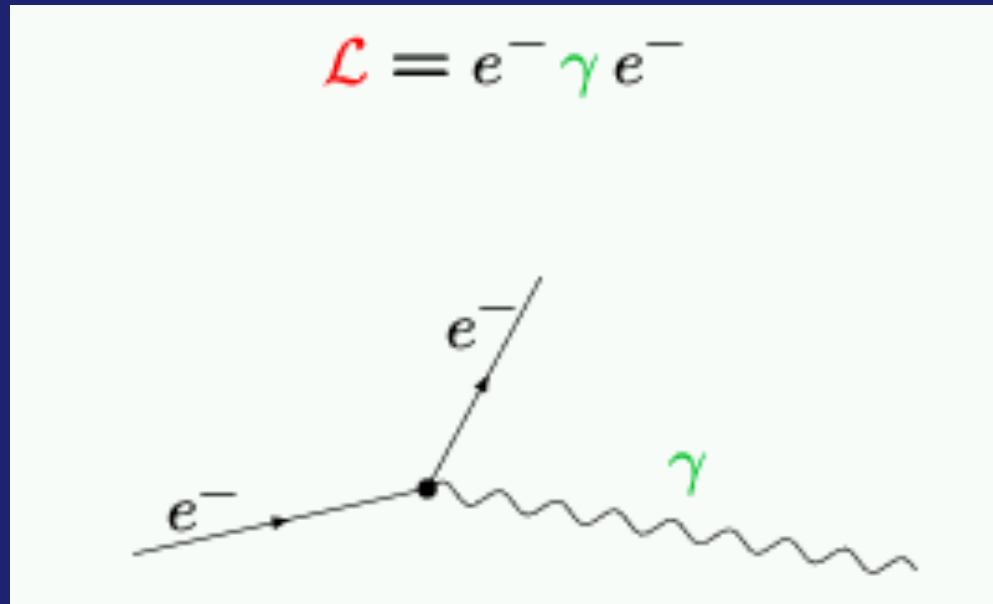
# Was ist die Weltformel ?

Sie sollte (fast) auf ein T-Shirt passen ...

Die Weltformel ( $\mathcal{L}$ ) beschreibt die Bestandteile aller Materie sowie die Wechselwirkungen dieser Bestandteile miteinander.



# Ein Teil der Weltformel



Die Formel beschreibt ein Elektron, das ein Photon emittiert. Es bleibt aber ein Elektron. Dieser Prozess tritt zum Beispiel bei einer leuchtenden Glühbirne auf.



# Ein Teil der Weltformel

$$\mathcal{L} = e^- \gamma e^- + u W d + W H W + \dots$$

Der 2. Term beschreibt ein u-Quark, das ein W emittiert und zu einem d-Quark wird. Dies geschieht zum Beispiel bei radioaktiven Zerfällen.

Der 3. Term beschreibt die Wechselwirkung eines Higgs-Bosons mit dem W-Teilchen. Man kann so z.B. berechnen, wie oft ein Higgs-Teilchen in W's zerfällt.

..... weitere Terme (nicht alle bekannt)

An iceberg floating in a dark blue ocean under a blue sky with light clouds. The iceberg is divided into three horizontal sections. The top section is a small, white, jagged peak above the water line. The middle section is a larger, translucent blue mass just below the water line. The bottom section is the largest, a massive, dark blue mass extending deep into the water. The text labels each section with its name and percentage.

**Bekannte Materie  
(5%)**

**Dunkle Materie  
(27%)**

**Dunkle Energie  
(68%)**



# Zusammenfassung

- Das Standardmodell ist komplett.
- 95% des Universums harren noch einer Erklärung.
- Teilchenphysik- und Astrophysikexperimente müssen zusammenarbeiten, um die Erklärung herbeizuführen.
- Fundamentale Entdeckungen stehen vielleicht bevor.

Danke für Ihre Aufmerksamkeit!