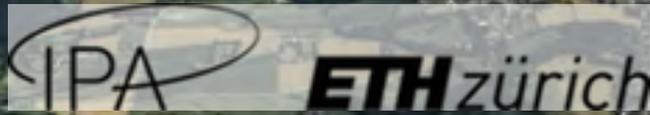


# Was ist Materie und woher kommt sie ? Quarks, Higgs Teilchenbeschleuniger und Co.



ST. GALLISCHE  
NATURWISSENSCHAFTLICHE  
GESELLSCHAFT

Rainer Wallny  
Institut für Teilchen- und Astrophysik

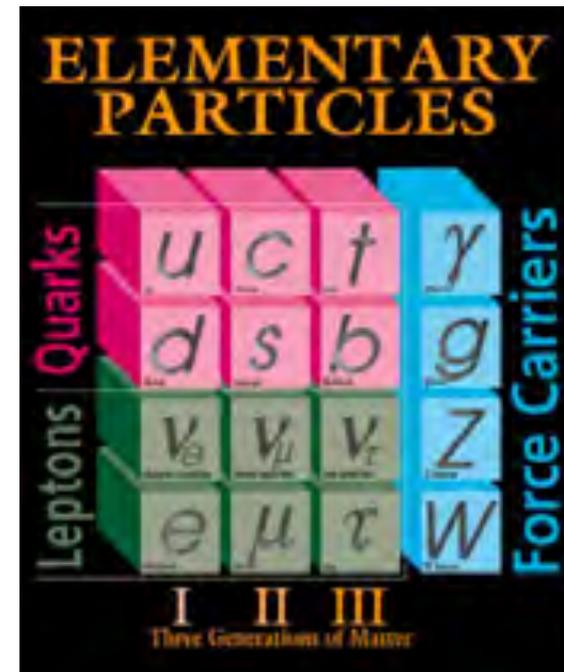
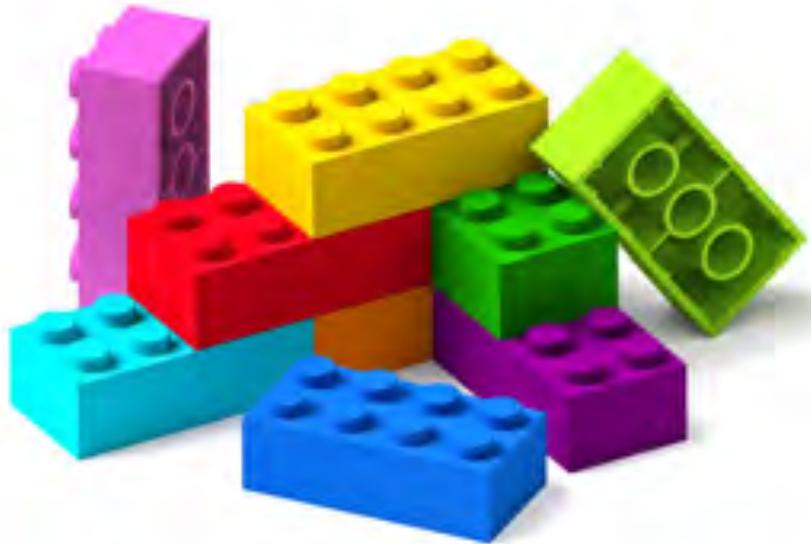


23. April 2025



Aus was für Bausteinen besteht  
die Welt ?  
Was hält diese zusammen ?  
Woher kommen wir ?

# Elementarteilchen-Physik

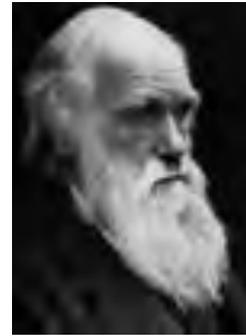


“Elementarteilchenphysik ist der moderne Name für das Jahrhunderte alte Unterfangen, die fundamentalen Gesetze der Natur zu verstehen”.

*(Edward Witten)*

# Wissenschaftliche Entdeckung (1)

Ob in der Ferne...



... oder auch direkt  
vor unserer Nase:

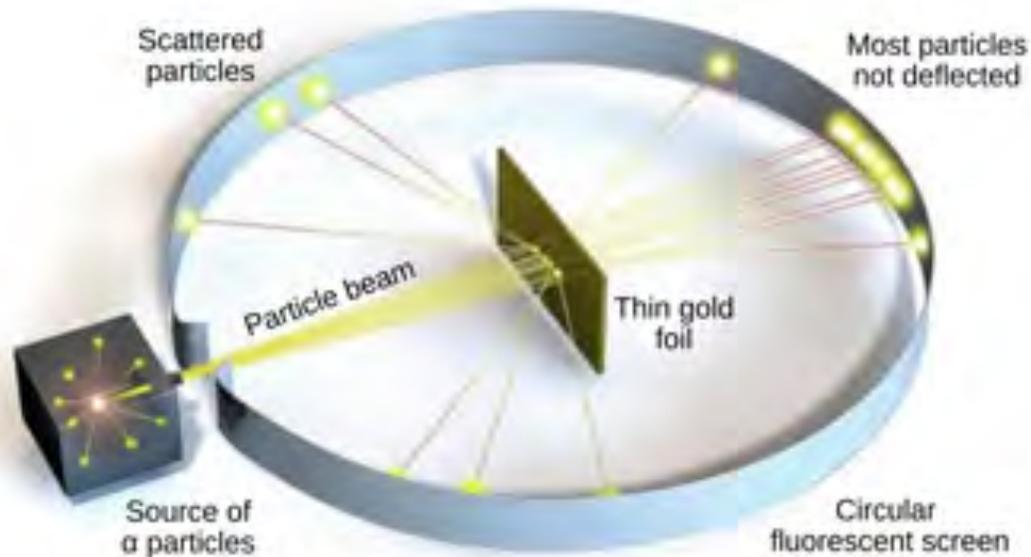


Neue Territorien ⇔ Entdeckungen

- die spektakuläre Entdeckung (*NZZ, Tagesanzeiger*) bleibt eine Ausnahme
- der Alltag der Forscher erfordert oft akribische Fleissarbeit und Ausdauer
- Neue Instrumente ermöglichen Durchbrüche!

# Grossvater der Teilchenphysik

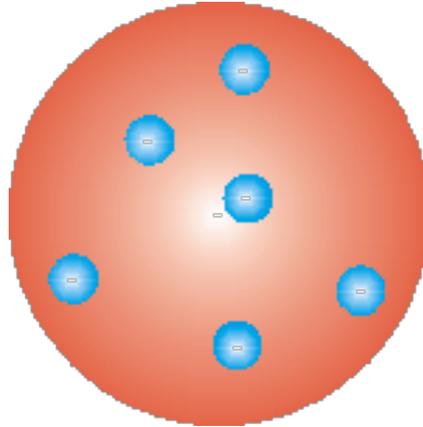
- Die Entdeckung des Atomkerns durch Rutherford
  - Benutzung energetischer  $\alpha$ -Strahlen, um das Innere des Atoms zu “durchleuchten”



*“Es ist so ziemlich das unglaublichste Ereignis, das mir je in meinem Leben passierte. Es war fast so unglaublich, als ob Sie eine 38cm-Granate gegen ein Stück Seidenpapier abfeuern, und sie kommt zurück und trifft Sie!”*

# Aufbau der Atome (Modell 1905)

---

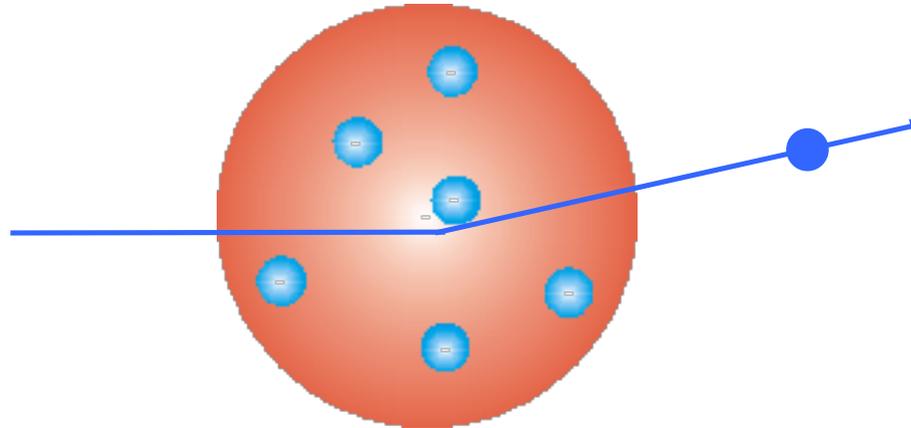


# Rutherford Experiment (1909)

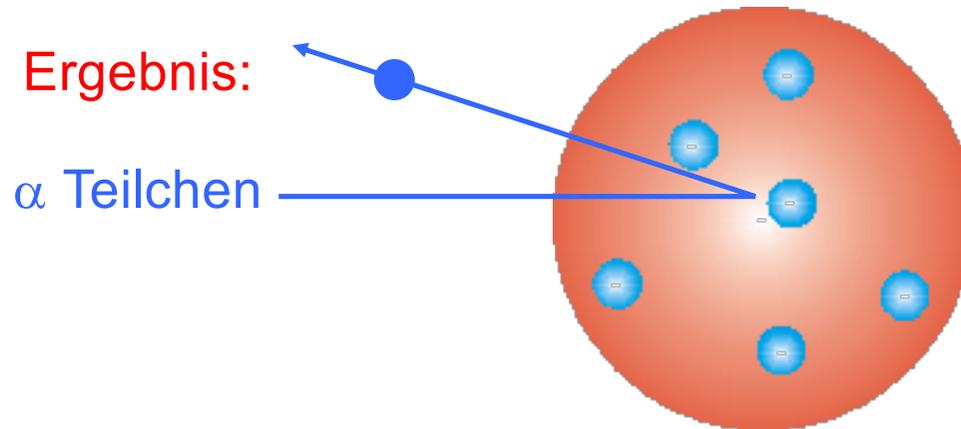


Erwartung:

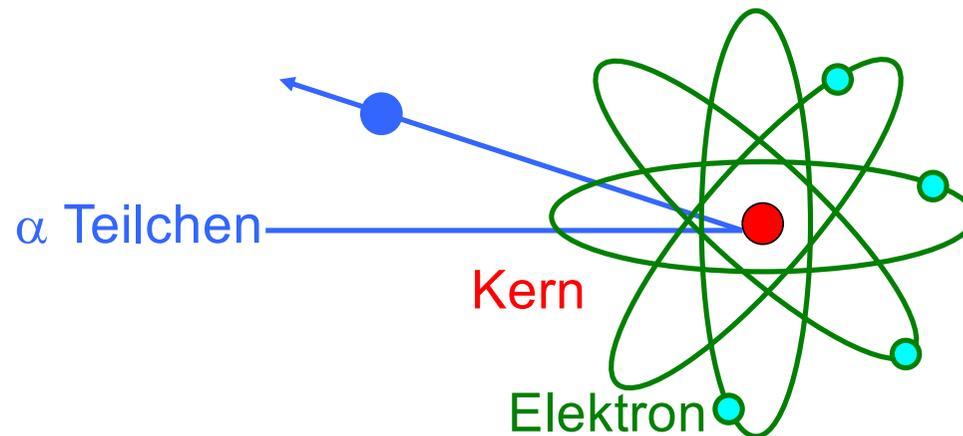
$\alpha$  Teilchen



# Rutherford Experiment (1909)



Führte zu einem neuen Modell des Atoms (1911):



G

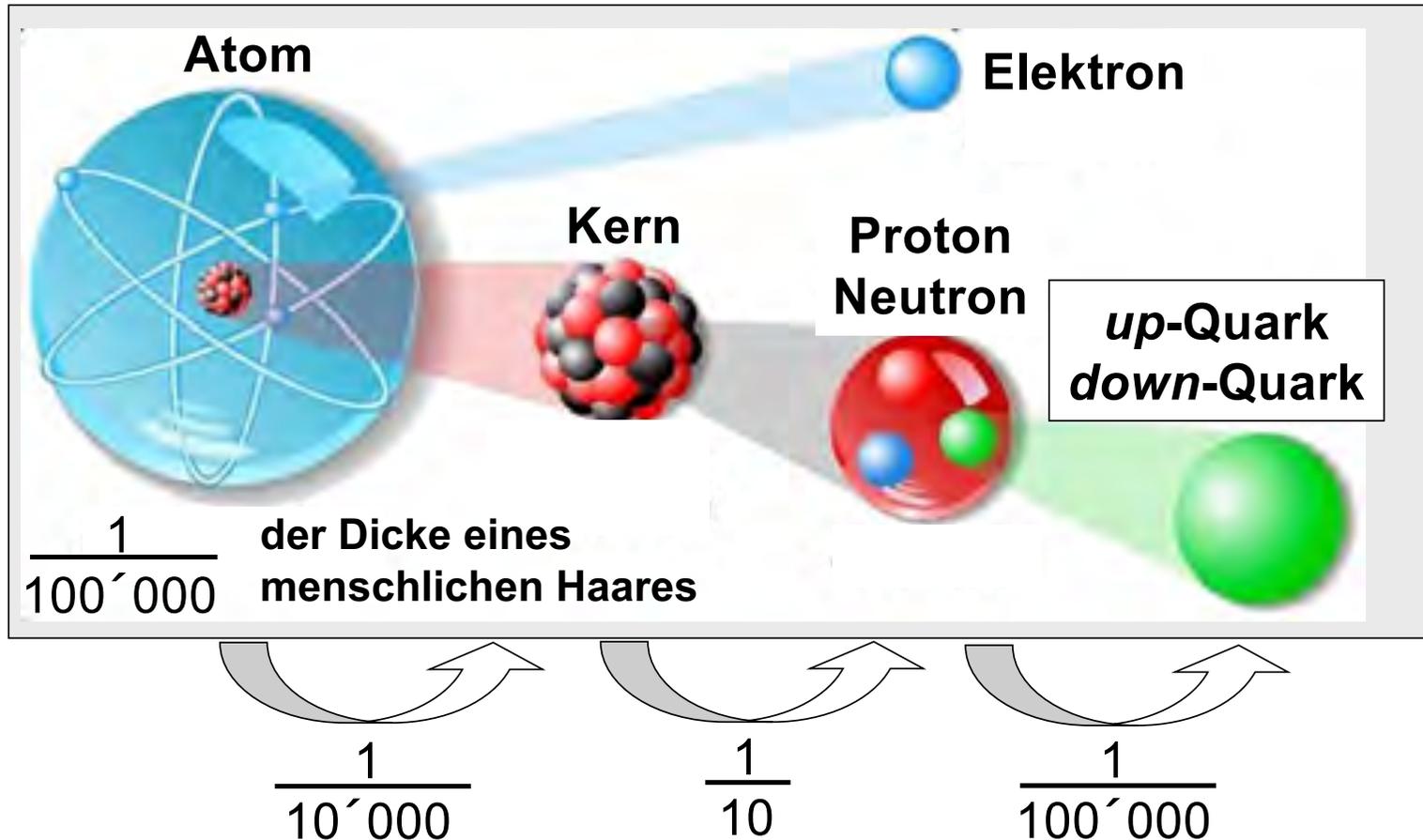
$$\frac{\text{Kern}}{\text{Atom}} = \frac{\text{Fliege}}{\text{Kathedrale}}$$

*“like a fly in a cathedral”*

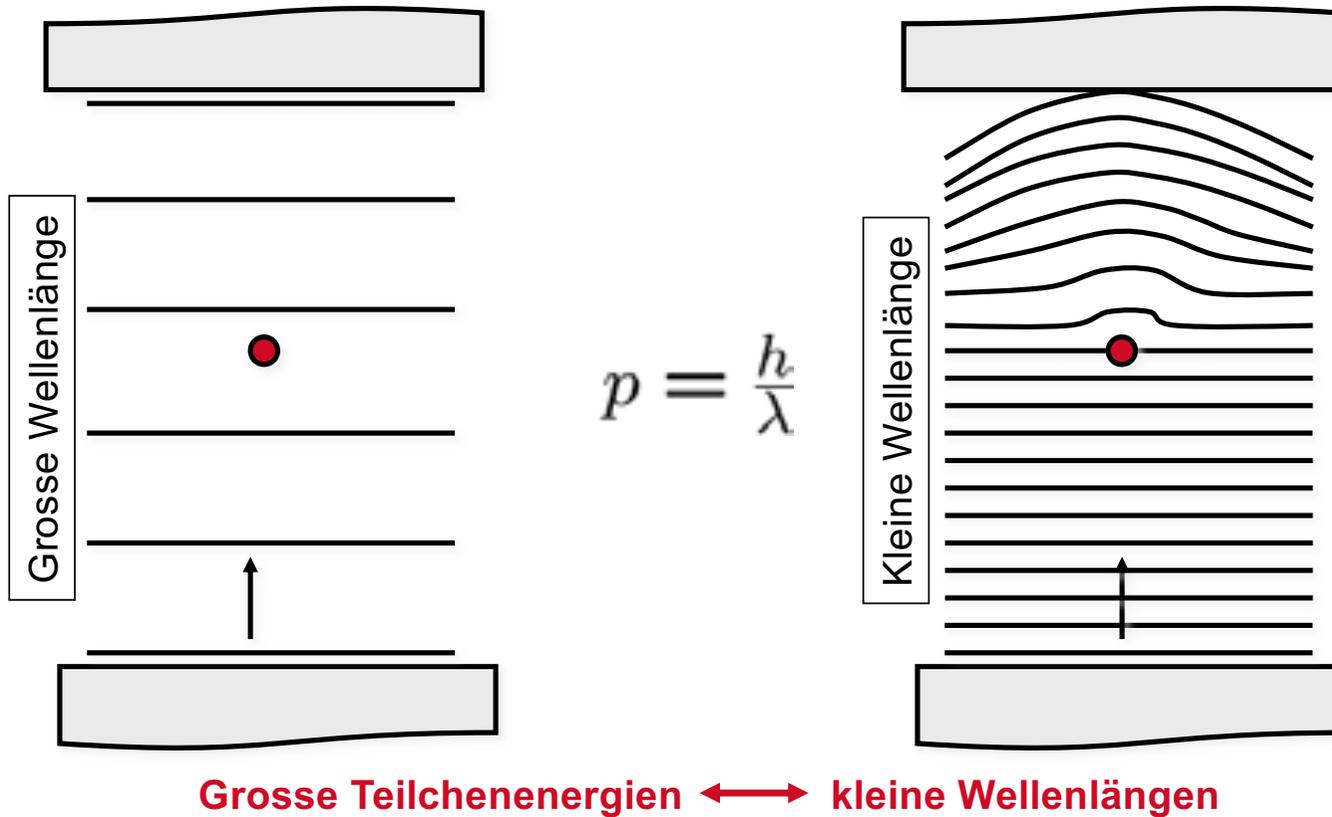
# Reise ins Innere der Materie

Present

Vor ~100 Jahren Vor ~60 Jahren ~Vor ~40 Jahren

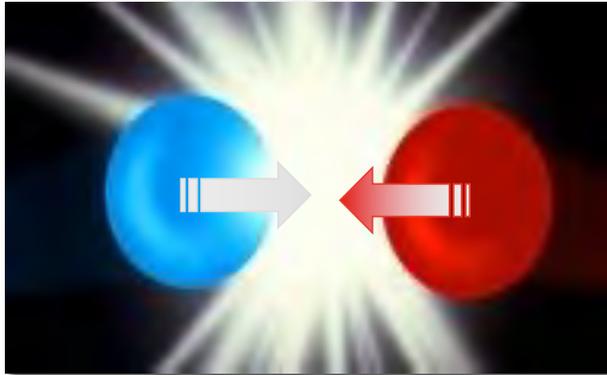


# Teilchenmikroskop



Teilchenbeschleuniger = **Mikroskop!**

# Teilchenerzeuger



$$E = mc^2$$

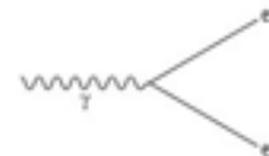
Masse wird in Energie umgewandelt

**Teilchenbeschleuniger:** hochenergetische Teilchenstrahlen treffen aufeinander

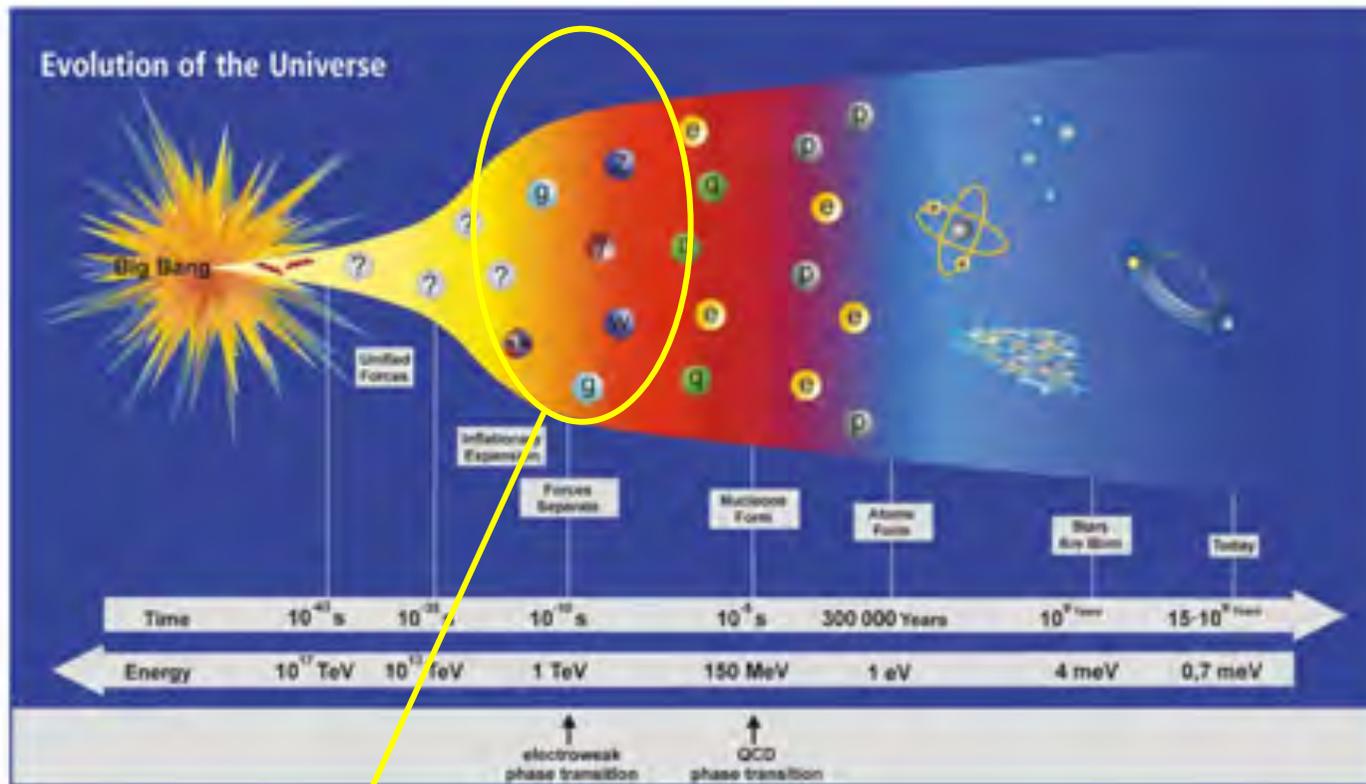
→ Teilchen-Antiteilchen Paare entstehen

Energie-Masse-Einheiten: **Elektronenvolt (eV)**

- Sichtbares Licht: 2 eV
- Masse des Protons: 1 GeV (Giga-eV =  $10^9$  eV)
- Schwerstes bekanntes Elementarteilchen (*top*-Quark): 175 GeV



# Teilchen-Zeitmaschine

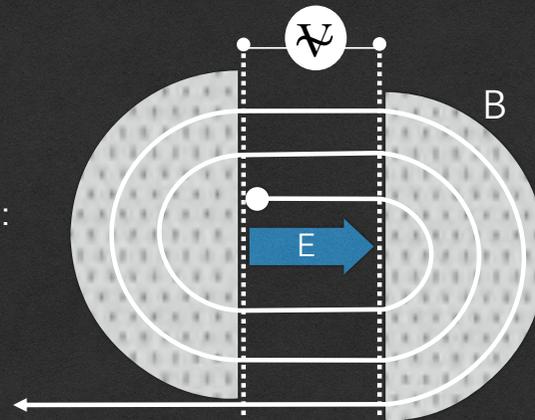


- Teilchenbeschleuniger erzeugen Energiedichten wie  $10^{-10}$ s nach dem Urknall

# Teilchenbeschleuniger - damals und heute

## Prinzip - Zyklotron

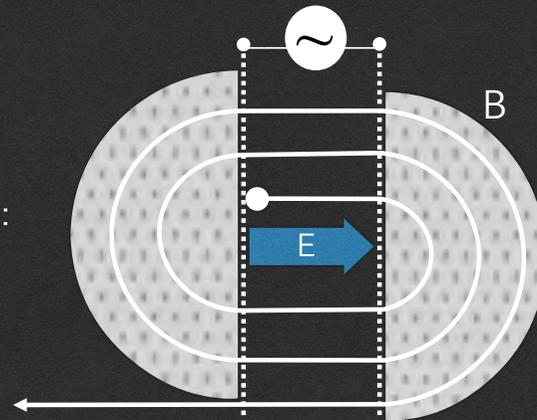
Wiederverwendung des gleichen elektrischen Feldes: Teilchen in dieselbe Beschleunigungslücke zurückgebogen



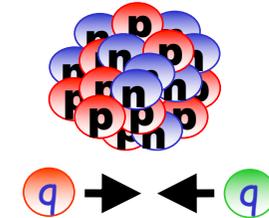
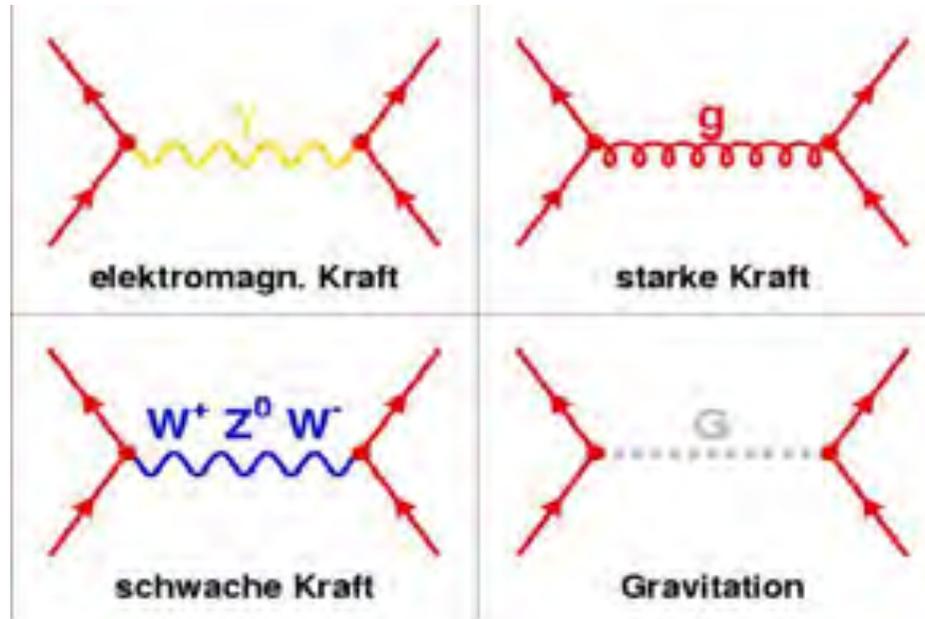
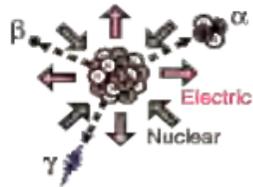
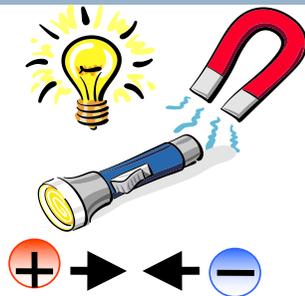
# Teilchenbeschleuniger - damals und heute

## Prinzip - Zyklotron

Wiederverwendung des gleichen elektrischen Feldes: Teilchen in dieselbe Beschleunigungslücke zurückgebogen



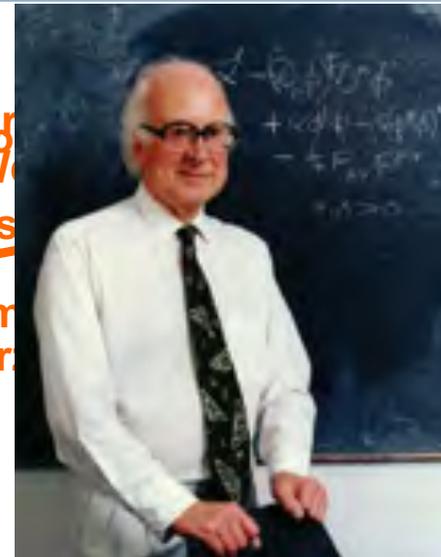
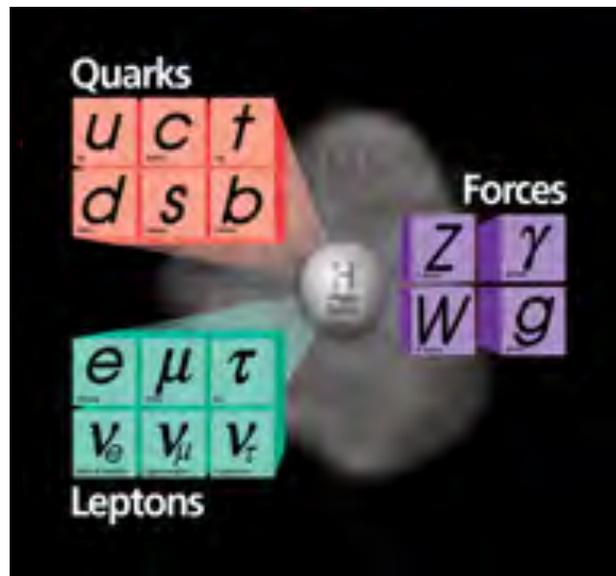
# Die fundamentalen Wechselwirkungen



*Die Gravitationswechselwirkung verstehen wir noch nicht in dieser Sprache*

Die Wechselwirkung wird vermittelt durch ein "Kraftteilchen" (Eichboson)

# Standard-Modell (SM) der Teilchenphysik (\*1968)

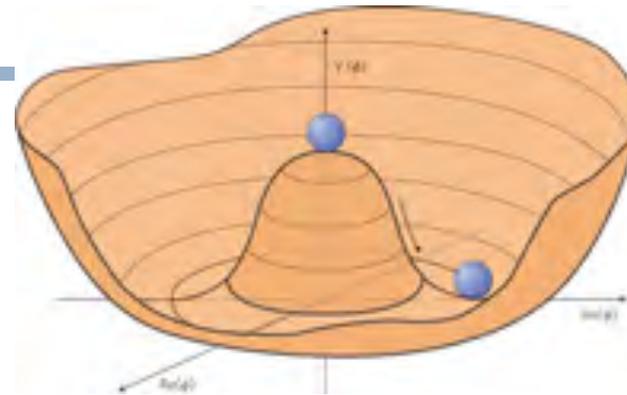


”K  
No  
W  
ms  
(im  
er

P. Higgs (+ Kibble, Brout, Englert) 1960er

- Umfasst alle bekannten Elementarteilchen (und Antiteilchen)
- Beschreibt drei der vier bekannten Wechselwirkungen
  - Elektromagnetische Kraft ( $\gamma$ ), schwache ( $W, Z$ ) und starke ( $g$ ) Kernkraft
  - Keine Quantentheorie der Gravitation
- Extrem erfolgreich .... Aber: Wie erhalten Teilchen ihre Masse ?

# Higgs-Mechanismus



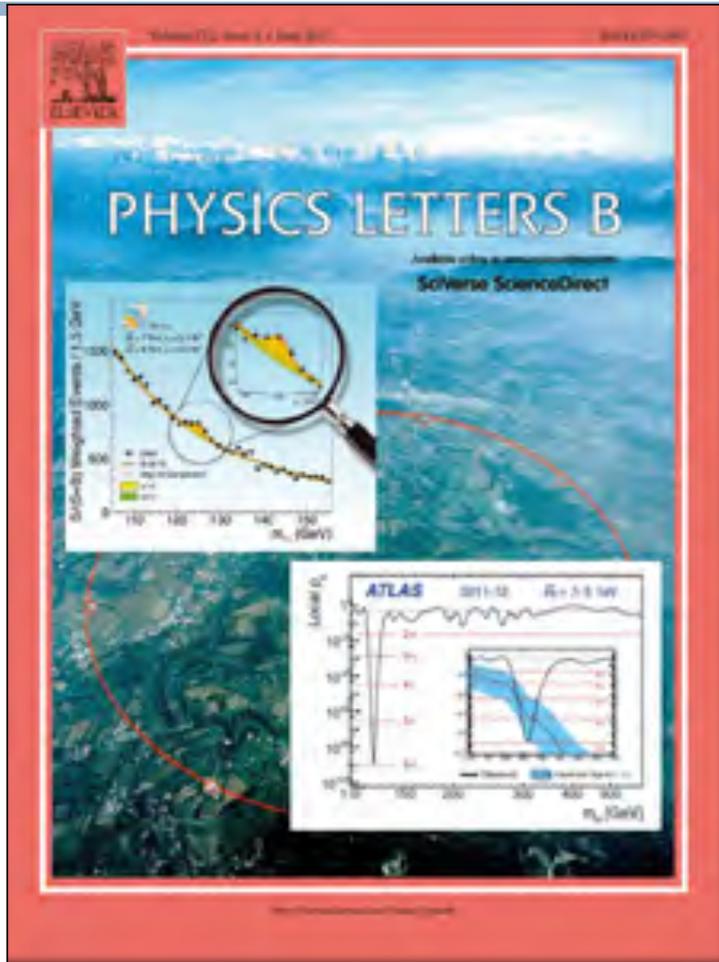
“Elektroschwache Symmetriebrechung”



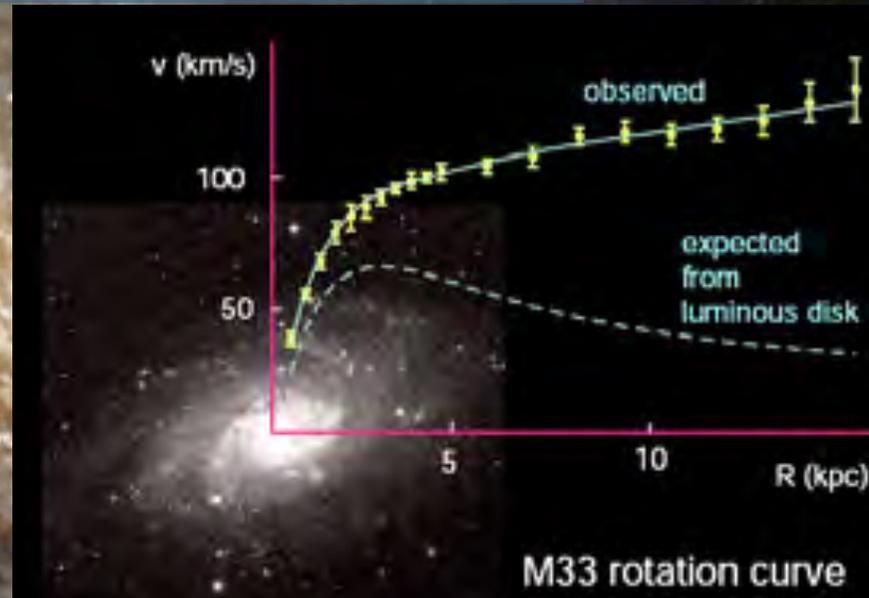
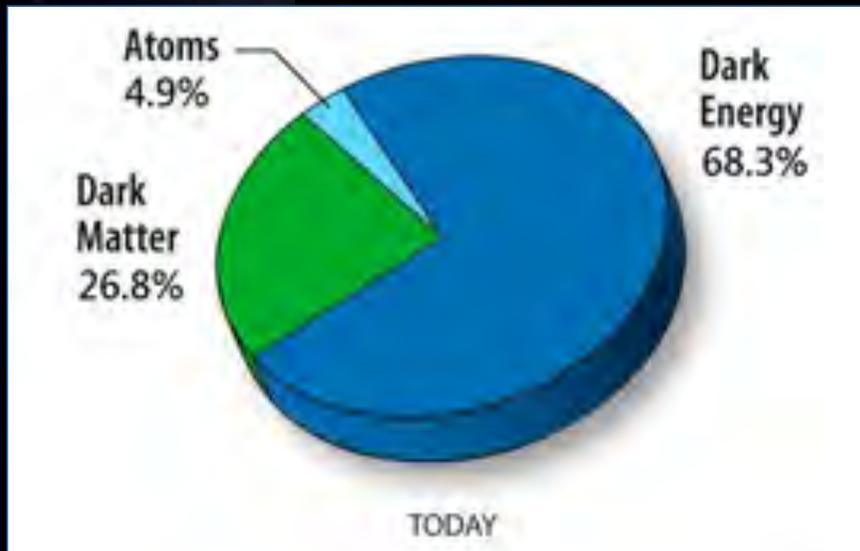
# Weihnachten 2011



# 2012: Ein Wunsch geht in Erfüllung



# Dunkle Materie

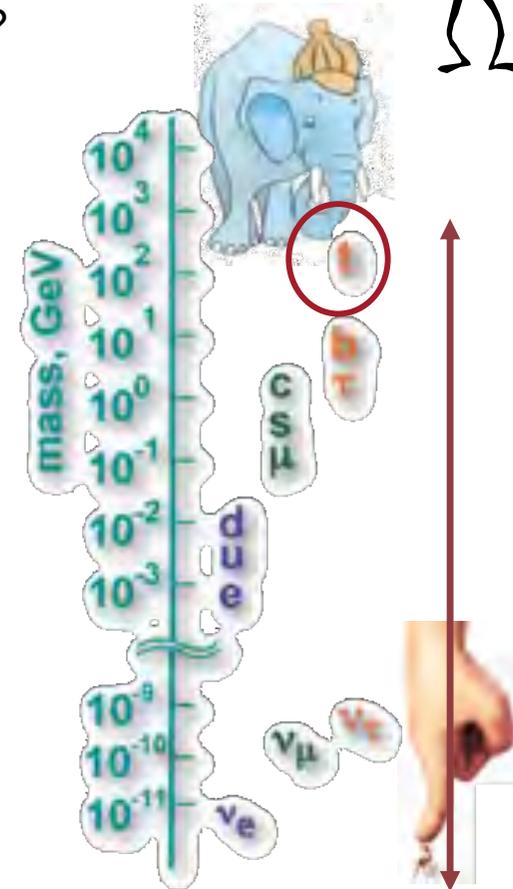


Standard-Modell beschreibt nur  $\sim 5\%$  der Masse-Energiedichte des Universums:

Was ist das Dunkle-Materie-Teilchen ?

# Offene Fragen

- + Ursprung der **Teilchenmassen** ? Neutrino-Massen ?
  - + Warum **drei Familien** ?
  - + **Vereinheitlichung** aller Wechselwirkungen ?
  - + Warum sind die Wechselwirkungen so unterschiedlich stark ? (**Hierarchie-Problem**)
  - + Was ist die **Dunkle Materie** ?
  - + Gibt es **Supersymmetrische** Teilchen ?
  - + **Materie-Antimaterie** Asymmetrie ?
  - + Weitere **Sub-Struktur** der fundamentalen Teilchen ?
  - + Gibt es **weitere Raumdimensionen** ?
- (...)



# ...Terra Incognita ....



---

# CERN UND LHC

From 1954....



Mid 1950's the first accelerator  
(the synchrocyclotron) arrives . . .

# CERN – Europäische Organisation für Kernforschung

(Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire)



Gegründet 1954:

- 12 Europäische Gründerstaaten
- heute 24 Mitgliedstaaten

~ 2700 Angestellte  
~ 10000 weitere Mitarbeiter  
> 12000 User  
Budget (2019) ~1200 MCHF

*“Where the web was born”*



**24 Mitgliedstaaten:** Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Italien, Israel, Niederlande, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Serbien, Slowakische Republik, Spanien, Schweden, Schweiz, Tschechische Republik, Ungarn und Vereinigtes Königreich

**2 Beitrittskandidaten:** Slowenien, Zypern

**8 Assoziierte Mitgliedstaaten:** Brasilien, Kroatien, Indien, Lettland, Litauen, Pakistan, Türkei, Ukraine

**6 Beobachter im Council:** Japan, Vereinigte Staaten von Amerika, Europäische Kommission, JINR(\*) und UNESCO

(ICA mit der Russischen Förderung ausgelaufen Ende 2024)



# Die Mission des CERN

- **Verschiebung** der Grenzen unseres Wissens

z.B. ...welche Teilchen und Kräfte gab es in den ersten Augenblicken des Universums?



- **Entwicklung** neuer Technologien für Beschleuniger und Detektoren

Informationstechnologie - Web und GRID  
Medizin - Diagnose and Therapie



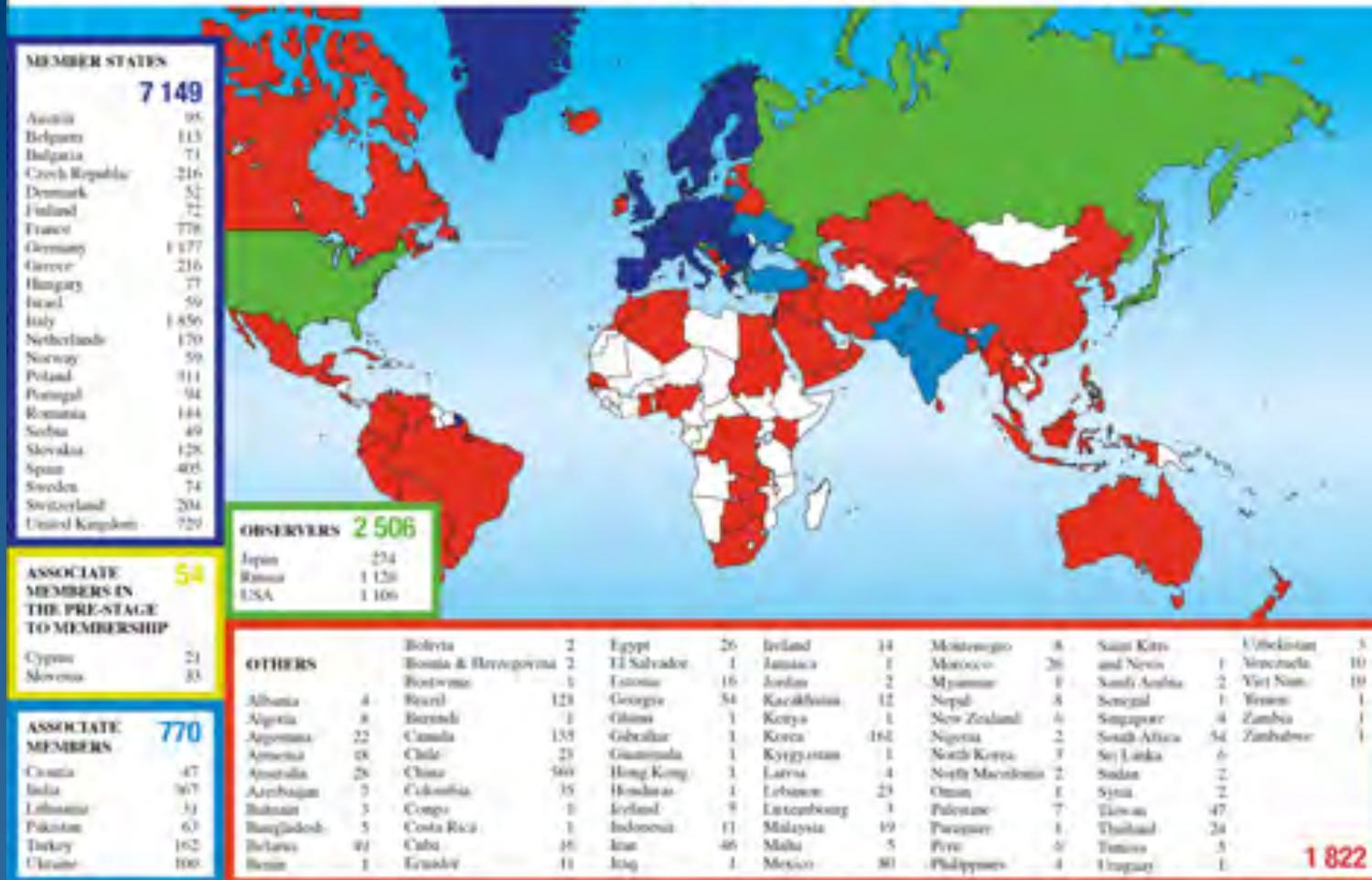
- **Ausbildung** des Ingenieur- und Wissenschaftspersonals von morgen



- **Zusammenbringen** von Menschen aus verschiedenen Ländern und Kulturen (Science for Peace)



## Distribution of All CERN Users by Nationality on 27 January 2020



Quarks, Higgs Teilchenbeschleuniger und Co

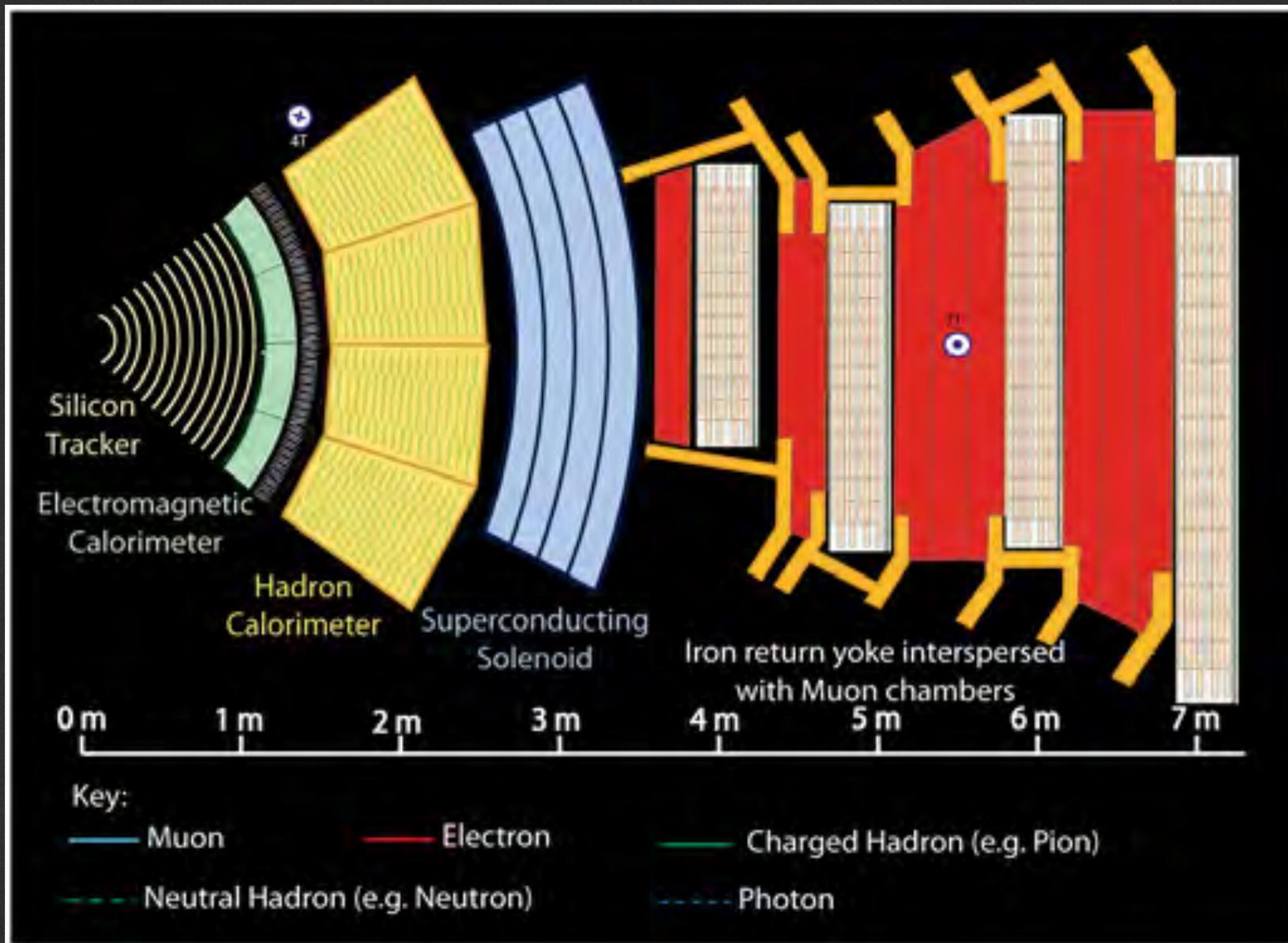
# Der Large Hadron Collider

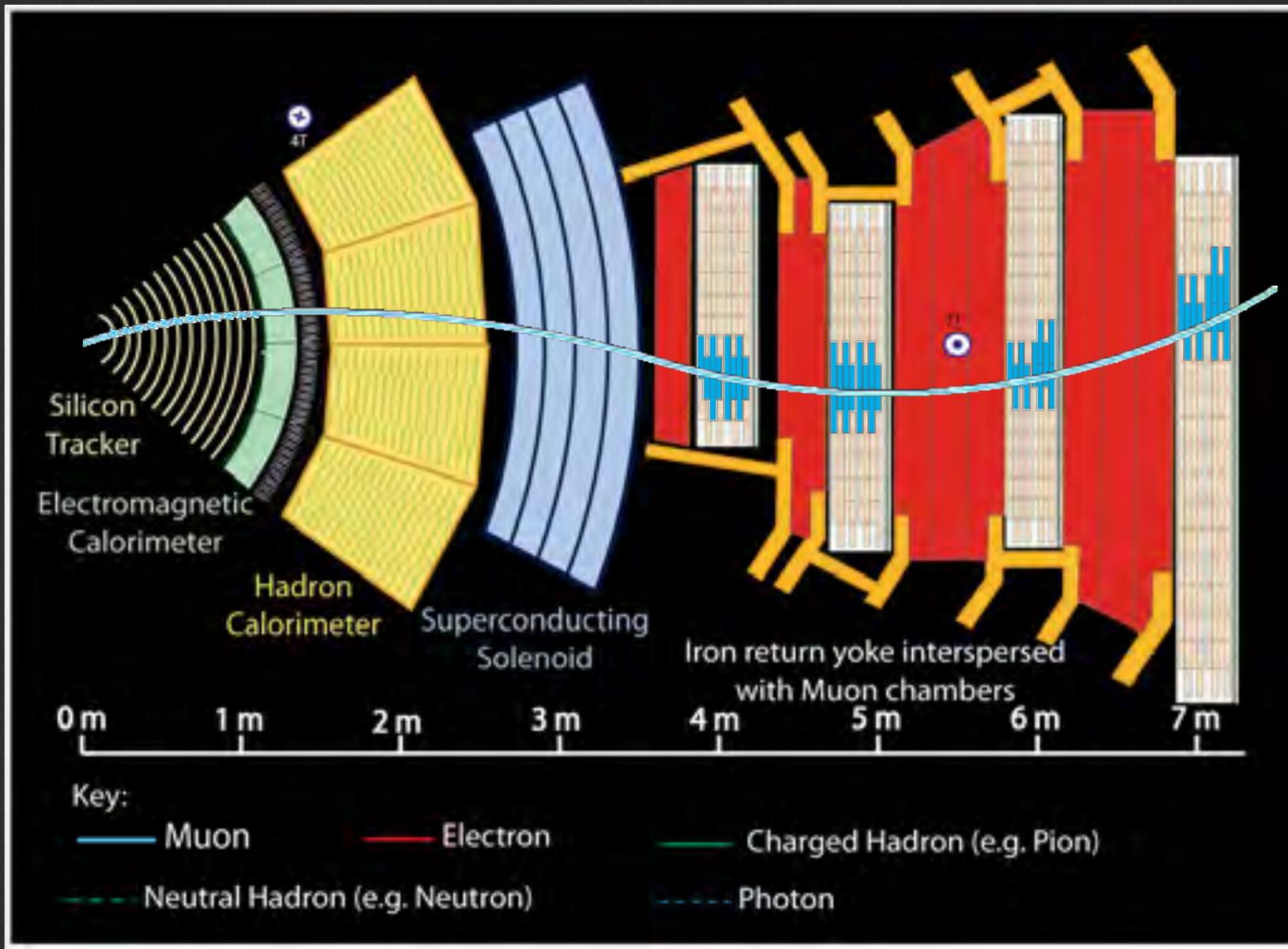


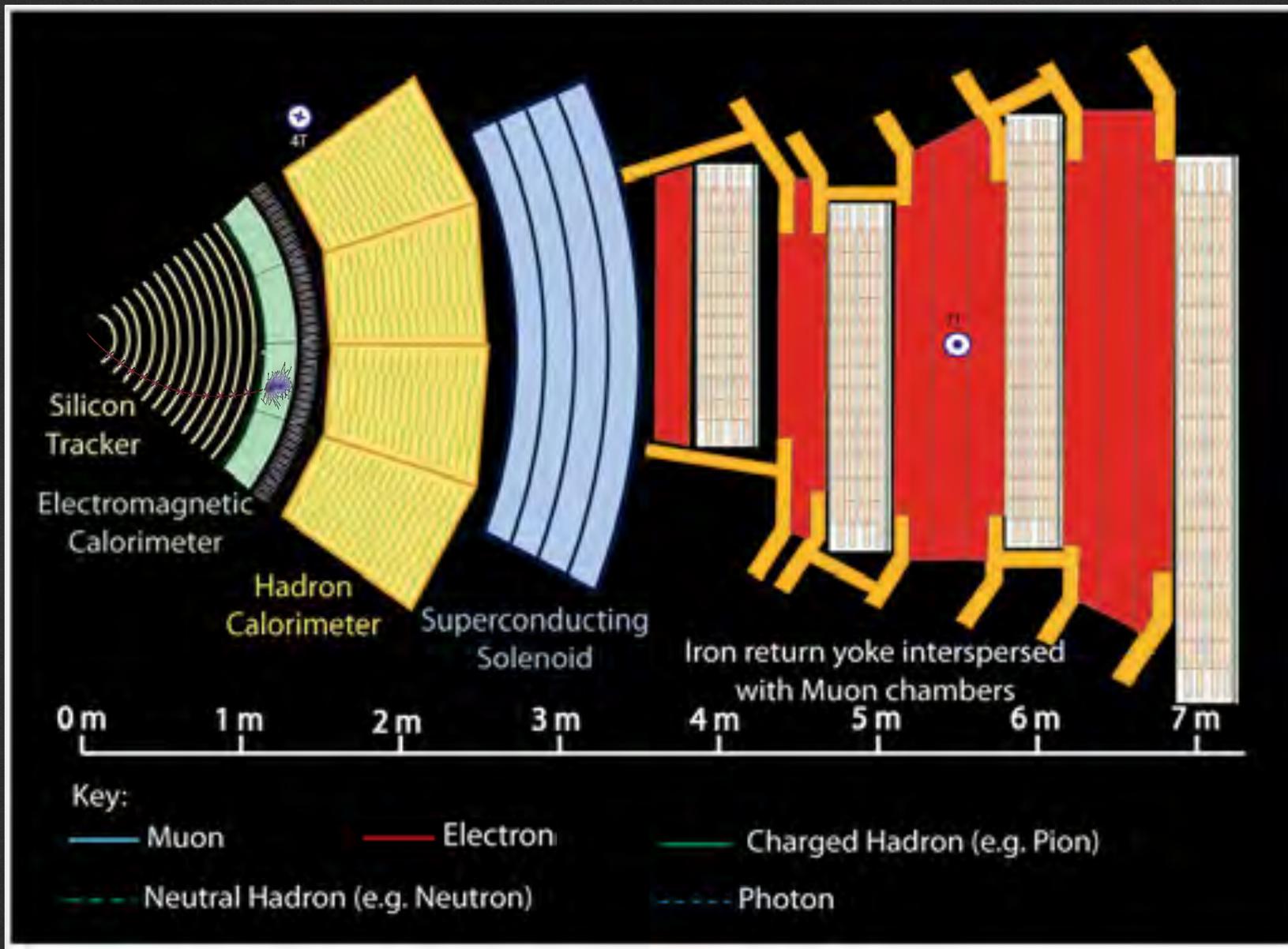


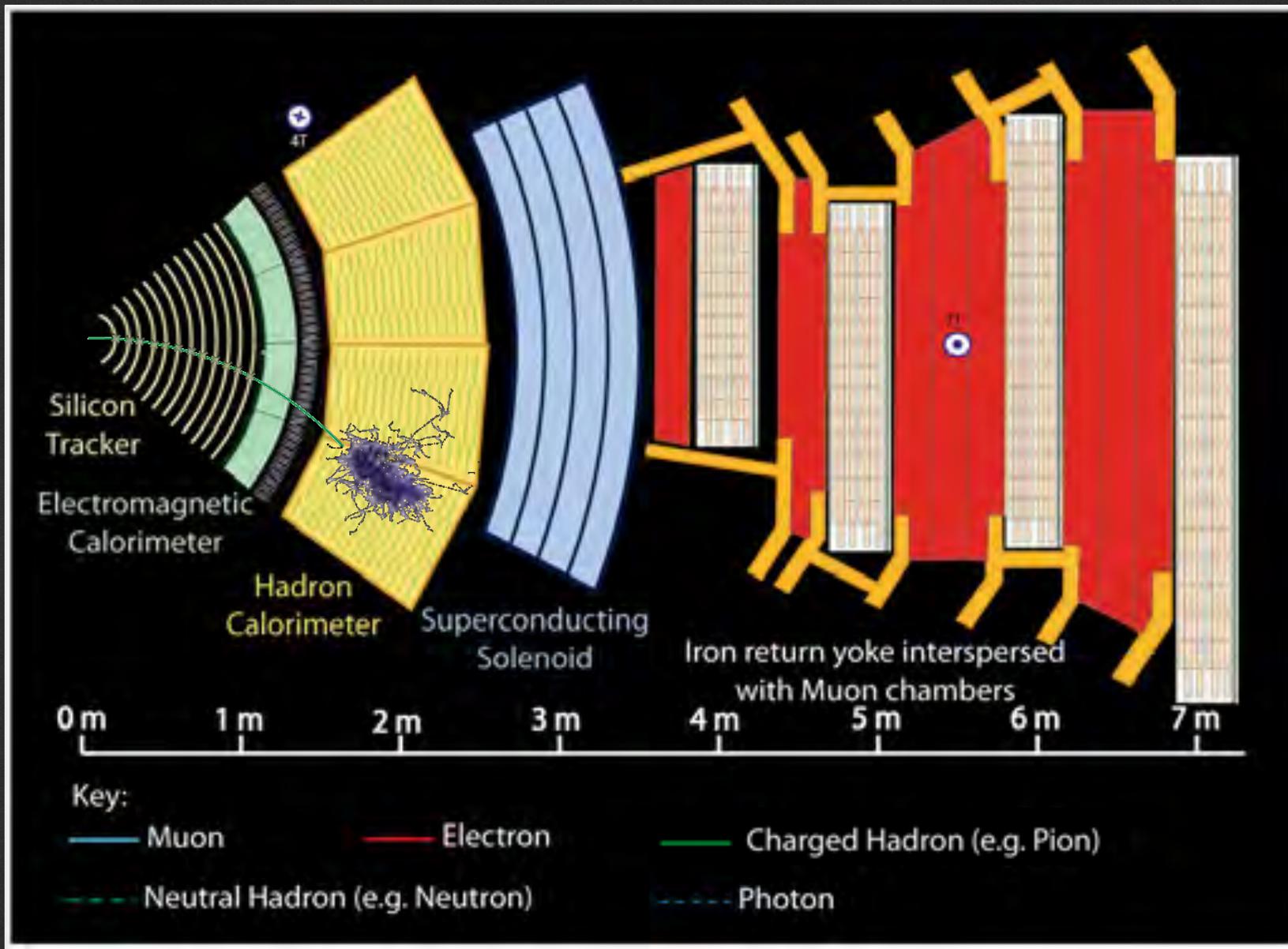
**D**PHYS

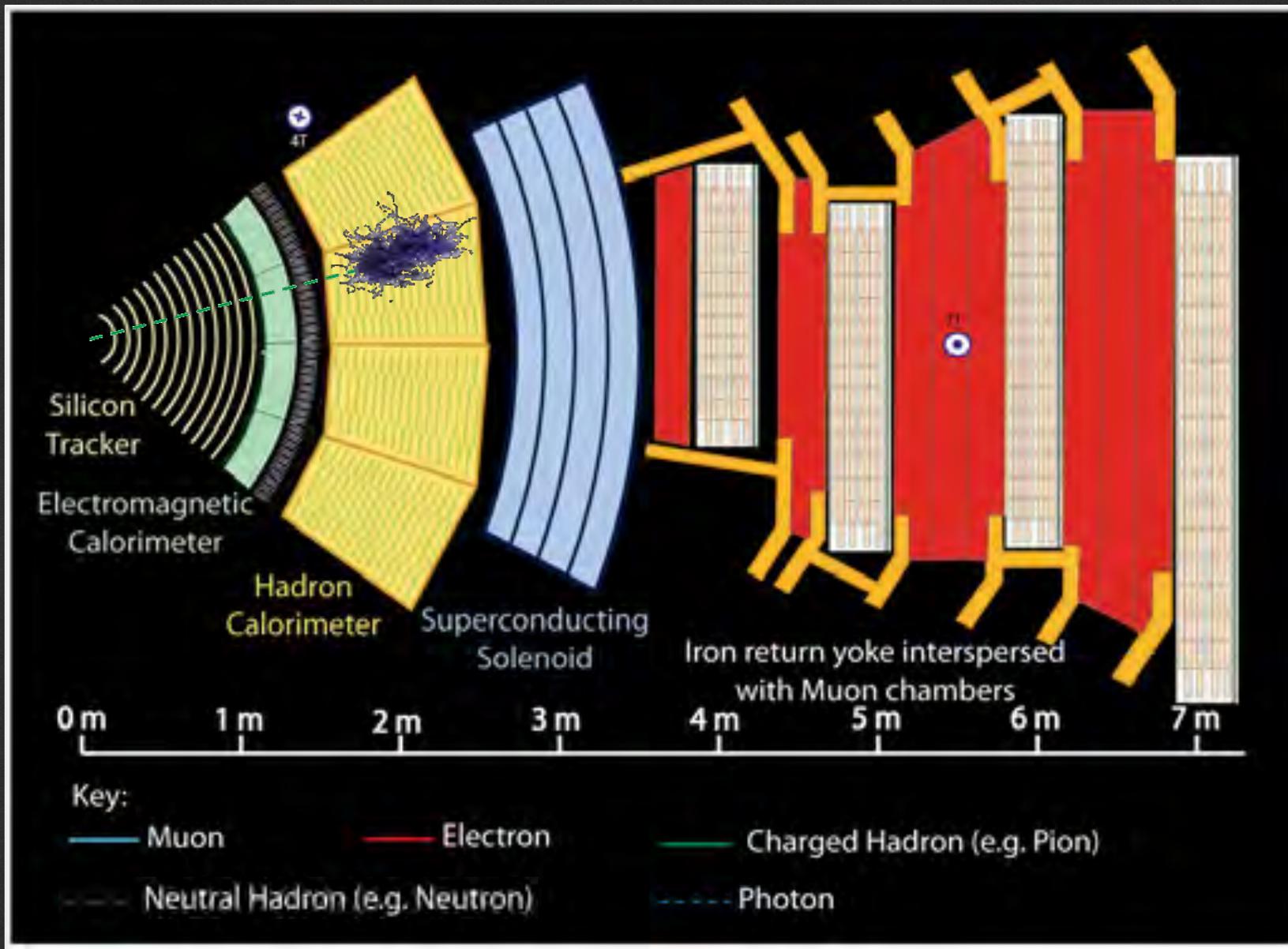
**Compact Muon Solenoid (CMS) Detektor**

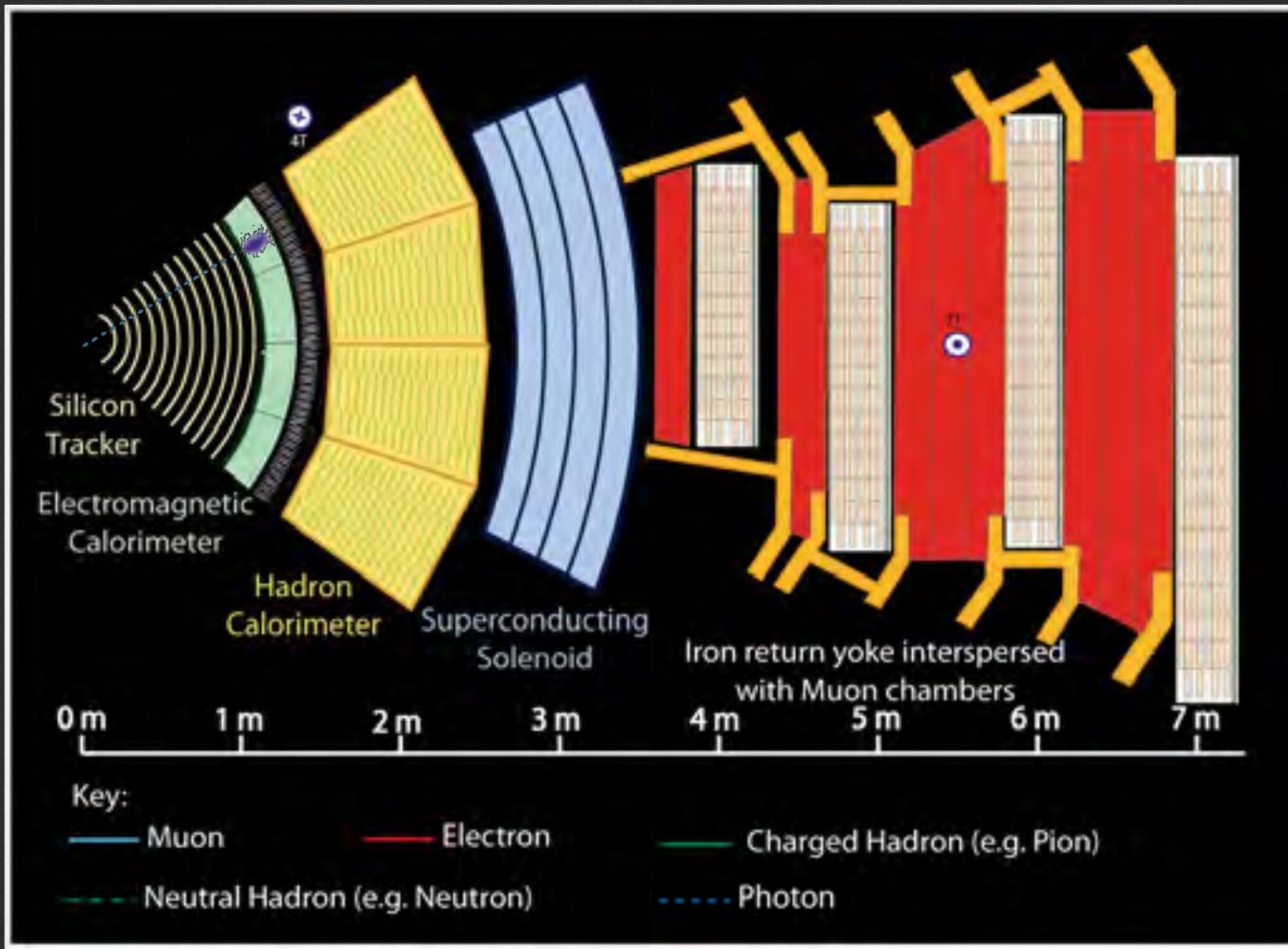




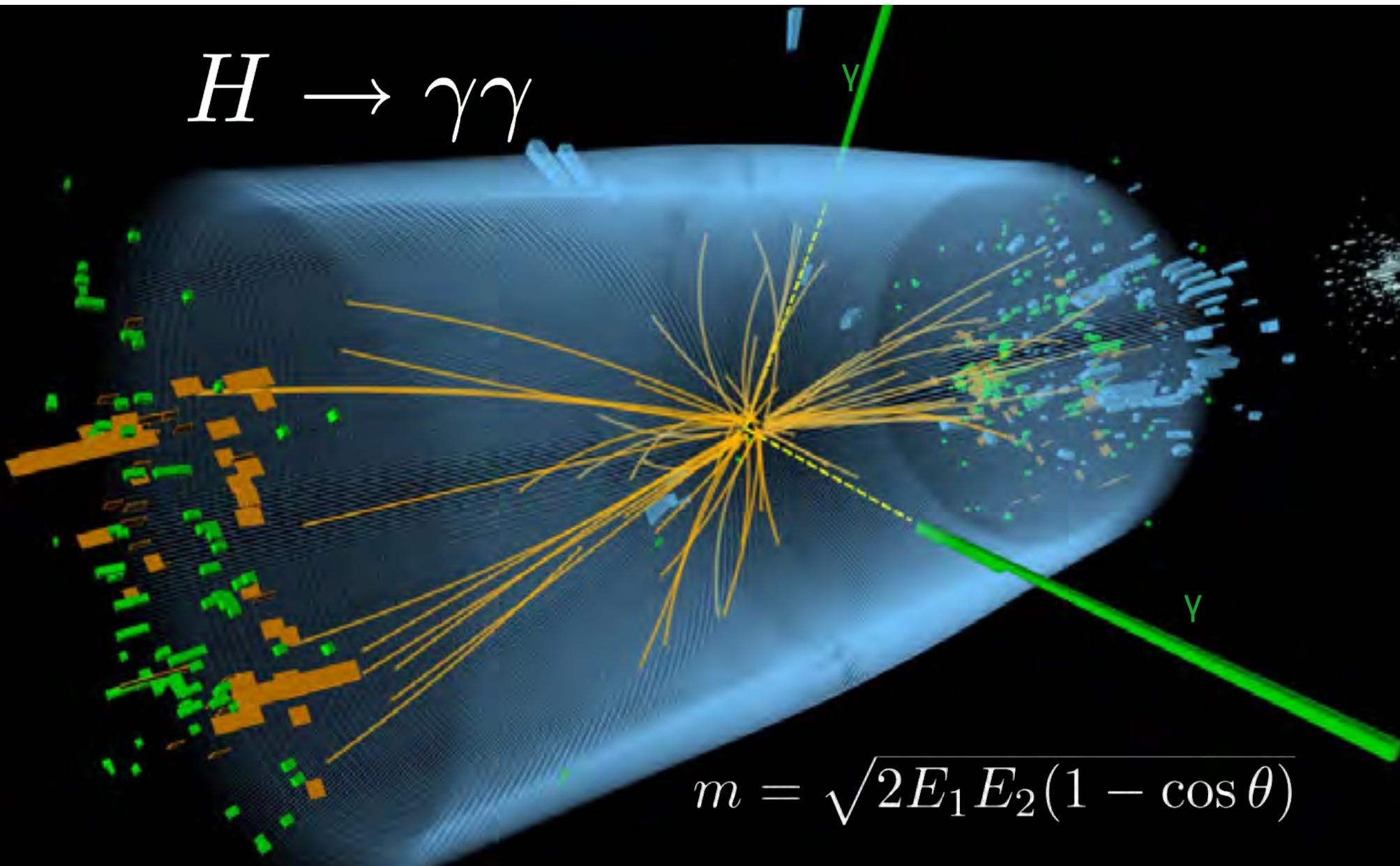








$$H \rightarrow \gamma\gamma$$



$$m = \sqrt{2E_1 E_2 (1 - \cos \theta)}$$

# Die CMS Kollaboration



~ 4000 WissenschaftlerInnen  
50 Länder  
240 Institute



1 Sprecher, 2 Stellvertreter  
Management Board  
Collaboration Board  
Finance Board  
1 Verfassung ...



# Zeitskalen ...

- 1984 – erste Ideen
- 1987 – La Thuile Workshop – der LHC ist das Zukunftsprojekt des CERN
- 1994 – Genehmigung des LHC - IPP der ETH Zürich tritt CMS bei
- 1998 – Baubeginn
- 2005 – Unterirdische Kavernen fertiggestellt
- 2008 – Experimente bereit
- 2009 – Erste Proton-Proton-Kollisionen
- 2010 – Beginn des Betriebs bei 7 TeV (50% Design)
- 2011 – 300 Millionen Proton-Kollisionen pro Jahr (1/3 Design-Luminosität)
- > 2014 – Betrieb bei 13 TeV und Designluminosität

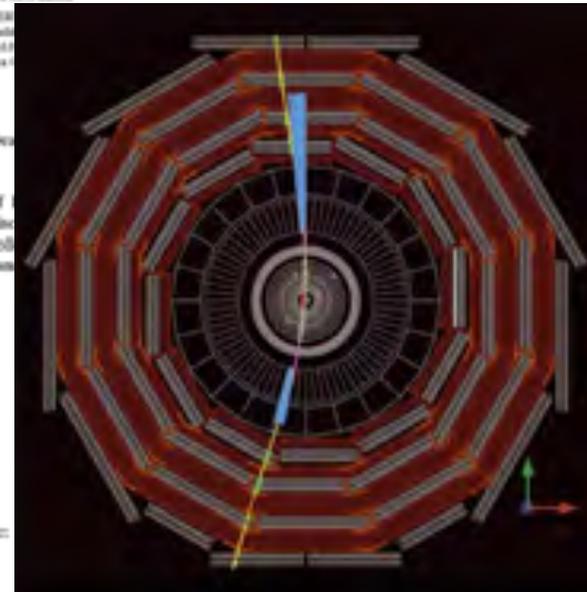


**ETH** Eidgenössische Technische Hochschule Zürich  
Ecole polytechnique fédérale de Zurich  
Politecnico federale svizzero di Zurigo  
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

Lehrer für Hochenergiephysik  
Prof. Dr. Huber  
HFG-Gebäude  
St. 05.800 20 75  
Fax: 05.572 05 54

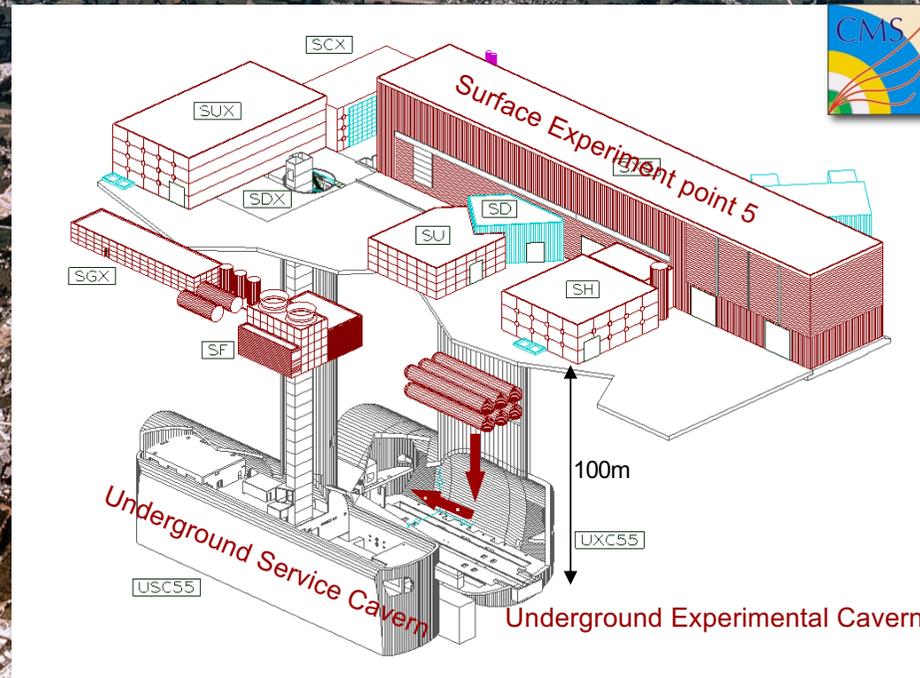
Michel Della Negra  
Spokesperson of CMS  
CERN  
Building 322-B09  
1211 Geneva 23

Präsidentin:  
Lehrer für Hochenergiephysik  
ETH-Hönggerberg 89A,  
CH-8093 Zurich



Professor Ch. Llewellyn-Smith, Director General of CERN

# Bau von CMS am Punkt 5



# YB-0 Absenkung

---



# LHC ≠ IKEA-Collider



2008



---

# HIGGS BOSON



# Higgs schon früh gesichtet ...

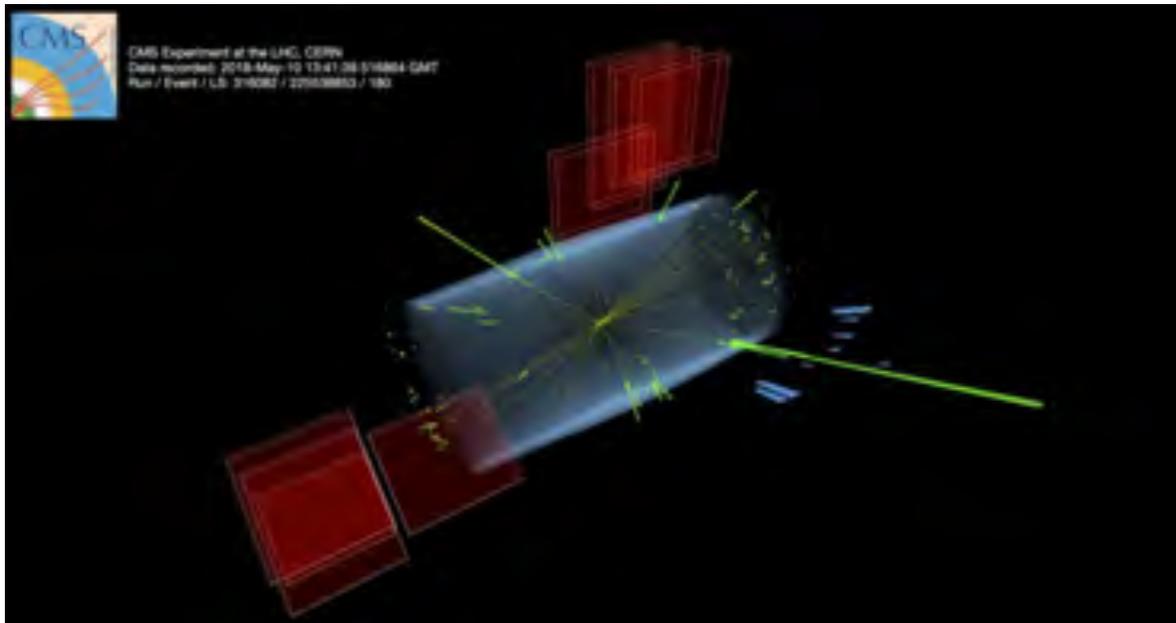


...sowohl in ATLAS als  
auch CMS (April 2008)

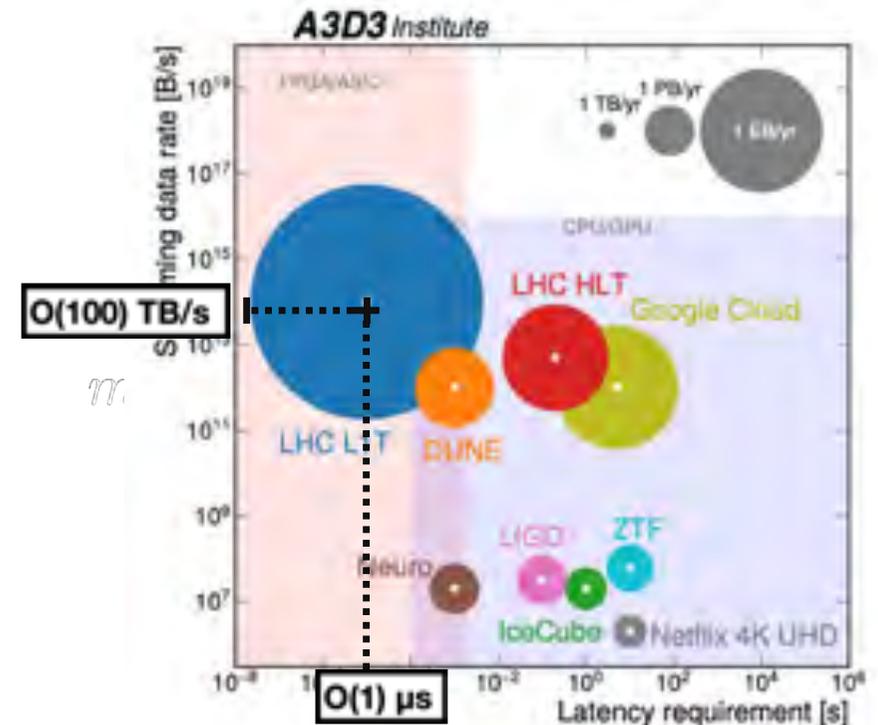


# Die Nadel im Heuhaufen ...

- Rohdatenstrom um die 100 TB/s
  - 5% des globalen Internets!
- ca. 1 interessantes Ereignis aus 1 Milliarde herausfischen

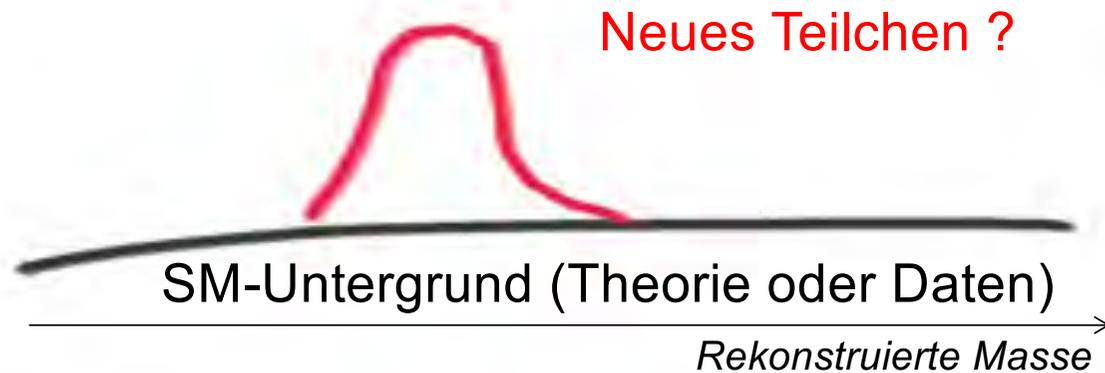


Ereignis in 3D:  
<https://cms3d.web.cern.ch/HIG-19-001/>

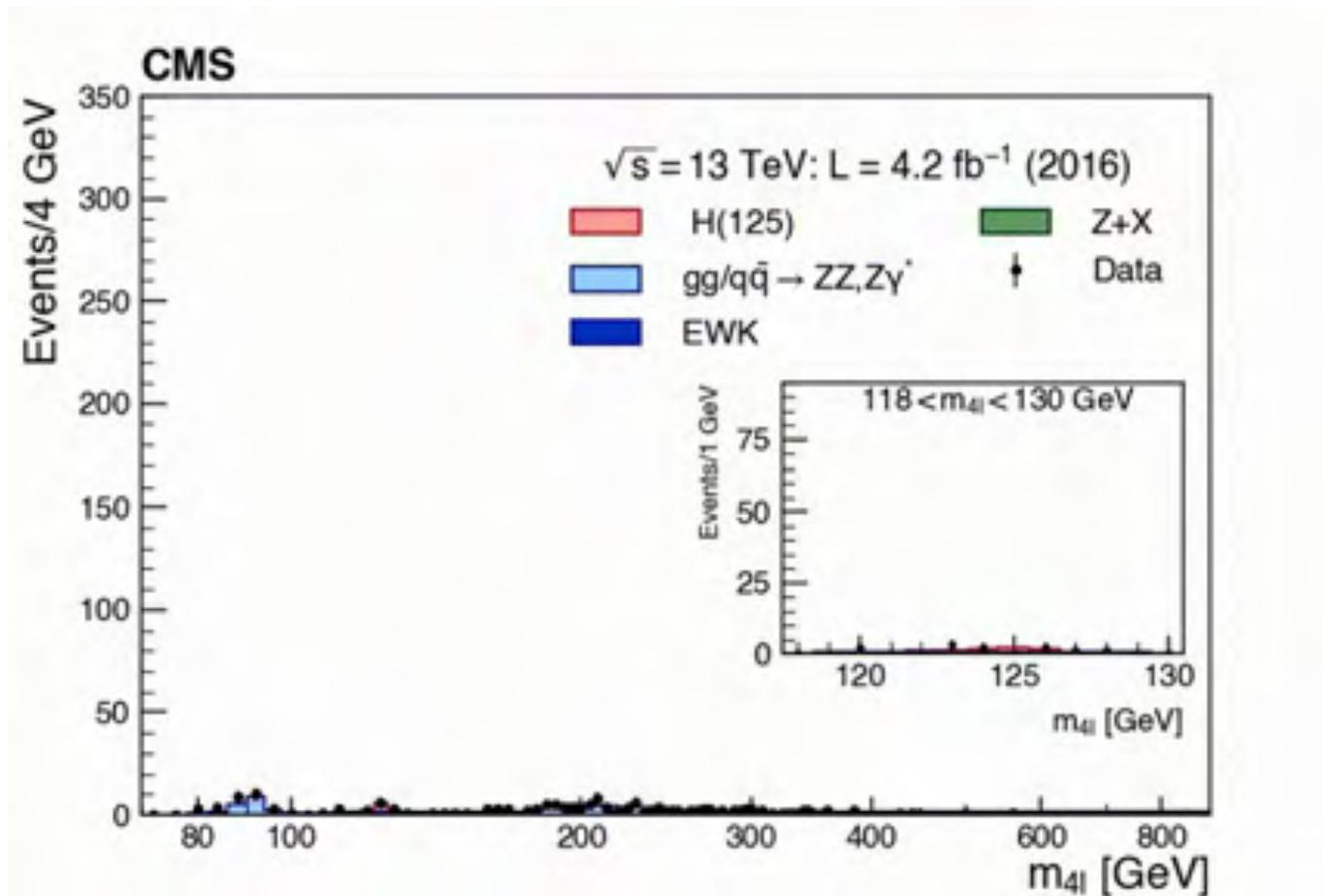


# Entdeckungen in der Teilchenphysik

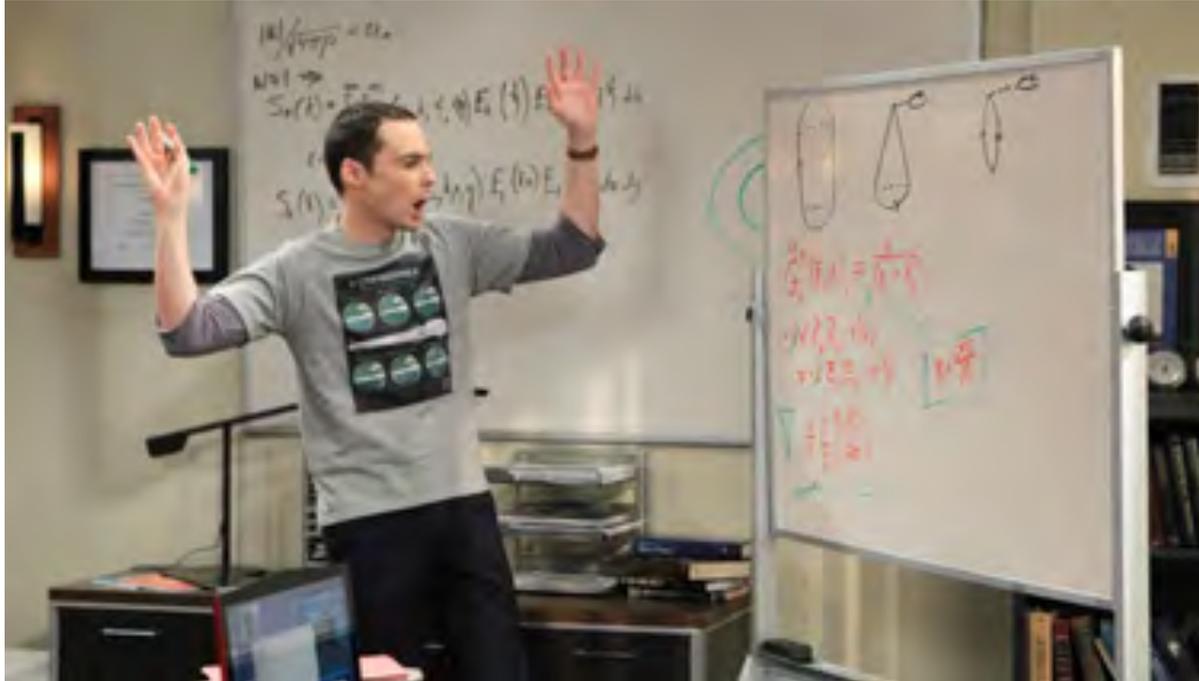
---



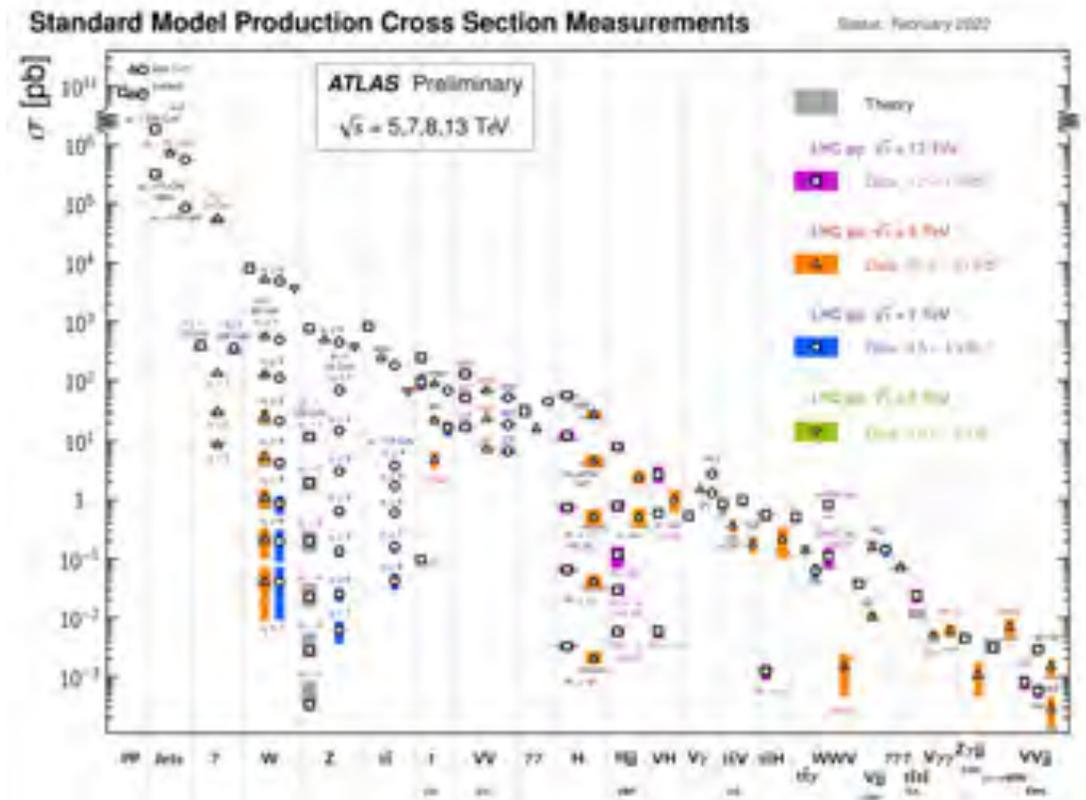
# Eine Entdeckung im Entstehen



# Vergleich der Daten mit der Theorie ...



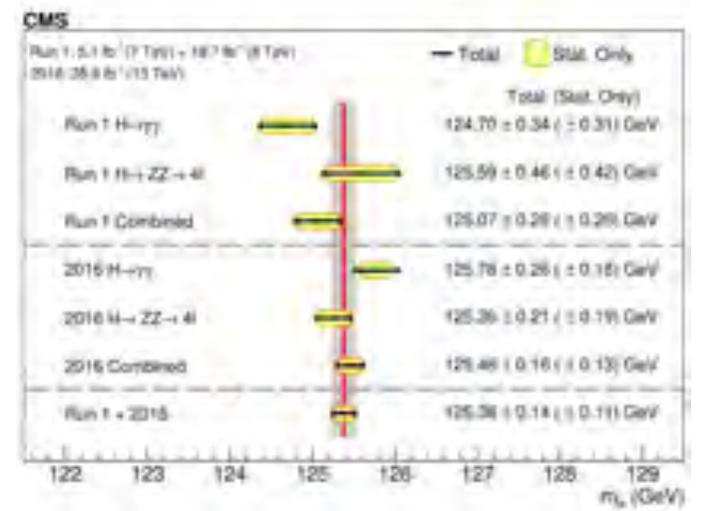
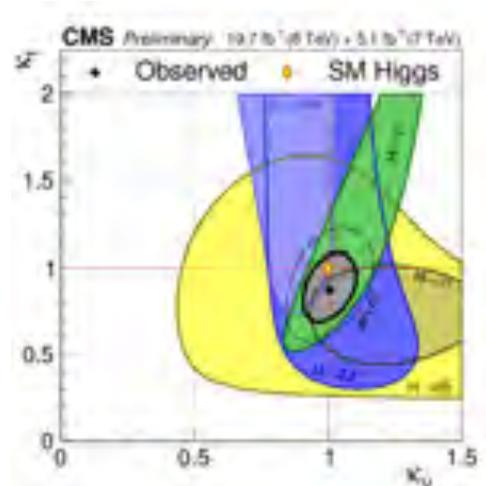
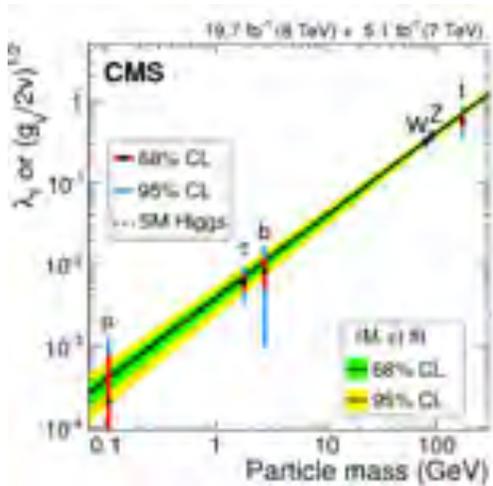
# Triumph - und Fluch ....



- Bisher keine Abweichungen vom Standard Modell beobachtet von ATLAS und CMS
- Aufgezeichnete Luminosität nur etwa 10% des geplanten Gesamtprogrammes des LHC

# Eigenschaften des Higgs Bosons

- Das Higgs Boson eröffnet ein Portal zur Suche nach neuer Physik
  - Higgs Boson «redet» mit allen Teilchen
  - Eine neue Art der Wechselwirkung!
- Neuer zentraler Fokus der Forschung am LHC

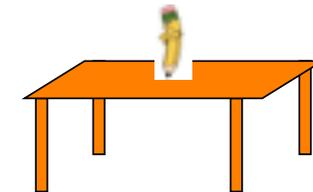


# Ist das Universum “feinabgestimmt” ?

---



B. Kilminster



[link](#)



# LHC / HL-LHC Plan

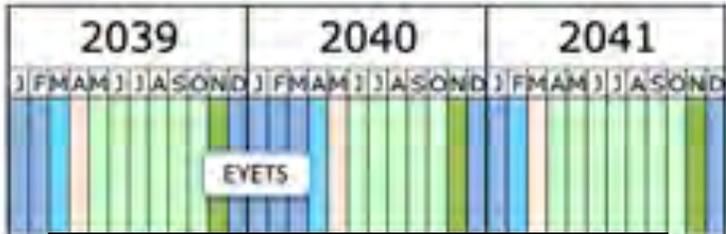


Run 3: until now (CMS/ATLAS) 196 fb<sup>-1</sup> Goal: ~300 fb<sup>-1</sup>

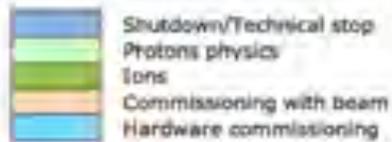


Run 4: 1000 fb<sup>-1</sup>

Run 5: 2000 fb<sup>-1</sup>



Run 5 (cont'd)



LHC Run 1 + 2 + 3:

~500 fb<sup>-1</sup>

Total HL-LHC:

3000 fb<sup>-1</sup>

# ...Terra Incognita ....



# Zusammenfassung und Ausblick

- Der LHC – 25 Jahre von der Idee zum Betrieb - ein Programm für 30 Jahre
  - Higgsboson entdeckt – Standard-Modell komplett!
  - Standard-Modell reicht nicht aus - z.B. nur 5% der Energiedichtes des Universums verstanden
  - Viele Fragen weiter offen! Das Higgsboson wird uns helfen, diese weiter zu verfolgen.
  - nur 10% der LHC Daten aufgenommen und analysiert - Ausbau ab 2026
  - Grundlagenforschung ein Motor der technischen Innovation
- ⇒ **Spannende Zukunft weiter vor uns!**

