

# Teilchendetektoren am LHC oder Wie macht man Teilchen sichtbar?

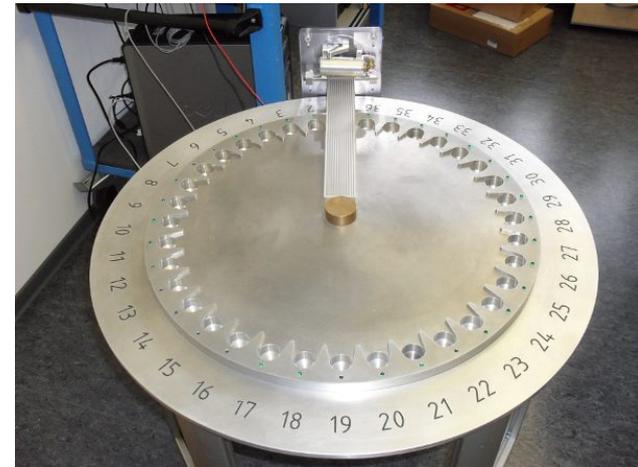
CMS Detektor am CERN  
Einbau der Siliziumspurkammer  
CMS wiegt 12.500 t (~ 1 Eiffelturm)

10. April 2013

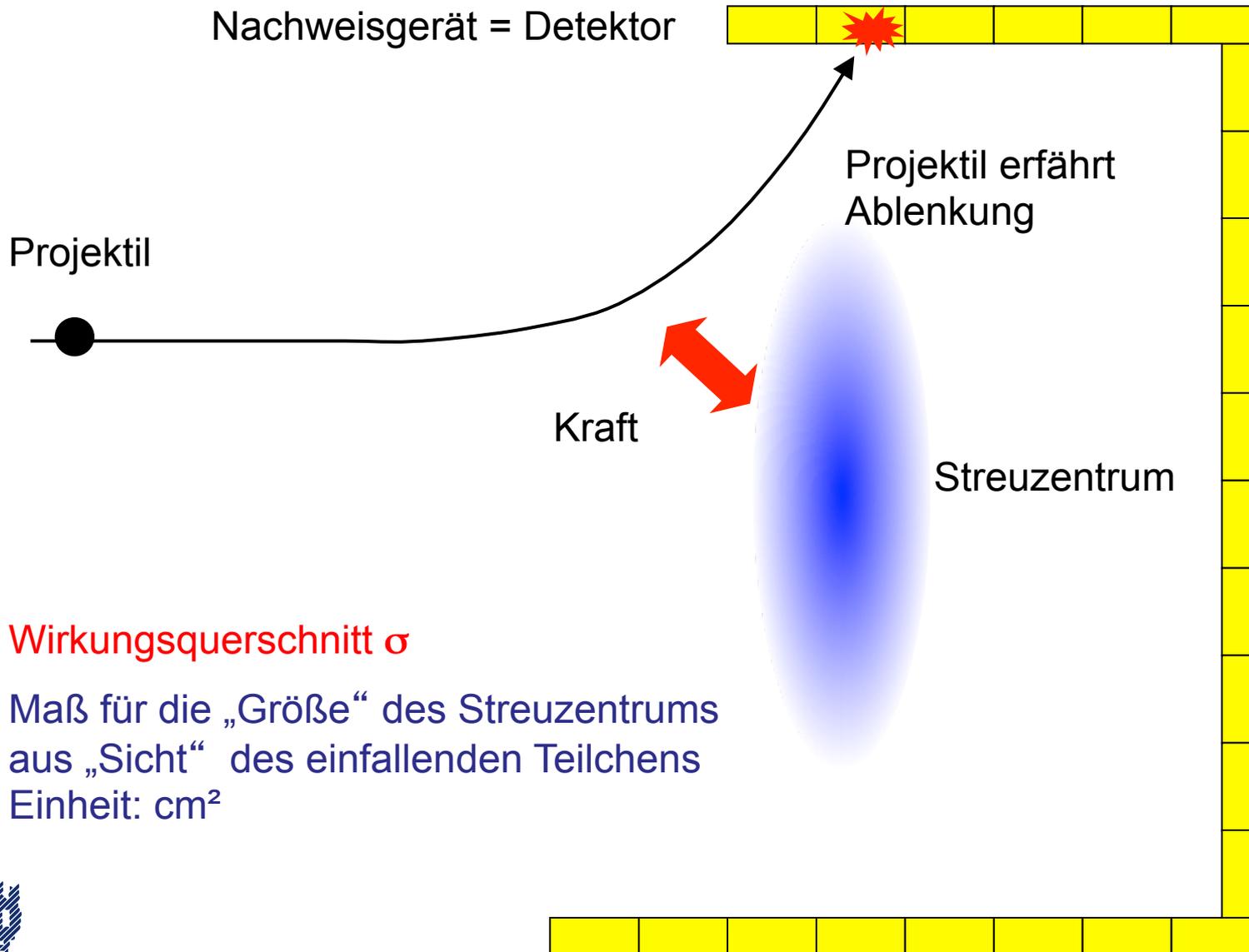
St. Anna-Schule, Wuppertal

# Gliederung Projektkurs

- 1) Auftaktveranstaltung an der Bergischen Universität ✓  
Folien: <http://www.atlas.uni-wuppertal.de/~wagner/Outreach/Outreach.html>
- 2) Einführung in die Welt der Elementarteilchen ✓
- 3) Einführung in Streuexperimente: Das mechanische Streuexperiment ✓
- 4) Vorlesung zum Large Hadron Collider (LHC) ✓
- 5) Starke und schwache Wechselwirkung
- 6) Der Rutherford-Versuch (im Praktikum)
- 7) Zusammenstellung eines Teilchenquartetts
- 8) Schulvorlesung zur Teilchenidentifikation
- 9) Einblick in die Astroteilchenphysik
- 10) Schülerversuche: Myonnachweis mit Kamiokanne und Szintillationszähler
- 11) Schauerdetektion: Experimente an der Universität
- 12) Analyse von LHC-Kollisionsdaten
- 13) Abschlussveranstaltung an der Universität:  
„Die offenen Fragen der Teilchenphysik“



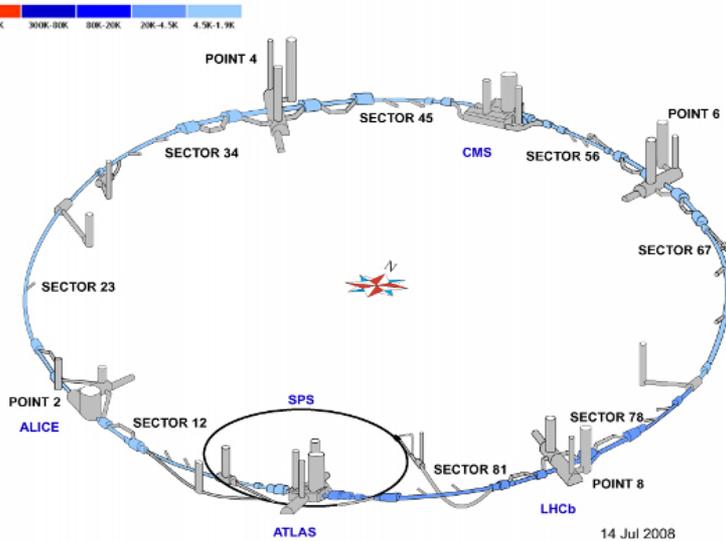
# Prinzip eines Streuexperimentes



# Der Large Hadron Collider (LHC)

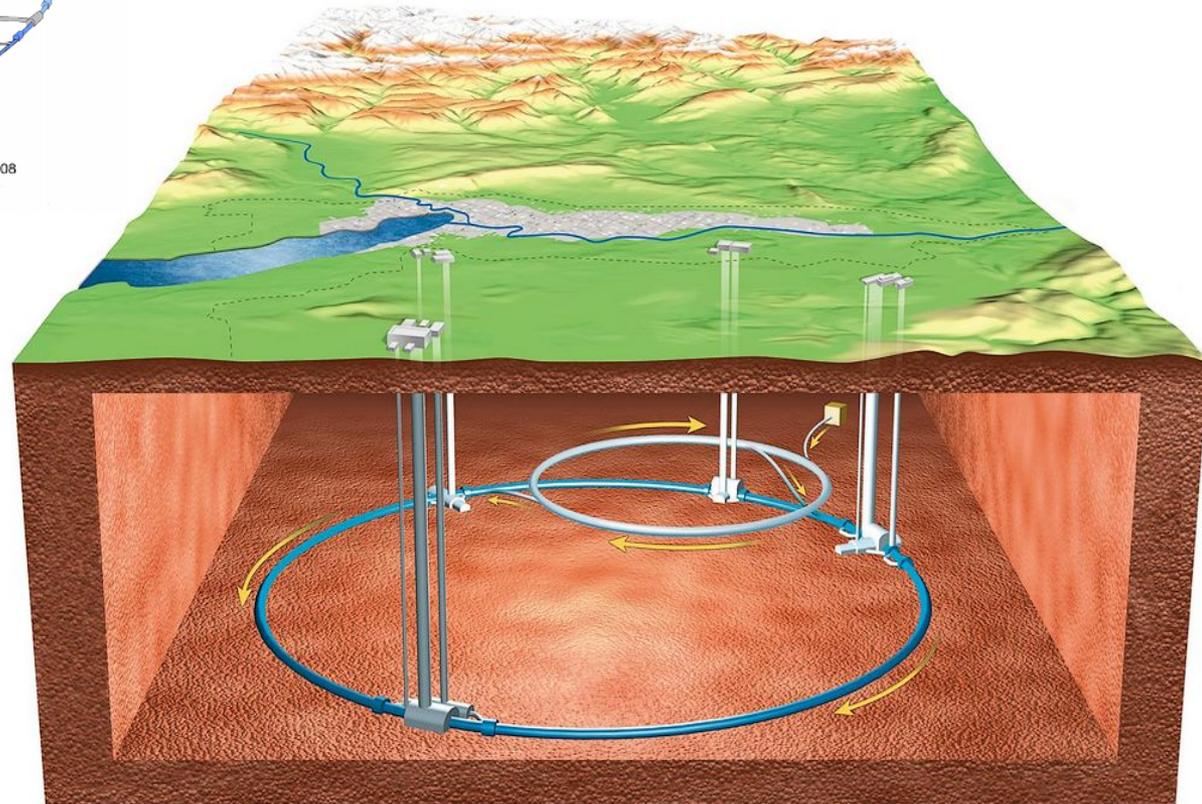
## Proton-Proton-Beschleuniger

- in Tunnel am CERN mit 27 km Umfang
- Protonen machen 10000 Runden/Sekunde
- 7 TeV pro Kollision, d.h Bedingungen wie zu Zeiten  $10^{-13}$  -  $10^{-14}$  s nach dem Urknall, Abstände bis  $10^{-19}$  m



## Vier Teilchendetektoren:

- ATLAS
- ALICE  
Pb-Pb-Kollisionen
- CMS
- LHC-B  
Physik der b-Quarks





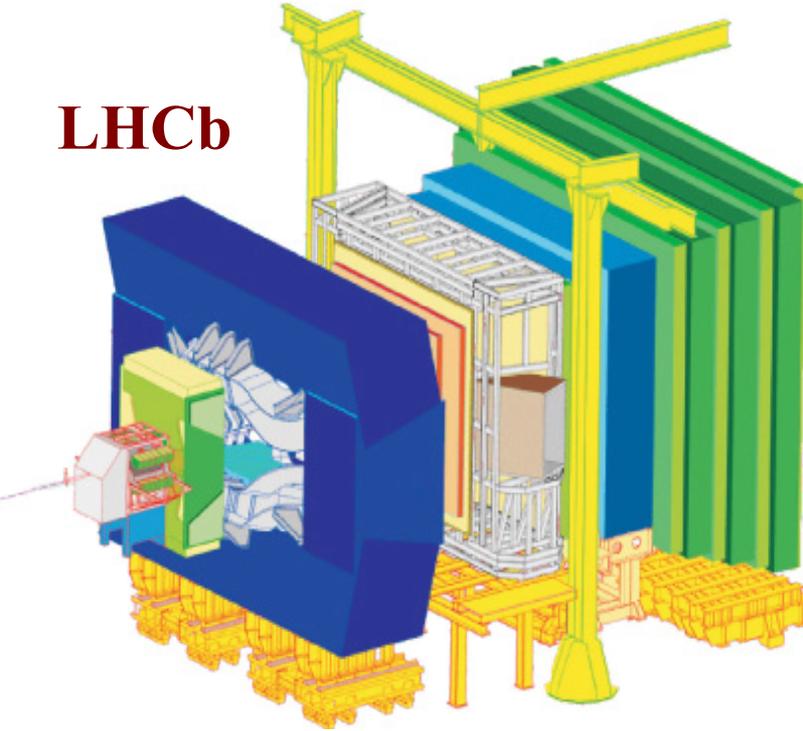
# *CERN*

das europäische Labor für  
Elementarteilchenphysik

**Gegründet 1954**  
**eines von Europas ersten Gemeinschaftsprojekten**

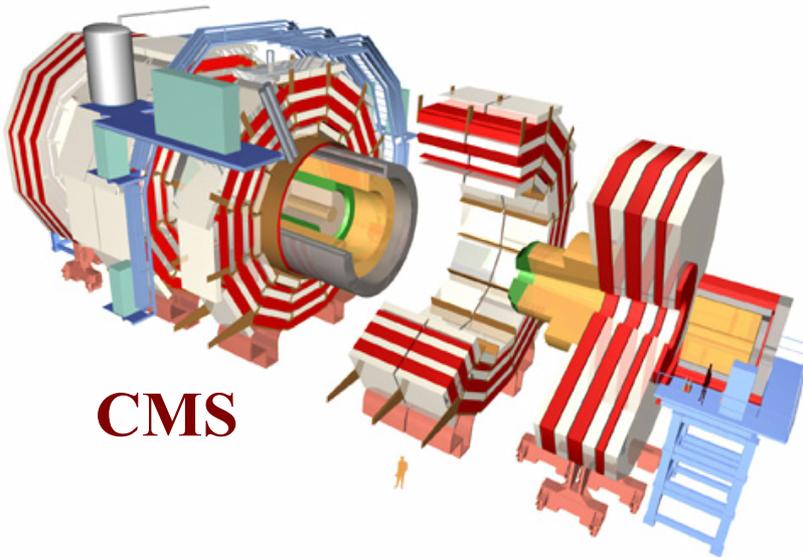
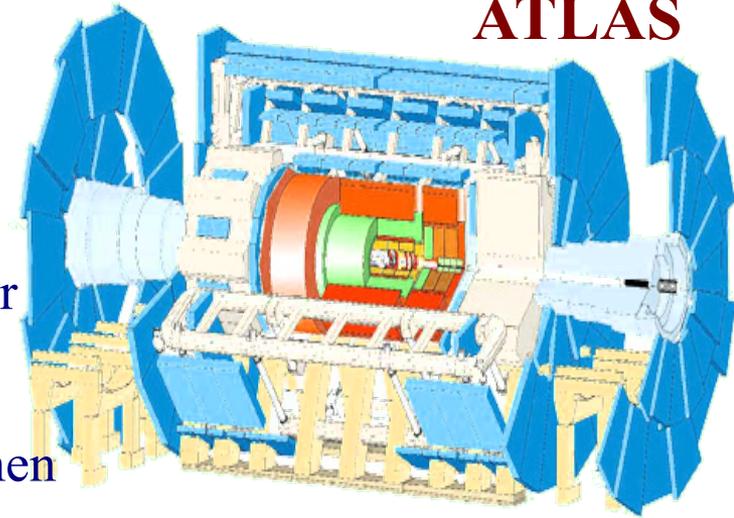
# Die vier großen Experimente

**LHCb**

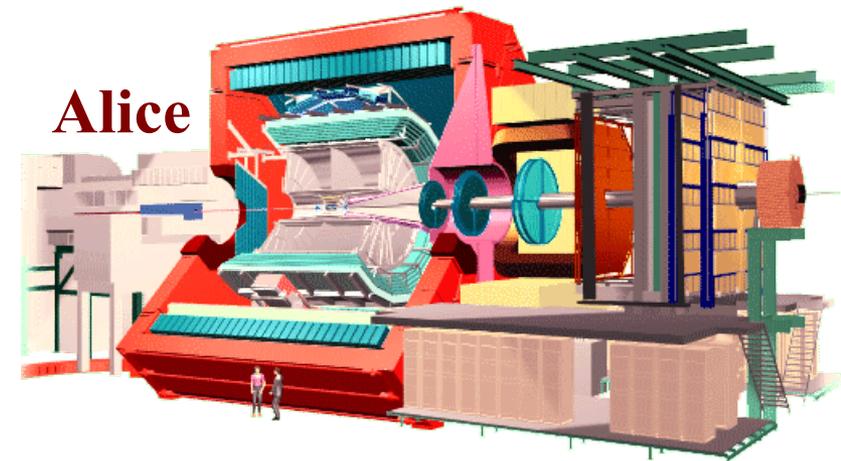


- Gebaut von Instituten in der ganzen Welt
- Jeder hat mehr als 100 Millionen Sensoren
- 40 Millionen Aufnahmen von Kollisionen pro Sekunde
- Insgesamt etwa 10'000 Physiker aus ~70 Ländern
- Spezialisiert auf unterschiedliche Fragestellungen

**ATLAS**



**CMS**



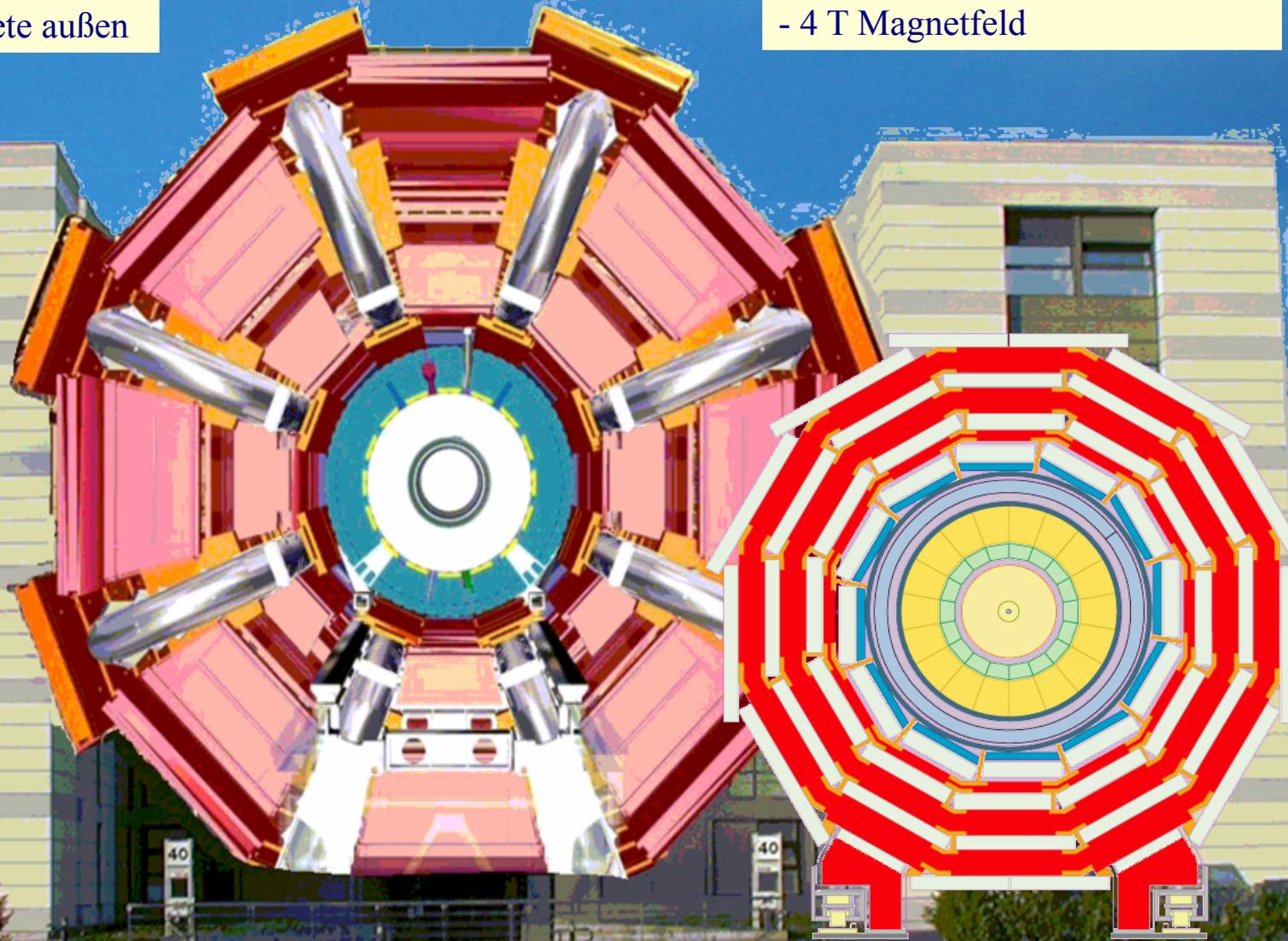
**Alice**

- 25 m hoch, 46 m lang
- 7.000 t schwer
- ca. 2.200 Wissenschaftler von 170 Instituten aus 37 Ländern
- große Toroid-Magnete außen

# ATLAS & CMS

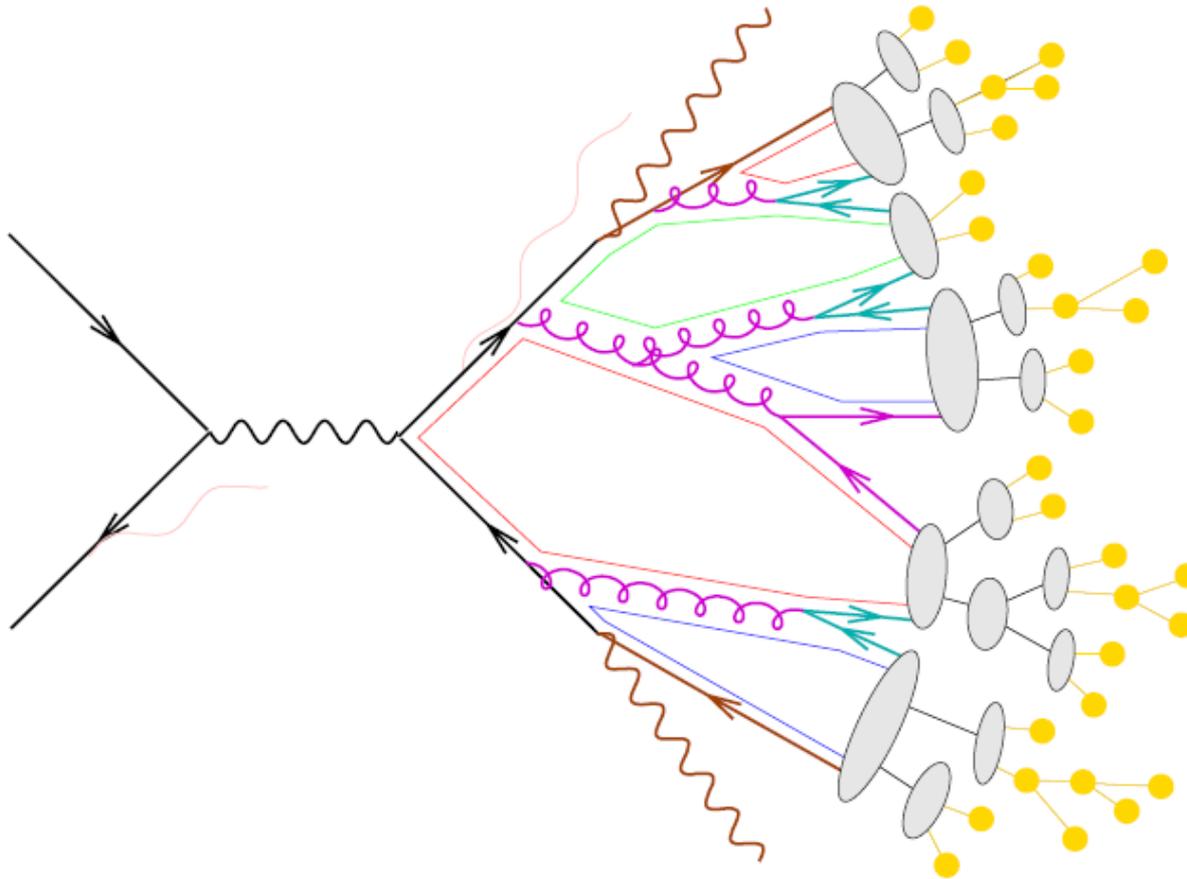
- die Universalisten

- 15 m hoch, 21 m lang
- 12.500 t schwer
- > 2.000 Wissenschaftler von 155 Instituten aus 37 Ländern
- 4 T Magnetfeld



# Welche Teilchen sind direkt beobachtbar?

Schemabild eines hochenergetischen Streuprozesses



Nur Teilchen mit  $\tau > 10^{-10}$  s erreichen den Detektor.

- Elektronen,
- Myonen,
- Photonen,
- Pionen,
- Kaonen,
- Protonen
- $\Lambda$ -Baryonen
- Neutrinos (keine Wechselwirkung im Detektor)



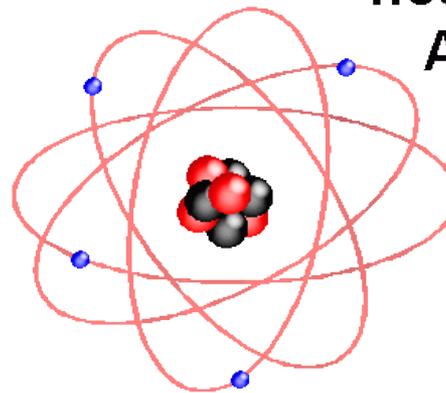
# Teilchennachweis: Ionisation

- Geladenes Teilchen fliegt an Atom vorbei
- Hüllenelektronen sehen die Ladung des Teilchens
- Elektron wird aus der Hülle gelöst  
→ positiv geladenes Ion bleibt zurück

geladenes  
Teilchen



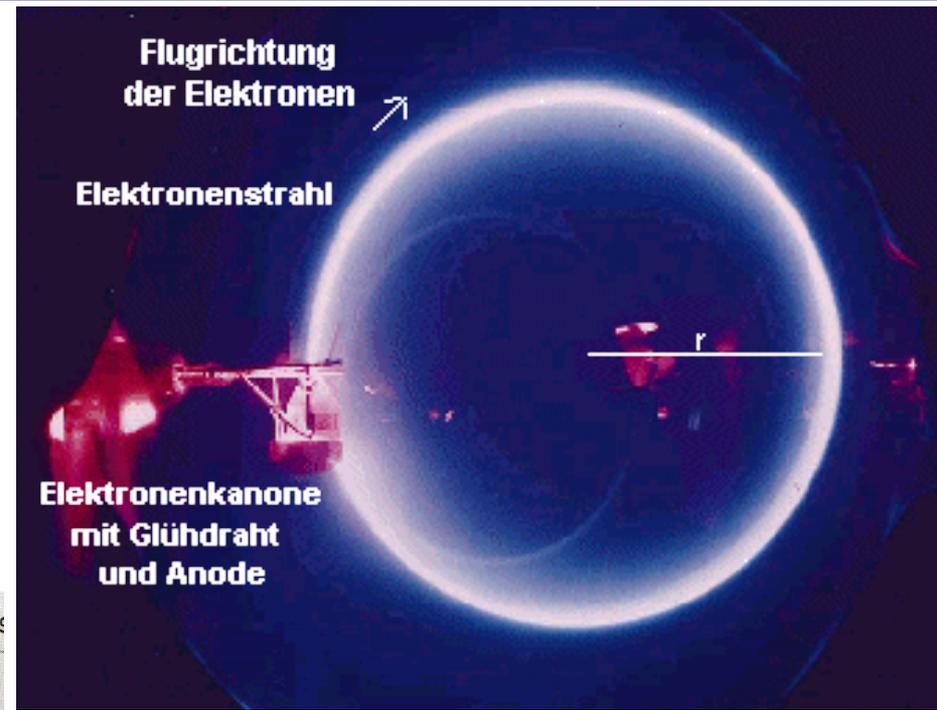
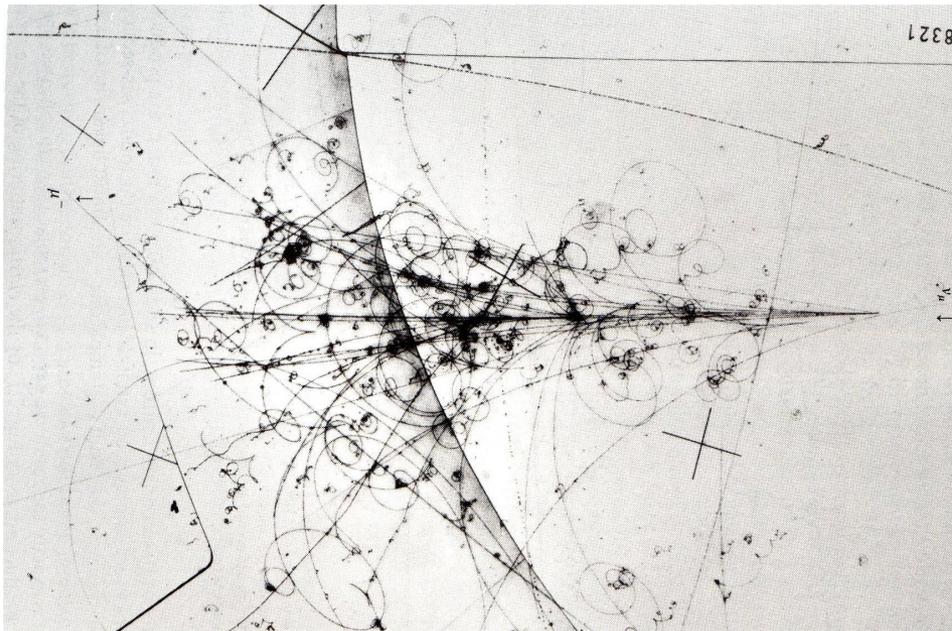
neutrales  
Atom



# Ionisation sichtbar machen

## ■ Fadenstrahlrohr

- Elektronen in Gas werden durch Magnetfeld auf Kreisbahn gezwungen
- Gas wird entlang der Elektronenbahn ionisiert und damit zum Leuchten angeregt

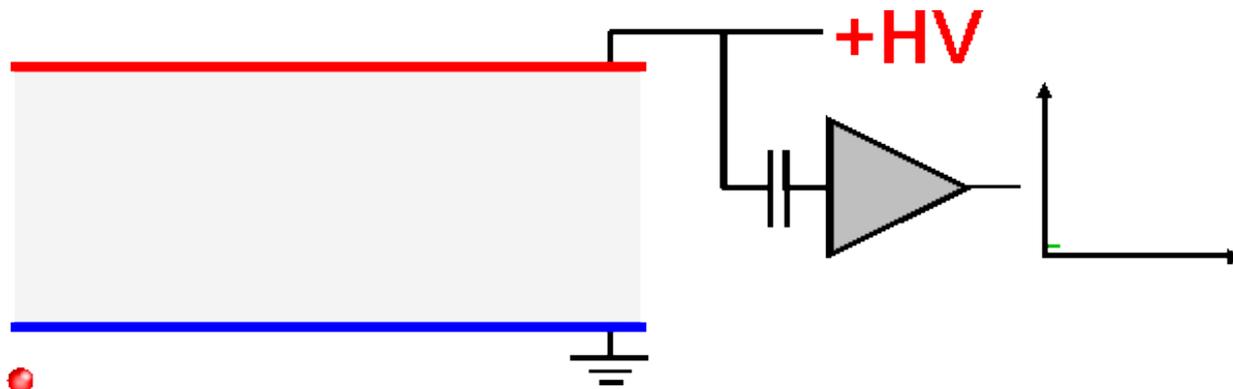


## ■ Emulsion (Film)

Schwärzung eines Films durch ionisierende Strahlung

# Ionisationskammer mit elektronischer Auslese

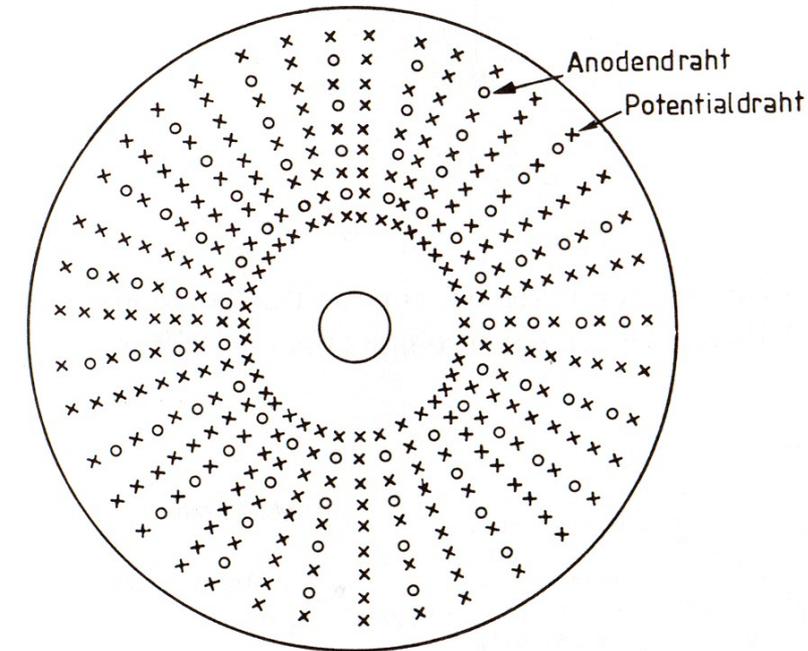
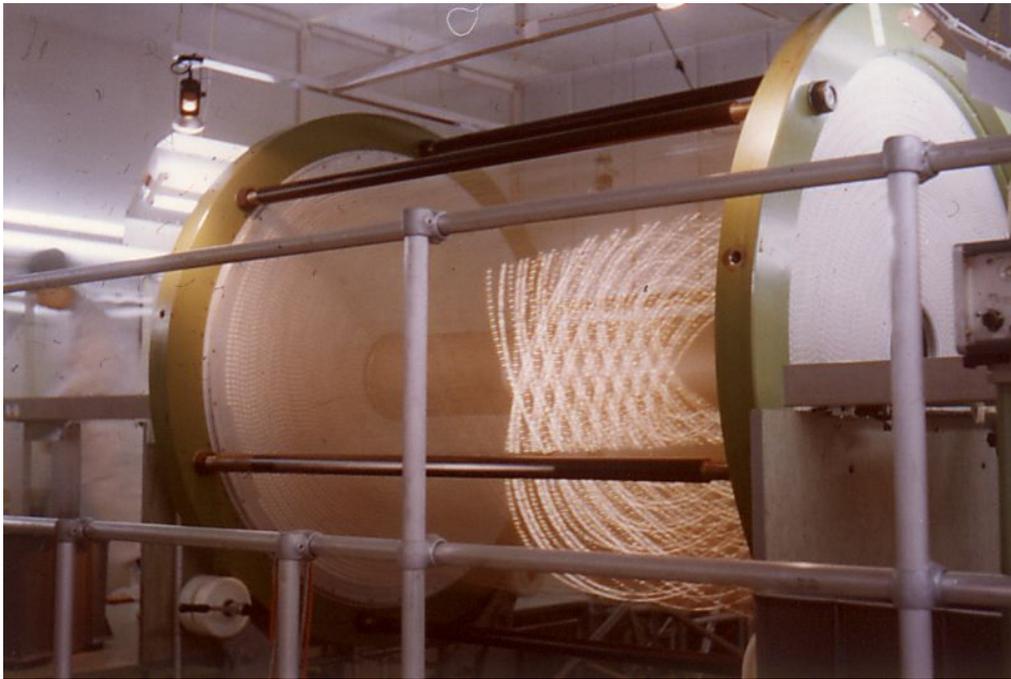
- Geladenes Teilchen ionisiert das Gas, die Flüssigkeit oder den Festkörper des Detektors
  - Elektronen und positive Ionen entstehen
- Elektronen und Ionen werden durch elektrisches Feld getrennt
  - Strom fließt in der Kammer
- Ladung erreicht nach einiger Zeit die Elektroden
  - Ladungsmenge hängt vom Material ab (groß für Si, kleiner für Ar)
- Stromsignal wird elektrisch verstärkt und an einen Computer geschickt



# Beispiel: Drahtkammer

Eine Elektrode kann durch Drähte ersetzt werden:

- Viele Drähte erlauben eine räumliche Rekonstruktion der Teilchenspur
- Volumen ist mit Gas gefüllt (Argon, Methan,  $\text{CO}_2$  ...)



# Andere Nachweisverfahren

## ■ Szintillationslicht

- Atom wird NICHT ionisiert, aber angeregt
- Atom sendet Licht aus, z.B. Nordlichter

## ■ Cherenkovlicht

- Teilchen bewegt sich in einem Material „schneller als das Licht“  
Lichtgeschwindigkeit hängt vom Brechungsindex ab
- Optischer „Überschallknall“



Cherenkovlicht  
in einem  
Atomreaktor



# Siliziumdetektoren

- Idee: Ersetze Gas aus Ionisationskammer durch Festkörper.
- **Vorteil: Hohe Zahl von Elektron-Loch-Paaren**
- Energie  $W$ , die zur Erzeugung eines Ladungsträgerpaars benötigt wird:

Szintillator	$\approx 700 \text{ eV}$
Gase	$\approx 30 \text{ eV}$
Silizium	$3,6 \text{ eV}$
Germanium	$2,8 \text{ eV}$

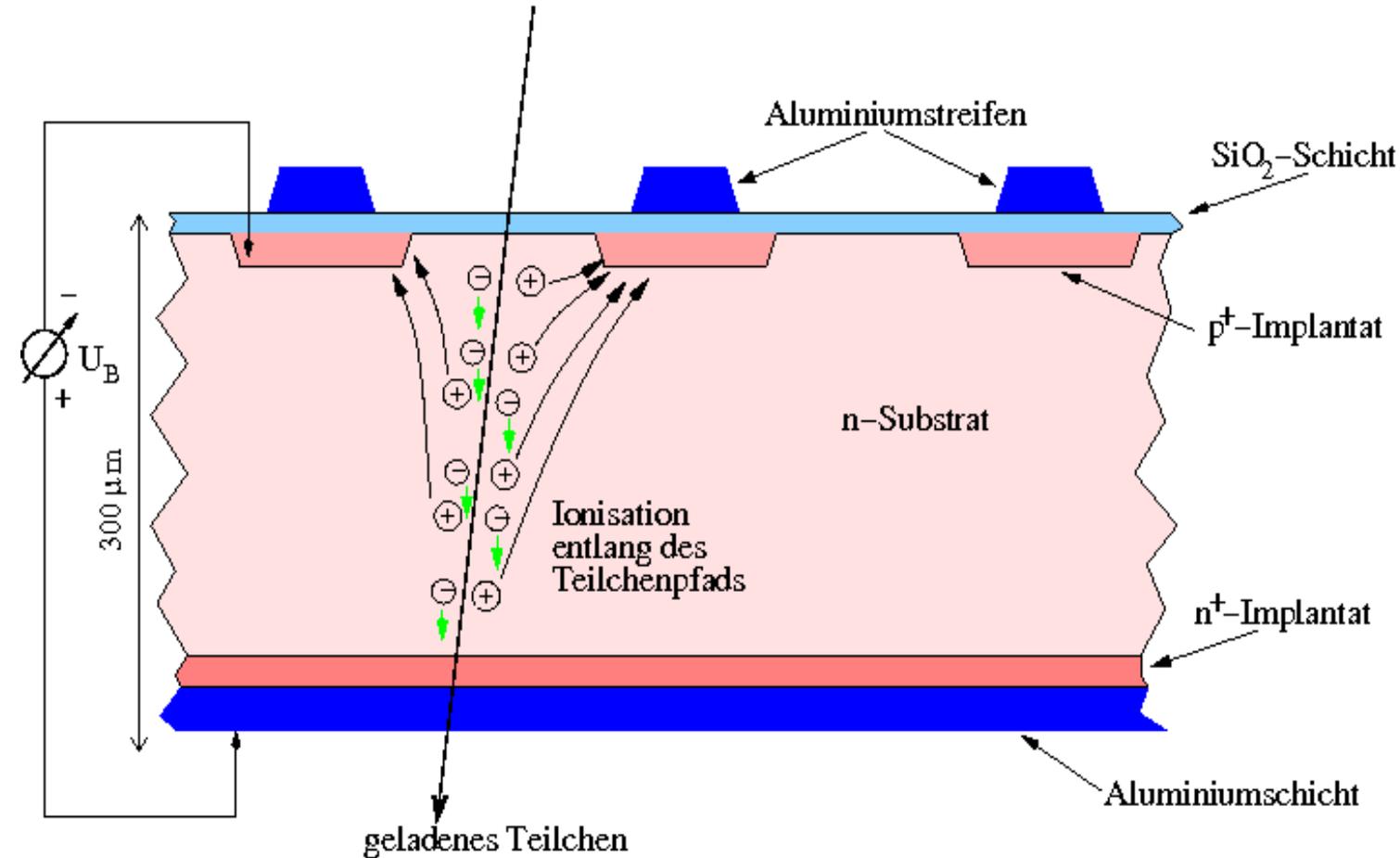
⇒ gute Energieauflösung im Vergleich zum Szintillator

$$\frac{\Delta E}{E} \propto \frac{1}{\sqrt{N}} = \sqrt{\frac{W}{E}} \quad \frac{(\Delta E/E)_{\text{Si}}}{(\Delta E/E)_{\text{Szin}}} = \frac{\sqrt{E/700 \text{ eV}}}{\sqrt{E/3 \text{ eV}}} \approx 6 \cdot 10^{-2}$$



# Funktionsweise eines Siliziumstreifenzählers

einseitig strukturierter Streifenzähler mit p-auf-n Streifen



Auslesestreife  
n sind  
kapazitiv  
gekoppelt

auf der Rückseite:  
ohmsche  
Ankopplung an n<sup>+</sup>-  
Implantat



Der Spurdetektor von CMS  
besteht aus Siliziumstreifenzählern

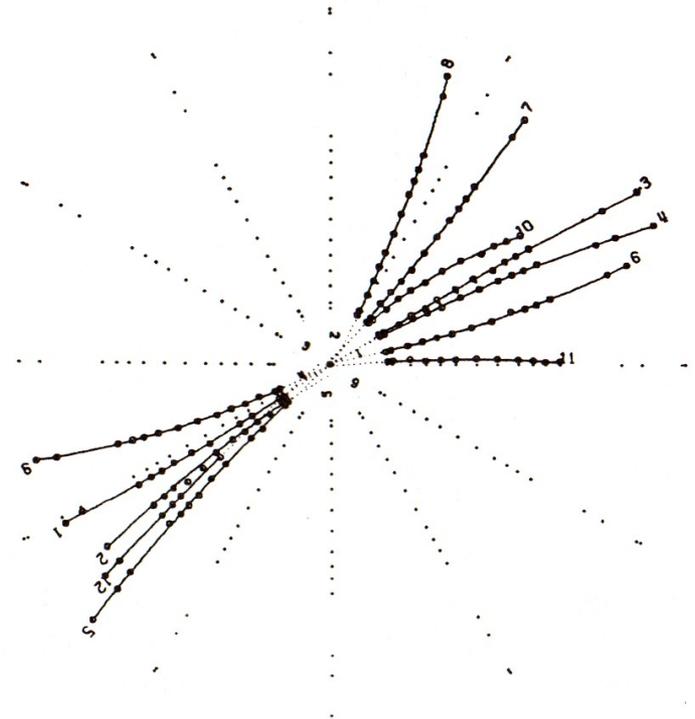




Voll verkabelter CMS-Spurdetektors

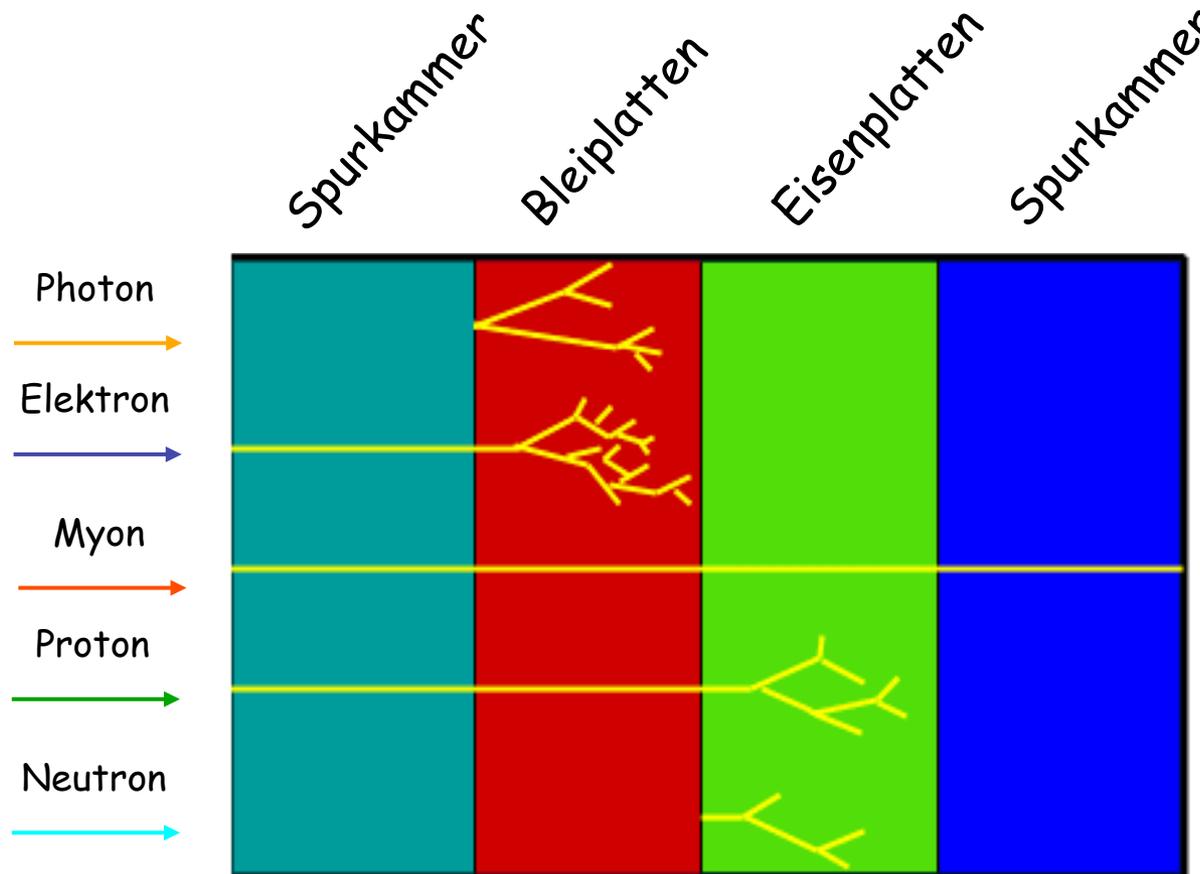
# Teilchenspuren

- Im Zentrum des Detektors kommt es zur Vernichtung von Elektronen und Positronen
  - Die neu entstandenen Teilchen werden mit verschiedenen Detektorkomponenten nachgewiesen
  - Die geladenen Teilchen erzeugen Signale im Gas der Drahtkammer  
→ Teilchenspur
  - Aus Quarks entstehen hierbei **Teilchenbündel („Jets“)**

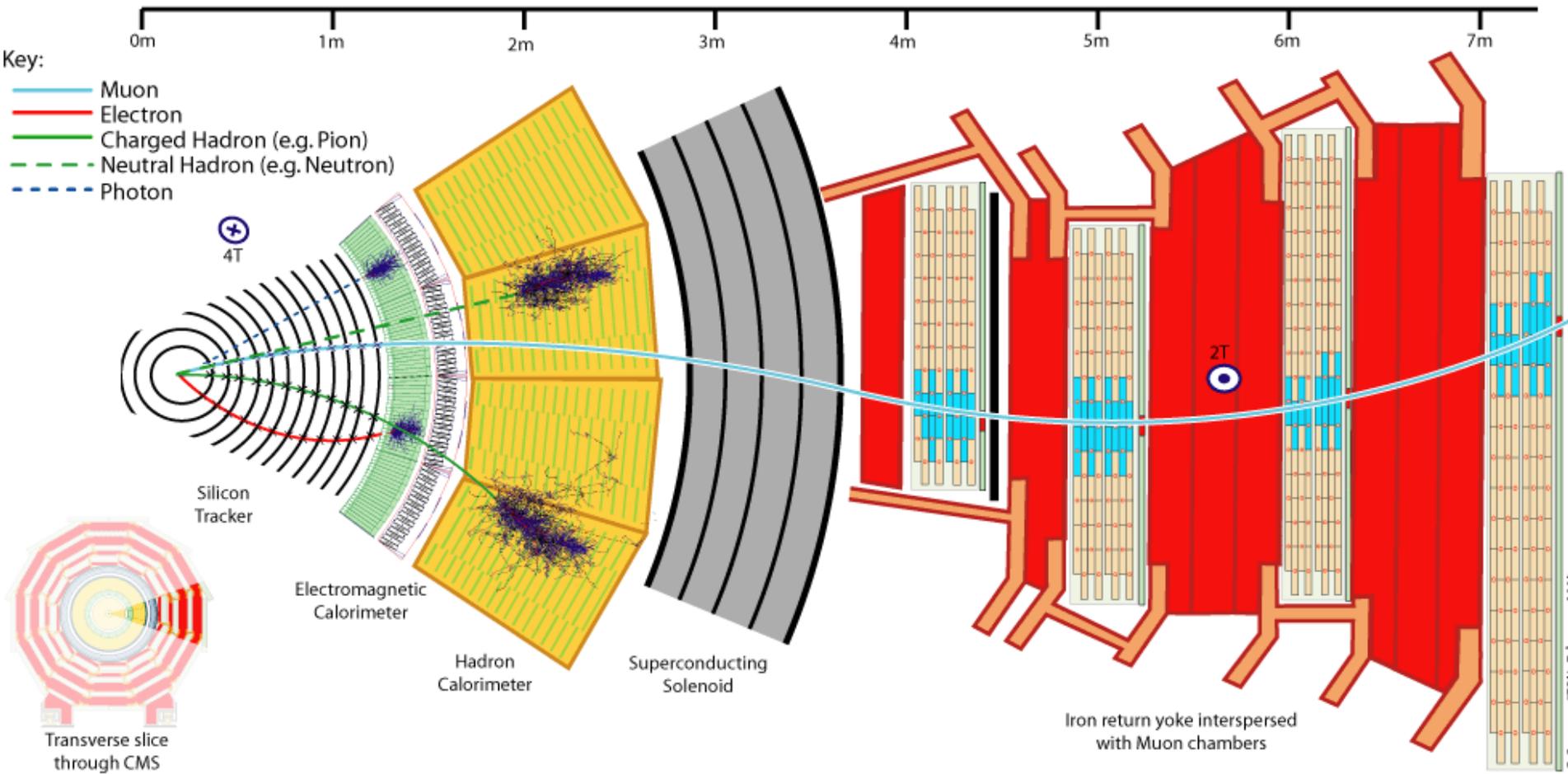


# Teilchen in Materie

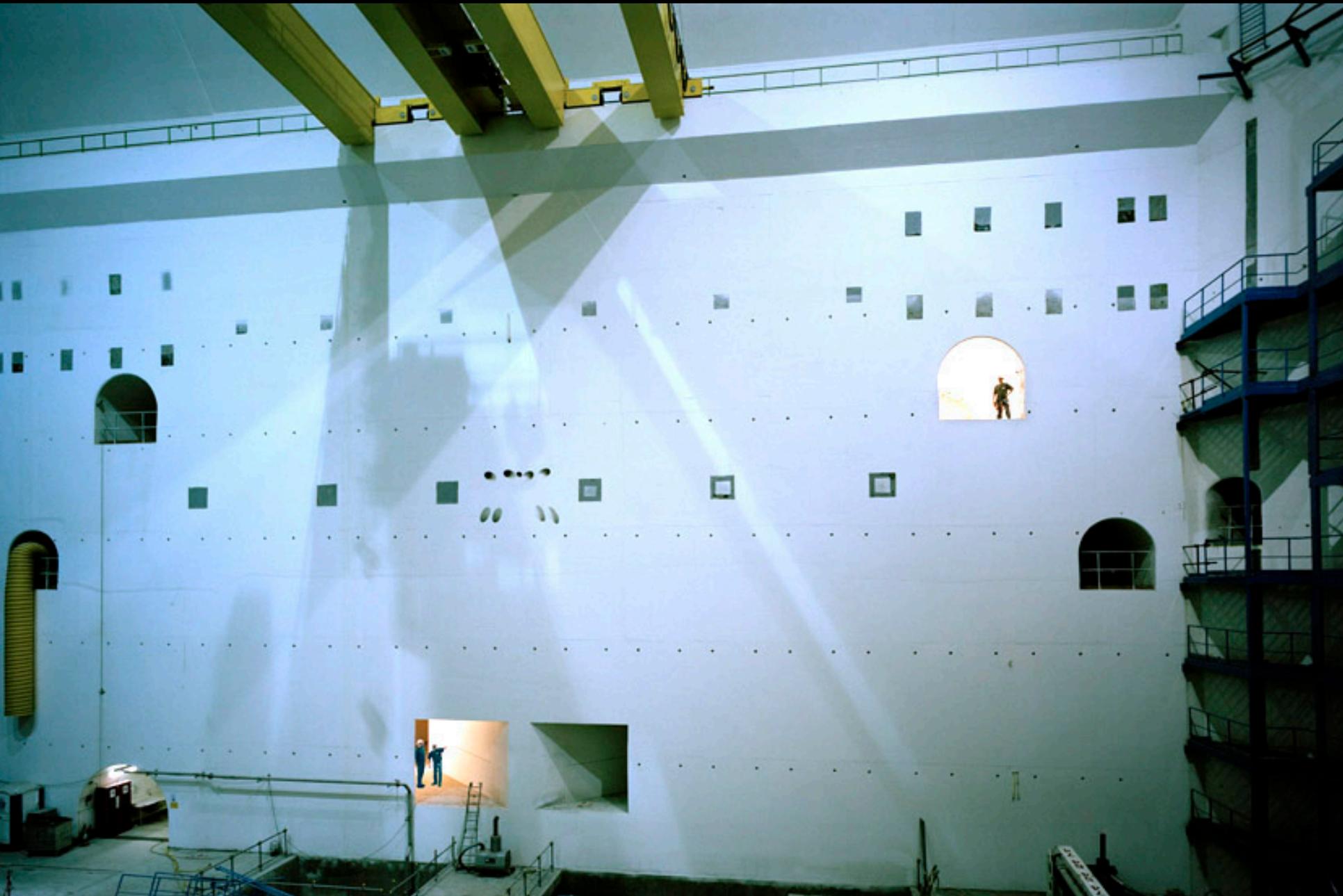
Verschiedenen Teilchen reagieren unterschiedlich mit Materie.



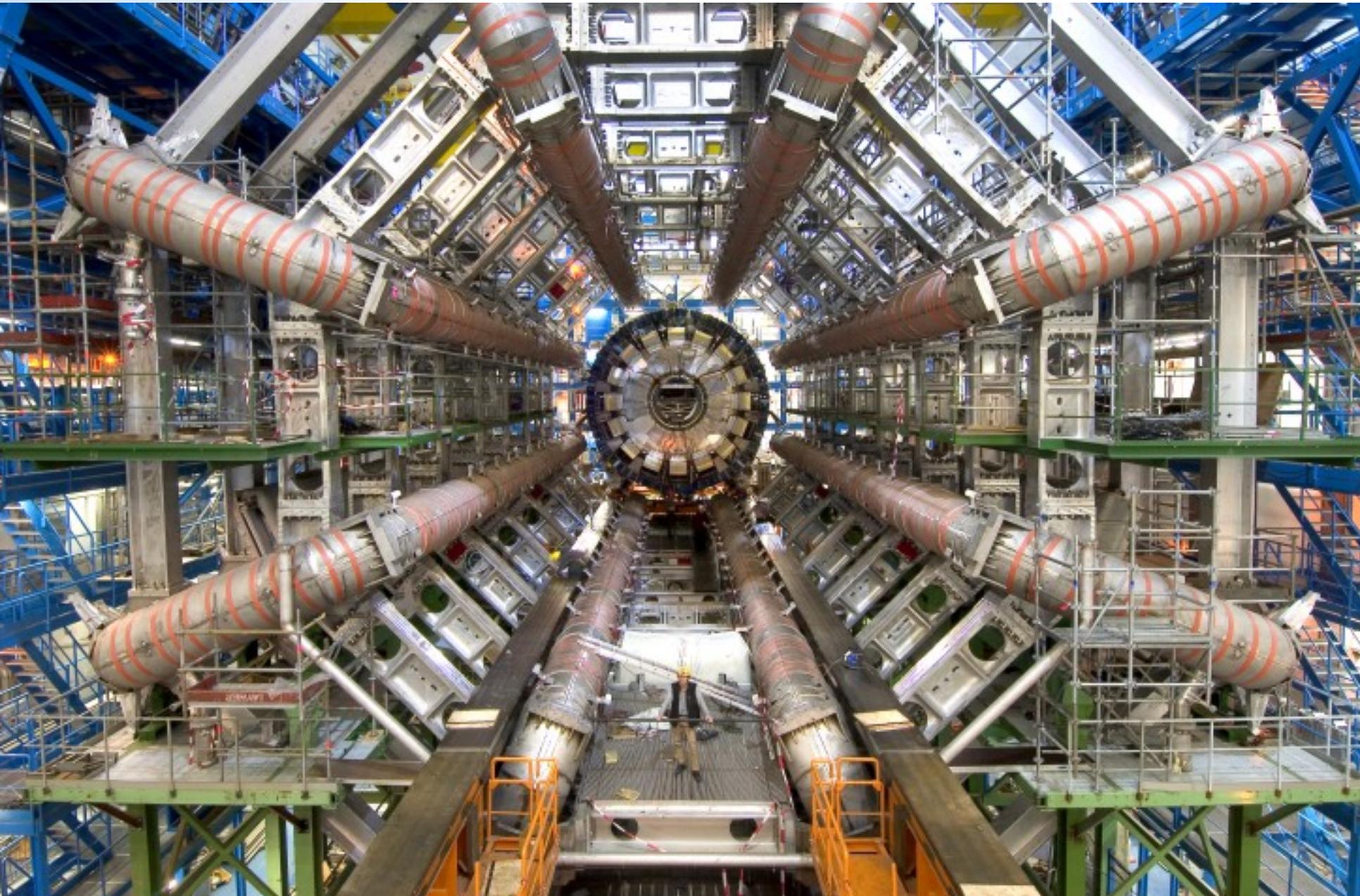
# Die Zwiebelschalenstruktur eines Detektors



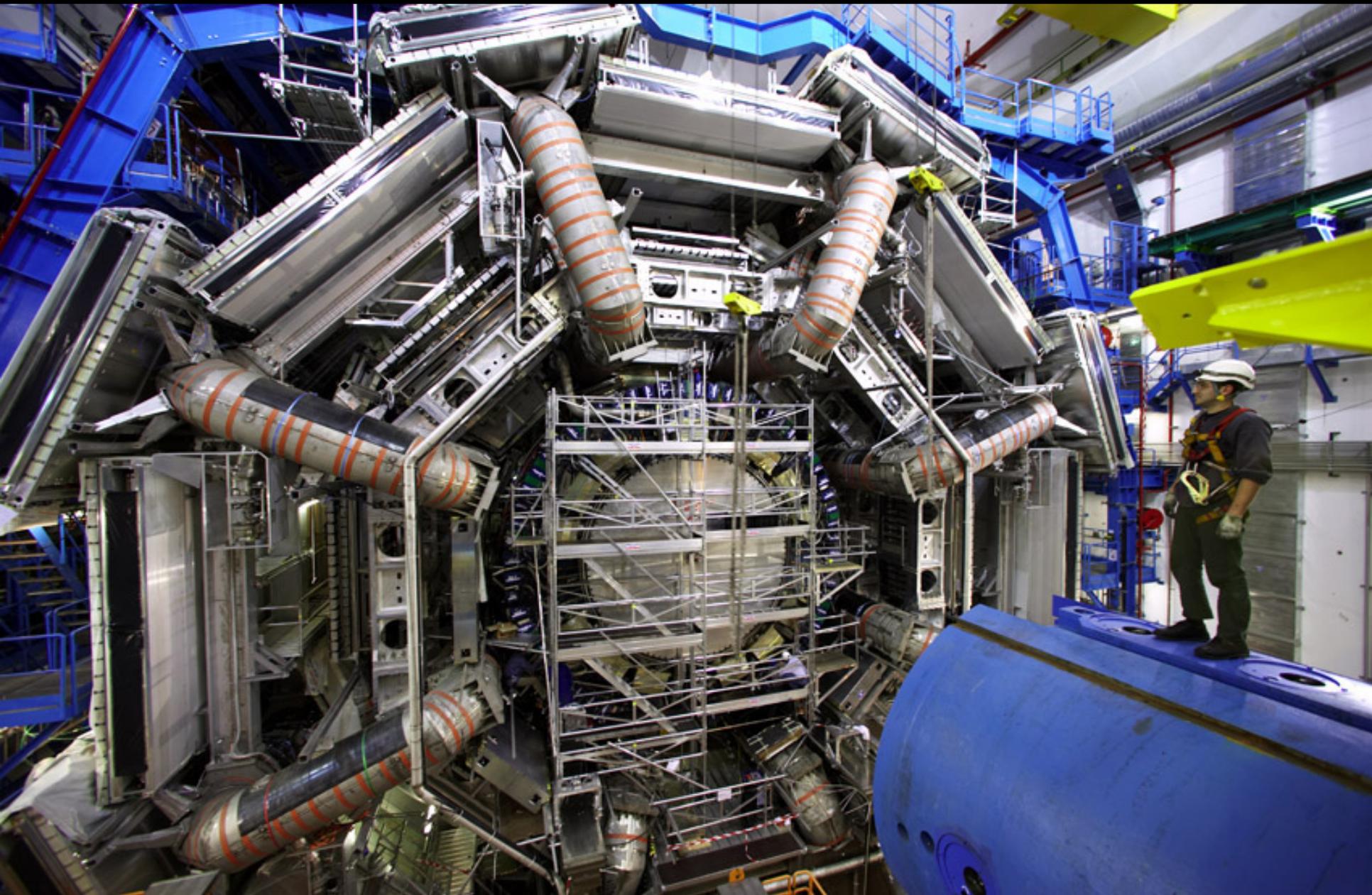
# Noch leere, unterirdische Halle des ATLAS-Experiments



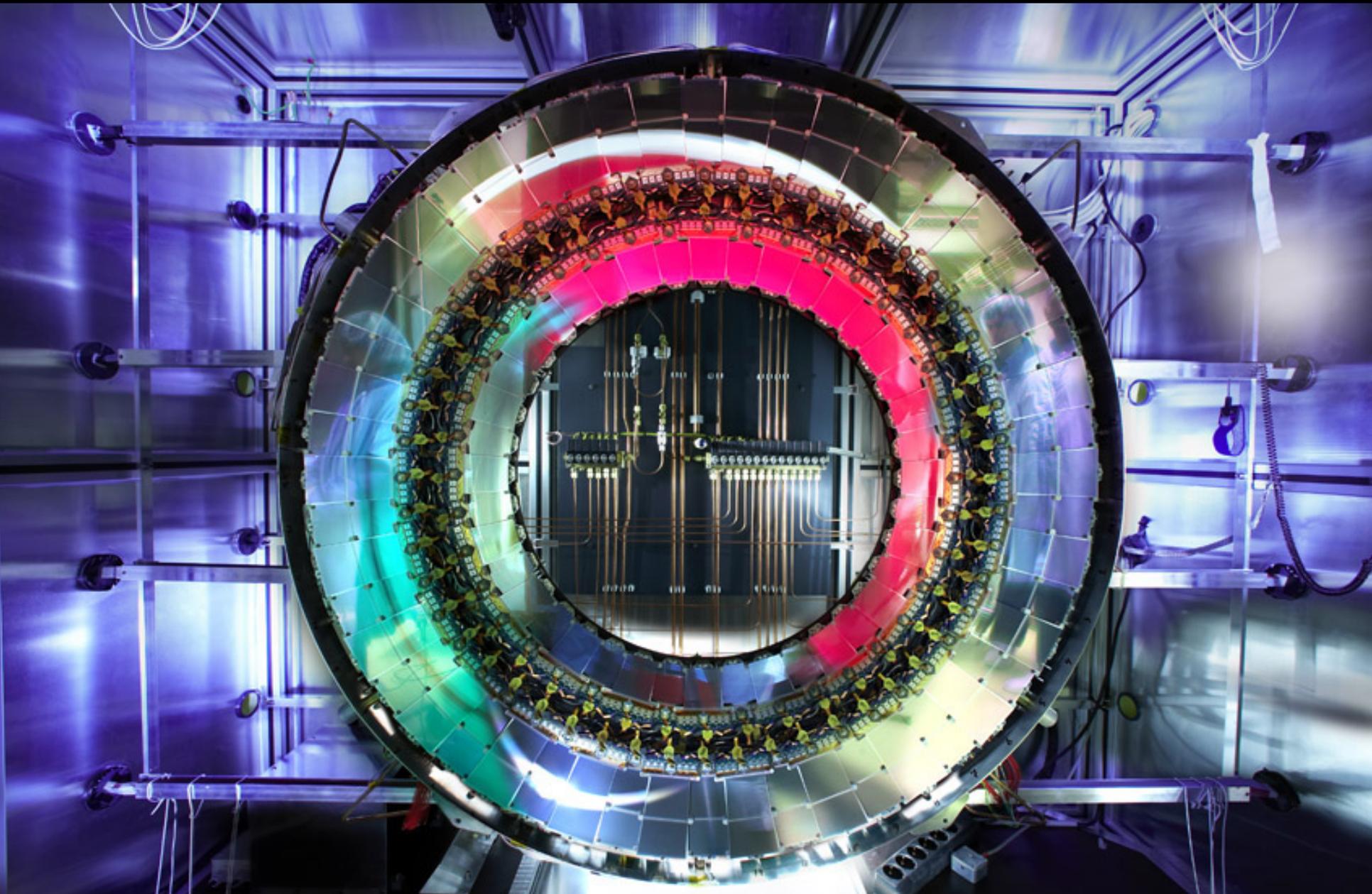
# ATLAS: zu Beginn des Zusammenbaus

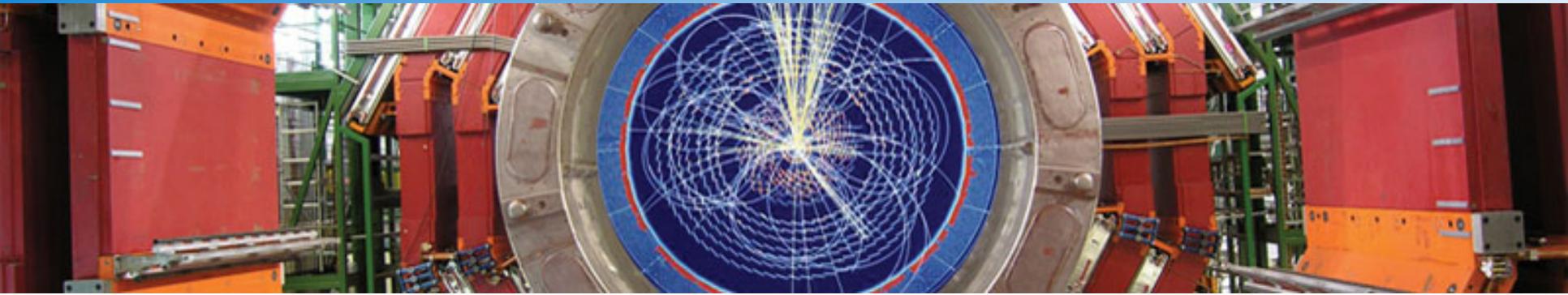


# Der ATLAS-Detektor kurz vor der Vollendung

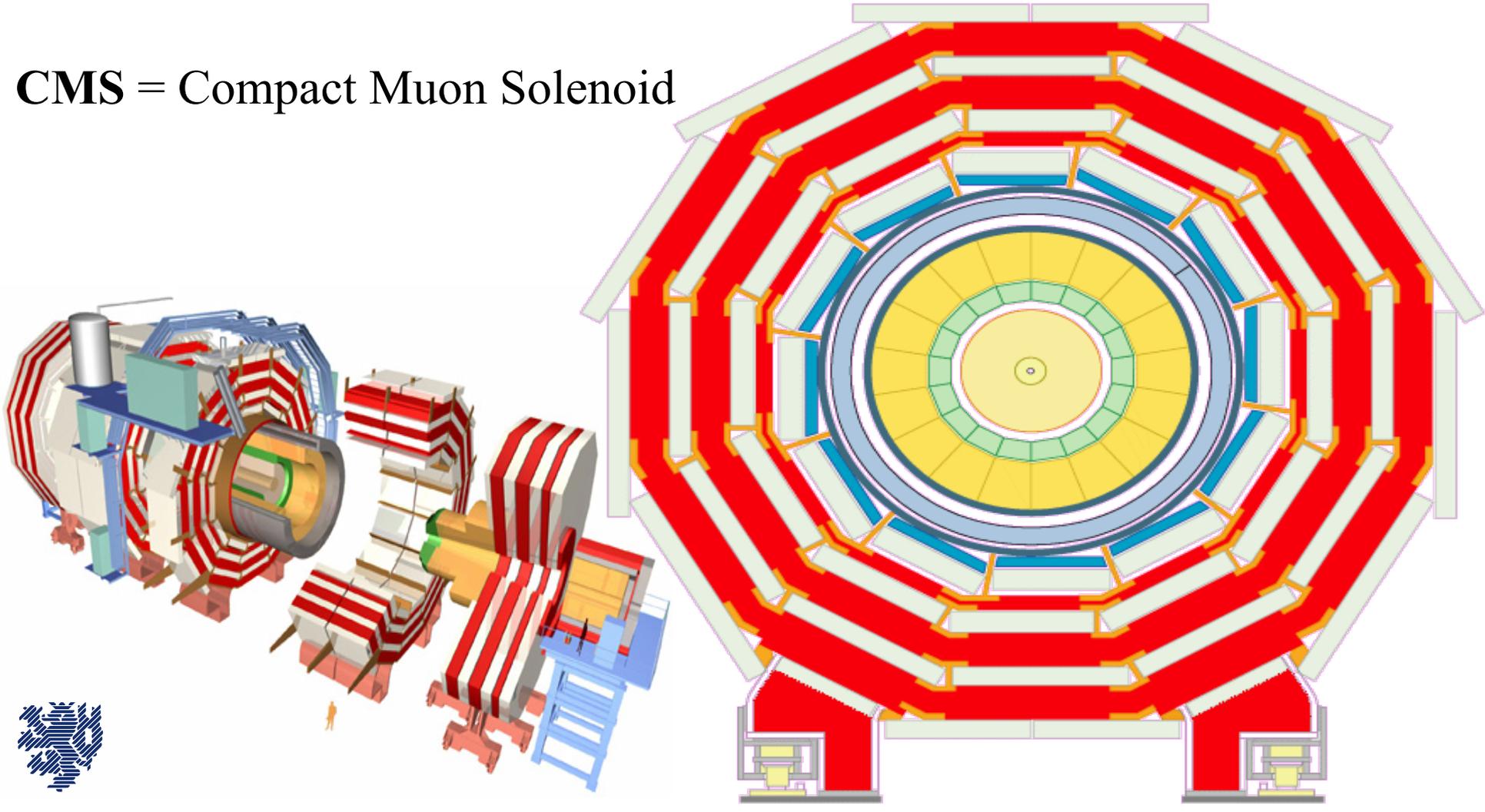


# ATLAS Silizium-Detektor



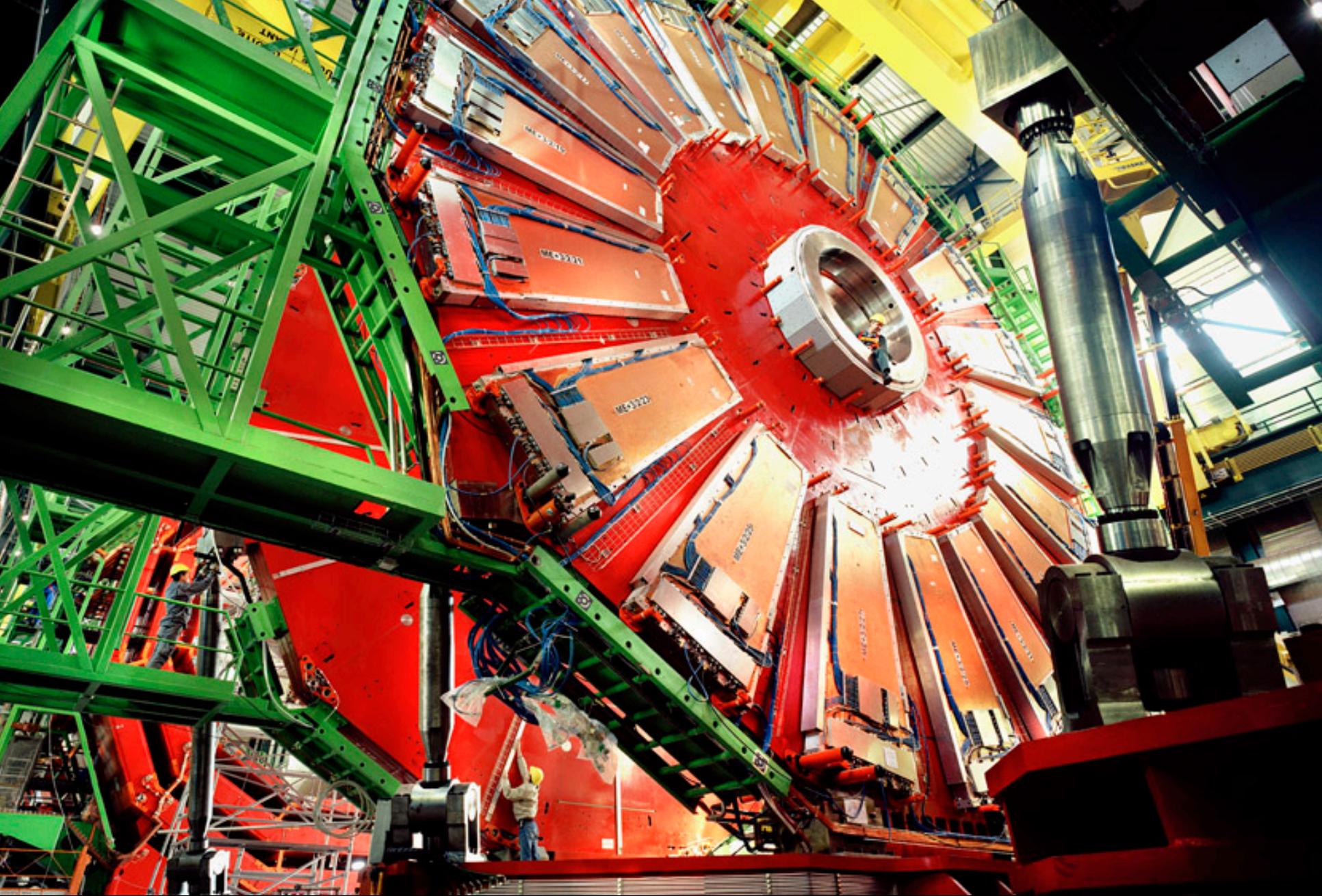


CMS = Compact Muon Solenoid

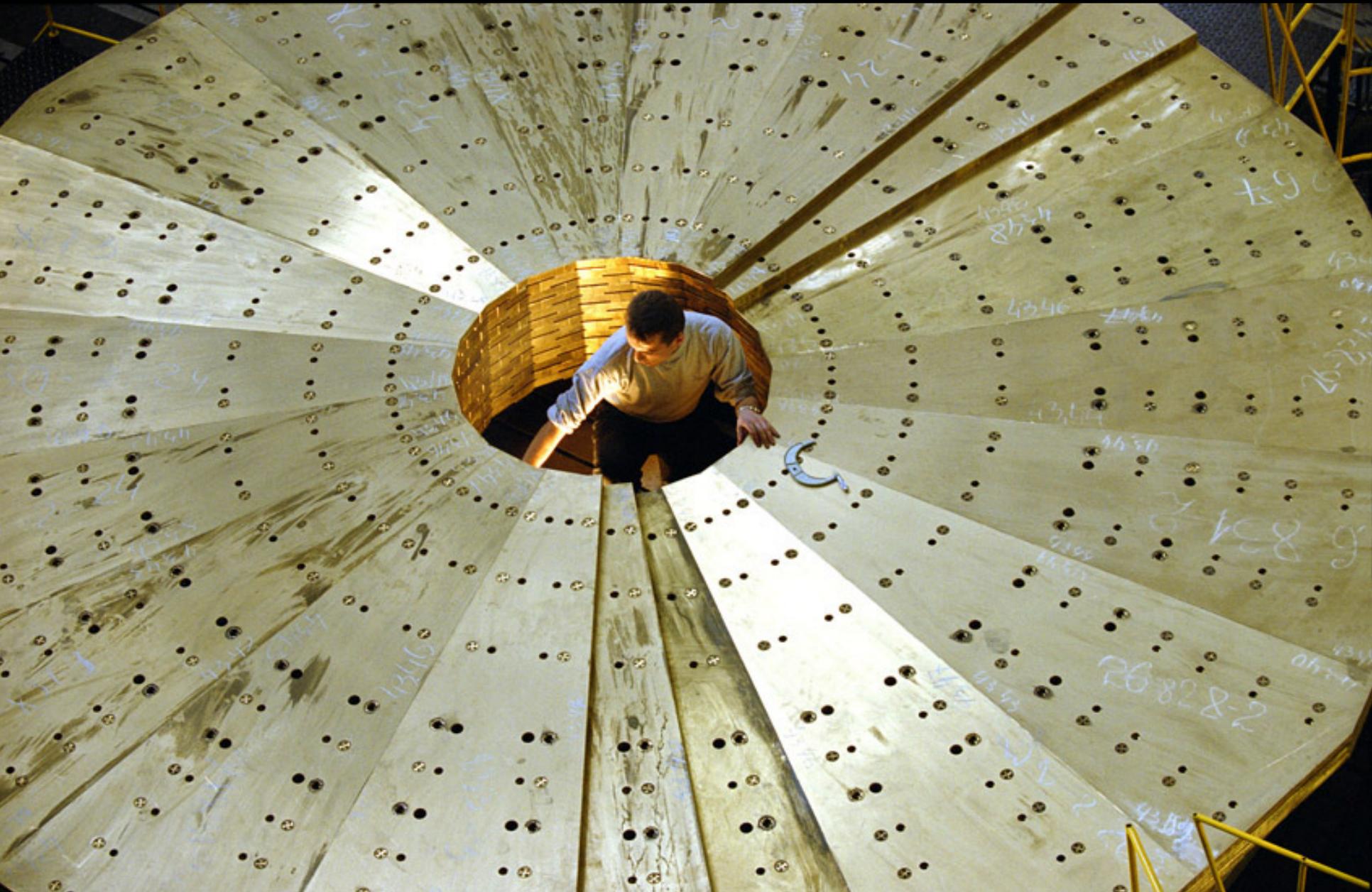


# Einzelne Scheiben des CMS-Experiments

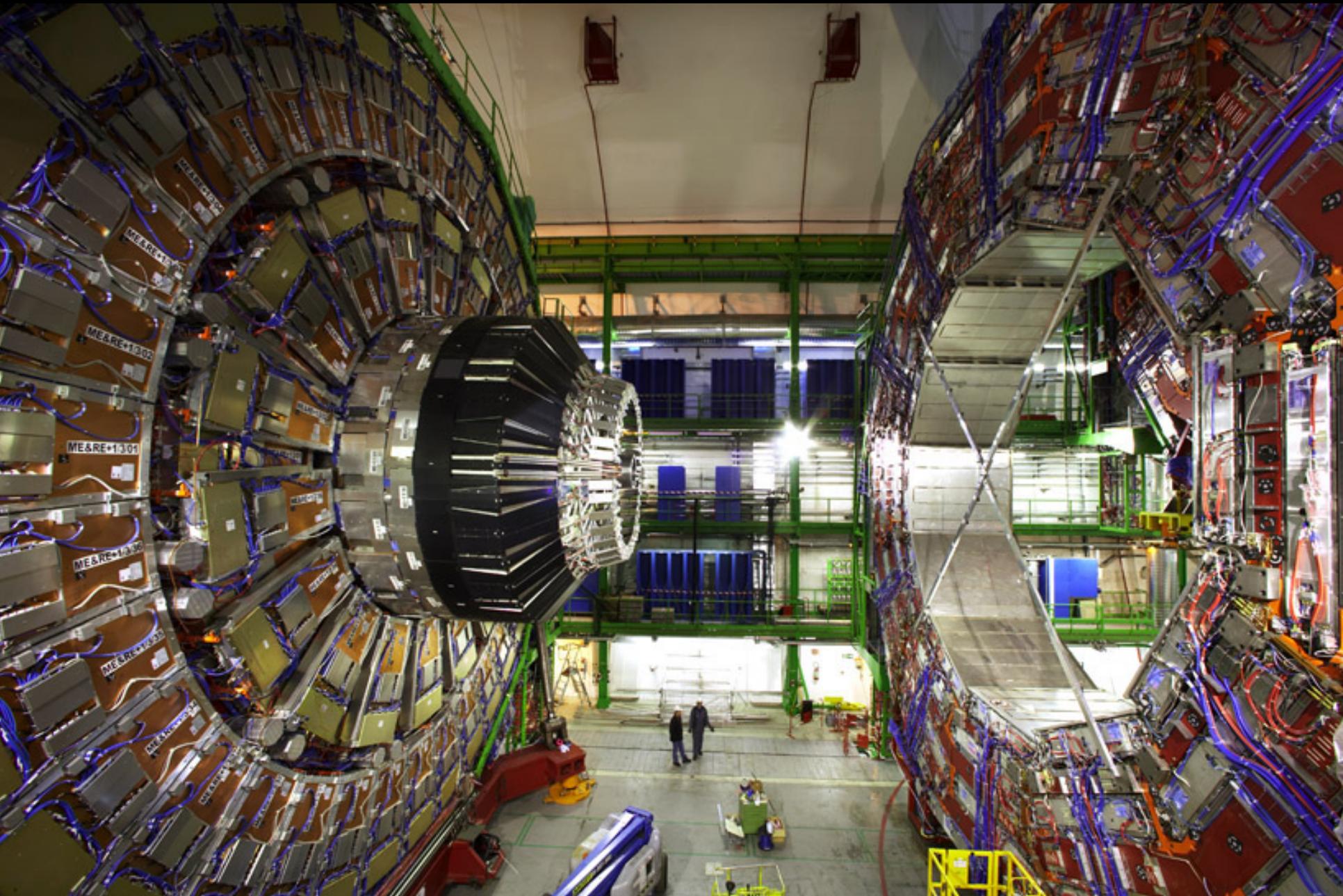




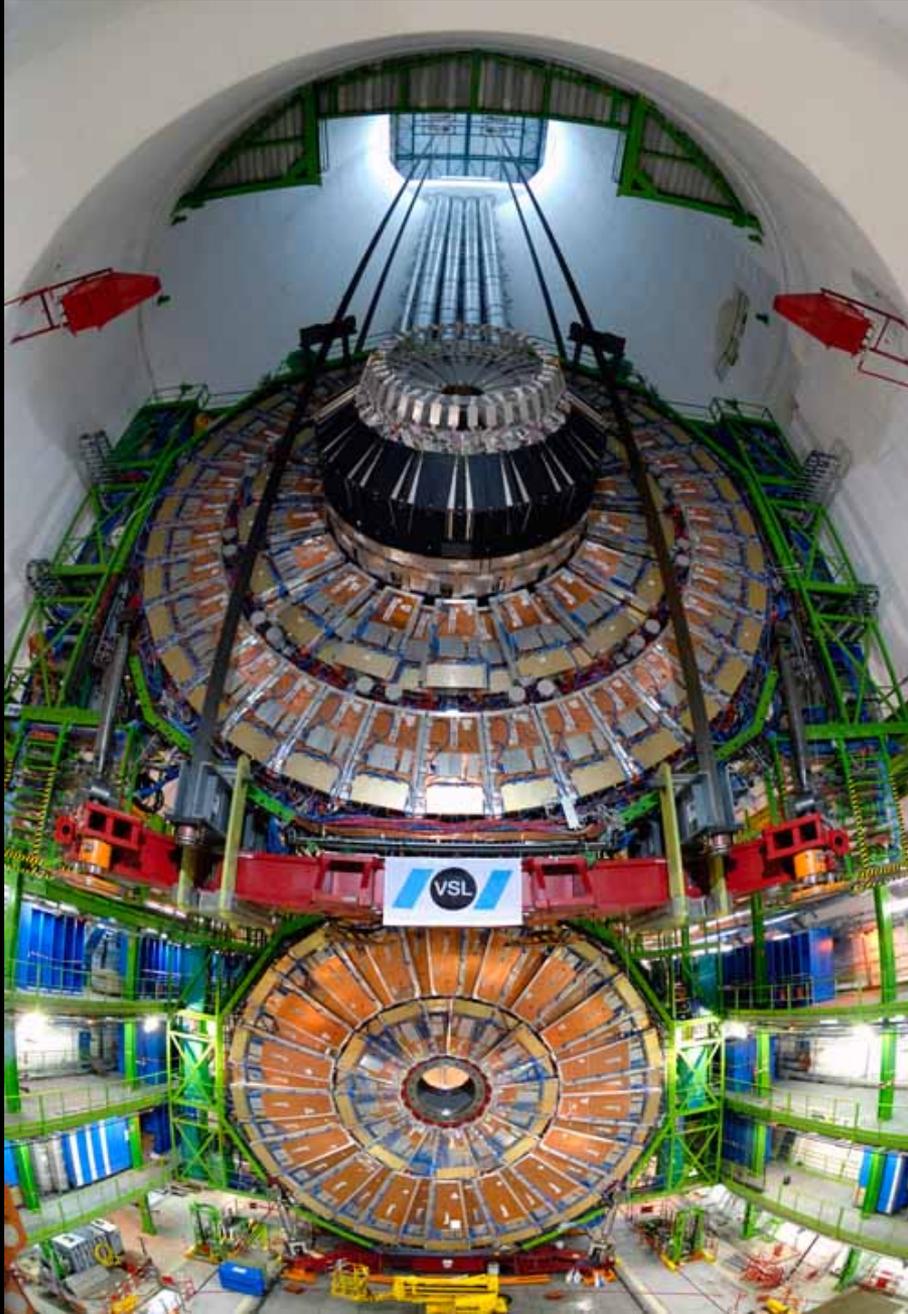
# Endkappe des Hadron-Kalorimeters von CMS



# Endkappe und „Rad“ des CMS-Detektors



# Zusammenbau von CMS 100 m unter der Erde



# Ereignis mit $Z \rightarrow e^+e^-$ Kandidat

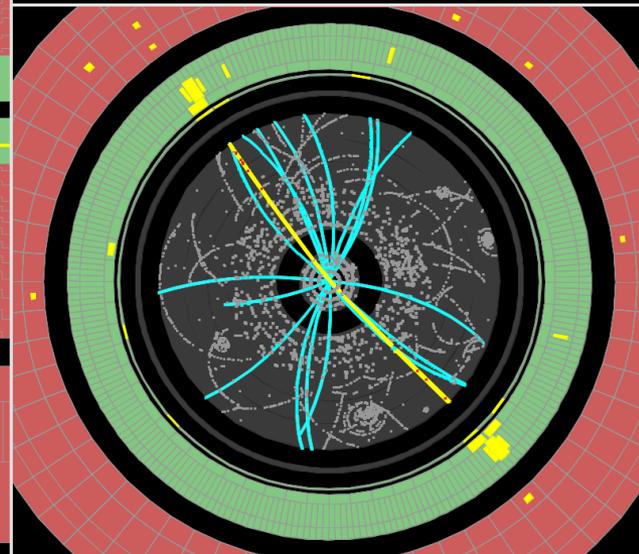
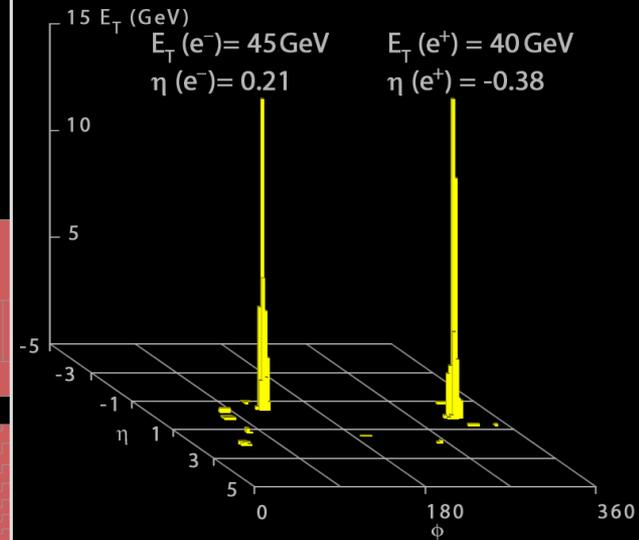


Run Number: 154817, Event Number: 968871

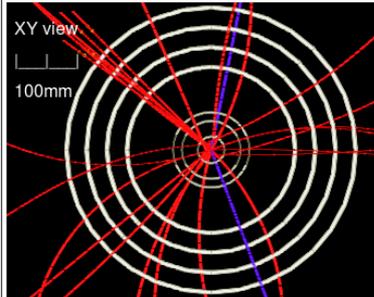
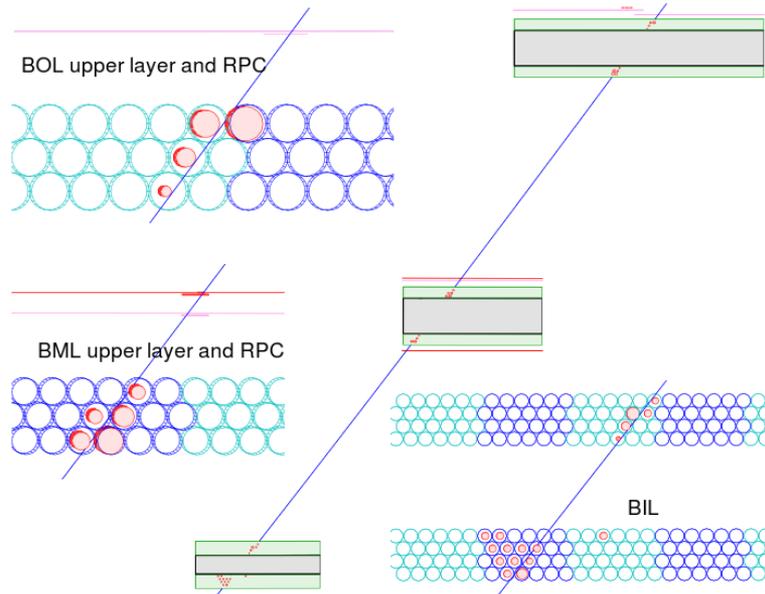
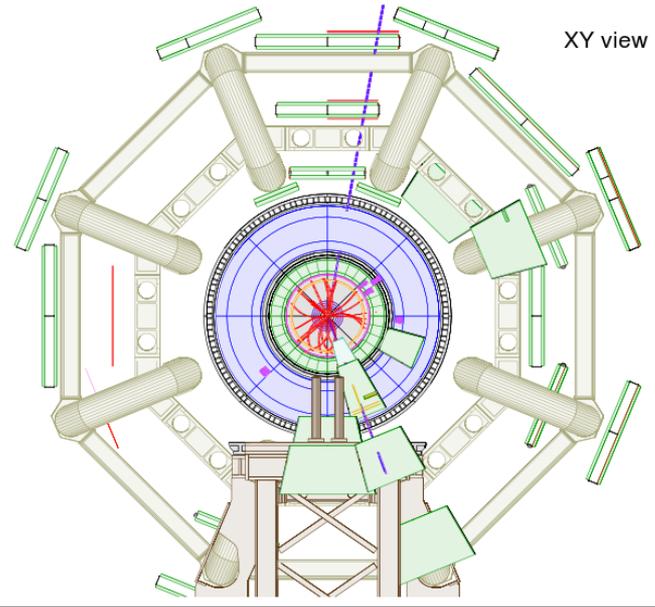
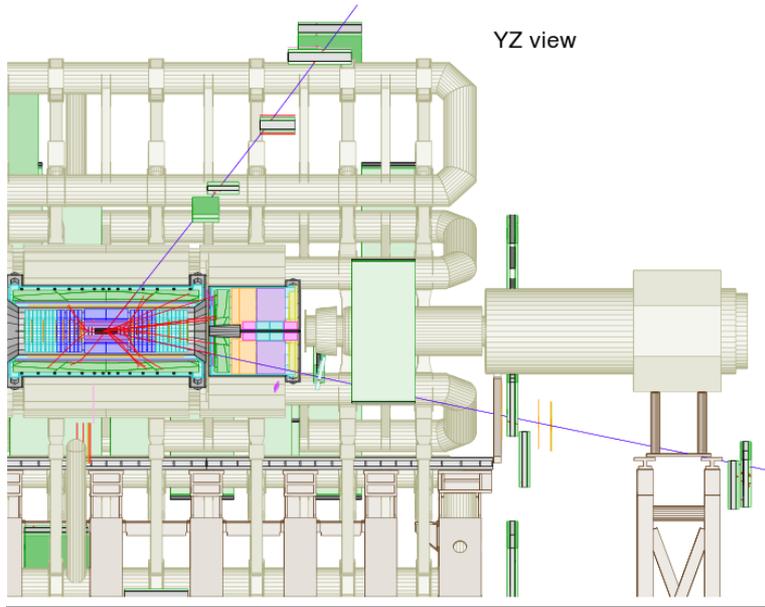
Date: 2010-05-09 09:41:40 CEST

$M_{ee} = 89 \text{ GeV}$

$Z \rightarrow ee$  candidate in 7 TeV collisions



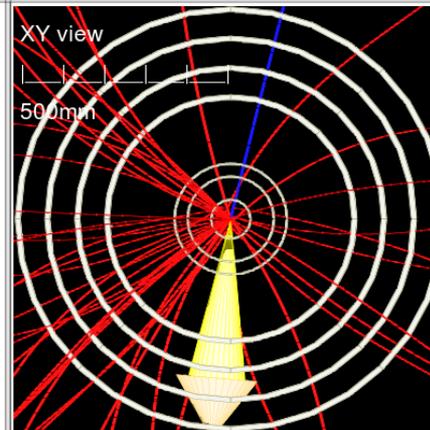
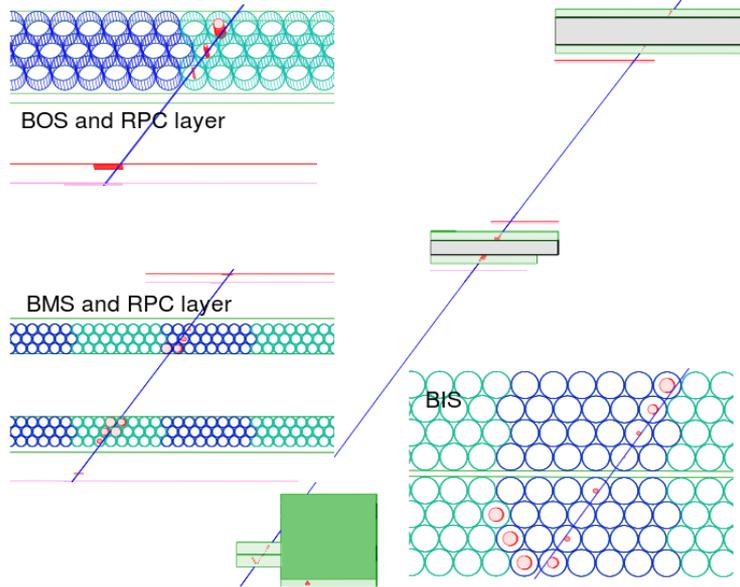
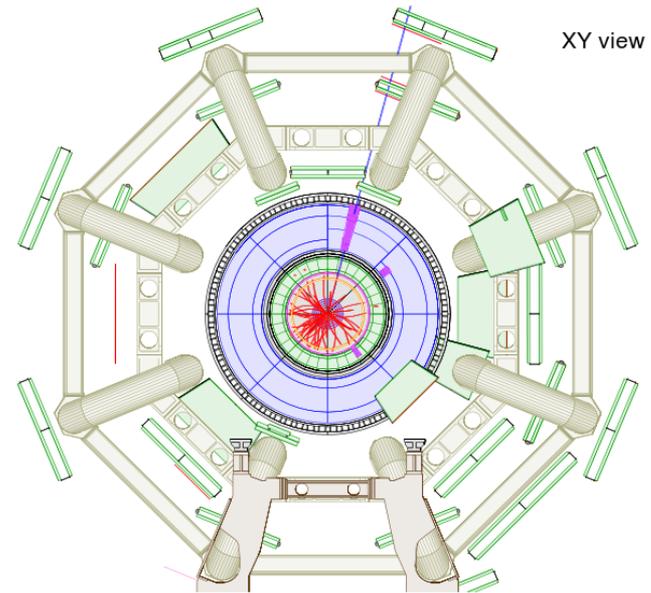
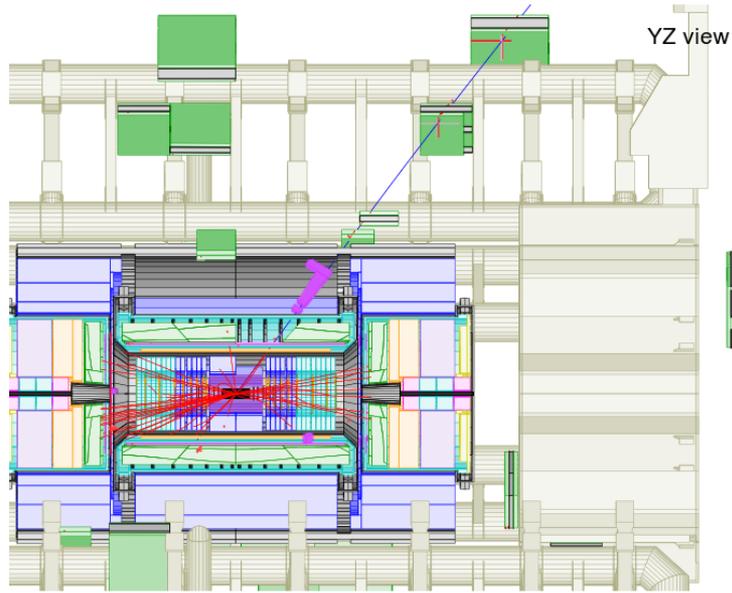
# Ereignis mit $Z \rightarrow \mu^+\mu^-$ Kandidat



**Z- $\mu\mu$  candidate in 7 TeV collisions**

Run Number: 154822, Event Number: 14321500  
 Z:  $\text{Minv}=87$  GeV,  $\text{Pt}=26$  GeV  
 $\text{Pt}(\mu^+) = 45$  GeV,  $\eta=2.2$   
 $\text{Pt}(\mu^-) = 27$  GeV,  $\eta=0.7$

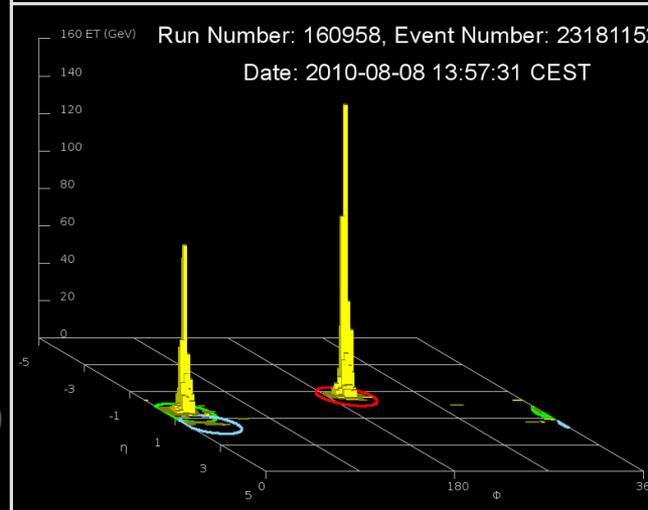
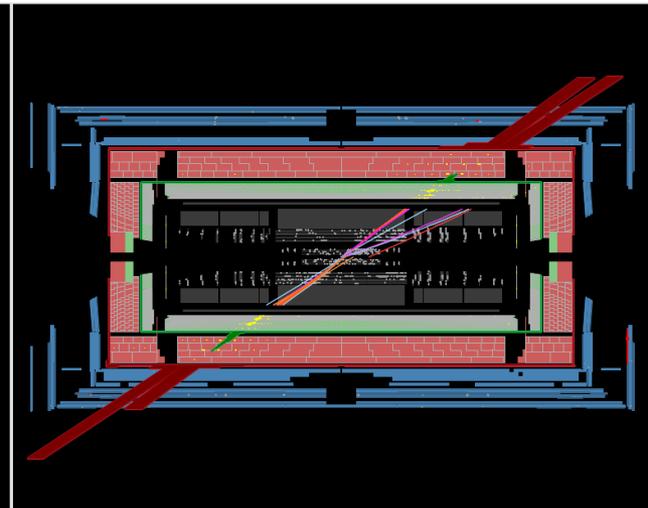
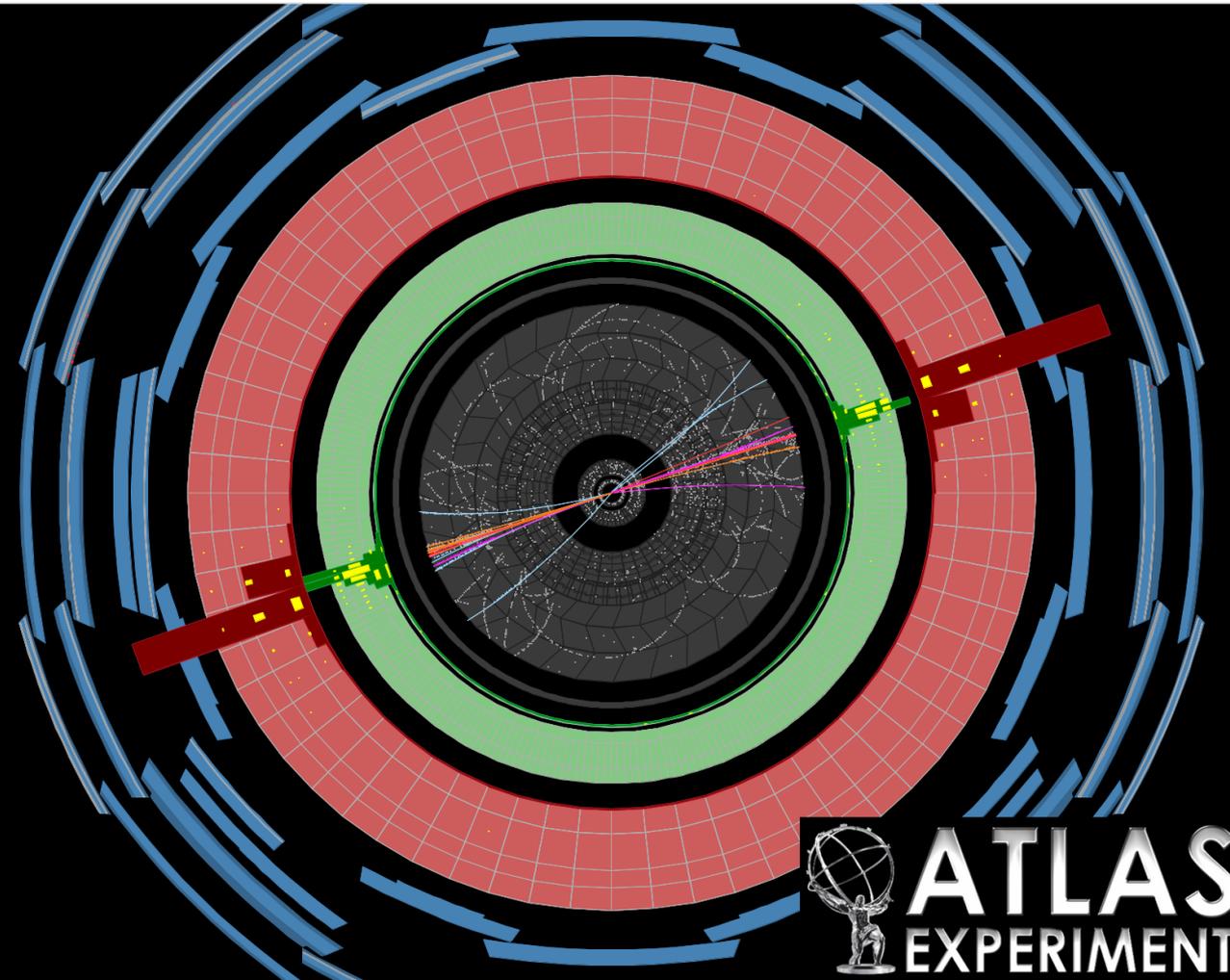
# Ereignis mit $W^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ Kandidat



$W \rightarrow \mu \nu$  candidate in 7 TeV collisions

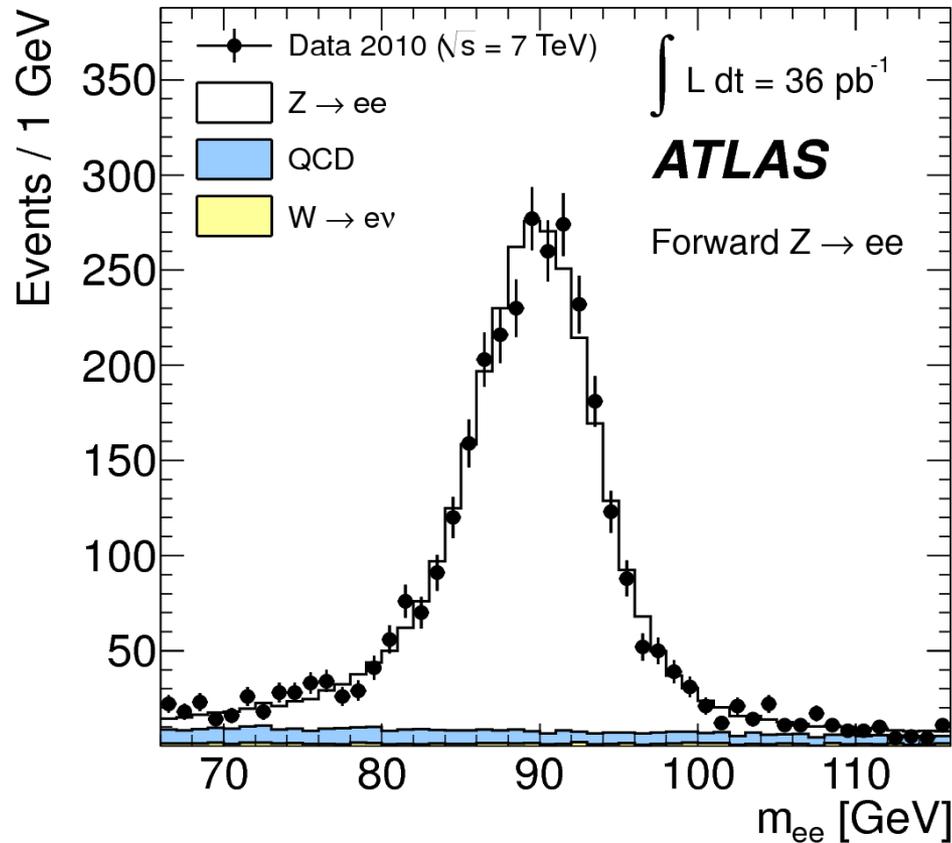
Run Number: 152221, Event Number: 383185  
 Date: 2010-04-01 00:31:22 CEST  
 $PT(\mu^+) = 29 \text{ GeV}$ ,  $\eta = 0.66$   
 $ET_{\text{mis}} = 24 \text{ GeV}$   
 $MT = 53 \text{ GeV}$

# Aus Quarks werden Jets: Zwei-Jet-Ereignis



- 1<sup>st</sup> jet (ordered by  $p_T$ ):  $p_T = 890$  GeV,  $y = -0.6$ ,  $\phi = -2.8$
- 2<sup>nd</sup> jet:  $p_T = 760$  GeV,  $y = 0.6$ ,  $\phi = 0.3$
- 3<sup>rd</sup> jet:  $p_T = 30$  GeV,  $y = 1.5$ ,  $\phi = 0.4$

# Invariante Massenverteilung



relativistische Energie-Impuls-Relation:

$$m^2 c^4 = E^2 - p^2 c^2$$

invariante Masse

d.h. ändert sich nicht bei Wechsel des Bezugssystems



# Zusammenfassung

- Nur wenige Teilchensorten erreichen den Detektor.
- Gemessen werden:
  - Spuren geladener Teilchen → Spurdetektoren
  - Energien: Kalorimeter, Teilchen werden gestoppt
  - hochenergetische Quarks → Jets
- „Schöne“ Signatur:  $Z^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$   
→ weiter im Projektkurs