



**EXPERIMENTE &  
MESSUNG**

---

Grundprinzipien der Experimente

LHC & ATLAS

Einführung in die Messung

# GRUNDPRINZIPIEN DER EXPERIMENTE

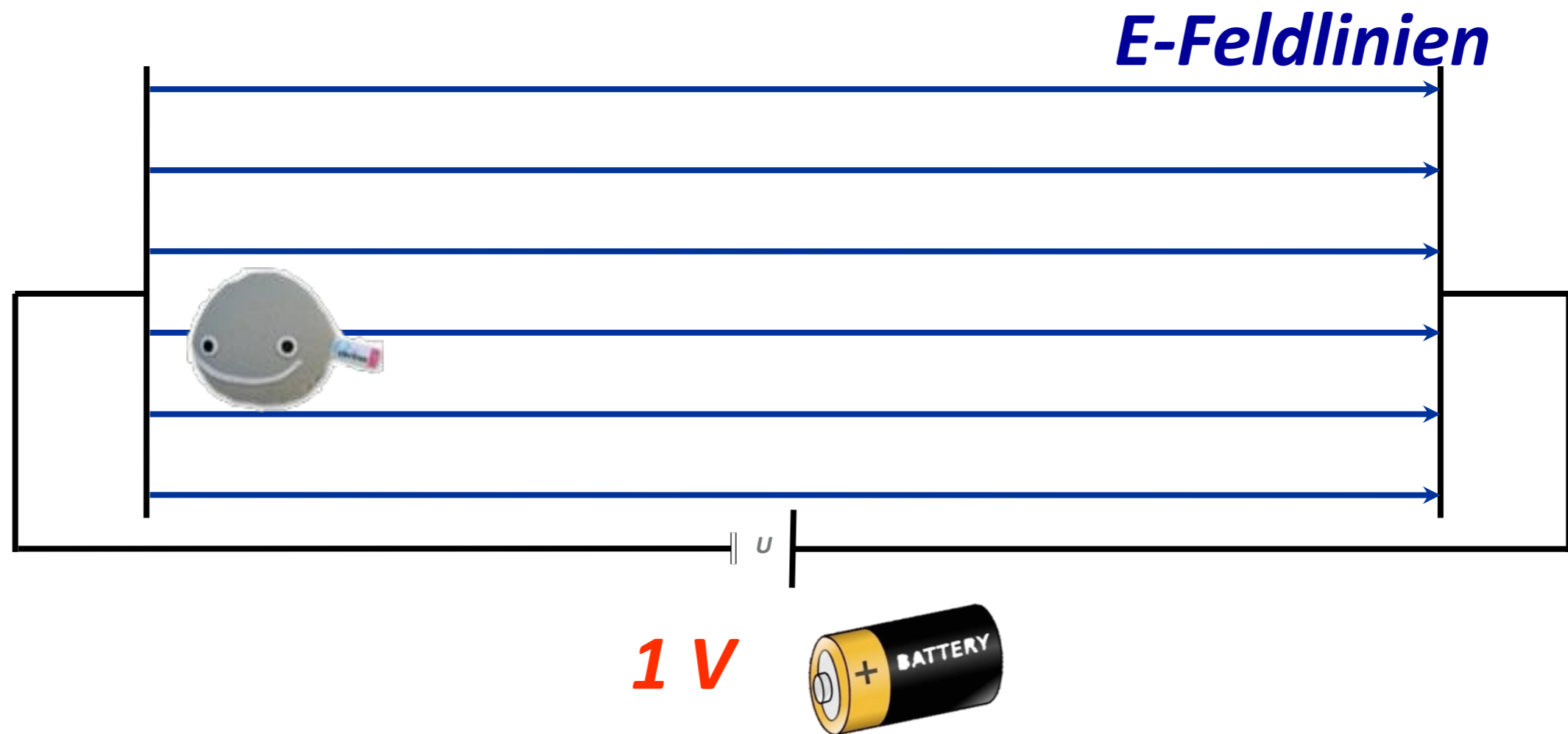
---

- ▶ Teilchen werden
  - ▶ beschleunigt -> erhalten kinetische Energie  $E$
  - ▶ zur Kollision gebracht -> Umwandlung in Masse ( $E=mc^2$ )
- ▶ Neue Teilchen
  - ▶ entstehen
  - ▶ werden aufgezeichnet -> Detektoren
  - ▶ werden identifiziert -> statistische Analyse

# TEILCHEN BESCHLEUNIGEN

---

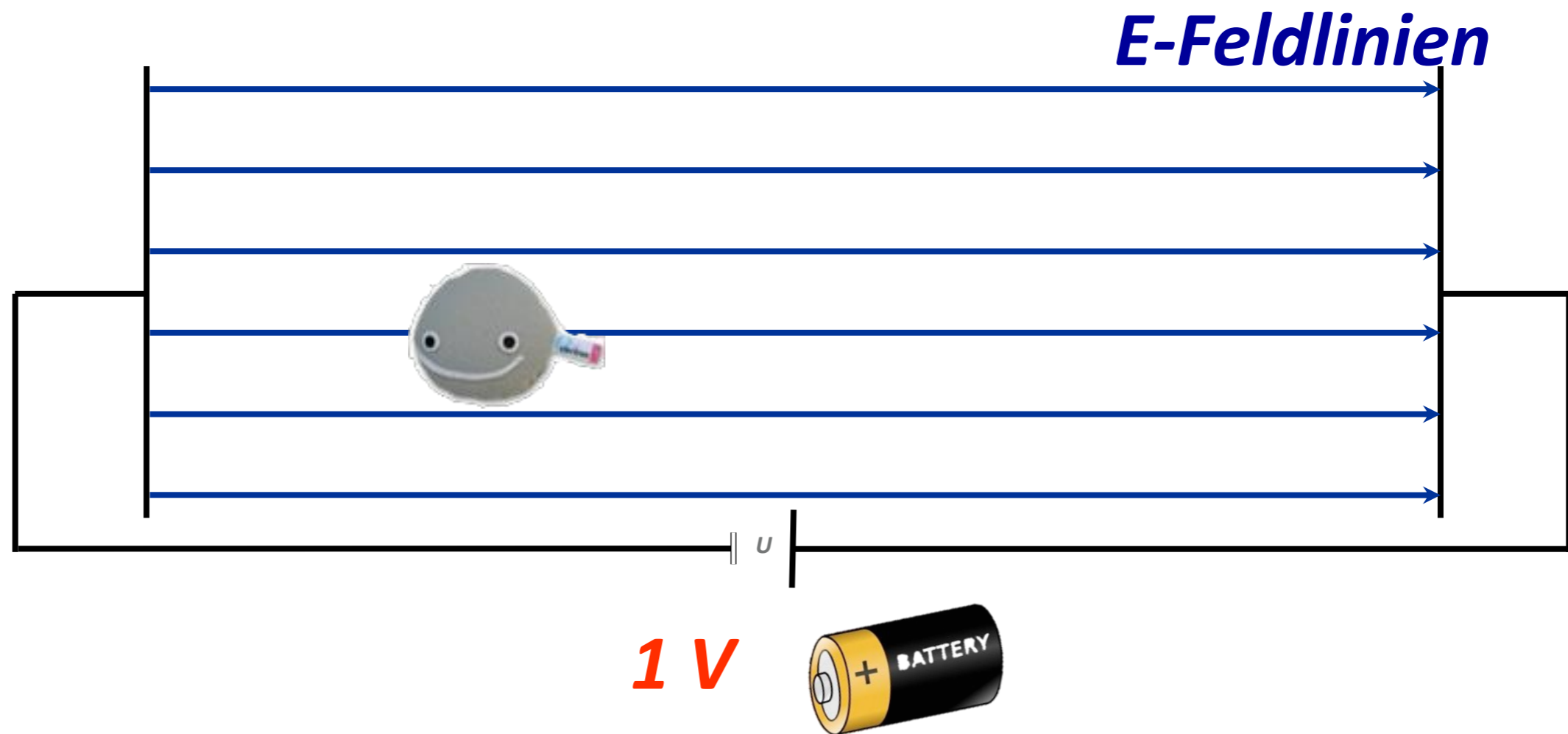
- ▶ geladene Teilchen (z.B. Elektronen) werden im E-Feld entlang der Feldlinien beschleunigt



# TEILCHEN BESCHLEUNIGEN

---

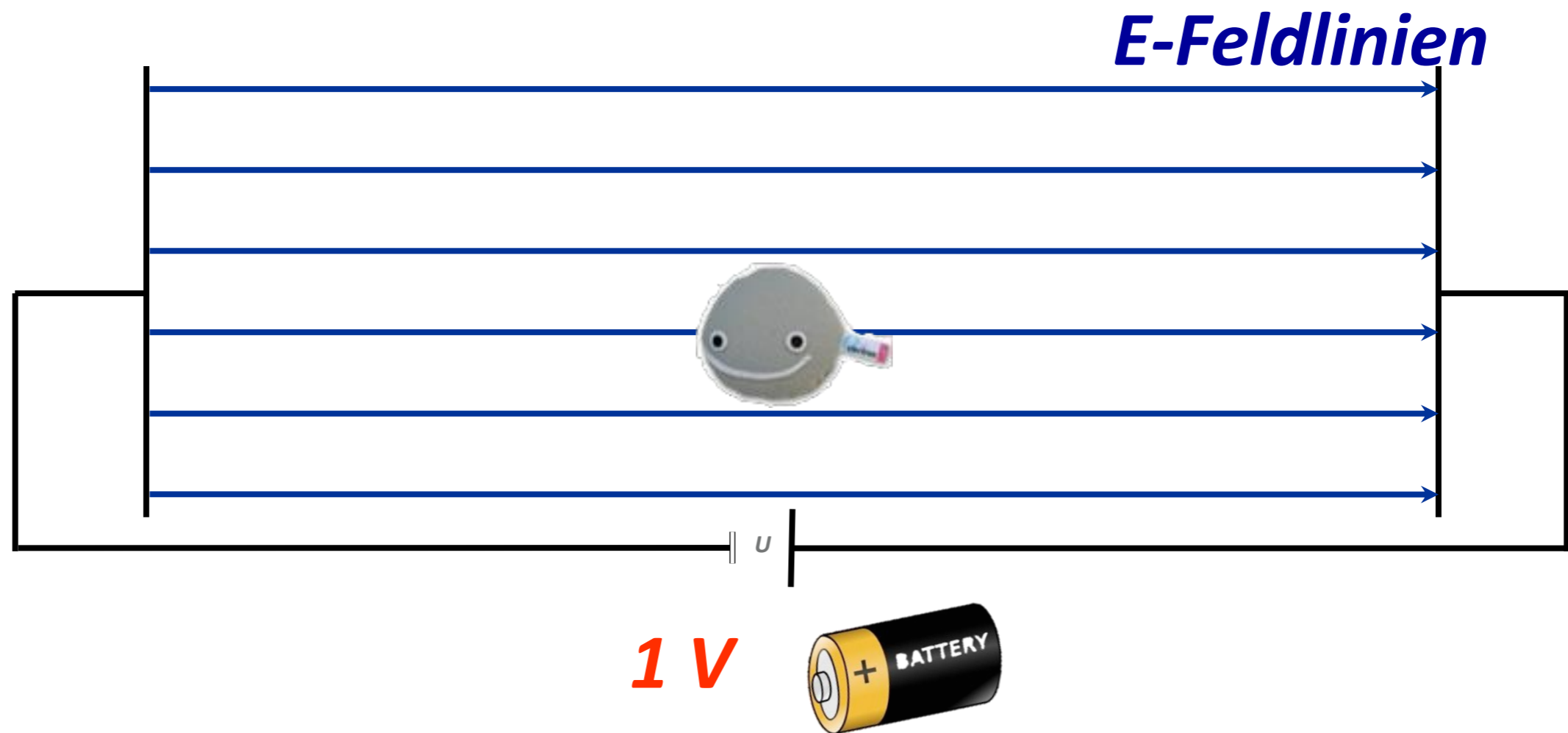
- ▶ geladene Teilchen (z.B. Elektronen) werden im E-Feld entlang der Feldlinien beschleunigt



# TEILCHEN BESCHLEUNIGEN

---

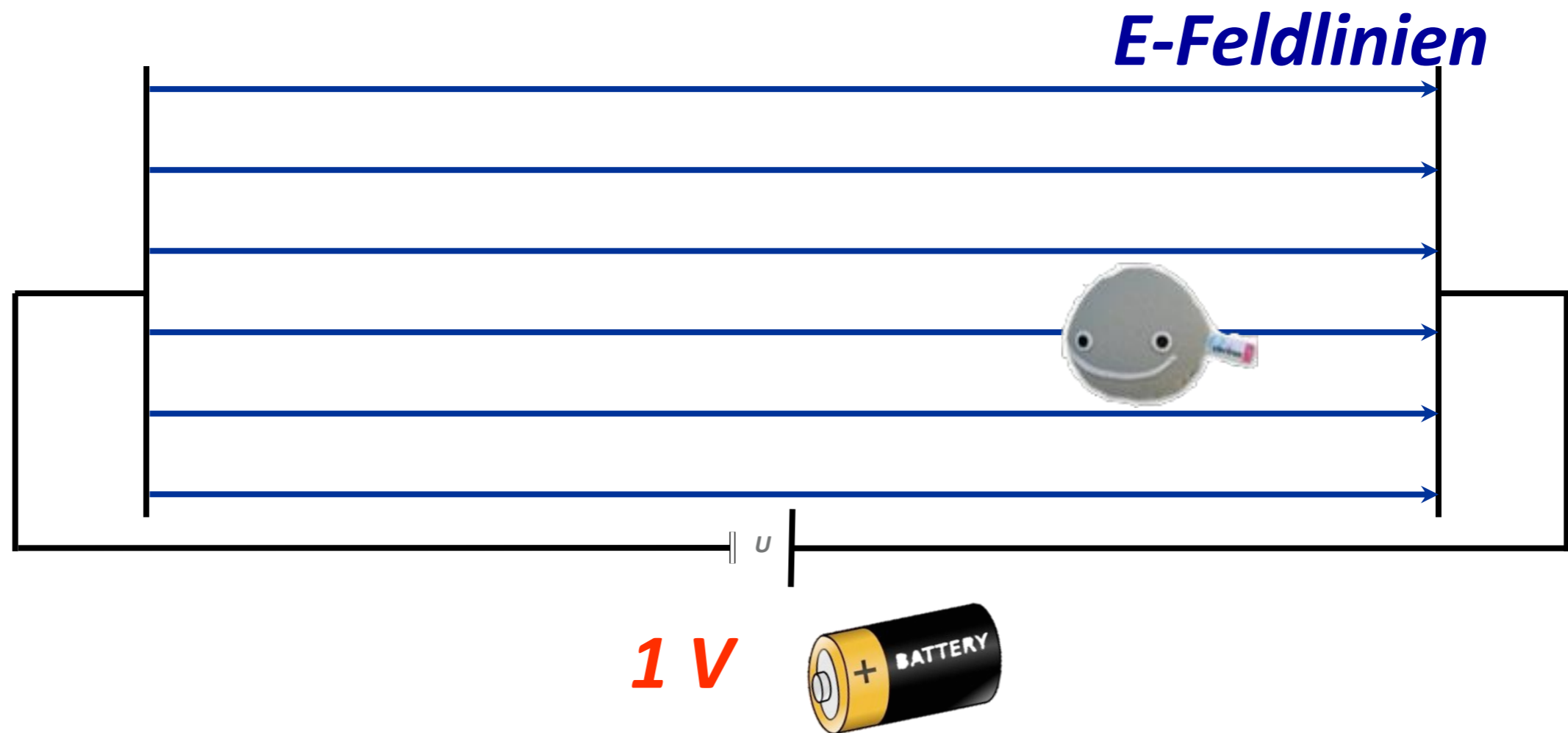
- ▶ geladene Teilchen (z.B. Elektronen) werden im E-Feld entlang der Feldlinien beschleunigt



# TEILCHEN BESCHLEUNIGEN

---

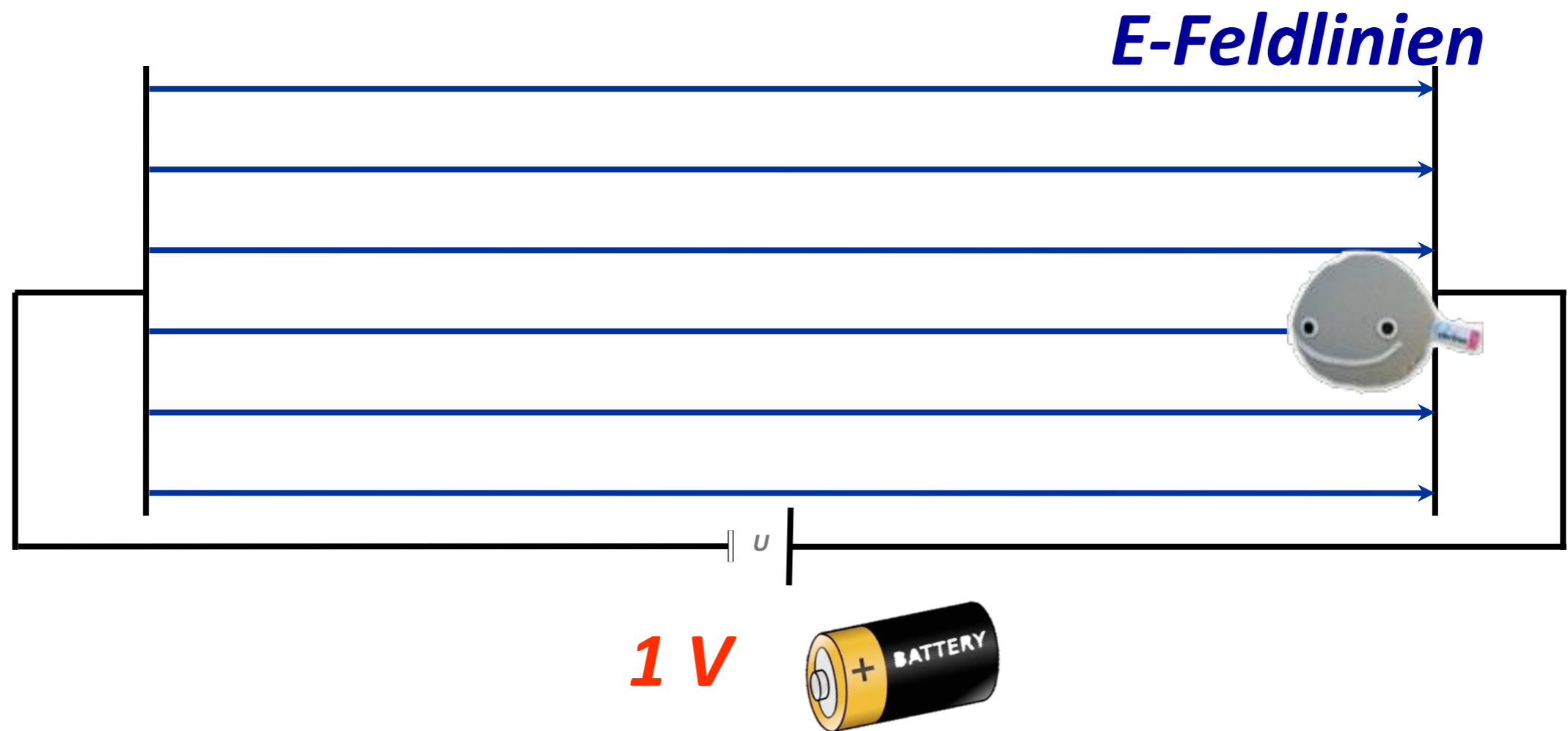
- ▶ geladene Teilchen (z.B. Elektronen) werden im E-Feld entlang der Feldlinien beschleunigt



# TEILCHEN BESCHLEUNIGEN

---

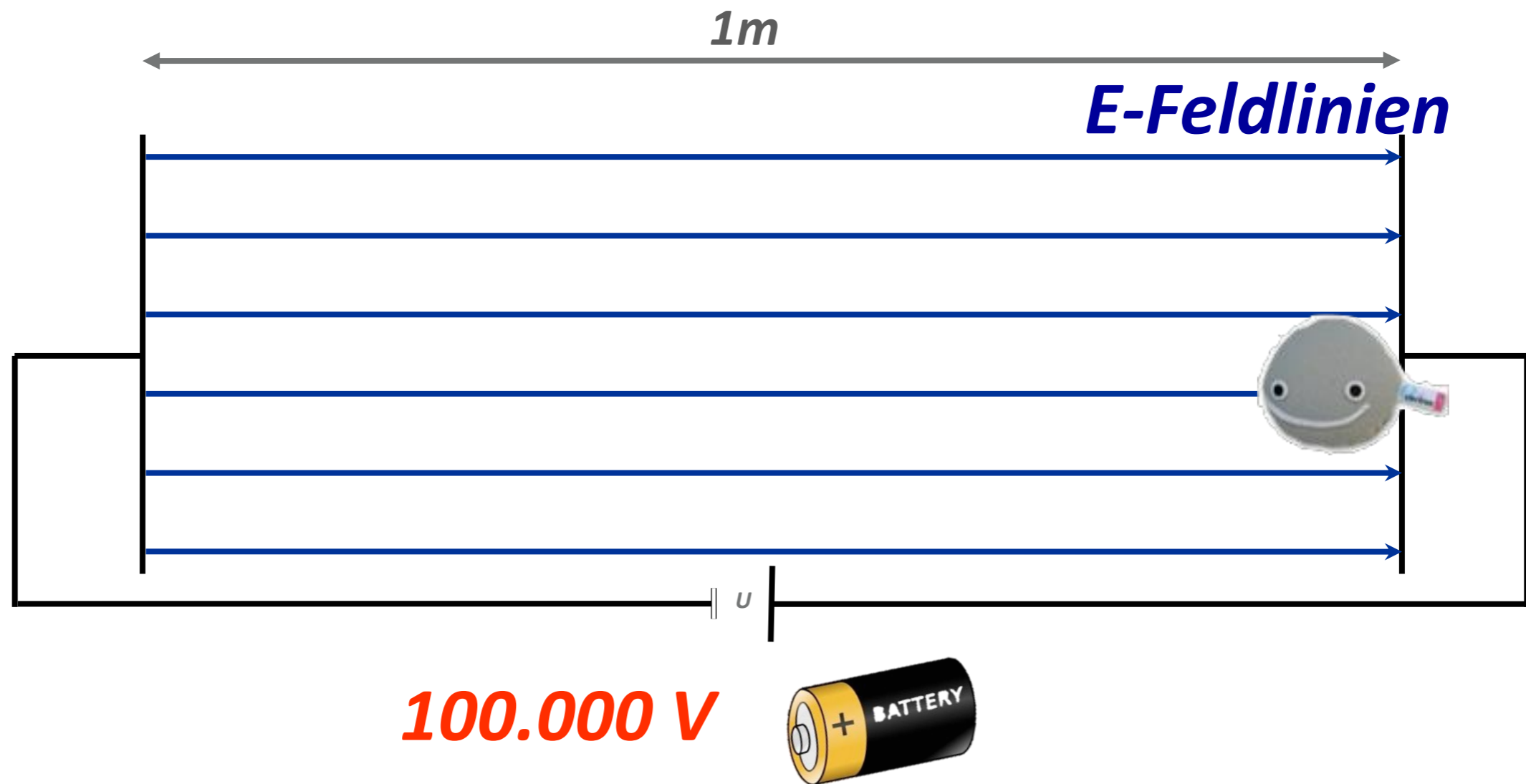
- ▶ geladene Teilchen (z.B. Elektronen) werden im E-Feld entlang der Feldlinien beschleunigt
- ▶ ...und erhalten die Energie  $E = q \cdot U$  hier: 1 eV



# TEILCHEN BESCHLEUNIGEN

---

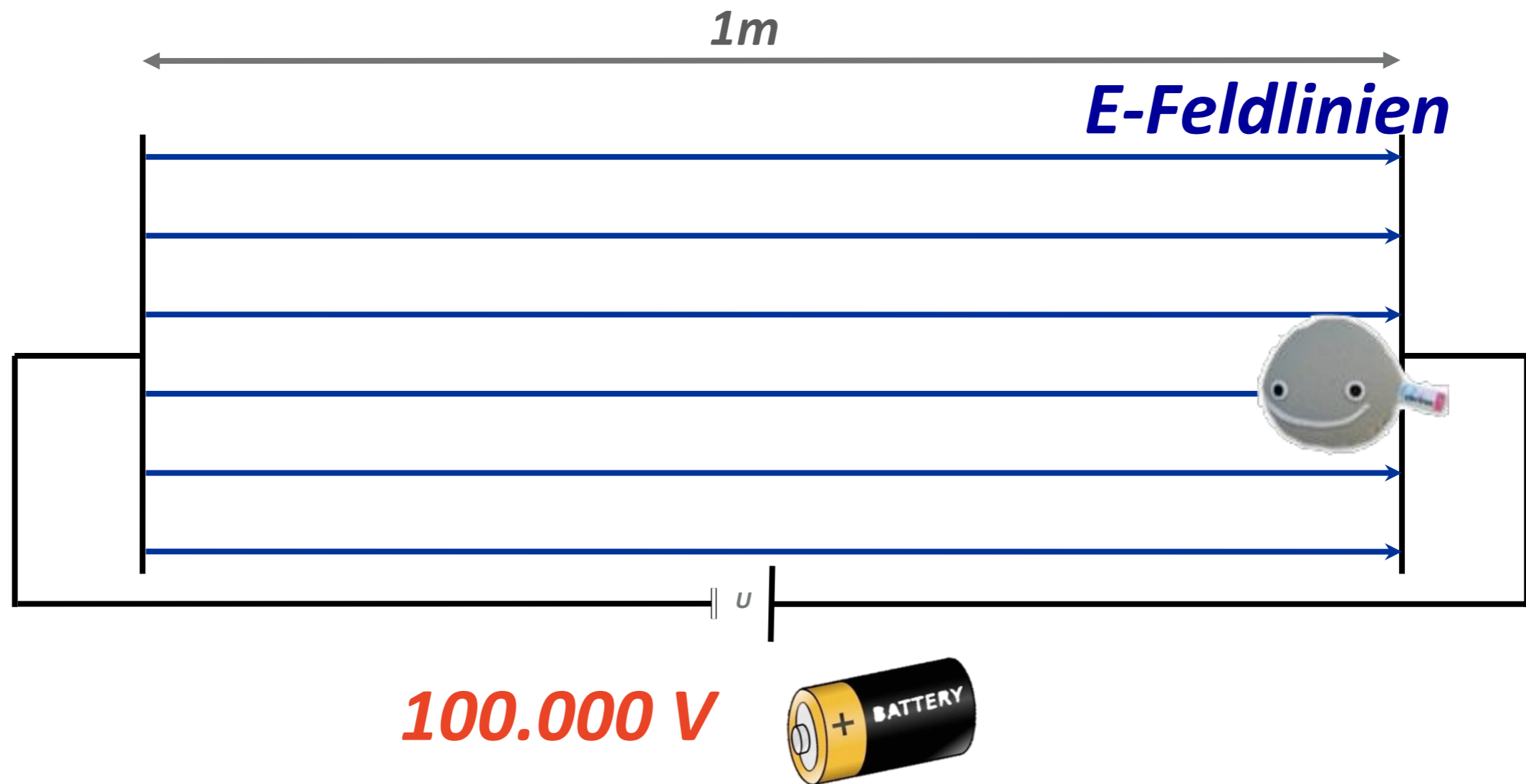
- ▶ geladene Teilchen (z.B. Elektronen) werden im E-Feld entlang der Feldlinien beschleunigt
- ▶ ...und erhalten die Energie  $E = q \cdot U$  hier: 100 keV





# TEILCHEN BESCHLEUNIGEN

- ▶ geladene Teilchen (z.B. Elektronen) werden im E-Feld entlang der Feldlinien beschleunigt
- ▶ ...und erhalten die Energie  $E = q \cdot U$  hier: 100 keV

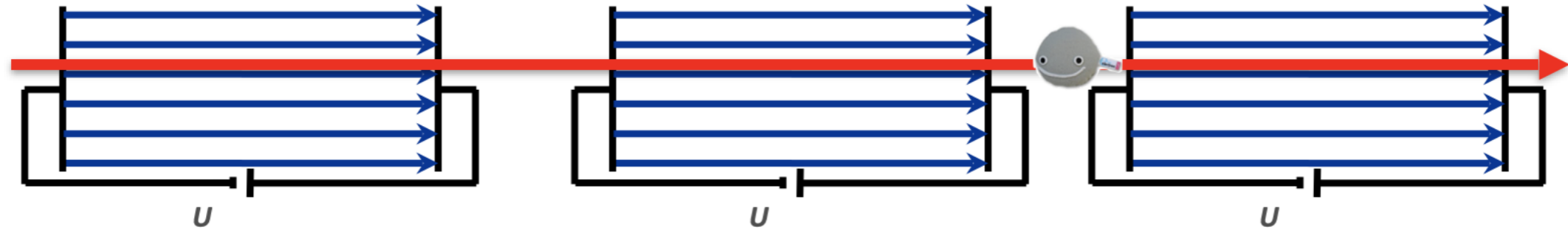


- ▶ Wie könnte man höhere Energien erreichen?

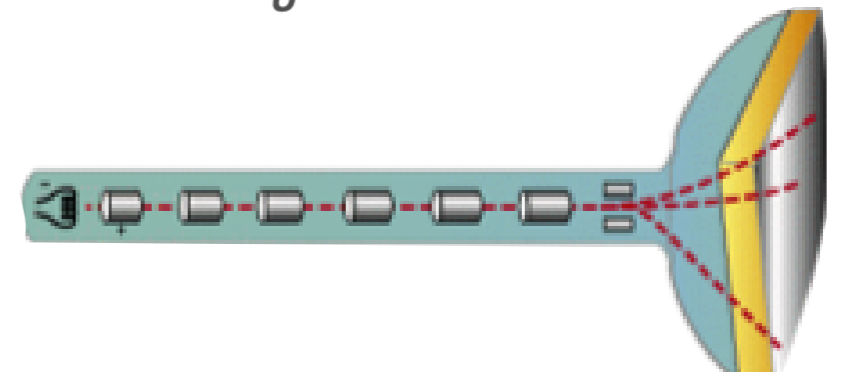
# LINEARBESCHLEUNIGER

Viele E-Felder hintereinander

***E-Feldlinien***



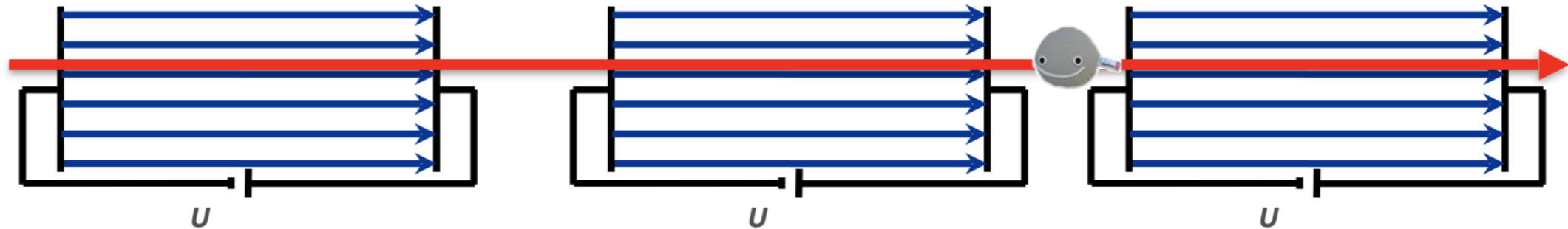
Bsp. alter Röhrenfernseher



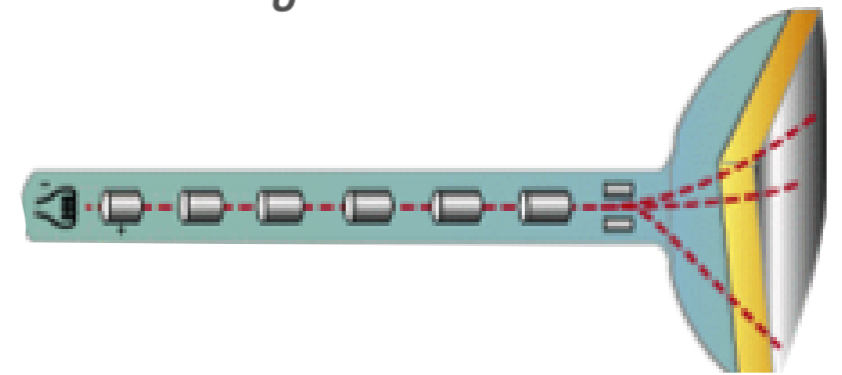
# LINEARBESCHLEUNIGER

Viele E-Felder hintereinander

## *E-Feldlinien*



Bsp. alter Röhrenfernseher



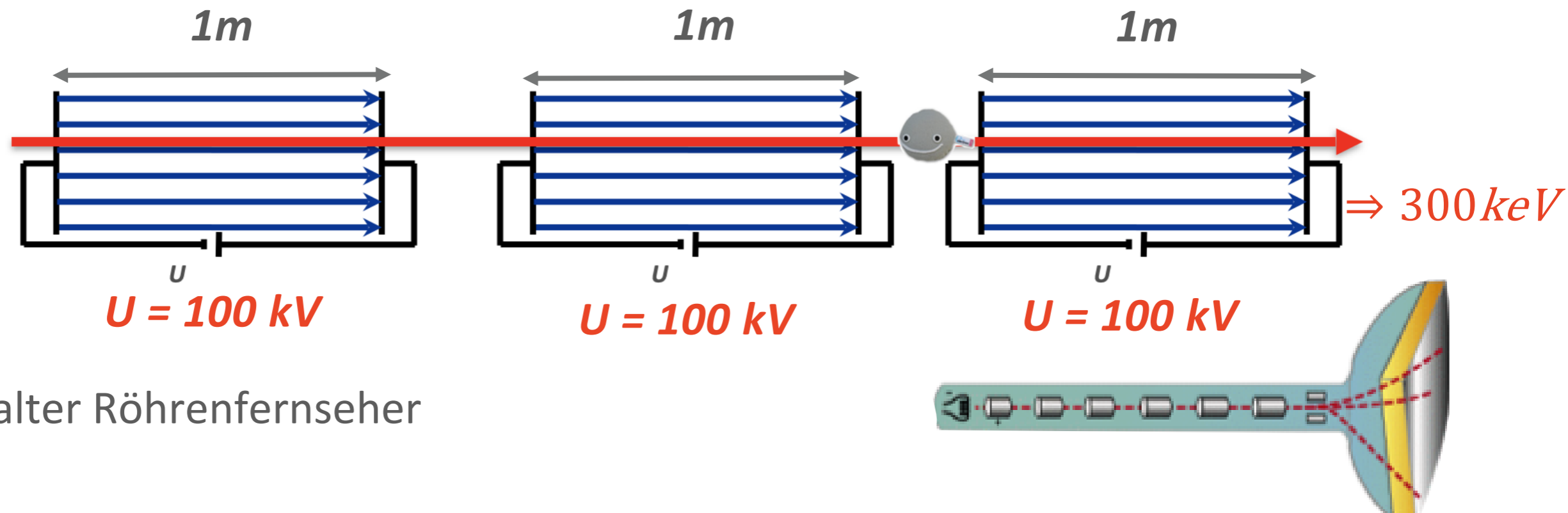
**Aber:** Wie lang muss ein solcher Beschleuniger mindestens werden, um ein Higgs produzieren zu können?



$$M_H = 125 \text{ GeV}/c^2 = 125.000.000 \text{ keV}/c^2$$

# LINEARBESCHLEUNIGER

Viele E-Felder hintereinander



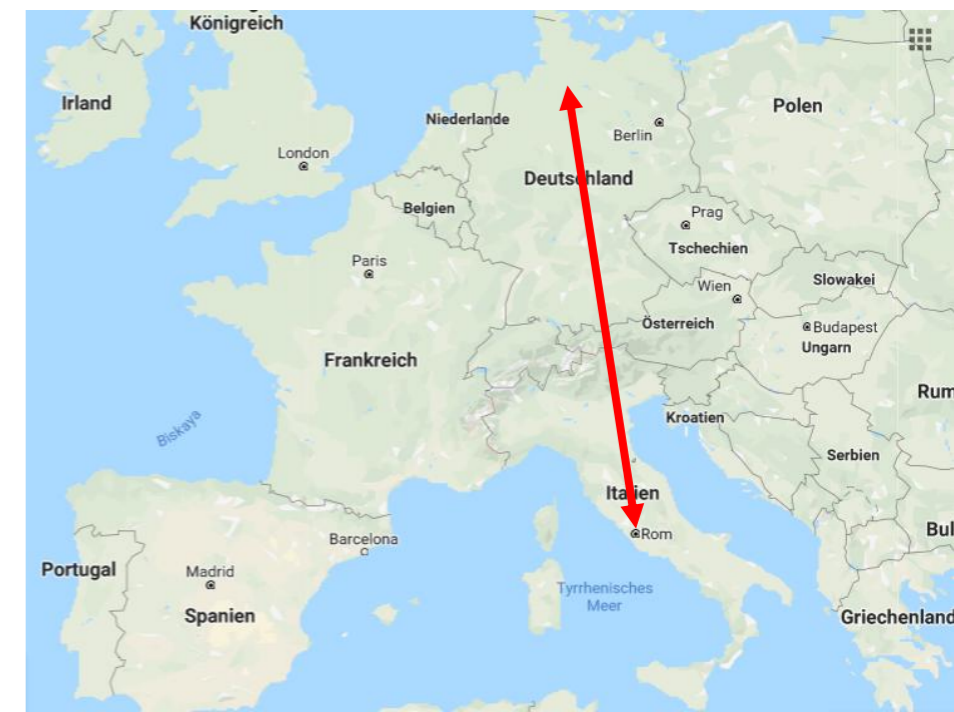
Bsp. alter Röhrenfernseher

**Aber:** Wie lang muss ein solcher Beschleuniger mindestens werden, um ein Higgs produzieren zu können?



$$M_H = 125 \text{ GeV}/c^2 = 125.000.000 \text{ keV}/c^2$$

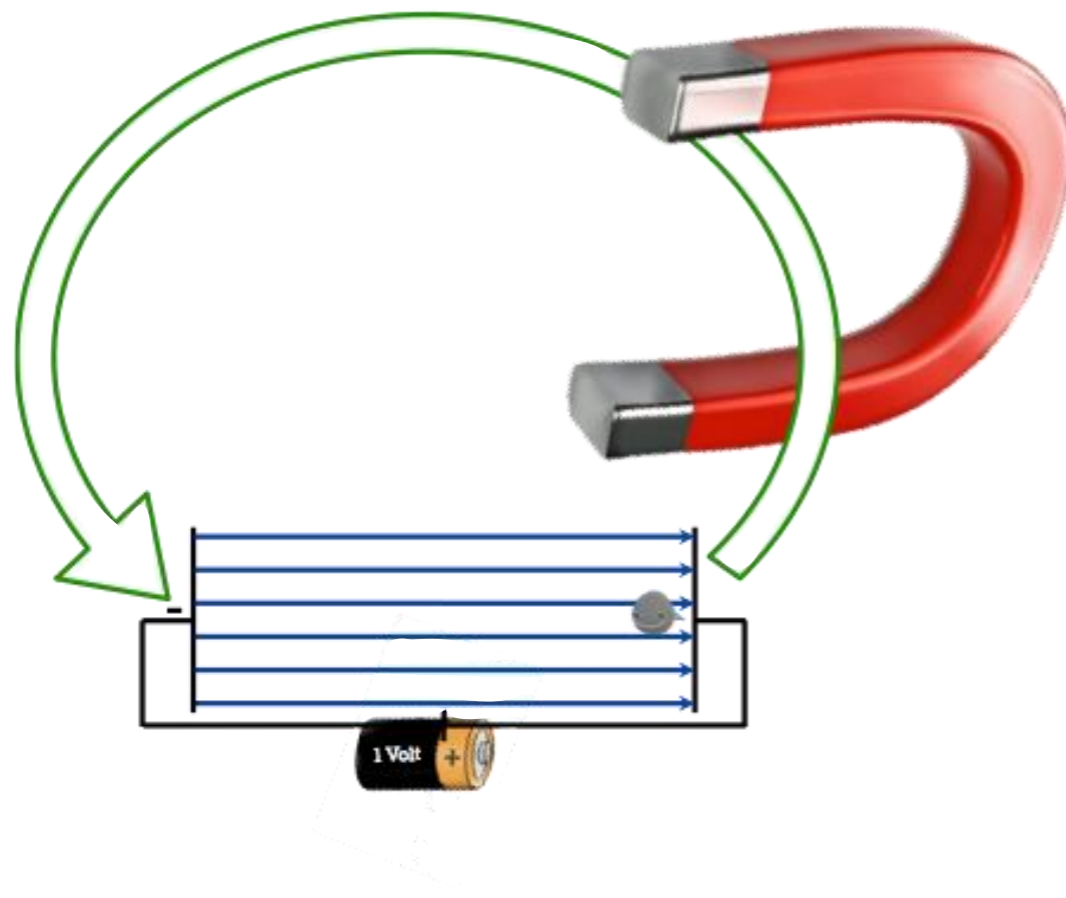
⇒ 1.250 km ca. Strecke: Hamburg ↔ Rom



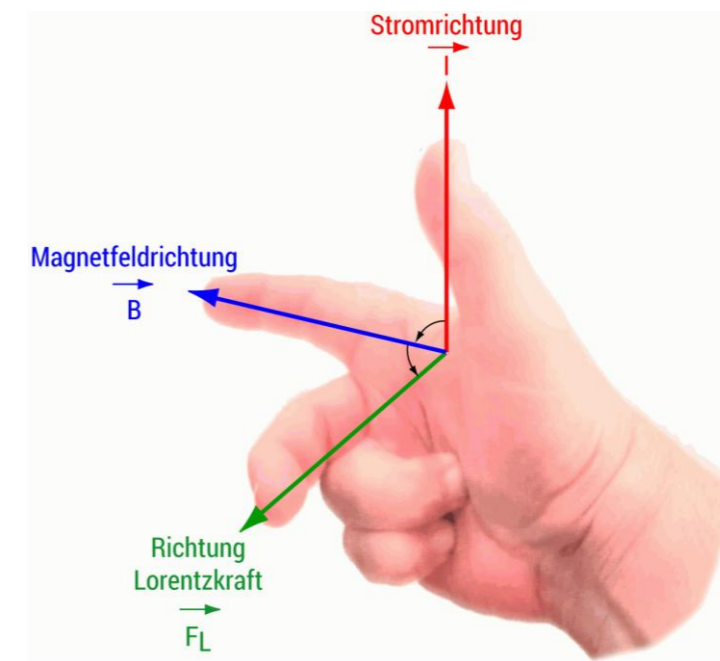
**WAS KÖNNTE MAN  
STATTDESSEN  
MACHEN?**

# FELDER MEHRFACH NUTZEN

- ▶ Teilchen mit Lorentzkraft auf Kreisbahn lenken



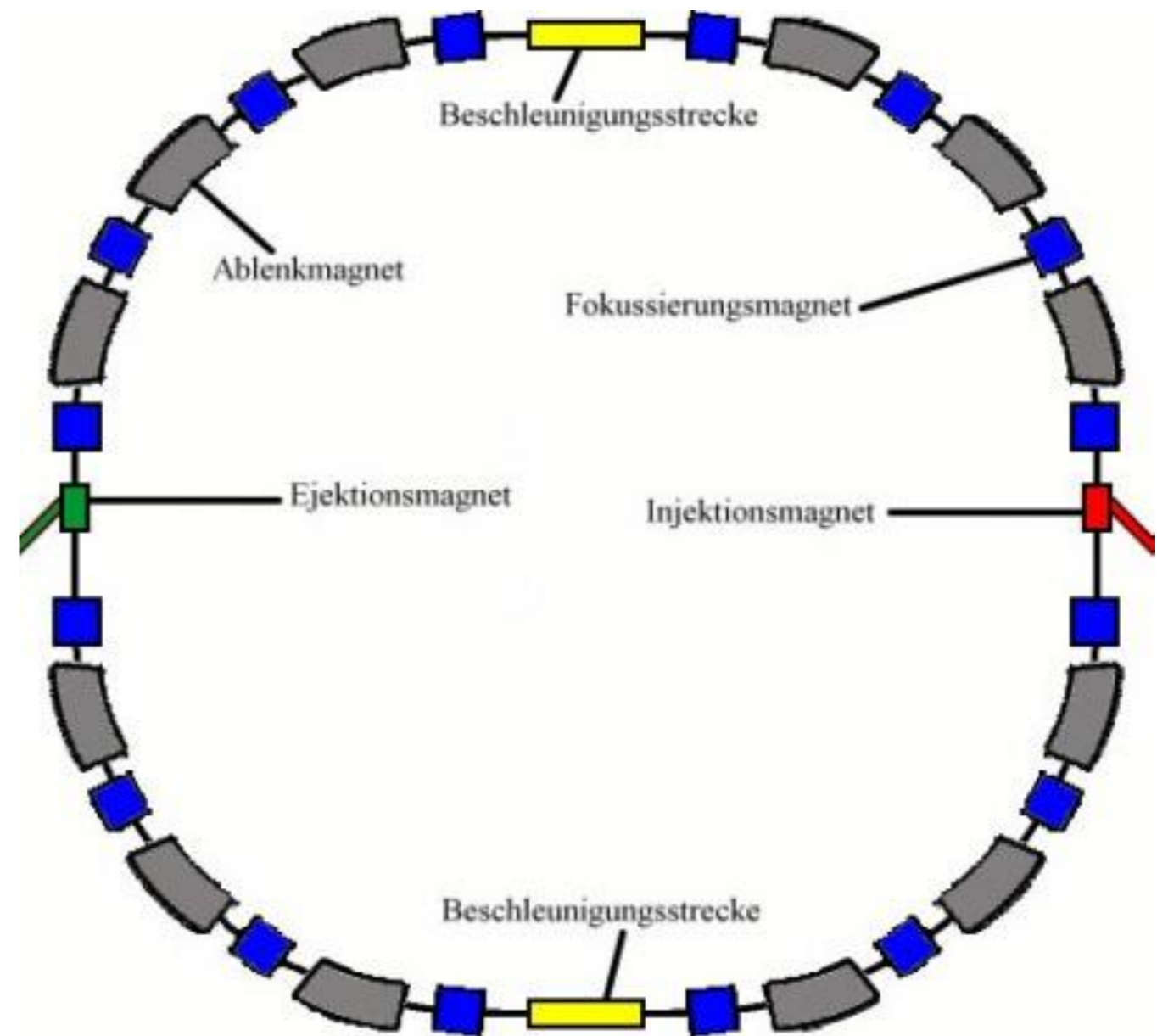
## *Rechte-Hand-Regel*



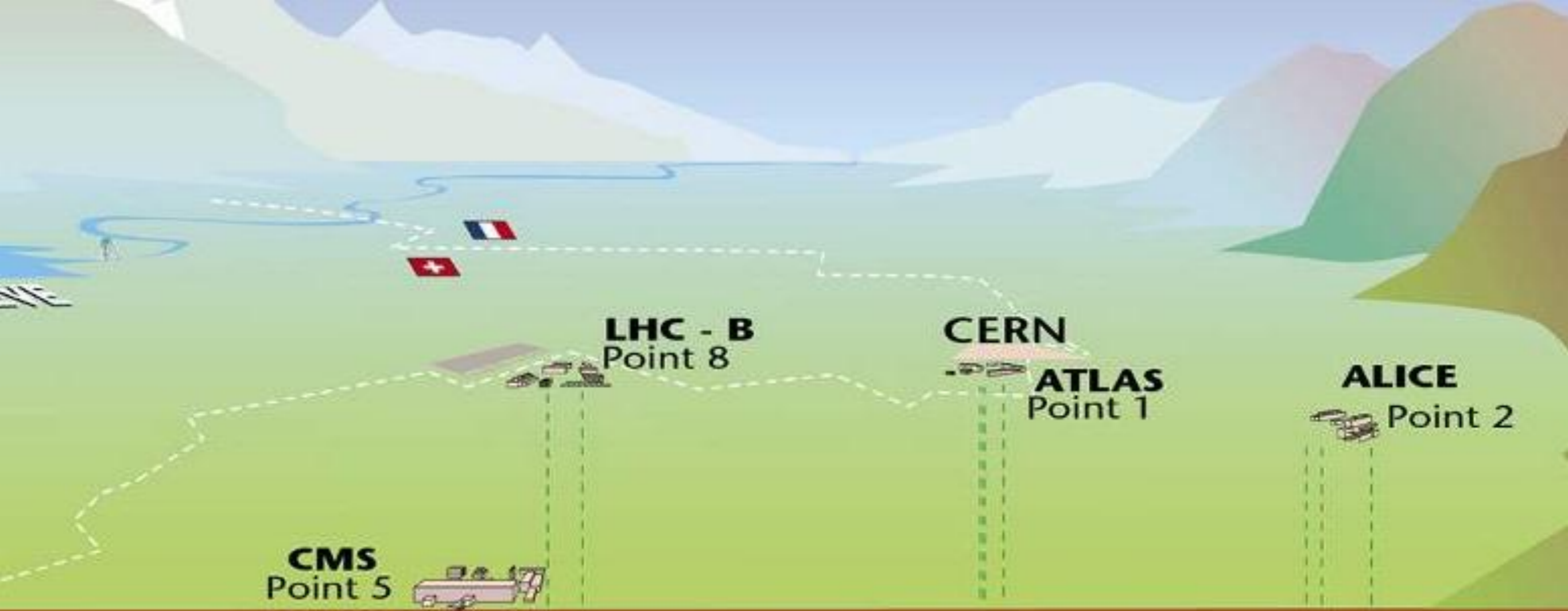
# RINGBESCHLEUNIGER

---

- Ablenkmagnete lenken Teilchen auf Kreisbahn
- Beschleunigung auf den geraden Strecken bei jedem Durchlauf



**Kennt ihr Beispiele für Ringbeschleuniger?**

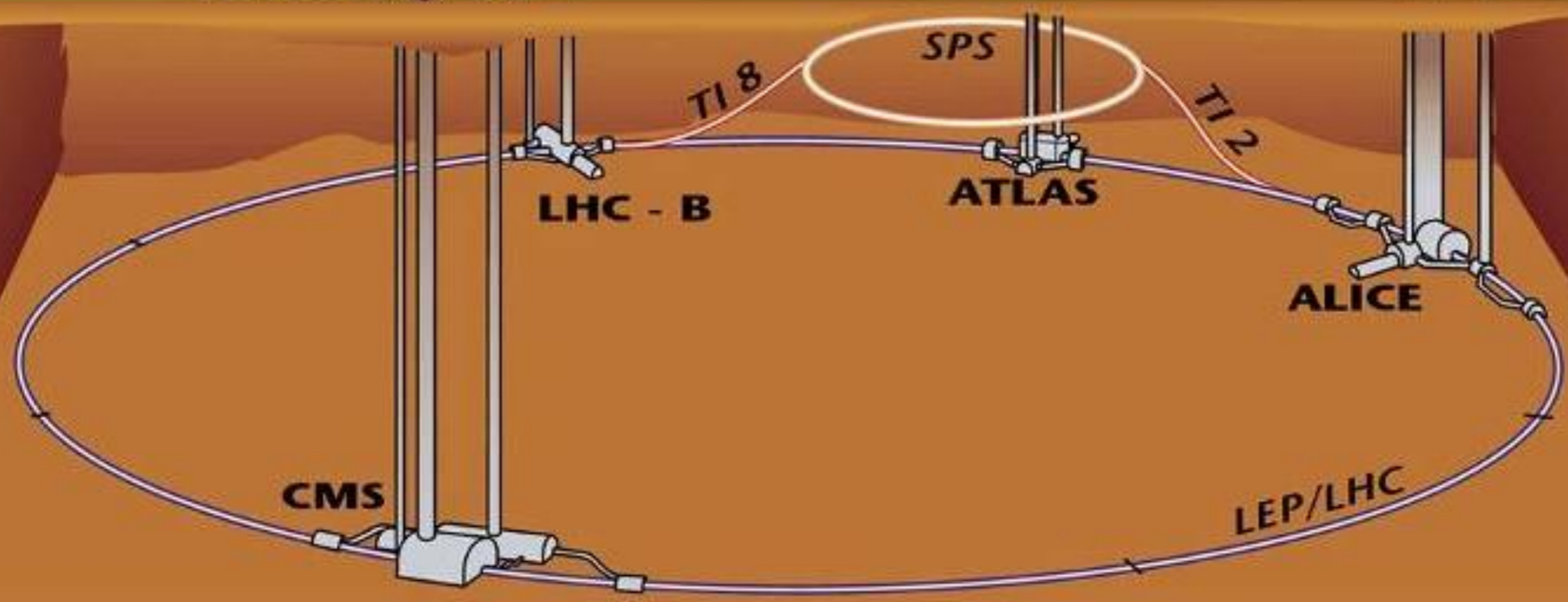
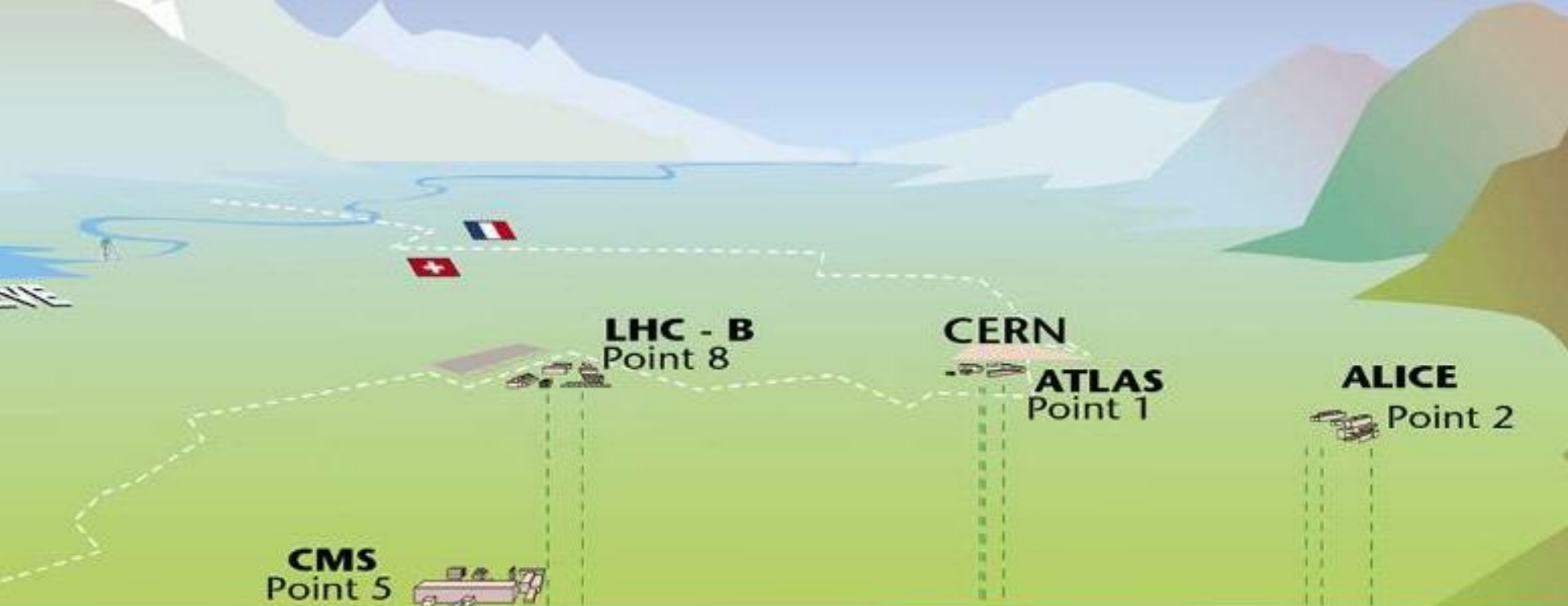


# DER **L**ARGE **H**ADRON **C**OLLIDER

*2000 Pakete a 100 Milliarden Protonen umrunden den LHC **11000/s**  
in **entgegengesetzte Richtungen** -> 2 Strahlrohre  
4 Kreuzungspunkte -> Protonenpakete **kollidieren***









## DER LARGE HADRON COLLIDER

---

- 27 km Umfang
- 100 m unter Erde
- Protonen erreichen Energie von 6,5 TeV
- LHC-Strahl Energie eines ICEs
- Magnete: supraleitend bei  $1,9 \text{ K} < (\text{Universum}) = 2,7 \text{ K}$
- Vakuum im Strahlrohr 10x leerer als auf dem Mond

# ERINNERUNG TEILCHENKOLLISIONEN:

---

*Live-Webcam: LHC, ATLAS-Experiment:*

# ERINNERUNG TEILCHENKOLLISIONEN:

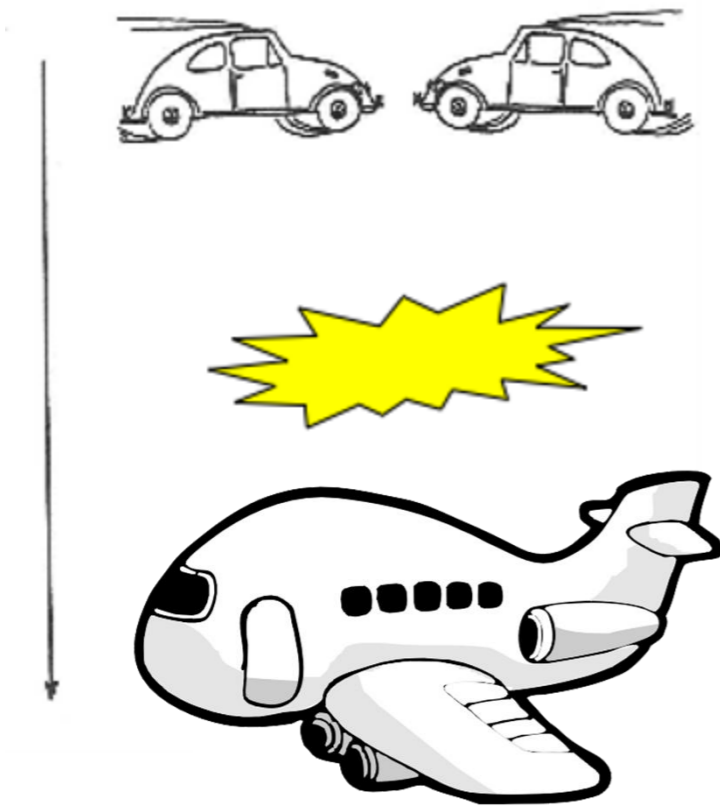
---

*Live-Webcam: LHC, ATLAS-Experiment:*



# ERINNERUNG TEILCHENKOLLISIONEN:

---



$$E = mc^2$$

mehr Energie



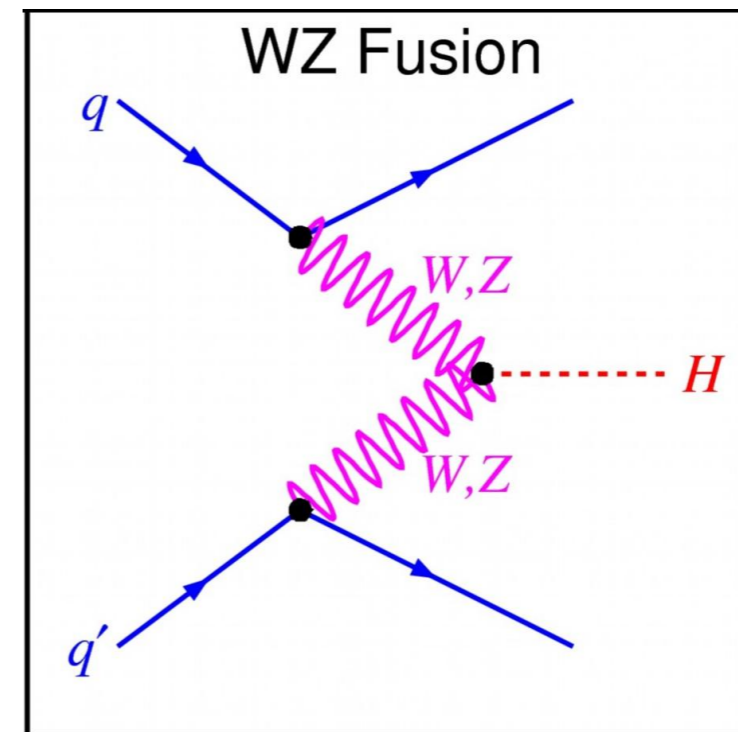
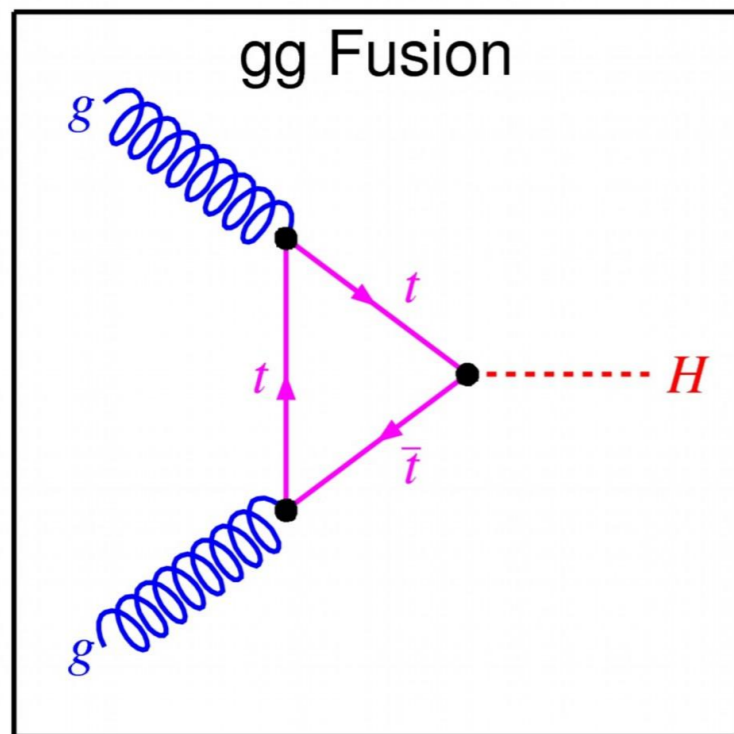
mehr/schwerere Teilchen

**Wie können wir neue Teilchen aus zwei Protonen erzeugen?**

# WIE ENTSTEHET DAS HIGGS BOSON?

---

- Kollision von einzelnen Gluonen und Quarks



+ weitere aber weniger wichtige Produktionskanäle

# WIE OFT ENTSTEHT EIN HIGGS BOSON?

---



... etwa alle 10 Milliarde Ereignisse 1x ...

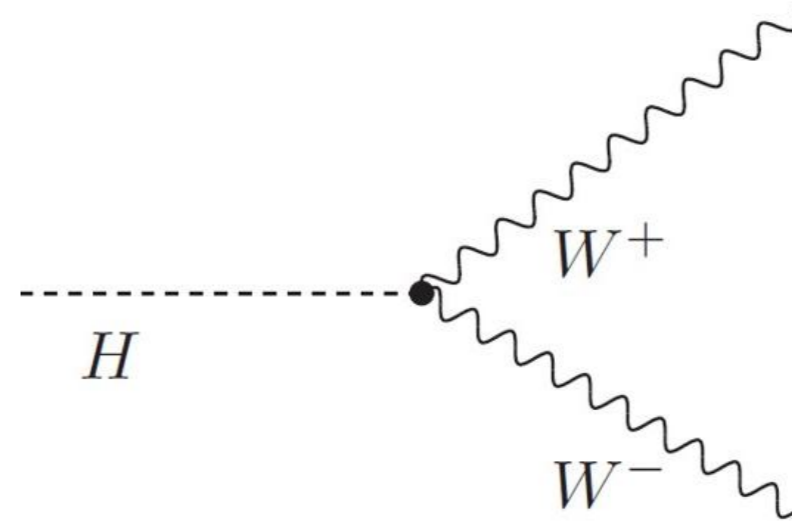
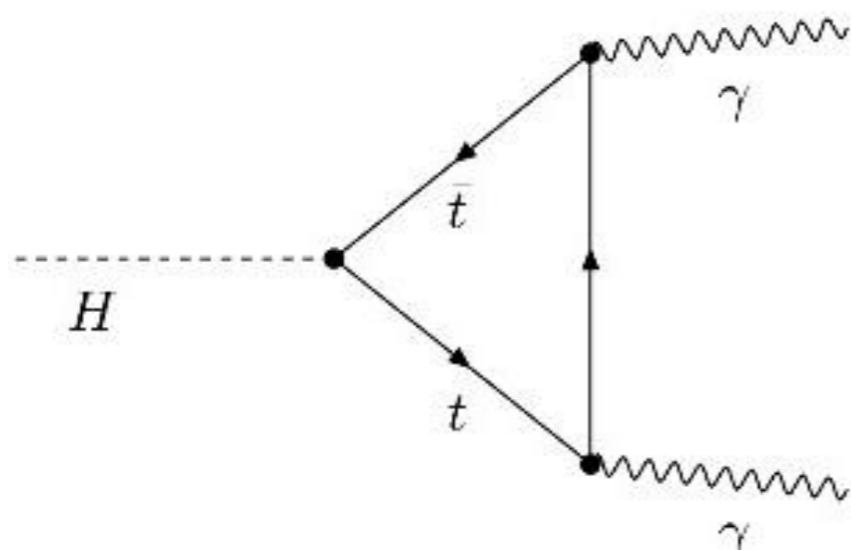
# WIE FINDET MAN DAS HIGGS?

---

Was sagt die Theorie über das Higgs?

-> Das Higgs zerfällt sofort wieder

- ▶ in 2 Photonen oder
- ▶ in 2 W-Bosonen (die zerfallen wieder) oder
- ▶ .... und so weiter





# WIE FINDET MAN DAS HIGGS?

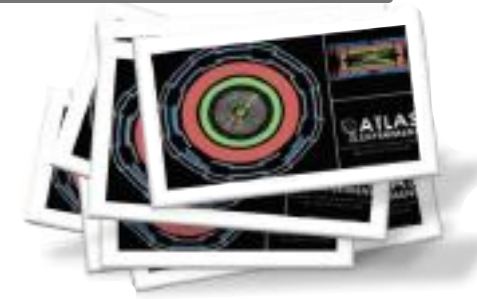
---

- ▶ Jeder Forscher wählt einen “Zerfallskanal”, den er für vielversprechend hält
  - Wie sieht “mein” Zerfall im Detektor aus?
  - Welche anderen Prozesse gibt es, die genauso aussehen?
  - Suche nach Kollisionen, welche die Kriterien erfüllen
  - Wie viele finden wir?



# WIE FINDET MAN DAS HIGGS?

---



Ein (fiktives) Beispiel:

- ▶ Wir finden 200 Bilder, die wie ein Higgs aussehen
- ▶ Wir erwarten 150 Bilder, die genau so aussehen, ABER KEIN Higgs sind
- ▶ Bleiben 50 Kandidaten für ein Higgs-Teilchen

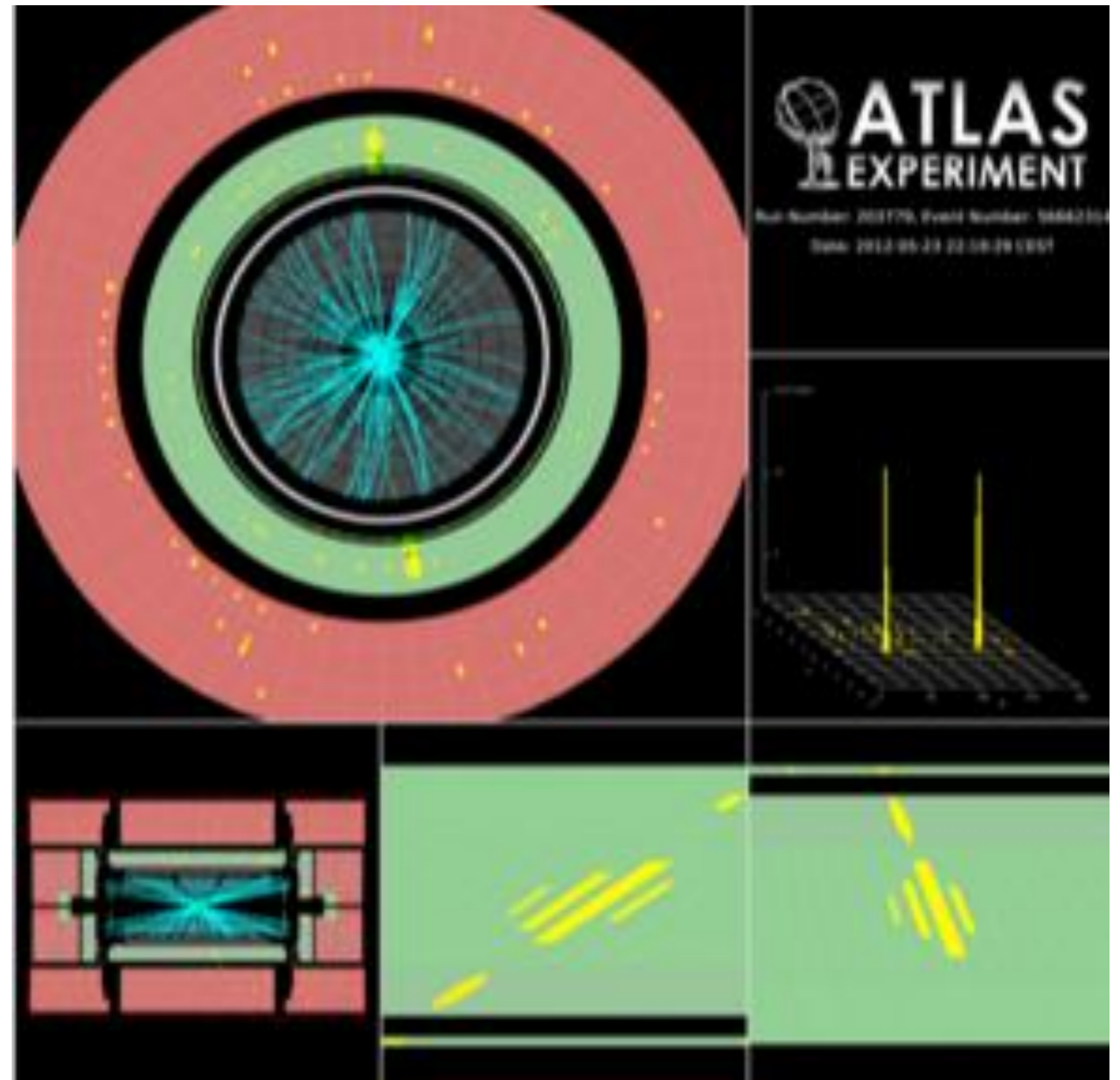
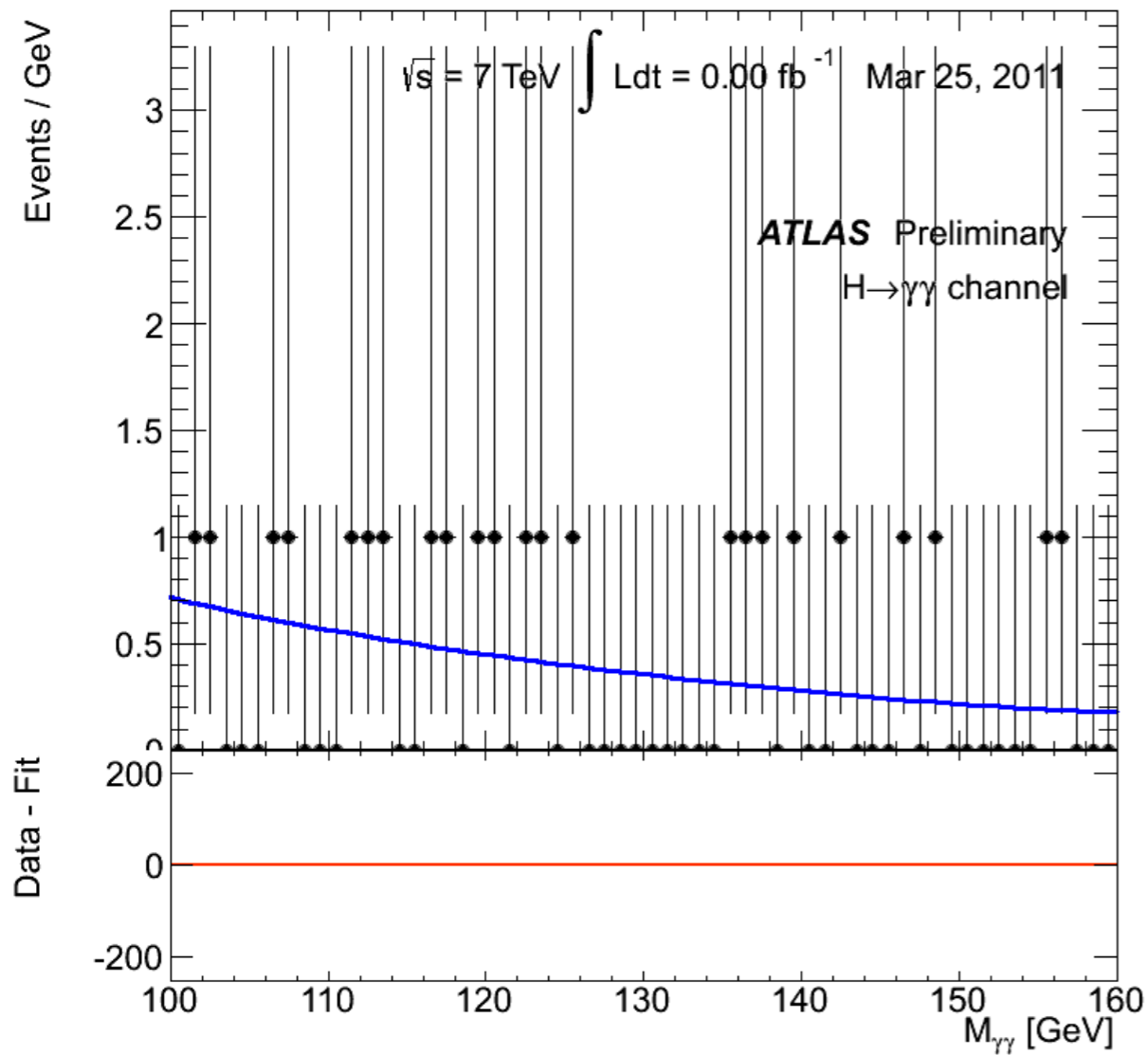
**150x  
kein Higgs**



**50x  
Higgs**

# BEISPIEL 2: $H \rightarrow \gamma\gamma$

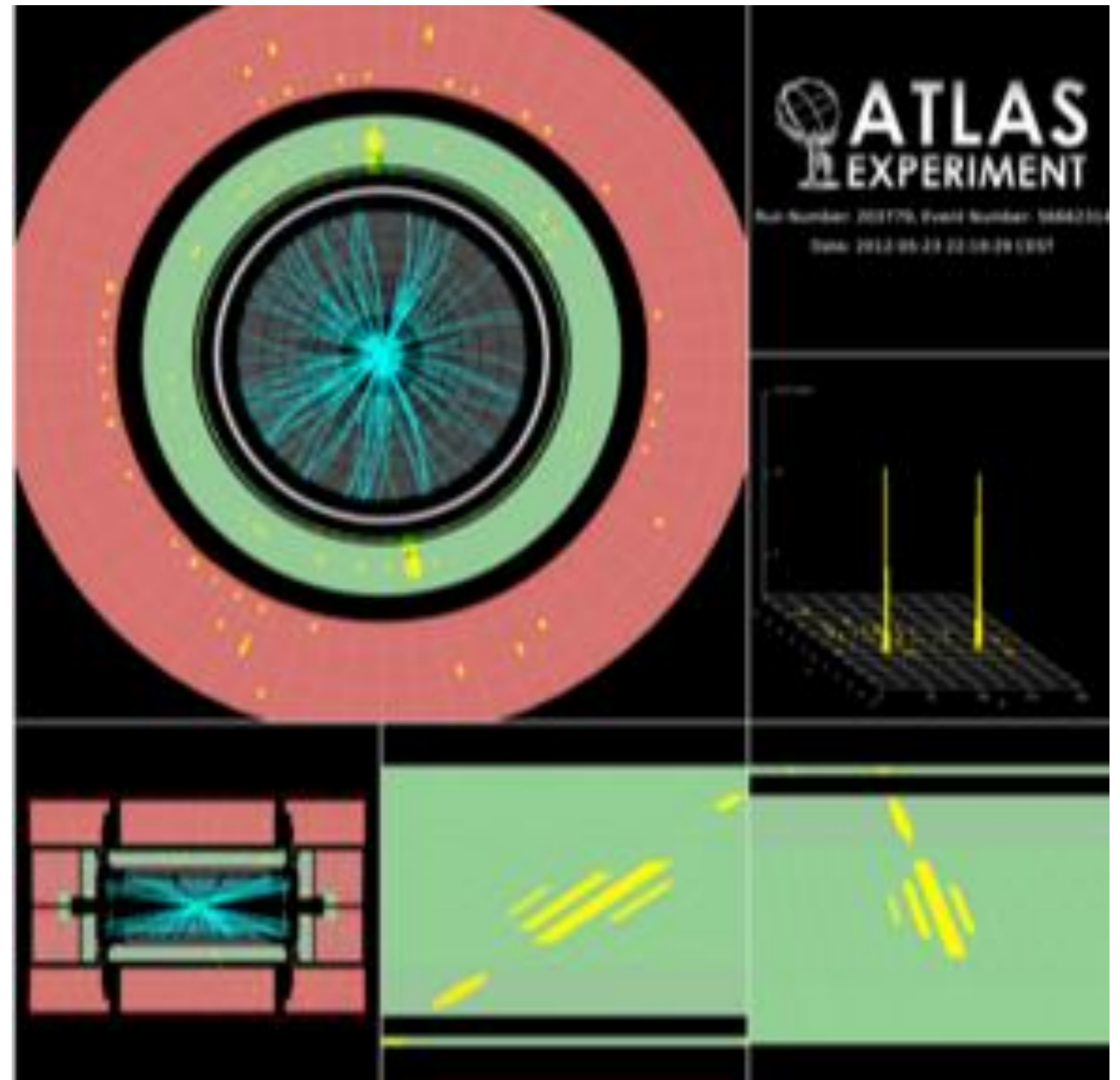
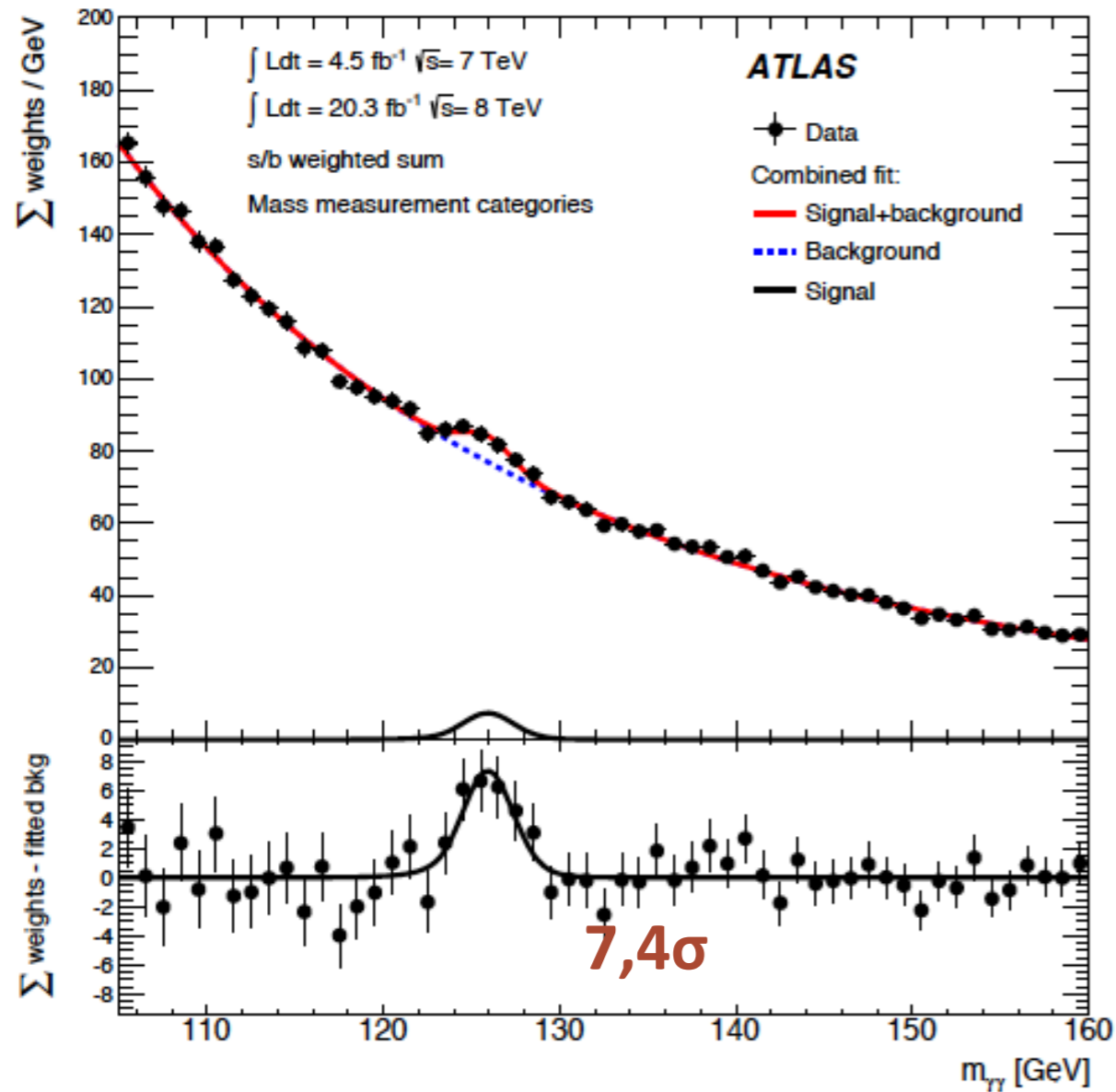
<http://arxiv.org/abs/1406.3827>



**$7\sigma$  - Wahrscheinlichkeit eines Zufalls  $\lesssim 1$ :  
400.000.000.000**

# BEISPIEL 2: $H \rightarrow \gamma\gamma$

<http://arxiv.org/abs/1406.3827>



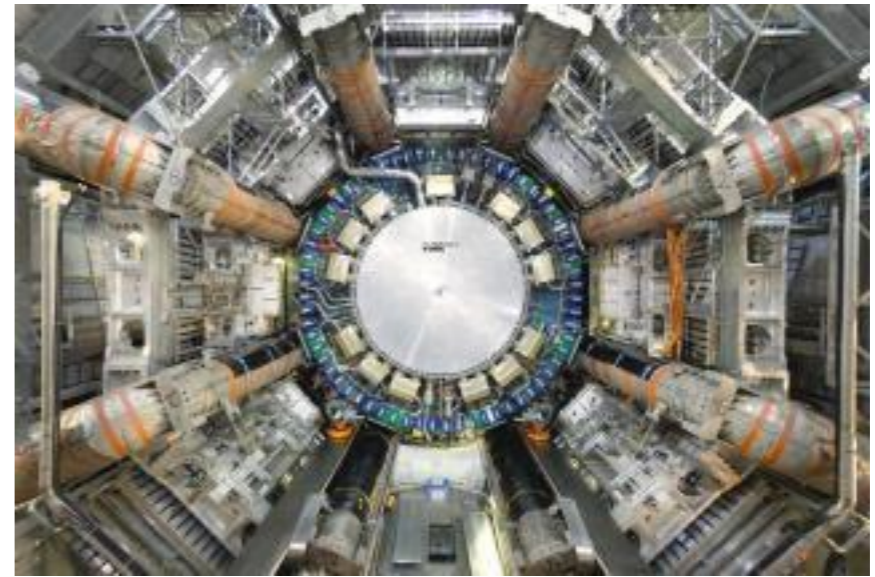
$7\sigma$  - Wahrscheinlichkeit eines Zufalls  $\lesssim 1$ :  
400.000.000.000

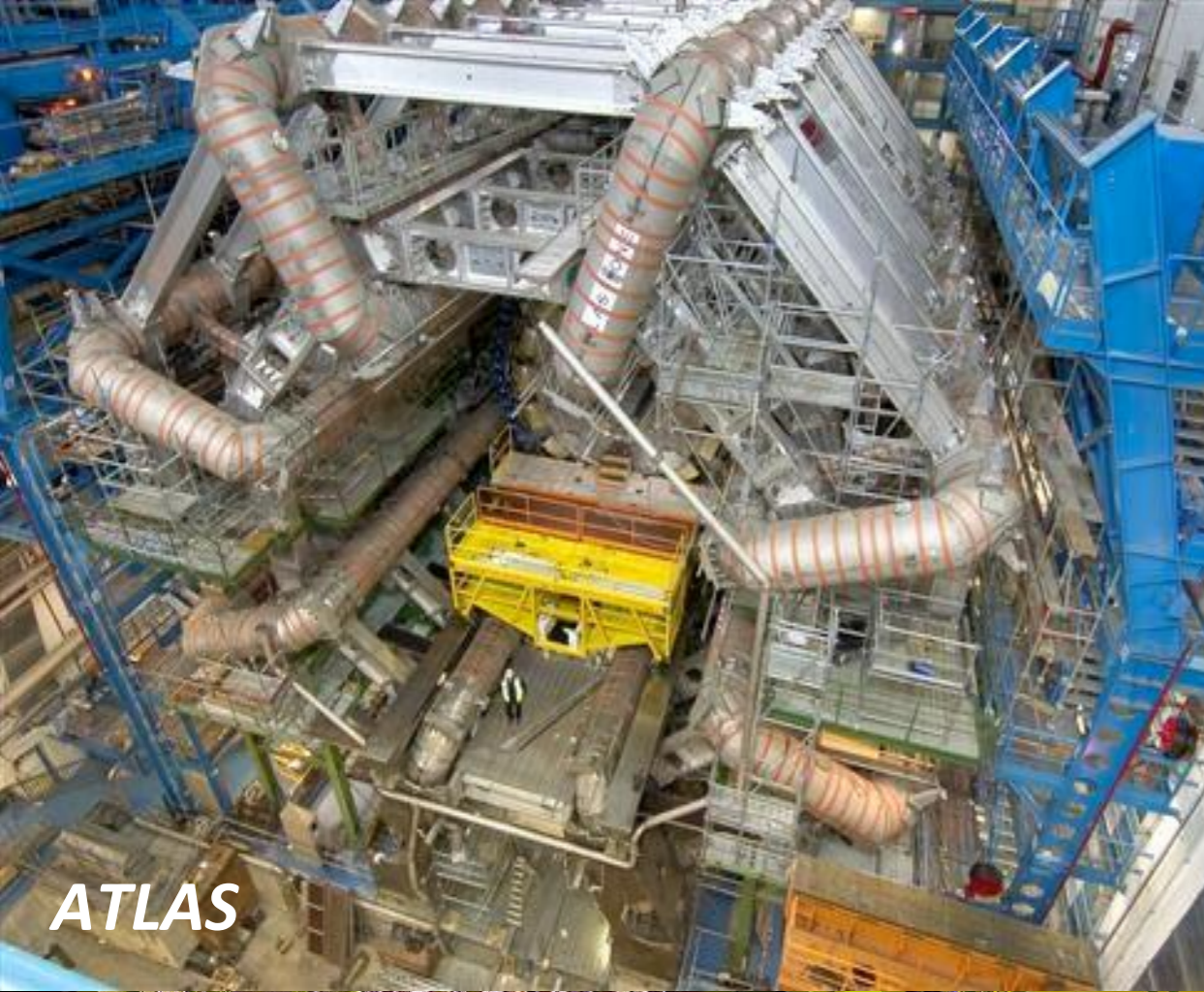
**WIE KÖNNEN WIR  
DIE NEUEN TEILCHEN  
NACHWEISEN ?**

# TEILCHENDETEKTOREN ...

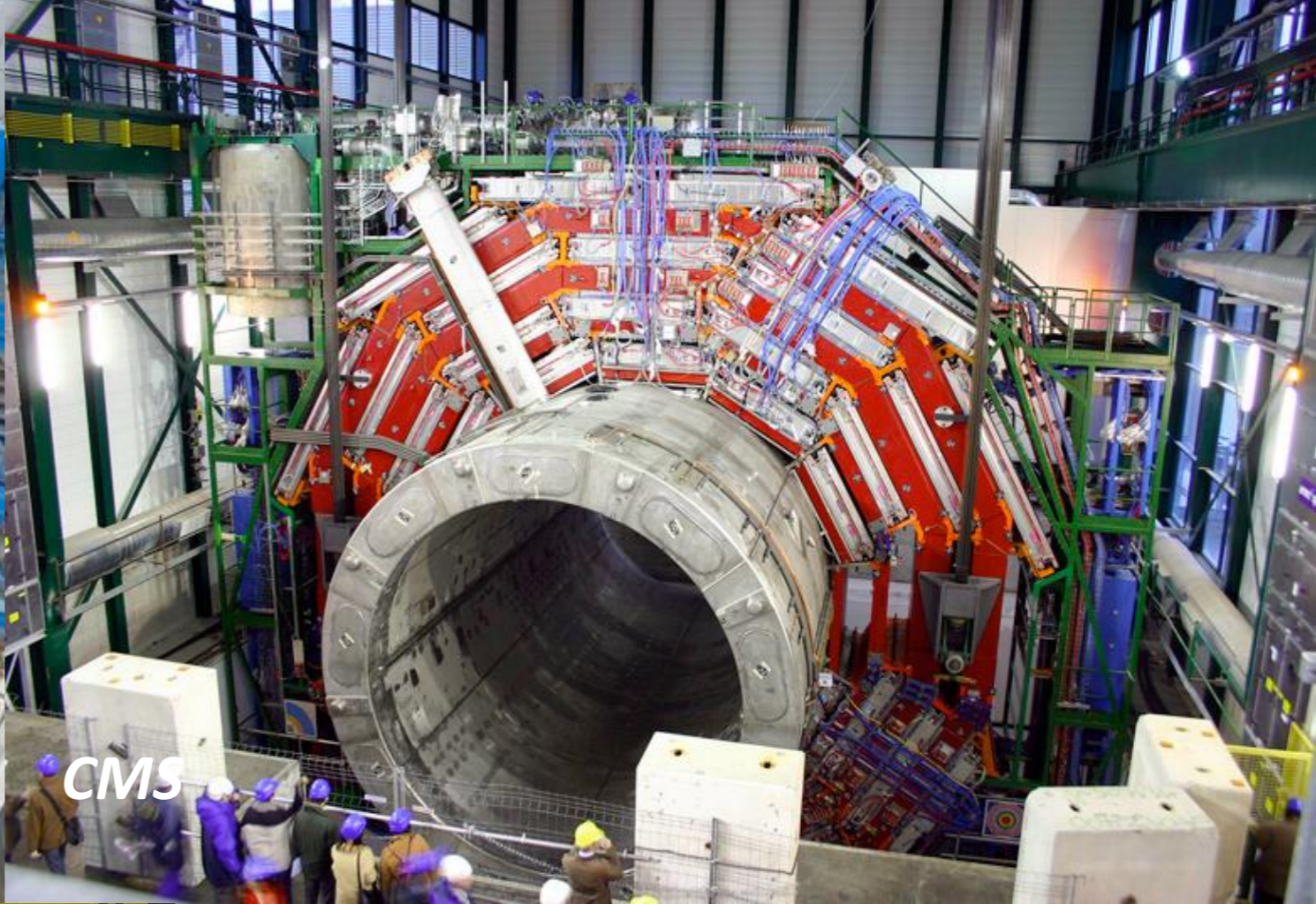
---

- ▶ sind „Kameras“, die Kollisionen aufzeichnen
- ▶ vermessen die entstandenen Teilchen:
  1. Welche Teilchen?
  2. Wo lang geflogen?
  3. Energie / Impuls?

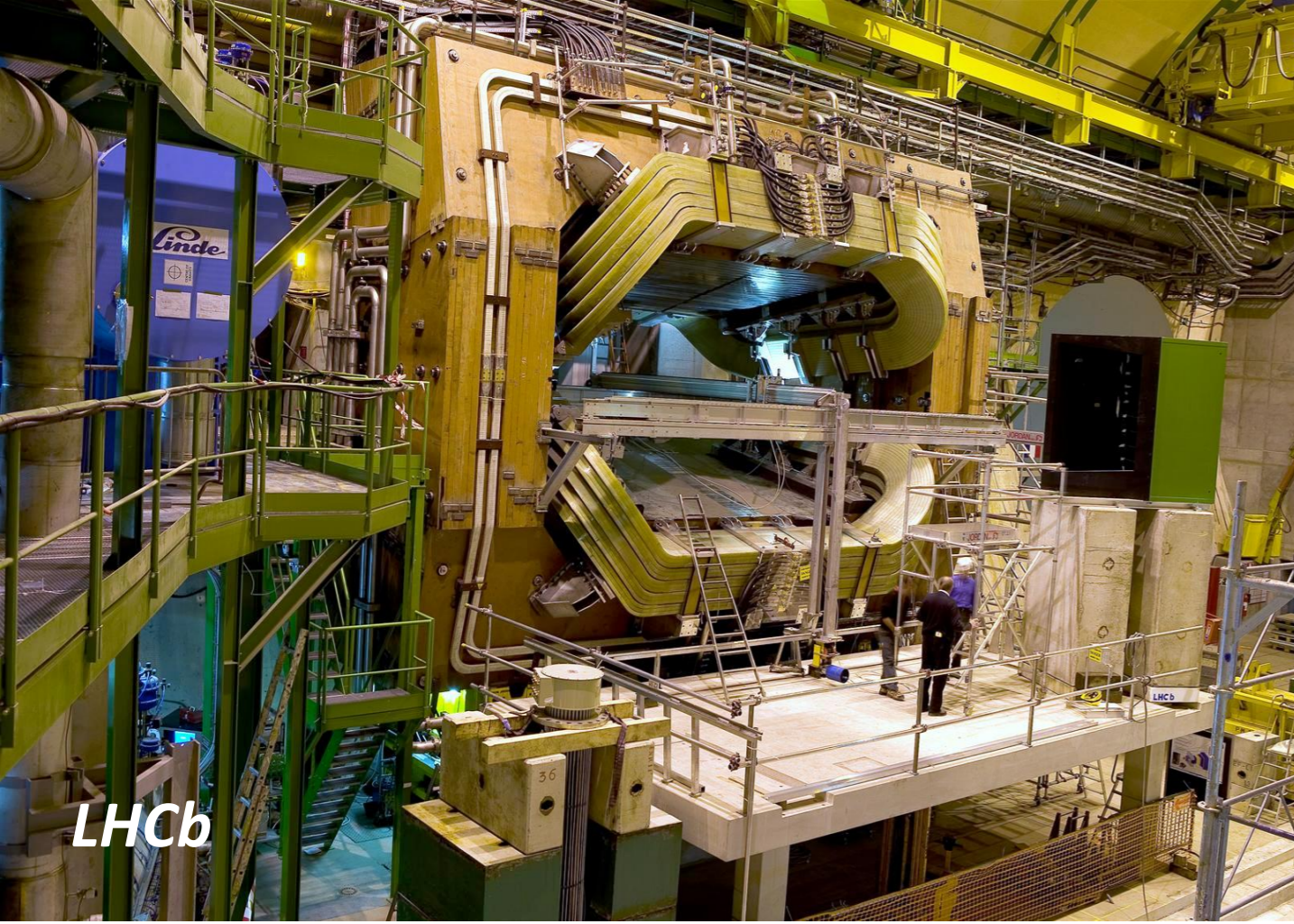




*ATLAS*



*CMS*



*LHCb*



*ALICE*

# DATEN VERARBEITEN, ANALYSIEREN & SPEICHERN

---

- ▶ Insgesamt 40 Millionen Kollisionen/s (80 TB/s) → Wir müssen filtern!!
- ▶ 90 Petabyte (90 Millionen GB) Daten pro Jahr
- ▶ Interessante (z.B. Higgs ähnliche) Ereignisse lösen Trigger aus → das Foto wird gespeichert!
- ▶ Cern hat ein extrem rechenstarkes Computergrid
- ▶ Vernetzt 200 Computerzentren überall auf der Welt

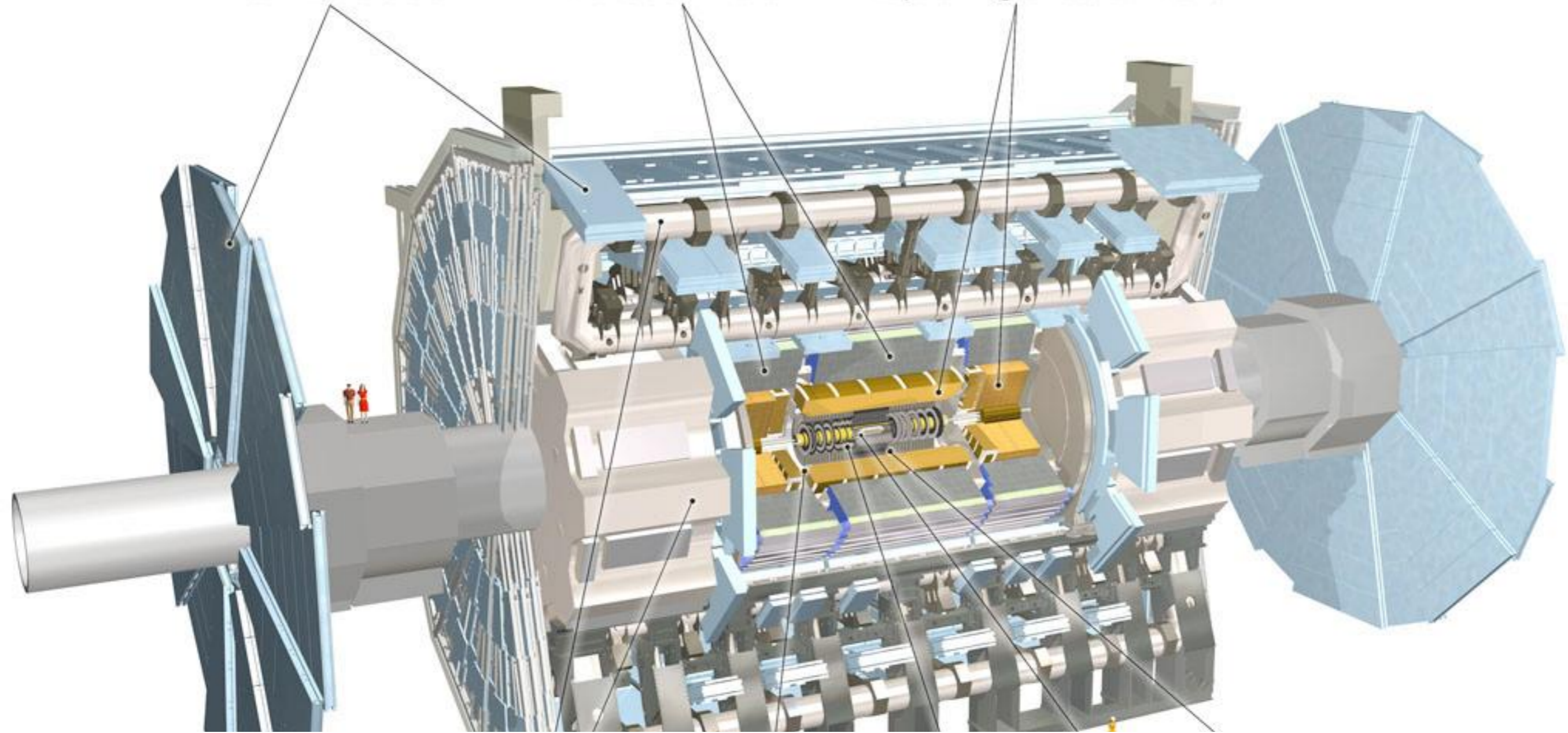




Muon Detectors

Tile Calorimeter

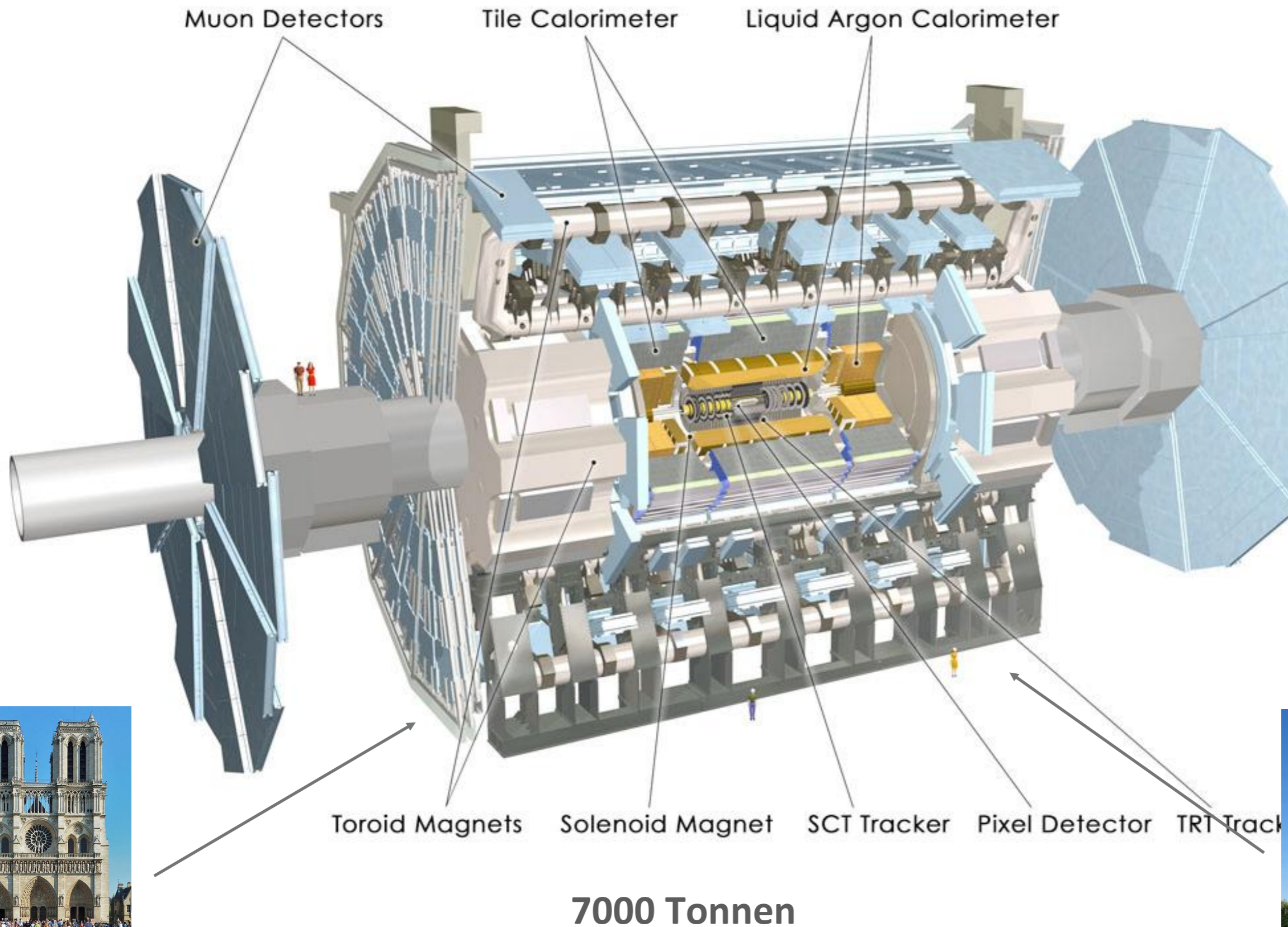
Liquid Argon Calorimeter



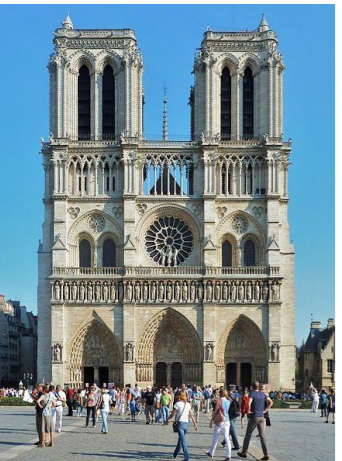
# DAS ATLAS EXPERIMENT

---

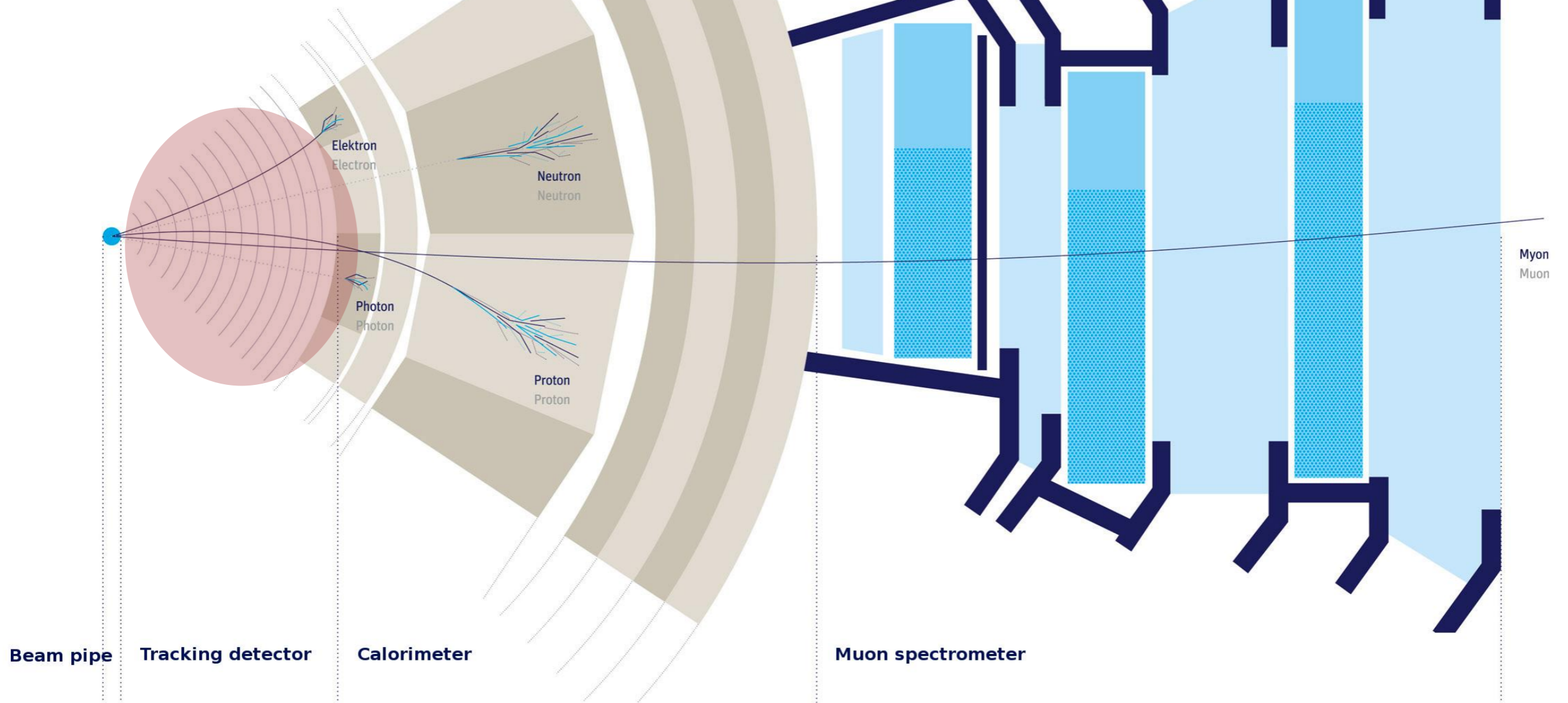
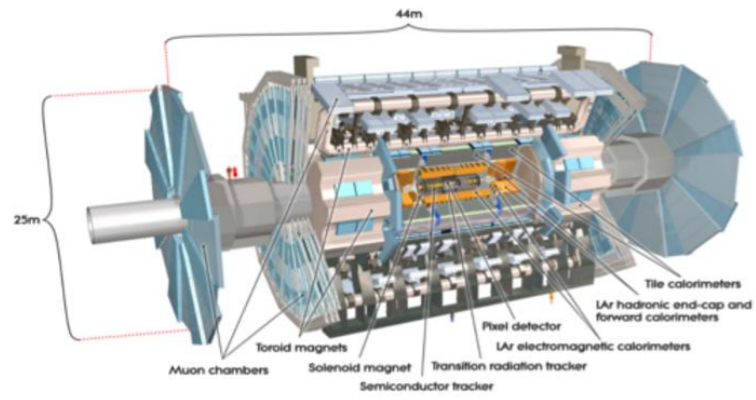
# A TOROIDAL LHC APPARATUS



ATLAS Experiment © 2014 CERN



# DER SPURDETEKTOR



Beam pipe

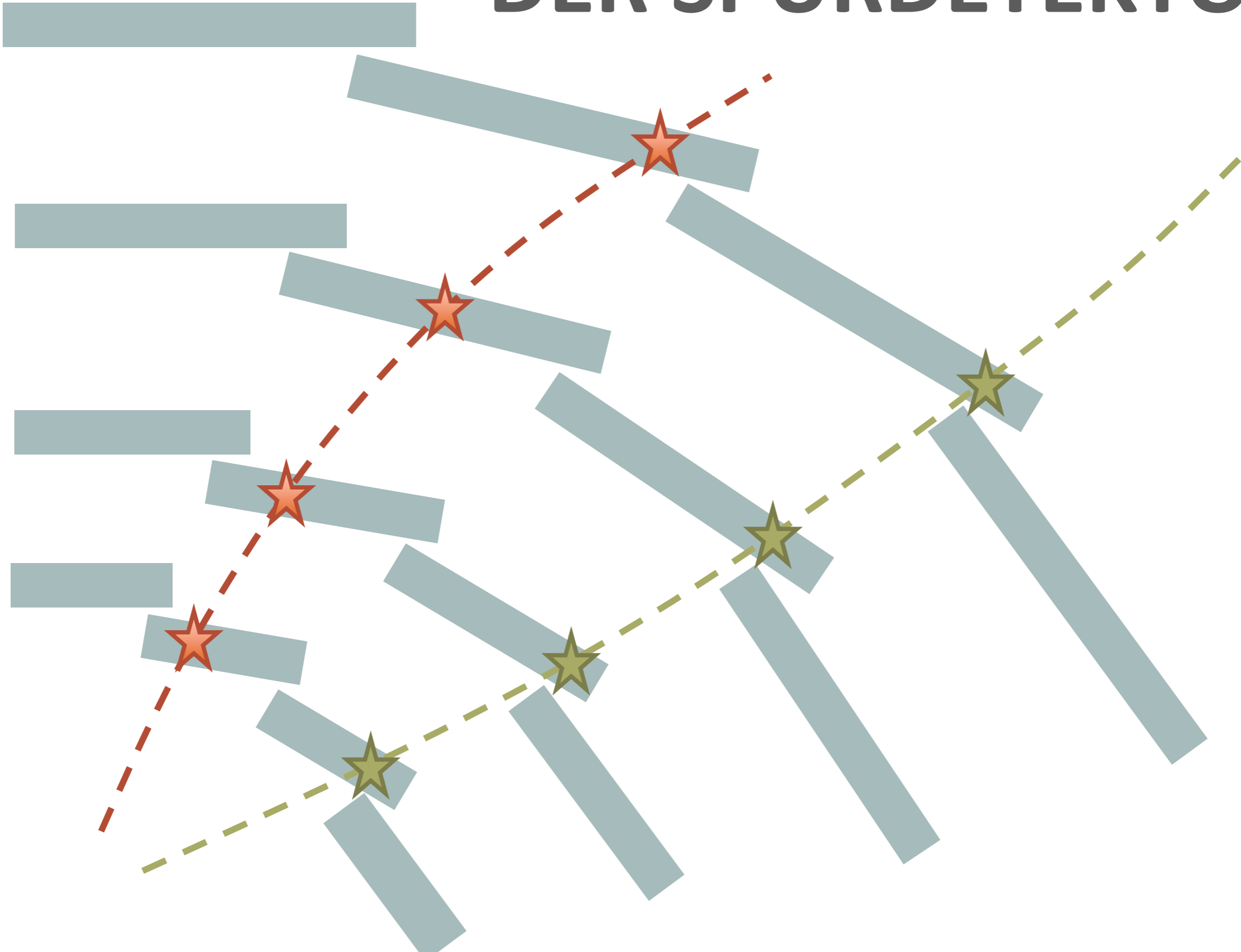
Tracking detector

Calorimeter

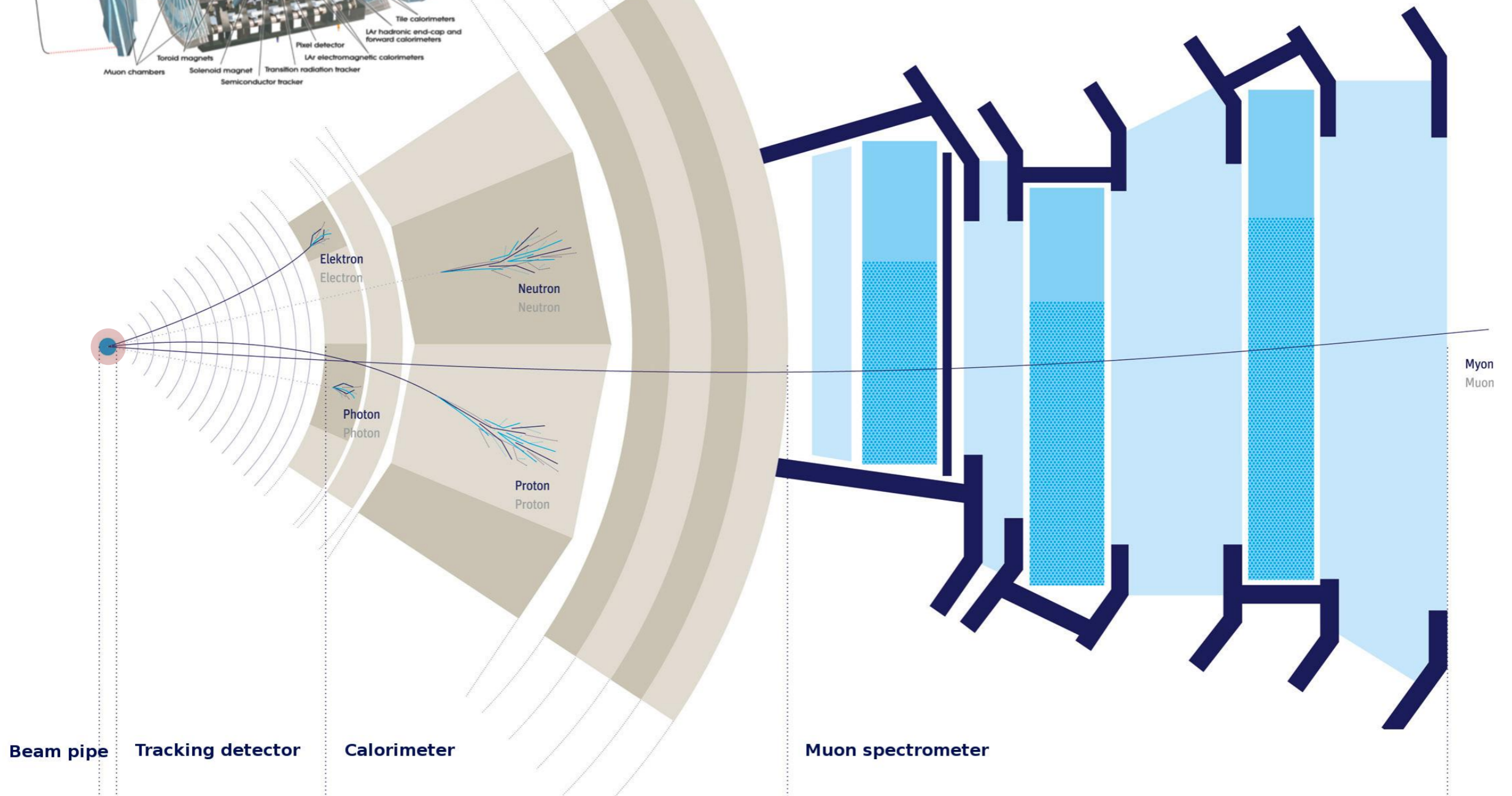
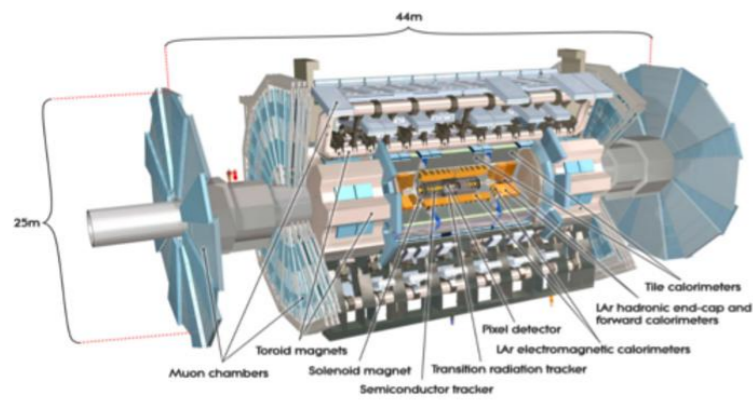
Muon spectrometer

Myon  
Muon

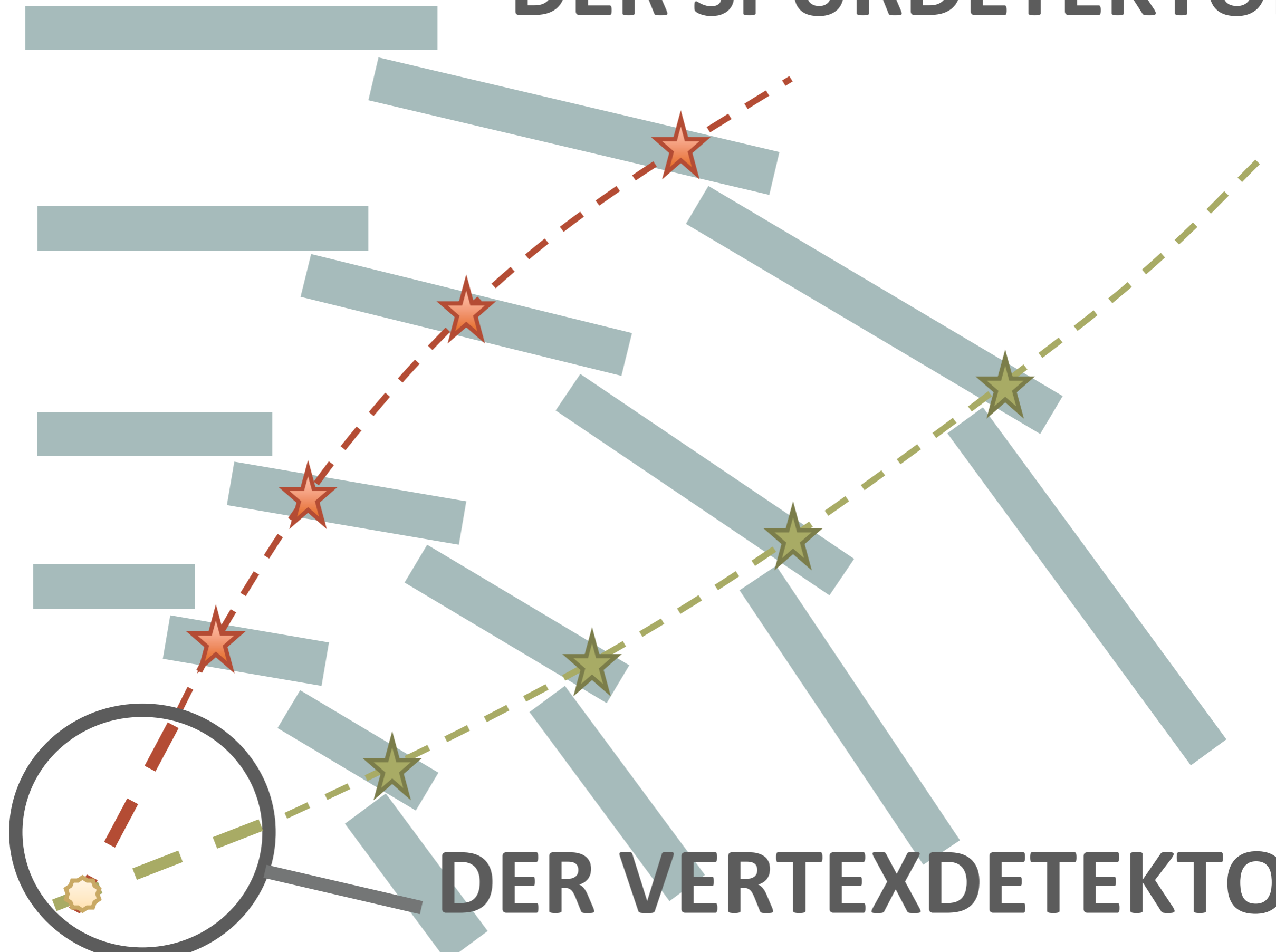
# DER SPURDETEKTOR



# DER VERTEXDETEKTOR

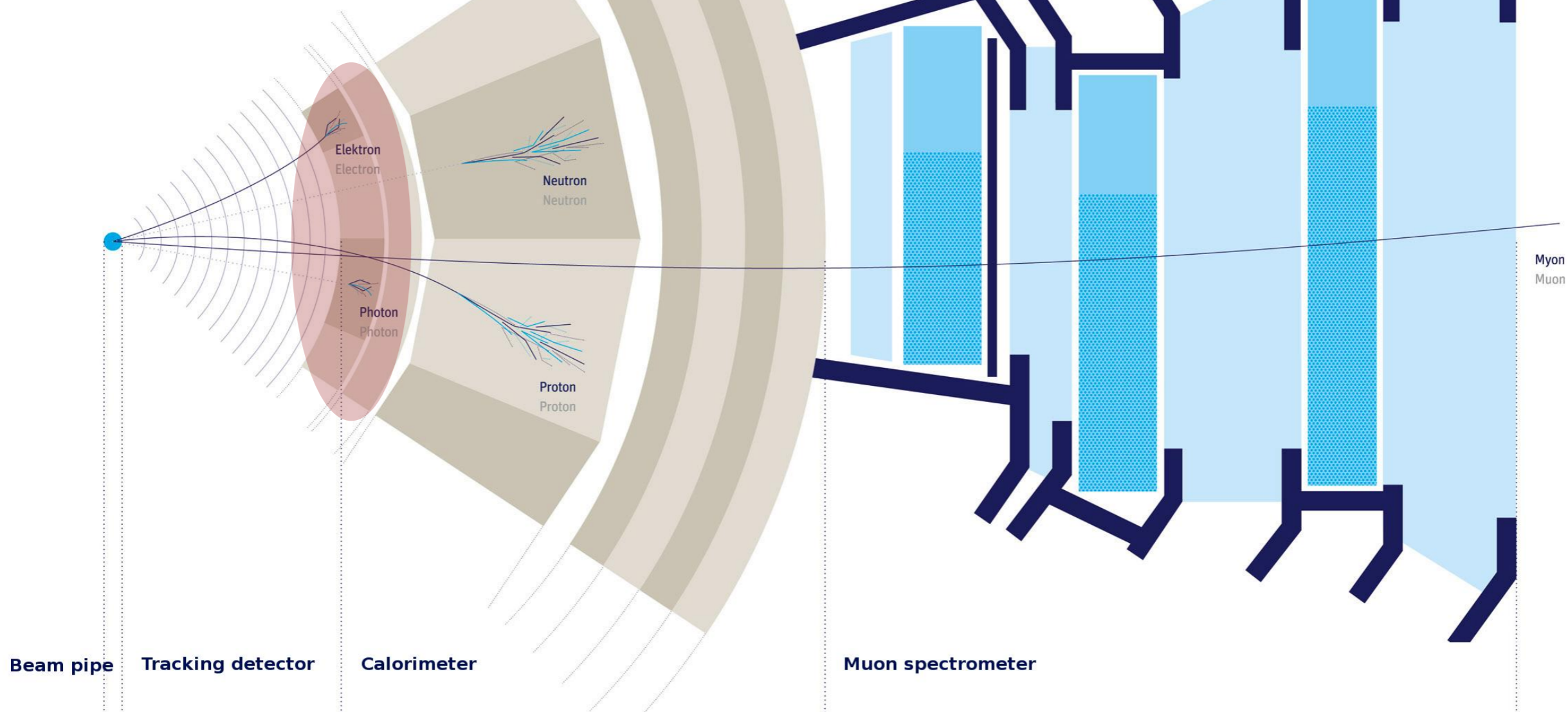
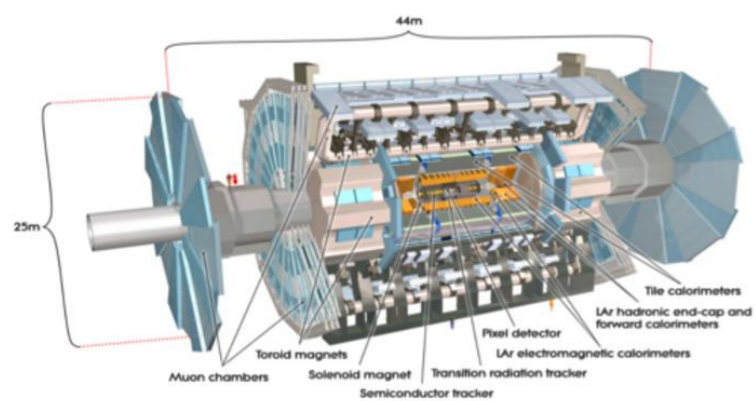


# DER SPURDETEKTOR

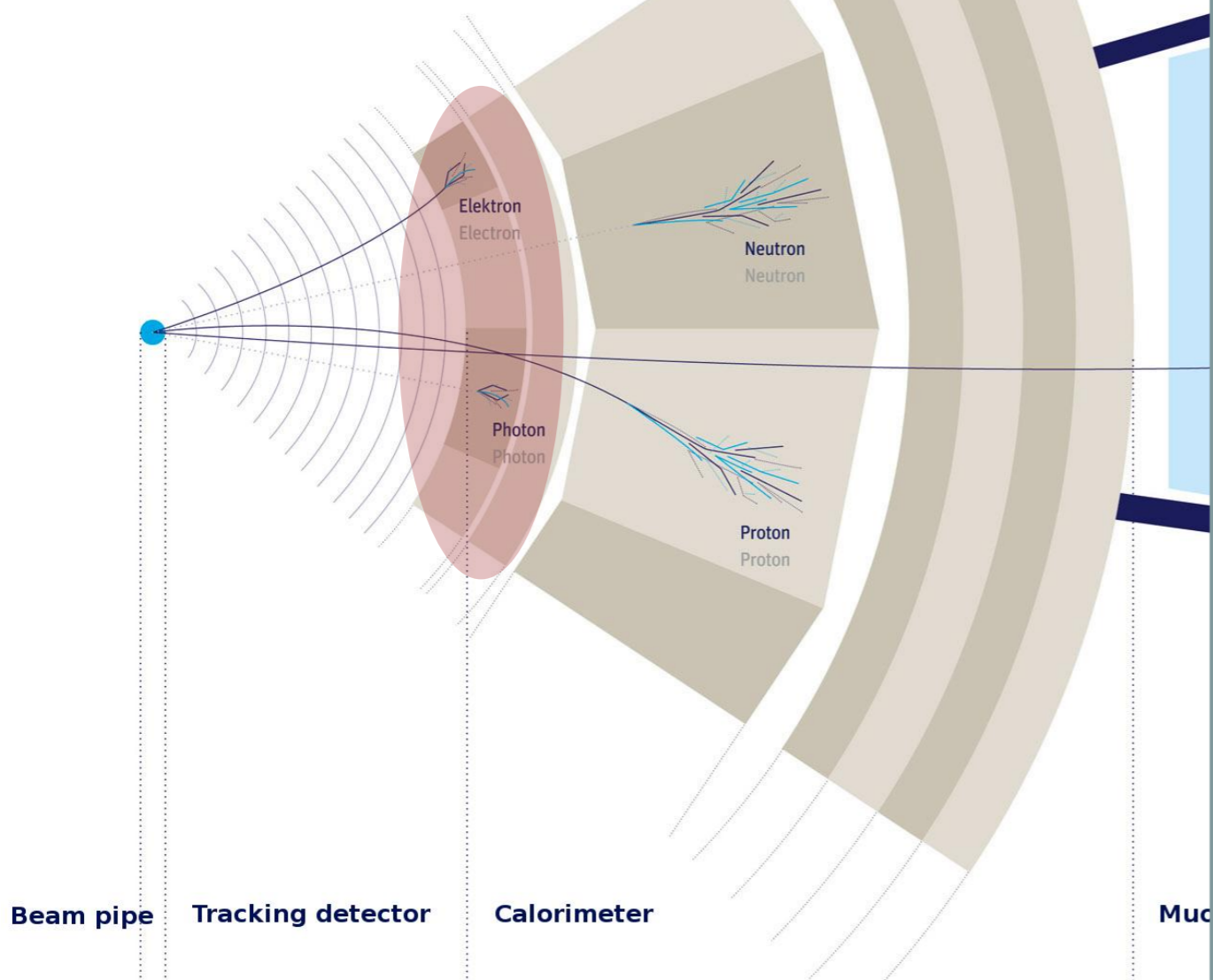
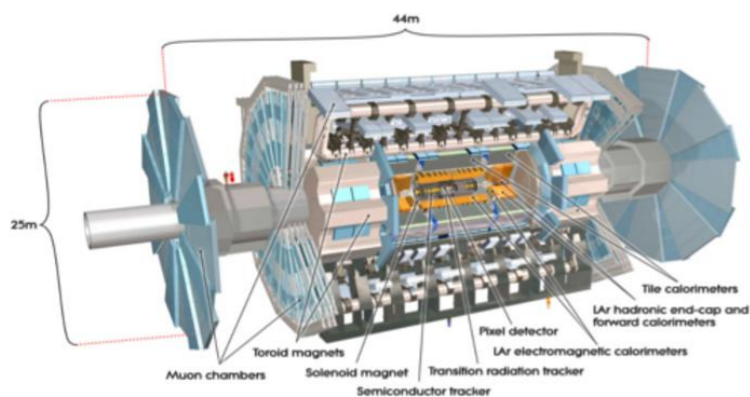


# DER VERTEXDETEKTOR

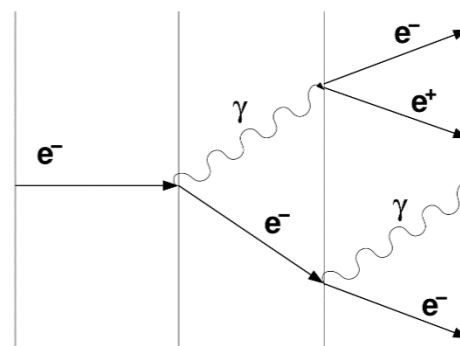
# DAS EM-KALORIMETER



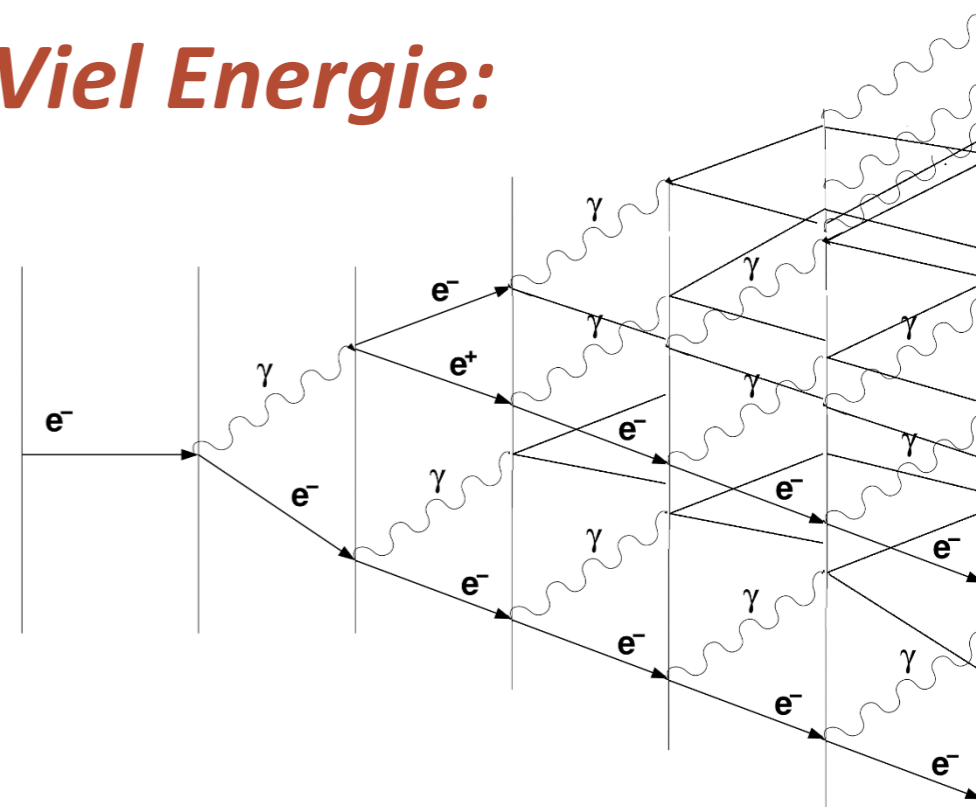
# DAS EM-KALORIMETER



*Wenig Energie:*

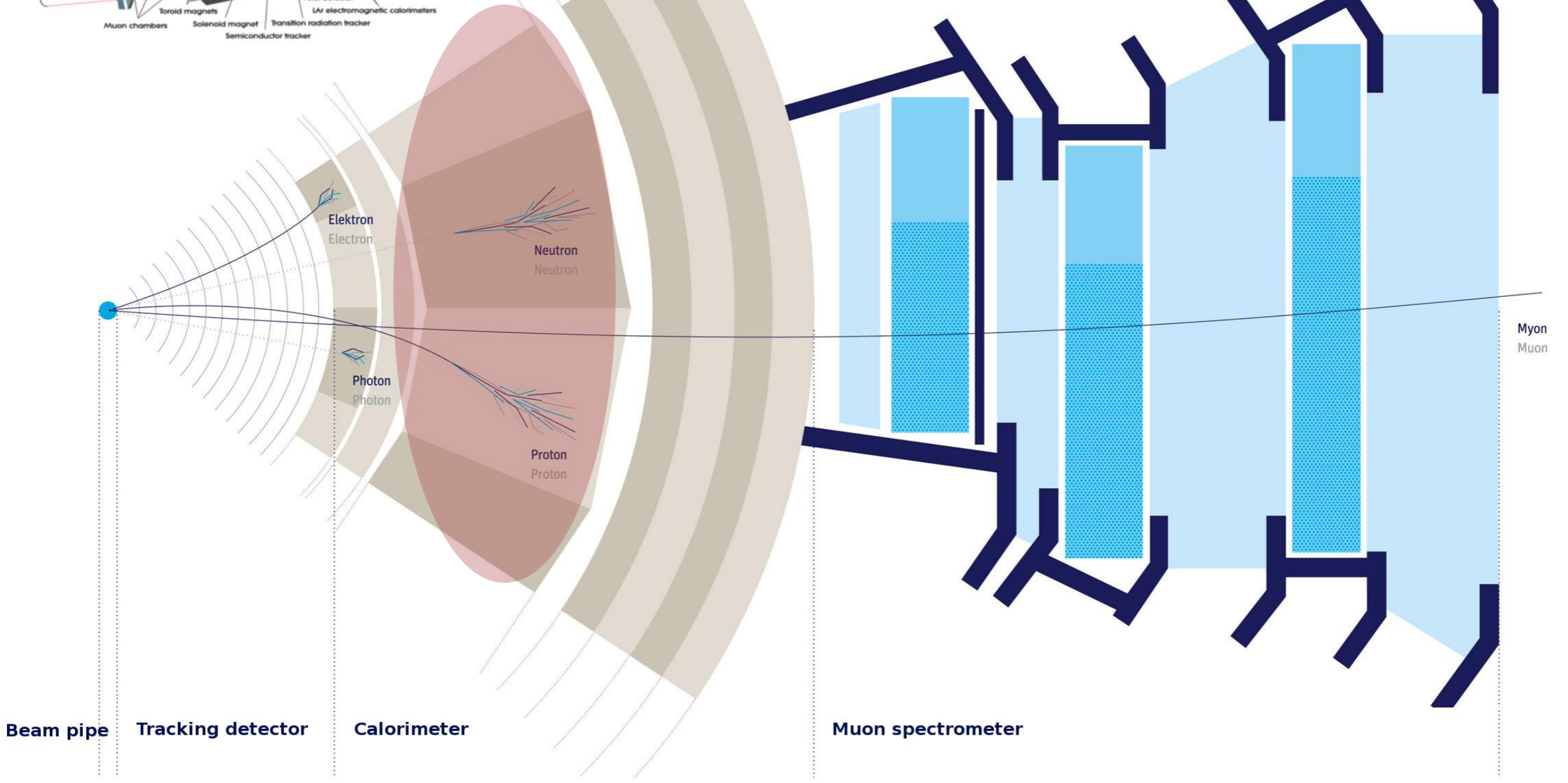
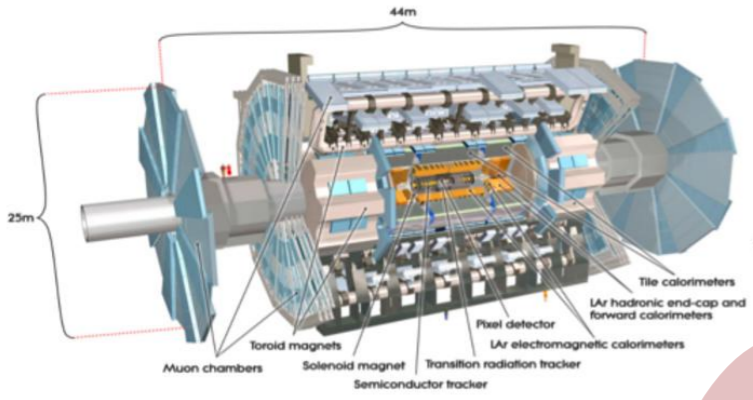


*Viel Energie:*





# DAS HADRONISCHE KALORIMETER



# DIE MYON KAMMERN

