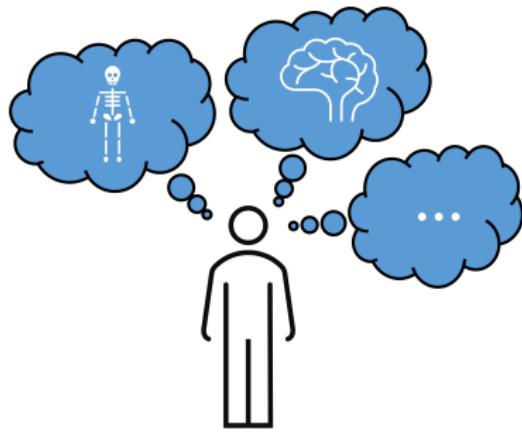


# Herzlich Willkommen zur Masterclass!

Gedulden Sie sich noch ein wenig. Die Veranstaltung beginnt in Kürze.



Woraus bestehen  
eigentlich Menschen?

Und,  
woher wissen wir das?

Woraus besteht die Welt?

Warum ist sie so gebaut, wie sie es ist?

Wir möchten heute der Frage nachgehen:  
Was ist Materie, wie kann man sie "messen"?



# Einführungsvortrag

Das Standardmodell der Teilchenphysik und der LHCb  
Detektor

<WorkGroup><sup>1</sup>

<sup>1</sup><University>

<Date>

Wer seid ihr?

Wer sind wir? ✓

Wer seid ihr?

☞ Anwesenheitsbogen

# Was ist Materie, wie kann man sie "messen" ?

Was müssen wir alles wissen, um dieser Frage nachzugehen?

# Der heutige Tag

|       |                                     |             |
|-------|-------------------------------------|-------------|
| 00:00 | Einführungsvortrag                  | (<Person1>) |
| 01:00 | Anwendung Detektoren                |             |
| 01:45 | Hadronen. Vortrag und Anwendung;    | (<Person2>) |
| 02:45 | Mittagspause                        |             |
| 03:45 | Datenanalyse. Vortrag und Anwendung | (<Person3>) |
| 04:45 | Ergebnisdiskussion                  | (<Person4>) |
| 05:00 | Ende                                |             |

Pausen gibt es zwischendurch, je nach Bedarf.

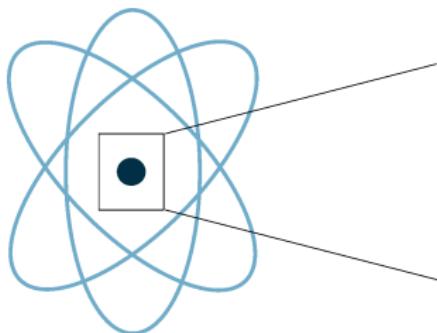
- ☞ Auf Toilette darf immer gehen, ohne zu fragen,
- ☞ Fragen über Physik dürfen immer gestellt werden!

# 1

## Einführung in die Teilchenphysik

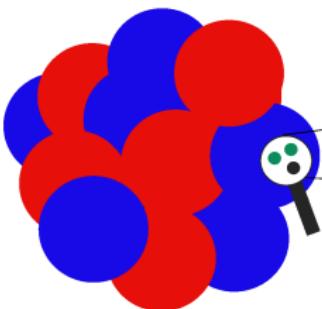
# Und was ist eigentlich im Nukleus?

Atom



$10^{-10} \text{ m}$

Atomkern



$10^{-15} \text{ m}$

Proton mit Quarks

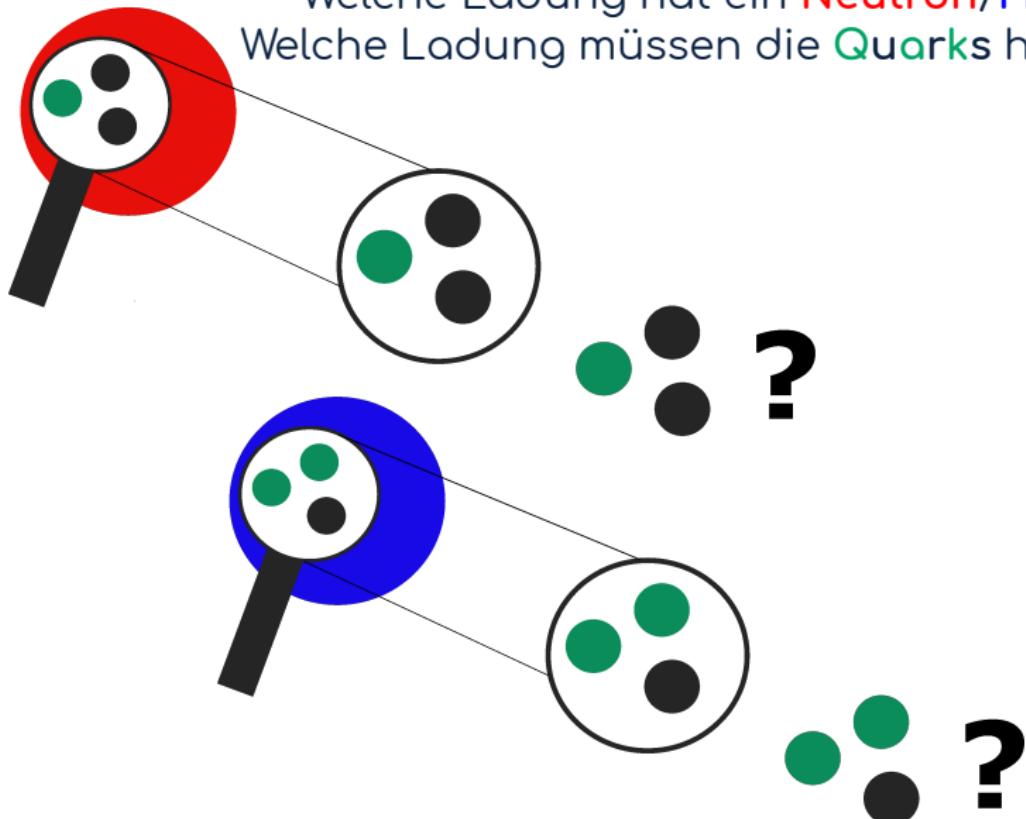


$\leq 10^{-18} \text{ m}$

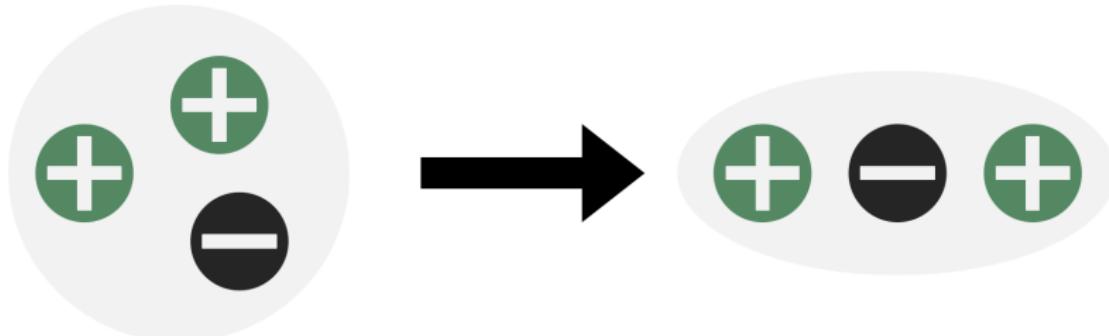
# Quarks - Was sind das?

Welche Ladung hat ein **Neutron/Proton**?

Welche Ladung müssen die **Quarks** haben?



# Wie werden Quarks zusammengehalten?

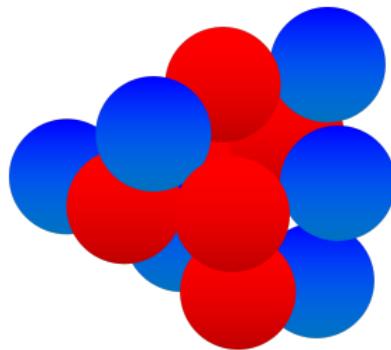


Die Elektromagnetische Kraft könnte Quarks binden!

# Kräfte in Atomkernen

...aber warum halten dann Atomkerne zusammen?!

✗ Protonen stoßen sich elektromagnetisch ab!



☞ Es gibt weitere Kraft die Atomkerne bindet

## Die Starke Kraft

# Fragestunde Protonen

...aber,

wie können wir feststellen, ob Protonen nun  
von der  
starken oder elektromagnetischen Kraft  
zusammengehalten werden?

# Andere Quarkkombinationen

Tatsächlich finden wir Teilchen, die aus drei up-Quarks/drei down-Quarks bestehen!



$$\rightarrow \Delta^{++}$$



$$\rightarrow \Delta^-$$

☞ Die Starke Kraft muss für die Bindung verantwortlich sein!

# Unterschiede der Kräfte

Wie unterscheiden sich die elektromagnetische und die starke Kraft?

# Unterschiede der Kräfte

Wie unterscheiden sich die elektromagnetische und die starke Kraft?

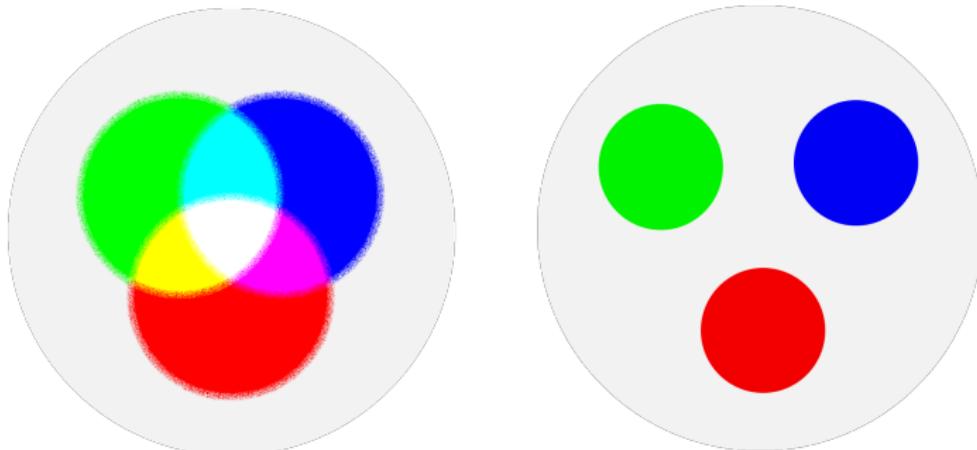
- Wir spüren die starke Kraft nicht im Alltag
- Die starke Kraft wirkt anziehend auf elektrisch neutrale & geladene Teilchen
- ...
- † Wir verstehen die elektromagnetische Kraft, bei der Starken Kraft tun wir uns schwerer!

# Die Eigenschaften der starken Wechselwirkung

Für die Starke Kraft existiert eine Ladung, auf die sie wirkt!

- Quarks müssen eine sog. Farbladung besitzen  
Teilchen, die wir beobachten, sind aber farblos!

Analogie:



- Insgesamt farbneutrale Teilchen!

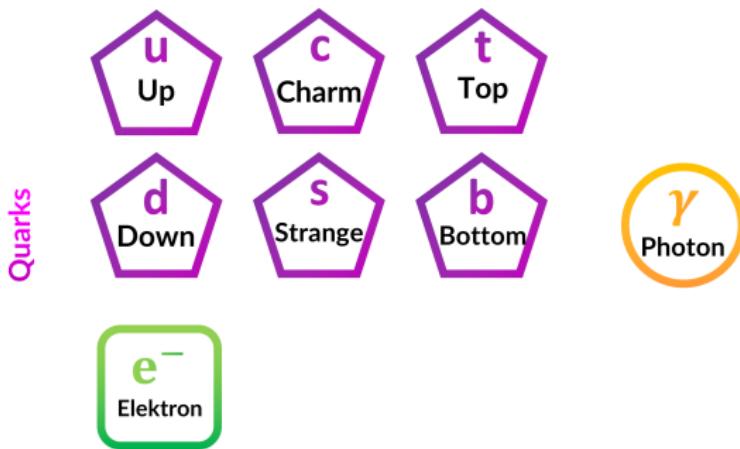
# Das Standard Modell der Teilchenphysik



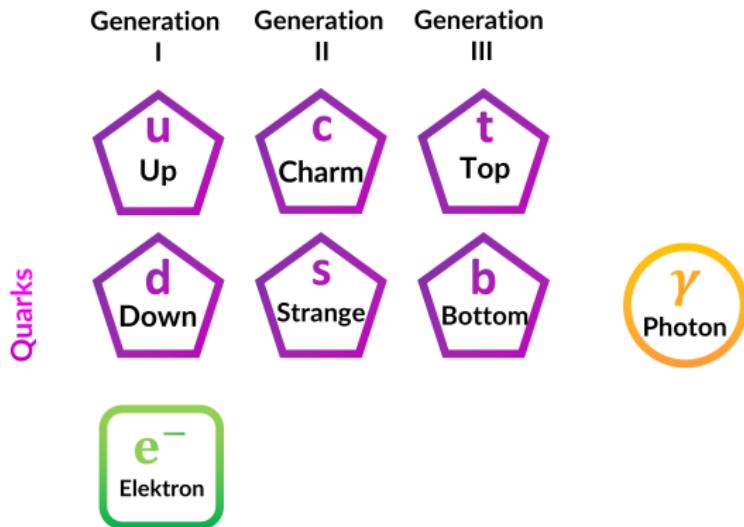
# Das Standard Modell der Teilchenphysik



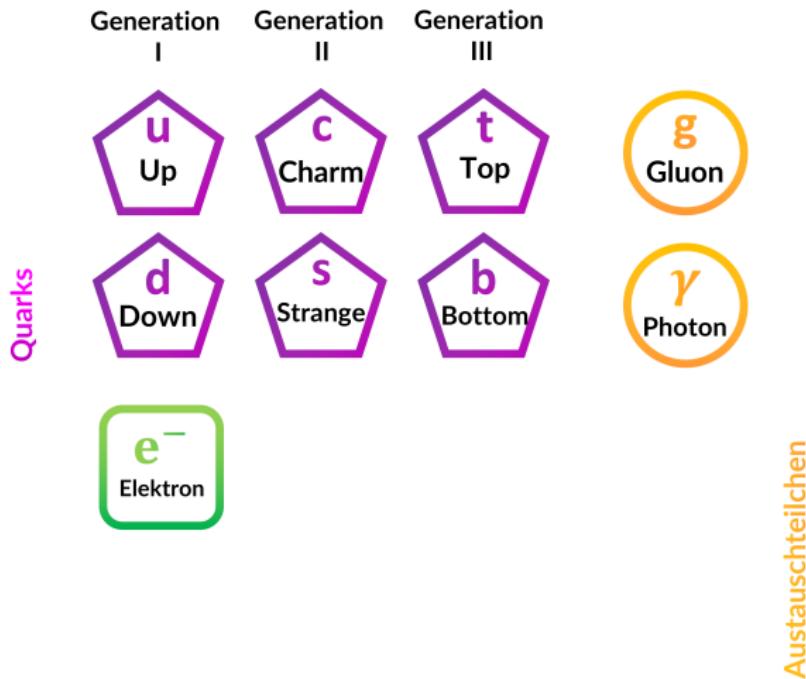
# Das Standard Modell der Teilchenphysik



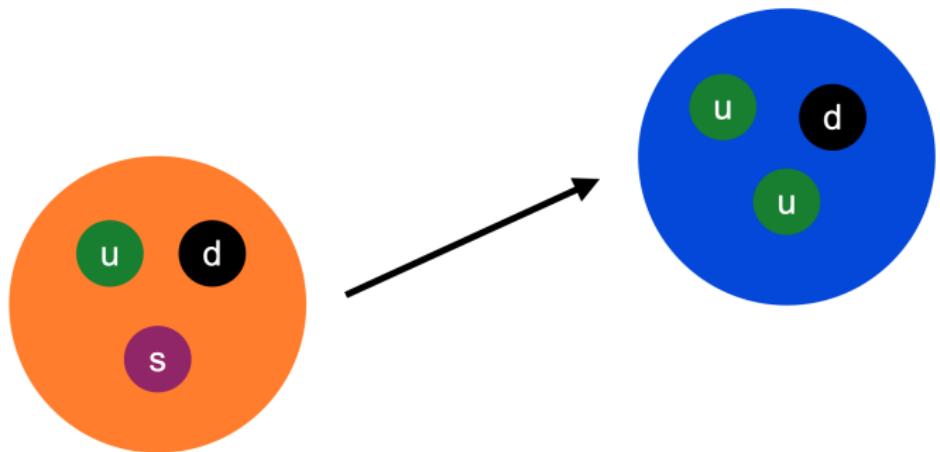
# Das Standard Modell der Teilchenphysik



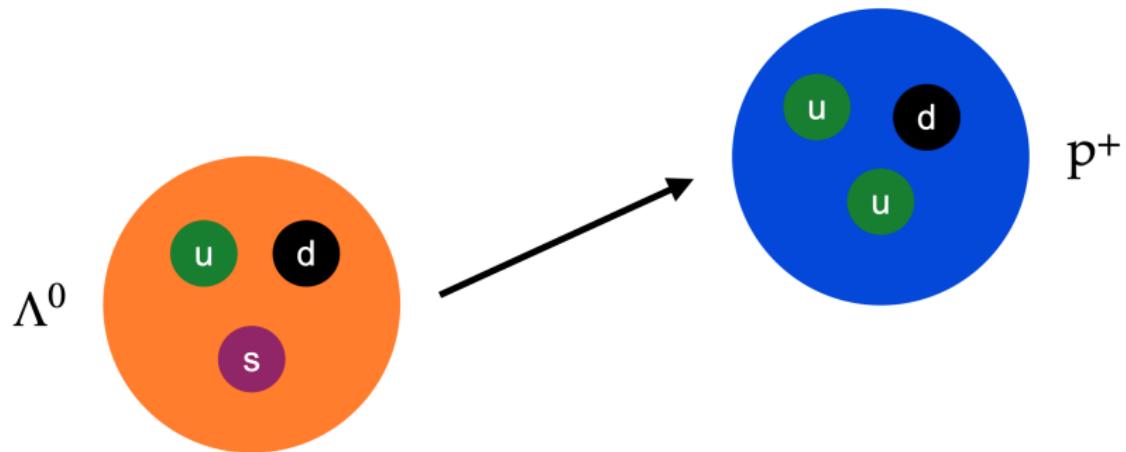
# Das Standard Modell der Teilchenphysik



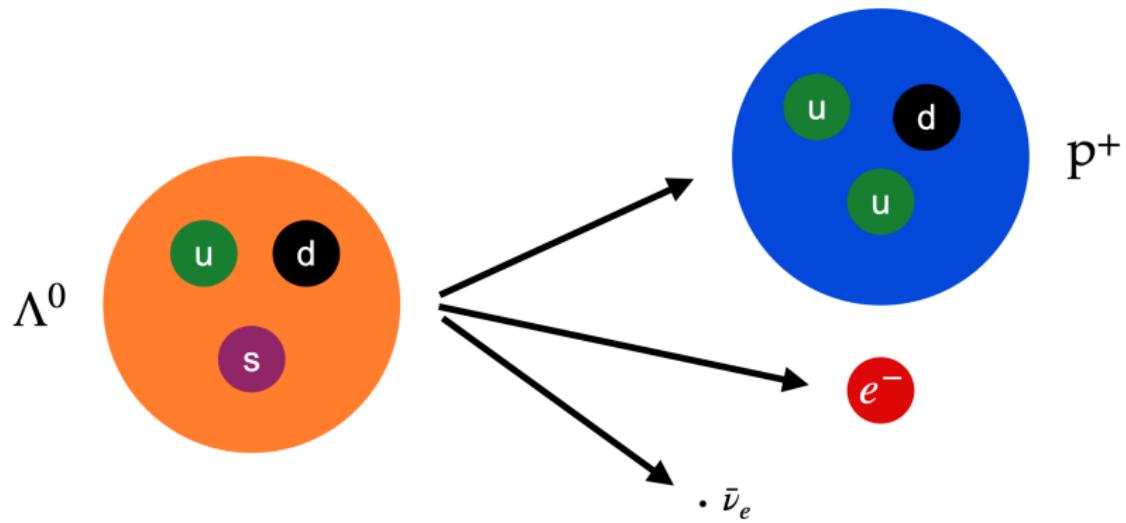
# Die schwache Wechselwirkung



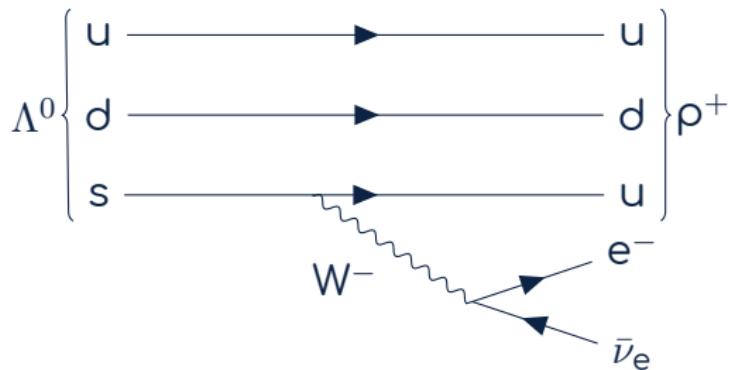
# Die schwache Wechselwirkung



# Die schwache Wechselwirkung

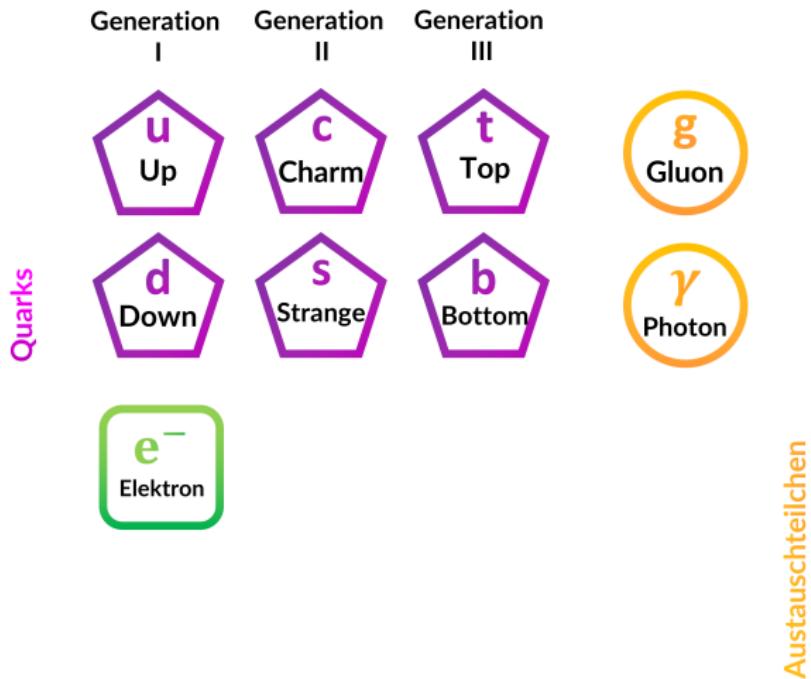


# Feynman Diagramme

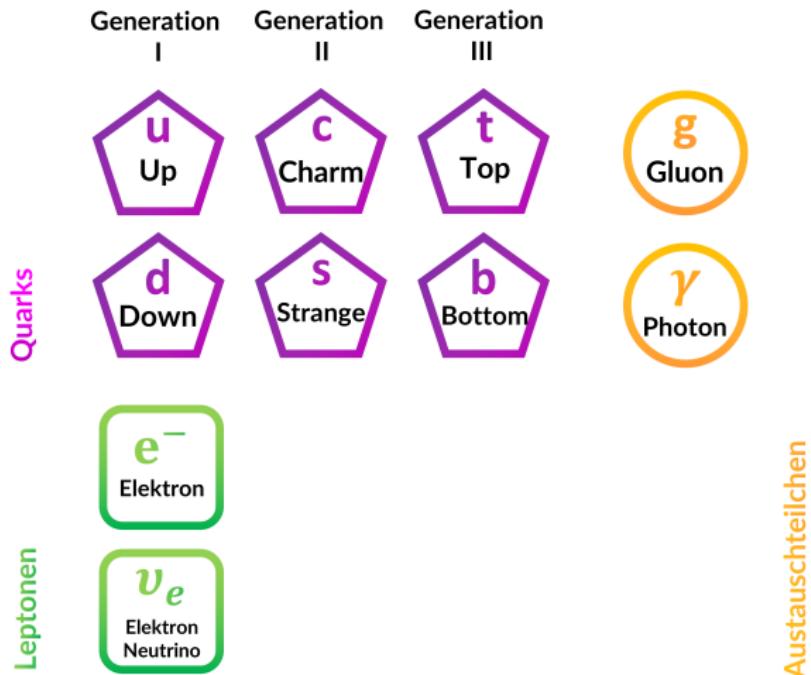


☞ Nur die schwache Wechselwirkung ist in der Lage den Flavour eines Teilchens zu verändern!

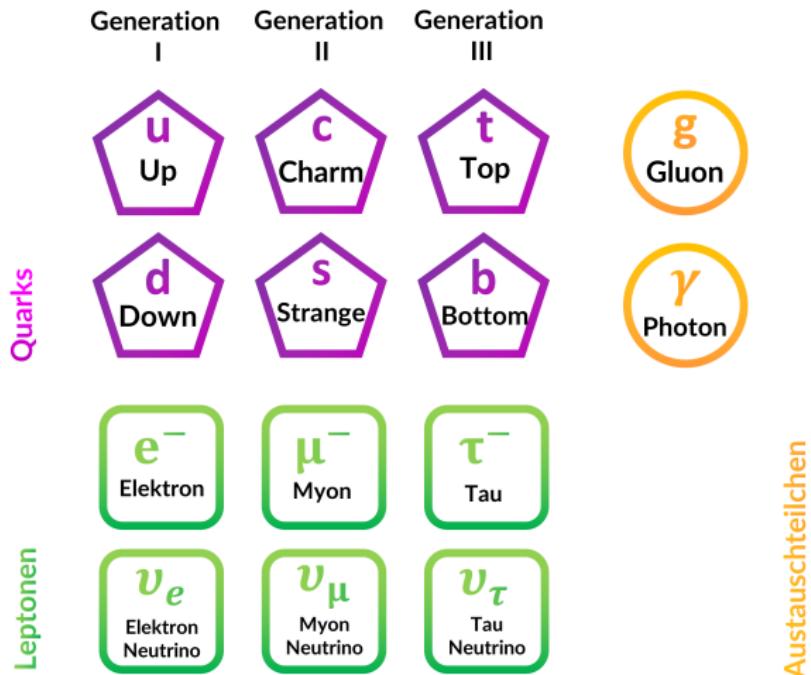
# Das Standard Modell der Teilchenphysik II



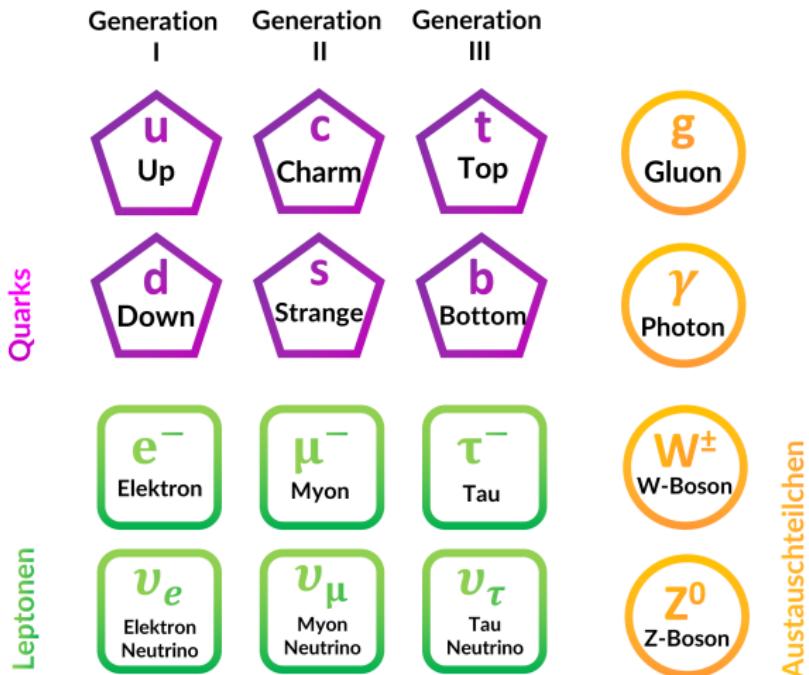
# Das Standard Modell der Teilchenphysik II



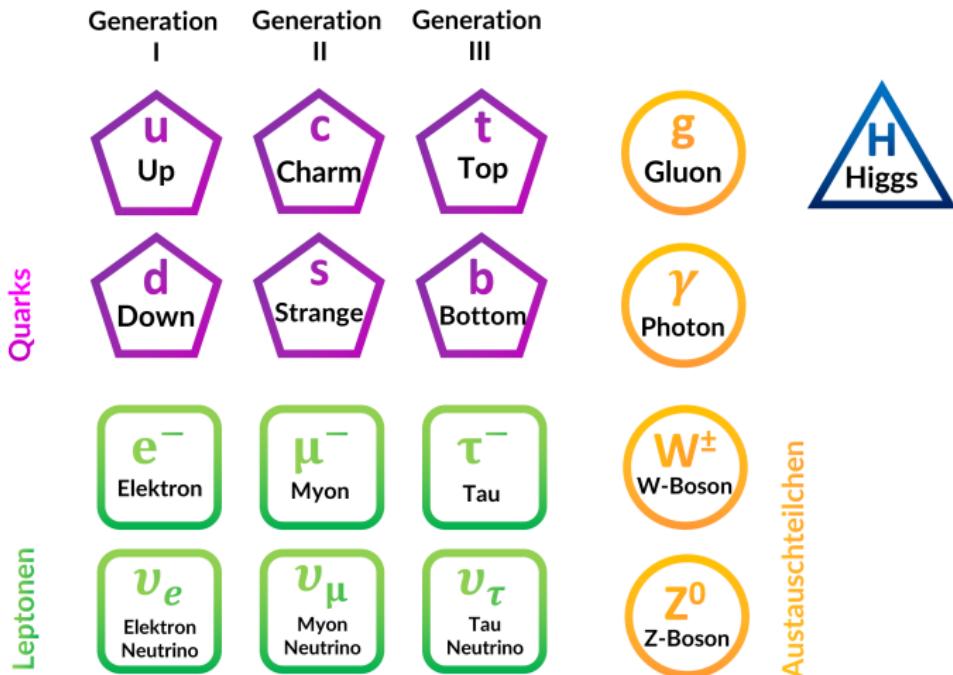
# Das Standard Modell der Teilchenphysik II



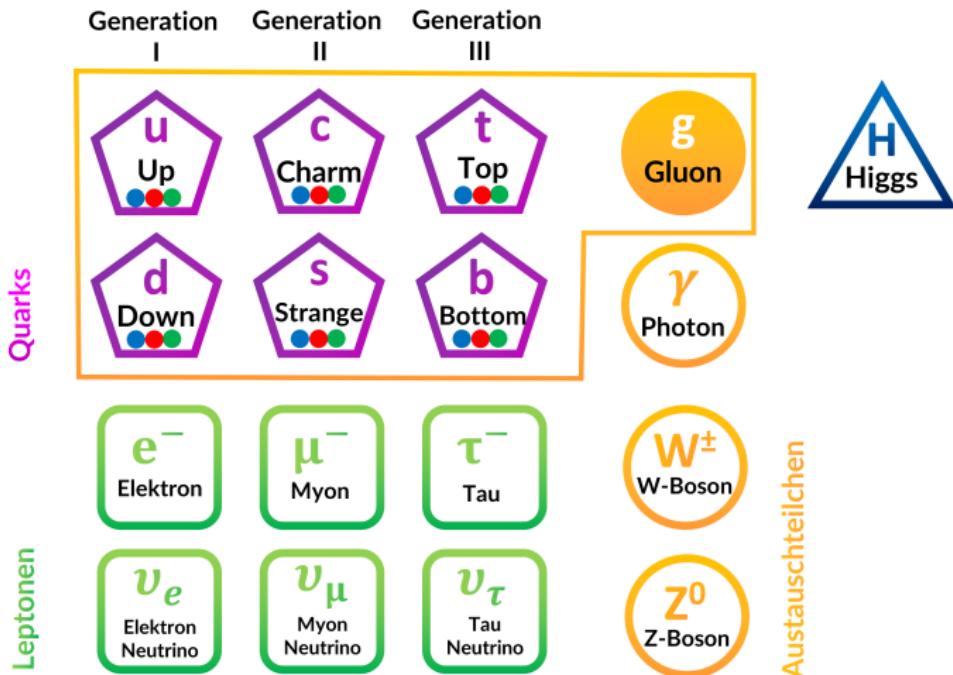
# Das Standard Modell der Teilchenphysik II



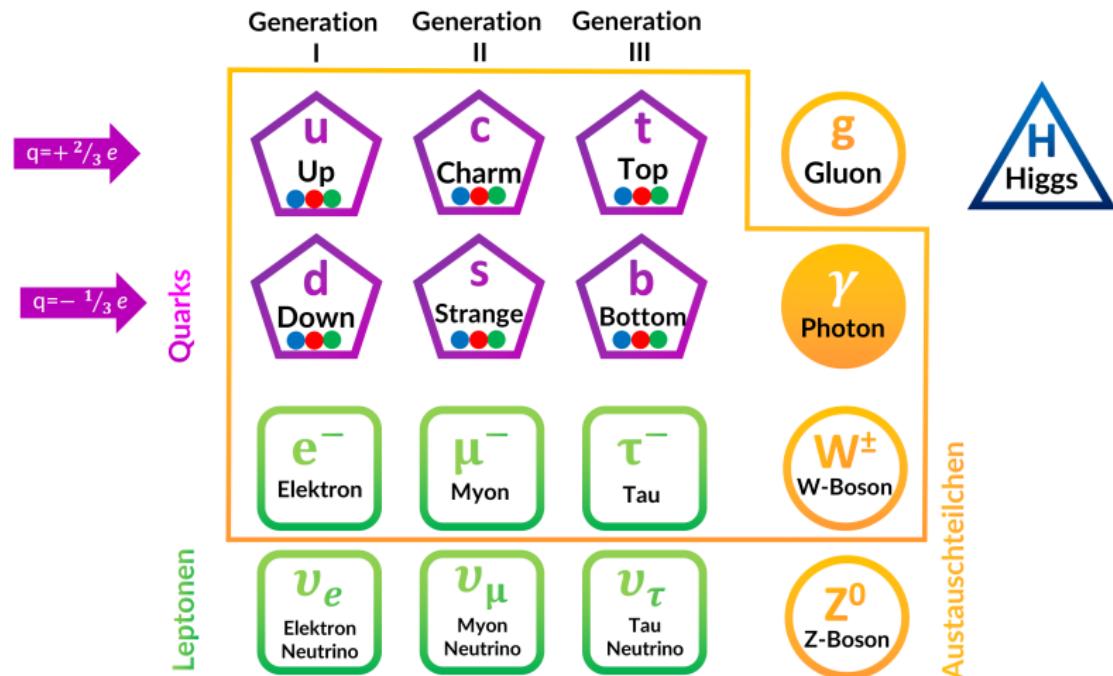
# Das Standard Modell der Teilchenphysik II



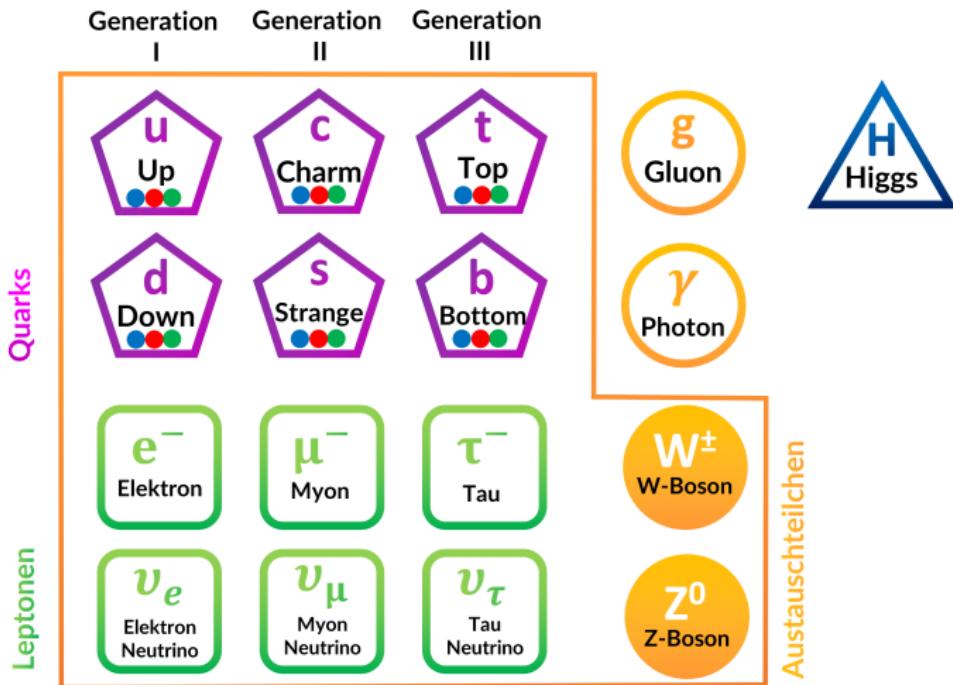
# Das Standard Modell der Teilchenphysik II



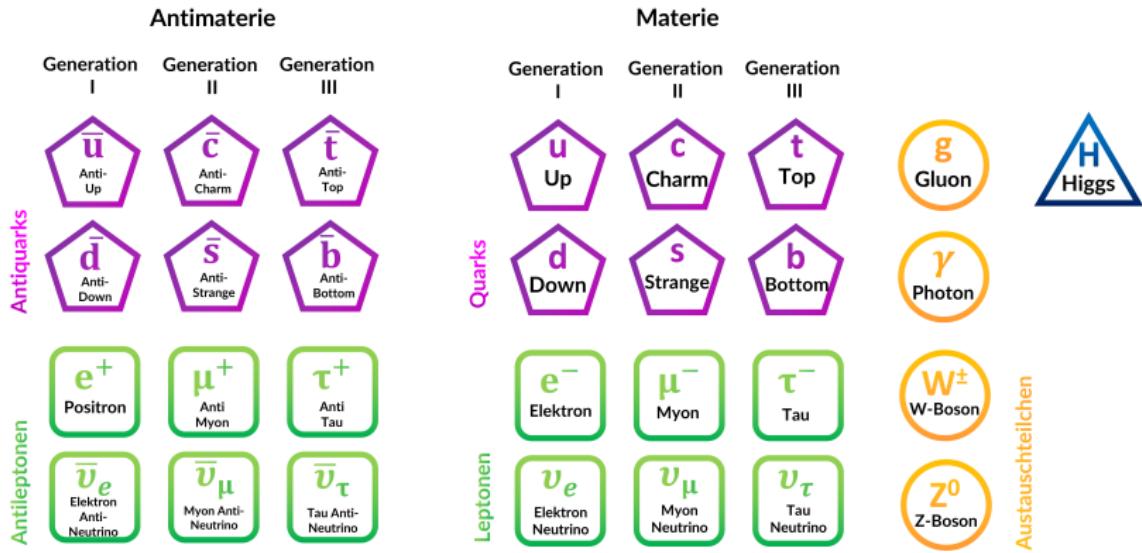
# Das Standard Modell der Teilchenphysik II



# Das Standard Modell der Teilchenphysik II



# Das Standard Modell der Teilchenphysik II



# Standard Modell: Das wichtigste für heute

- ✗ 6 Quark-Flavours u, d, c, s, b, t
- ✗ Starke-, Schwache- und Elektromagnetische Kraft
- ✗ Flavour-Änderung nur über Schwachen Zerfall
- ✗ Austauschteilchen  $\gamma$ ,  $Z^0$  &  $W^\pm$ , g
- ✗ Farbladung als Ladung der Starken Kraft
- ✗ Quarks farbig, Teilchen farbneutral
- † Starke Kraft recht unverstanden!

# Was ist Materie, wie kann man sie "messen"?

Und jetzt?

- Wie kann man Teilchen erzeugen?
- Wie können wir das alles nachweisen?!

# Was ist Materie, wie kann man sie "messen"?

Und jetzt?

- Wie kann man Teilchen erzeugen?
- Wie können wir das alles nachweisen?!

Aber erstmal  
**5 min Pause :)**

# 2

## Einführung in den LHCb-Detektor am CERN

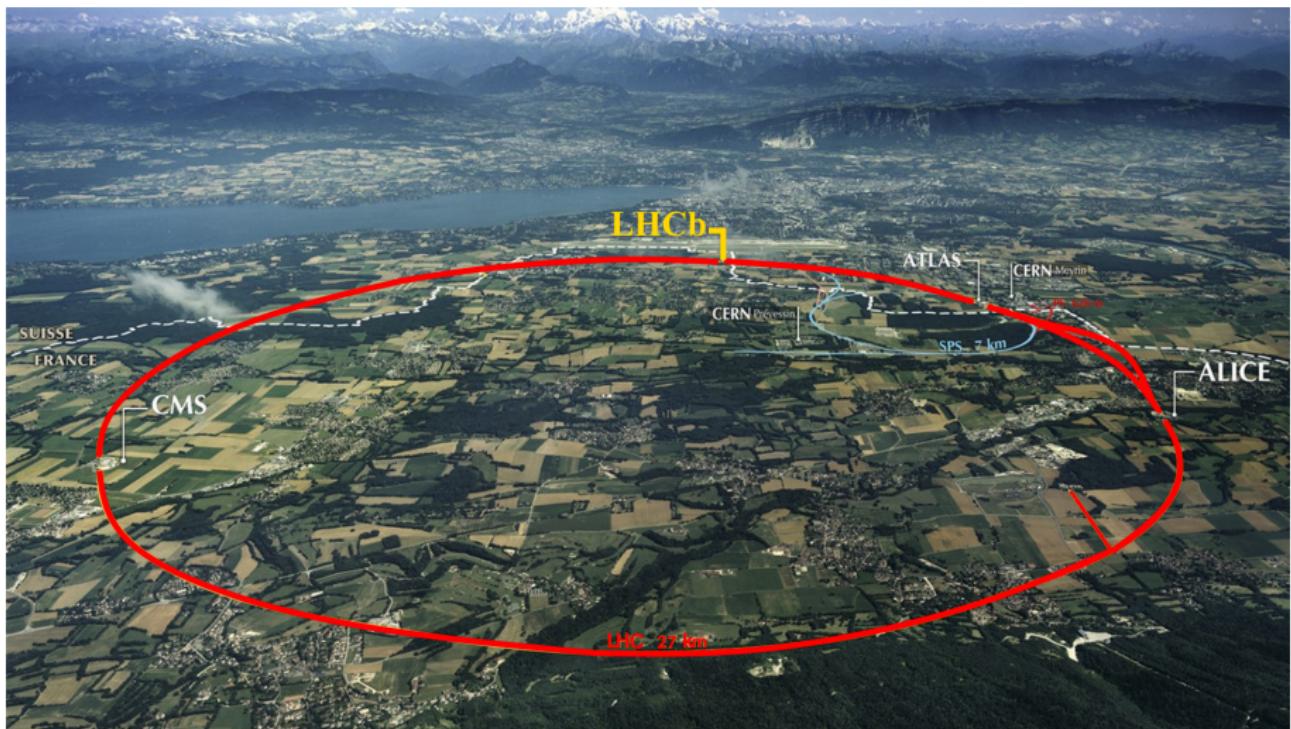
# Ein Teilchen bitte!

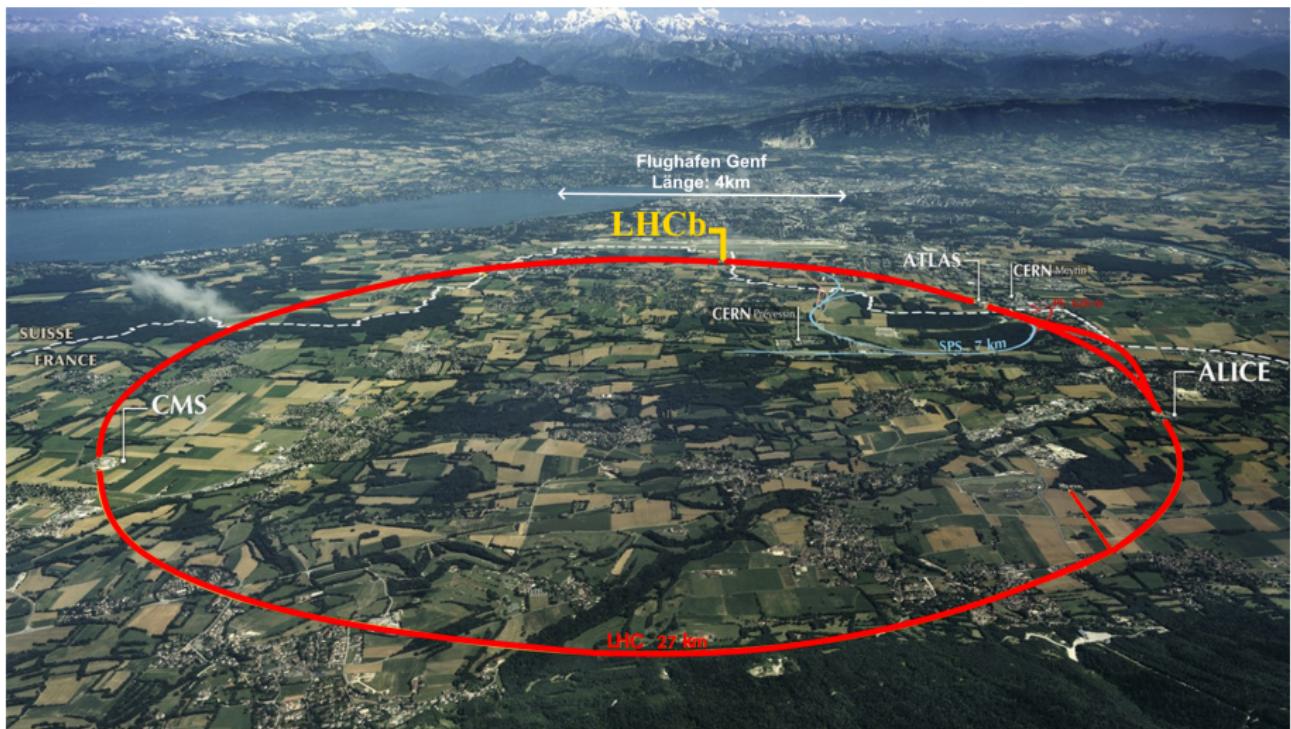
Wir wollen Teilchen produzieren!  
Dazu brauchen wir viel **Energie!**

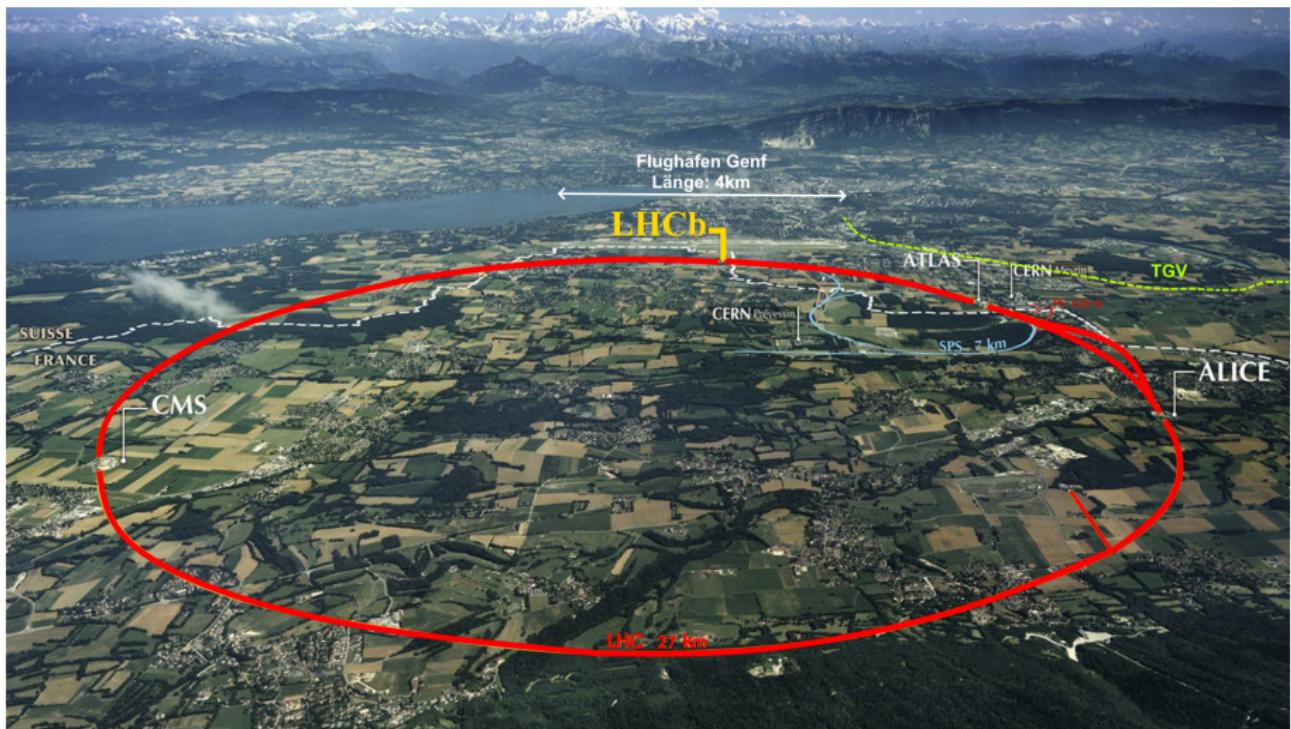
$$E = m \cdot c^2$$

Wie kann man die benötigte Energie bereitstellen?



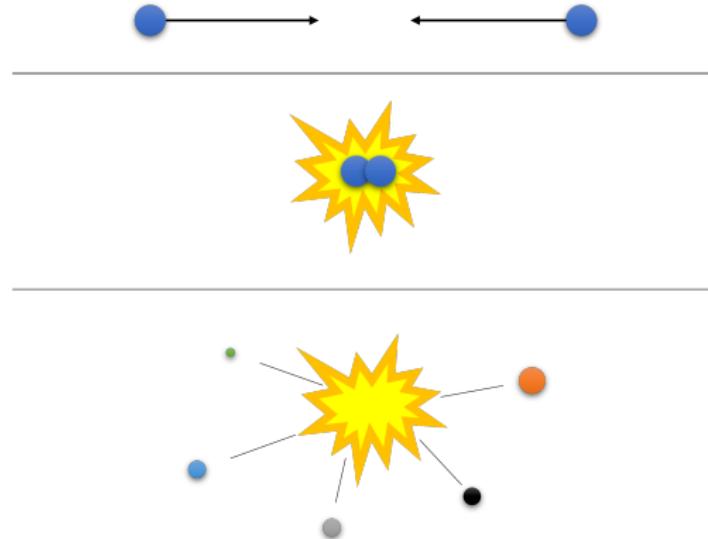






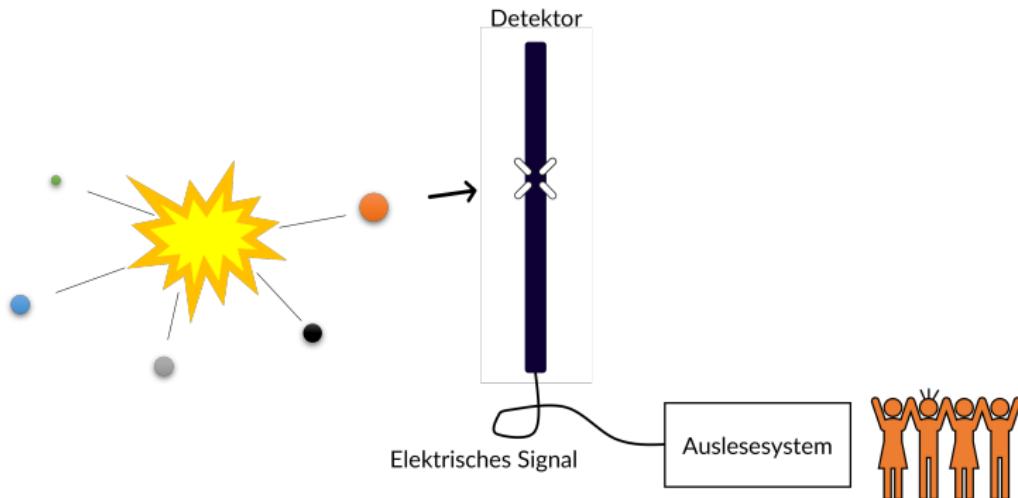
# Die Kollision der Teilchen

Die hochenergetischen Teilchen kollidieren  
x Was geschieht mit der Energie?



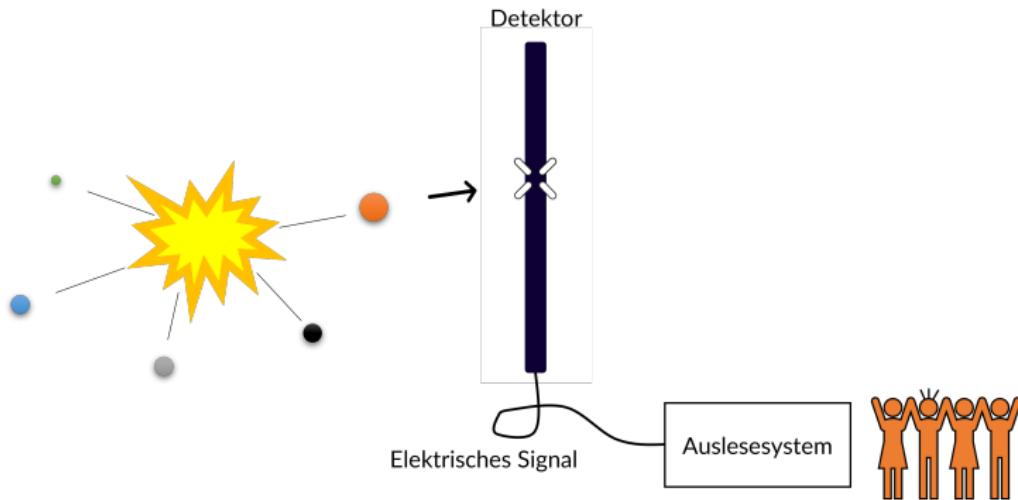
# Detektive für Teilchen

Wie können wir feststellen, was bei der Kollision passiert ist?



# Detektive für Teilchen

Wie können wir feststellen, was bei der Kollision passiert ist?



- ✗ Welches Signal gehört zu welchem Teilchen?

# Welches Signal gehört zu welchem Teilchen?

Erinnert euch an die Eigenschaften der Teilchen, die ihr kennt:

# Welches Signal gehört zu welchem Teilchen?

Erinnert euch an die Eigenschaften der Teilchen, die ihr kennt:

- Masse  $m$
- Elektrische Ladung  $q$
- Energie  $E$
- Impuls  $\vec{p}$
- Geschwindigkeit  $\vec{v}$

# Welches Signal gehört zu welchem Teilchen?

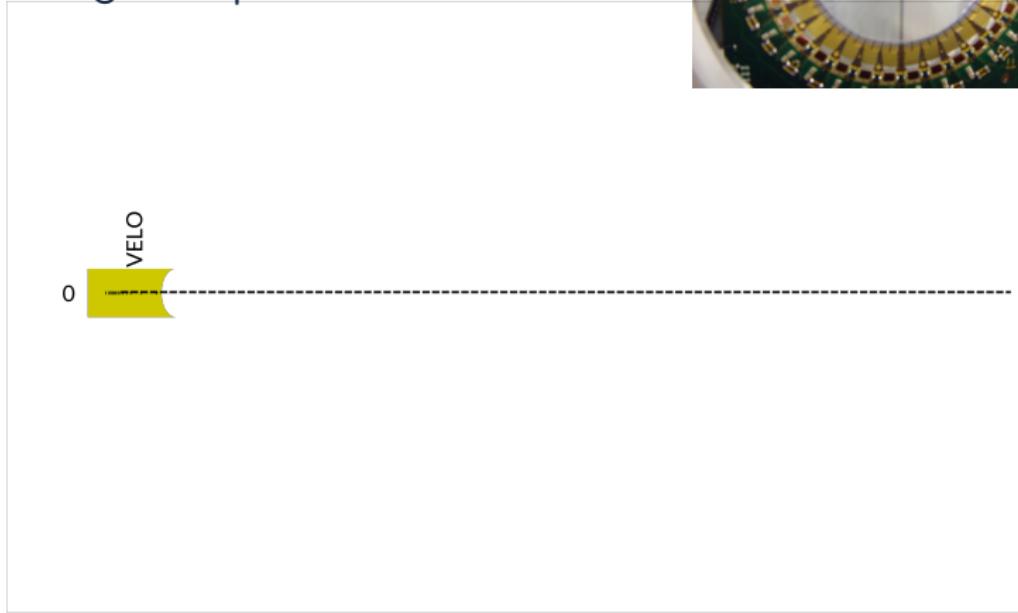
Erinnert euch an die Eigenschaften der Teilchen, die ihr kennt:

- Masse  $m$
- Elektrische Ladung  $q$
- Energie  $E$
- Impuls  $\vec{p}$
- Geschwindigkeit  $\vec{v}$

→ Wie können wir mit dem LHCb-Detektor diese Eigenschaften messen?

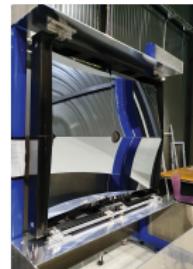
# Vertex Locator (VELO)

- Um den Kollisionspunkt aufgebaut
- Wichtig für Spurrekonstruktion



# Ring Imaging Cherenkov Detector (RICH1)

- Misst **Geschwindigkeit** der Teilchen
- Wichtig für Identifikation von Teilchen
- Nur genau in begrenztem Geschwindigkeitsfenster



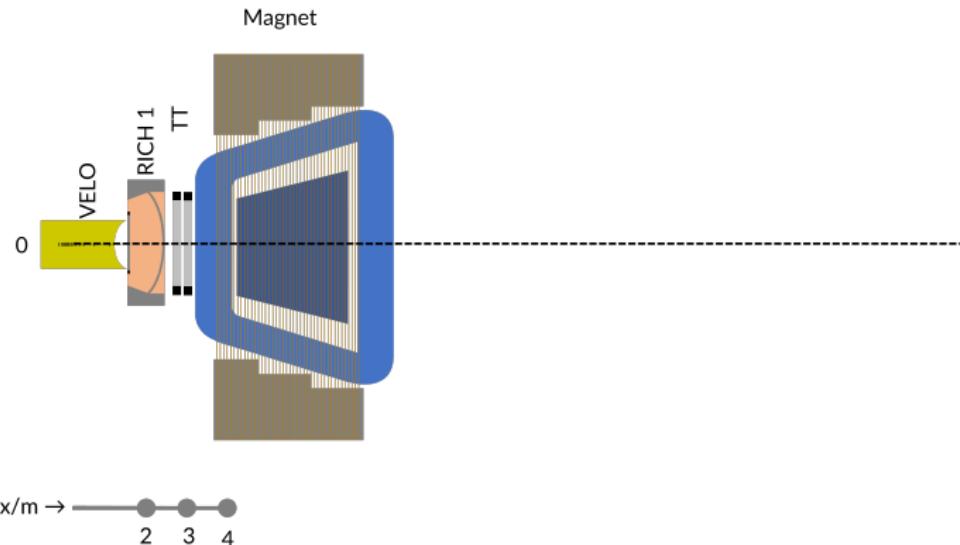
# Tracker Turicensis (TT)

- Misst die **Position** der Teilchen
- Trägt zur Spurrekonstruktion bei



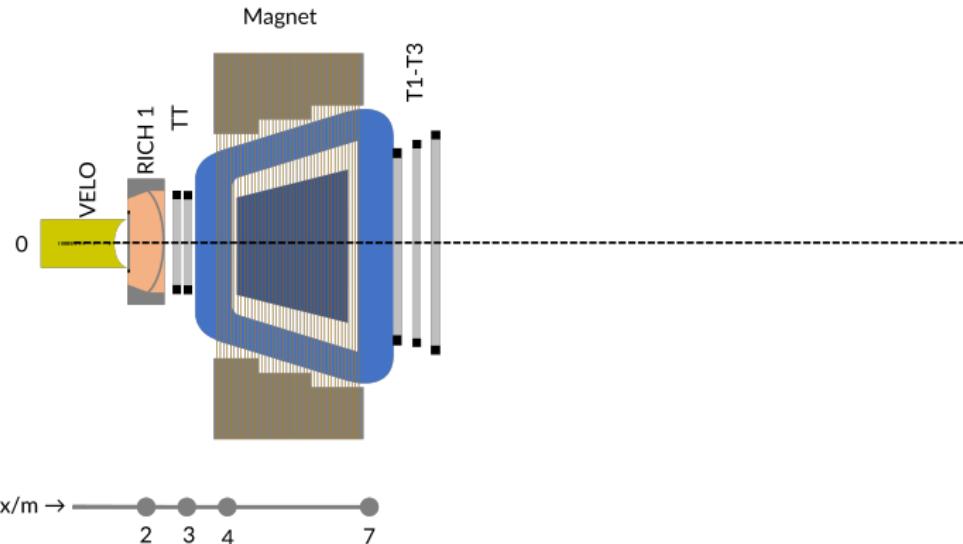
# Magnet

- Krümmt die Flugbahn der Teilchen proportional zum **Impuls** und **el. Ladung**
- Hilft Teilchen zu identifizieren



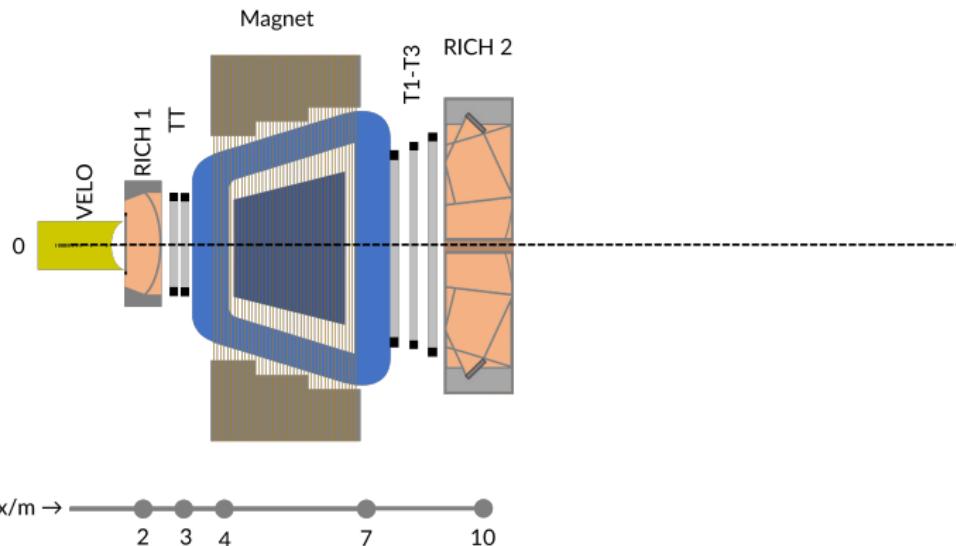
# Tracker T1, T2 und T3

- Misst die **Position** der Teilchen
- Hilft Teilchen zu identifizieren



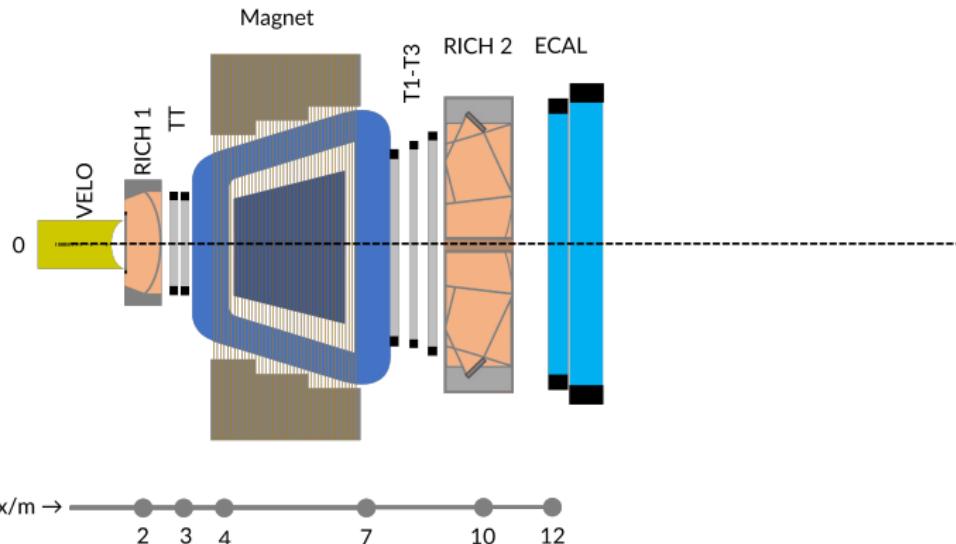
# Ring Imaging Cherenkov Detector (RICH2)

- Funktioniert wie RICH1
- Nutzt anderes Medium → genau in anderem Geschwindigkeitsfenster



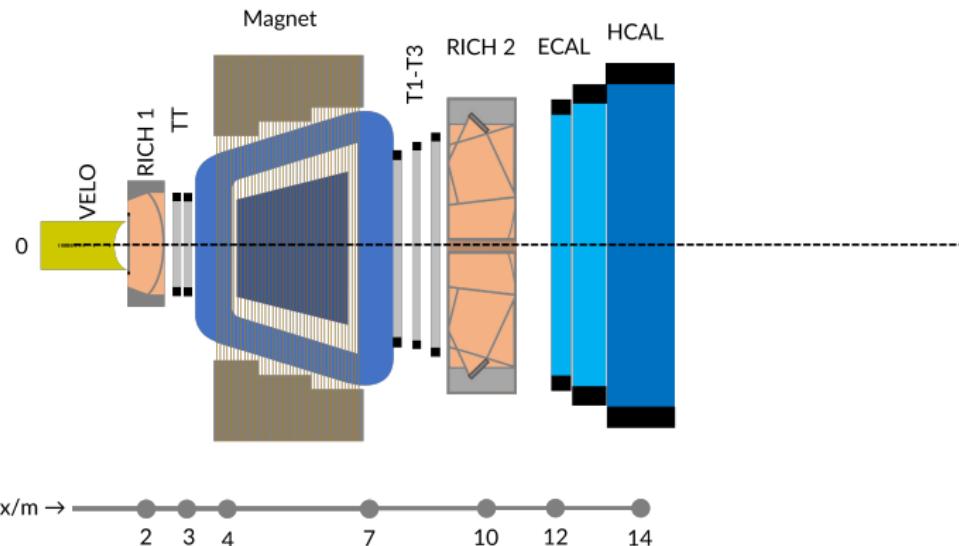
# Elektromagnetisches Kalorimeter (ECAL)

- Stoppt Elektronen und Photonen
- Misst deponierte **Energie**



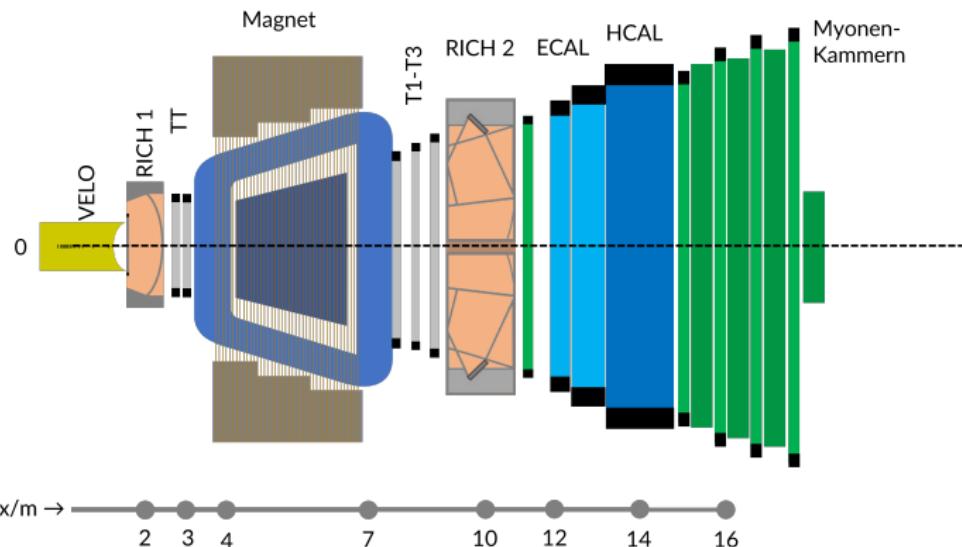
# Hadronisches Kalorimeter (HCAL)

- Stoppt auch schwere geladene und neutrale Teilchen
- Misst deponierte **Energie**

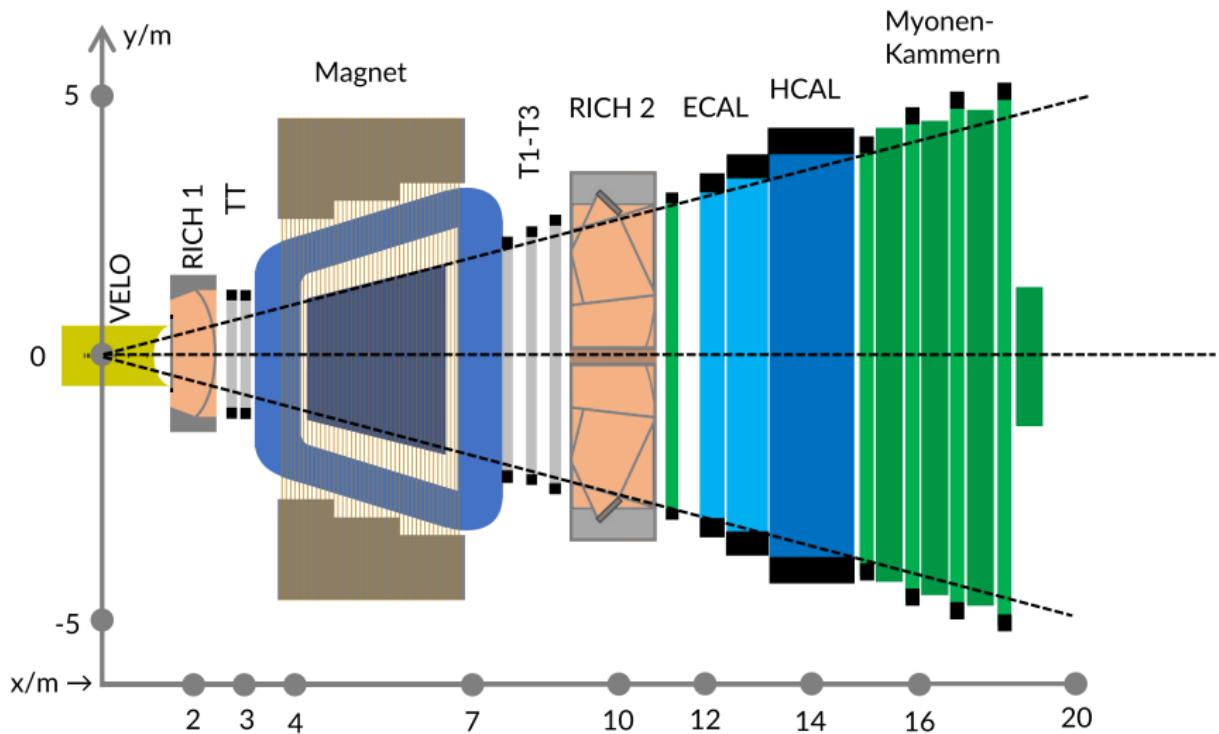


# Myonenkammern

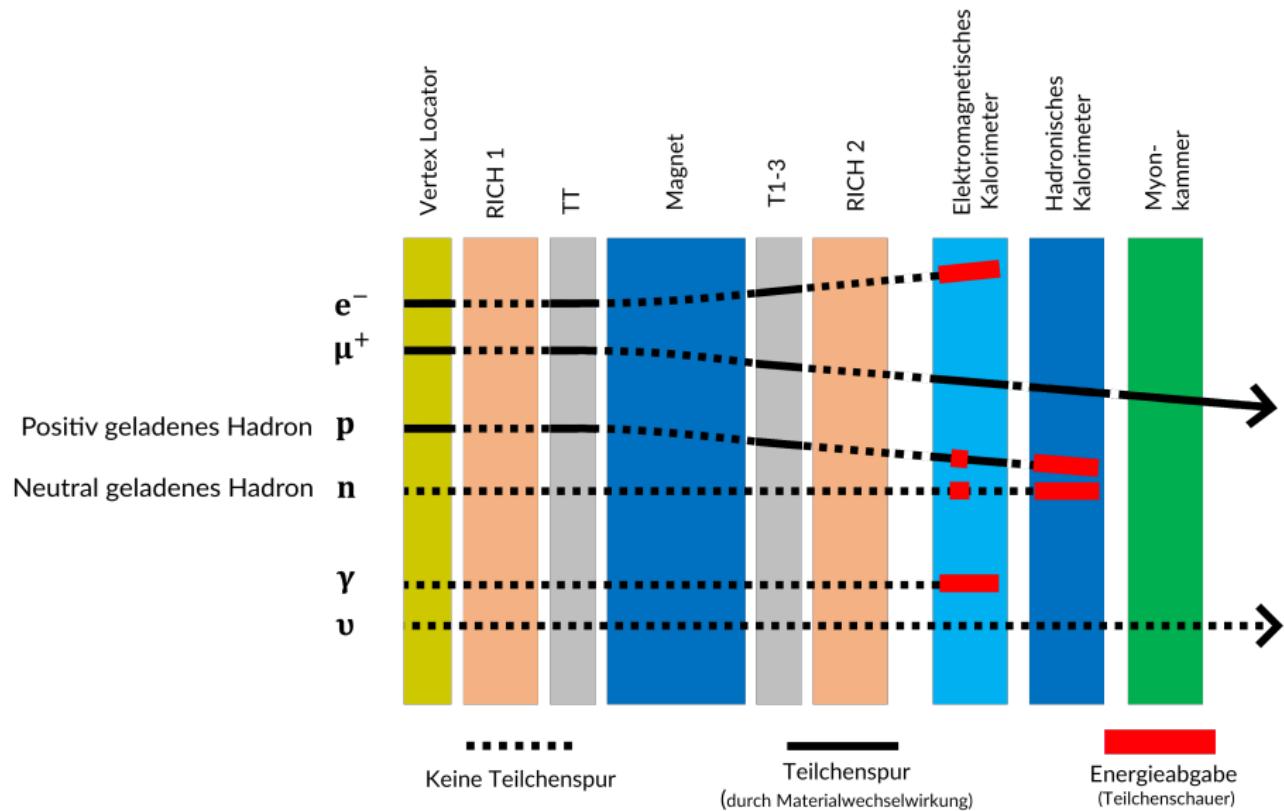
- Misst **Position** von Myonen



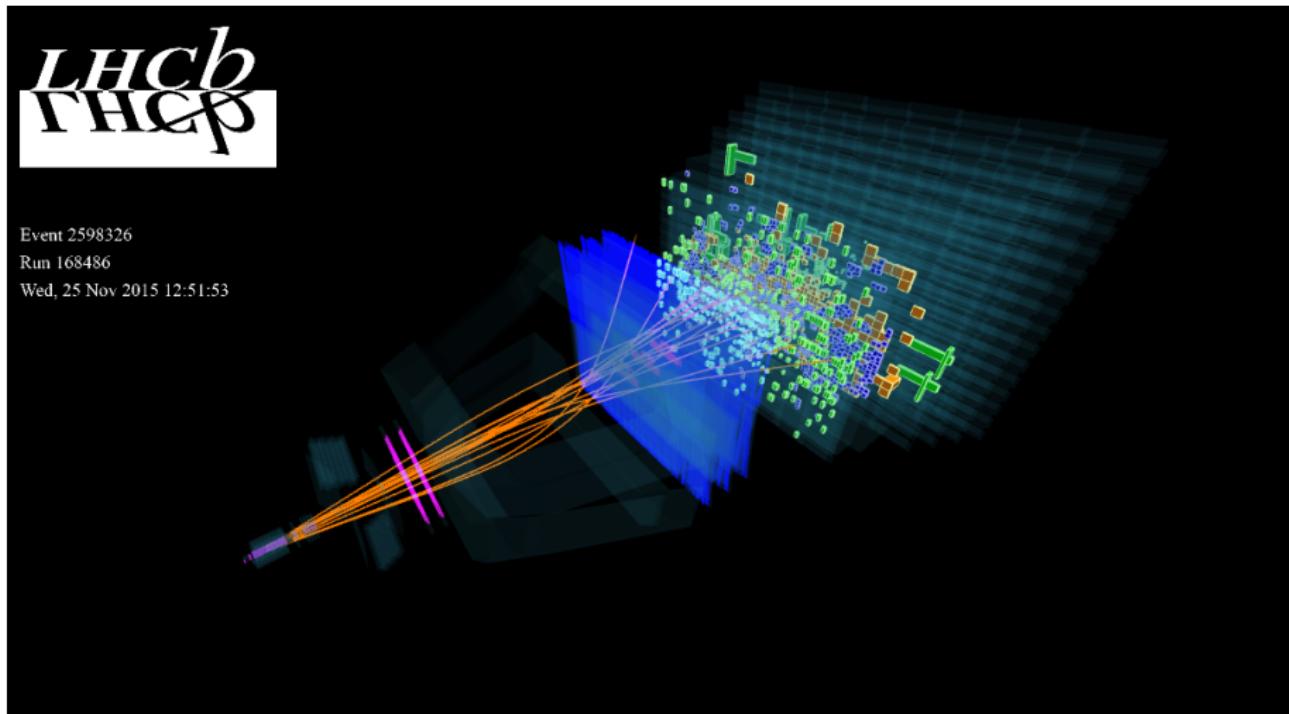
# Messbereich von LHCb



# Was macht wo ein Signal?



# Wie sieht ein gemessenes Ereignis aus?



# LHCb - Zusammenfassung

Erinnert euch an die Eigenschaften der Teilchen, die ihr kennt

| Eigenschaft     |           | Subdetektor           |
|-----------------|-----------|-----------------------|
| Masse           | $m$       | ?                     |
| El. Ladung      | $q$       | Magnet, Tracker       |
| Energie         | $E$       | Kalorimenter, Tracker |
| Impuls          | $\vec{p}$ | ?                     |
| Geschwindigkeit | $\vec{v}$ | RICH, Magnet, Tracker |

# LHCb - Zusammenfassung

Erinnert euch an die Eigenschaften der Teilchen, die ihr kennt

| Eigenschaft     |           | Subdetektor           |
|-----------------|-----------|-----------------------|
| Masse           | $m$       | ?                     |
| El. Ladung      | $q$       | Magnet, Tracker       |
| Energie         | $E$       | Kalorimenter, Tracker |
| Impuls          | $\vec{p}$ | ?                     |
| Geschwindigkeit | $\vec{v}$ | RICH, Magnet, Tracker |

- Spuren müssen mit Trackern rekonstruiert, zu Teilchen zugeordnet werden!
- Impuls und Masse müssen berechnet (abgeschätzt) werden!

# LHCb - Zusammenfassung

Erinnert euch an die Eigenschaften der Teilchen, die ihr kennt

| Eigenschaft     |           | Subdetektor           |
|-----------------|-----------|-----------------------|
| Masse           | $m$       | ?                     |
| El. Ladung      | $q$       | Magnet, Tracker       |
| Energie         | $E$       | Kalorimenter, Tracker |
| Impuls          | $\vec{p}$ | ?                     |
| Geschwindigkeit | $\vec{v}$ | RICH, Magnet, Tracker |

- Spuren müssen mit Trackern rekonstruiert, zu Teilchen zugeordnet werden!
- Impuls und Masse müssen berechnet (abgeschätzt) werden!
- ☞ Eure Aufgabe jetzt!