



Einführungsvortrag

Das Standardmodell der Teilchenphysik und der LHCb
Detektor

University of Bonn

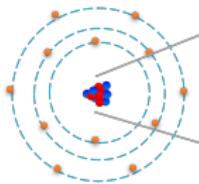
11. April 2025

1

Einführung in die Teilchenphysik

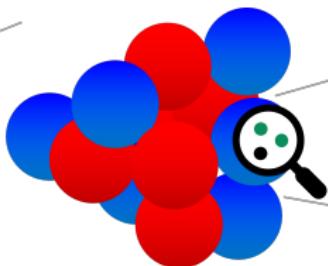
Und was ist eigentlich im Nukleus?

Atom



10^{-10} m

Atomkern



10^{-15} m

Quarks

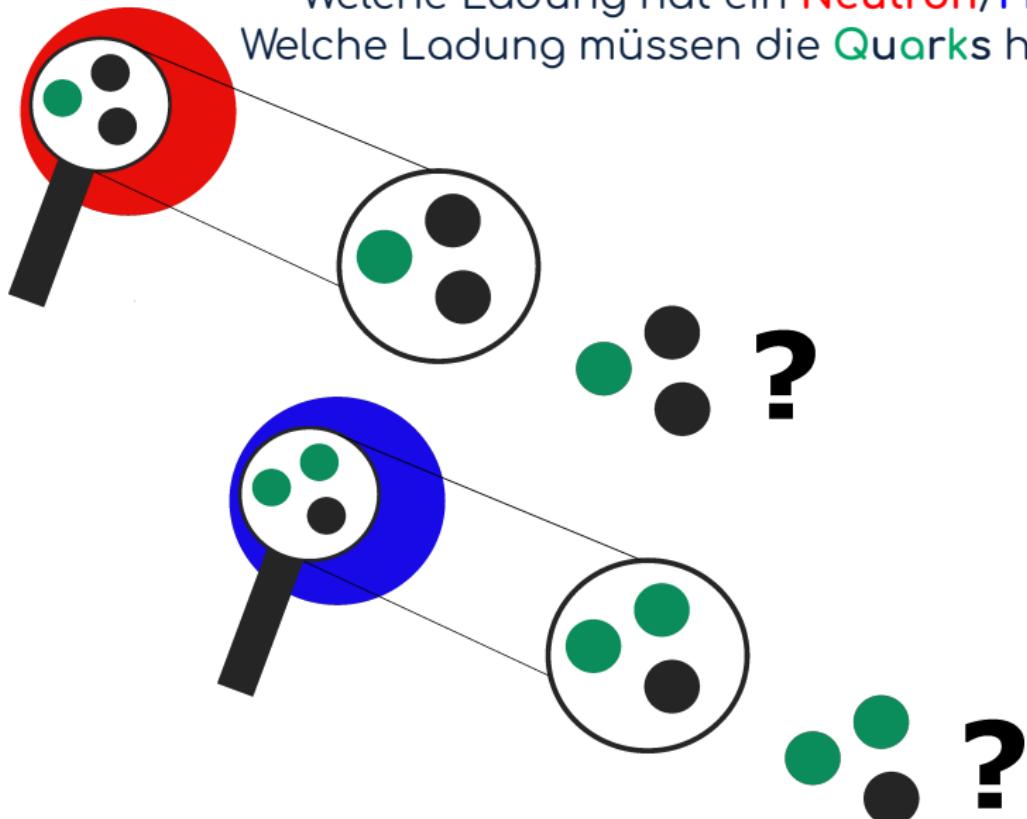


$\leq 10^{-18} \text{ m}$

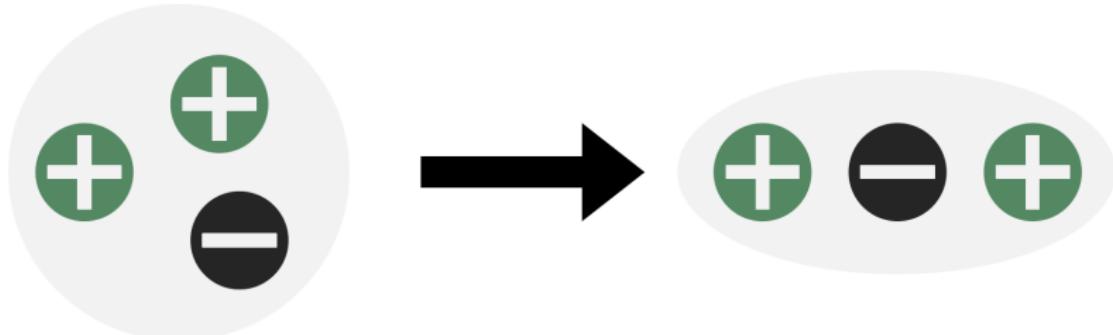
Quarks - Was sind das?

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

Welche Ladung müssen die **Quarks** haben?



Wie werden Quarks zusammengehalten?

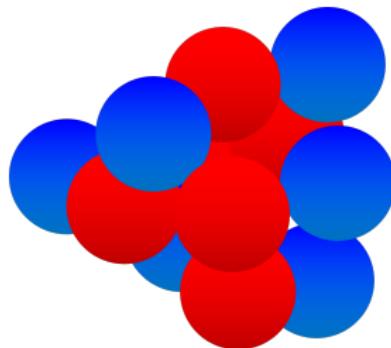


Die Elektromagnetische Kraft könnte Quarks binden!

Kräfte in Atomkernen

...aber warum halten dann Atomkerne zusammen?!

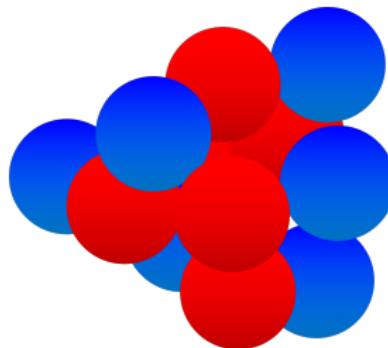
☞ **Protonen** stoßen sich elektromagnetisch ab!



Kräfte in Atomkernen

...aber warum halten dann Atomkerne zusammen?!

☞ **Protonen** stoßen sich elektromagnetisch ab!



☞ Es gibt weitere Kraft, die Atomkerne bindet

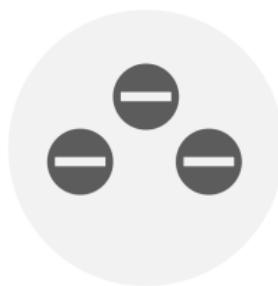
Die starke Kraft

...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!

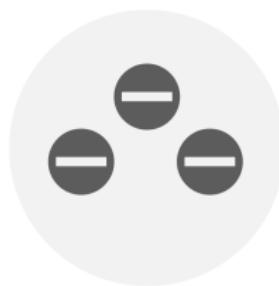


Andere Quarkkombinationen

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 im Alltag nicht
- Die starke Kraft wirkt anziehend auf elektrisch neutrale & geladene Teilchen
- ...

Unterschiede der Kräfte

Wie unterscheiden sich die elektromagnetische und die starke Kraft?

- Wir spüren die starke Kraft im Alltag nicht
 - 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!

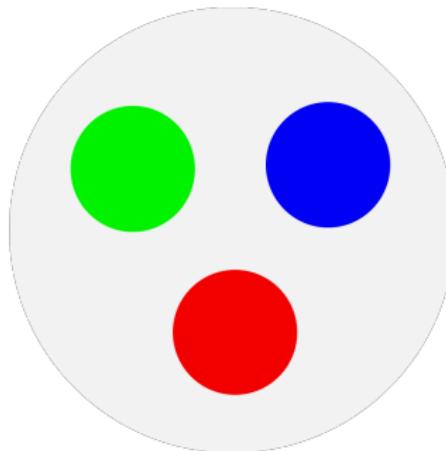
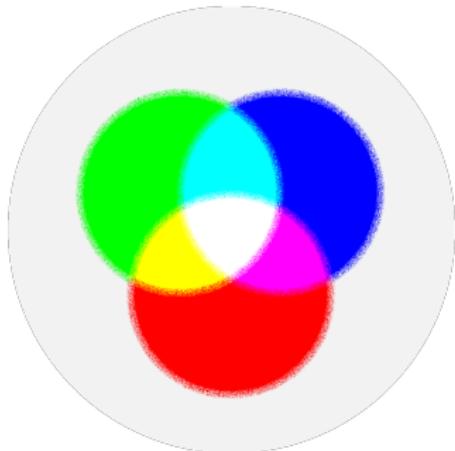
Die Eigenschaften der starken Wechselwirkung

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

→ Quarks müssen eine sog. Farbladung besitzen

Teilchen, die wir beobachten, sind aber farblos!

Veranschaulichung:



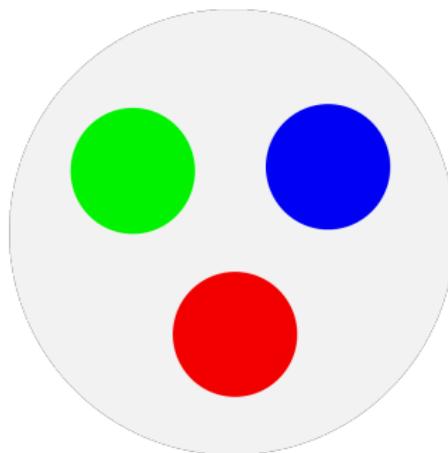
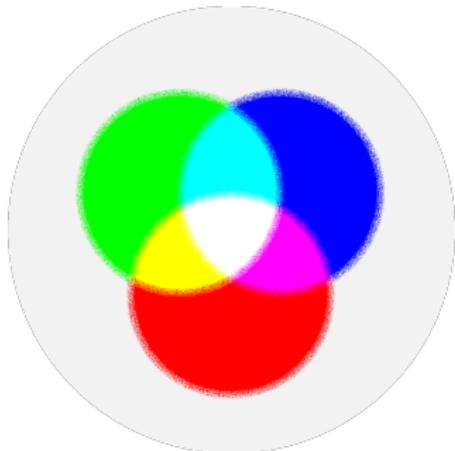
Die Eigenschaften der starken Wechselwirkung

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

→ Quarks müssen eine sog. Farbladung besitzen

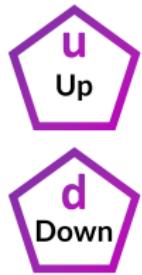
Teilchen, die wir beobachten, sind aber farblos!

Veranschaulichung:



→ Insgesamt farbneutrale Teilchen!

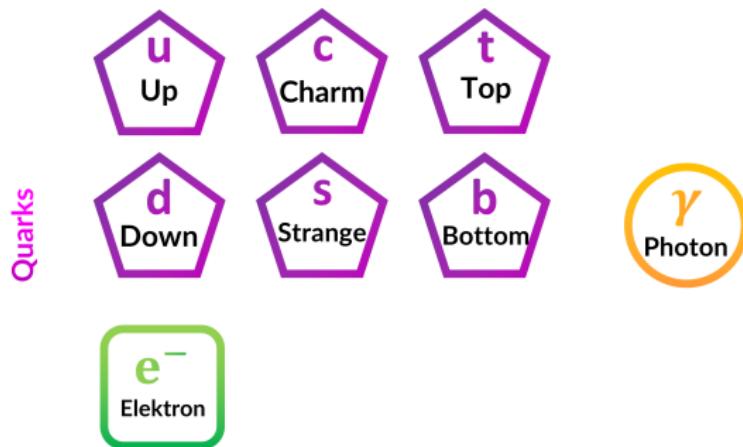
Das Standardmodell der Teilchenphysik



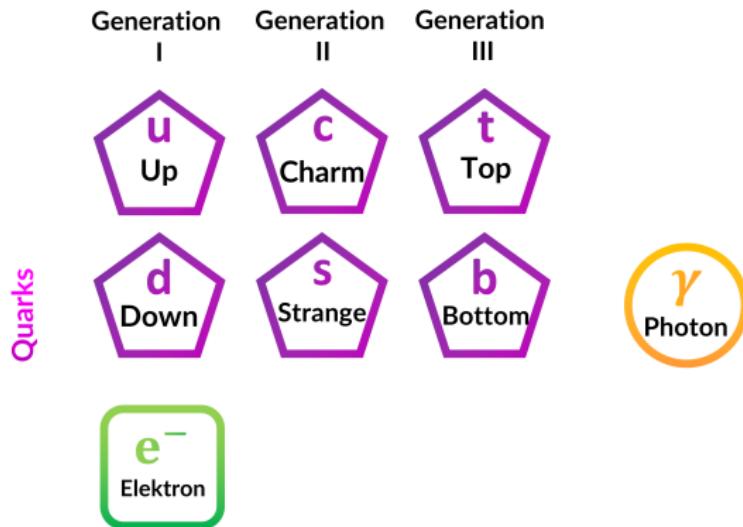
Das Standardmodell der Teilchenphysik



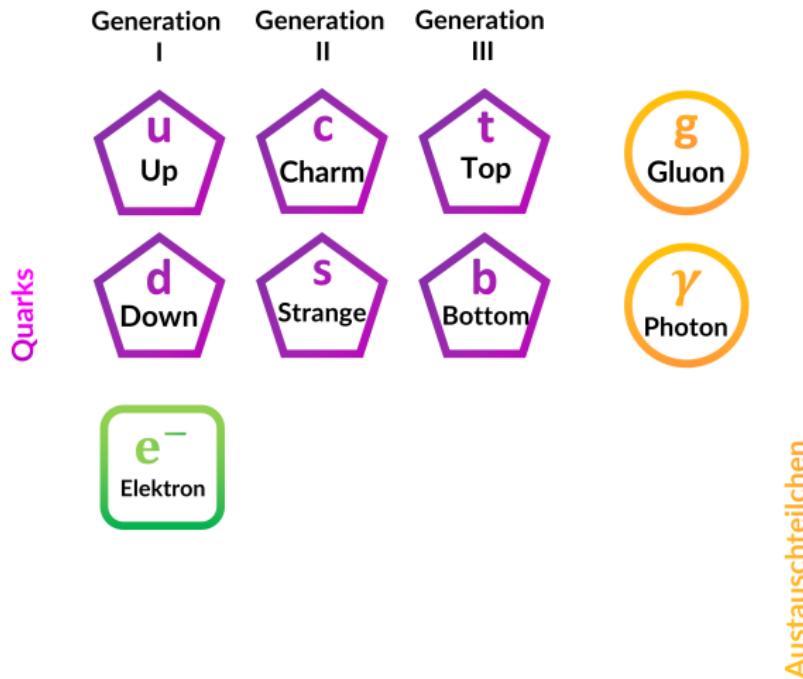
Das Standardmodell der Teilchenphysik



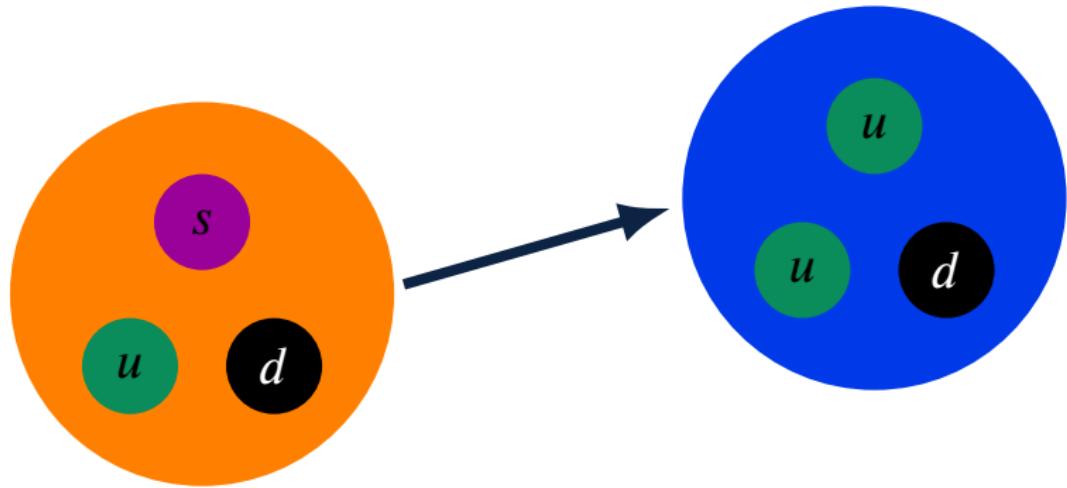
Das Standardmodell der Teilchenphysik



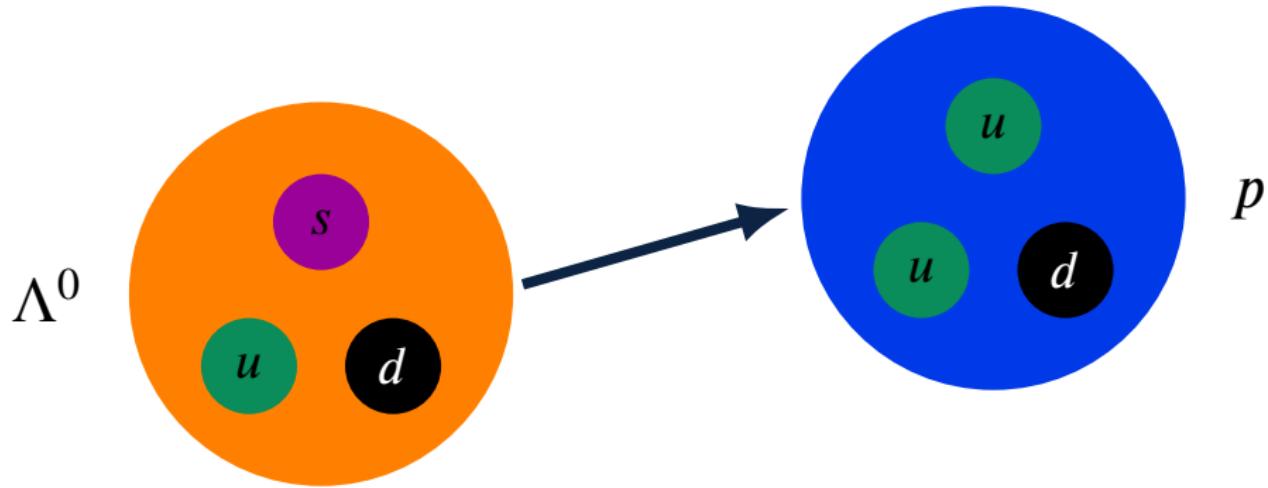
Das Standardmodell der Teilchenphysik



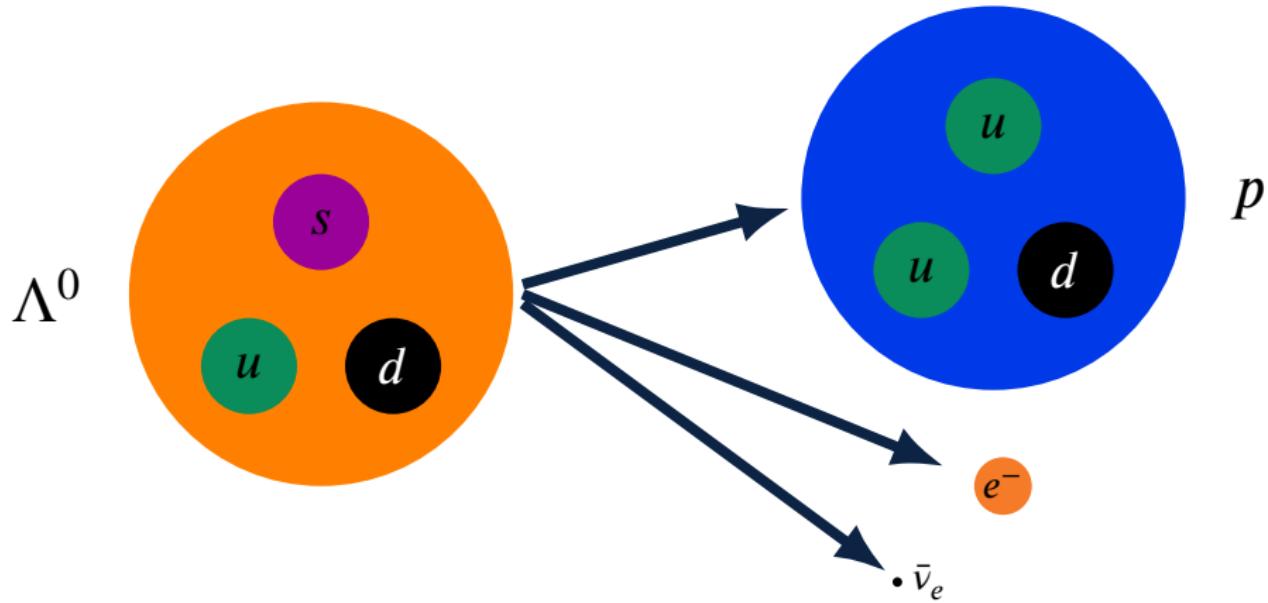
Die schwache Wechselwirkung



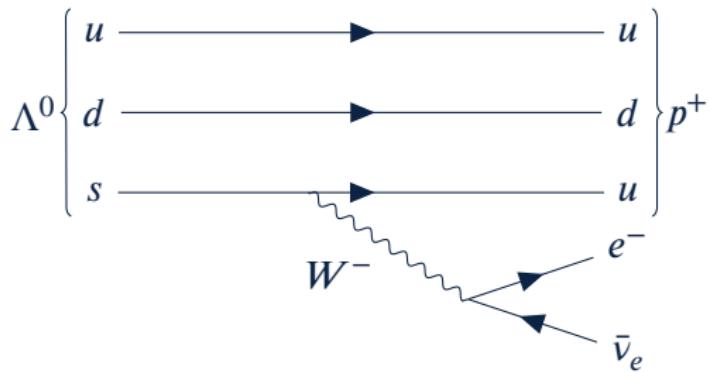
Die schwache Wechselwirkung



Die schwache Wechselwirkung

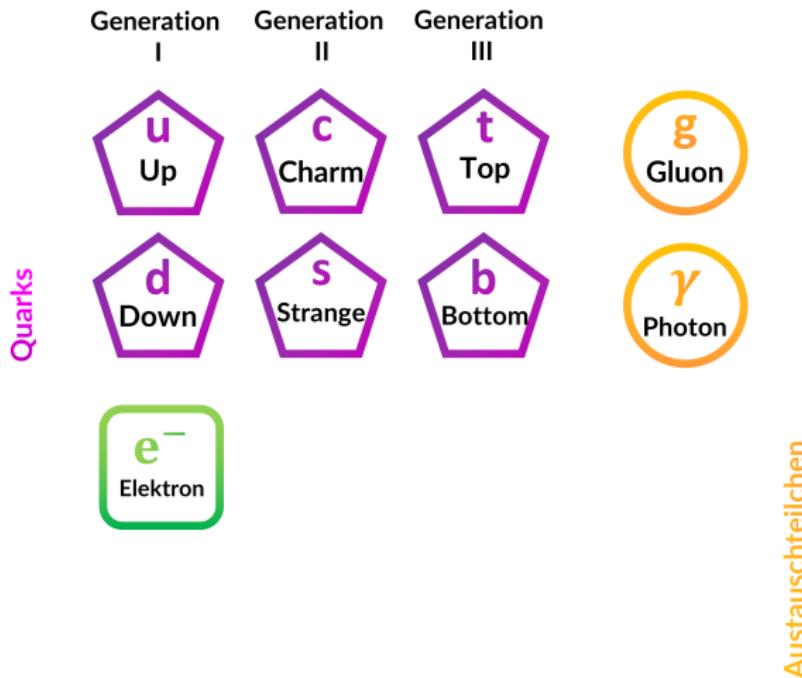


Feynman Diagramme

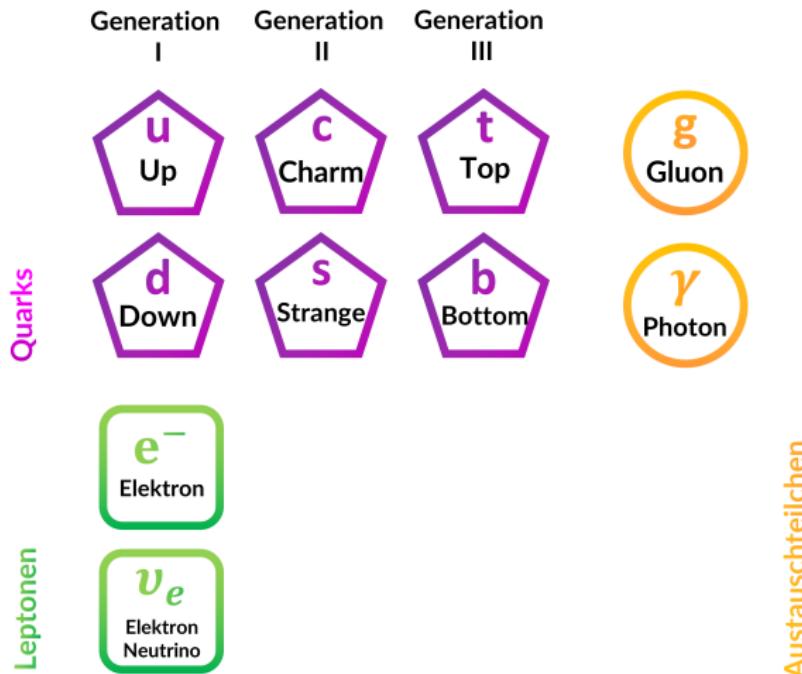


☞ Nur die schwache Wechselwirkung ist in der Lage den Flavour eines Teilchens zu verändern!

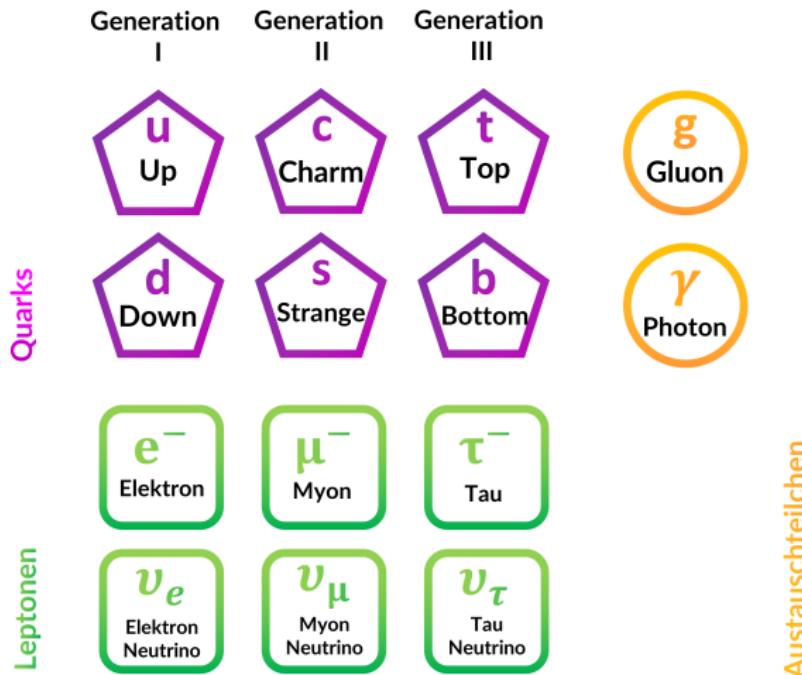
Das Standardmodell der Teilchenphysik II



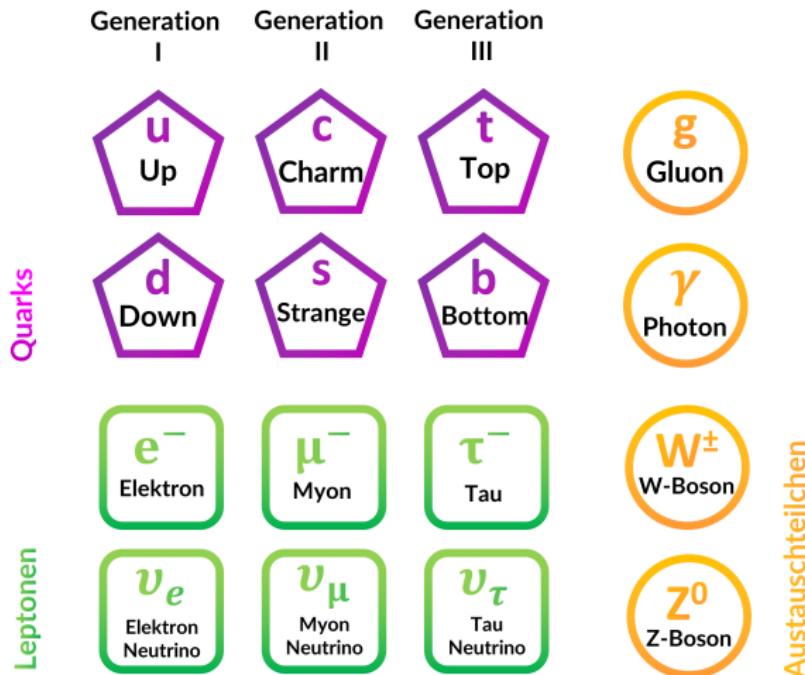
Das Standardmodell der Teilchenphysik II



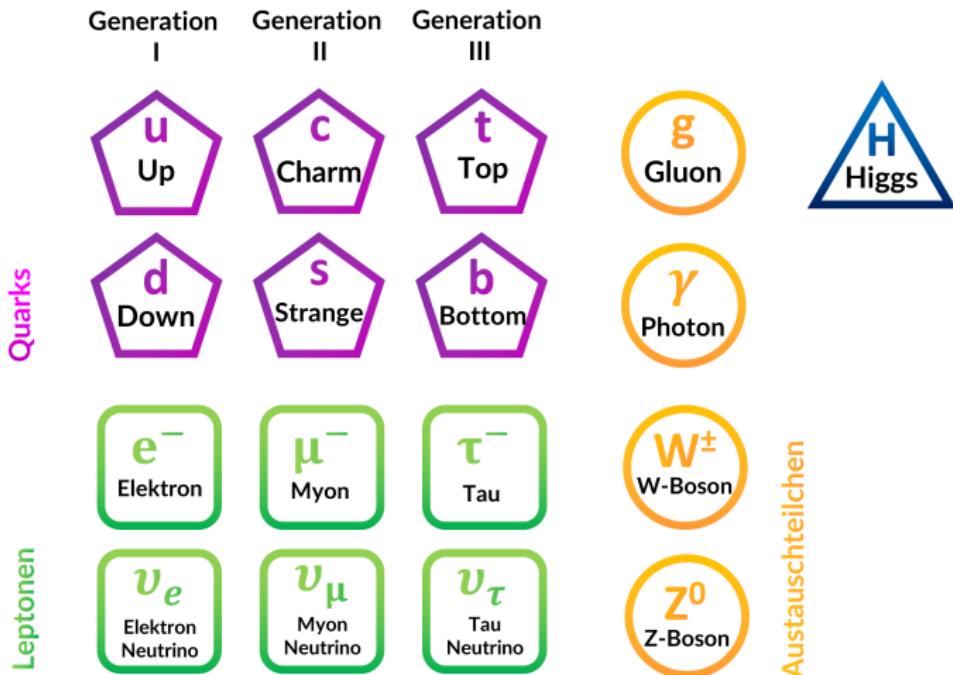
Das Standardmodell der Teilchenphysik II



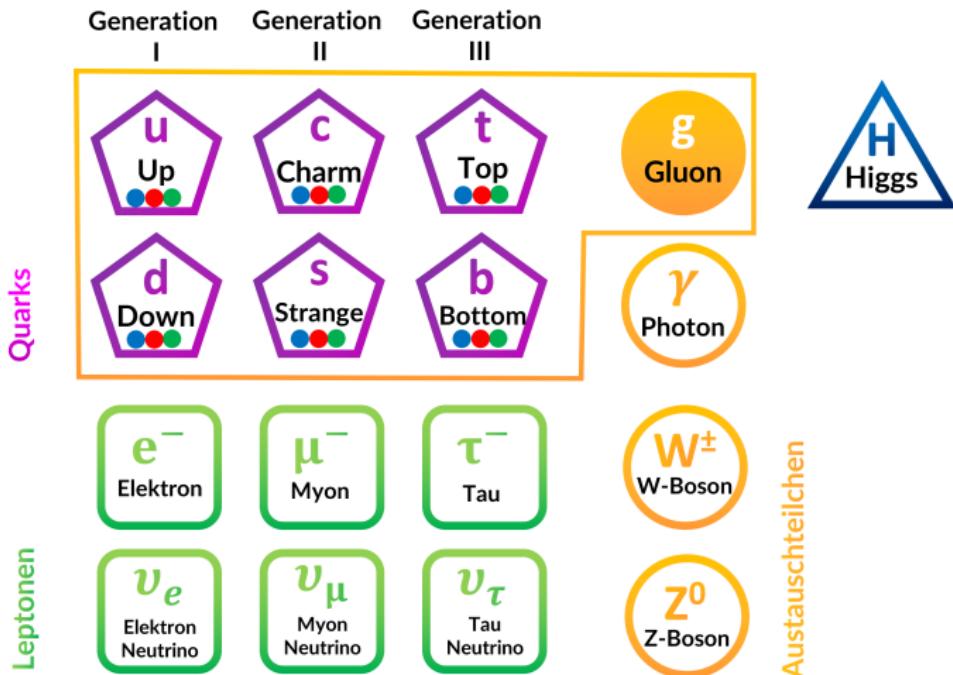
Das Standardmodell der Teilchenphysik II



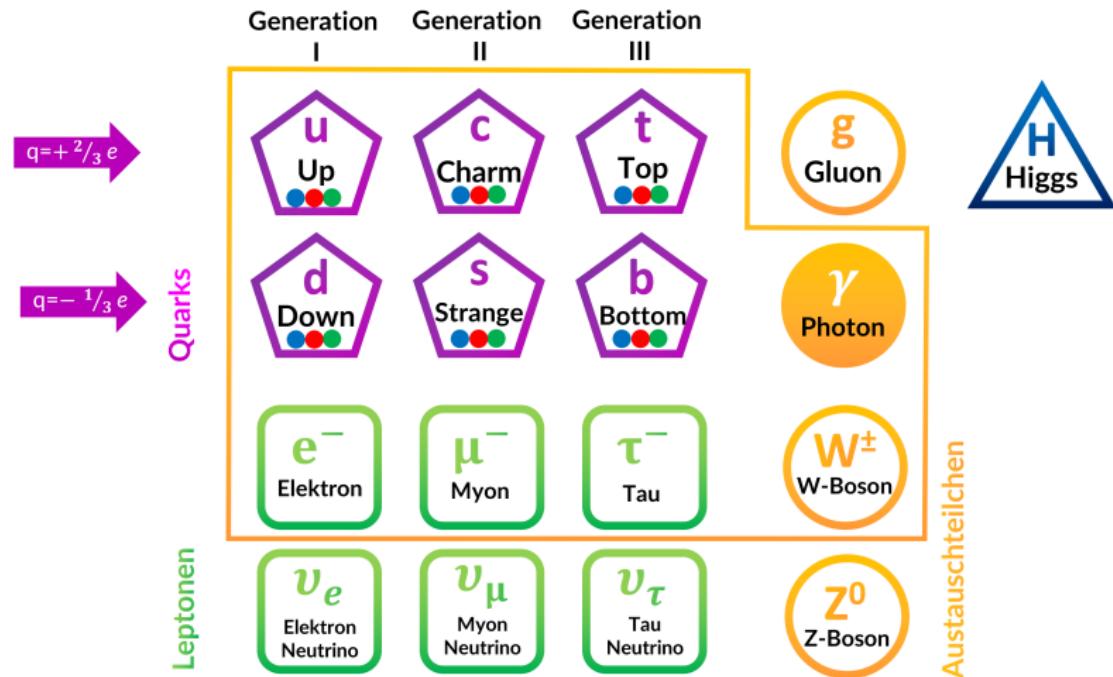
Das Standardmodell der Teilchenphysik II



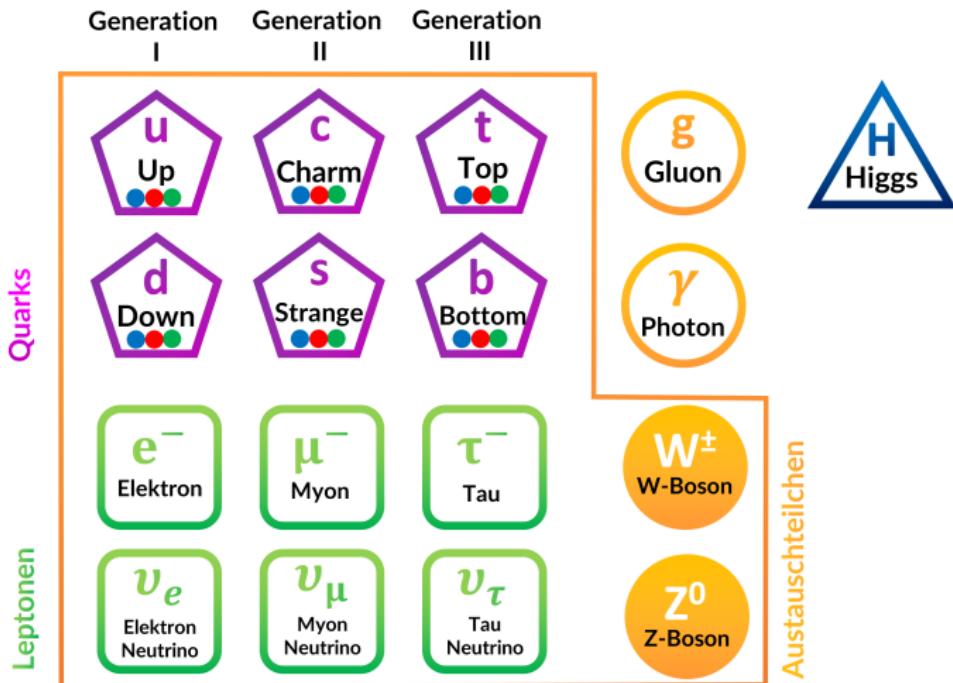
Das Standardmodell der Teilchenphysik II



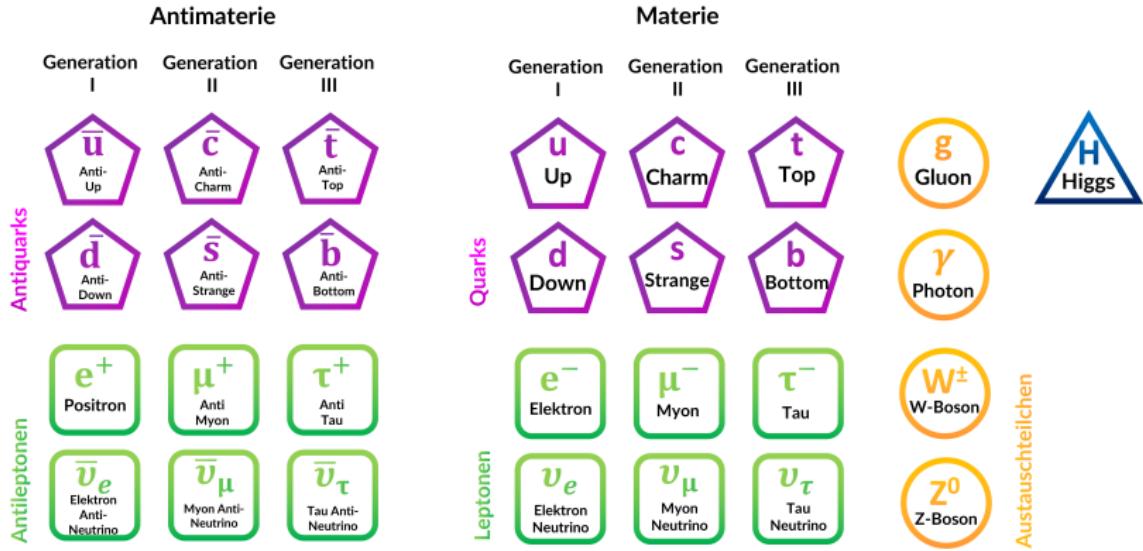
Das Standardmodell der Teilchenphysik II



Das Standardmodell der Teilchenphysik II



Das Standardmodell der Teilchenphysik II



Standardmodell: Das wichtigste für heute

- 6 Quark-Flavours u, d, s, c, b, t
 - starke-, schwache- und elektromagnetische Kraft
 - Flavour-Änderung nur über Schwachen Zerfall
 - Austauschteilchen γ, Z^0 & W^\pm, g
 - Farbladung als Ladung der starken Kraft
 - Quarks farbgeladen, Teilchen farbneutral
- ☞ Starke Kraft recht unverstanden und Objekt aktueller Forschung!

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

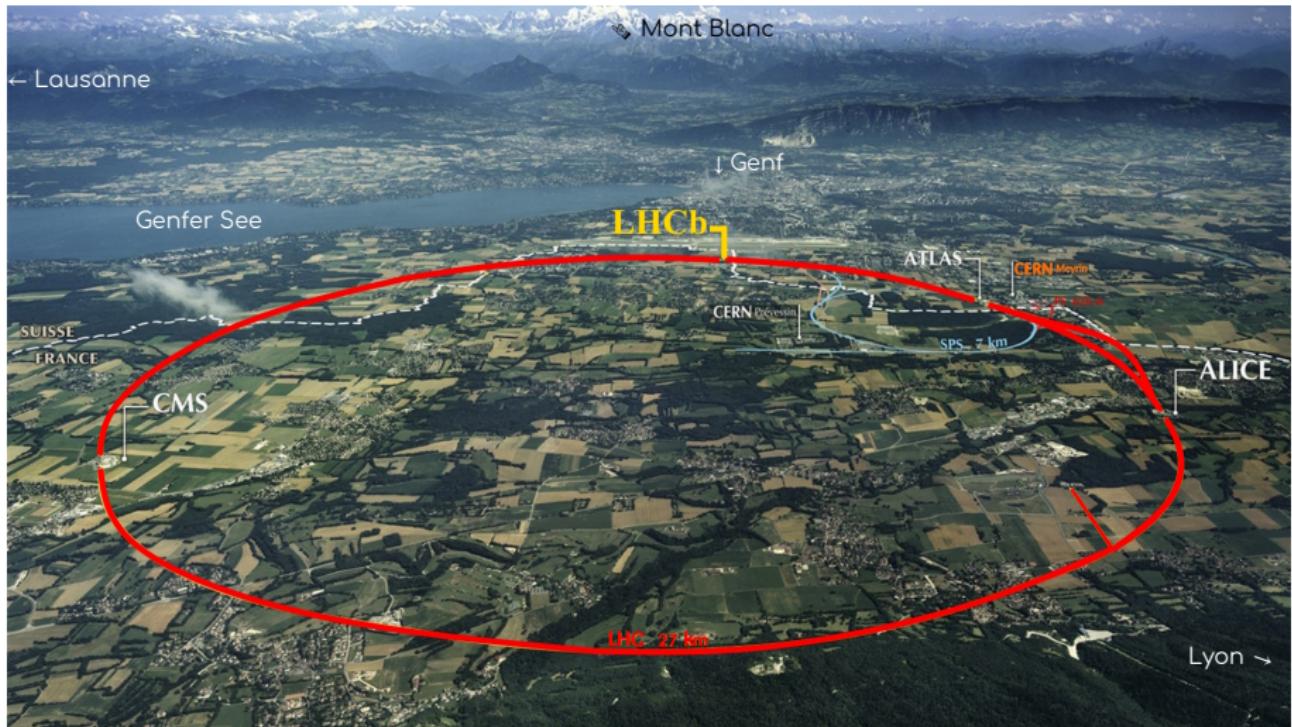
Ein Teilchen bitte!

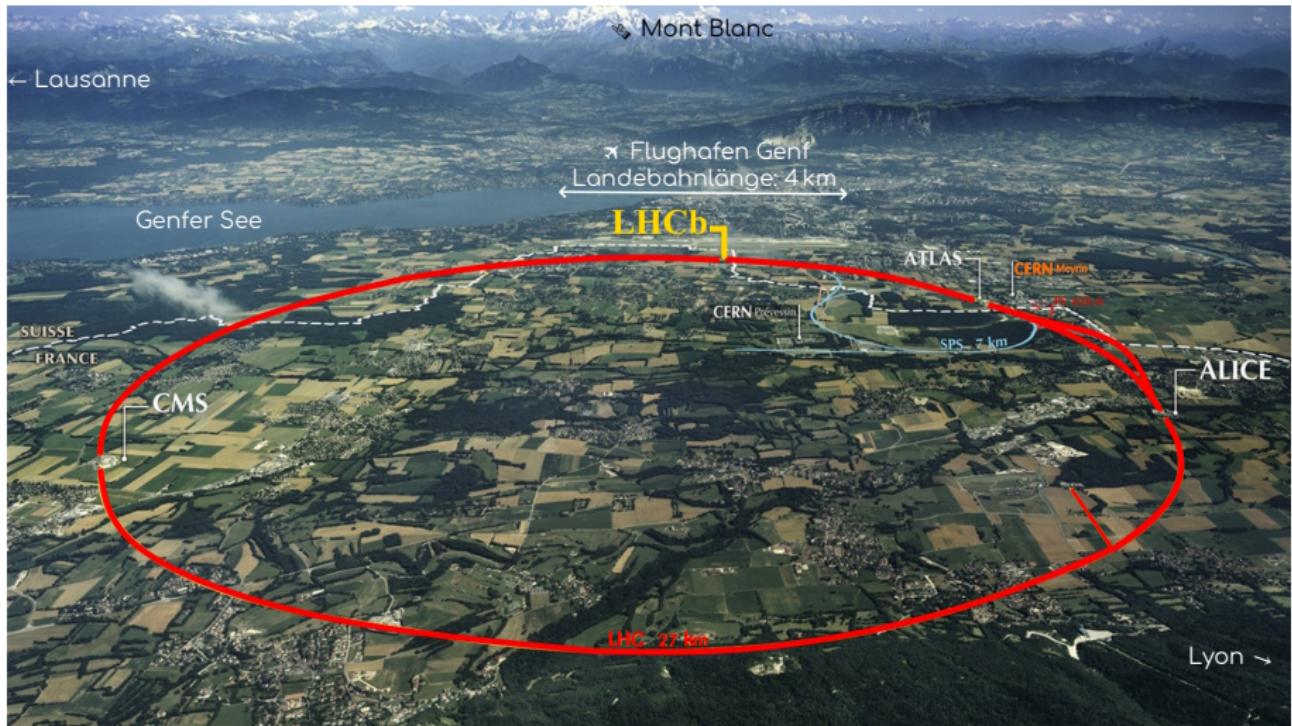
Wir wollen Teilchen produzieren!
Dazu brauchen wir viel **Energie!**

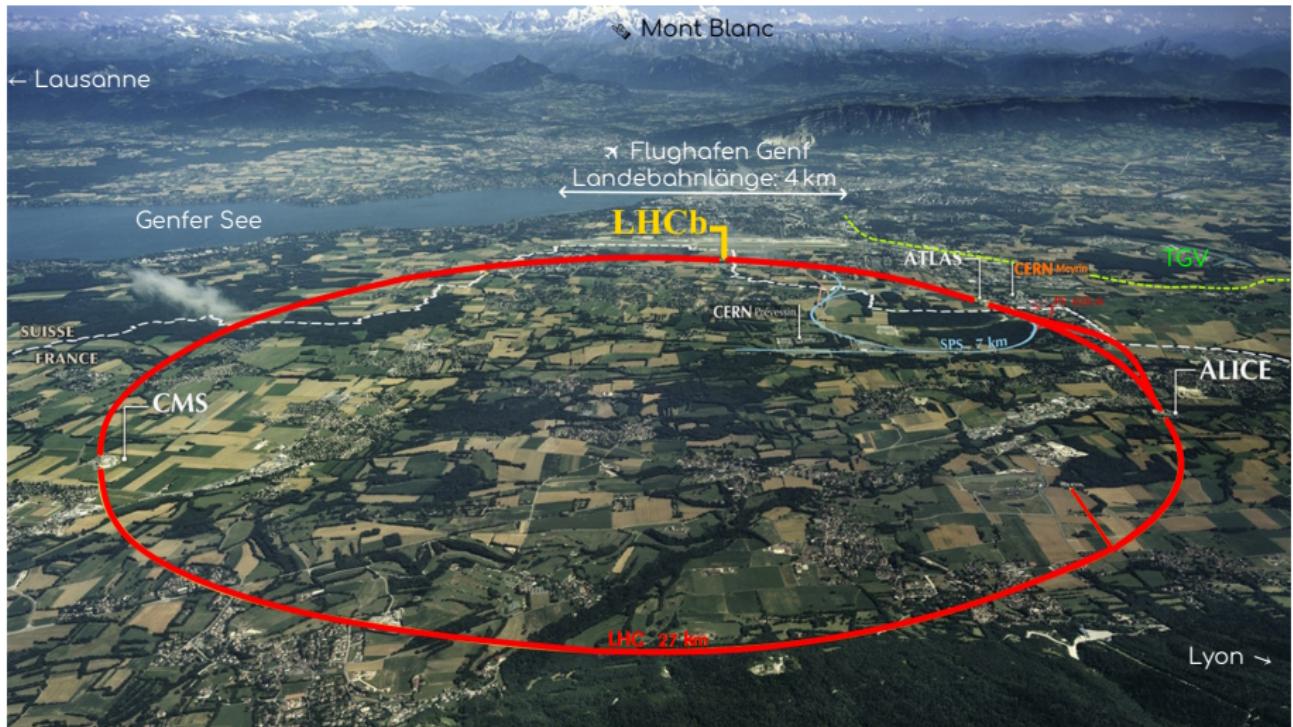
$$E = m \cdot c^2$$

Wie kann man die benötigte Energie bereitstellen?









LHC vs. ICE

Energie pro Strahl: 350 MJ

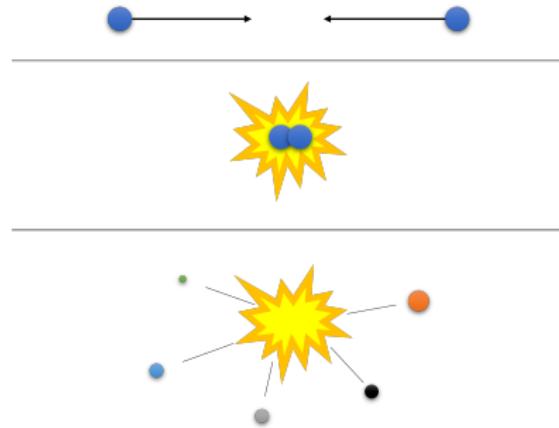
- ☞ ICE ($m = 400 \text{ t}$) bei 150 km/h
- ☞ Nährwert 153 Tafeln Schokolade

Energie pro Proton: 1 μJ

- ☞ Biene ($m = 0.1 \text{ g}$) bei 1 km/h

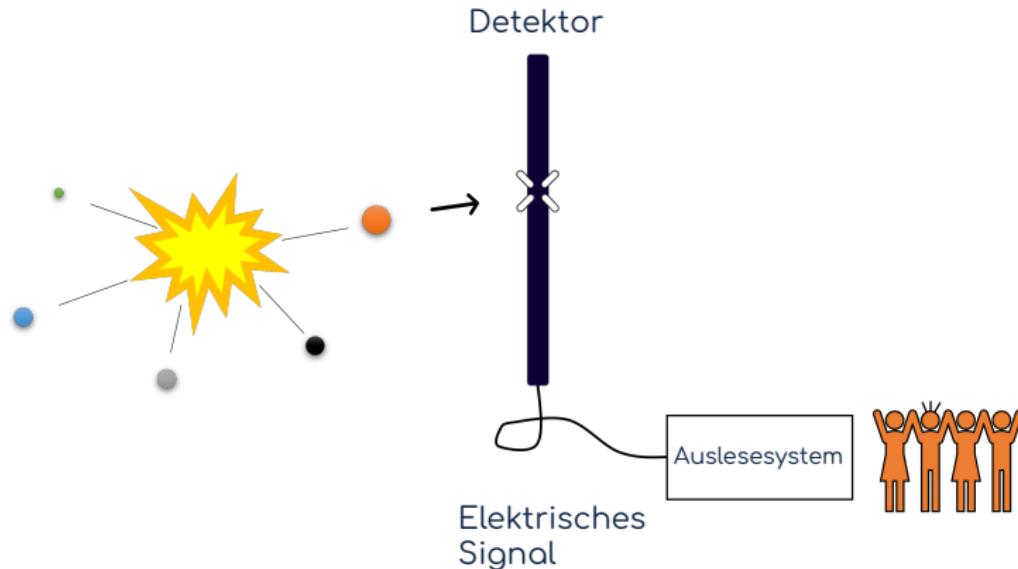
Die Kollision der Teilchen

Die hochenergetischen Teilchen kollidieren
☞ Was geschieht mit der Energie?



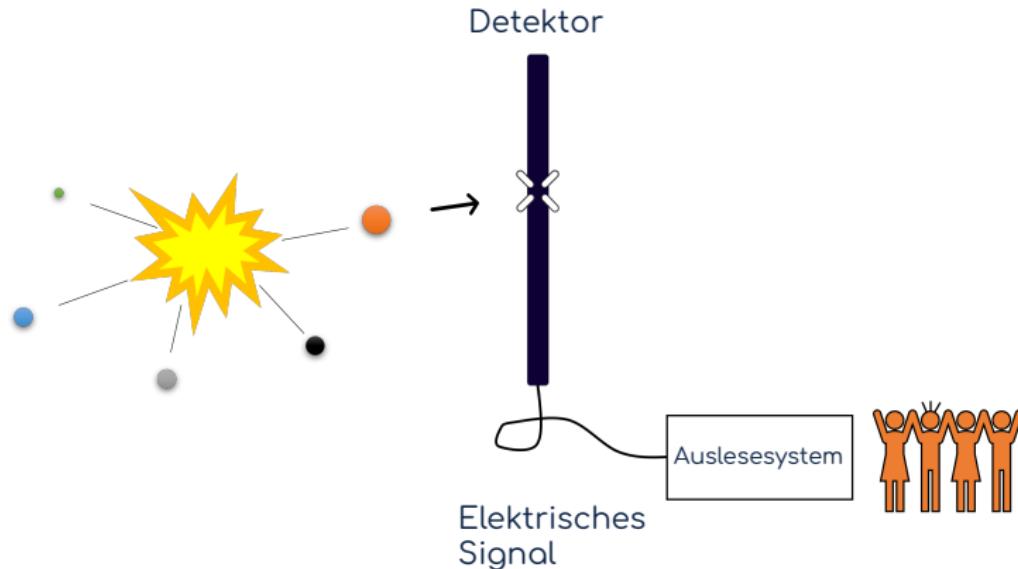
Detektive für Teilchen

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?

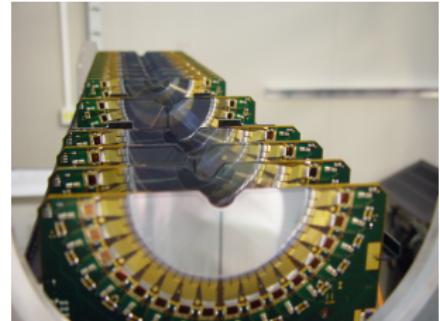
Erinnert euch an die Eigenschaften der Teilchen, die ihr kennt:

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

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

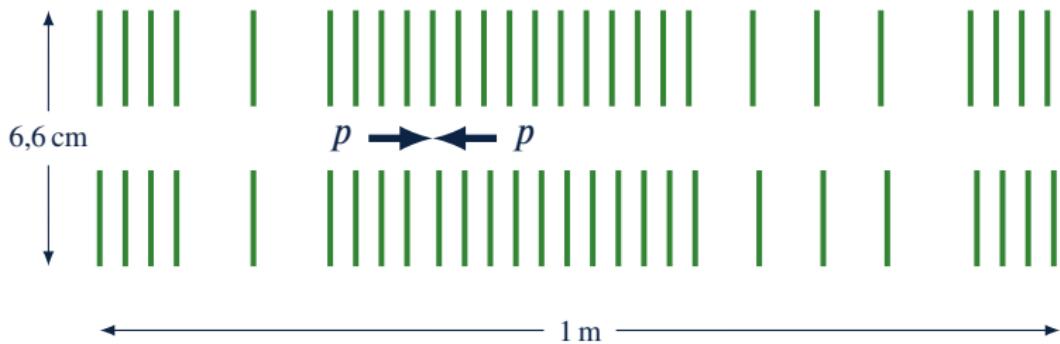
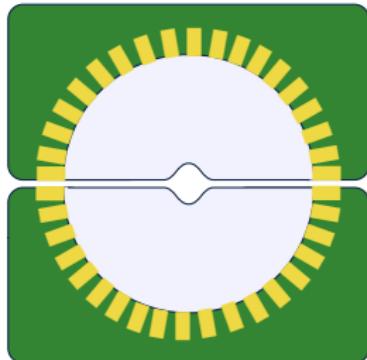
Vertex Locator (VELO)

- Um den Kollisionspunkt positioniert
- Wichtig für Spurrekonstruktion



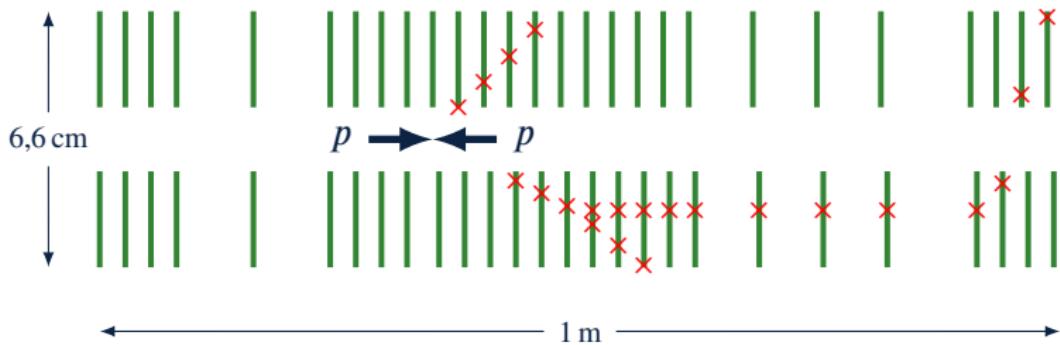
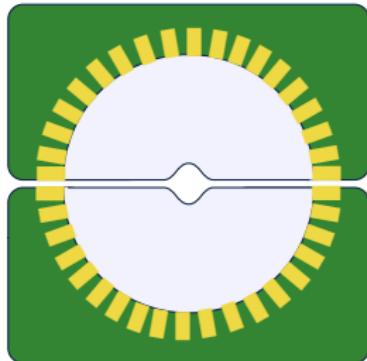
Vertex Locator (VELO)

- Spurrekonstruktion
- Identifikation von Vertices



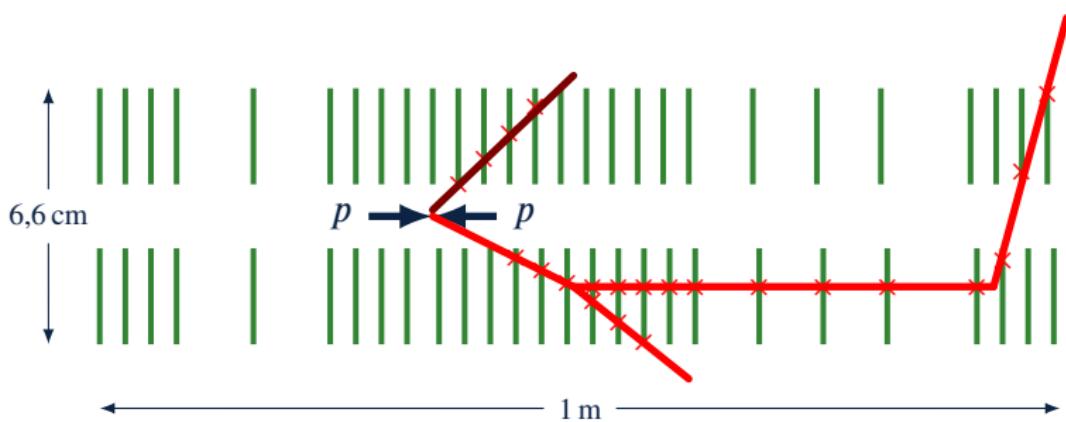
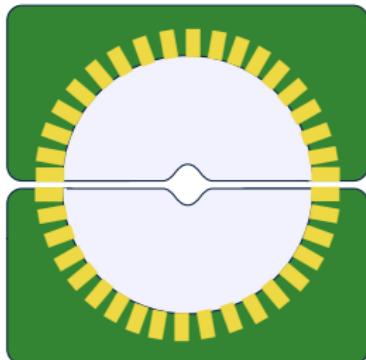
Vertex Locator (VELO)

- Spurrekonstruktion
- Identifikation von Vertices



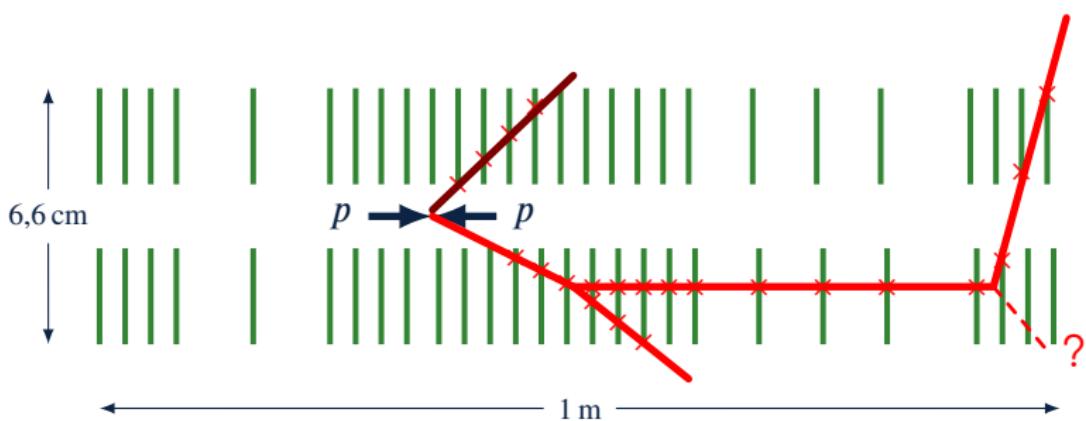
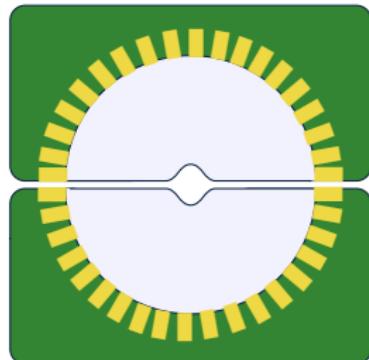
Vertex Locator (VELO)

- Spurrekonstruktion
- Identifikation von Vertices



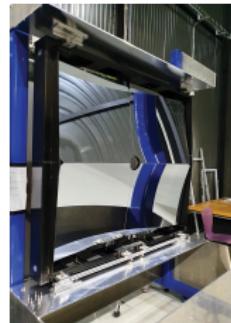
Vertex Locator (VELO)

- Spurrekonstruktion
- Identifikation von Vertices



Ring Imaging Cherenkov Detector (RICH1)

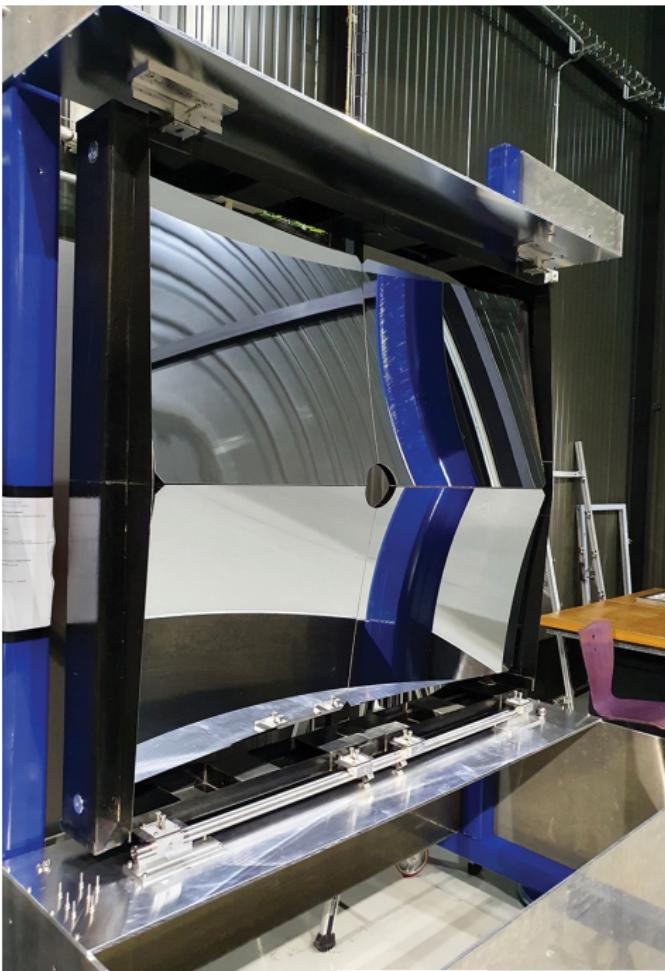
- Misst **Geschwindigkeit** der Teilchen
- Wichtig für Identifikation von Teilchen
- Nur in begrenztem Impulsfenster definiert



RICH 1

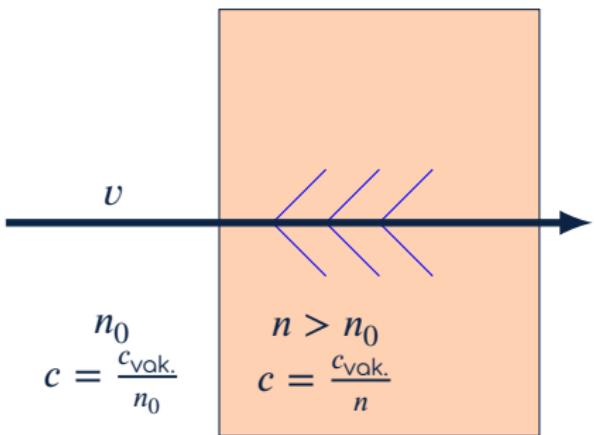


$z/m \rightarrow$  2



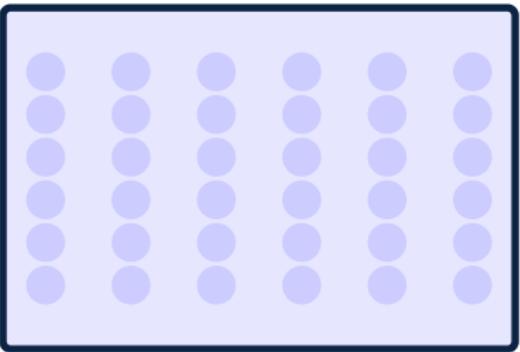
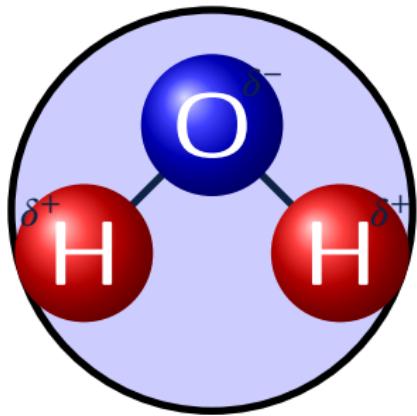
Cherenkov Effekt

RICH

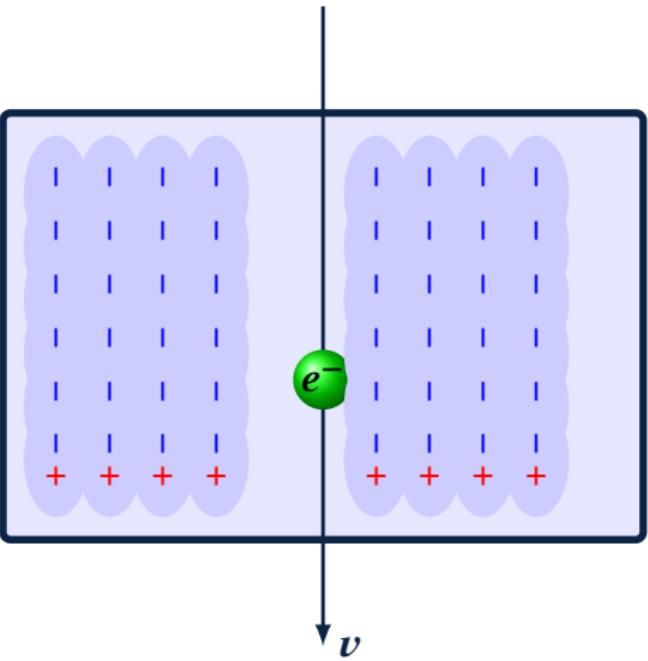
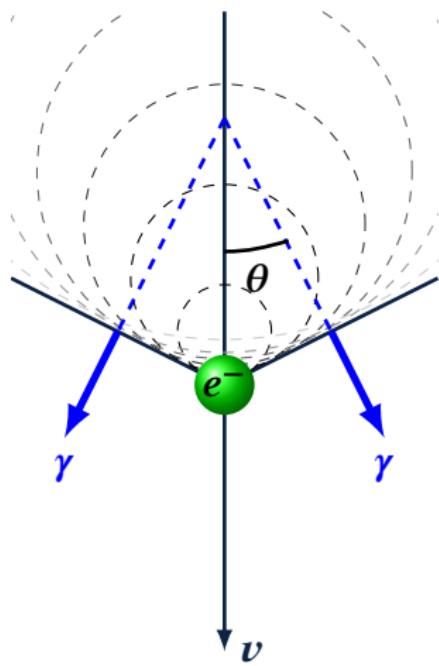


Für $v > c$ wird Strahlung emittiert! Die kann man messen.

Cherenkov Effekt in Wasser $n \approx 1.3$

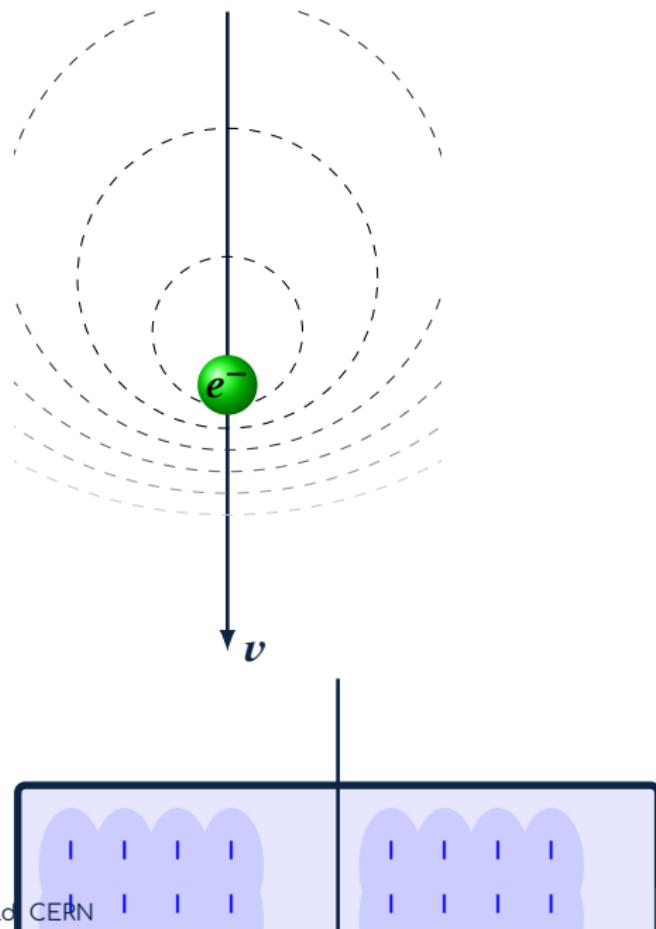


Cherenkov Effekt in Wasser $n \approx 1.3$



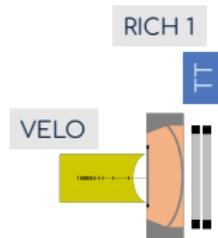
$$\cos \theta = \frac{c}{v \cdot n}, v > c/n$$

Cherenkov Effekt in Wasser $n \approx 1.3$

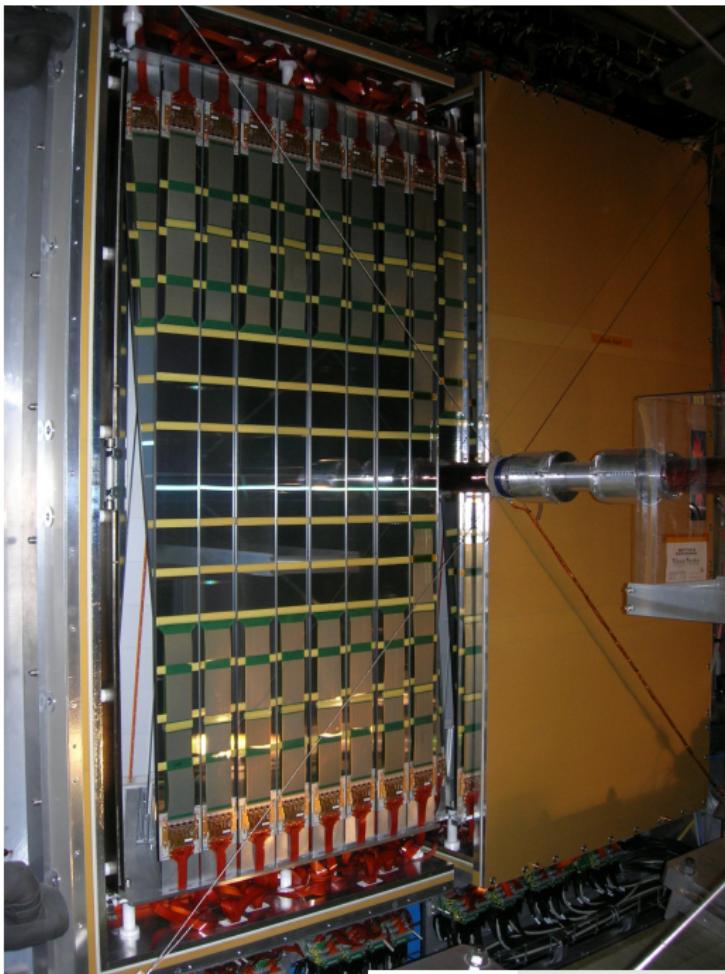


Tracker Turicensis (TT)

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

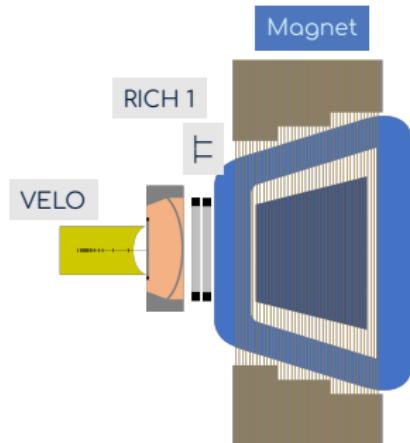


$z/m \rightarrow$ —— ● ——
 2 3



Magnet

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



$z/m \rightarrow$
2 3 4





Magnet

Was passiert mit Teilchen in einem magnetischen Feld?
Lorentzkraft:

$$\vec{F}_L = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B})$$

$$F_L = qvB$$

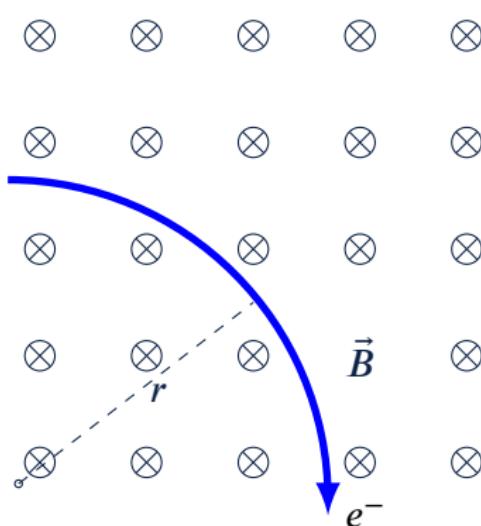
Zentrifugalkraft:

$$F_Z = m \frac{v^2}{r}$$

Gleichsetzen:

$$qvB = m \frac{v^2}{r}$$

$$\Rightarrow r = \frac{mv}{qB} = \frac{p}{qB}$$



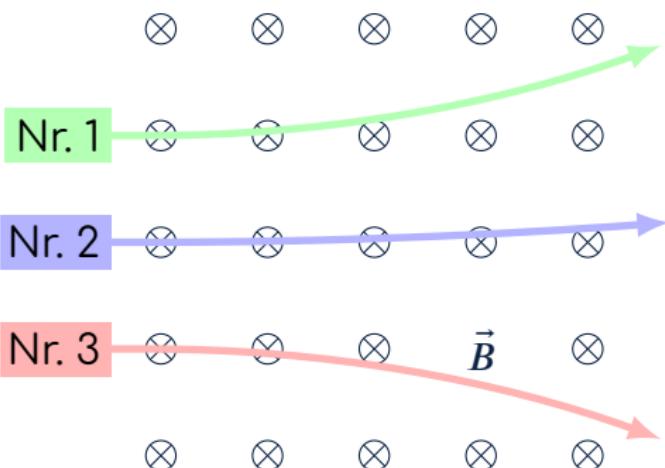
Magnet

Um welche Teilchen könnte es sich handeln?

$$r = \frac{mv}{qB} = \frac{p}{qB}$$

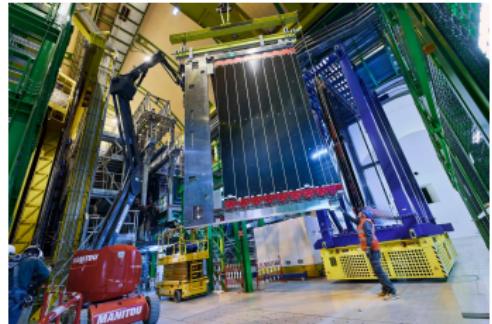
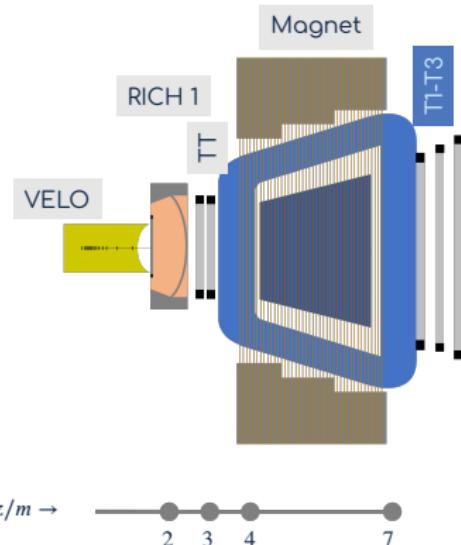
Kann es eines der folgenden sein?

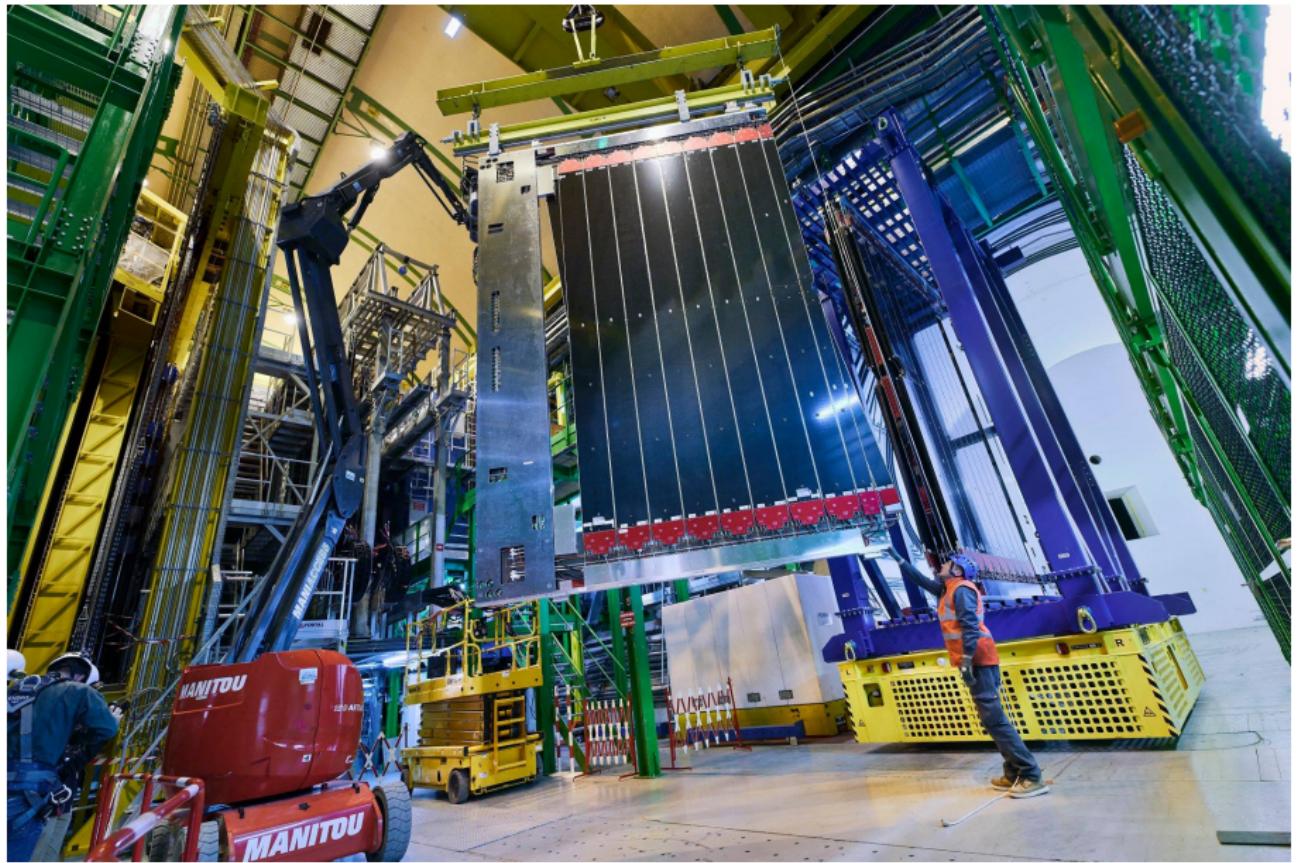
- p
- e^-
- e^+
- n
- γ
- H



Tracker T1, T2 und T3

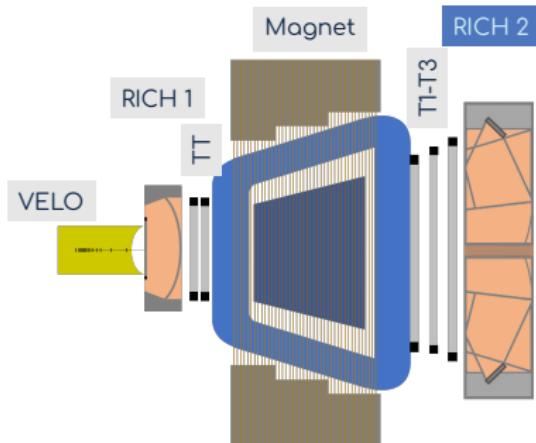
- Misst die **Position** der Teilchen
- Hilft Teilchen zu identifizieren





Ring Imaging Cherenkov Detector (RICH2)

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

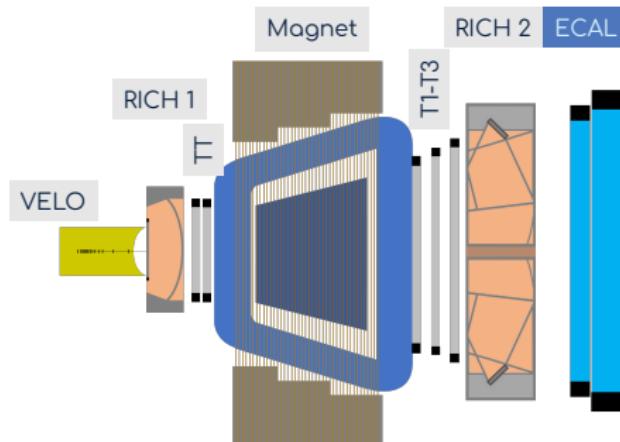




LHCb-Detektor am CERN

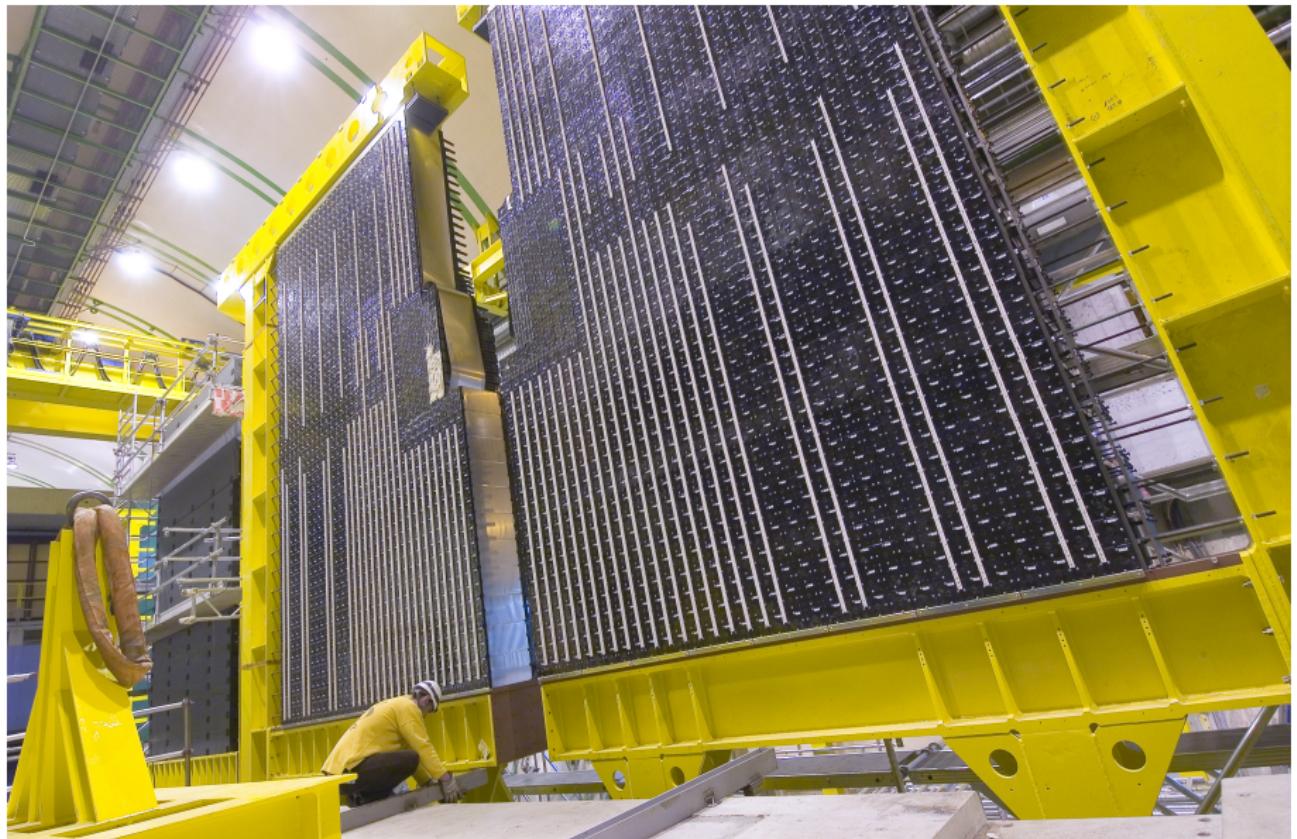
Elektromagnetisches Kalorimeter (ECAL)

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



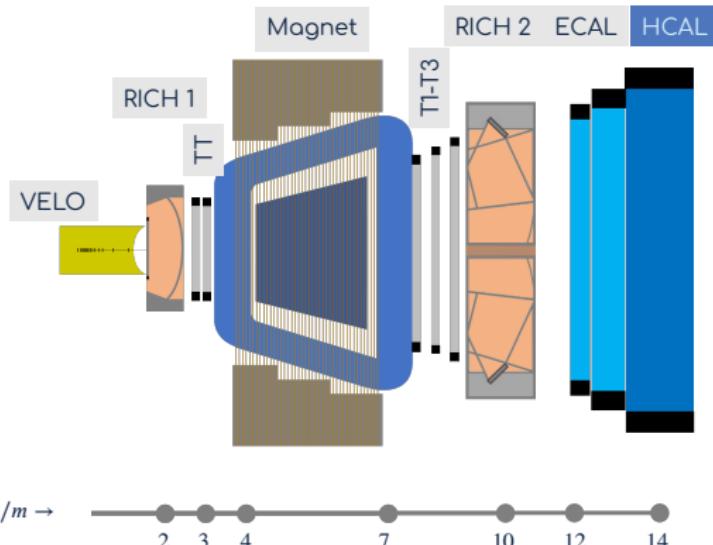
$z/m \rightarrow$

2 3 4 7 10 12



Hadronisches Kalorimeter (HCAL)

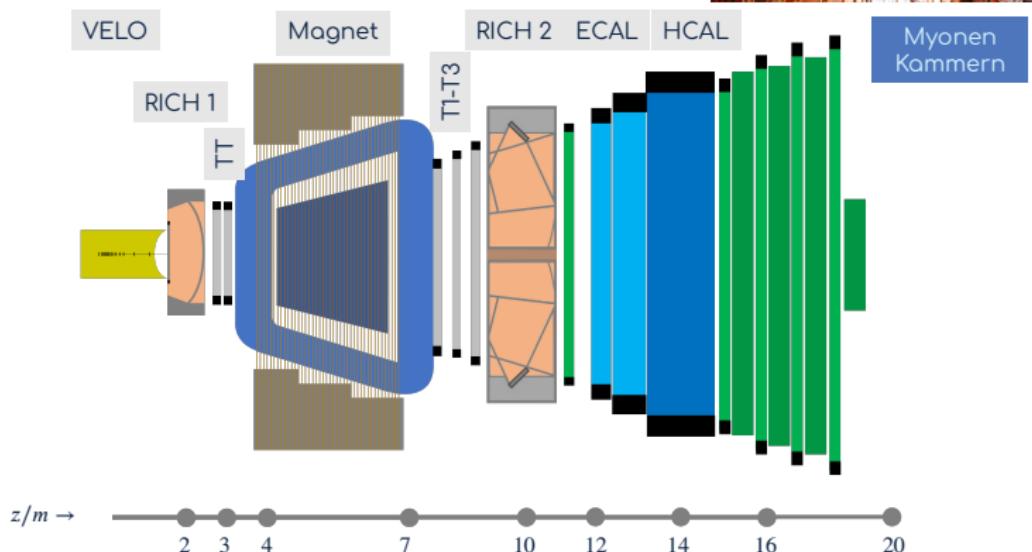
- Stoppt auch schwere geladene und neutrale Teilchen
- Misst deponierte **Energie**





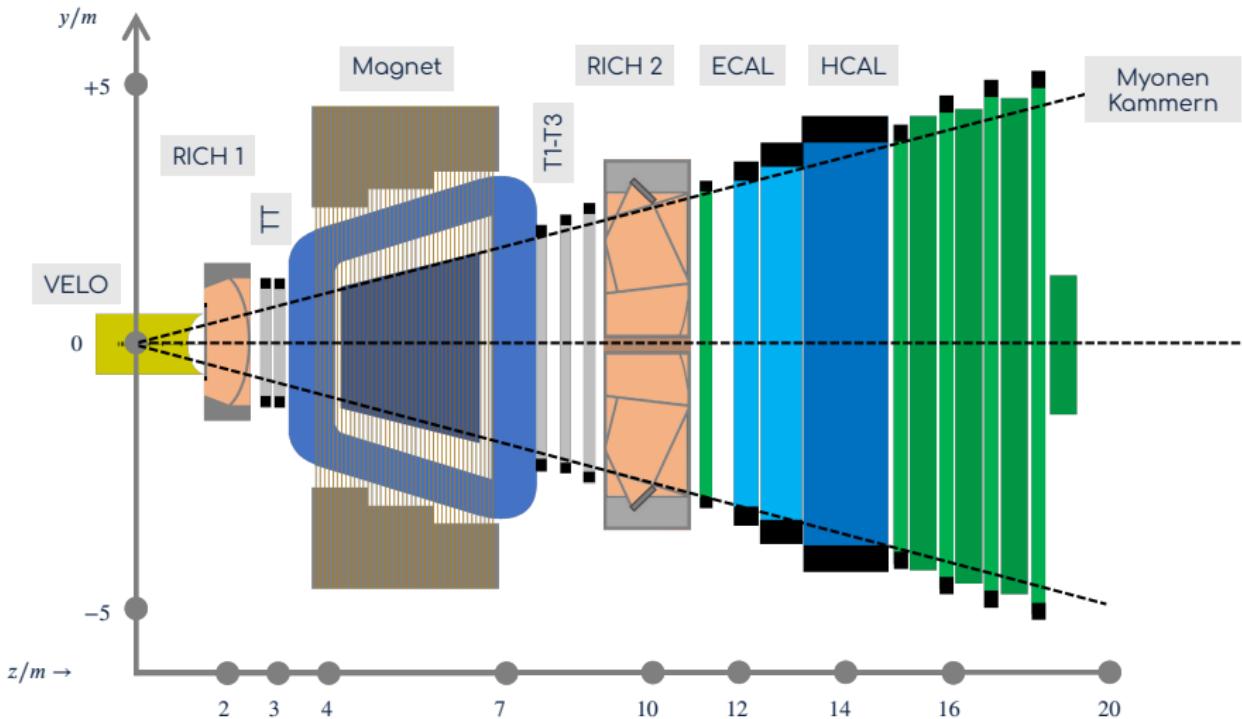
Myonenkammern

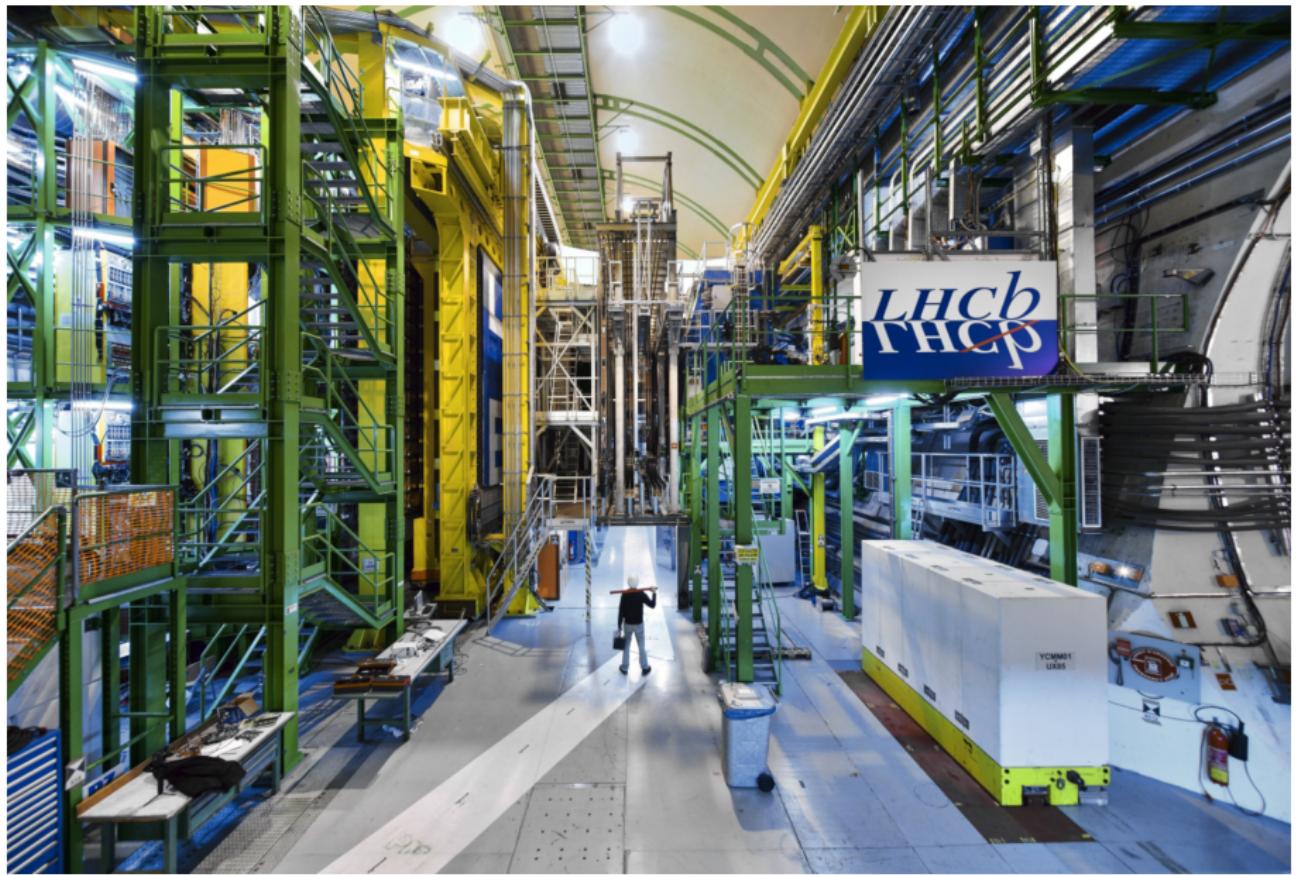
- Misst **Position** von Myonen

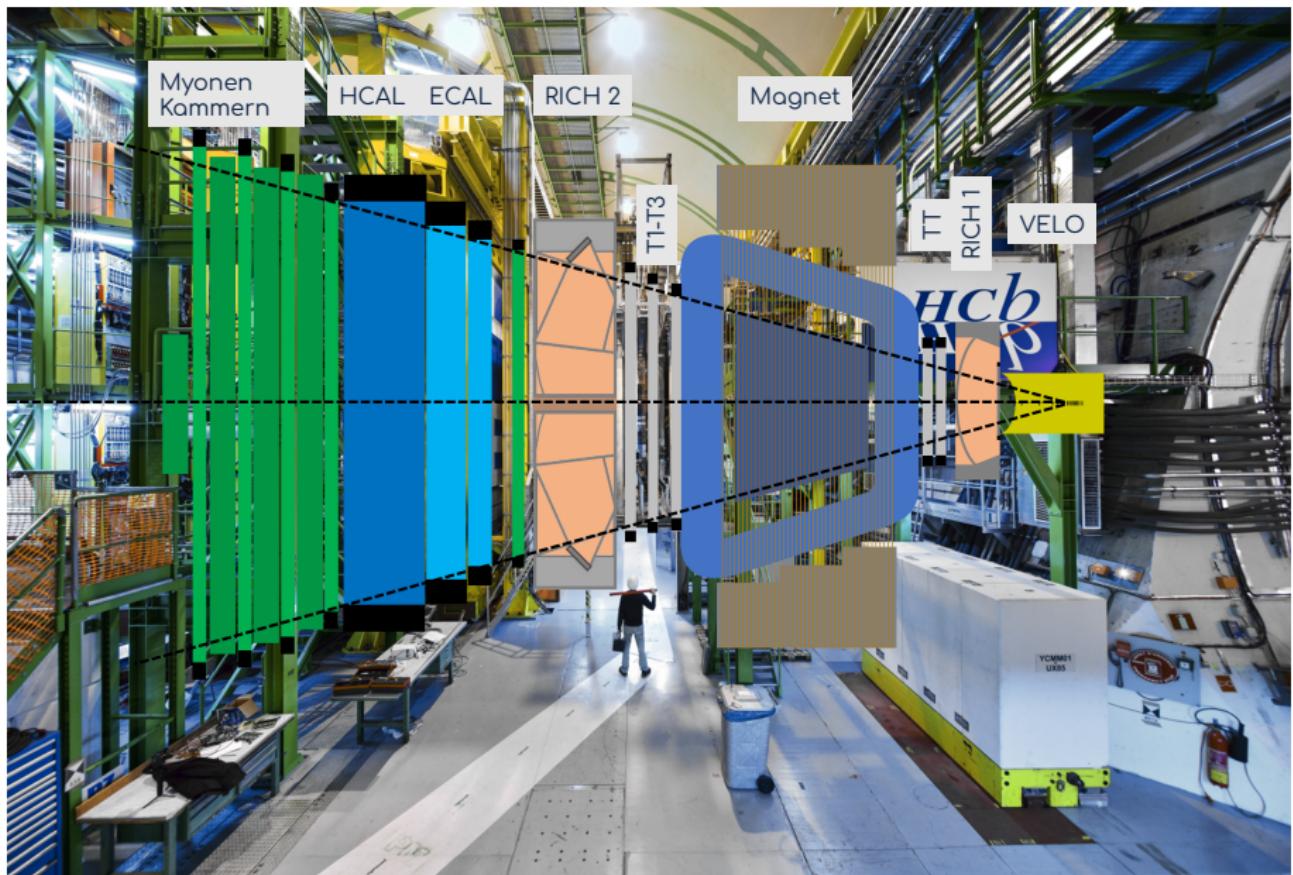




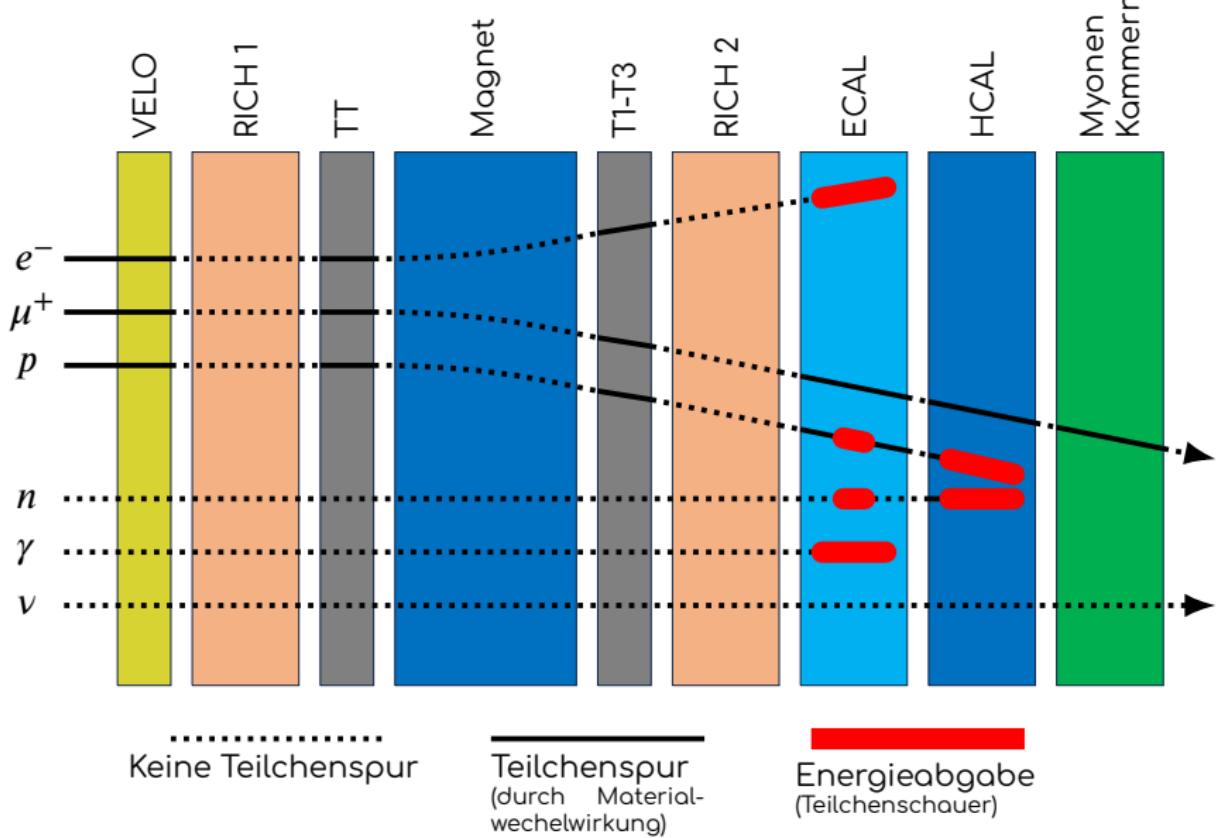
Messbereich von LHCb



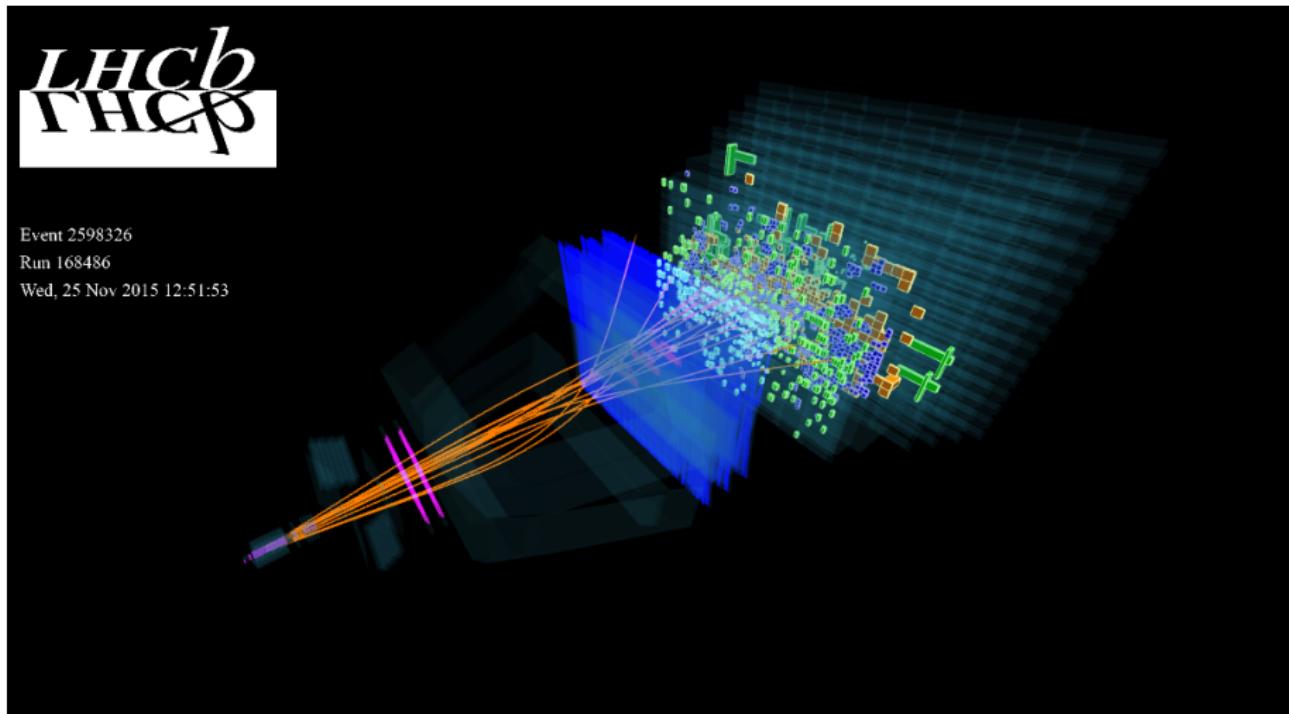




Was macht wo ein Signal?



Wie sieht ein gemessenes Ereignis aus?



Additional slides ●

Quarkmassen

2.2 MeV/ c^2



Quarkmassen



1kg

$2.2 \text{ MeV}/c^2$



Quarkmassen



1kg

$2.2 \text{ MeV}/c^2$ $4.7 \text{ MeV}/c^2$



Quarkmassen



1kg

\approx 2 kg

\approx 45 kg

$2.2 \text{ MeV}/c^2$

$4.7 \text{ MeV}/c^2$

$96 \text{ MeV}/c^2$



Quarkmassen



1kg

$2.2 \text{ MeV}/c^2$



$\approx 2 \text{ kg}$

$4.7 \text{ MeV}/c^2$



$\approx 45 \text{ kg}$

$96 \text{ MeV}/c^2$



$\approx 0.6 \text{ t}$

$1.3 \text{ GeV}/c^2$



Quarkmassen



1kg

$2.2 \text{ MeV}/c^2$



$\approx 2 \text{ kg}$

$4.7 \text{ MeV}/c^2$



$\approx 45 \text{ kg}$

$96 \text{ MeV}/c^2$



$\approx 0.6 \text{ t}$

$1.3 \text{ GeV}/c^2$



$\approx 1.9 \text{ t}$

$4.2 \text{ GeV}/c^2$



Quarkmassen



1kg

$2.2 \text{ MeV}/c^2$



$\approx 2 \text{ kg}$

$4.7 \text{ MeV}/c^2$



$\approx 45 \text{ kg}$

$96 \text{ MeV}/c^2$



$\approx 0.6 \text{ t}$

$1.3 \text{ GeV}/c^2$



$\approx 1.9 \text{ t}$

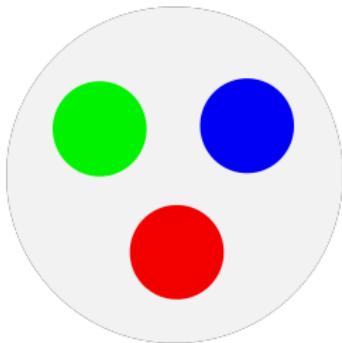
$4.2 \text{ GeV}/c^2$



$\approx 79 \text{ t}$

$173 \text{ GeV}/c^2$





Einfache Überlegung:
 $m(\text{grey circle}) \stackrel{?}{=} m(\text{red}) + m(\text{blue}) + m(\text{green})$

z.B. Proton (uud):

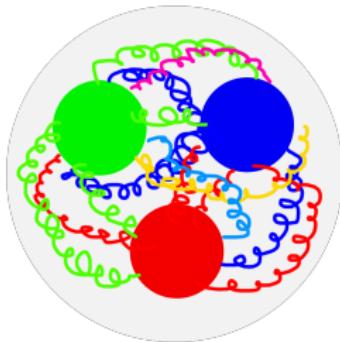
$$m(u) = 2.2 \text{ MeV}/c^2$$

$$m(d) = 4.7 \text{ MeV}/c^2$$

$$\rightarrow m(\text{Proton}) = 9.1 \text{ MeV}/c^2$$

Tatsächlich findet man:

$$m(\text{Proton}) = 938 \text{ MeV}/c^2$$



Einfache Überlegung:
 $m(\text{Nucleus}) \neq m(\text{Red}) + m(\text{Blue}) + m(\text{Green})$

z.B. Proton (uud):

$$m(u) = 2.2 \text{ MeV}/c^2$$

$$m(d) = 4.7 \text{ MeV}/c^2$$

$$\rightarrow m(\text{Proton}) = 9.1 \text{ MeV}/c^2$$

Tatsächlich findet man:

$$m(\text{Proton}) = 938 \text{ MeV}/c^2$$

Referenzen

- Maximilien Brice/CERN (2018) CERN Photo - 201801-025-18
- Maximilien Brice/CERN (2008). Record 1295244
- Paula Collins/CERN (2007) Record 1017398
- Christoph Frei/CERN (2021) Record 2807064
- Angela Buechler/CERN (2009) Conference Summary IEE Florida 2009
- Peter Ginter/CERN (2008) Record 1124307
- Maximilien Brice, Julien Ordan/CERN (2009) Facebook Photo - LHCbExperiment
- Maximilien Brice, Julien Ordan/CERN (2009) Record 2302374
- CERN (2015) LHCb Collaboration Page
- Maximilien Brice/CERN (2005) Record 835712
- Schaette.de Rinder - Was können wir für abwehrstarke Kälber tun
- Meinhaushalt.at (2009) Zunge Schalen Kochen
- M 93 (2021) BMW X3 xDrive20d xLine (G01)
- Airbus A320 A321 XLR