



# Einführungsvortrag

Das Standardmodell der Teilchenphysik und der LHCb  
Detektor

Ellinor Eckstein, Lukas Julian Exner, Ludwig Kramer,  
Niklas Kramer, Sebastian Neubert, Piet Nogga

University of Bonn

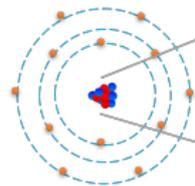
07.03.2024

1

Einführung in die Teilchenphysik

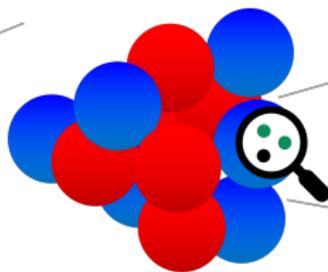
# Und was ist eigentlich im Nukleus?

Atom



$10^{-10}$  m

Atomkern



$10^{-15}$  m

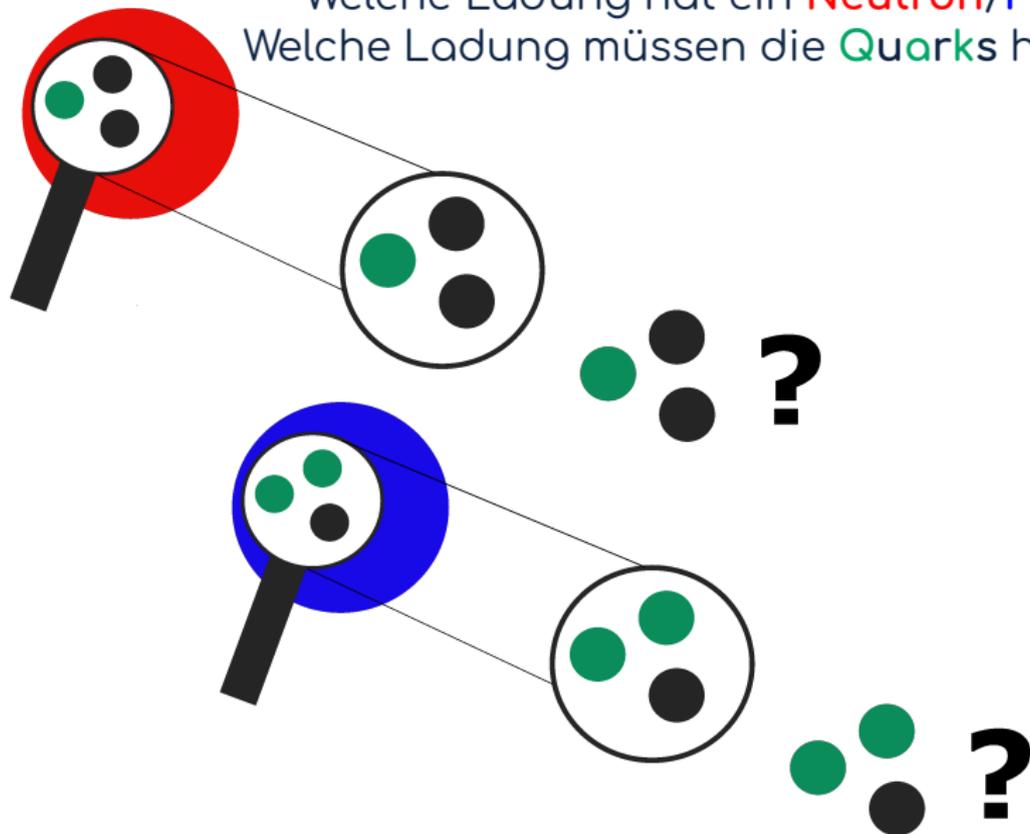
Quarks



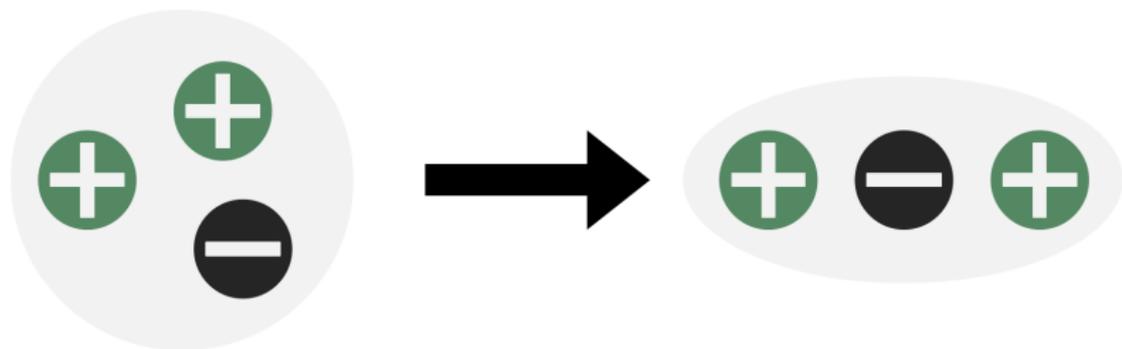
$\leq 10^{-18}$  m

# Quarks - Was sind das?

Welche Ladung hat ein **Neutron/Proton**?  
Welche Ladung müssen die **Quarks** haben?



# Wie werden Quarks zusammengehalten?

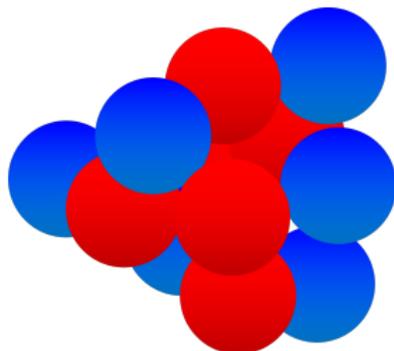


Die Elektromagnetische Kraft *könnte* Quarks binden!

# Kräfte in Atomkernen

...aber warum halten dann *Atomkerne* zusammen?!

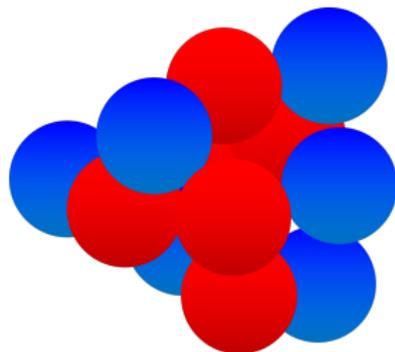
☞ **Protonen** stoßen sich elektromagnetisch ab!



# 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!



→  $\Delta^{++}$



→  $\Delta^{-}$

☞ 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

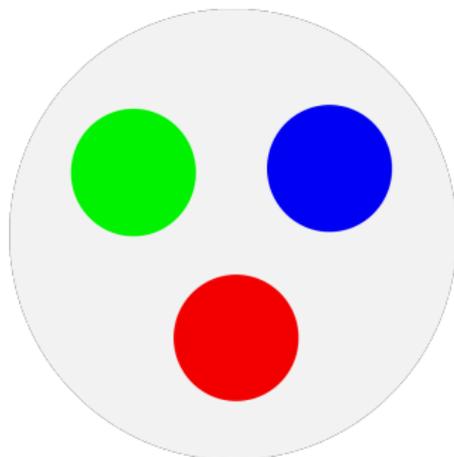
Für die **starke Kraft** existiert eine **Ladung**, auf die sie wirkt!

# 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:

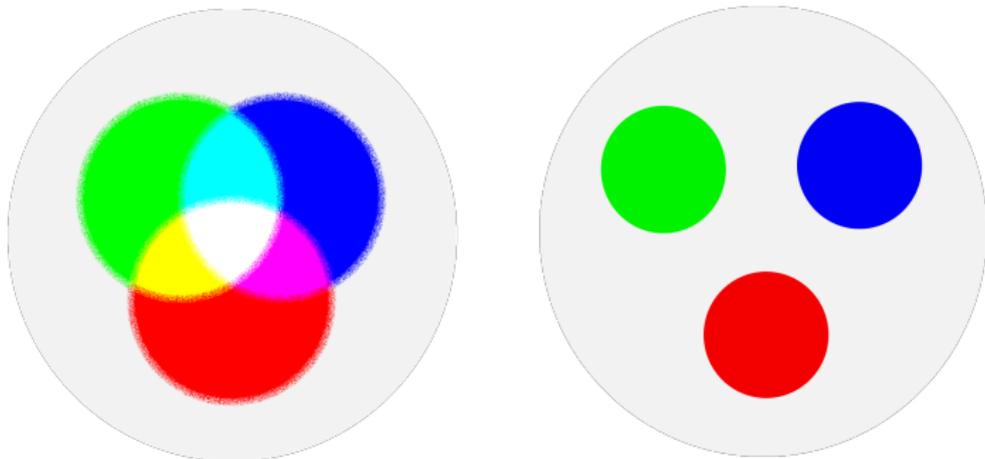


# Die Eigenschaften der starken Wechselwirkung

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!

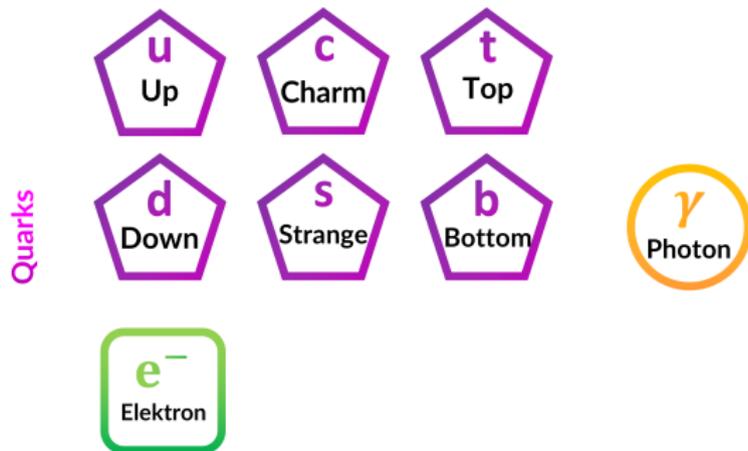
# Das Standardmodell der Teilchenphysik



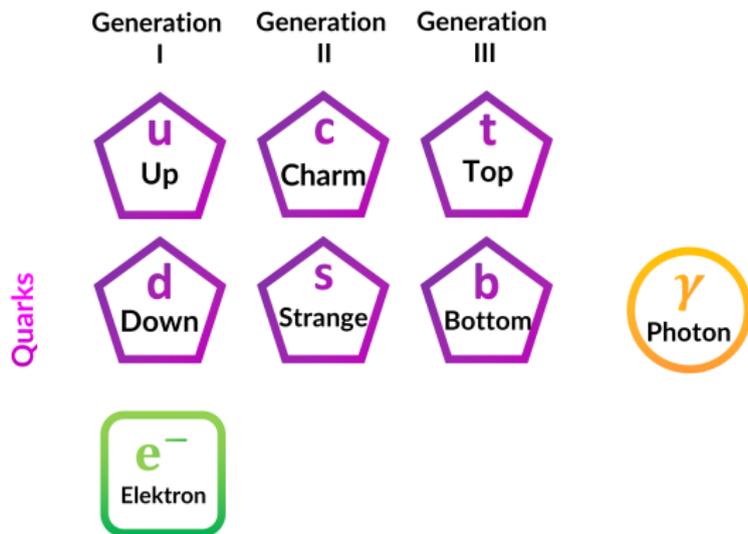
# Das Standardmodell der Teilchenphysik



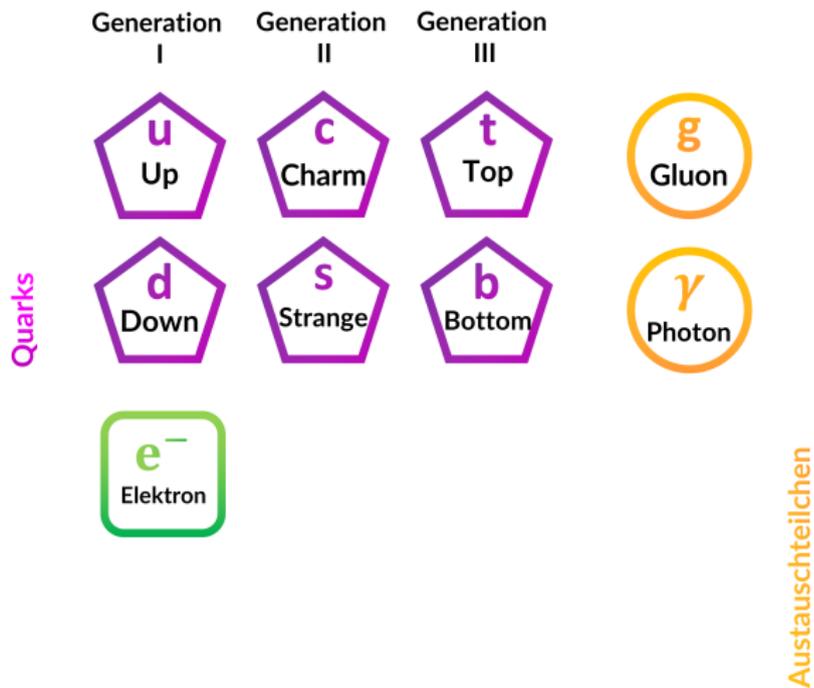
# Das Standardmodell der Teilchenphysik



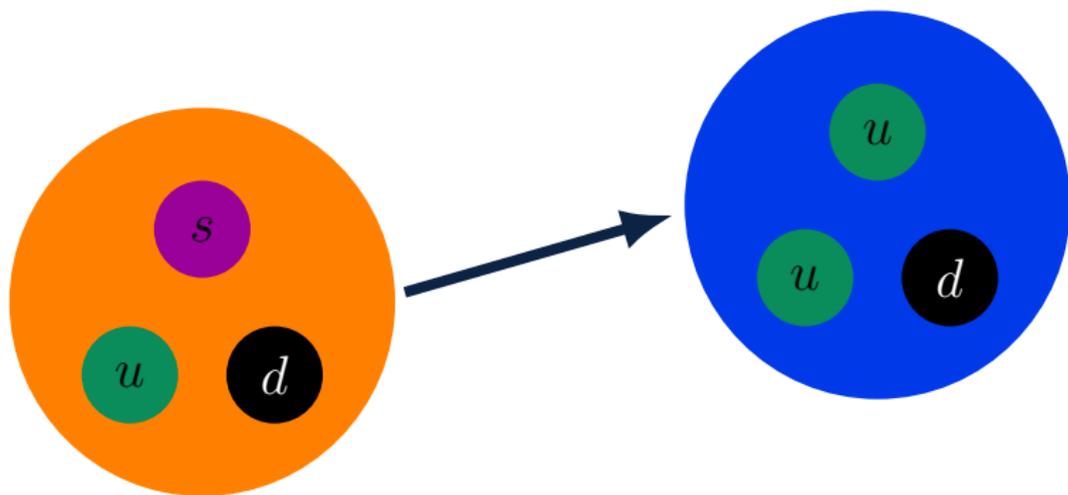
# Das Standardmodell der Teilchenphysik



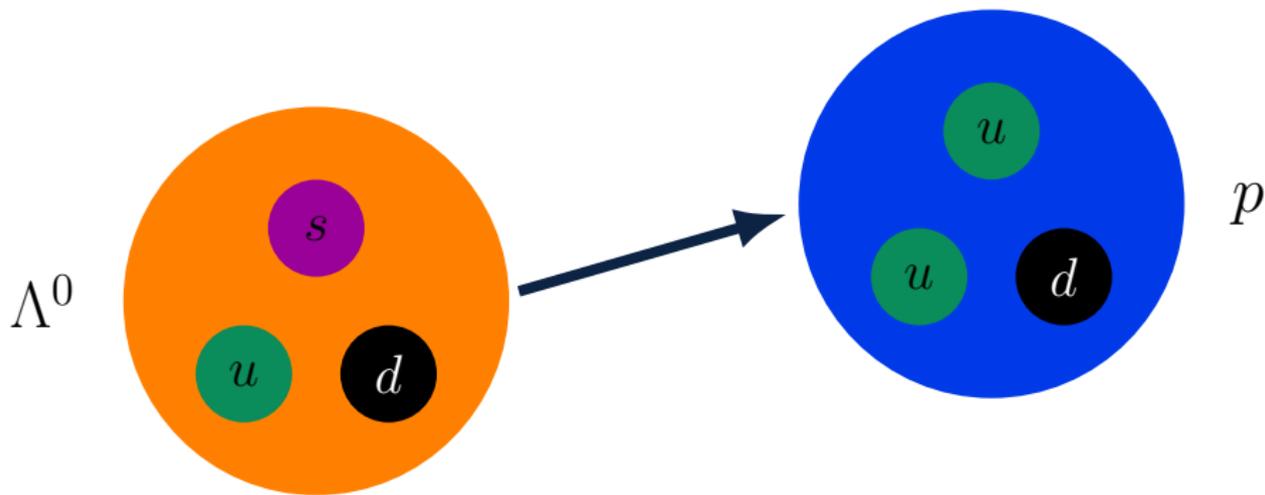
# Das Standardmodell der Teilchenphysik



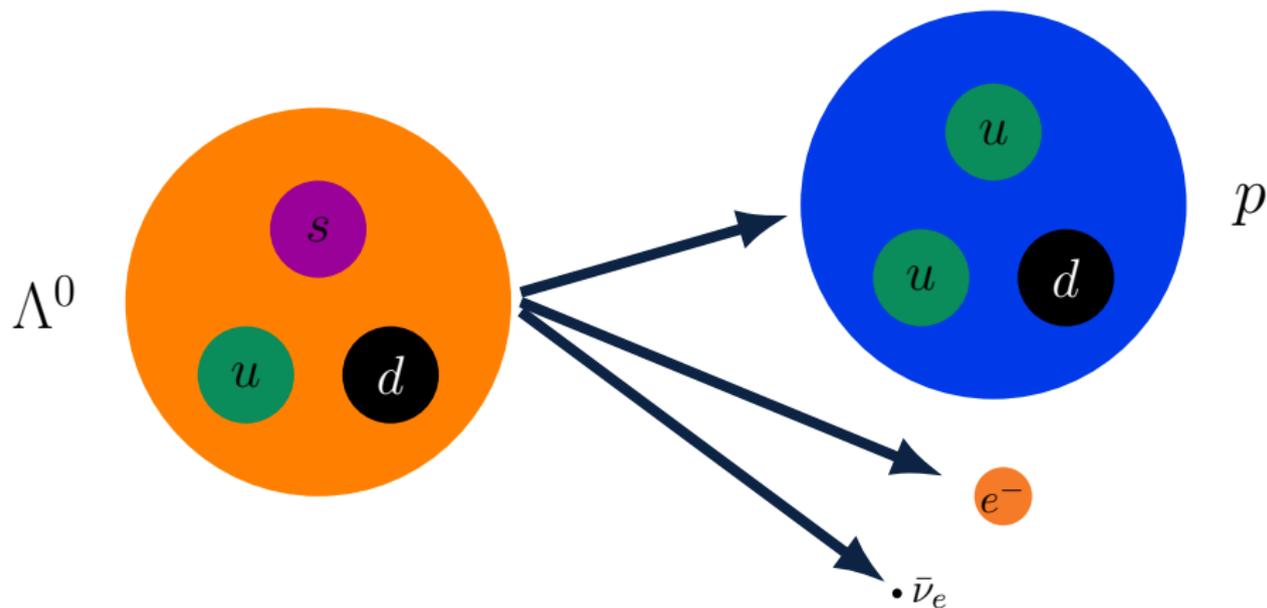
# Die schwache Wechselwirkung



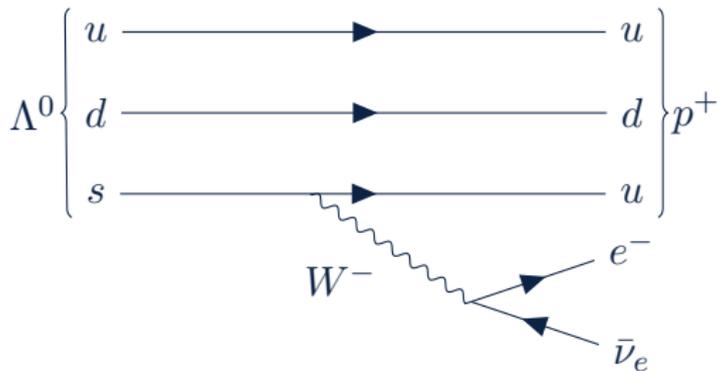
# Die schwache Wechselwirkung



# Die schwache Wechselwirkung

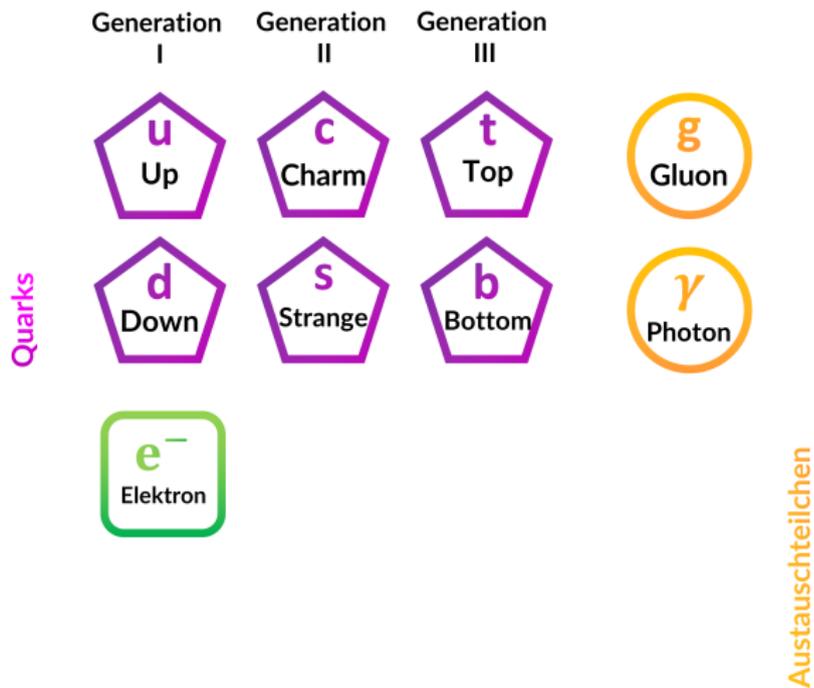


# Feynman Diagramme

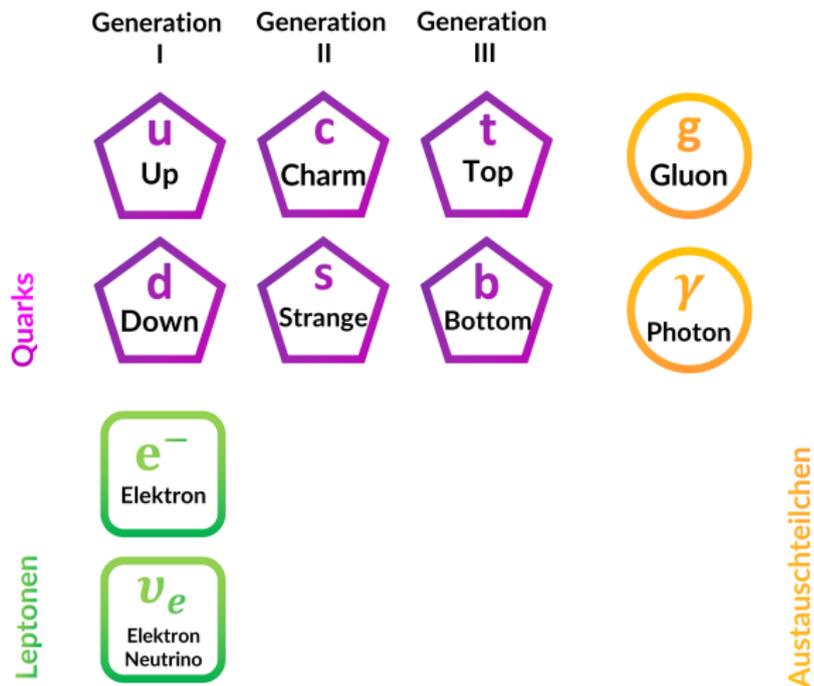


☞ Nur die schwache Wechselwirkung ist in der Lage den Flavour eines Teilchens zu verändern!

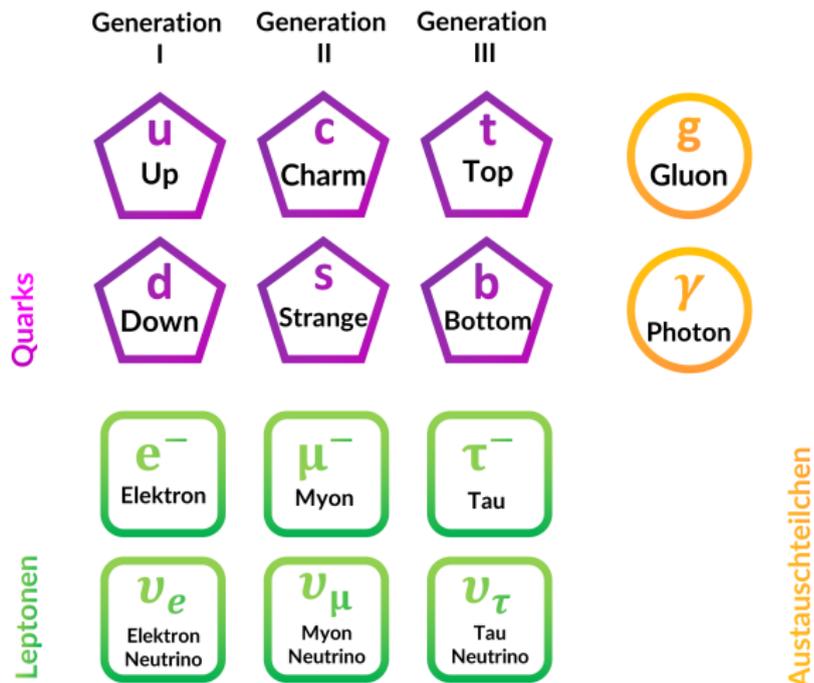
# Das Standardmodell der Teilchenphysik II



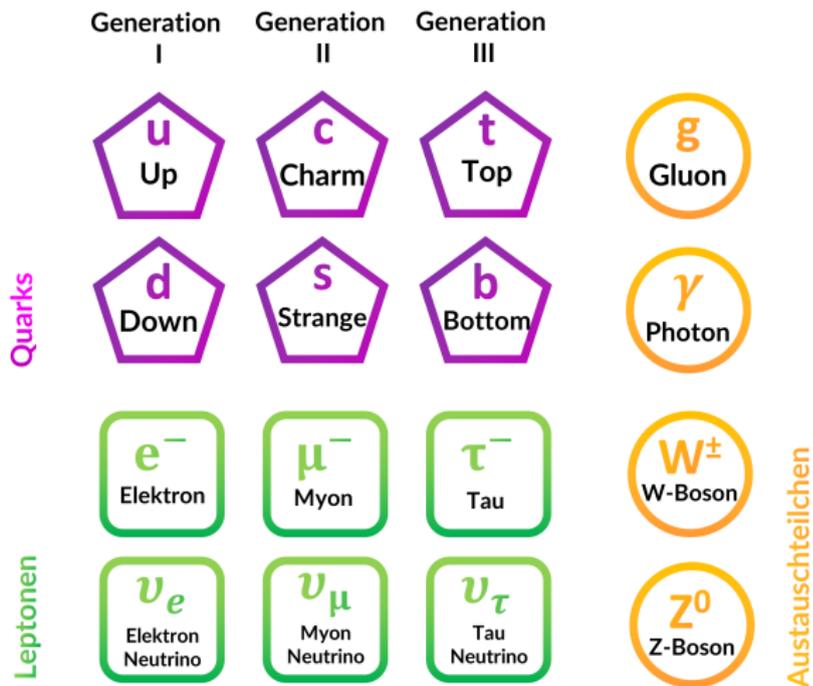
# Das Standardmodell der Teilchenphysik II



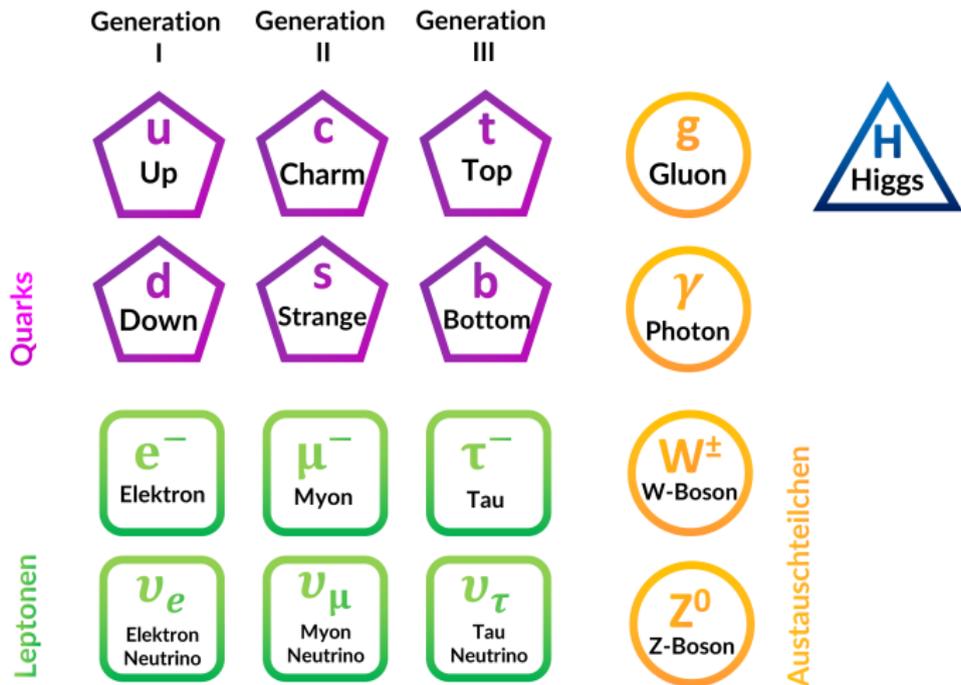
# Das Standardmodell der Teilchenphysik II



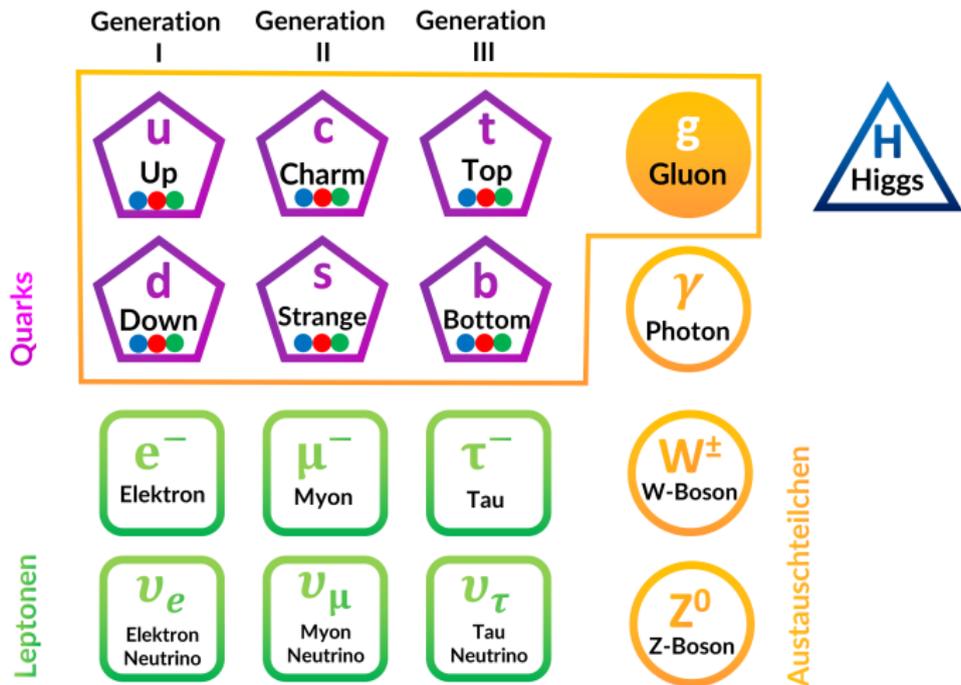
# Das Standardmodell der Teilchenphysik II



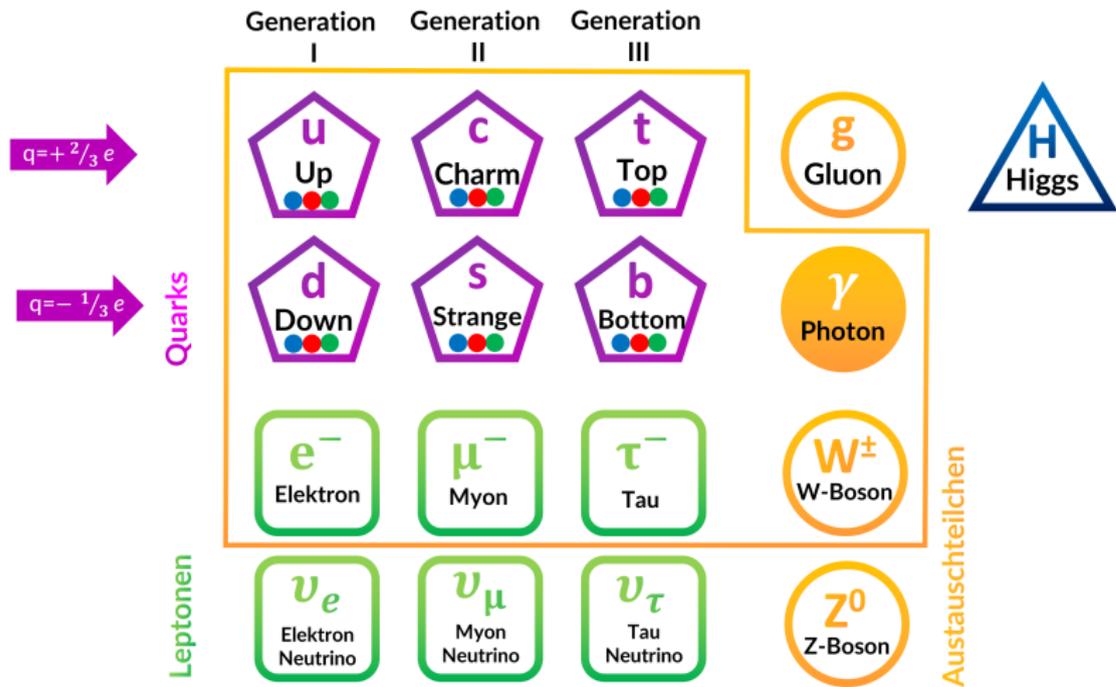
# Das Standardmodell der Teilchenphysik II



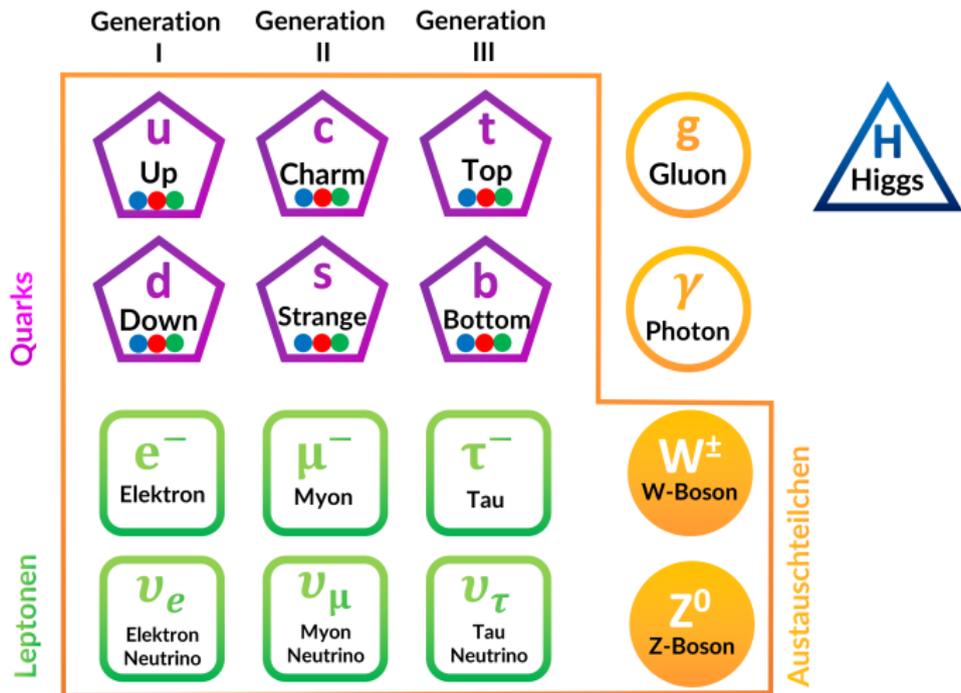
# Das Standardmodell der Teilchenphysik II



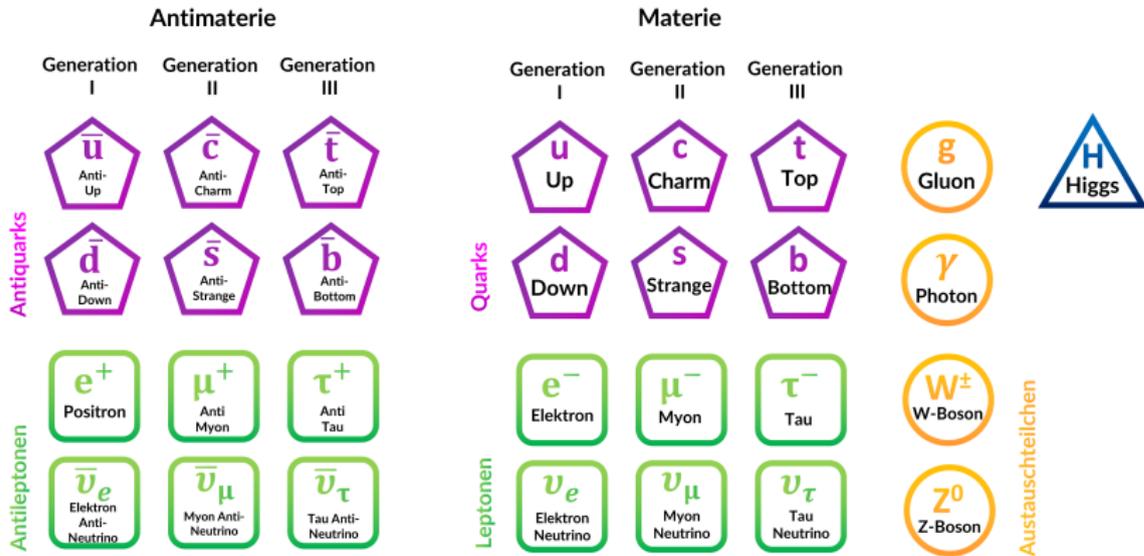
# Das Standardmodell der Teilchenphysik II



# 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  $\gamma, Z^0$  &  $W^\pm, g$
  - 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

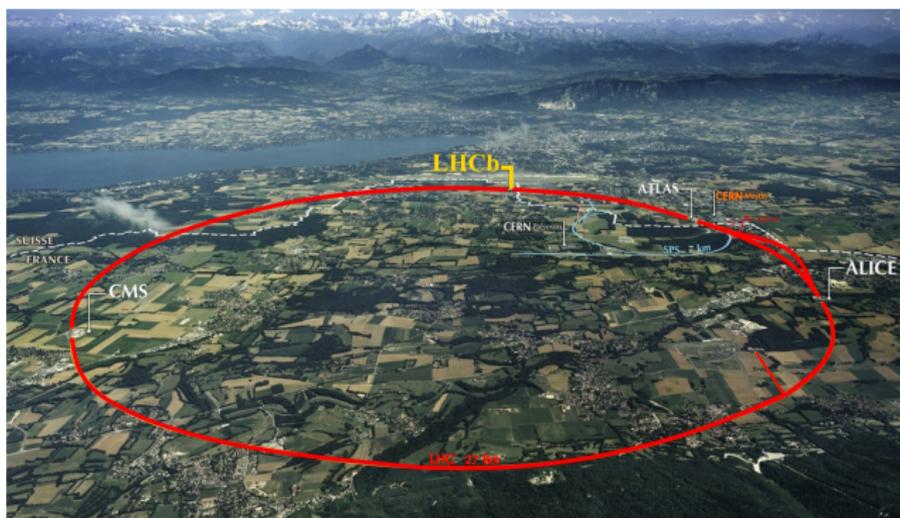
Einführung in den LHCb-Detektor am CERN

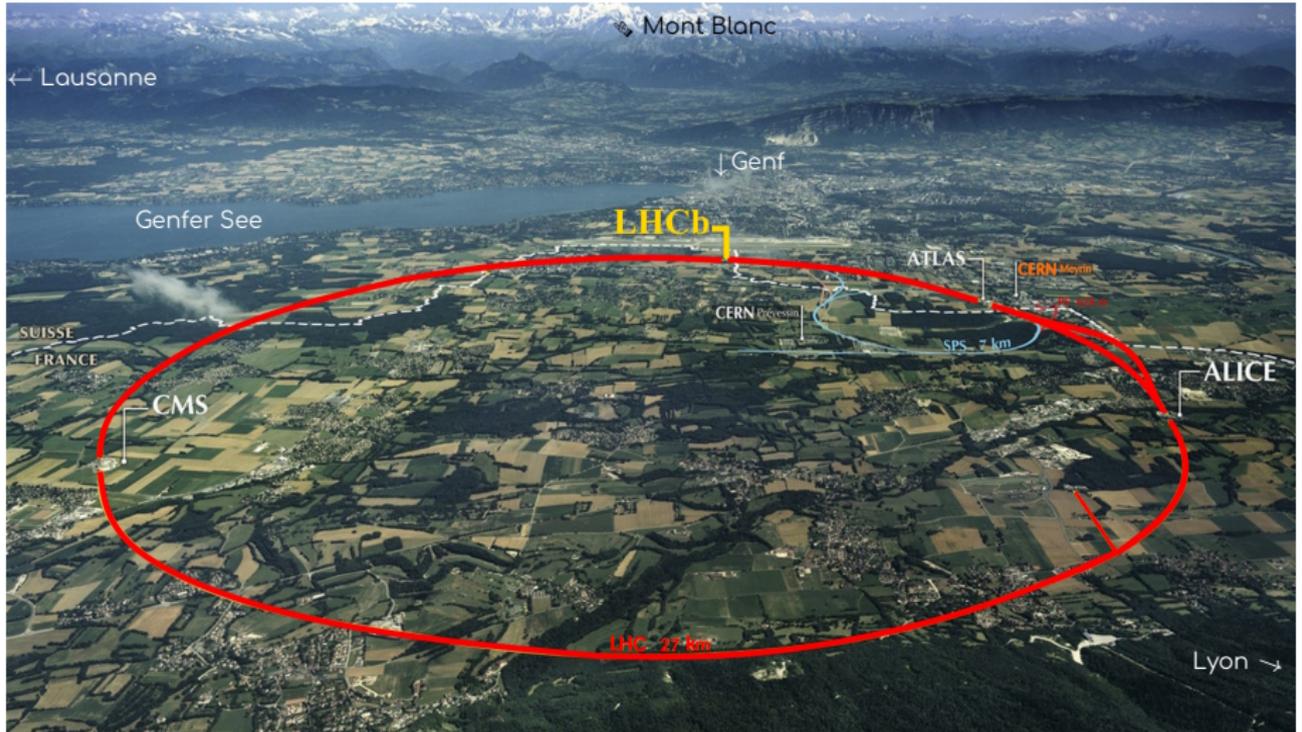
Wir wollen Teilchen produzieren!  
Dazu brauchen wir viel **Energie!**

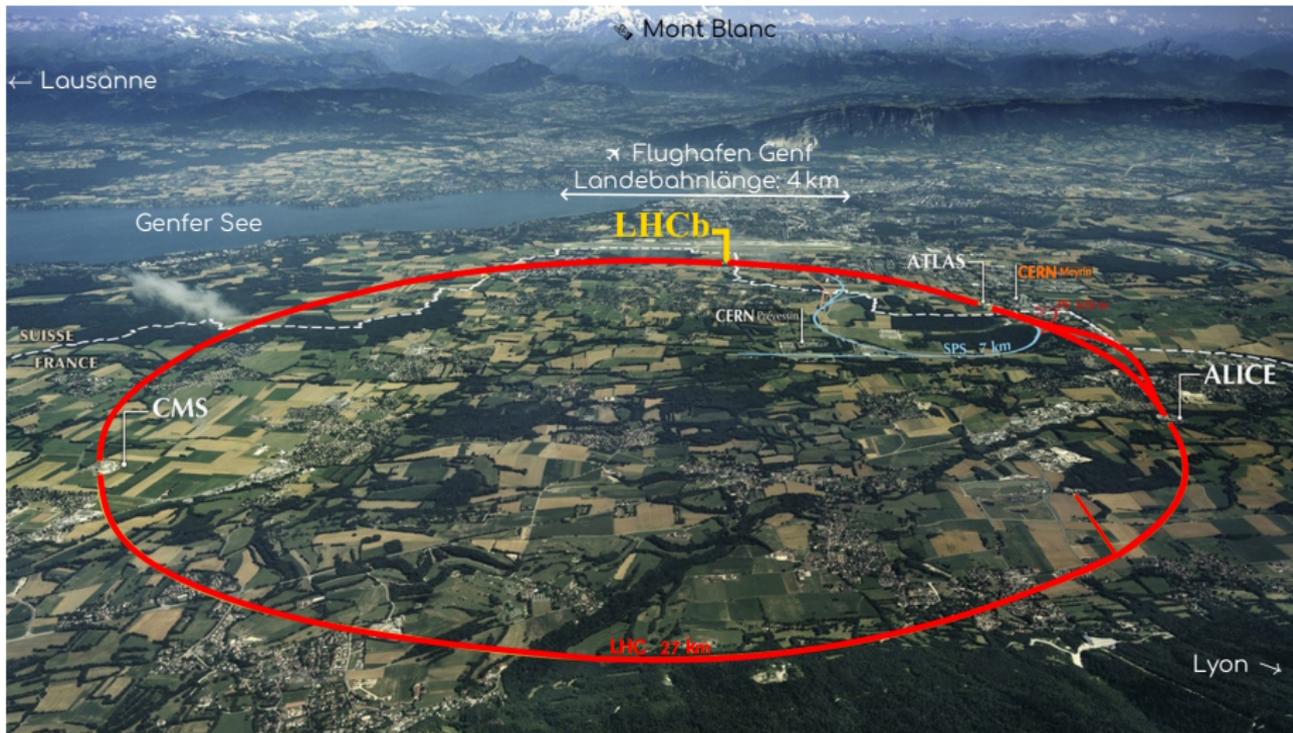
$$E = m \cdot c^2$$

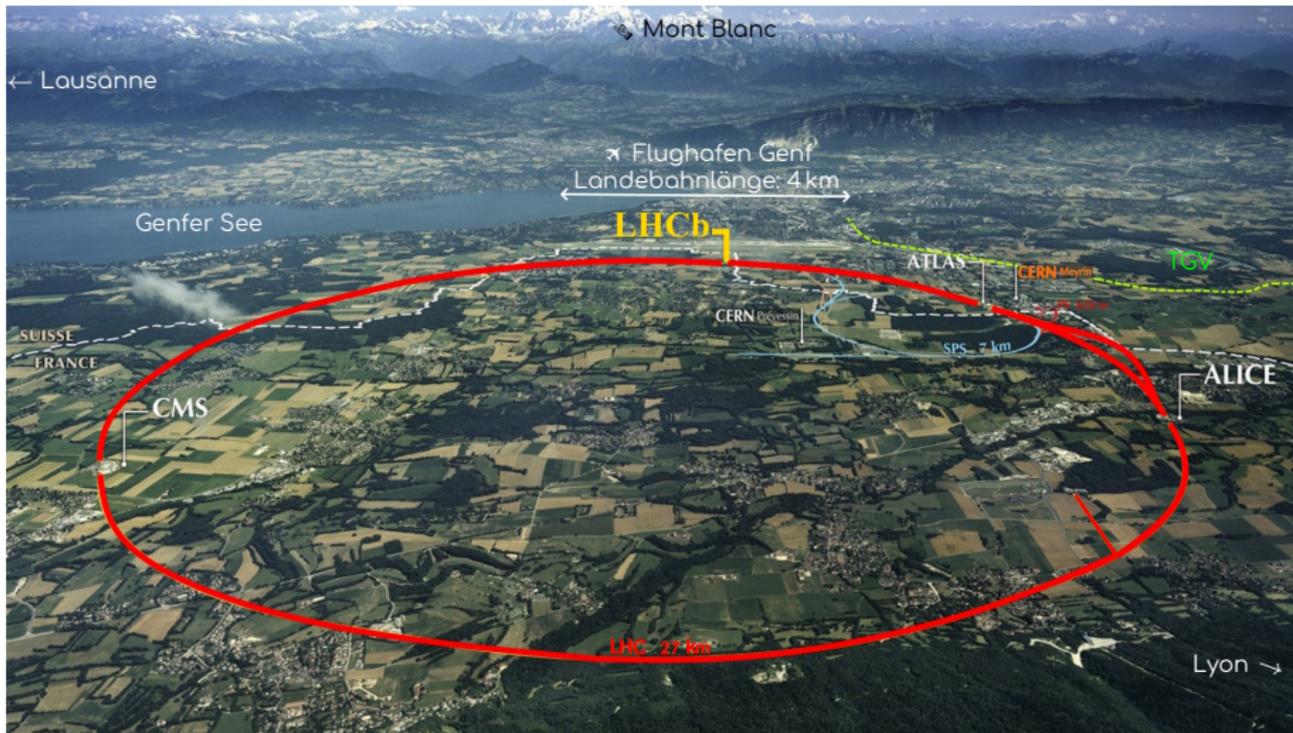
# Willkommen am CERN & LHC

Wie kann man die benötigte Energie bereitstellen?









# LHC vs. ICE

Energie pro Strahl: 350 MJ

☞ ICE ( $m = 400\text{ t}$ ) bei 150 km/h

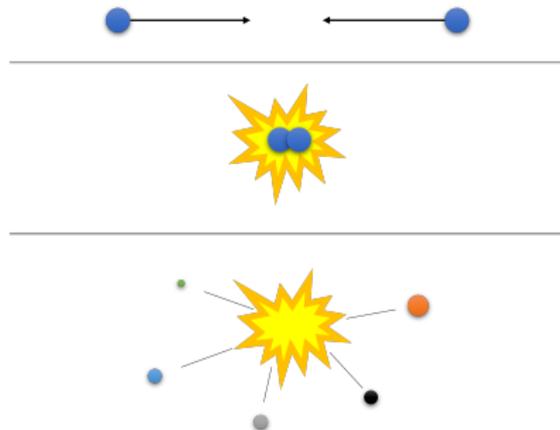
☞ Nährwert 153 Tafeln Schokolade

Energie pro Proton: 1  $\mu\text{J}$

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

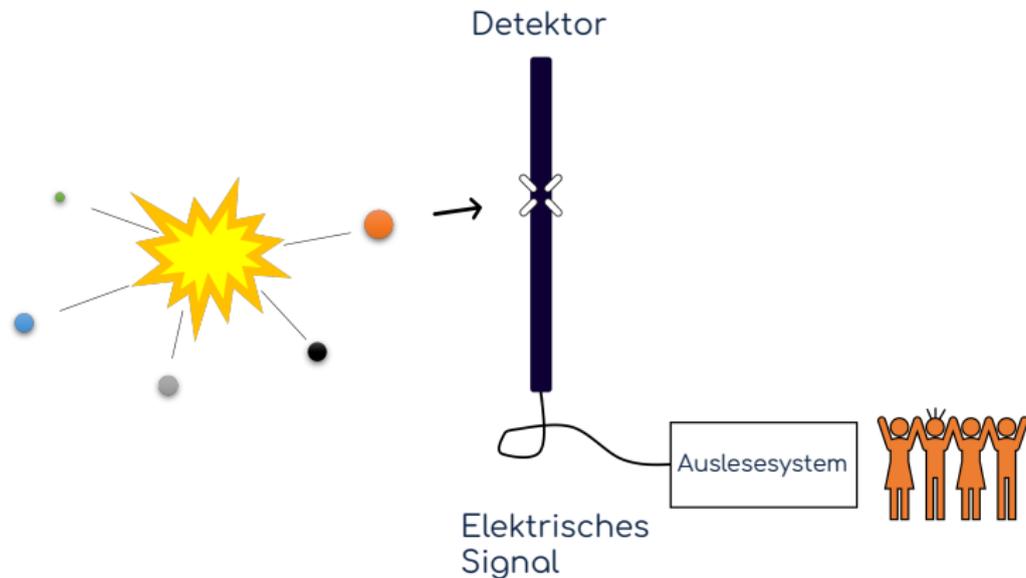
# Die Kollision der Teilchen

Die hochenergetischen Teilchen kollidieren  
☞ Was geschieht mit der Energie?



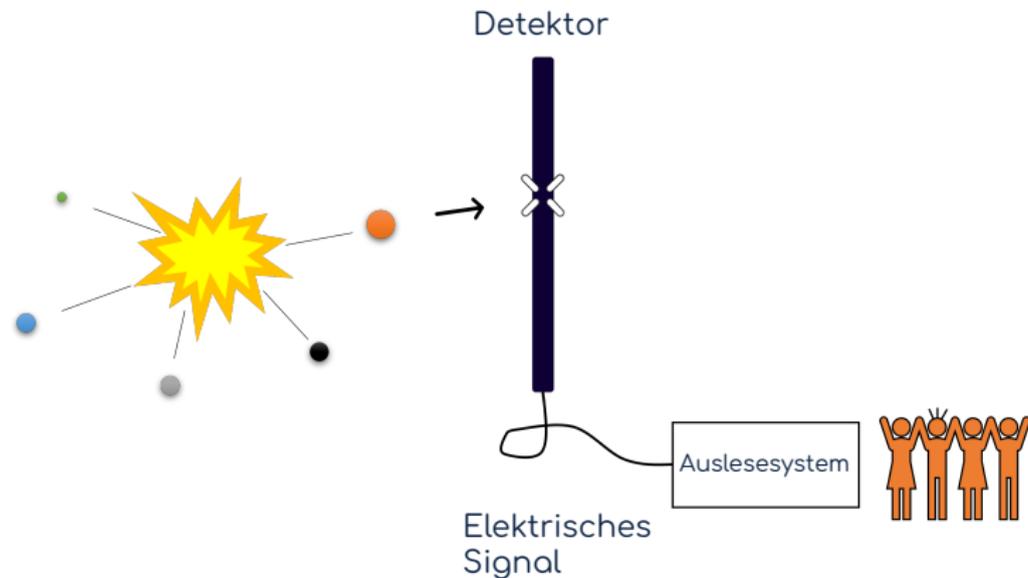
# Detektive für Teilchen

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?

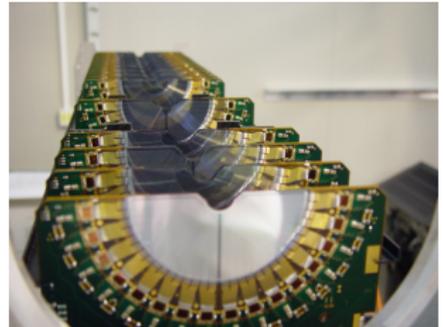
Erinnert euch an die Eigenschaften der Teilchen, die ihr kennt:

- 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



# Ring Imaging Cherenkov Detector (RICH1)

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

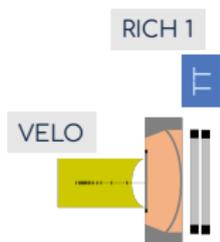


RICH 1



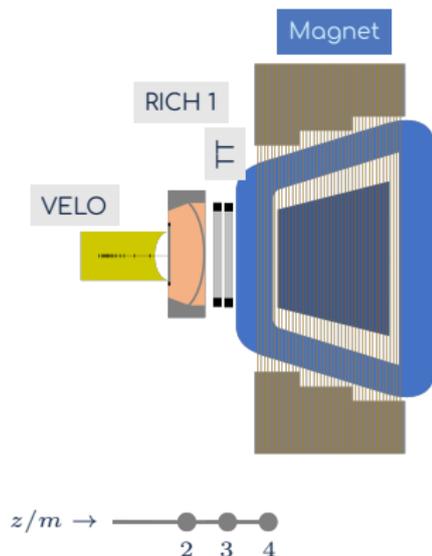
# Tracker Turicensis (TT)

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



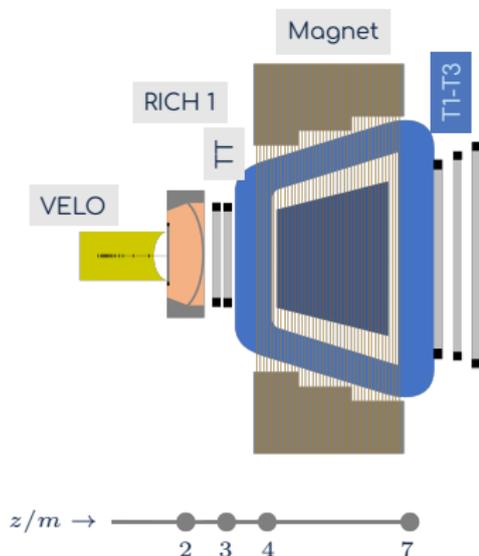
# Magnet

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



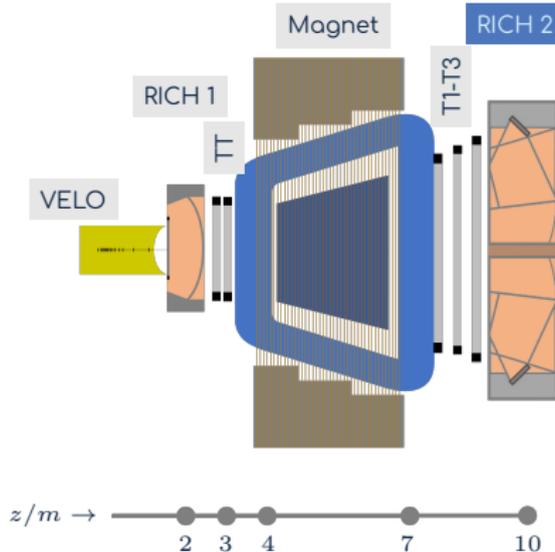
# Tracker T1, T2 und T3

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



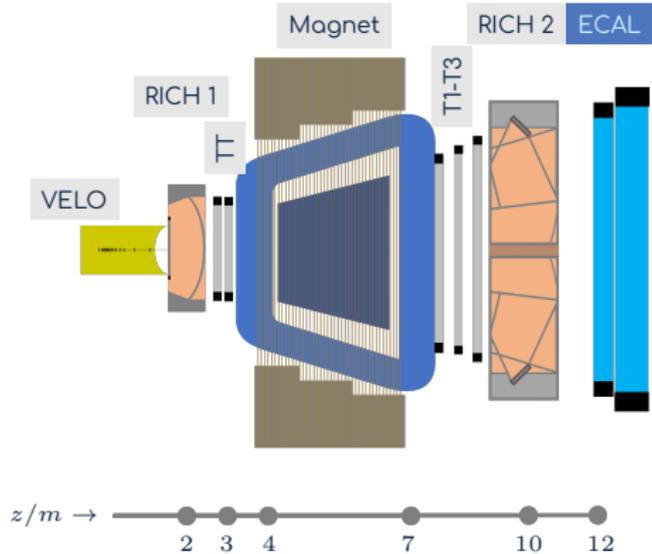
# Ring Imaging Cherenkov Detector (RICH2)

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



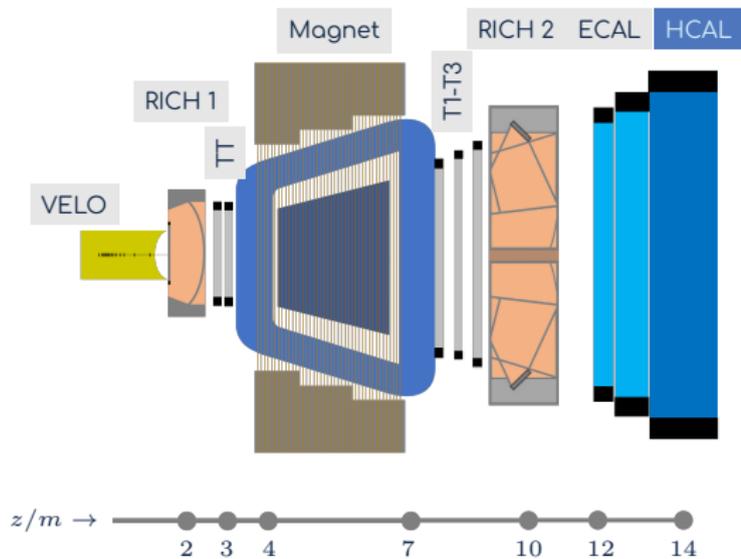
# Elektromagnetisches Kalorimeter (ECAL)

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



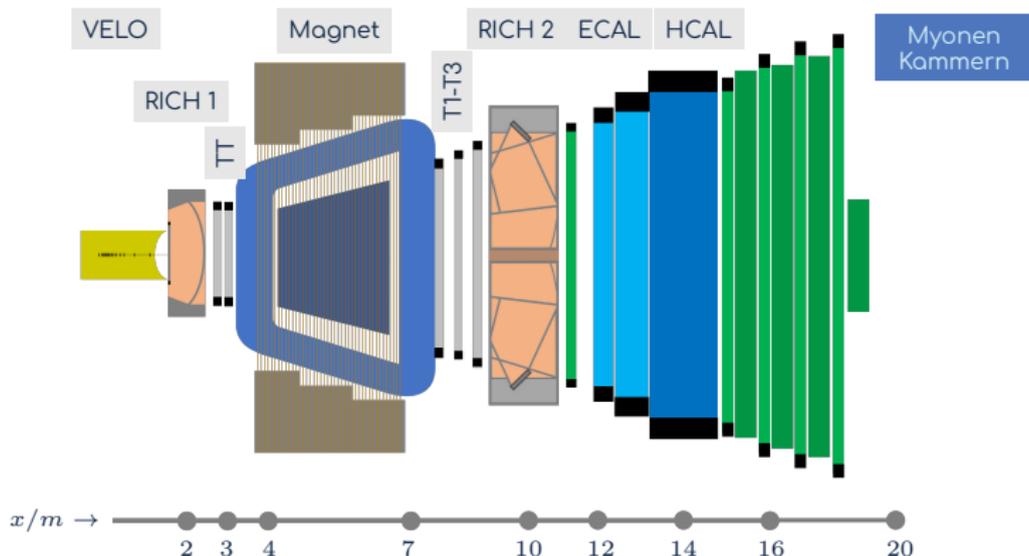
# Hadronisches Kalorimeter (HCAL)

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

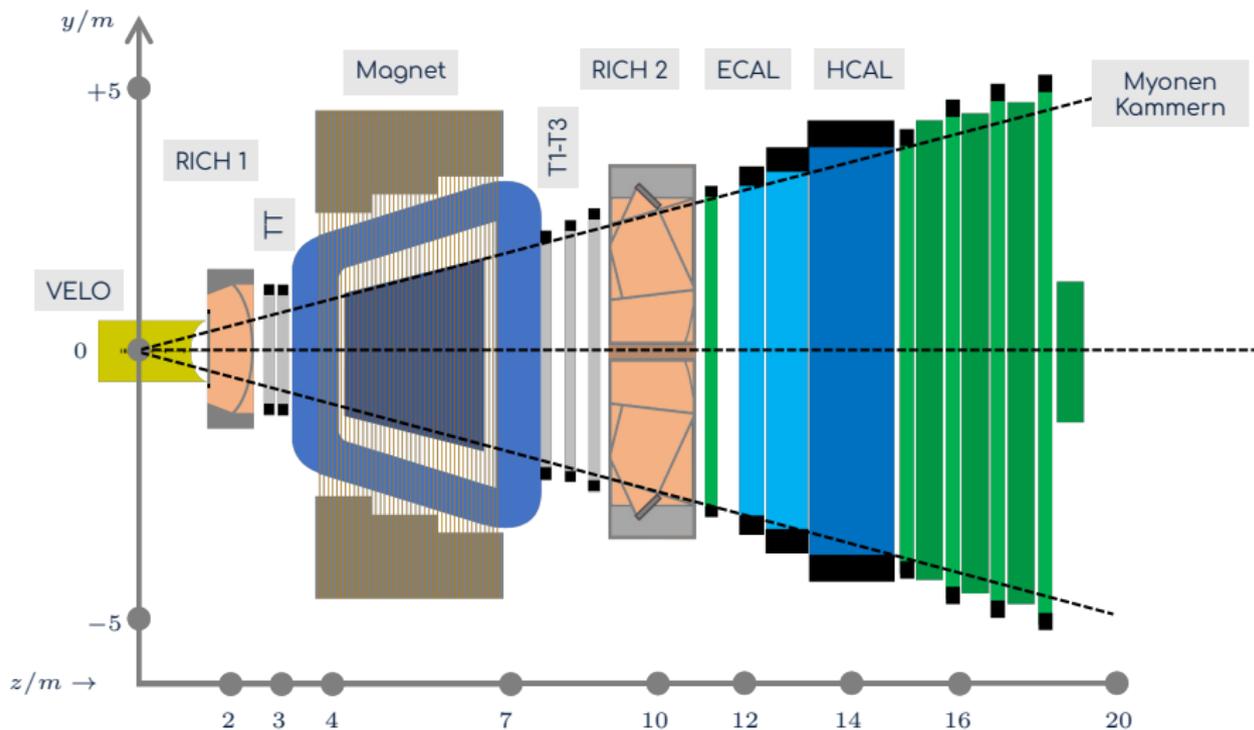


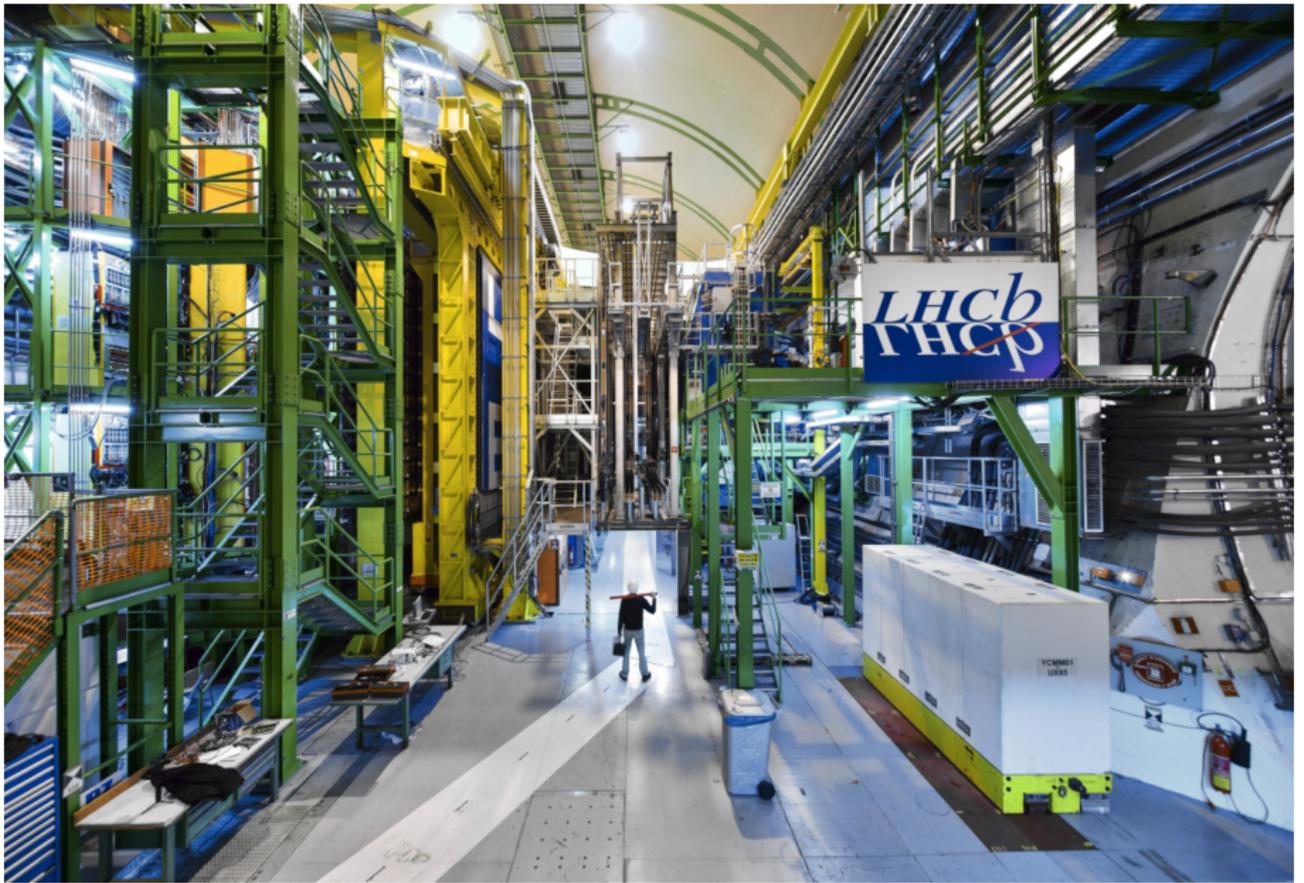
# Myonenkammern

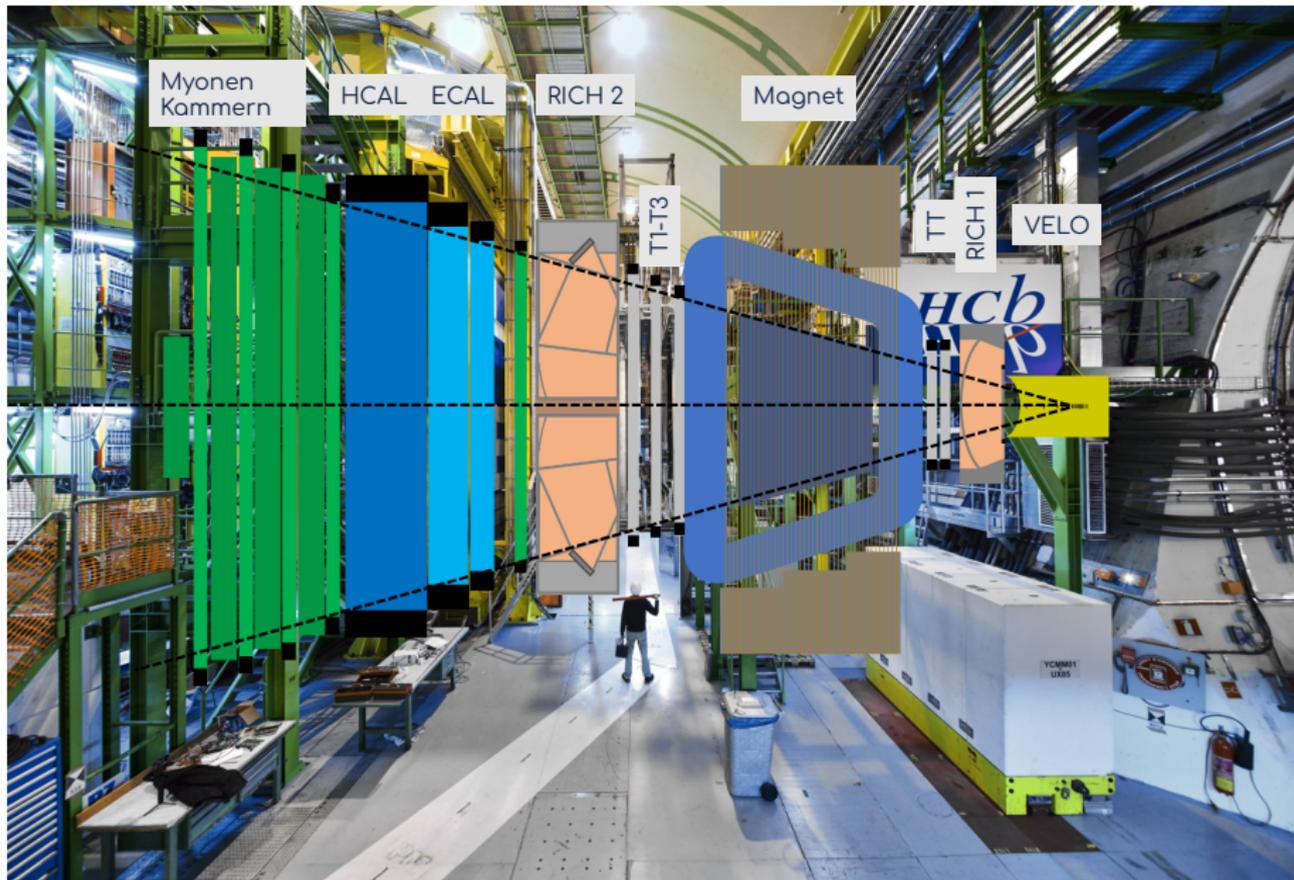
- Misst **Position** von Myonen



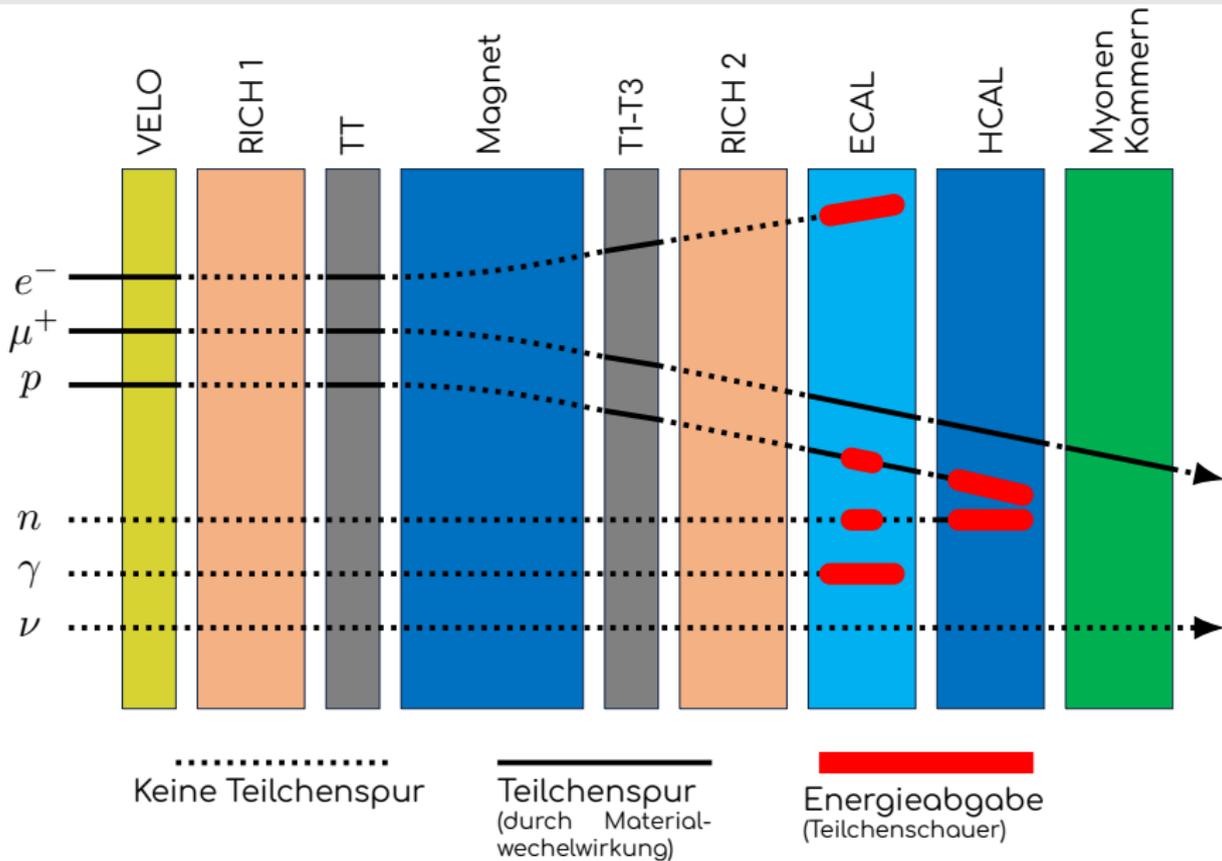
# Messbereich von LHCb







# Was macht wo ein Signal?



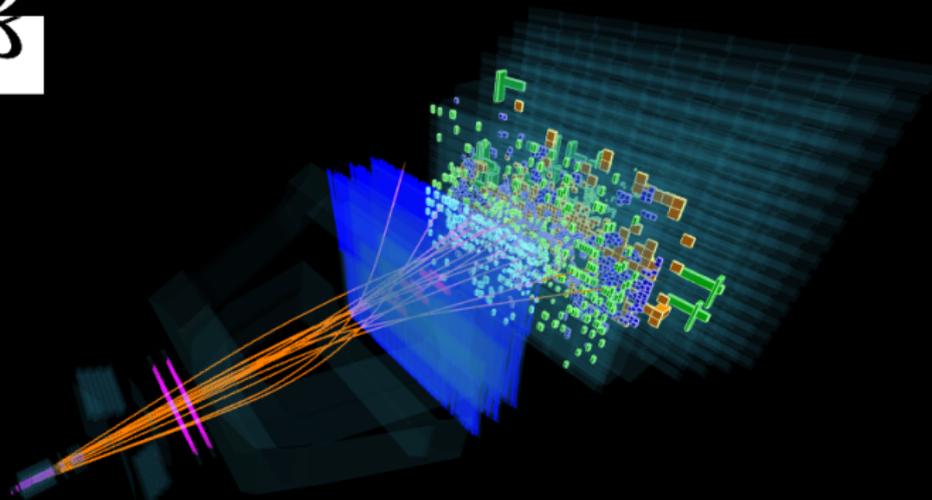
# Wie sieht ein gemessenes Ereignis aus?



Event 2598326

Run 168486

Wed, 25 Nov 2015 12:51:53



Additional slides ●

# Quarkmassen

2.2 MeV/c<sup>2</sup>



# Quarkmassen



1 kg

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



# Quarkmassen



1 kg

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



$\approx 2 \text{ kg}$

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



# Quarkmassen



1 kg

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



$\approx 2 \text{ kg}$

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



$\approx 45 \text{ kg}$

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



# Quarkmassen



1 kg

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



$\approx 2 \text{ kg}$

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



$\approx 45 \text{ kg}$

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



$\approx 0.6 \text{ t}$

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



# Quarkmassen



1 kg

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



$\approx 2 \text{ kg}$

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



$\approx 45 \text{ kg}$

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



$\approx 0.6 \text{ t}$

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



$\approx 1.9 \text{ t}$

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



# Quarkmassen



1 kg

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



$\approx 2 \text{ kg}$

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



$\approx 45 \text{ kg}$

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



$\approx 0.6 \text{ t}$

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



$\approx 1.9 \text{ t}$

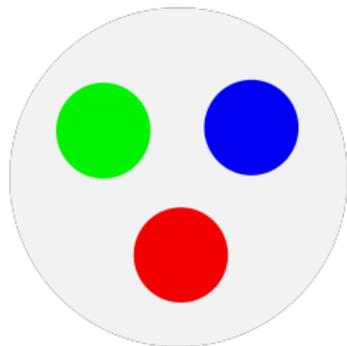
$4.2 \text{ GeV}/c^2$



$\approx 79 \text{ t}$

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





Einfache Überlegung:

$$m(\text{gray circle}) \stackrel{?}{=} m(\text{red circle}) + m(\text{blue circle}) + m(\text{green circle})$$

z.B. Proton (*uud*):

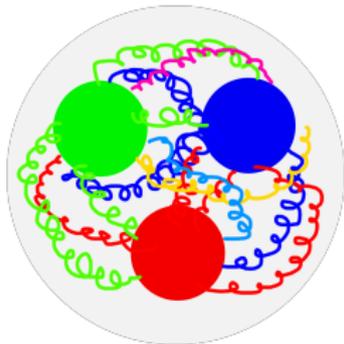
$$m(u) = 2.2 \text{ MeV}/c^2$$

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

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

Tatsächlich findet man:

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



Einfache Überlegung:

$$m(\text{grey circle}) \neq m(\text{red}) + m(\text{blue}) + m(\text{green})$$

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) <https://cds.cern.ch/images/CERN-PHOTO-201801-025-18/>
- Maximilien Brice/CERN (2008). [cds.cern.ch/record/1295244](https://cds.cern.ch/record/1295244)
- Paula Collins/CERN (2007) [cds.cern.ch/record/1017398](https://cds.cern.ch/record/1017398)
- Christoph Frei/CERN (2021) [cds.cern.ch/record/2807064](https://cds.cern.ch/record/2807064)
- Angela Buechler/CERN (2009) [twiki.cern.ch/twiki/bin/view/LHCb/ConferenceSummaryIEEFlorida2009](https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/LHCb/ConferenceSummaryIEEFlorida2009)
- Peter Ginter/CERN (2008) [cds.cern.ch/record/1124307](https://cds.cern.ch/record/1124307)
- Maximilien Brice, Julien Ordan/CERN (2009) [facebook.com/LHCbExperiment/photos/a.238680152959433/1123439814483458/?type=3](https://facebook.com/LHCbExperiment/photos/a.238680152959433/1123439814483458/?type=3)
- Maximilien Brice, Julien Ordan/CERN (2009) <https://cds.cern.ch/record/2302374>
- CERN (2015). [https://lhcb.web.cern.ch/lhcb\\_page/collaboration/LHCb20/](https://lhcb.web.cern.ch/lhcb_page/collaboration/LHCb20/)
- Maximilien Brice/CERN (2005) [cds.cern.ch/record/835712](https://cds.cern.ch/record/835712)
- [schaette.de](https://schaette.de). [schaette.de/ratgeber/tiergesundheit/rinder/rinder-was-koennen-wir-fuer-abwehrstarke-kaelber-tun](https://schaette.de/ratgeber/tiergesundheit/rinder/rinder-was-koennen-wir-fuer-abwehrstarke-kaelber-tun)
- [meinhaushalt.at](https://meinhaushalt.at) (2009). [meinhaushalt.at/4182-zunge-schalen-kochen/#](https://meinhaushalt.at/4182-zunge-schalen-kochen/#)
- M 93 (2021) BMW X3 xDrive20d xLine (G01) – h 02042021.jpg
- Airbus. [aircraft.airbus.com/en/aircraft/a320/a321xlr#images](https://aircraft.airbus.com/en/aircraft/a320/a321xlr#images)