

Die Architektur der Wirklichkeit  
CERN-Forschende auf der Spur einer neuen Kraft?  
Katharina Müller

Paulus Akademie  
2. März 2022

# März 2021

## The Guardian

### Cern experiment hints at new force of nature

Experts reveal 'cautious excitement' over unstable particles that fail to decay as standard model suggests

## TagesAnzeiger

Abo Sensation am Cern in Genf

### Teilchenphysiker sind einer neuen Naturkraft auf der Spur

Die Entdeckung könnte unser Verständnis des Universums revolutionieren und sogar das Higgs-Teilchen in den Schatten stellen.

Mess-Abweichung am CERN

### Eine fünfte fundamentale Kraft entdeckt?

Forschende der UZH und des CERN haben etwas entdeckt, das ein fundamentales physikalisches Gesetz in Frage stellt: Bei Experimenten entsprach das Resultat nicht der erwarteten «Lepton-Universalität». Vermutet wird, dass eine neue, noch unbekannte Kraft im Spiel ist.

## Blick.ch

## NZZ

### Ein Experiment am Cern rüttelt an den Grundfesten der Physik – allerdings nur sanft



- Die Fundamente der Materie  
Grundbausteine und Kräfte
- Der grösste Beschleuniger  
Large Hadron Collider am CERN
- Das Auge der Forschenden  
LHCb Experiment
- Auf den Spuren einer neuen Kraft

# Woraus besteht Materie?

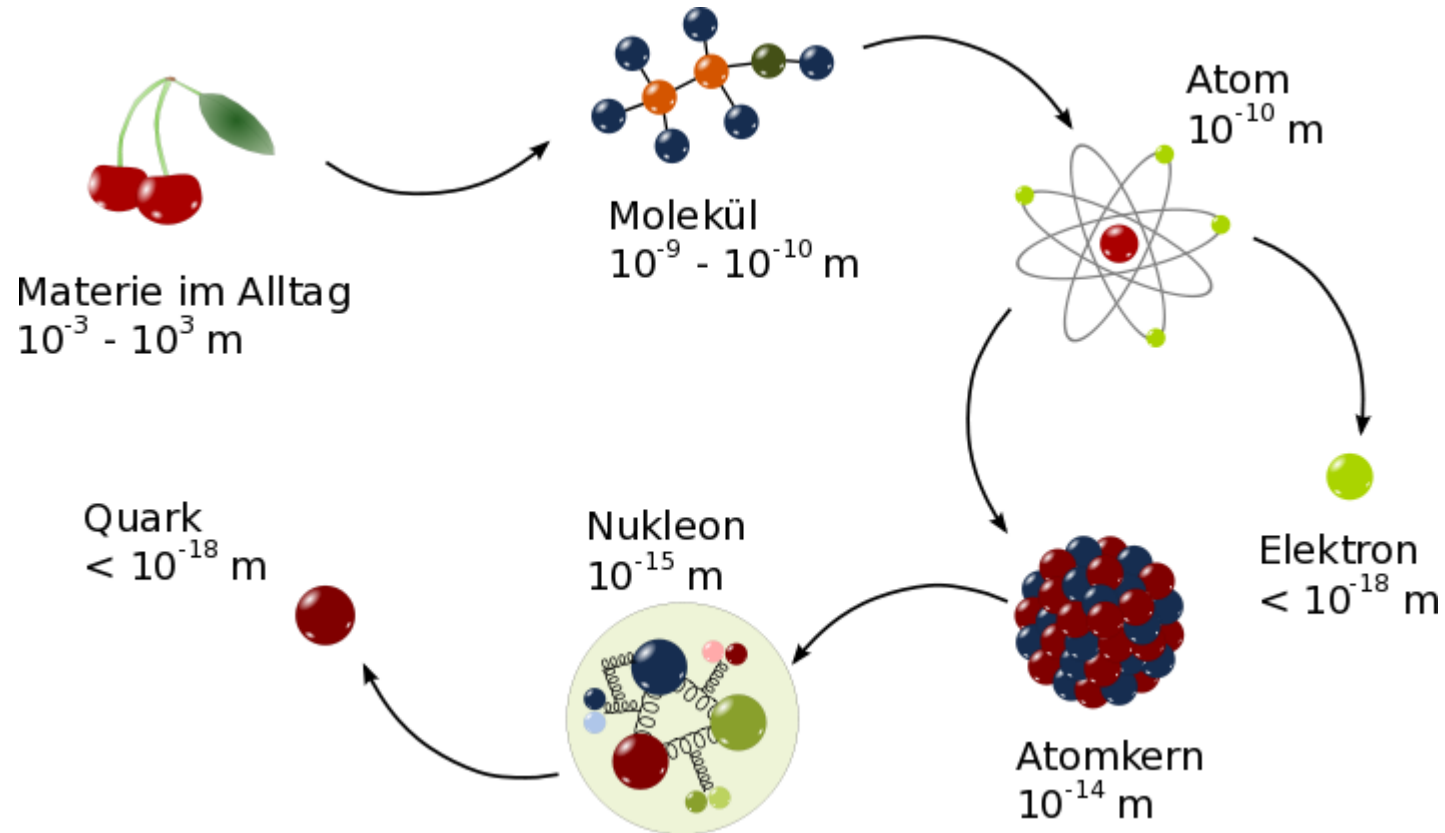
Griechische Philosophie:  
Vier-Elemente-Lehre



Hubert Elsässer  
Gröbenzeller Brunnen

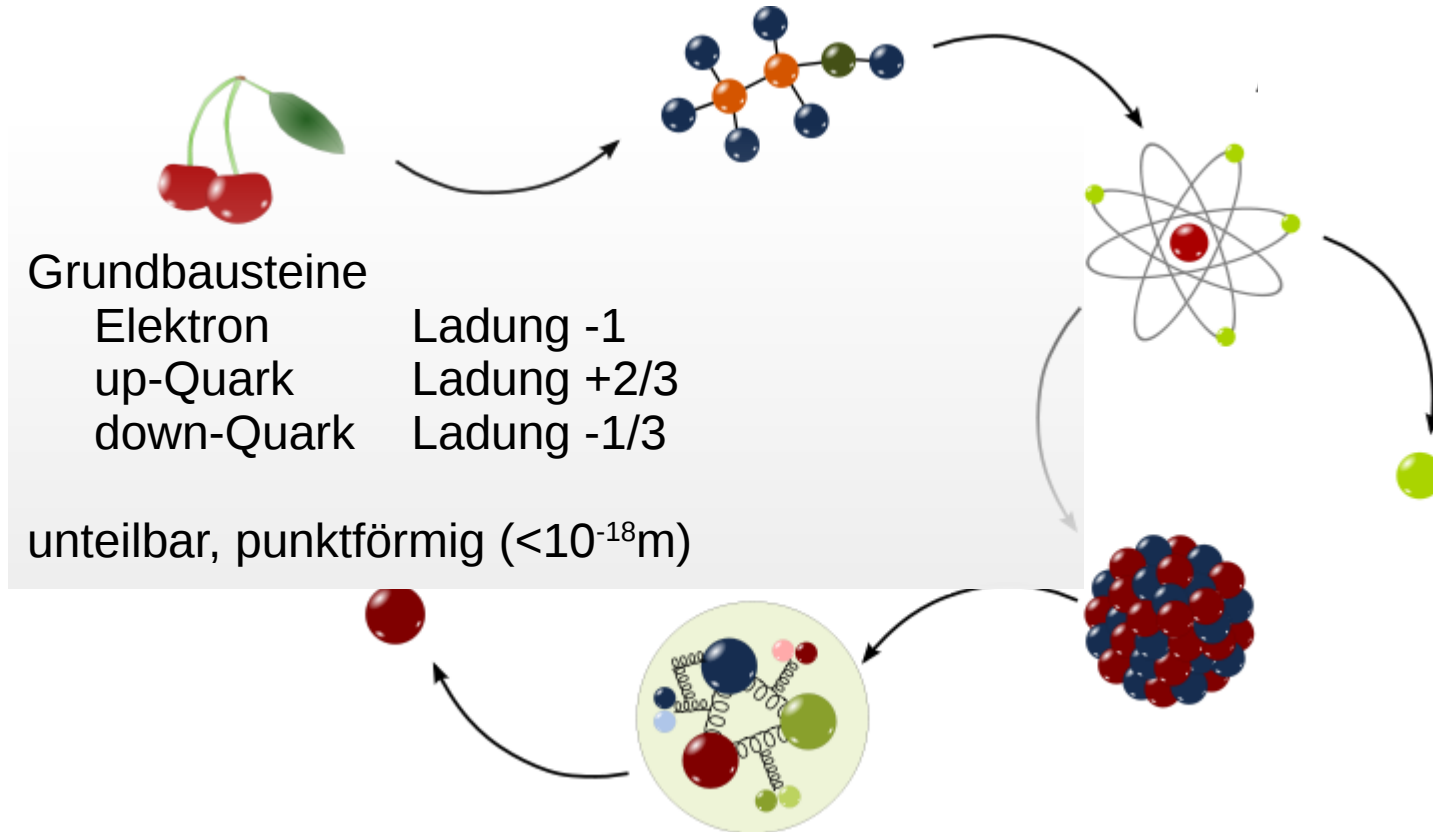


# Woraus besteht Materie?



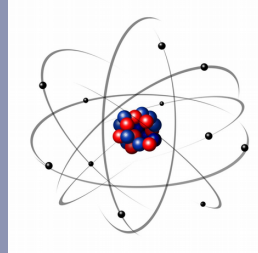


# Woraus besteht Materie?



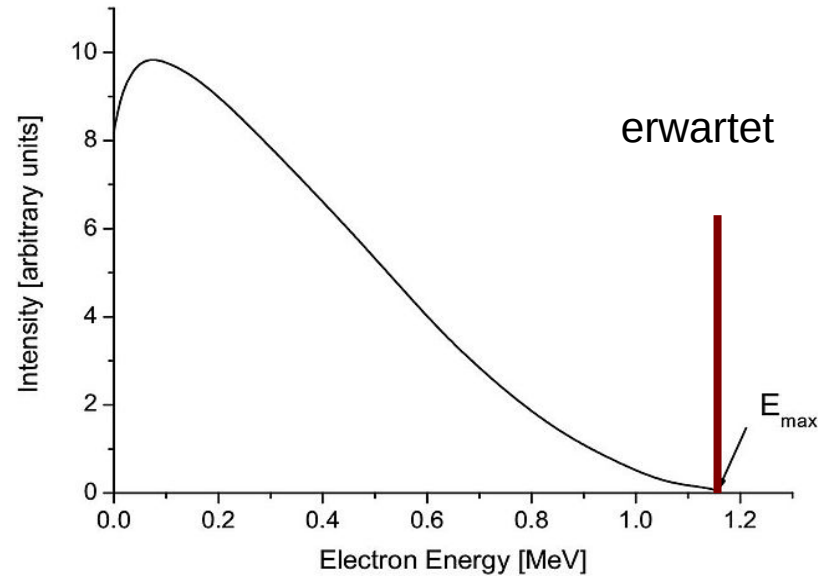
# Noch mehr Grundbauteilchen

Atom → Elektron  
up und down Quarks



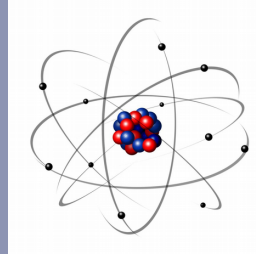
$\beta$ -Zerfall → **Neutrino**

**freies** Neutron zerfällt  $n \rightarrow p + e$  ( $\beta$ -Zerfall)  
Lebensdauer 15 Minuten



# Noch mehr Grundbauteilchen

Atom → Elektron  
up und down Quarks



$\beta$  -Zerfall → **Neutrino**

1936 Kosmische Höhenstrahlung

**Muon: schwerer Bruder des Elektrons**  
200 mal schwerer  
Lebensdauer 2 Mikrosekunden

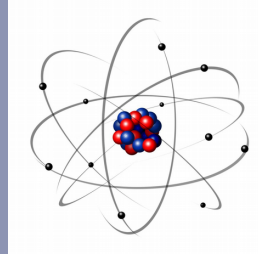


[https://www.zeuthen.desy.de/exps/physik\\_begreifen/frederiq/Kosmische\\_Strahlung](https://www.zeuthen.desy.de/exps/physik_begreifen/frederiq/Kosmische_Strahlung)



# Materieteilchen

Atom → Elektron  
up und down Quarks



β -Zerfall → **Neutrino**

Kosmische Höhenstrahlung → **Muon**

Beschleuniger:

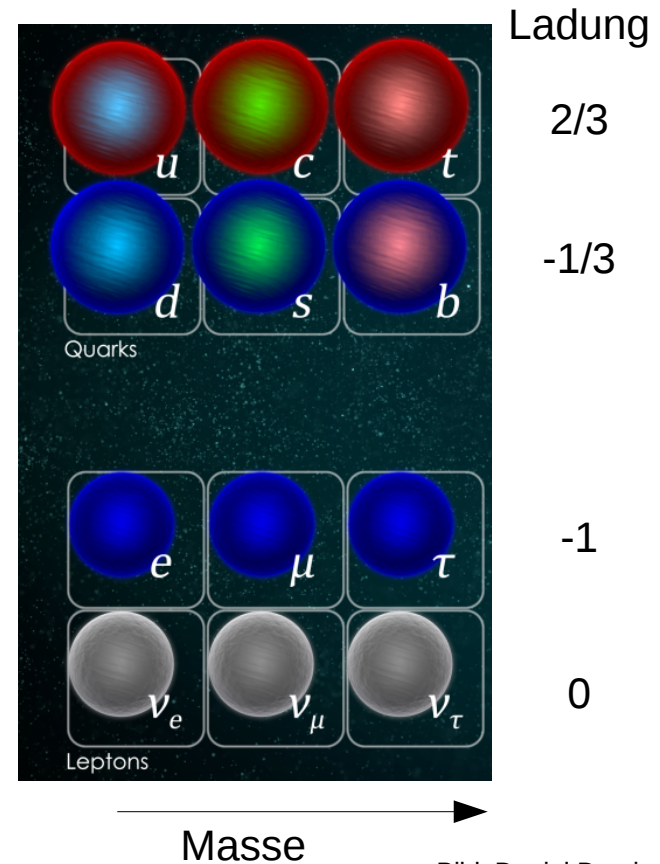
1974 strange Quark

1974 charm Quark

1975 Tau

1977 **bottom oder beauty Quark**

1995 top Quark

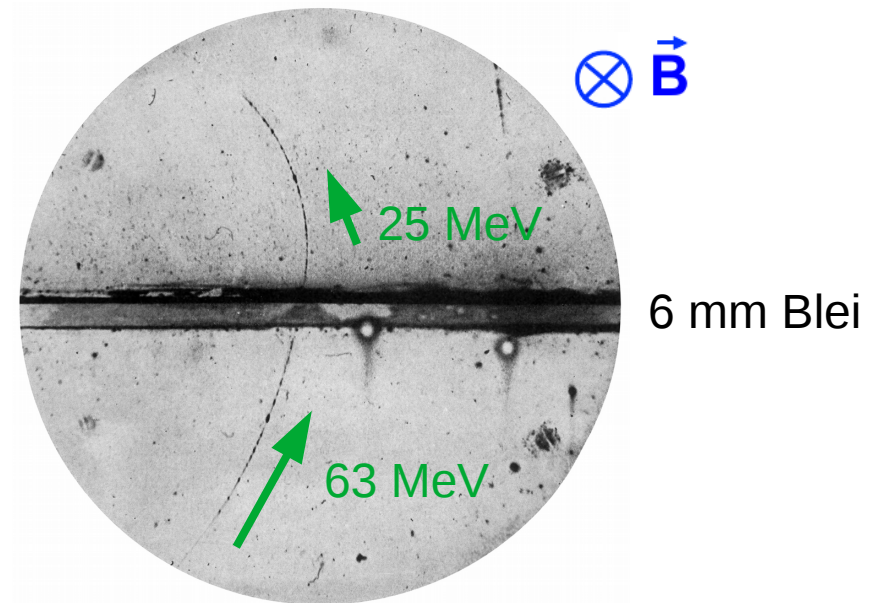


# Antimaterie

1928 Paul Dirac:  $(i\partial - m)\psi = 0$ , Energie des Elektrons  $E = \pm\sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}$

Nachweis 1932 in kosmischer Höhenstrahlung  
(Paul Anderson)

Heute:  
Zu jedem Teilchen gibt es ein Antiteilchen  
mit umgekehrter Ladung



Physical Review 43 (6): 491–494. DOI:10.1103/PhysRev.43.491.

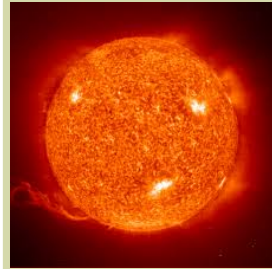
# Grundkräfte und ihre Austauschteilchen



Gravitation  
Graviton(?)



Elektromagnetische Kraft  
Photon



Schwache Kraft  
W und Z Teilchen



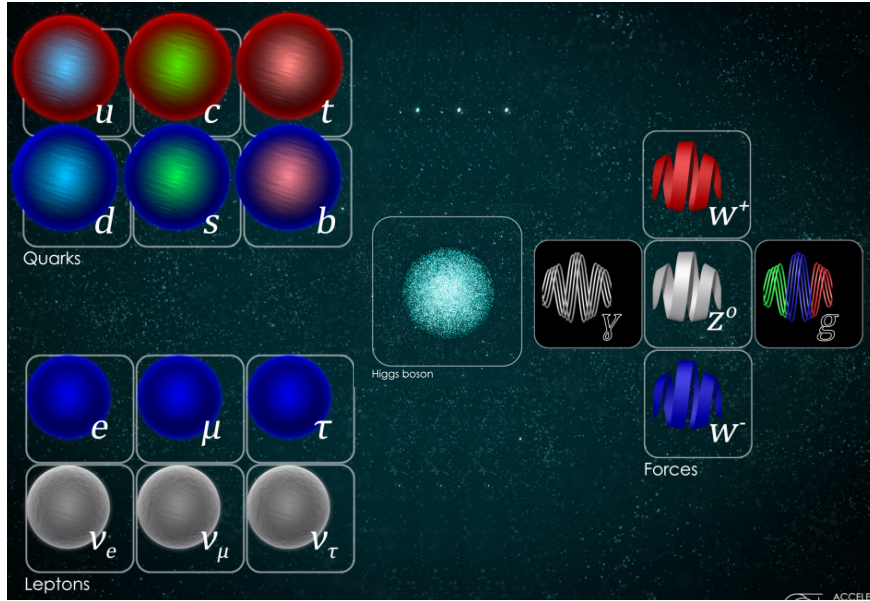
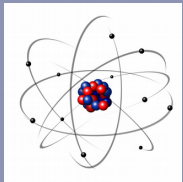
Starke Kraft  
Gluonen





Materie:  
drei Familien

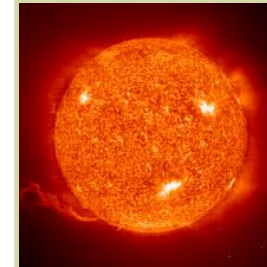
Atome:  
Elektron  
up & down Quark



Gravitation



Elektromagnetische  
Kraft

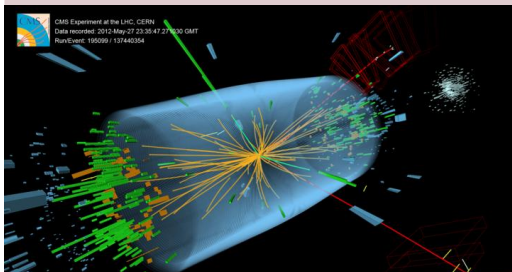


Schwache Kraft

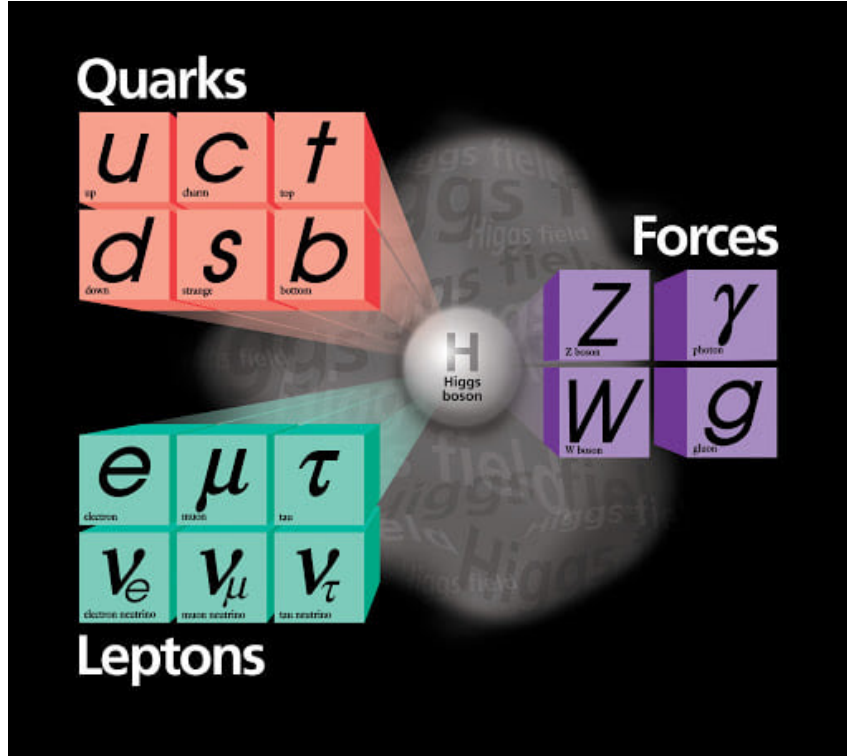


Starke Kraft

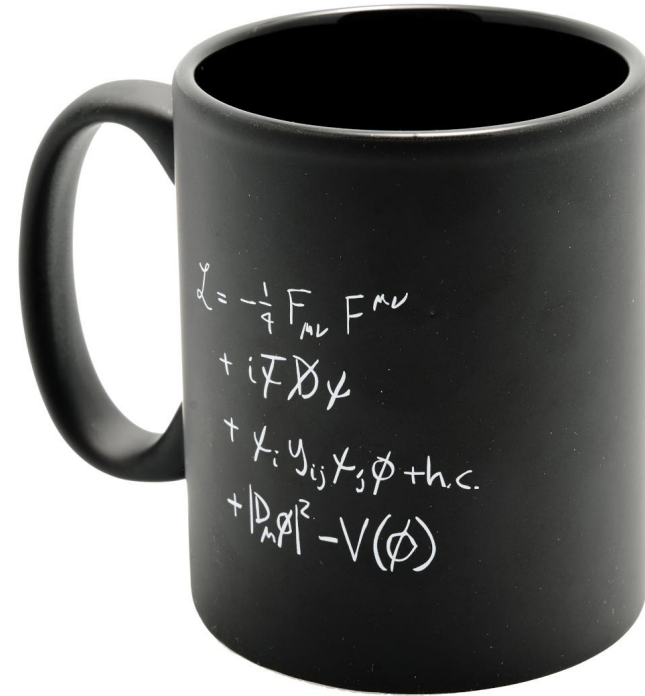
Higgs: gibt den Teilchen Masse  
2012 nachgewiesen



# Standardmodell der Teilchenphysik



<http://www.interactions.org>



<https://cds.cern.ch/record/2748662>

- Die Fundamente der Materie  
Grundbausteine und Kräfte
- Der grösste Beschleuniger  
Large Hadron Collider am CERN
- Das Auge der Forschenden  
LHCb Experiment
- Auf den Spuren einer neuen Kraft



# Large Hadron Collider (LHC)

## Beschleuniger:

- Umfang 27 km, ca 100 m unter der Erde
- Kollisionen von Protonen
- 4 grosse Experimente

## Protonen:

- 2 gegenläufige Strahlen
- 11000 Umläufe pro s
- Kollisionen alle 25 ns  
→ 40 Millionen pro Sekunde

## Protonen gebündelt in Paketen:

- 2808 Pakete
- 100 Milliarden Protonen/Paket
- Paket: ca 8 cm lang  
Durchmesser 1mm

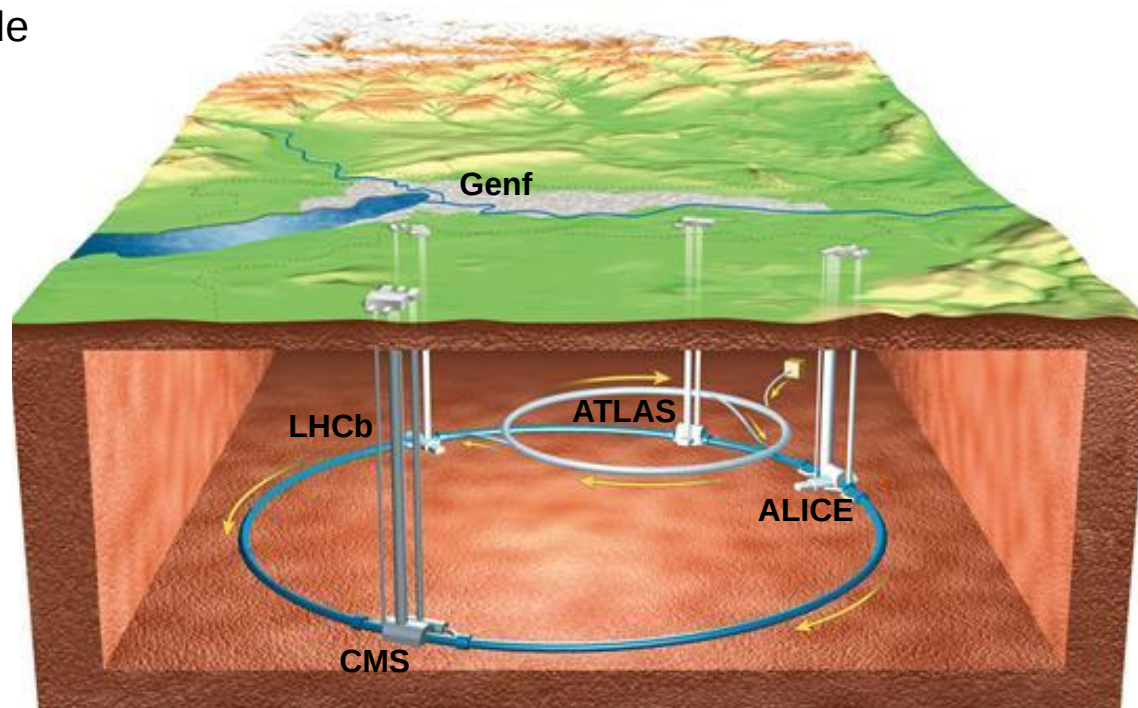
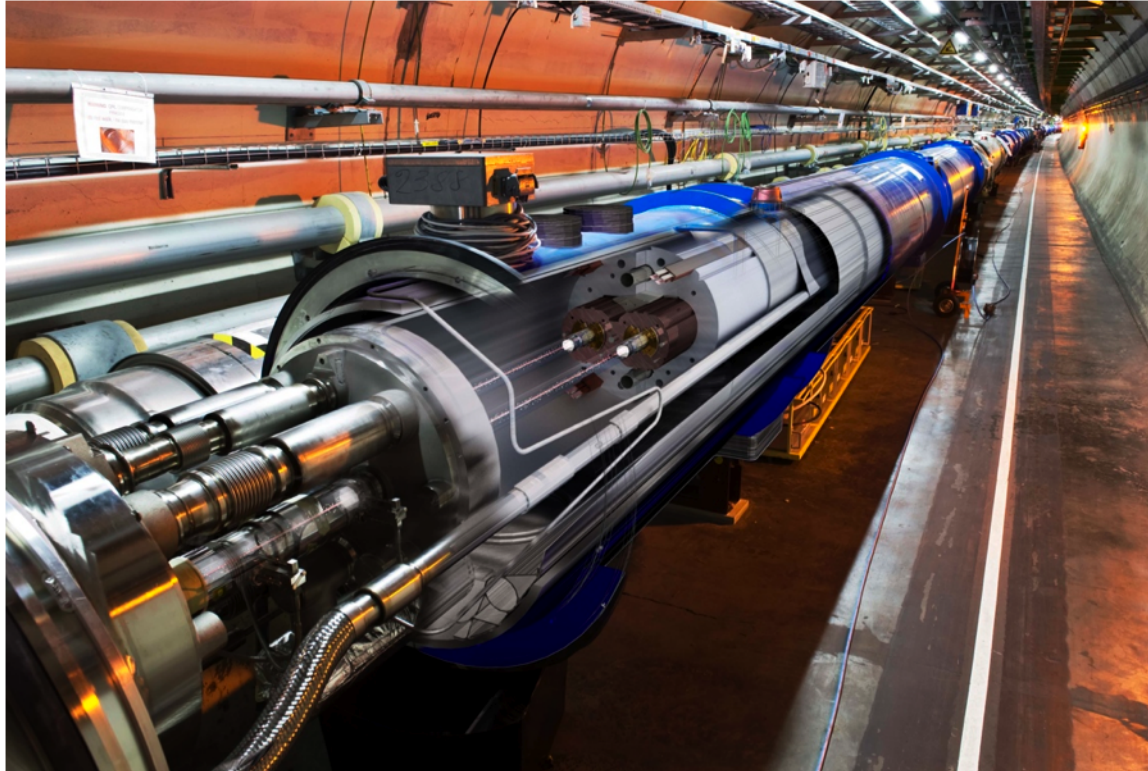


Bild: CERN

# Large Hadron Collider (LHC)



Fotomontage: D. Dominguez/CERN

# Ablenkmagnete

- 1232 Dipolmagnete halten Protonen auf Kreisbahn
- 15 m lang, 30 t schwer
- supraleitend ( $\sim 100$  t flüssiges Helium bei  $T = 1.9\text{K}$ )
- Magnetfeld bis zu 8.33 T  
11'850 Ampère
- → **11 GJ** gespeicherte Energie!



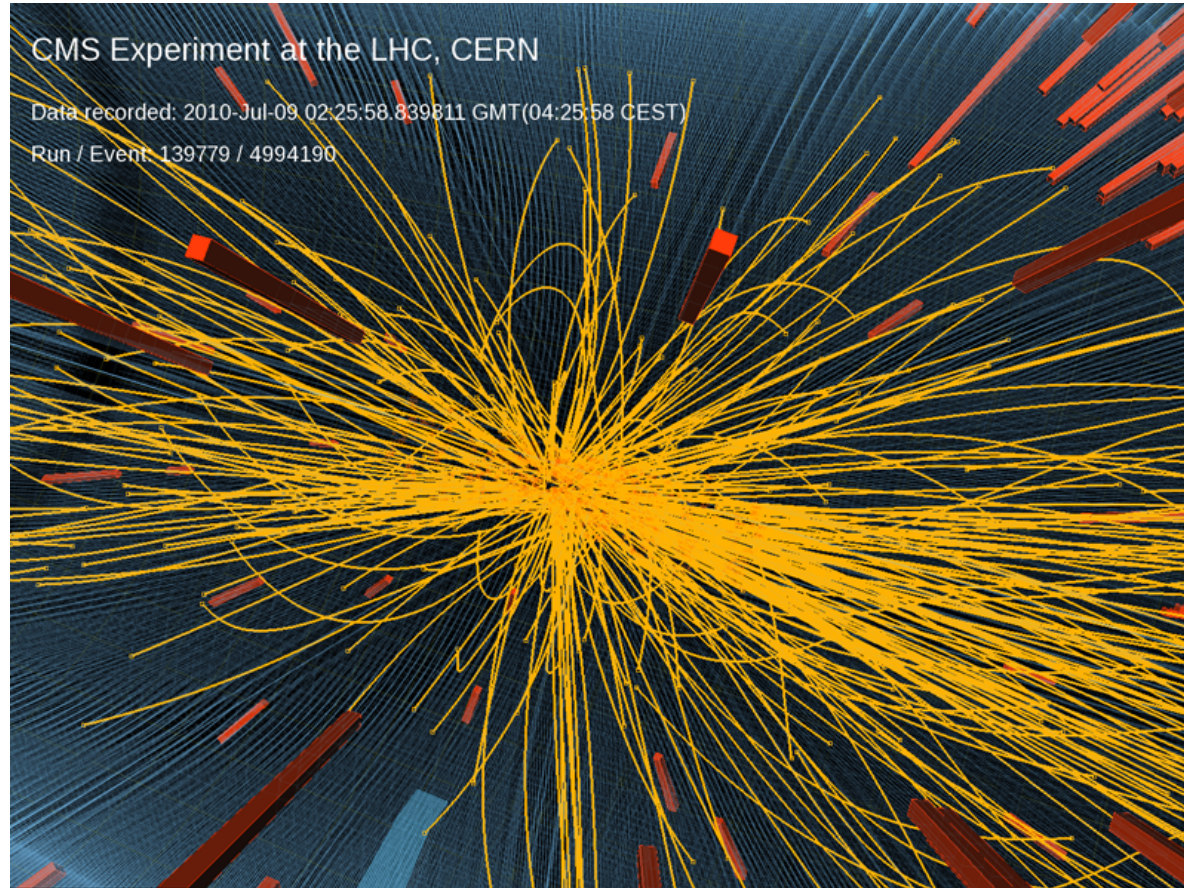


# Detektoren: Auge der Forschenden

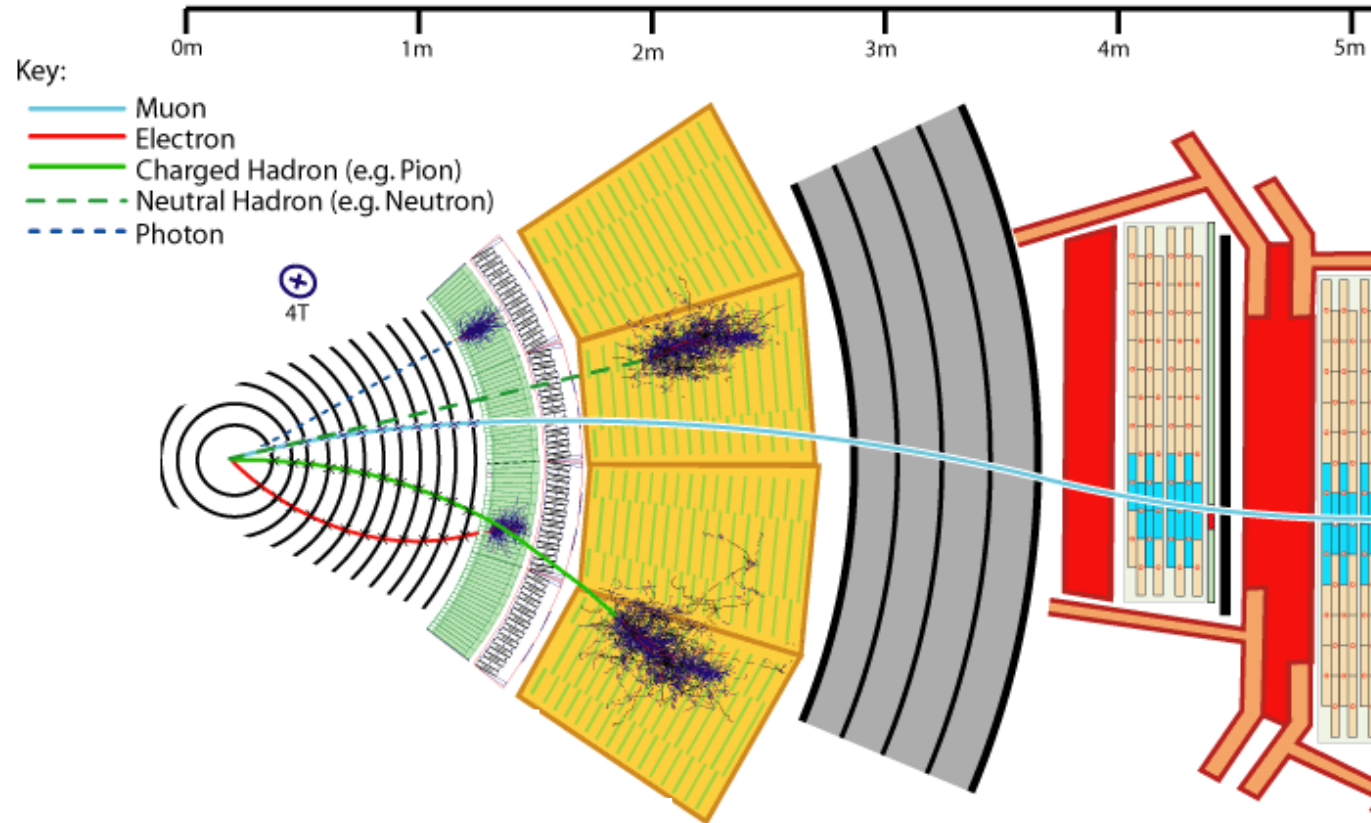




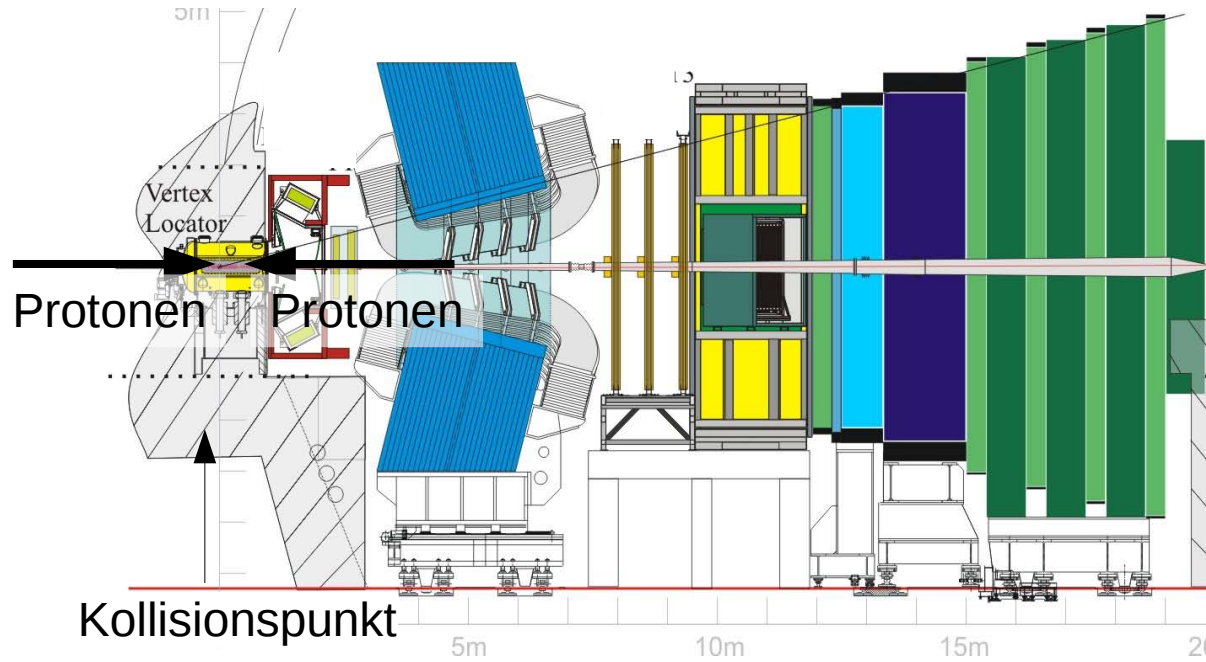
# Typisches Ereignis



# Prinzip eines Detektors

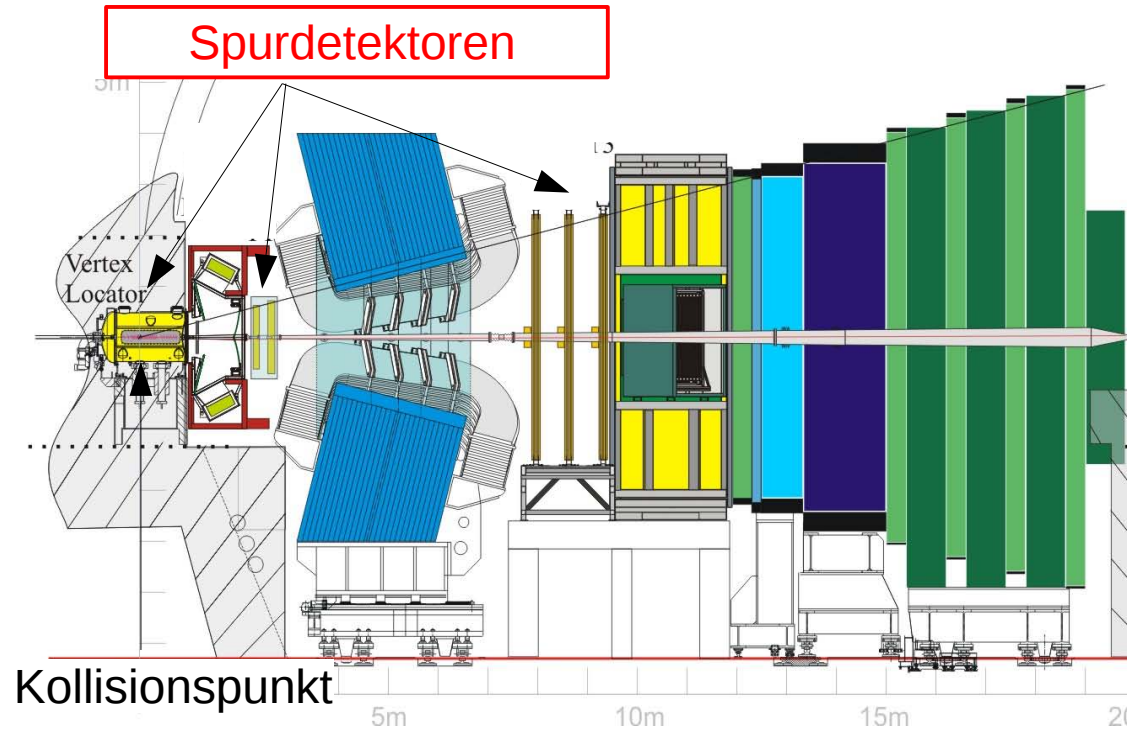


# LHCb Experiment





# LHCb Experiment

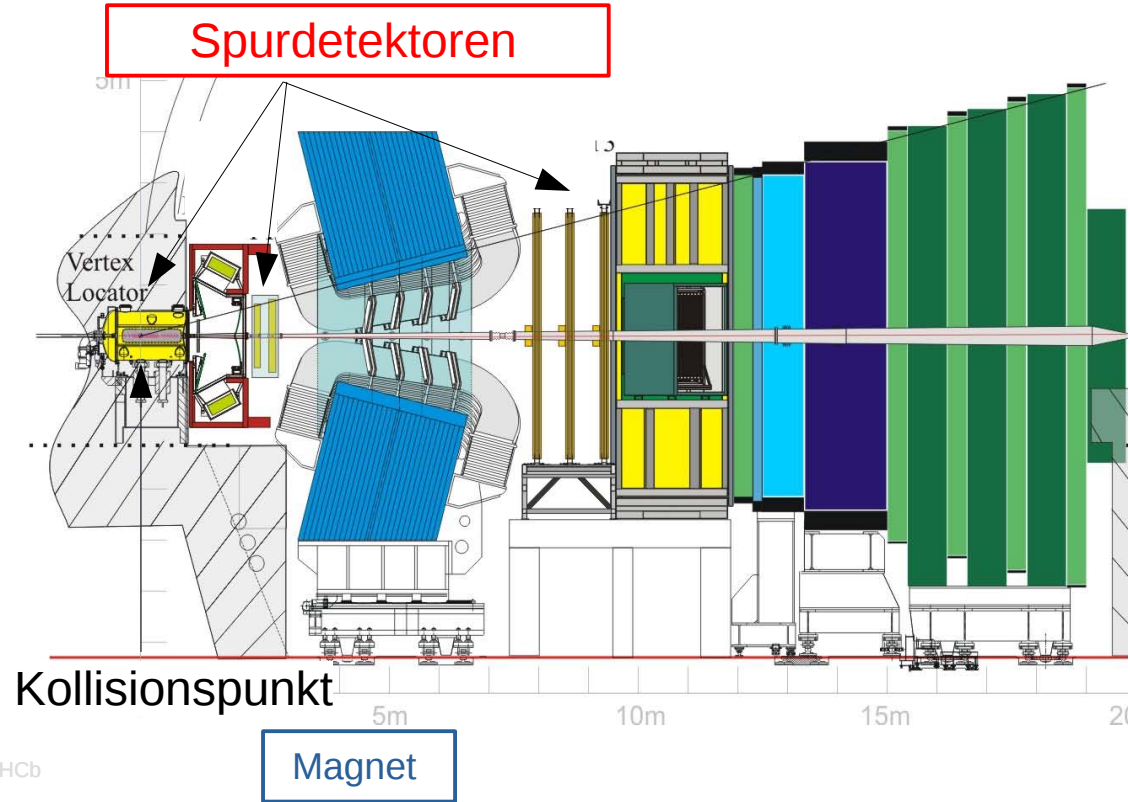


Spurkammern

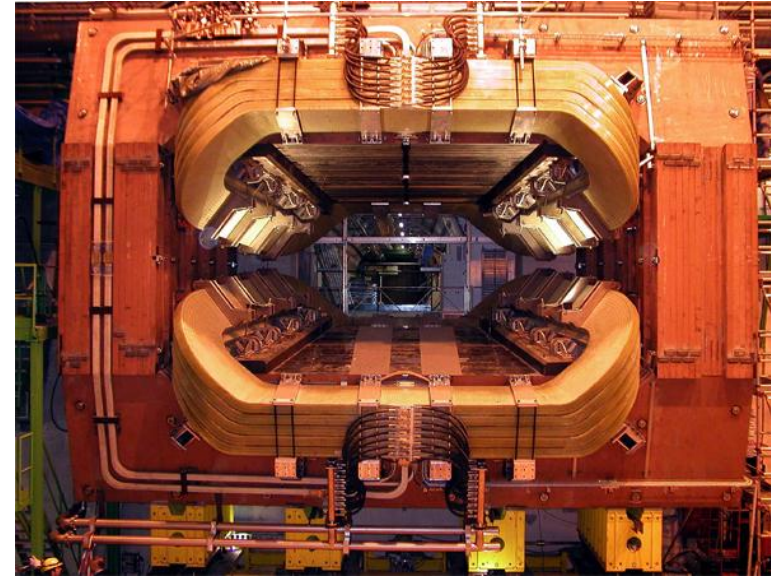




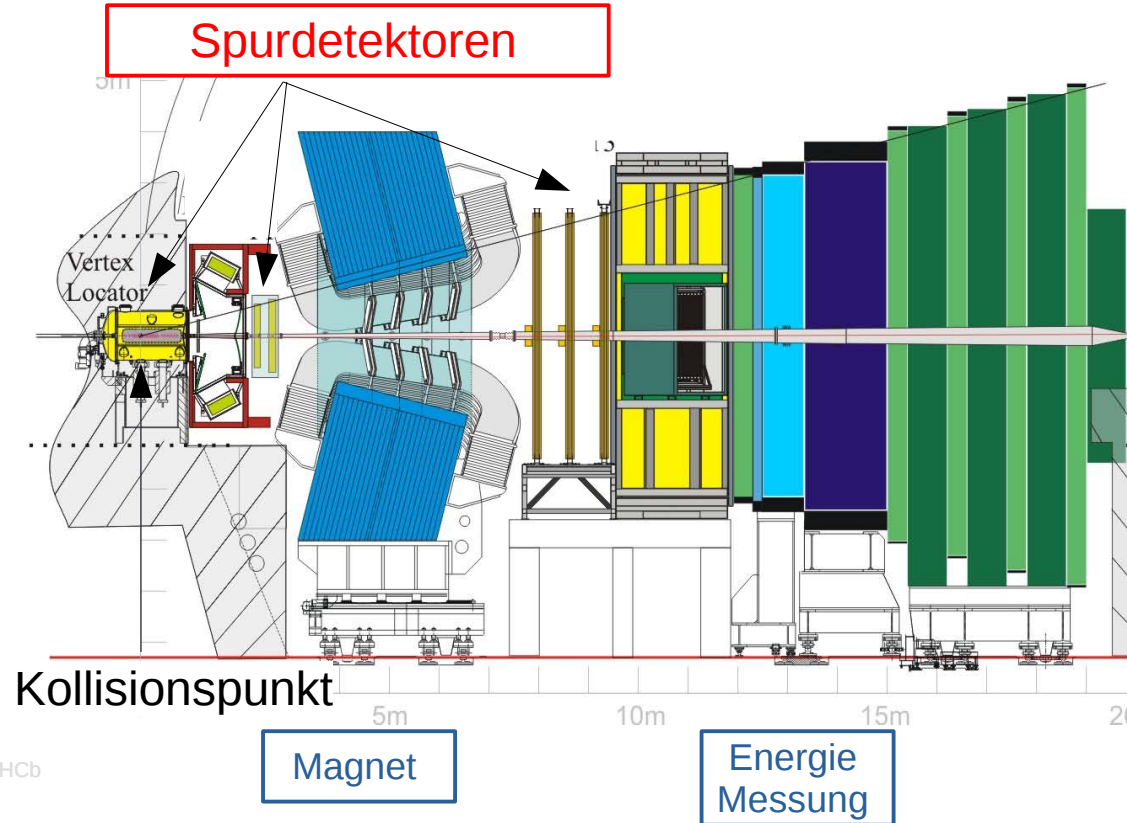
# LHCb Experiment



Magnet



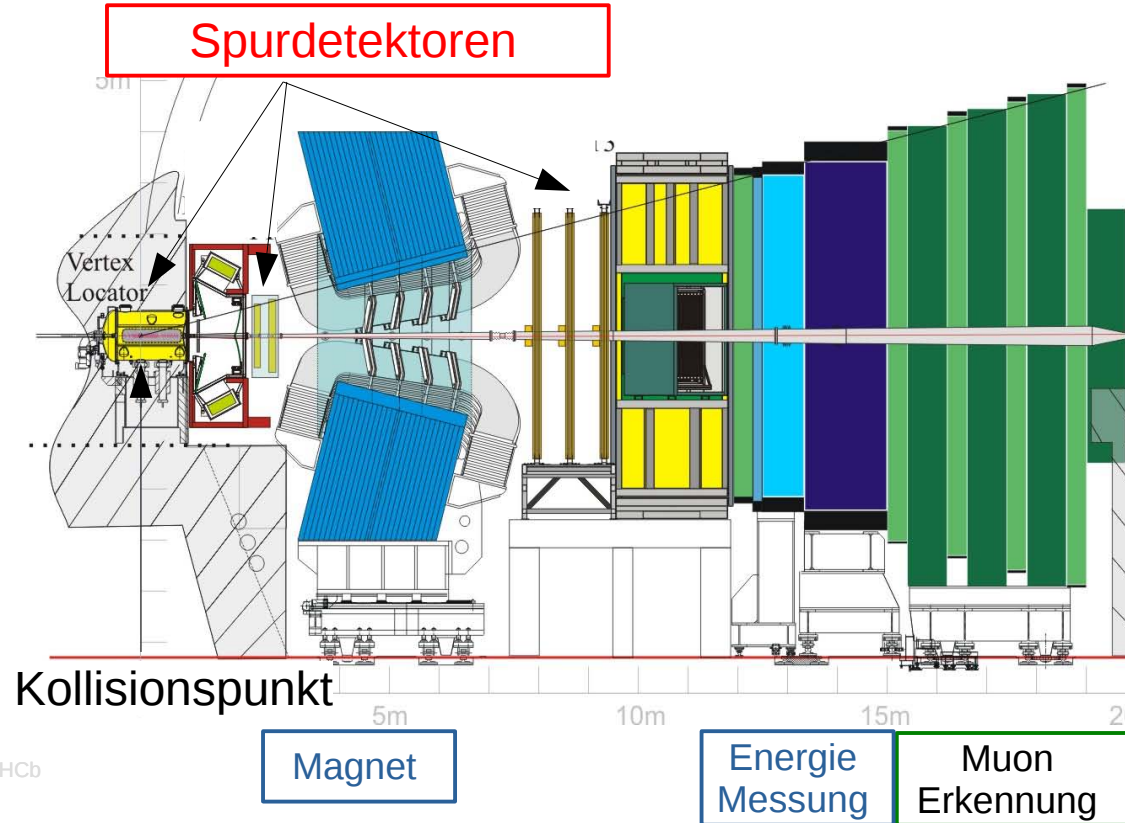
# LHCb Experiment



Energie (Kalorimeter)  
Bleiplatten und Szintillatoren



# LHCb Experiment

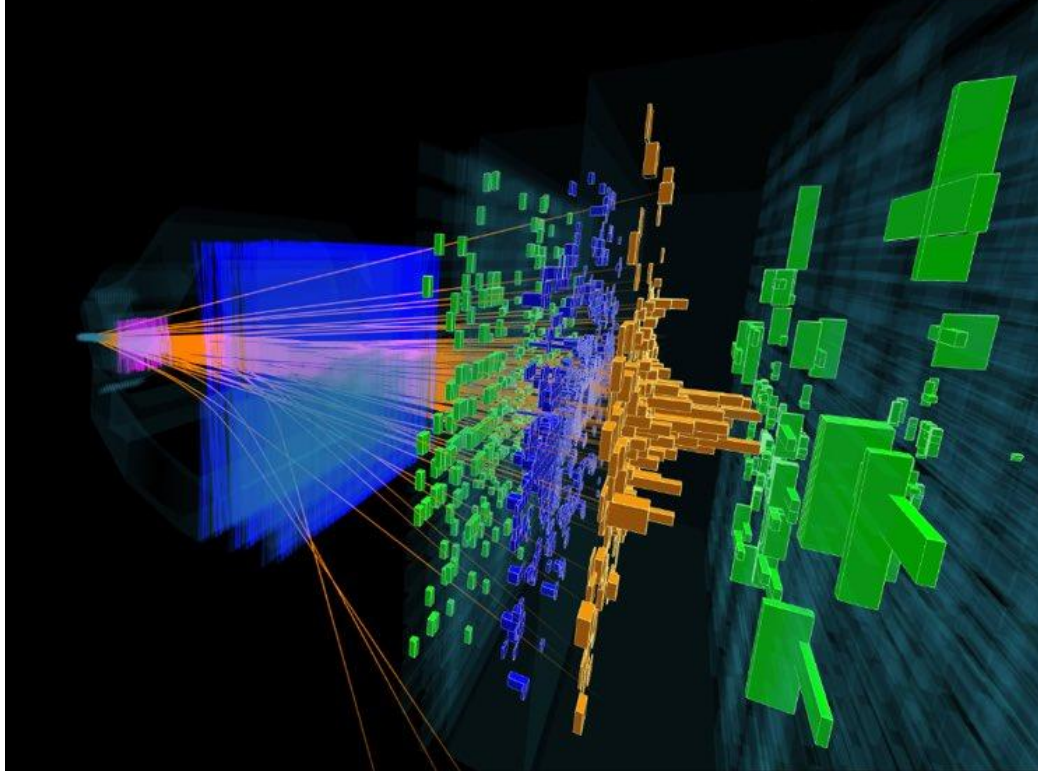


Muonenkammern





# LHCb Experiment



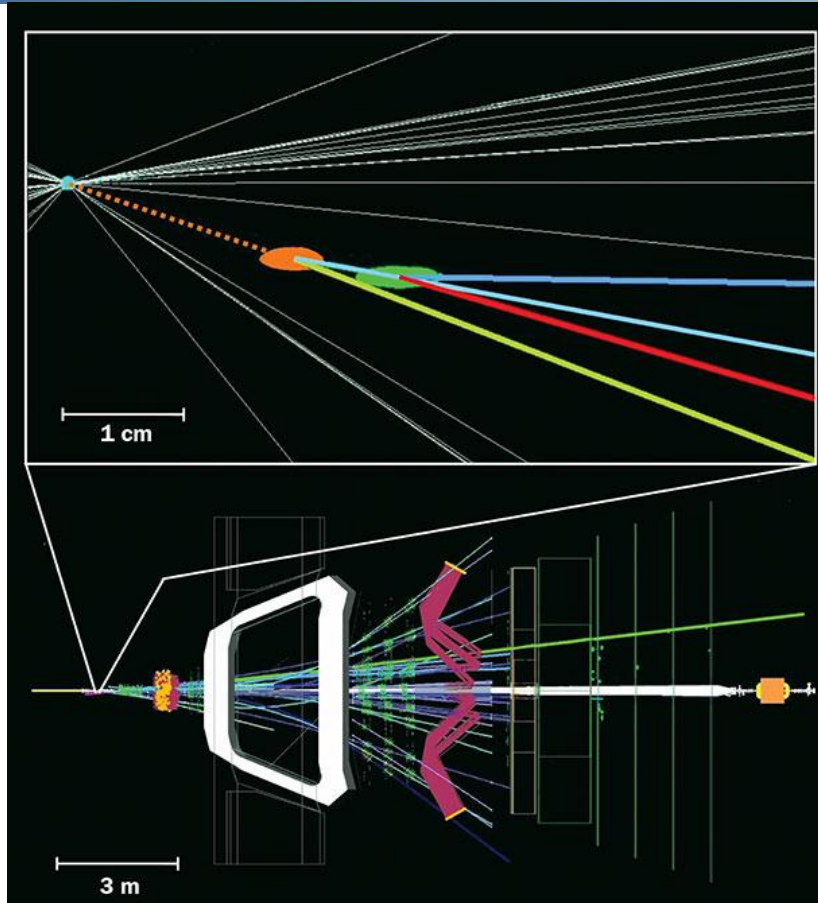
LHCb

1350 Mitglieder aus 17 Ländern  
Aus der Schweiz: EPFL und Uni Zürich

Gewicht	5'600 Tonnen
Höhe/Breite	10 Meter
Länge	21 Meter
Kollisionen	40 Millionen/s
gespeichert	12500 Ereignisse/s
	0.6 GB/s



# LHCb Experiment

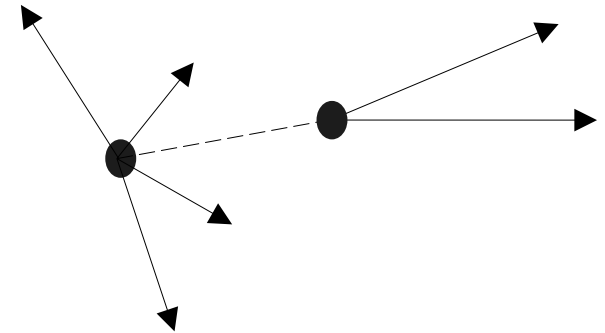


LHCb

Spezialisiert auf Messungen mit beauty-Quarks

Beauty-Quarks sind schwer:  
1000 mal schwerer als up oder down  
4 mal schwerer als Protonen

Beauty-Quarks zerfallen sehr schnell  
→ Teilchen mit Beauty-Quarks fliegen  
ein paar Millimeter



# Vertex-Detektor



Bild:CERN

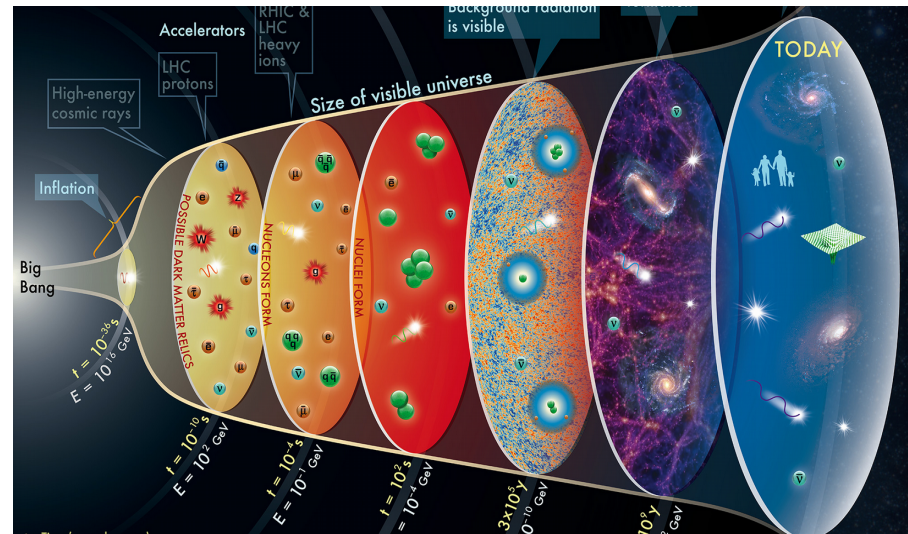
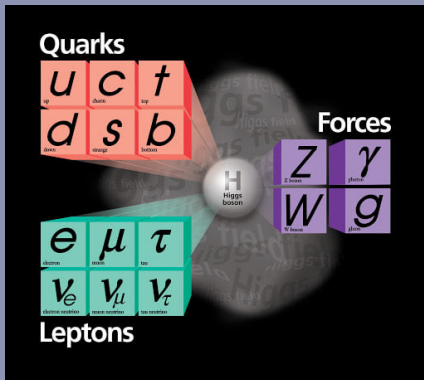
Siliziumdetektoren:

- präzise Vermessung des Kollisionspunktes  $< 50 \mu\text{m}$
- Rekonstruktion von Teilchenspuren
  
- 21 Lagen um den Kollisionspunkt
- Streifendetektoren
- 170'000 Auslesekanäle
- 8.2 mm vom Strahl entfernt

- Die Fundamente der Materie  
Grundbausteine und Kräfte
- Der grösste Beschleuniger  
Large Hadron Collider am CERN
- Das Auge der Forschenden  
LHCb Experiment
- Auf den Spuren einer neuen Kraft

# Probleme des Standardmodells

- Gravitation
- Antimaterie  
Teilchen und sein Antiteilchen können sich vernichten:  
 $E = mc^2$



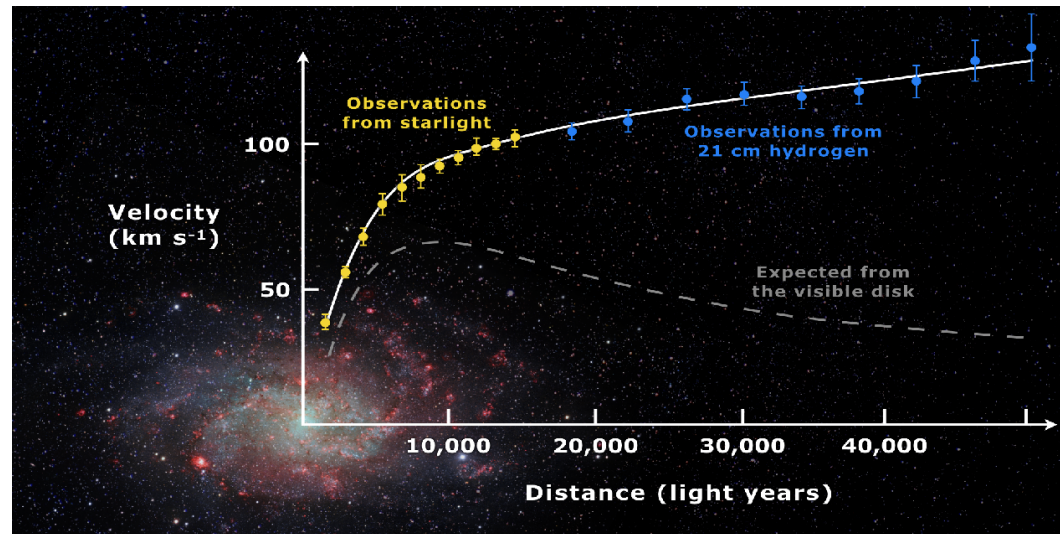
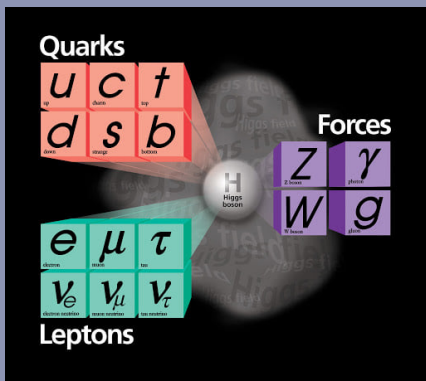
Particle Data Group/ CERN

## Urknall:

- aus Energie entstand Materie und Antimaterie
- Sekunden später verschwand die ganze Antimaterie  
1 Materieteilchen auf 1 Milliarde Antiteilchen blieb übrig

# Probleme des Standardmodells

- Gravitation
- Antimaterie
- Dunkle Materie  
kosmologische Beobachtungen



<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=74398525>

Rotationskurven von Spiralgalaxien (Bild: Messier33)  
→ zu wenig sichtbare (leuchtende) Masse

Hypothese: dunkle Materie  
Vermutung: es gibt etwa 5.5 Mal mehr dunkle Materie

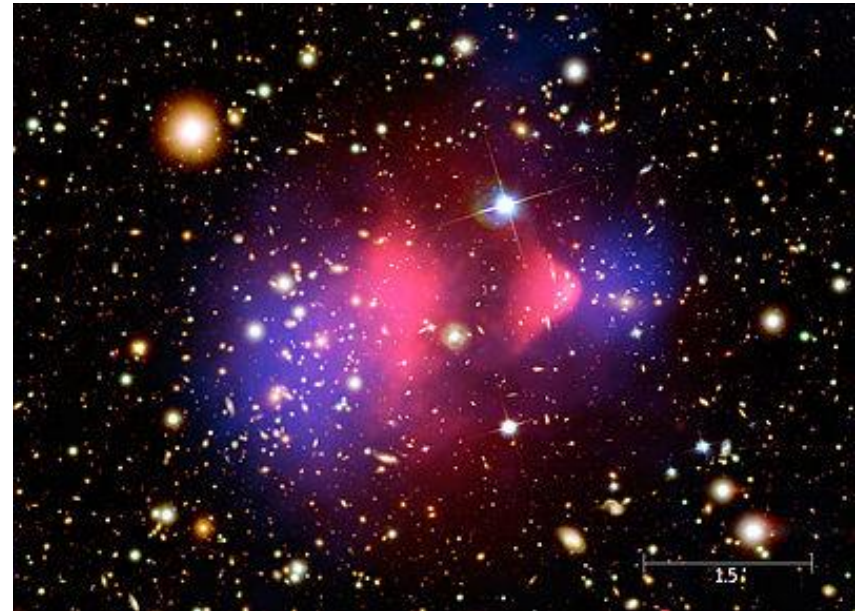


# Probleme des Standardmodells

- Gravitation
  - Antimaterie
  - Dunkle Materie
- kosmologische Beobachtungen:  
Bewegung von Sternen in Galaxien  
Gravitationslinsen  
Bildung von Galaxien und Clustern,  
Entwicklung des Universums
- ...

→ das Standardmodell ist unvollständig

Suche nach neuen Teilchen und/oder  
neuen Kräften



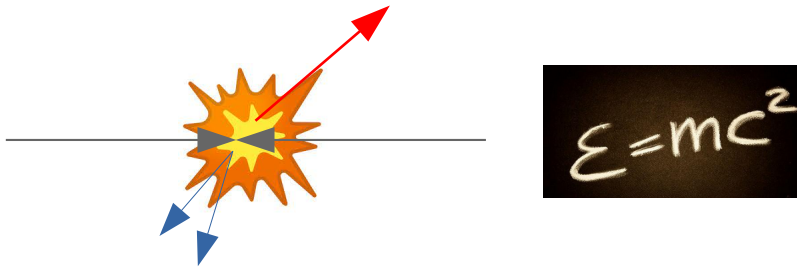
NASA/CXC/M. Weiss - Chandra X-Ray Observatory: 1E 0657-56

Bullet Cluster: Kollision von zwei Galaxien  
rot: heisses Gas (Hubble Teleskop)  
blau: rekonstruierte Massenverteilung

# Suche nach neuer Physik

## Direkte Suche

Nach neuen Teilchen, die bei der Kollision entstehen



Beschränkt durch die verfügbare Energie

## Indirekte Suche

Abweichungen von Messungen und theoretischen Vorhersagen



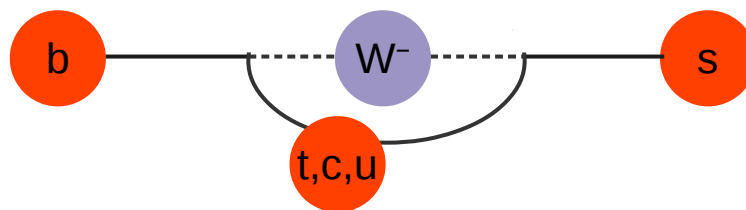
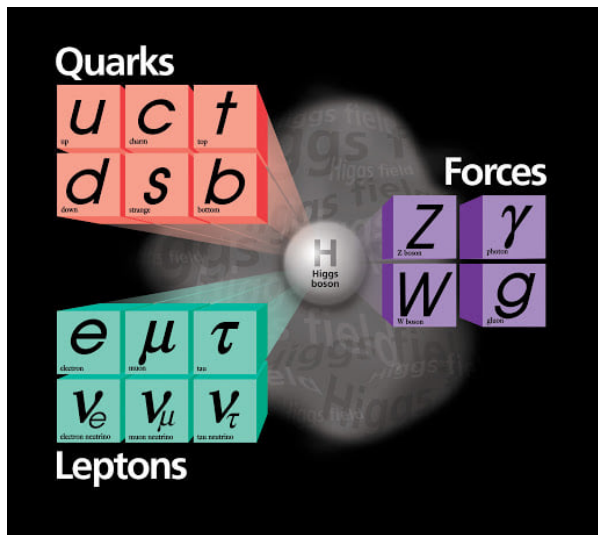
Sensitivität für sehr massive Teilchen  
→ Präzisionsmessungen an seltenen Zerfällen

Heisenbergsche Unschärferelation

$$\Delta E \cdot \Delta t > h/(4\pi)$$

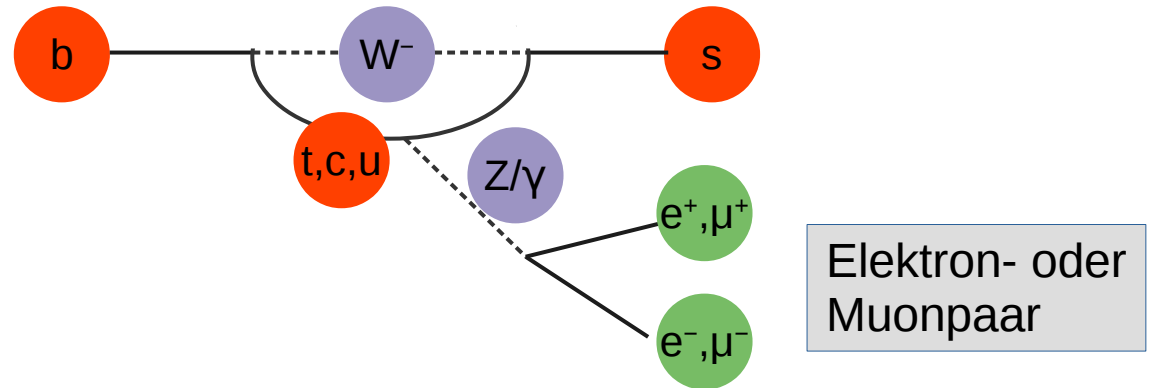
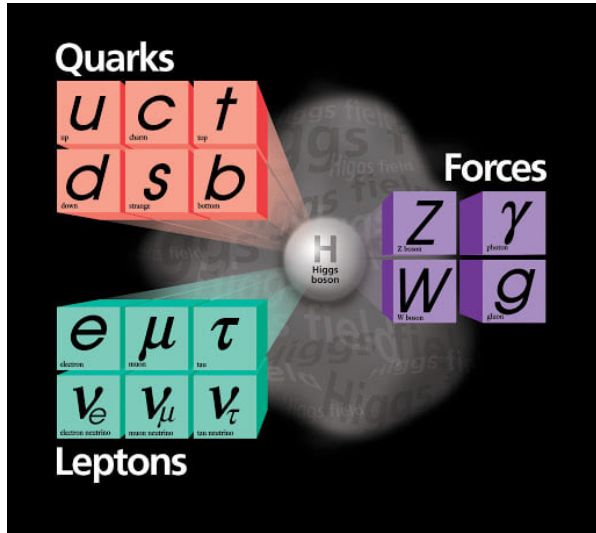
$$h = 6.6 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

# Zerfall von Beauty-Quarks



Zerfall von einem Beauty-Quark in ein Strange-Quark

# Zerfall von beauty-Quarks

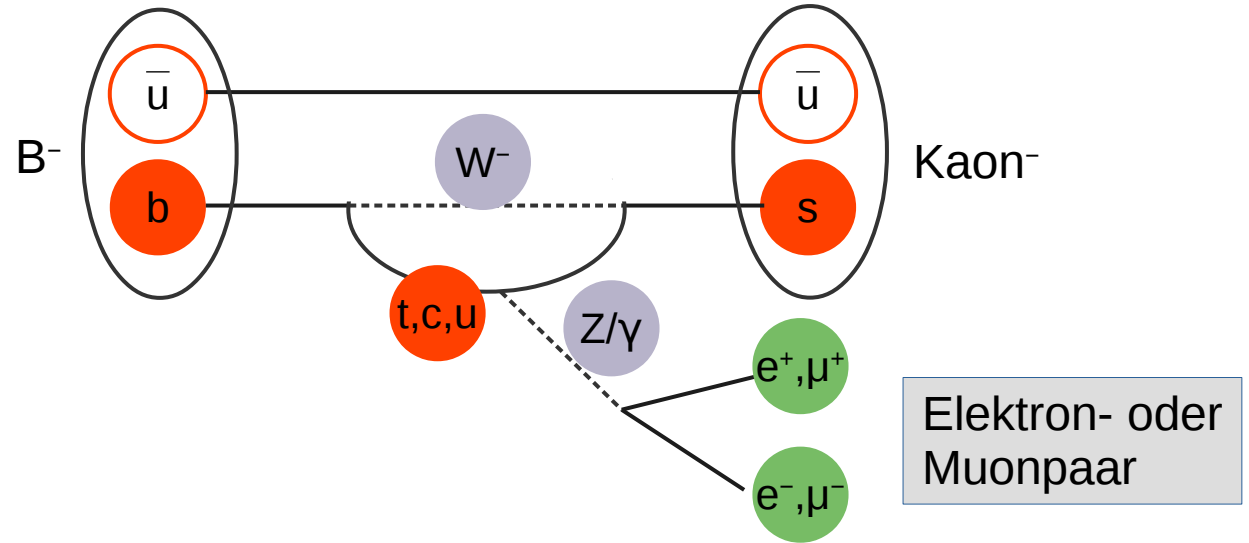
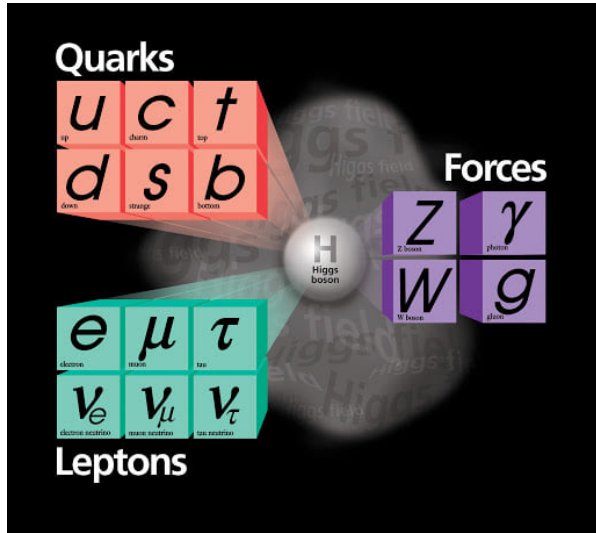


Elektron- oder Muonpaar

Sehr seltener Zerfall von einem Beauty-Quark in ein Strange-Quark und ein Elektron- oder Muonpaar  
1/1'000'000 von allen Zerfällen mit beauty-Quarks!



# Zerfall von beauty-Quarks



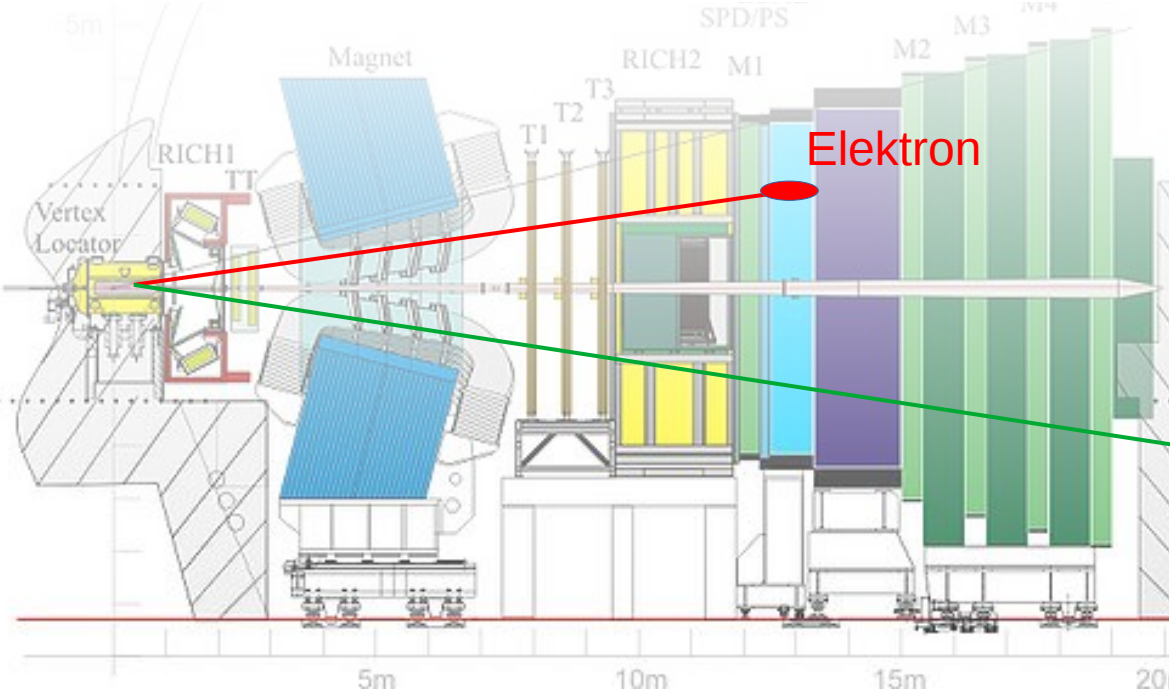
Messung:  
Wie häufig zerfällt ein  $B^-$  Meson ein Kaon  
und ein Elektron- oder Muonpaar

$$r_K = \frac{(B^- \rightarrow K^- \mu^+ \mu^-)}{(B^- \rightarrow K^- e^+ e^-)}$$

Vorhersage: kein Unterschied zwischen Elektronen und Muonen

# Messung von Elektronen und Muonen

Elektronen sind 200 mal leichter als Muonen

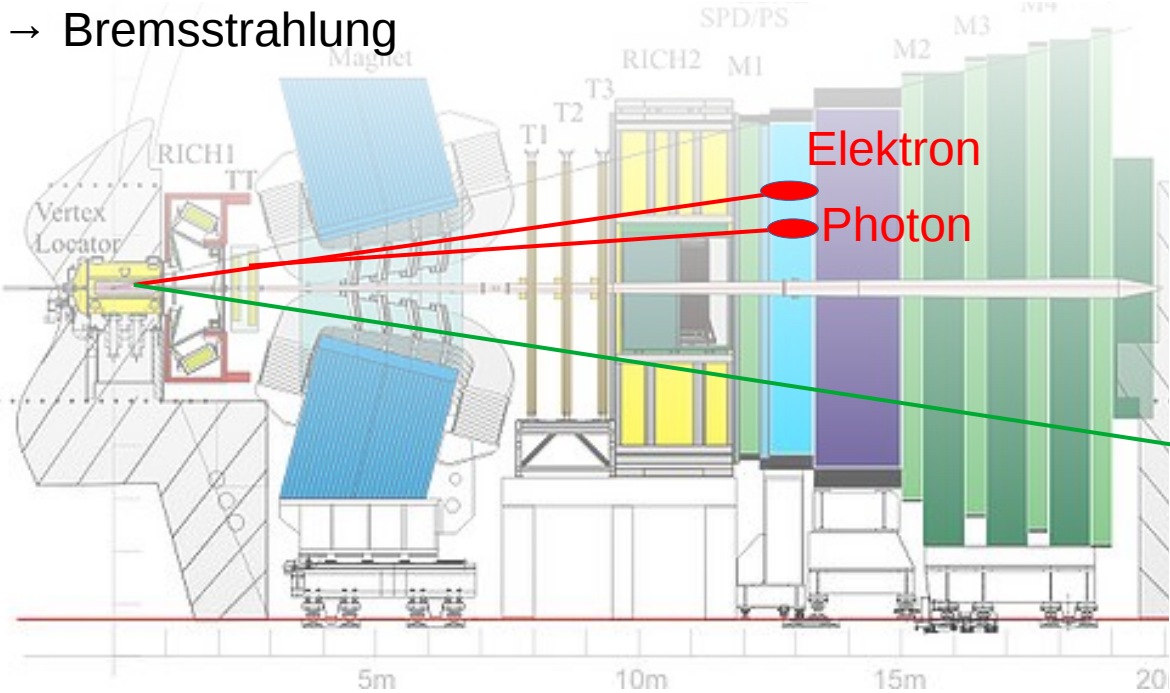


$$r_K = \frac{(B^- \rightarrow K^- \mu^+ \mu^-)}{(B^- \rightarrow K^- e^+ e^-)}$$

Muon

# Messung von Elektronen und Muonen

Elektronen sind 200 mal leichter als Muonen  
 → Bremsstrahlung



$$r_K = \frac{(B^- \rightarrow K^- \mu^+ \mu^-)}{(B^- \rightarrow K^- e^+ e^-)}$$

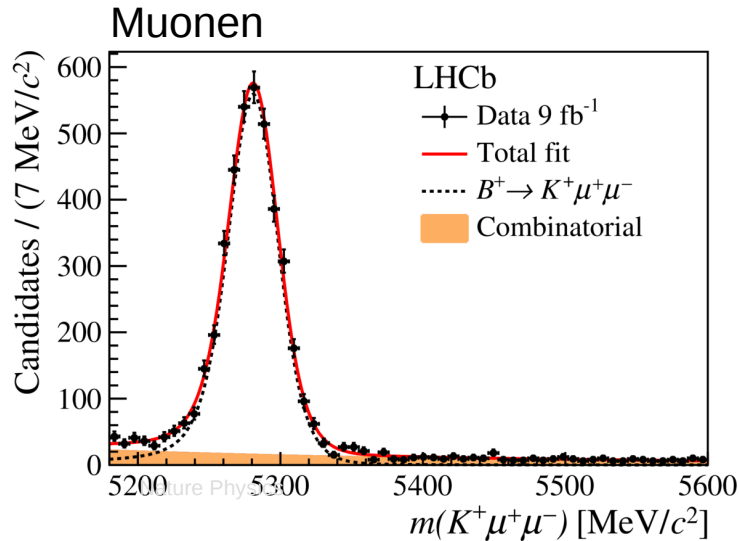
$$r_K = \frac{\text{Anz.}(B^- \rightarrow K^- \mu^+ \mu^-) \epsilon(e)}{\text{Anz.}(B^- \rightarrow K^- e^+ e^-) \epsilon(\mu)}$$

Nachweiswahrscheinlichkeit

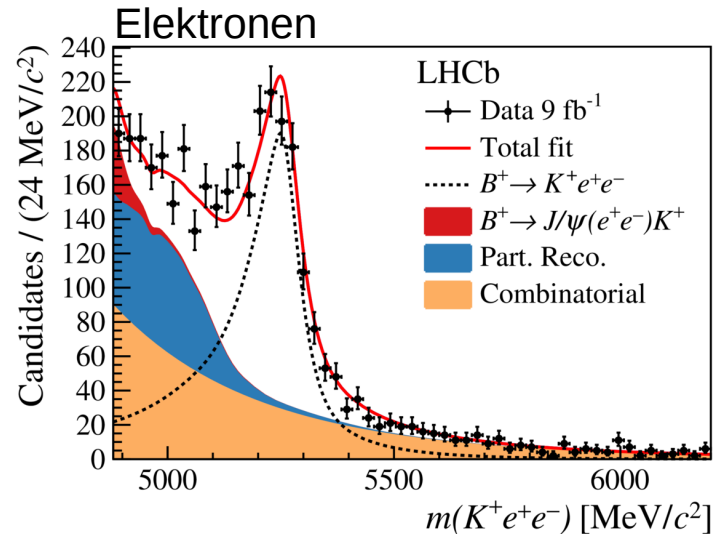
Muon

# Elektronen und Muonen

$$r_K = \frac{\text{Anz.}(B^- \rightarrow K^- \mu^+ \mu^-) \epsilon(e)}{\text{Anz.}(B^- \rightarrow K^- e^+ e^-) \epsilon(\mu)}$$



klares, schmales Signal  
 wenig Untergrund



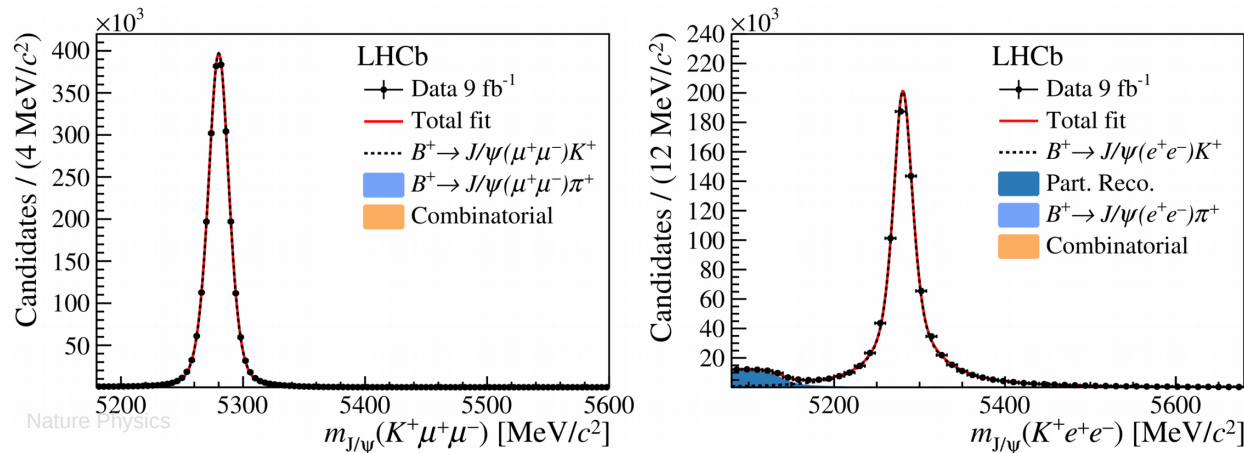
Signal verbreitert  
 schlechtere Auflösung  
 schlechtere Nachweiswahrscheinlichkeit  
 mehr Untergrund



# Kontrolle: Elektronen und Muonen

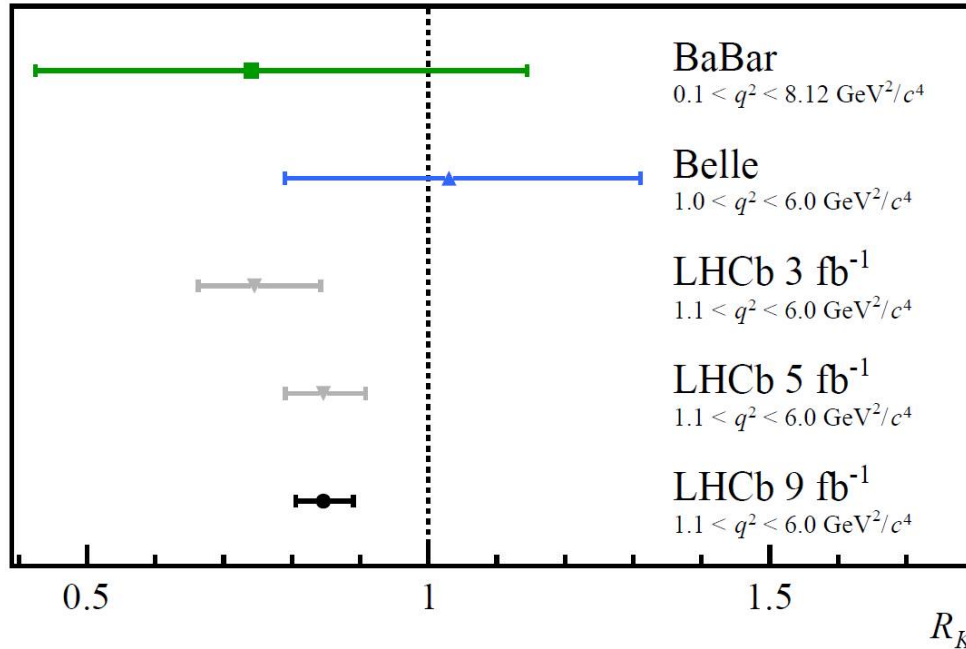
Nachweiswahrscheinlichkeiten und Untergrund für Muonen und Elektronen sehr unterschiedlich  
→ grosse experimentelle Unsicherheiten

Überprüfung mit bekanntem Zerfall  $B \rightarrow K J/\psi(\rightarrow ee), B \rightarrow K J/\psi(\rightarrow \mu\mu)$



$J/\psi$  Verhältnis Muonen/Elektronen  $1.0000 \pm 0.0004$   
LHCb Messung:  $0.98 \pm 0.02$

# Zerfall in Muon/Elektron = 0.85



$$R(K) = 0.846 \pm 0.042$$

Statistischer Fehler: 0.040

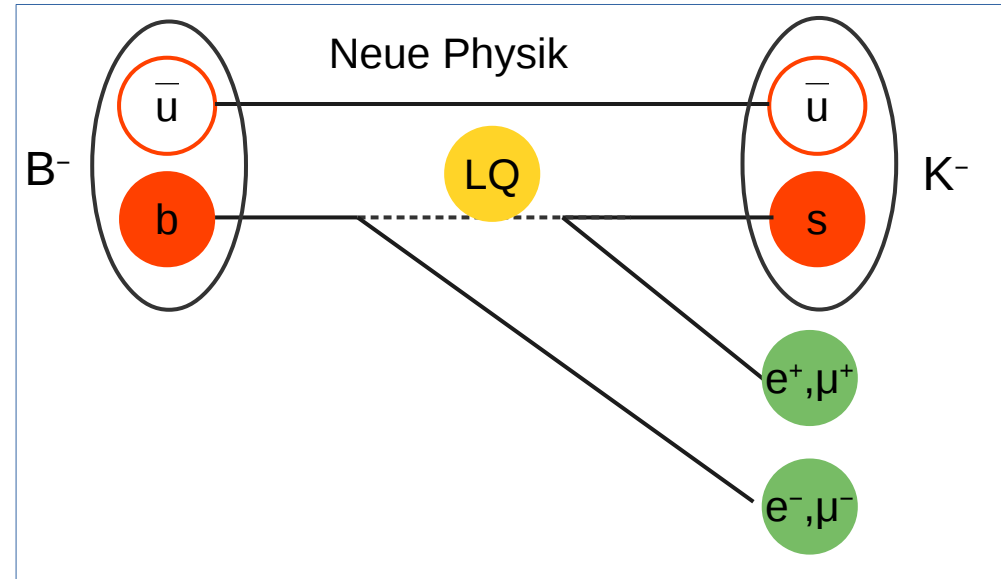
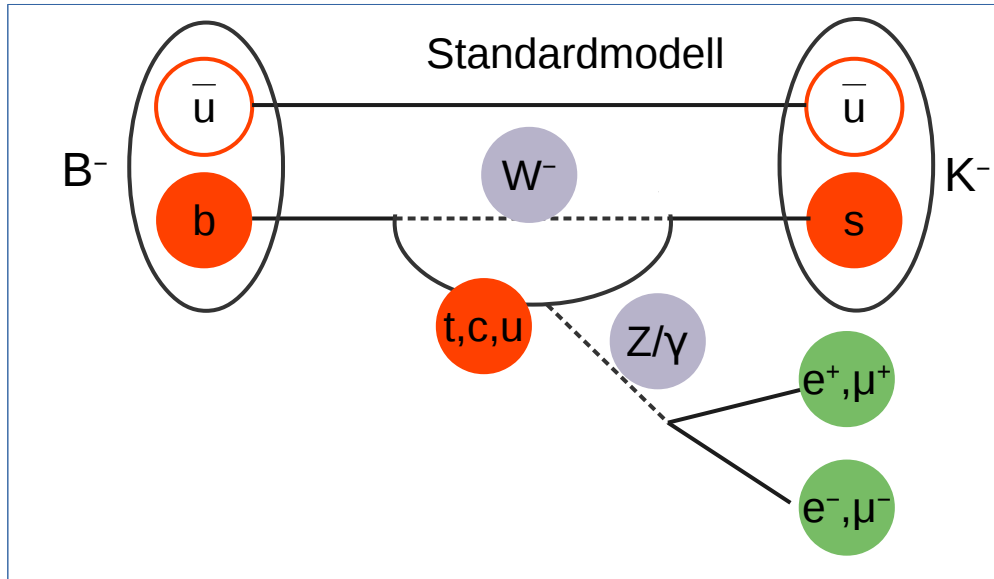
Systematischer Fehler: 0.012

Abweichung von Erwartung:  $3.1 \sigma$

Nature Physics

Wahrscheinlichkeit von 0.1% für eine zufällige statistische Fluktuation  
Gold Standard in Teilchenphysik:  $5 \sigma$  (0,00003%)

# Zerfall in Muon/Elektron = 0.85

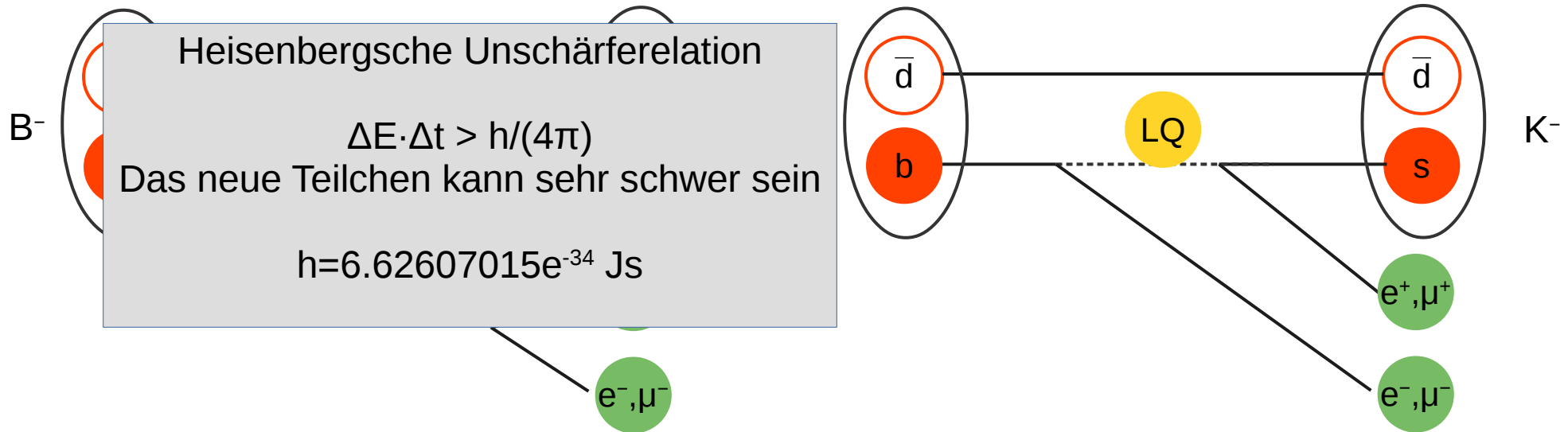


Zerfall in ein Muon ist weniger häufig als in ein Elektron

Hypothese: Effekt von einem neuen schweren Teilchen und / oder einer neuen Kraft

Es braucht mehr Daten, verschiedene Zerfallskanäle, andere Experimente

# Zerfall in Muon/Elektron = 0.85



Zerfall in ein Muon ist weniger häufig als in ein Elektron

Hypothese: Effekt von einem neuen schweren Teilchen und / oder einer neuen Kraft

Es braucht mehr Daten, verschiedene Zerfallskanäle, andere Experimente

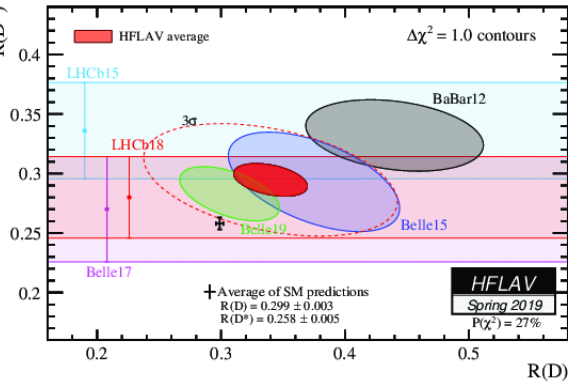


# Konsistentes Bild

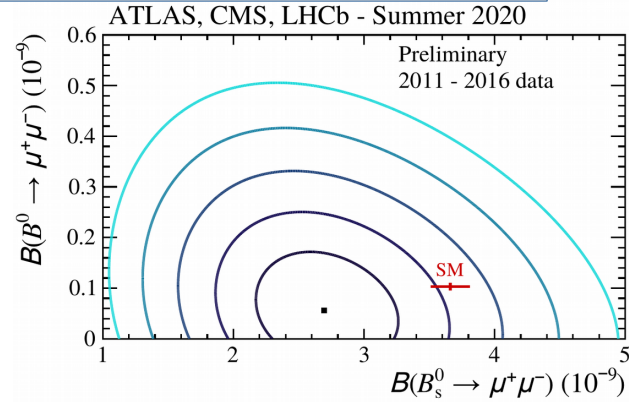
→ Defizit von Muonen, Winkelverteilung anders als erwartet

$$R(D^{(*)}) = \frac{BR(B \rightarrow D^{(*)} \tau \bar{\nu}_\tau)}{BR(B \rightarrow D^{(*)} \mu \bar{\nu}_\mu)}$$

HFLAV

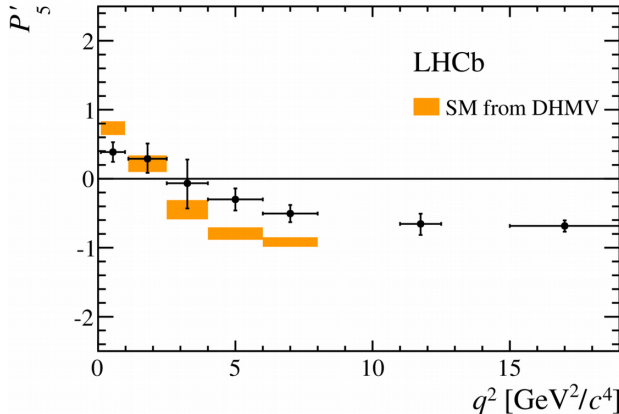


$B_s^0 \rightarrow \mu\mu$   
 ATLAS-CONF  
 -2020-049

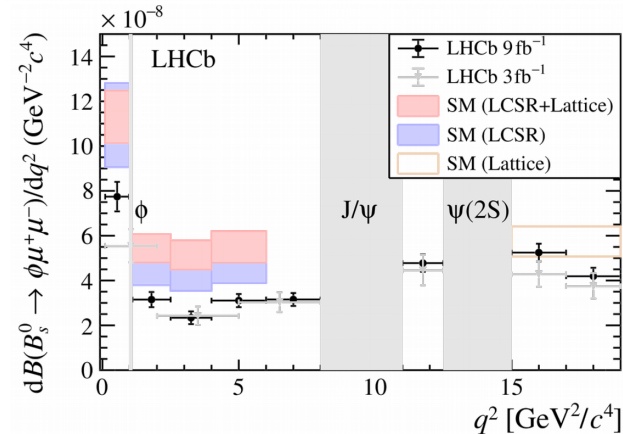


$B^0 \rightarrow K^0 \mu\mu$

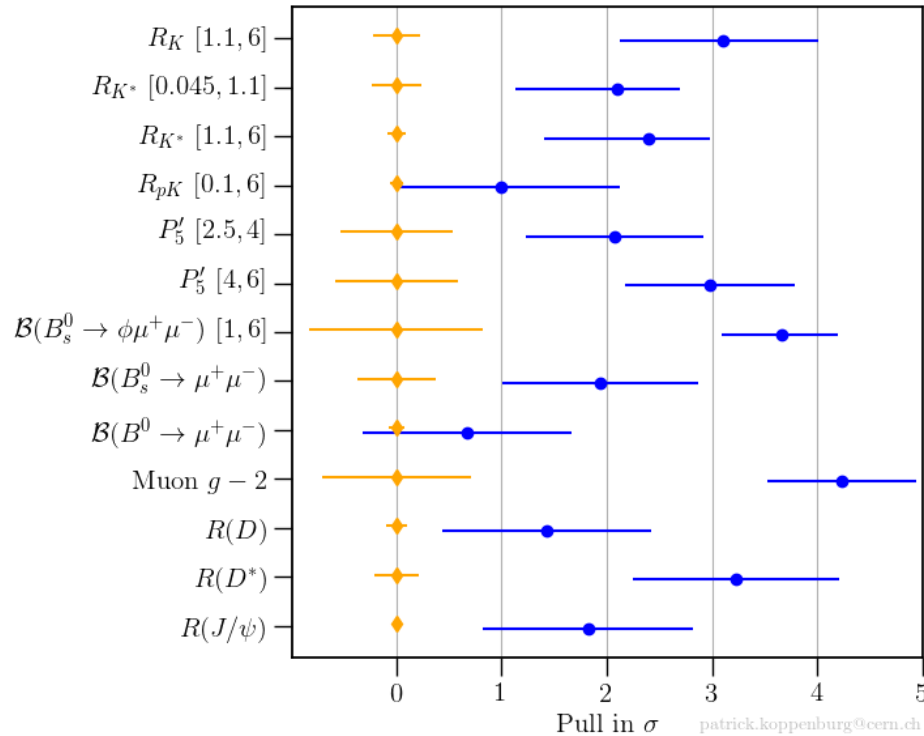
PHYS. REV. LETT  
 125 (2020) 011802



$B_s \rightarrow \Phi \mu\mu$   
 arXiv:2105.14007



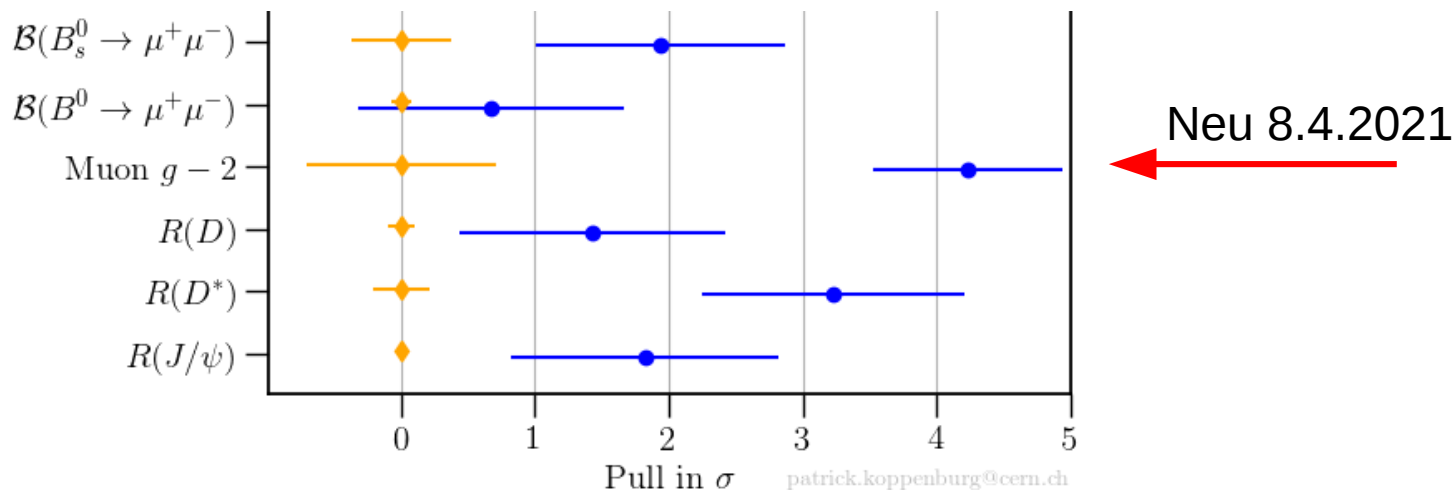
# Abweichungen konsistent



Neu 8.4.2021

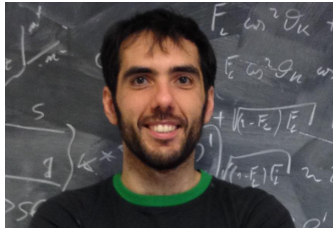
# Vor zwei Wochen bekam das Standardmodell der Teilchenphysik nasse Füße. Jetzt steht ihm das Wasser bis zum Hals

Am Fermilab bei Chicago haben Physiker das magnetische Moment des Myons mit bisher unerreichter Präzision vermessen. Das Ergebnis erhärtet den Verdacht, dass es im Mikrokosmos bisher unbekannte Teilchen oder Kräfte geben könnte.



# We are cautiously excited!

**Prof. Nicola Serra**

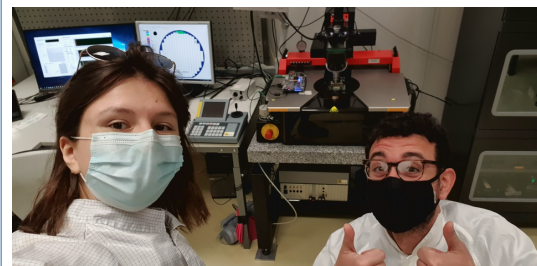


It was an honor to be part of the LHCb team who made the measurement of  $R_{K^*}$ , comparing electrons and muons in decays of beauty mesons. The measurement is very exciting and in agreement with a pattern of anomalies we are observing in LHCb.

**Prof. Gino Isidori**



What makes this result so exciting, is that it fits very well with other anomalies, in similar processes, reported since 2013. The picture is very coherent and signals us the existence of a new elementary interaction.



**Dario De Simone and Iaroslava Bezshyiko**

When you work well in a team, reality can be more adventurous than imagination!



**Martina Ferrillo**

What is truly invaluable for us: to doubt, to build and confute models, to contribute to expanding the frontiers of knowledge!



**Claudia Cornella**

I'm very thankful to my experimental colleagues at LHCb. Thanks to their hard work, we can finally say there is evidence of LFU Violation in  $B \rightarrow Kll$ ! I'm looking forward to keep investigating the origin of these anomalies.



**Dr. Rafael Silva Coutinho**

There are only a few times in a researcher career that you can actually be part of something that can completely revolutionise your field. This is it. The endeavour to understand whether this set of anomalies are true or not on itself is fascinating.



Fragen?

