

# Die Bausteine des Universums

Masterclass Teilchenphysik — Carl-von-Ossietzky-Gymnasium Hamburg

Arne Dräger, Matthias Schröder

29. Mai 2013



NETZWERK  
TEILCHENWELT

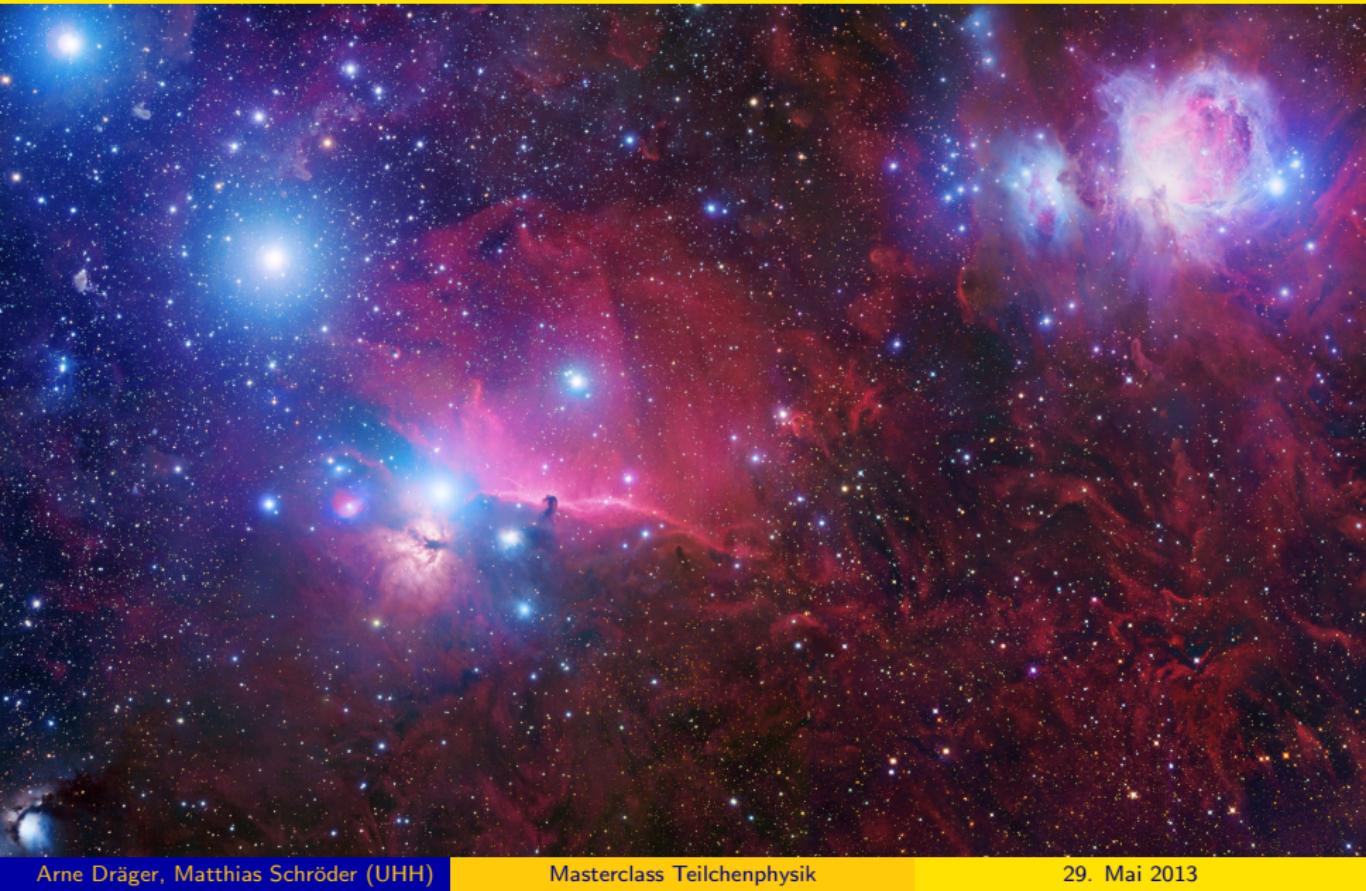




# FRAGEN

Teilchenphysik  
stellt  
**FRAGEN**

# Fragen der Teilchenphysik



# Fragen der Teilchenphysik

Woraus besteht das Universum? Woraus bestehen wir?  
Grundbausteine der Materie



# Fragen der Teilchenphysik

Woraus besteht das Universum? Woraus bestehen wir?

Grundbausteine der Materie

Wie funktioniert das Universum?

Wechselwirkungen



+



=



# Fragen der Teilchenphysik

Woraus besteht das Universum? Woraus bestehen wir?

Grundbausteine der Materie

Wie funktioniert das Universum?

Wechselwirkungen

Wie ist das Universum entstanden?

Zeitliche Entwicklung

# Fragen der Teilchenphysik

Woraus besteht das Universum? Woraus bestehen wir?

Grundbausteine der Materie

Wie funktioniert das Universum?

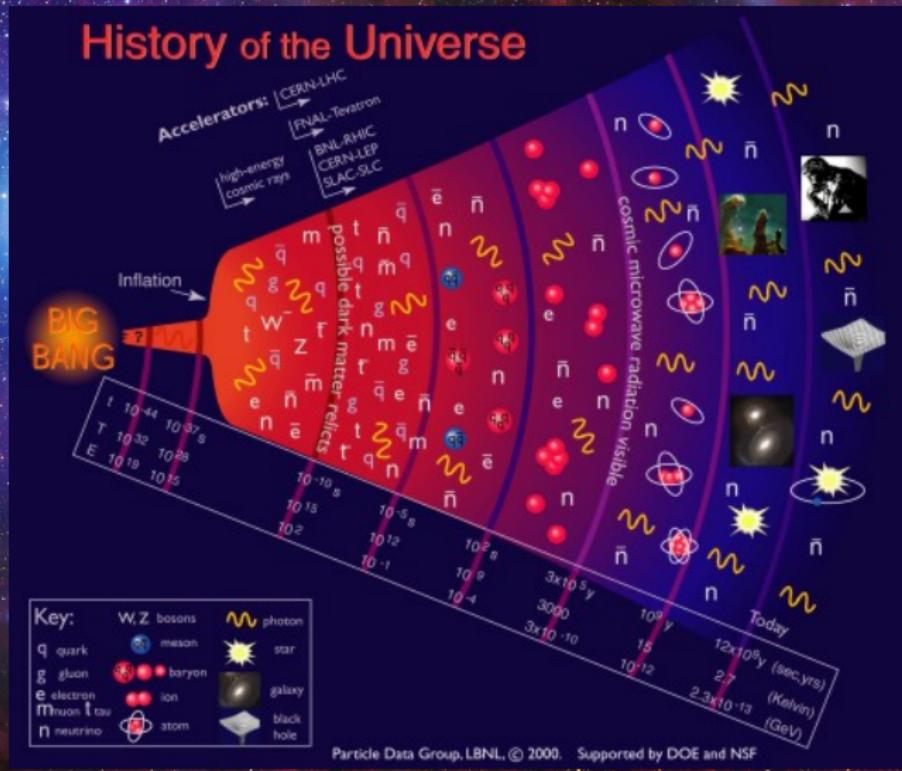
Wechselwirkungen

Wie ist das Universum entstanden?

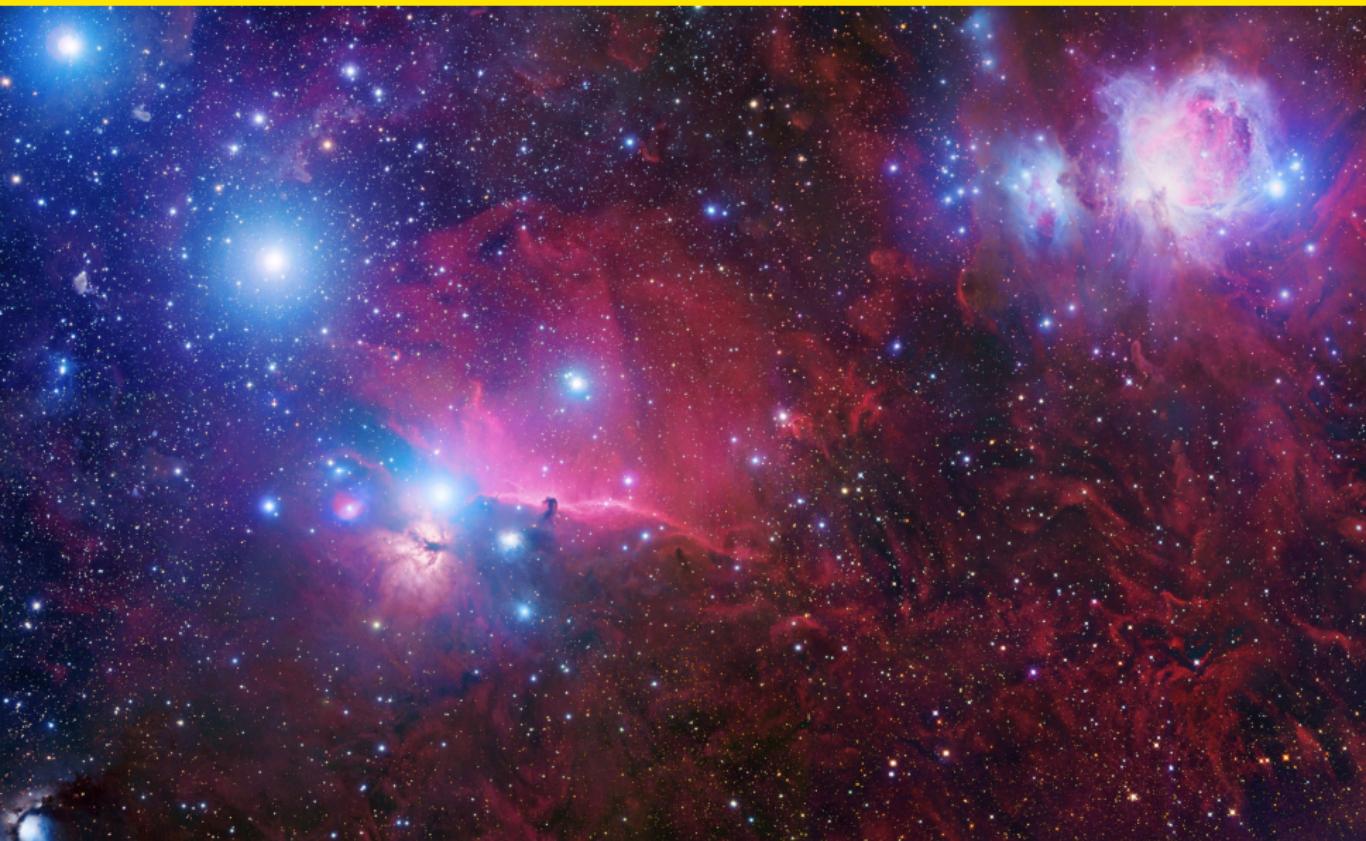
Zeitliche Entwicklung

Was sind die fundamentalen Bausteine  
und Kräfte im Universum?

# Unser Bild vom Universum



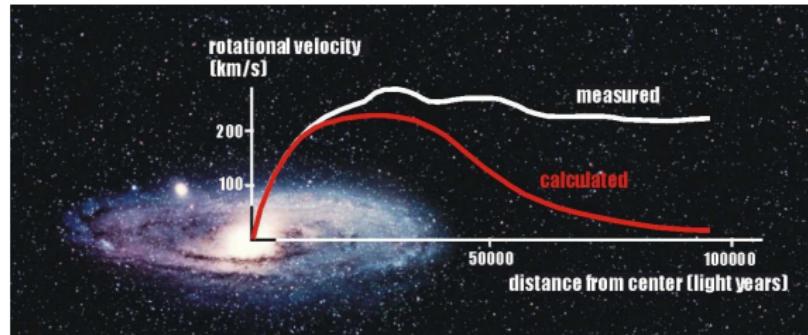
# Unser Bild vom Universum



# Unser Bild vom Universum

## Rotation von Galaxien

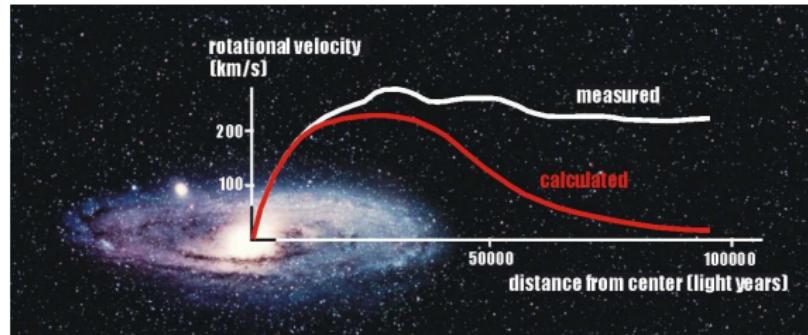
- Zu wenig sichtbare Materie



# Unser Bild vom Universum

## Rotation von Galaxien

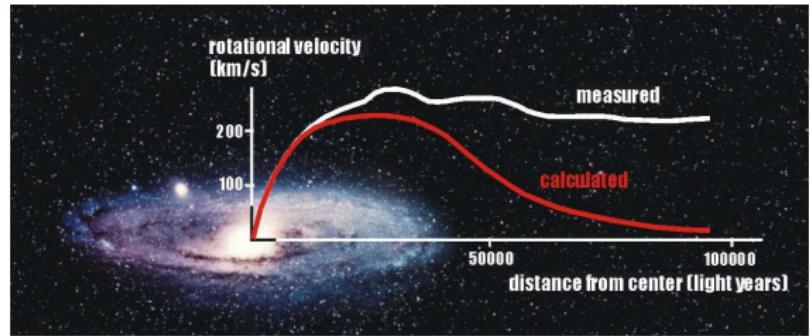
- Zu wenig sichtbare Materie
- Dunkle Materie



# Unser Bild vom Universum

## Rotation von Galaxien

- Zu wenig sichtbare Materie
- Dunkle Materie



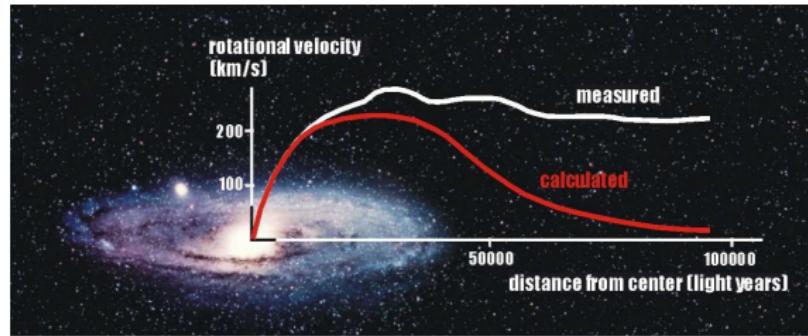
## Expansion des Universums



# Unser Bild vom Universum

## Rotation von Galaxien

- Zu wenig sichtbare Materie
- Dunkle Materie



## Expansion des Universums

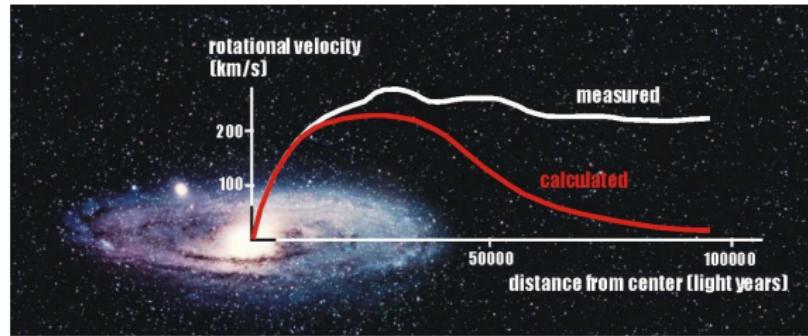
- Beschleunigte Expansion



# Unser Bild vom Universum

## Rotation von Galaxien

- Zu wenig sichtbare Materie
- Dunkle Materie

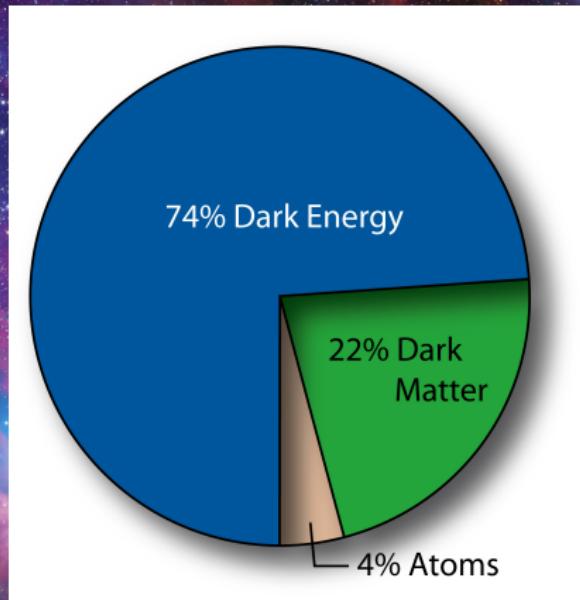


## Expansion des Universums

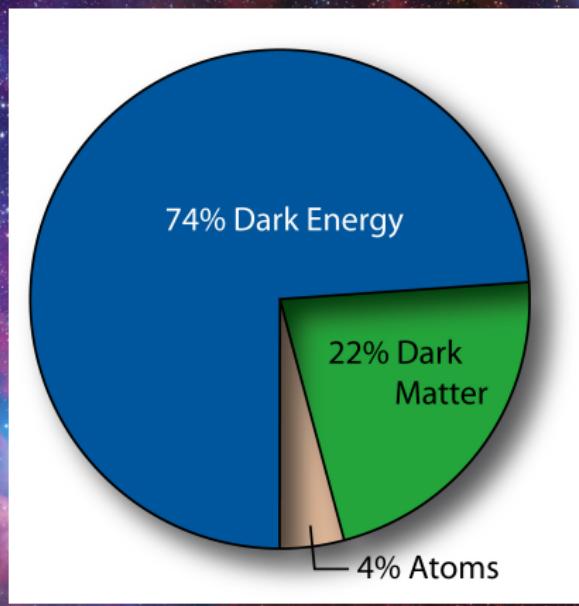
- Beschleunigte Expansion
- Dunkle Energie



# Unser Bild vom Universum



# Unser Bild vom Universum



LHC: Wir beginnen **jetzt**, die weiteren 96% zu erforschen!

# Übersicht

1

- Wie arbeiten Teilchenphysiker?
- Was wissen wir über Elementarteilchen?
- Was wissen wir **nicht** über Elementarteilchen?

Matthias

2

- Erforschung von Elementarteilchen
  - Wie kann man sie erzeugen?
  - Wie kann man sie sichtbar machen?

Arne

---

Mittagspause

---

3

- Selber forschen!
  - Wie kann man sie erzeugen?
  - Wie kann man sie sichtbar machen?

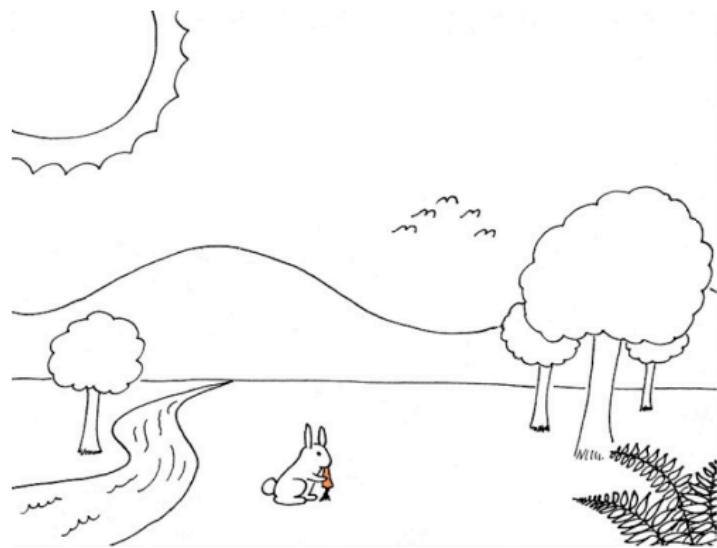
Alle zusammen

# Regeln

**FRAGEN stellen!**

# Wie erforscht man denn das Universum?

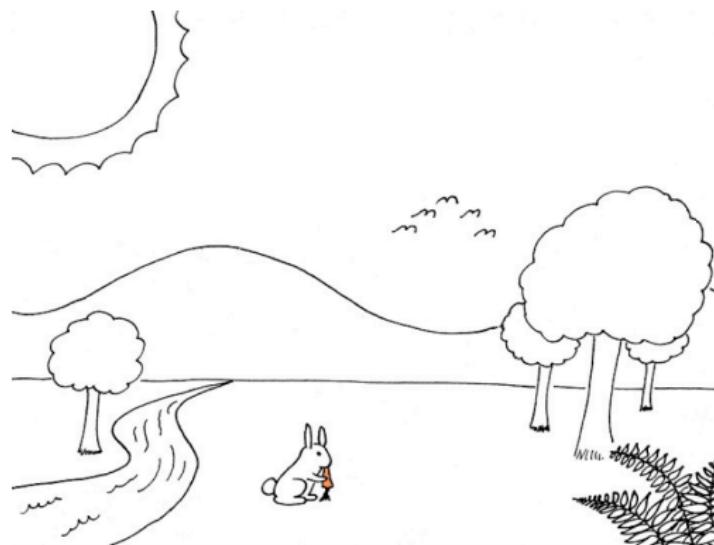
oder: Wie arbeiten Teilchenphysiker?



# Wie erforscht man denn das Universum?

oder: Wie arbeiten Teilchenphysiker?

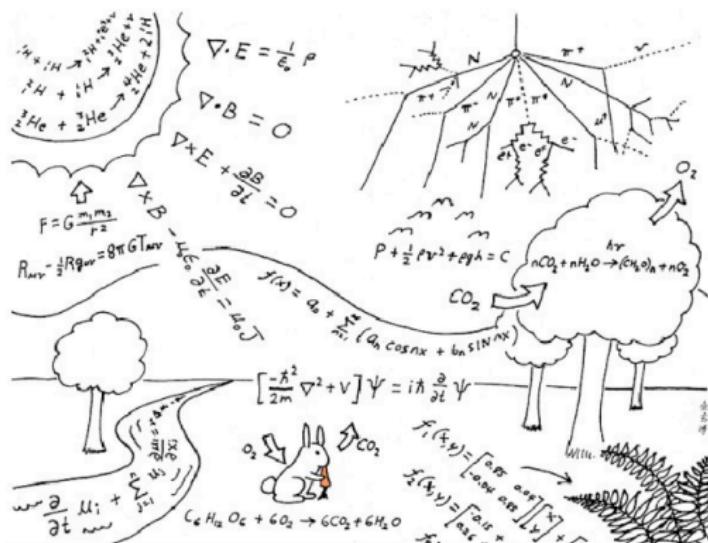
Theoretischer Physiker



Entwickelt Modelle

# Wie erforscht man denn das Universum?

oder: Wie arbeiten Teilchenphysiker?



Theoretischer Physiker

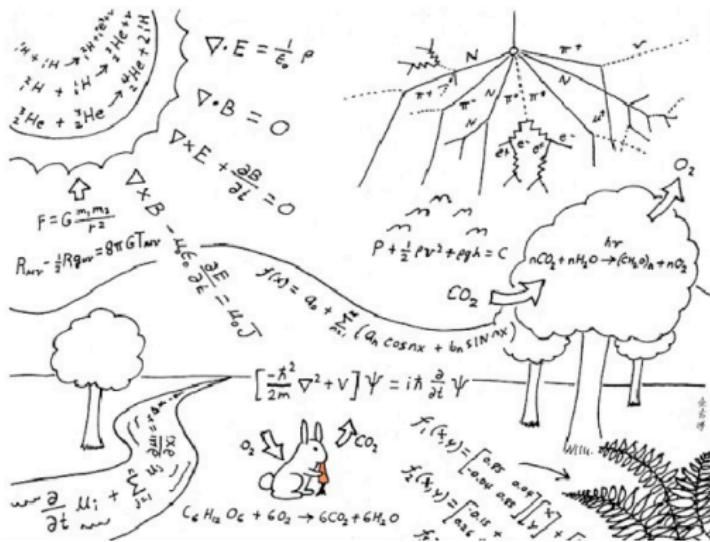


Entwickelt Modelle

- Mathemat. Formulierung
  - z.B. Standardmodell
- Wenige Grundannahmen
  - z.B. Energieerhaltung

# Wie erforscht man denn das Universum?

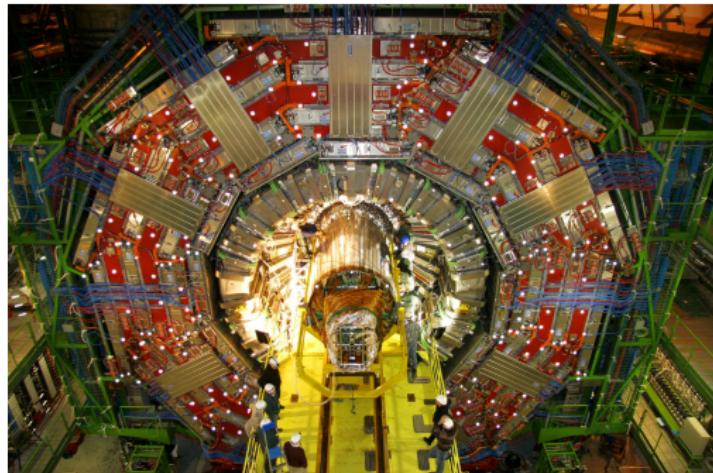
oder: Wie arbeiten Teilchenphysiker?



# Wie erforscht man denn das Universum?

oder: Wie arbeiten Teilchenphysiker?

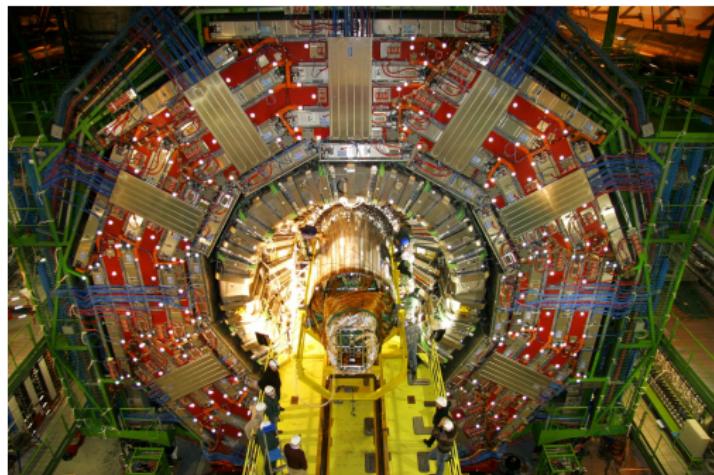
Experimentalphysiker



# Wie erforscht man denn das Universum?

oder: Wie arbeiten Teilchenphysiker?

Experimentalphysiker



- Überprüft Modelle
- Vervollständigt Modelle
  - Misst z.B. Teilchenmassen
- Sucht nach Unbekanntem
  - z.B. Dunkle Materie

# Experiment



Frage:

“Welcher geometrische Körper verbirgt sich in dem Knetball?”

# Wie groß sind Elementarteilchen?

=0,01 m  
Kristall  
Crystal



Materialphysik  $\approx$  1 cm

# Wie groß sind Elementarteilchen?

=0,01 m  
Kristall  
Crystal



Materialphysik  $\approx$  1 cm



Wir schauen genauer hin...

# Wie groß sind Elementarteilchen?

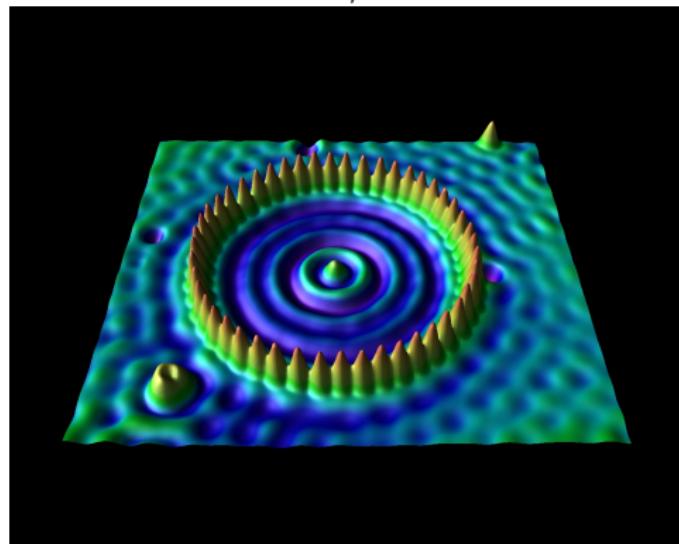
=0,01 m  
Kristall  
Crystal

1/10.000.000

$10^{-9}$  m  
Molekül  
Molecule

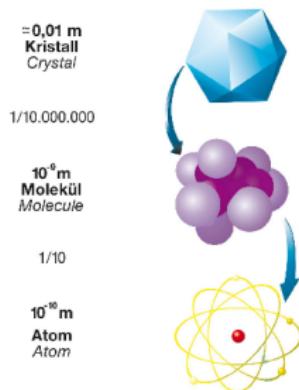


Moleküle  $\approx 10^{-9}$  m, Atome  $\approx 10^{-10}$  m

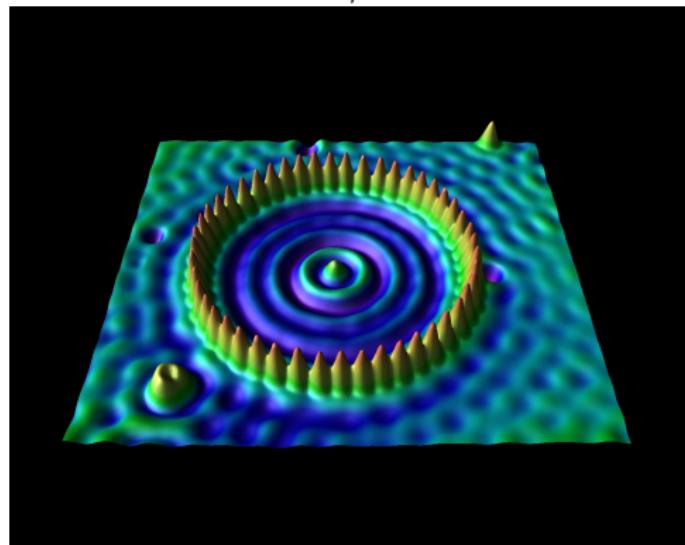


Atome sind Bausteine für alle makroskopischen Objekte

# Wie groß sind Elementarteilchen?

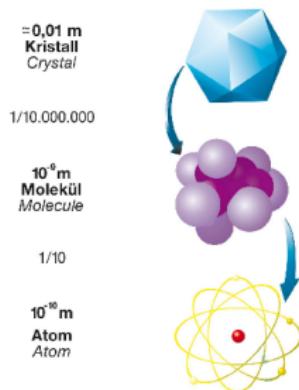


Moleküle  $\approx 10^{-9}$  m, Atome  $\approx 10^{-10}$  m



Atome sind Bausteine für alle makroskopischen Objekte

# Wie groß sind Elementarteilchen?

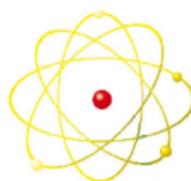


Wie groß sind  $10^{-10}\text{ m}$ ?



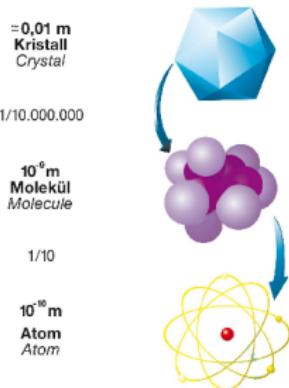
Kristall

⋮



Atom

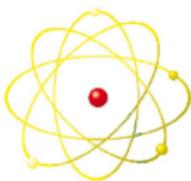
# Wie groß sind Elementarteilchen?



Wie groß sind  $10^{-10} \text{ m}$ ?



Kristall

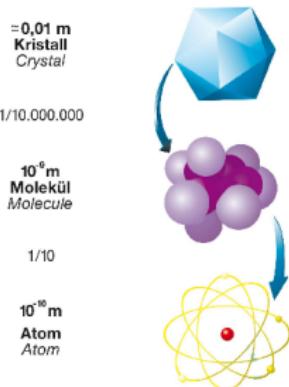


Atom



?

# Wie groß sind Elementarteilchen?



Wie groß sind  $10^{-10}$  m?

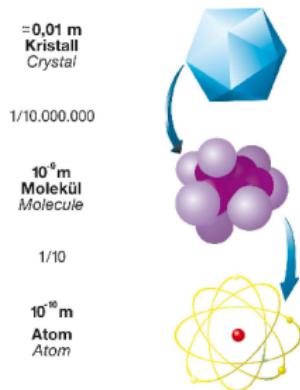


Kristall

Atom

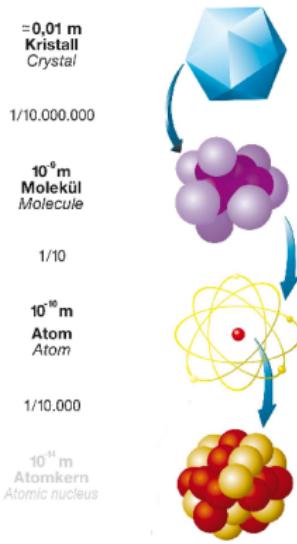


# Wie groß sind Elementarteilchen?



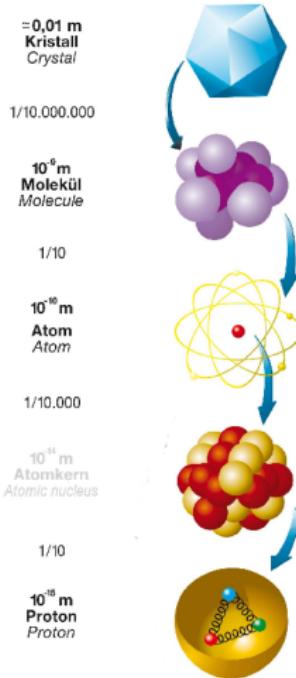
Wir schauen genauer hin...

# Wie groß sind Elementarteilchen?



Wir schauen genauer hin...

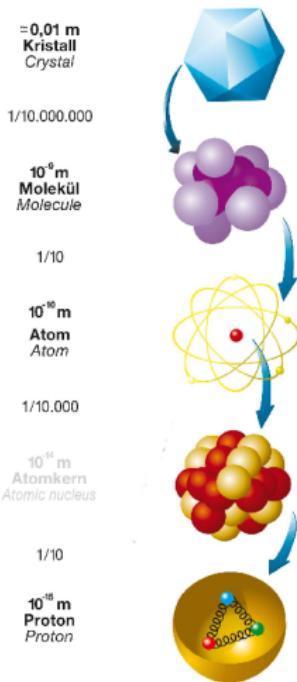
# Wie groß sind Elementarteilchen?



Wir schauen genauer hin...

Proton, Neutron  $\approx 10^{-15}\text{ m}$   
Hier fängt Teilchenphysik an!

# Wie groß sind Elementarteilchen?

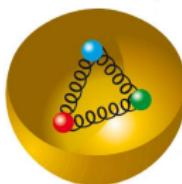


Wie groß sind  $10^{-15}$  m?



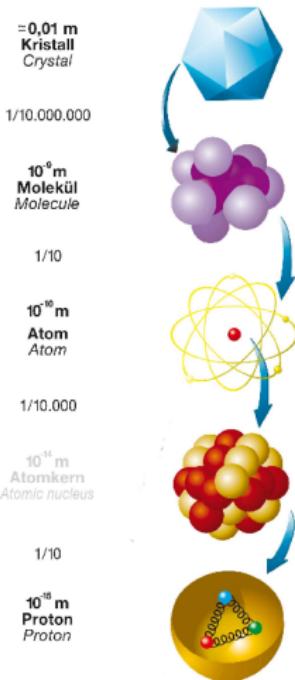
Kristall

⋮

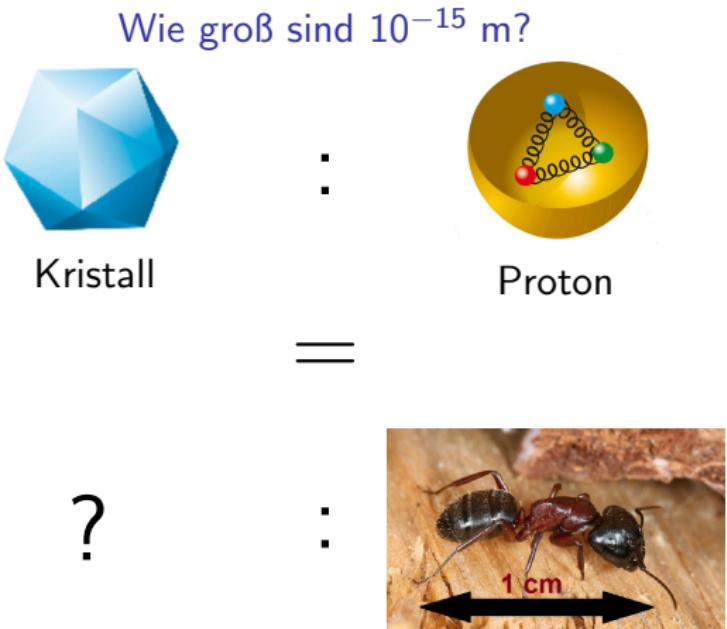


Proton

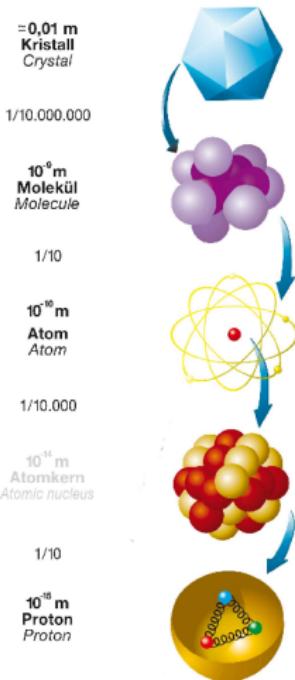
# Wie groß sind Elementarteilchen?



Wie groß sind  $10^{-15}$  m?



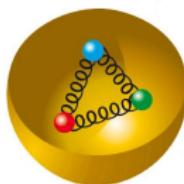
# Wie groß sind Elementarteilchen?



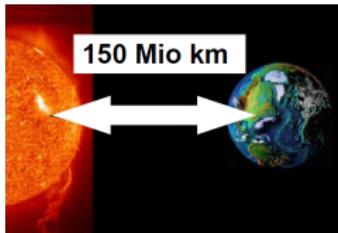
Wie groß sind  $10^{-15} \text{ m}$ ?



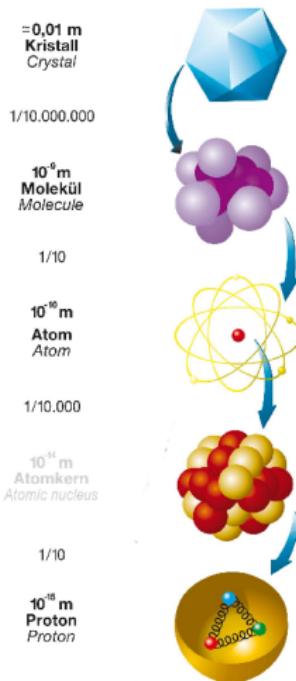
Kristall



Proton

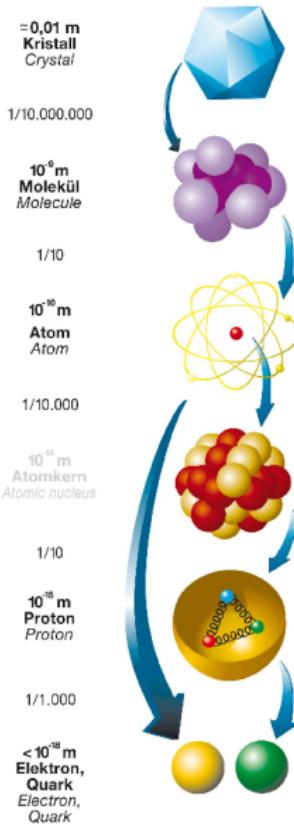


# Wie groß sind Elementarteilchen?



Wir schauen genauer hin...

# Wie groß sind Elementarteilchen?



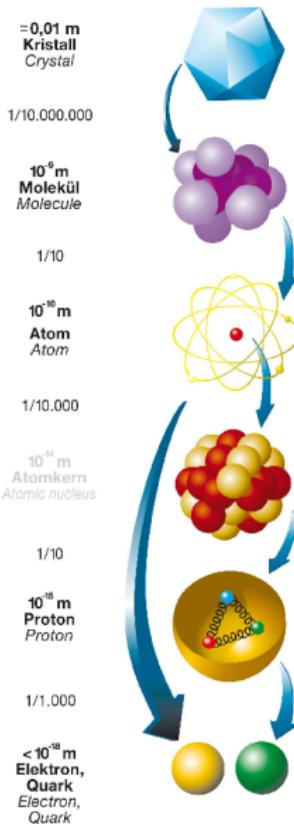
Wir schauen genauer hin...

Quarks, Elektronen

## Elementarteilchen

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

# Wie groß sind Elementarteilchen?



Wir schauen genauer hin...

Quarks, Elektronen

## Elementarteilchen

- $< 10^{-18}$  m (experimentell)
- punktförmig (theoretisch)

# Sichtbare Materie

- Woraus besteht die sichtbare Welt?
- Woraus bestehen wir?

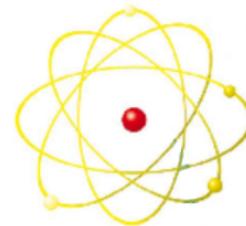
## Atome

# Sichtbare Materie

- Woraus besteht die sichtbare Welt?
- Woraus bestehen wir?

## Atome

- Atomhülle
- Atomkern

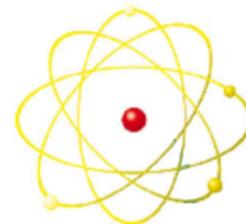


# Sichtbare Materie

- Woraus besteht die sichtbare Welt?
- Woraus bestehen wir?

## Atome

- Atomhülle
  - Elektronen:  $Q = -1$
- Atomkern

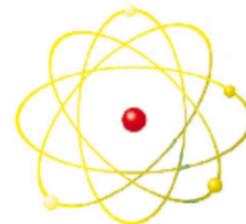
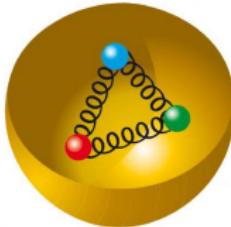


# Sichtbare Materie

- Woraus besteht die sichtbare Welt?
- Woraus bestehen wir?

## Atome

- Atomhülle
  - Elektronen:  $Q = -1$
- Atomkern
  - Protonen:  $Q = +1$
  - Neutronen:  $Q = 0$

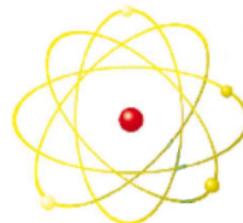
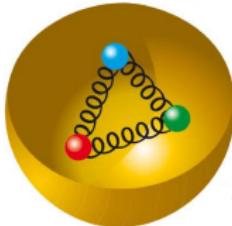


# Sichtbare Materie

- Woraus besteht die sichtbare Welt?
- Woraus bestehen wir?

## Atome

- Atomhülle
  - Elektronen:  $Q = -1$
- Atomkern
  - Protonen:  $Q = +1$ 
    - 2 up quarks       $Q = +2/3$
    - 1 down quark     $Q = -1/3$
  - Neutronen:  $Q = 0$

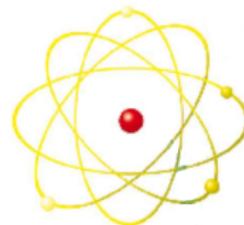
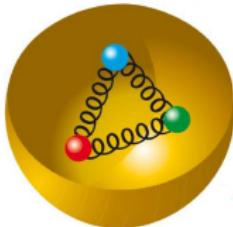


# Sichtbare Materie

- Woraus besteht die sichtbare Welt?
- Woraus bestehen wir?

## Atome

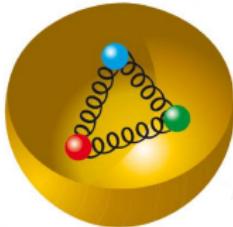
- Atomhülle
  - Elektronen:  $Q = -1$
- Atomkern
  - Protonen:  $Q = +1$ 
    - 2 up quarks       $Q = +2/3$
    - 1 down quark       $Q = -1/3$
  - Neutronen:  $Q = 0$ 
    - 1 up quark       $Q = +2/3$
    - 2 down quarks       $Q = -1/3$



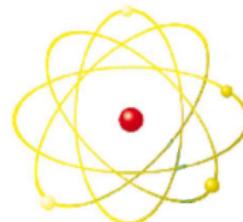
# Sichtbare Materie

- Woraus besteht die sichtbare Welt?
- Woraus bestehen wir?

## Elementarteilchen



- Atomhülle
  - Elektronen:  $Q = -1$
- Atomkern
  - Protonen:  $Q = +1$ 
    - 2 up quarks       $Q = +2/3$
    - 1 down quark       $Q = -1/3$
  - Neutronen:  $Q = 0$ 
    - 1 up quark       $Q = +2/3$
    - 2 down quarks       $Q = -1/3$



# Sichtbare Materie

- Woraus besteht die sichtbare Welt?
- Woraus bestehen wir?

# Sichtbare Materie

- Woraus besteht die sichtbare Welt?
- Woraus bestehen wir?

Neutron ist instabil:  $\beta$ -Zerfall

$$n \rightarrow p + e^-$$

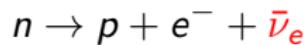
Problem: keine Energieerhaltung!

# Sichtbare Materie

- Woraus besteht die sichtbare Welt?
- Woraus bestehen wir?



Neutron ist instabil:  $\beta$ -Zerfall



1932: Neutrino

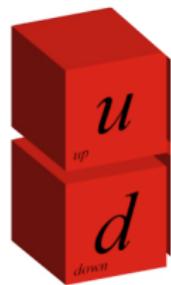
W. Pauli

# Sichtbare Materie

- Woraus besteht die sichtbare Welt?
- Woraus bestehen wir?

## 4 Elementarteilchen

Quarks



Leptons

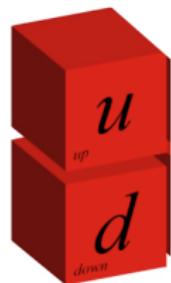


# Sichtbare Materie

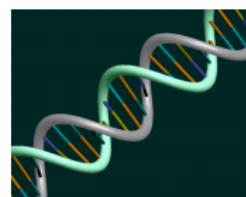
- Woraus besteht die sichtbare Welt?
- Woraus bestehen wir?

## 4 Elementarteilchen

Quarks



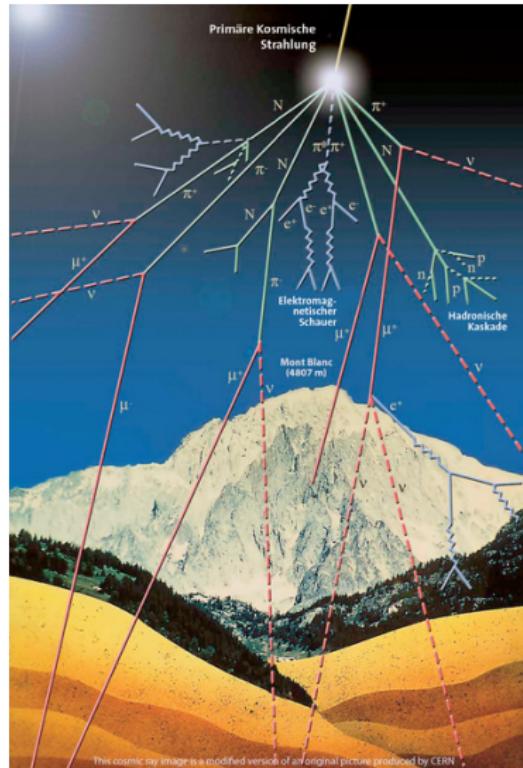
Leptons



zur Beschreibung der sichtbaren Materie!

# Gibt es noch weitere Elementarteilchen?

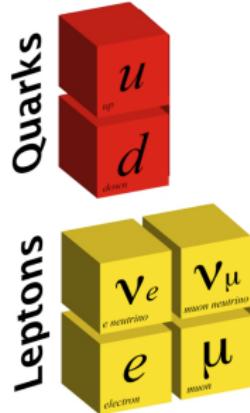
- 1936: Ein neues Elementarteilchen
  - In kosmischer Höhenstrahlung
  - Instabil ( $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$ )
- Das Myon  $\mu^-$ 
  - Gleiche elektrische Ladung wie  $e^-$
  - 200 mal schwerer als  $e^-$



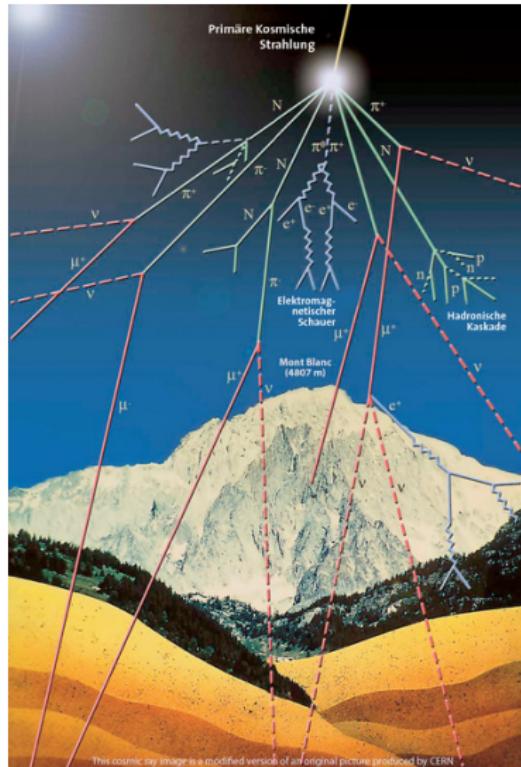
This cosmic ray image is a modified version of an original picture produced by CERN.

# Gibt es noch weitere Elementarteilchen?

- 1936: Ein neues Elementarteilchen
  - In kosmischer Höhenstrahlung
  - Instabil ( $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$ )
- Das Myon  $\mu^-$ 
  - Gleiche elektrische Ladung wie  $e^-$
  - 200 mal schwerer als  $e^-$



Myon  $\mu^-$   
"Schweres Elektron"



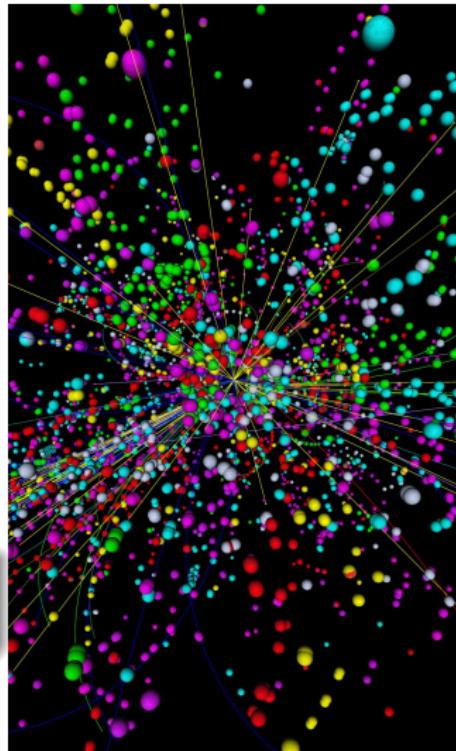
# Gibt es noch weitere Elementarteilchen?

Sind das jetzt alle? Nein!

Es gibt noch mehr Elementarteilchen

- Meist **instabil** und sehr kurzlebig
  - Nicht in sichtbarer Materie "verbaut"
- Oder nahezu "**unsichtbar**"
  - Neutrinos

Erzeugung in Teilchenkollisionen  
z. B. am LHC

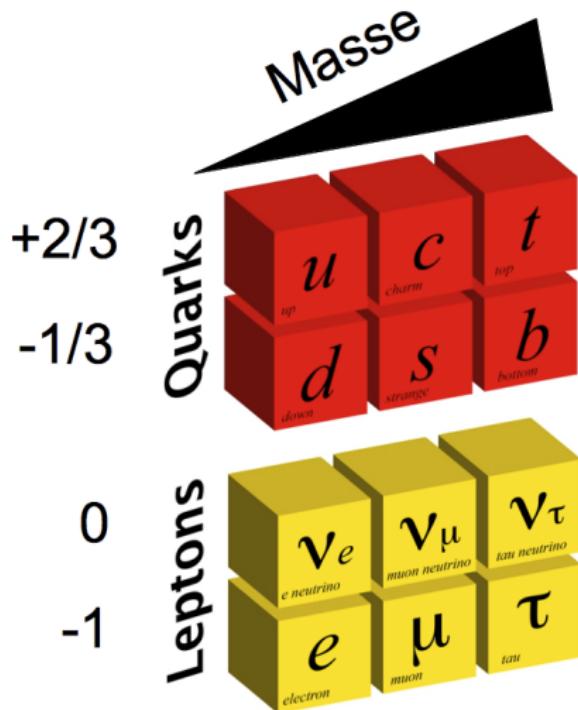


# Experiment Teilchenzoo



“Ordne die Elementarteilchen anhand  
ihrer Eigenschaften.”

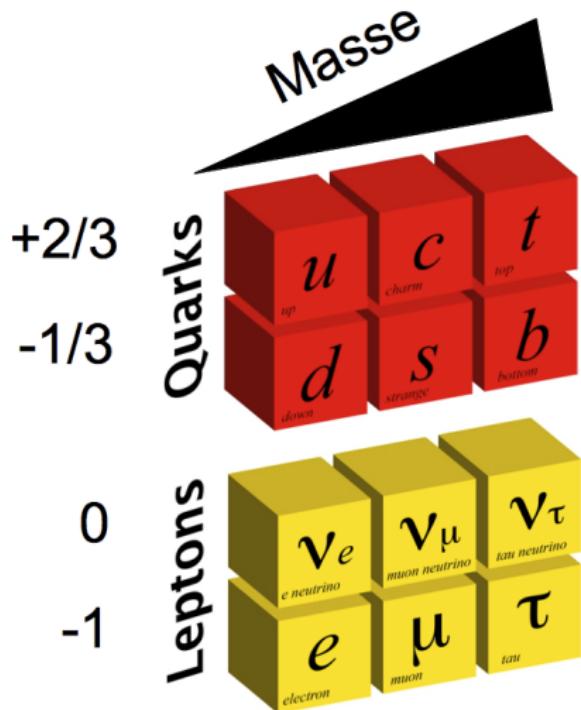
# Die bekannten Elementarteilchen



## Ordnung

- Masse
- Quantenzahlen
- Z.B. Ladung

# Die bekannten Elementarteilchen



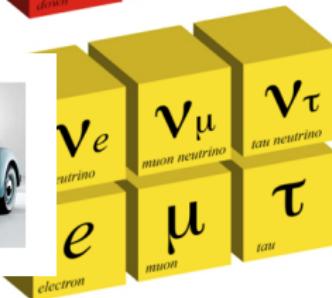
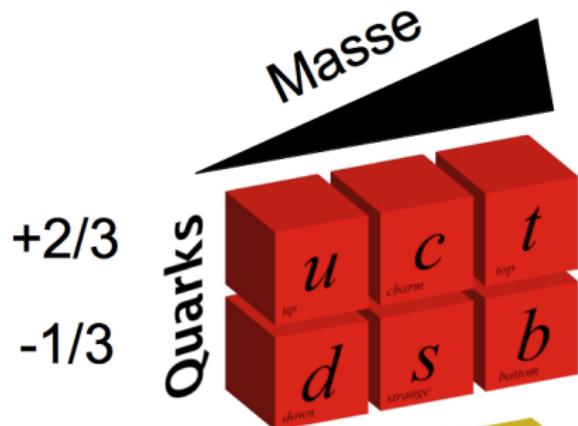
## Ordnung

- Masse
- Quantenzahlen
- Z.B. Ladung

## Teilchen der 2. und 3. Generation

- Gleiche Eigenschaften wie 1.
- Aber deutlich schwerer
- Instabil

# Die bekannten Elementarteilchen



## Ordnung

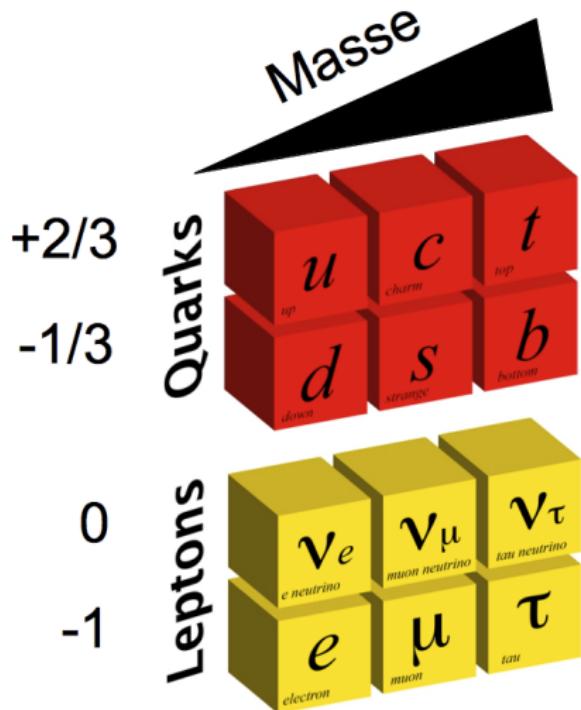


n  
ng

1. 3. Generation  
schaften wie 1.

- Aber deutlich schwerer
- Instabil

# Die bekannten Elementarteilchen



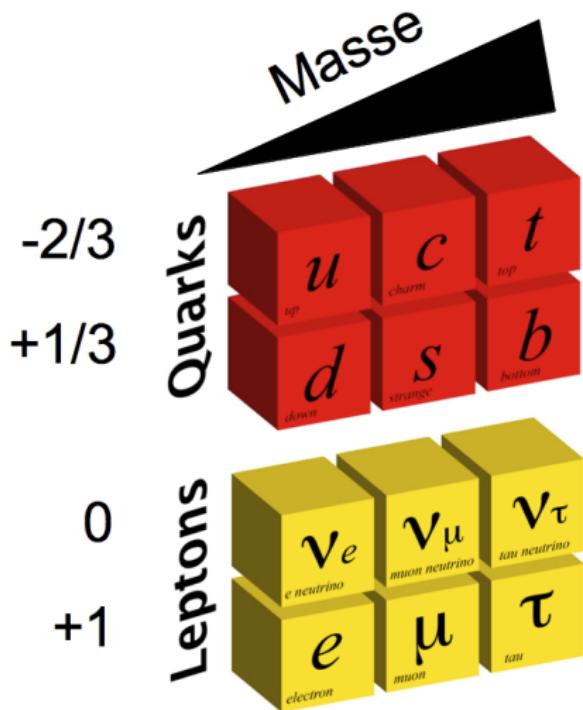
## Ordnung

- Masse
- Quantenzahlen
- Z.B. Ladung

## Teilchen der 2. und 3. Generation

- Gleiche Eigenschaften wie 1.
- Aber deutlich schwerer
- Instabil

# Die bekannten Elementarteilchen



## Ordnung

- Masse
- Quantenzahlen
- Z.B. Ladung

## Teilchen der 2. und 3. Generation

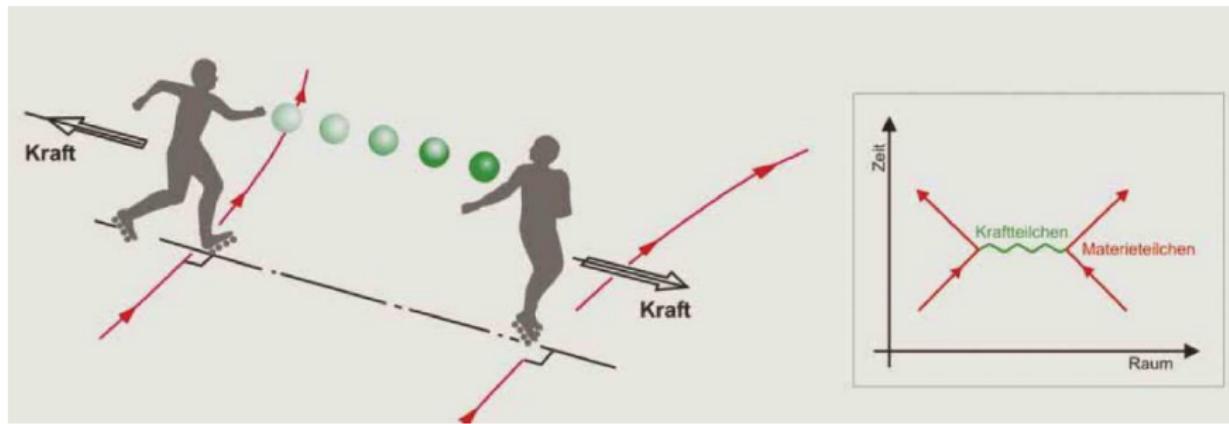
- Gleiche Eigenschaften wie 1.
- Aber deutlich schwerer
- Instabil

## Zu jedem Teilchen: Antiteilchen

- Gleiche Eigenschaften
- Aber entgegengesetzte Ladung
- Z.B.  $e^-$  und  $e^+$

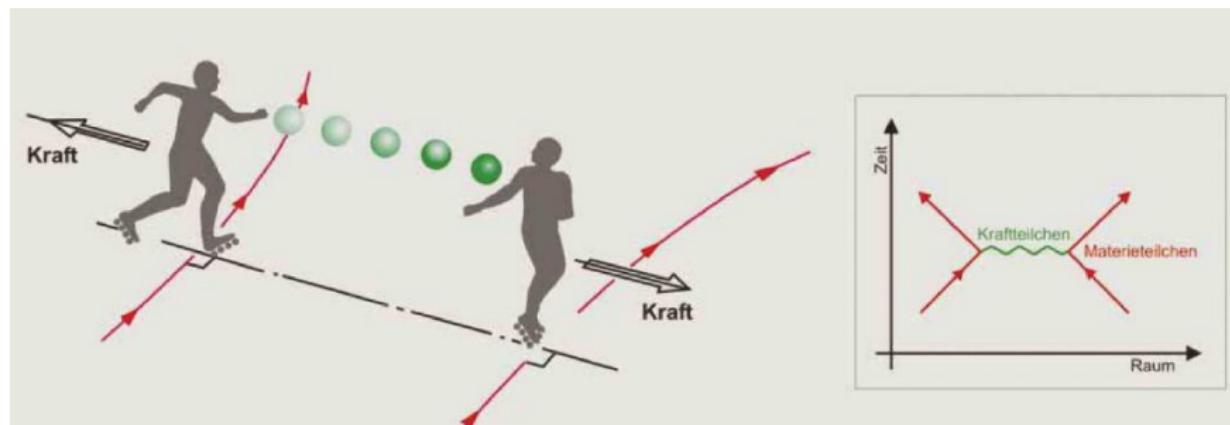
# Kräfte: Interaktion zwischen den Elementarteilchen

- Kräfte wirken zwischen **geladenen Teilchen**
- Kräfte entstehen durch den **Austausch von Teilchen ("Bosonen")**



# Kräfte: Interaktion zwischen den Elementarteilchen

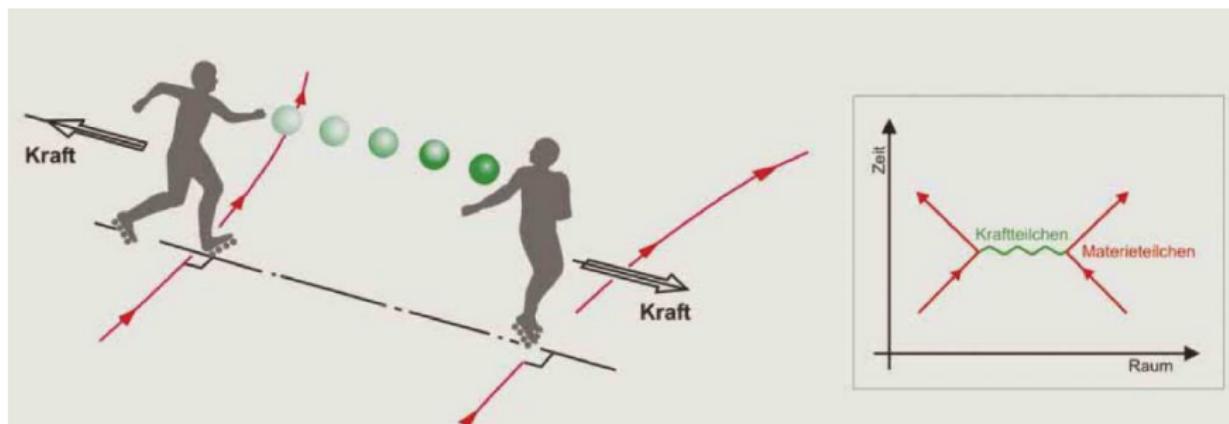
- Kräfte wirken zwischen **geladenen Teilchen**
- Kräfte entstehen durch den **Austausch von Teilchen ("Bosonen")**



- Anschauliche (und mathematische!) Beschreibung durch "Feynmandiagramme"

# Kräfte: Interaktion zwischen den Elementarteilchen

- Kräfte wirken zwischen geladenen Teilchen
- Kräfte entstehen durch den Austausch von Teilchen ("Bosonen")

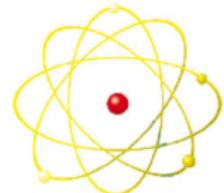


- Z.B. Elektron-Elektron Abstoßung durch Photon-Austausch
- Elektromagnetische Kraft

# Fundamentale Kräfte

## Elektromagnetische Kraft

- Elektrische Ladung, alle außer  $\nu$
- Vermittelt durch Photon  $\gamma$
- *Chemie, Elektrizität*



# Fundamentale Kräfte

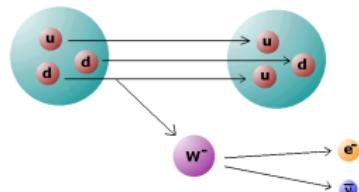
## Elektromagnetische Kraft

- Elektrische Ladung, alle außer  $\nu$
- Vermittelt durch Photon  $\gamma$
- *Chemie, Elektrizität*



## Schwache Kraft

- Schwache Ladung, alle Teilchen
- Vermittelt durch  $W^\pm$ ,  $Z^0$
- *Umwandlung von Teilchensorten ( $\beta$ -,  $\mu$ -Zerfall)*



# Fundamentale Kräfte

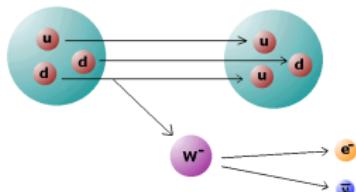
## Elektromagnetische Kraft

- Elektrische Ladung, alle außer  $\nu$
- Vermittelt durch Photon  $\gamma$
- *Chemie, Elektrizität*



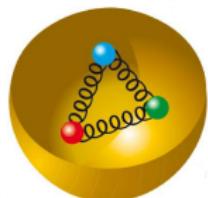
## Schwache Kraft

- Schwache Ladung, alle Teilchen
- Vermittelt durch  $W^\pm$ ,  $Z^0$
- *Umwandlung von Teilchensorten ( $\beta$ -,  $\mu$ -Zerfall)*

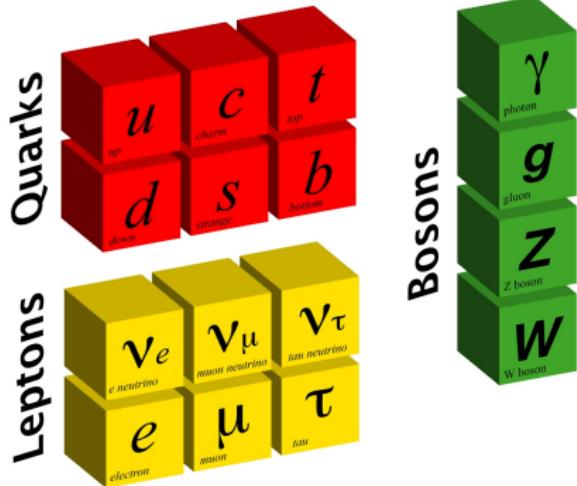


## Starke Kraft

- Farbladung (drei Zustände  $rgb$ ), nur Quarks
- Vermittelt durch Gluon  $g$
- *Bindung der Quarks in Hadronen:  $qqq$ ,  $q\bar{q}$*

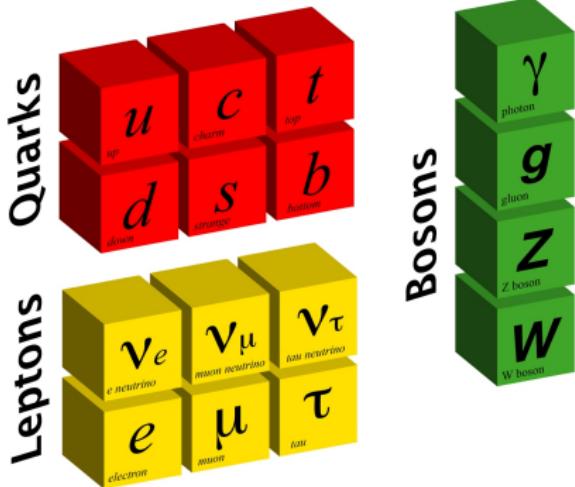


# Das Standardmodell der Teilchenphysik



- Einheitliche Beschreibung der
  - fundamentalen Teilchen und ihrer Eigenschaften
  - fundamentalen Kräfte (ausgenommen Gravitation)
- Beruht auf
  - Spezieller Relativitätstheorie
  - Quantenmechanik
- Genaueste Beschreibung der Natur

# Das Standardmodell der Teilchenphysik



- Einheitliche Beschreibung der
  - fundamentalen Teilchen und ihrer Eigenschaften
  - fundamentalen Kräfte (ausgenommen Gravitation)
- Beruht auf
  - Spezieller Relativitätstheorie
  - Quantenmechanik
- Genaueste Beschreibung der Natur

*“Das Standardmodell funktioniert frustrierend gut.” R. Heuer, 2011*

# Woher bekommen die Teilchen Masse?

- Standardmodell erlaubt keine Massen
- Elementarteilchen haben Massen!



$$m_t \approx 340\,000 \cdot m_e$$

# Woher bekommen die Teilchen Masse?

- Standardmodell erlaubt keine Massen
- Elementarteilchen haben Massen!

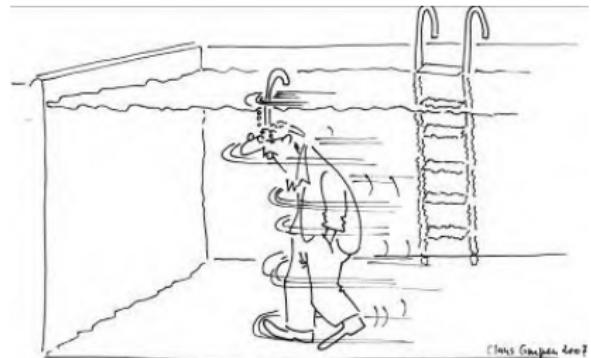


$$m_t \approx 340\,000 \cdot m_e$$

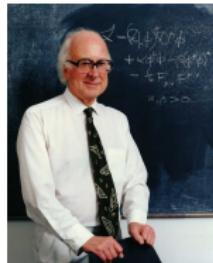
## Higgs-Mechanismus

- Hintergrundfeld im Universum
  - Teilchen werden "abgebremst"
- ⇒ Masse

Vorhersage: **Higgs Teilchen**

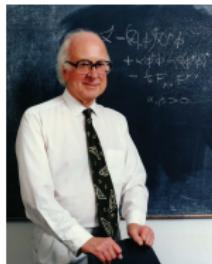


# Die Higgs-Story



- Über 40 Jahre

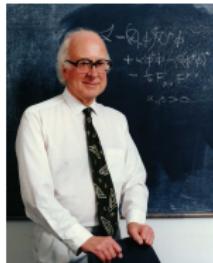
# Die Higgs-Story



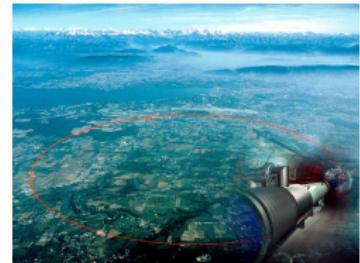
- Über 40 Jahre
- Viele Beschleunigerexperimente



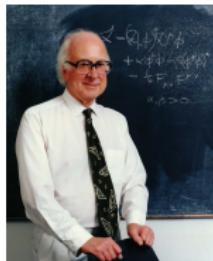
# Die Higgs-Story



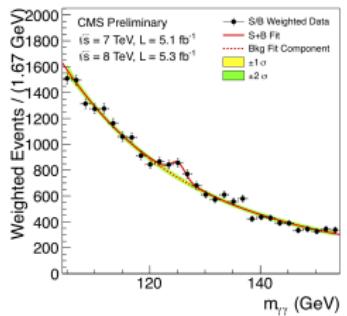
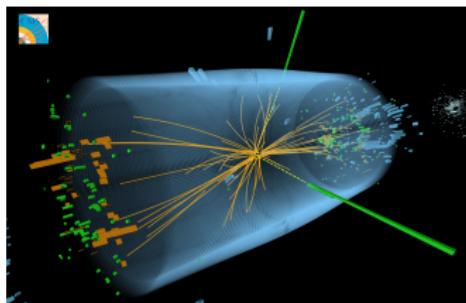
- Über 40 Jahre
- Viele Beschleunigerexperimente
- Ungezählte Teilchenphysiker



# Die Higgs-Story



- Über 40 Jahre
- Viele Beschleunigerexperimente
- Ungezählte Teilchenphysiker



4. July 2012

Eindeutige Hinweise auf ein Higgs-artiges Teilchen!



# Offene Fragen der Teilchenphysik



# Offene Fragen der Teilchenphysik

- Woher bekommen Teilchen ihre Massen?
  - Haben wir das Higgs-Teilchen gefunden?



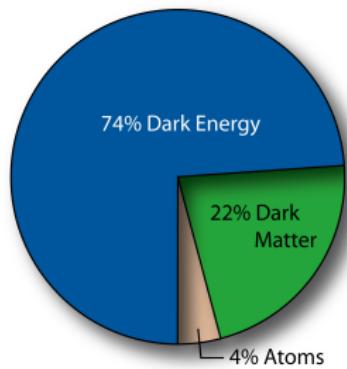
# Offene Fragen der Teilchenphysik

- Woher bekommen Teilchen ihre Massen?
  - Haben wir das Higgs-Teilchen gefunden?
- Warum gibt es mehr Materie als Antimaterie?



# Offene Fragen der Teilchenphysik

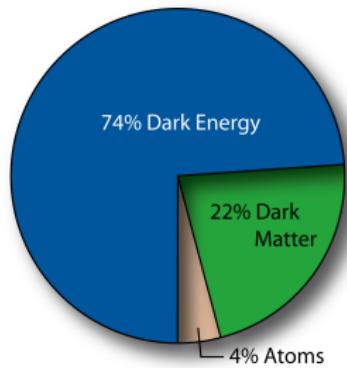
- Woher bekommen Teilchen ihre Massen?
  - Haben wir das Higgs-Teilchen gefunden?
- Warum gibt es mehr Materie als Antimaterie?
- Was ist dunkle Materie?
- Kann man die Gravitation durch Teilchenaustausch beschreiben?
  - Gibt es Supersymmetrie?





# Offene Fragen der Teilchenphysik

- Woher bekommen Teilchen ihre Massen?
  - Haben wir das Higgs-Teilchen gefunden?
- Warum gibt es mehr Materie als Antimaterie?
- Was ist dunkle Materie?
- Kann man die Gravitation durch Teilchenaustausch beschreiben?
  - Gibt es Supersymmetrie?



Antworten an Teilchenbeschleunigern  
— jetzt am LHC —

# Übersicht

1

- Wie arbeiten Teilchenphysiker?
- Was wissen wir über Elementarteilchen?
- Was wissen wir **nicht** über Elementarteilchen?

Matthias

2

- Erforschung von Elementarteilchen
  - Wie kann man sie erzeugen?
  - Wie kann man sie sichtbar machen?

Arne

---

Mittagspause

---

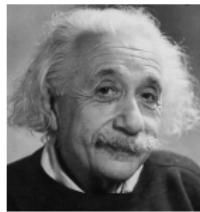
3

- Selber forschen!
  - Wie kann man sie erzeugen?
  - Wie kann man sie sichtbar machen?

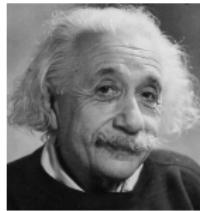
Alle zusammen

# Wie können wir neue Teilchen erzeugen?

# Wie können wir neue Teilchen erzeugen?



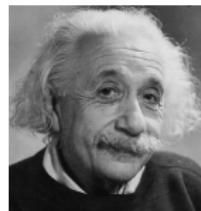
# Wie können wir neue Teilchen erzeugen?



“Masse entspricht Energie”

$$E = m \cdot c^2 \quad \Leftrightarrow \quad m = \frac{E}{c^2}$$

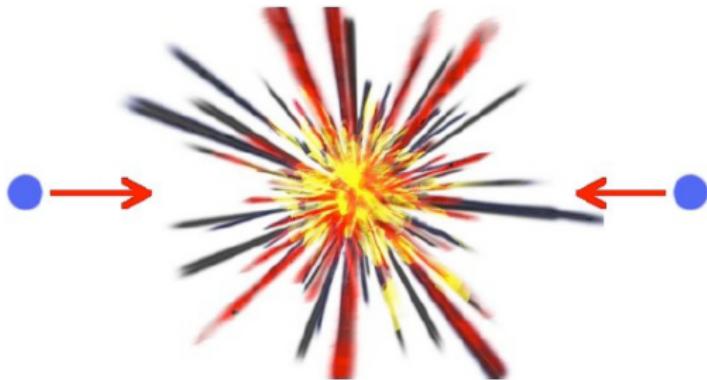
# Wie können wir neue Teilchen erzeugen?



“Masse entspricht Energie”

$$E = m \cdot c^2 \quad \Leftrightarrow \quad m = \frac{E}{c^2}$$

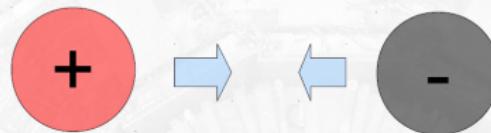
- Kollision von zwei Teilchen mit jeweils Energie  $E$



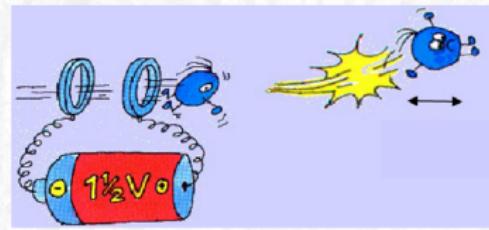
⇒ Erzeugung neuer Teilchen bis zur Masse  $2m = 2E$  ( $c = 1$ )

# Woher bekommt man schnelle Teilchen?

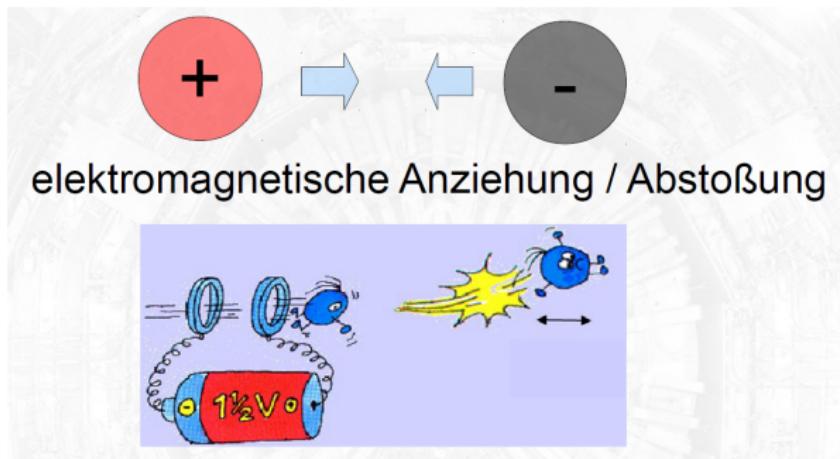
# Woher bekommt man schnelle Teilchen?



elektromagnetische Anziehung / Abstoßung



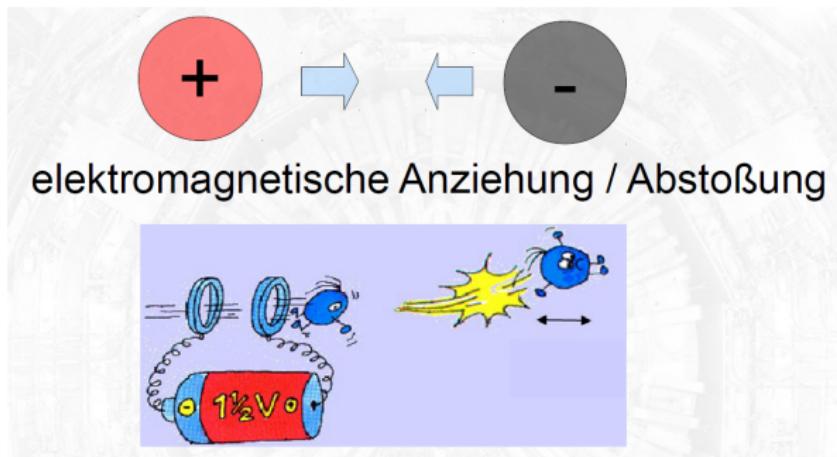
# Woher bekommt man schnelle Teilchen?



Energieeinheit der Teilchenphysiker: Elektronenvolt eV

1 eV = Energie durch Beschleunigung mit Spannung von 1 V

# Woher bekommt man schnelle Teilchen?

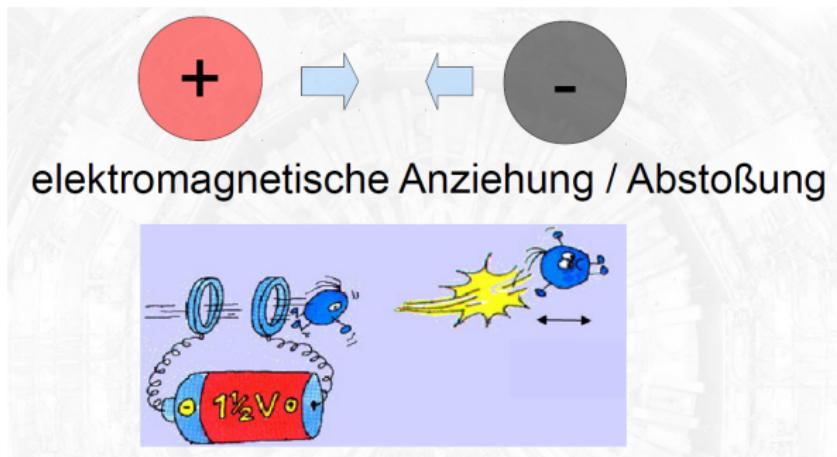


Energieeinheit der Teilchenphysiker: Elektronenvolt eV

1 eV = Energie durch Beschleunigung mit Spannung von 1 V

- Nach Batterie-Beschleunigung:

# Woher bekommt man schnelle Teilchen?

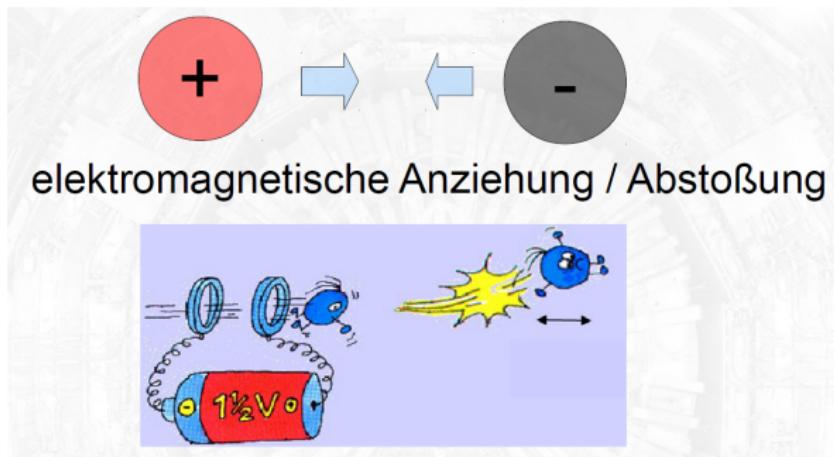


Energieeinheit der Teilchenphysiker: Elektronenvolt eV

1 eV = Energie durch Beschleunigung mit Spannung von 1 V

- Nach Batterie-Beschleunigung: 1,5 eV

# Woher bekommt man schnelle Teilchen?

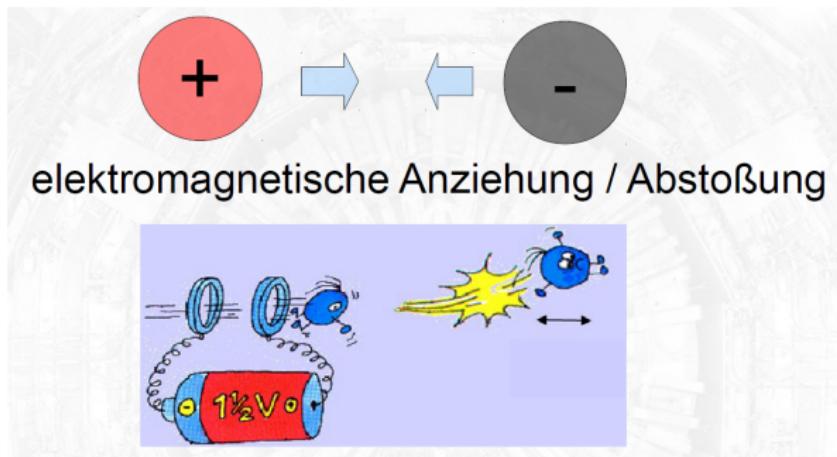


Energieeinheit der Teilchenphysiker: Elektronenvolt eV

1 eV = Energie durch Beschleunigung mit Spannung von 1 V

- Nach Batterie-Beschleunigung: 1,5 eV
- Protonenmasse  $\approx 1\ 000\ 000\ 000\ \text{eV} = 1\ \text{GeV}$  ( $1,7 \cdot 10^{-27}\ \text{kg}$ )

# Woher bekommt man schnelle Teilchen?

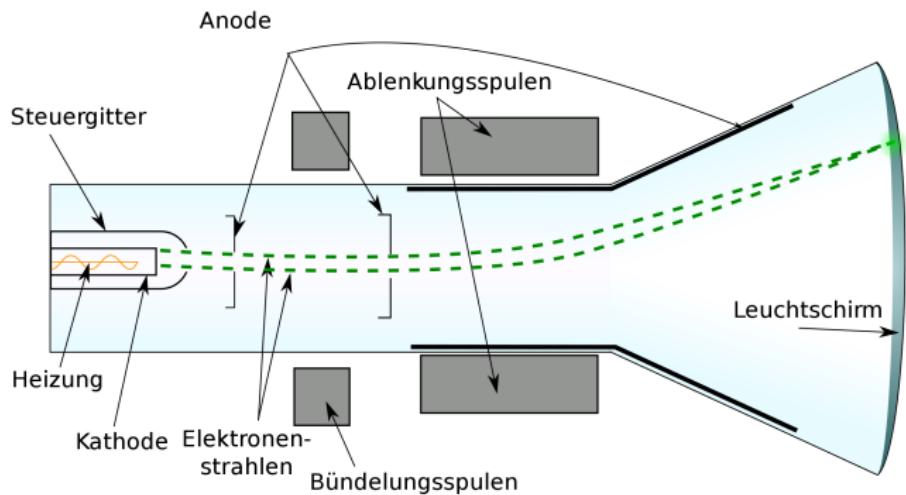


Energieeinheit der Teilchenphysiker: Elektronenvolt eV

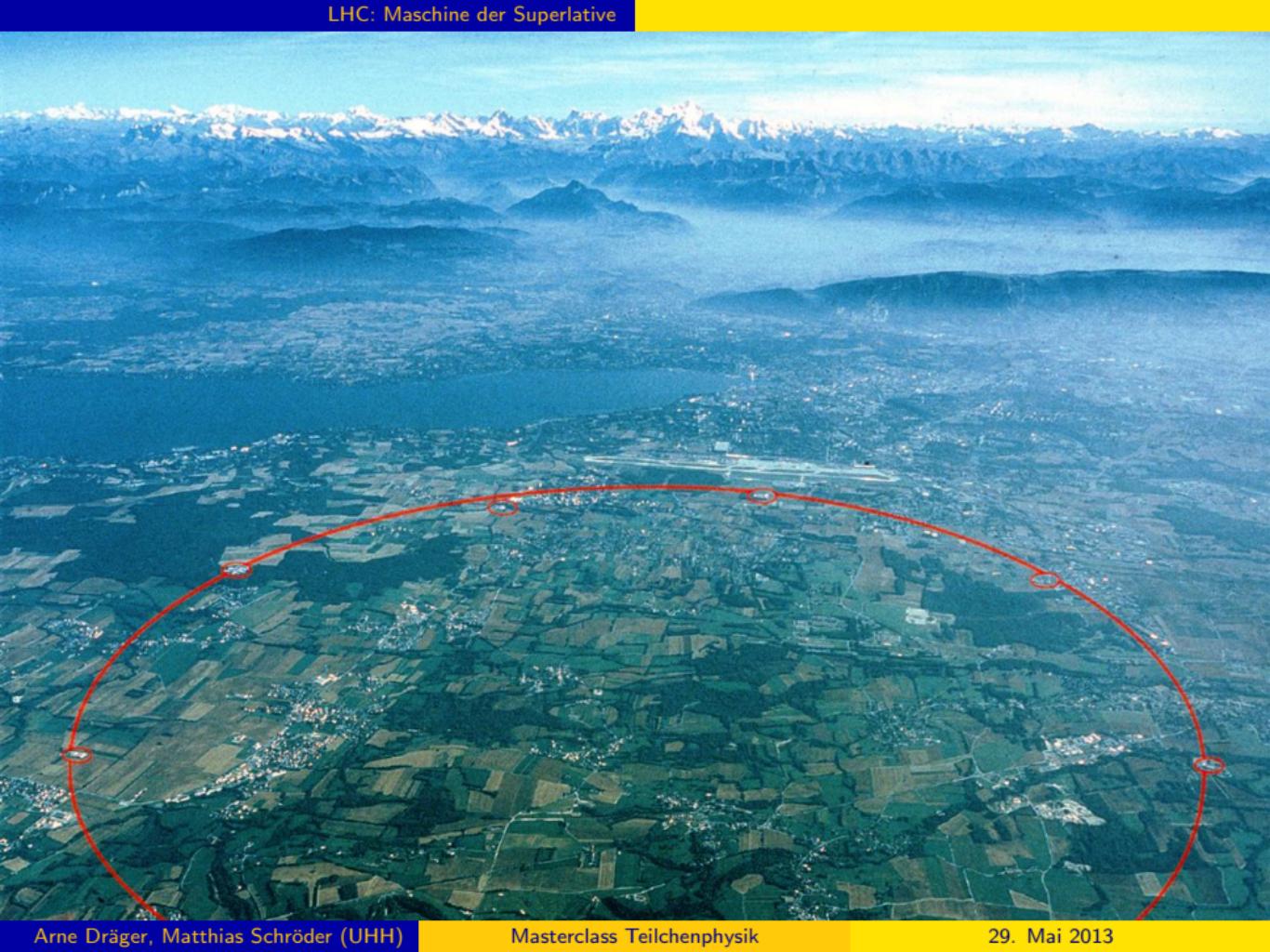
1 eV = Energie durch Beschleunigung mit Spannung von 1 V

- Nach Batterie-Beschleunigung: 1,5 eV
- Protonenmasse  $\approx 1\,000\,000\,000$  eV = 1 GeV ( $1,7 \cdot 10^{-27}$  kg)
- $Z^0$ -Masse  $\approx 90$  GeV

# Beispiel für einen Teilchenbeschleuniger: Röhrenfernseher

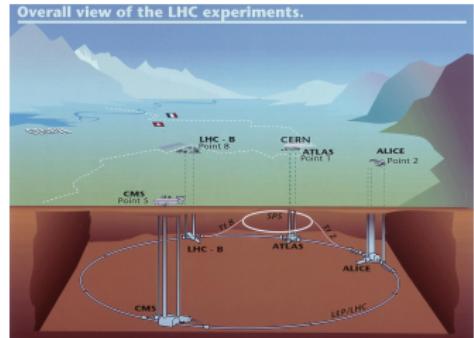


Spannung ca. 15 keV

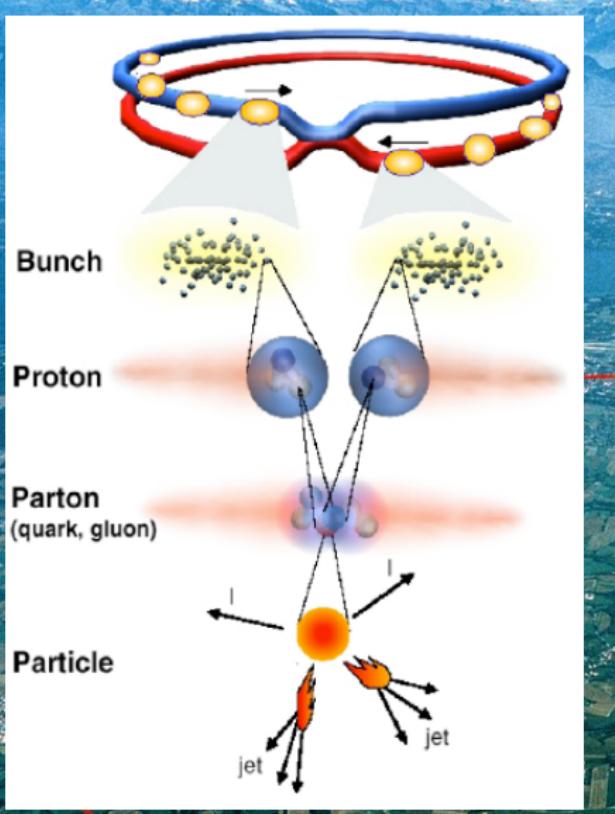


## Large Hadron Collider (LHC)

- Proton-Proton-Beschleuniger am CERN bei Genf
- Umfang von 27 km
- Zwischen 50 und 175 m unter der Erde



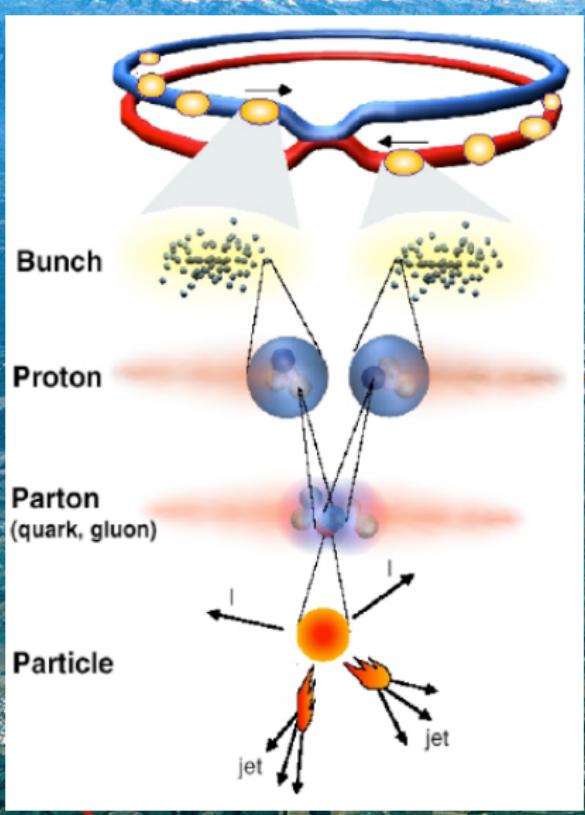
# LHC: Der stärkste Beschleuniger der Welt



- Zwei gegenläufige Strahlen
  - 2 808 “Teilchenpakete”
  - ca. 100 Milliarden Protonen pro Paket
- Protonen beschleunigt durch elektrische Wechselfelder
  - 99,9999991% der Lichtgeschwindigkeit
  - 11 245 Umläufe pro Sekunde



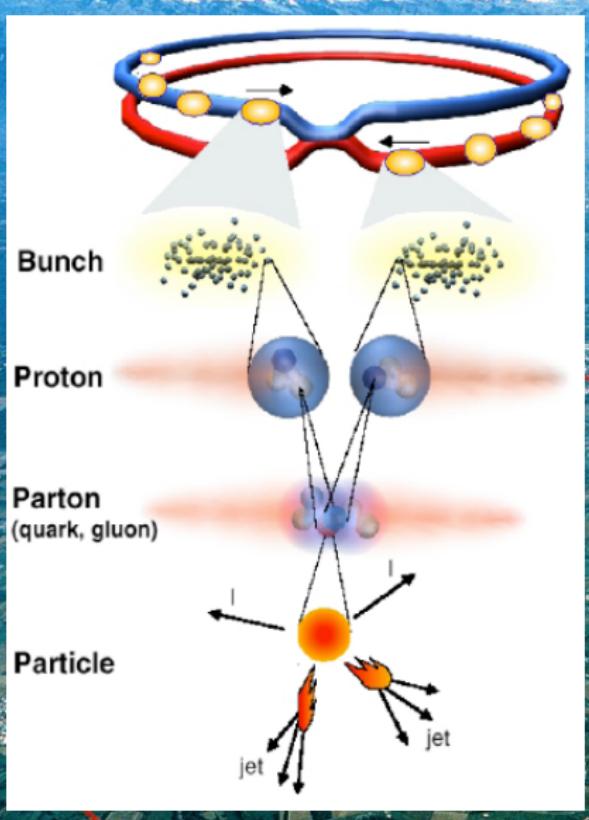
# LHC: Kälter als das Weltall



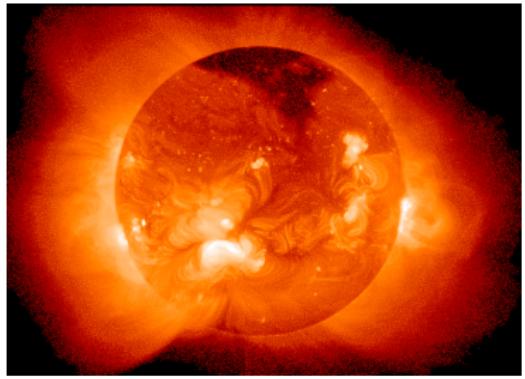
- Supraleitende Magnete zwingen Protonen auf Kreisbahn
  - 80 000 mal stärker als Erdmagnetfeld
- Erfordern Kühlung auf 1,9 K ( $-271,3^{\circ}\text{C}$ )
  - Kälter als das Weltall (2,7 K)



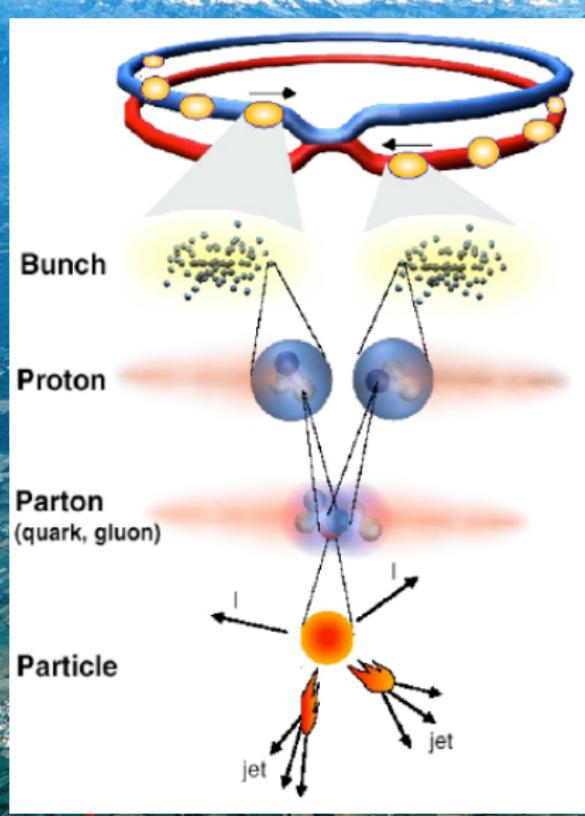
# LHC: Heißer als die Sonne



- ca. 400 Millionen Kollisionen pro Sekunde
- Energie von  $7 \text{ TeV} \approx 80 m_{Z^0}$ 
  - *100 000 mal heißer als im Innern der Sonne*

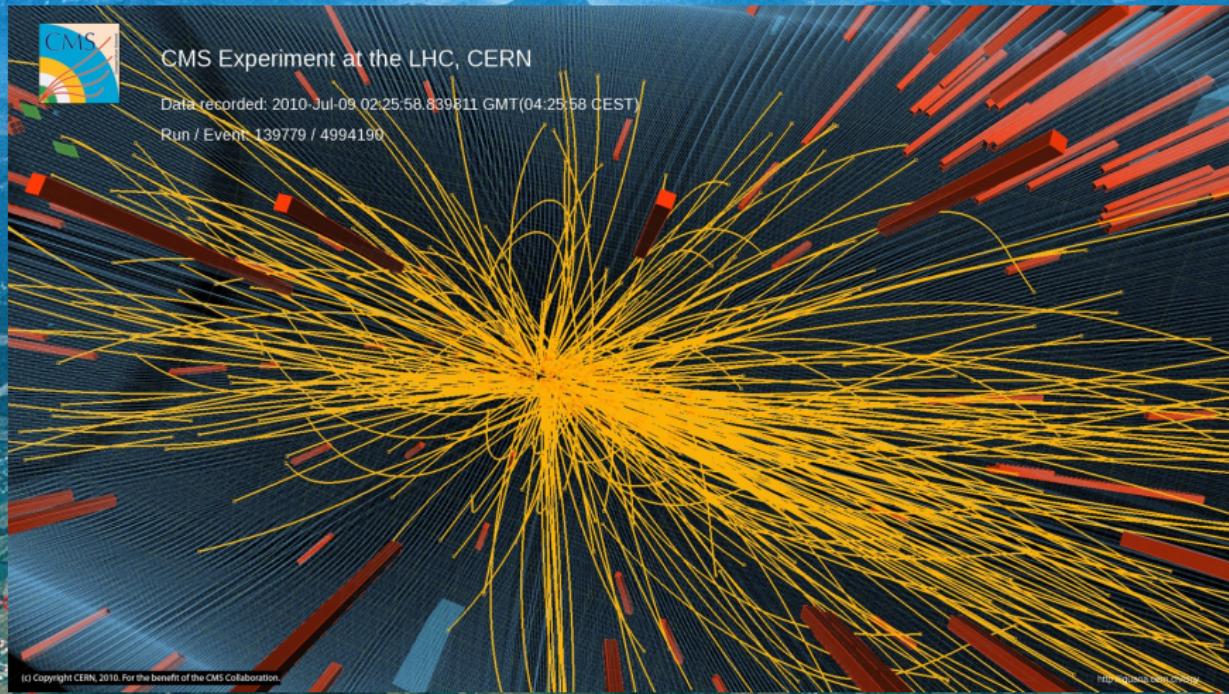


# LHC: Proton-Proton Kollision

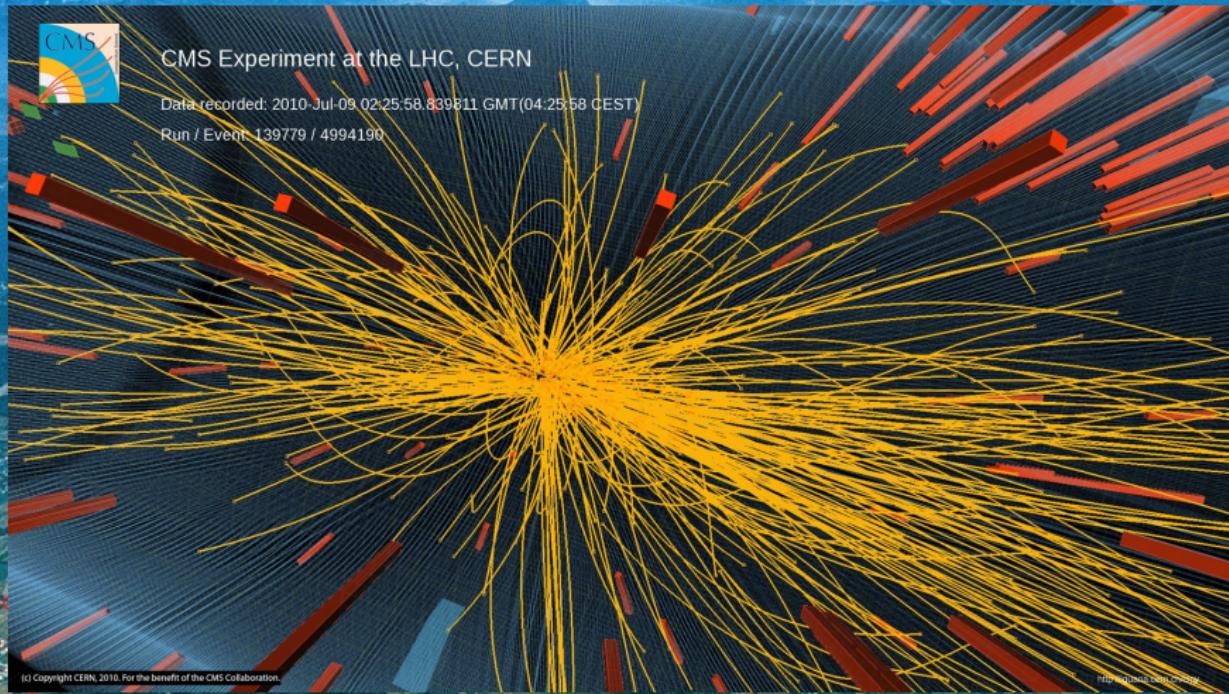


[www.youtube.com/watch?v=RdYvtm4CIAE](http://www.youtube.com/watch?v=RdYvtm4CIAE)

# LHC: Proton-Proton Kollision



# Wie misst man das??

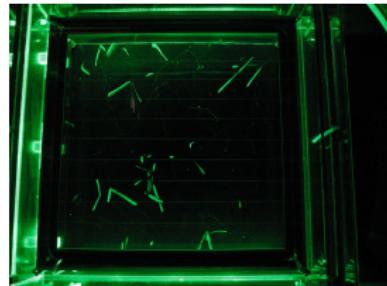


# Detektoren: Teilchen “sehen”

# Detektoren: Teilchen “sehen”

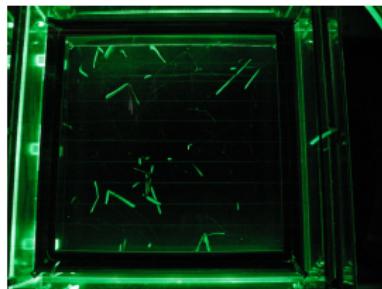
Teilchen wechselwirken mit Materie → messbares Signal

# Detektoren: Teilchen “sehen”



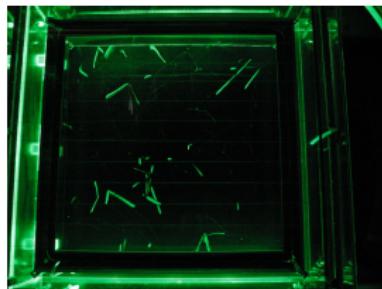
Teilchen wechselwirken mit Materie → messbares Signal

# Detektoren: Teilchen “sehen”



Teilchen wechselwirken mit Materie → messbares Signal

# Detektoren: Teilchen “sehen”

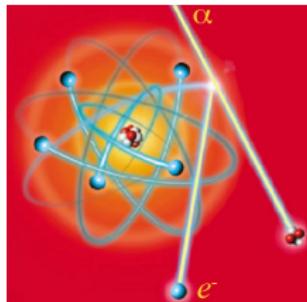


Teilchen wechselwirken mit Materie → messbares Signal

# Wenn Teilchen auf Materie treffen...

# Wenn Teilchen auf Materie treffen...

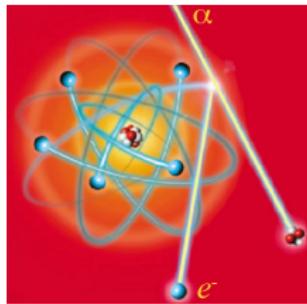
- Geladene Teilchen: Ionisation



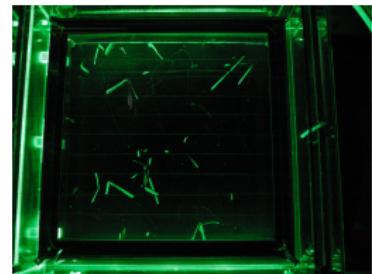
- **Freie Ladungsträger**

# Wenn Teilchen auf Materie treffen...

- Geladene Teilchen: Ionisation

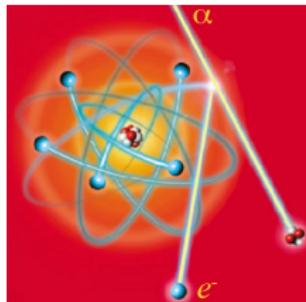


- **Freie Ladungsträger**
  - Nebelkammer  
 $\rightarrow$  "Kondensstreifen"



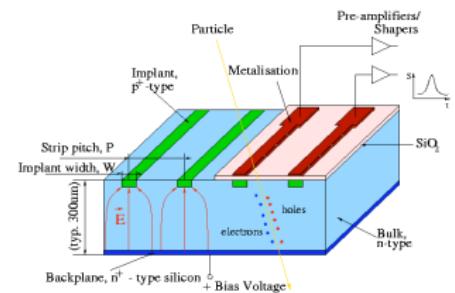
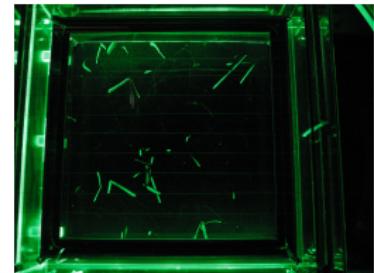
# Wenn Teilchen auf Materie treffen...

- Geladene Teilchen: Ionisation



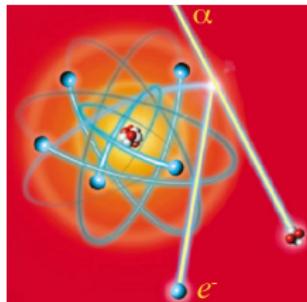
## • Freie Ladungsträger

- Nebelkammer  
→ "Kondensstreifen"
- Siliziumdetektor  
→ *Strompuls*

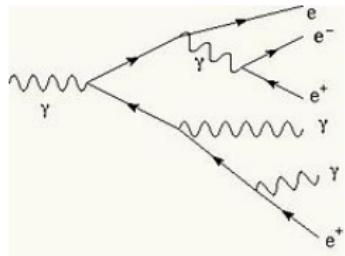


# Wenn Teilchen auf Materie treffen...

- Geladene Teilchen: Ionisation

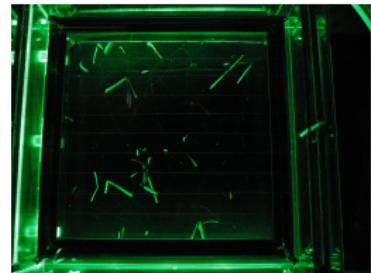


- Geladene & neutrale Teilchen: abgestoppt



## Freie Ladungsträger

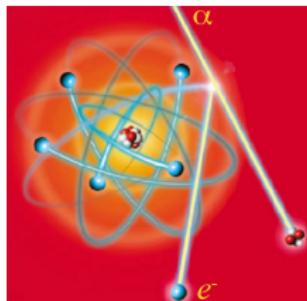
- Nebelkammer  
→ "Kondensstreifen"
- Siliziumdetektor  
→ Strompuls



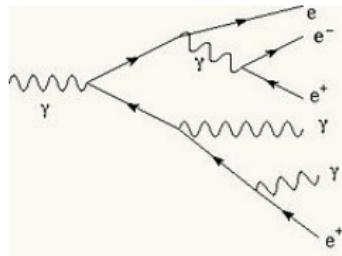
## Teilchenschauer

# Wenn Teilchen auf Materie treffen...

- Geladene Teilchen: Ionisation

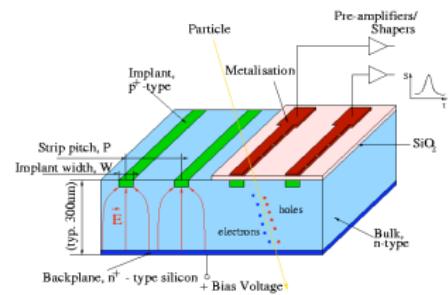
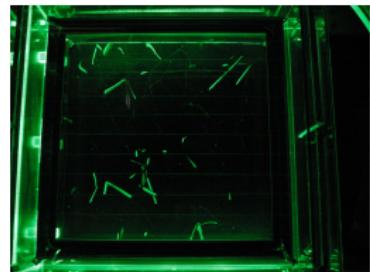


- Geladene & neutrale Teilchen: abgestoppt



## Freie Ladungsträger

- Nebelkammer  
→ "Kondensstreifen"
- Siliziumdetektor  
→ Strompuls

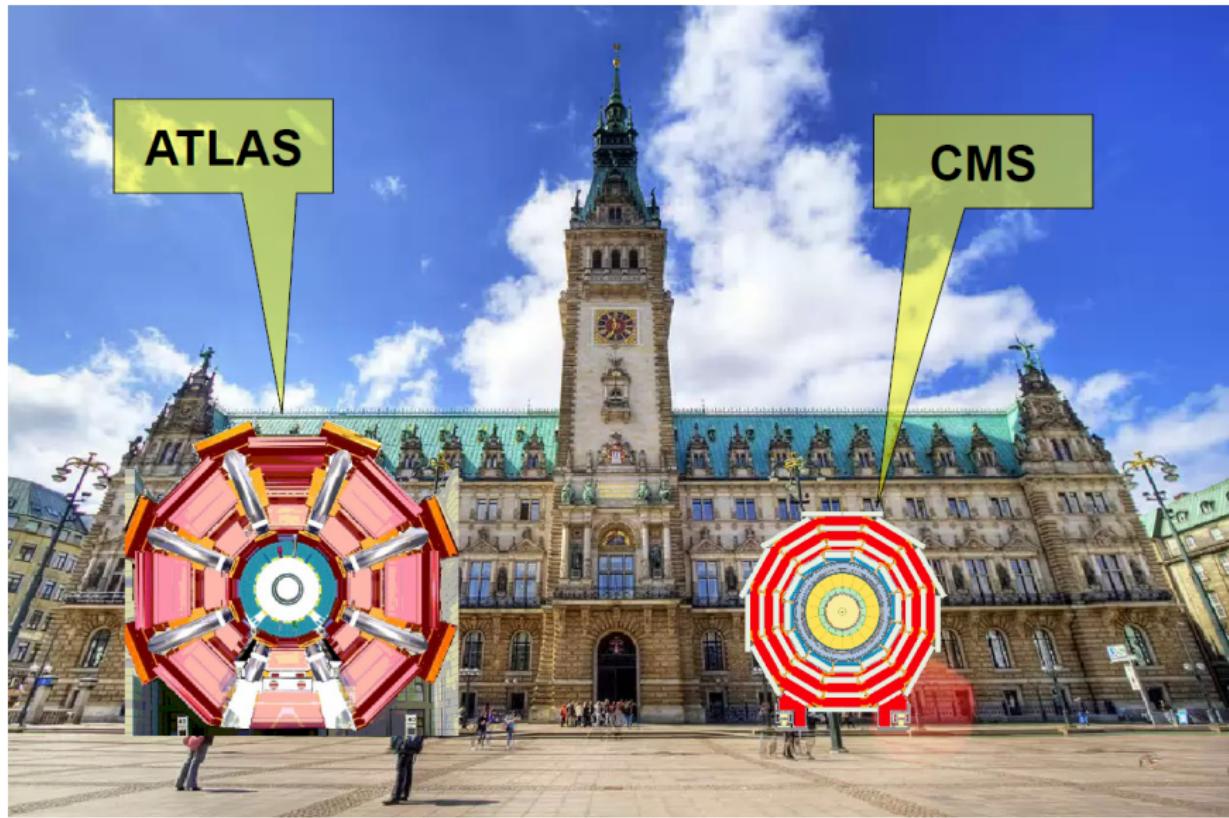


## Teilchenschauer

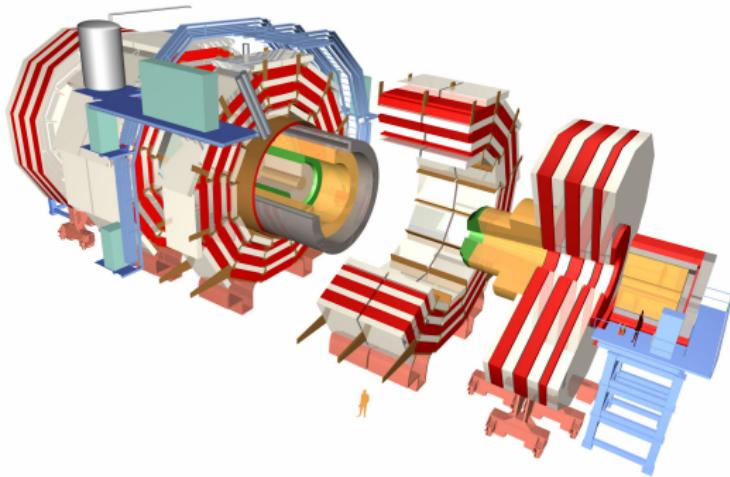
- Kalorimeter  
→ Lichtblitze



# Die großen Detektoren am LHC



# Der CMS-Detektor am LHC



- Breite: 15 m
- Höhe: 15 m
- Länge: 21 m
- Gewicht: 12 500 t
- Mehr als 3 000 Wissenschaftler aus 38 Ländern

# Was möchte man von den Teilchen wissen?

# Was möchte man von den Teilchen wissen?

Richtung

Impuls

Ladung

Energie

Teilchenart

# Spurdetektor

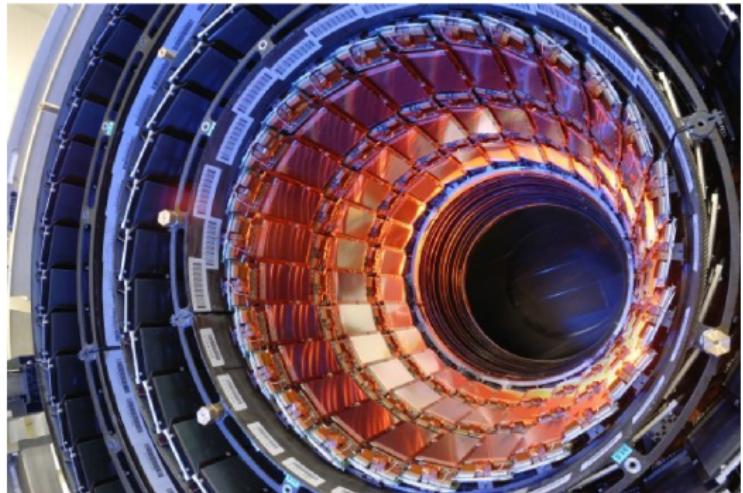
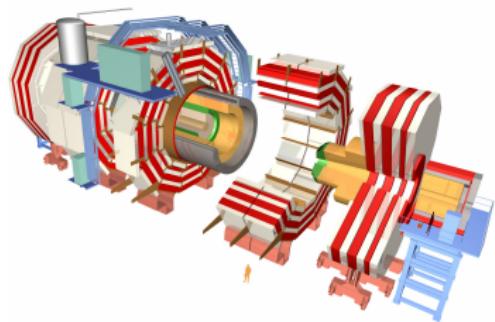
Richtung

Impuls

Ladung

Energie

Teilchenart



# Spurdetektor

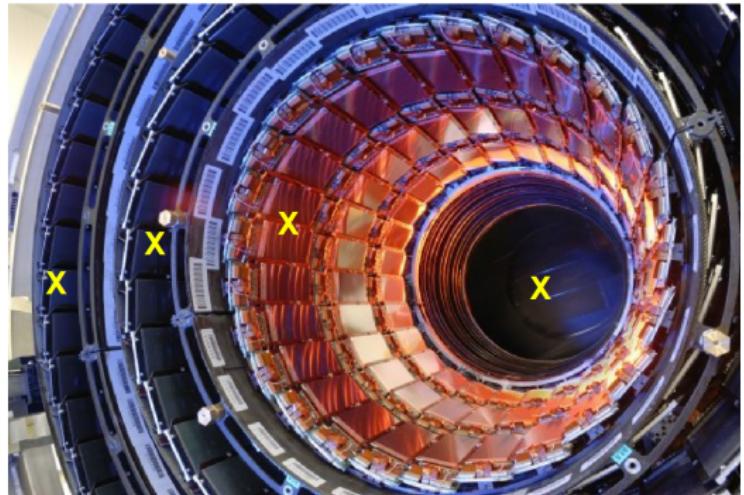
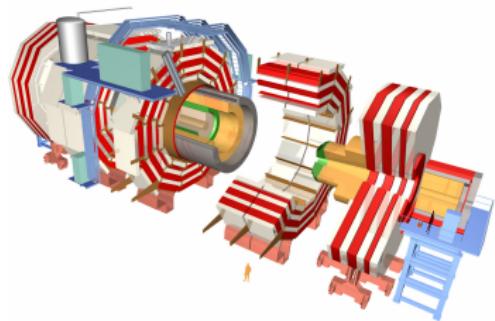
Richtung

Impuls

Ladung

Energie

Teilchenart



# Spurdetektor

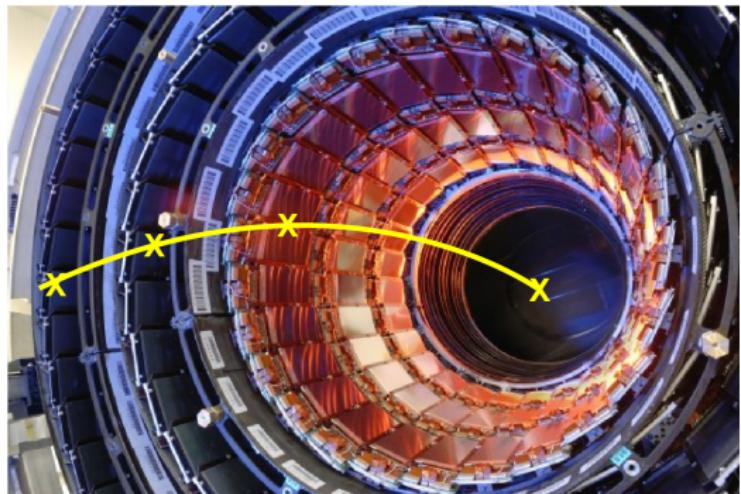
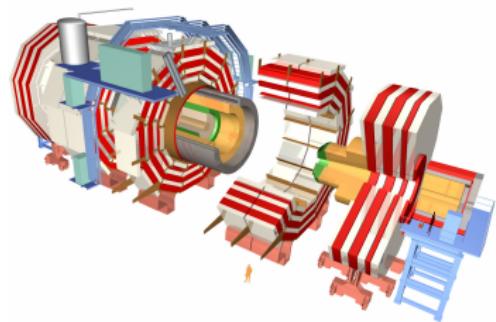
Richtung

Impuls

Ladung

Energie

Teilchenart



# Spurdetektor

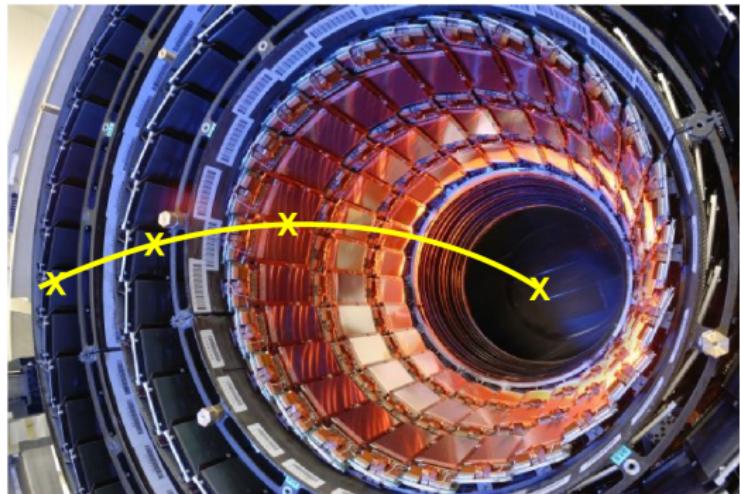
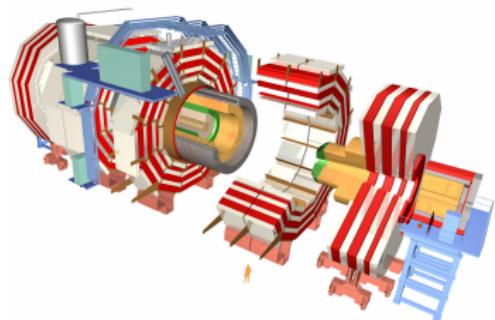
Richtung

Impuls

Ladung

Energie

Teilchenart



# Spurdetektor + Magnetfeld

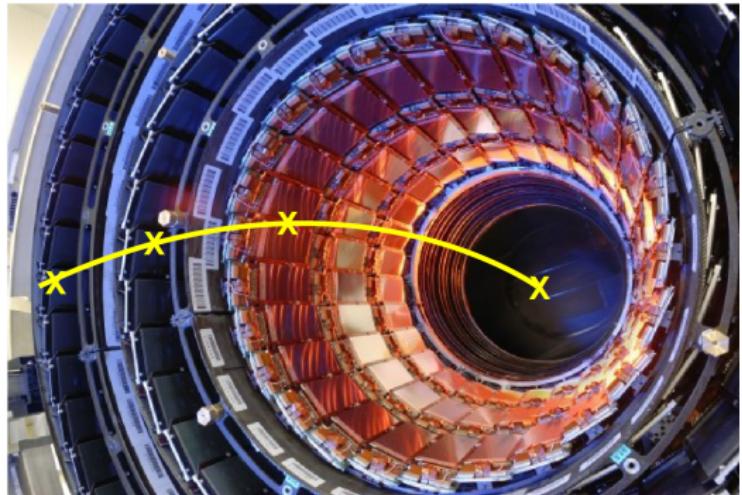
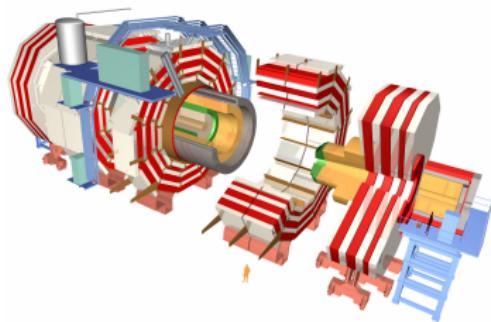
Richtung

Impuls

Ladung

Energie

Teilchenart



# Kalorimeter

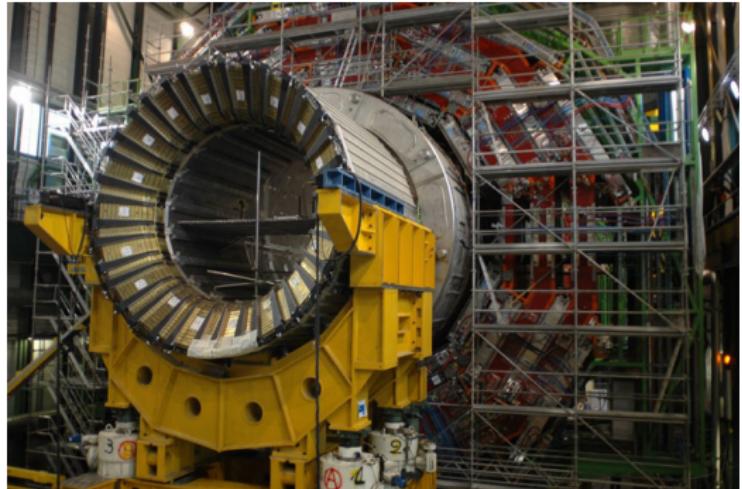
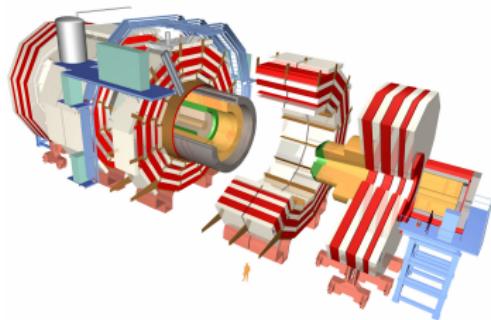
Richtung

Impuls

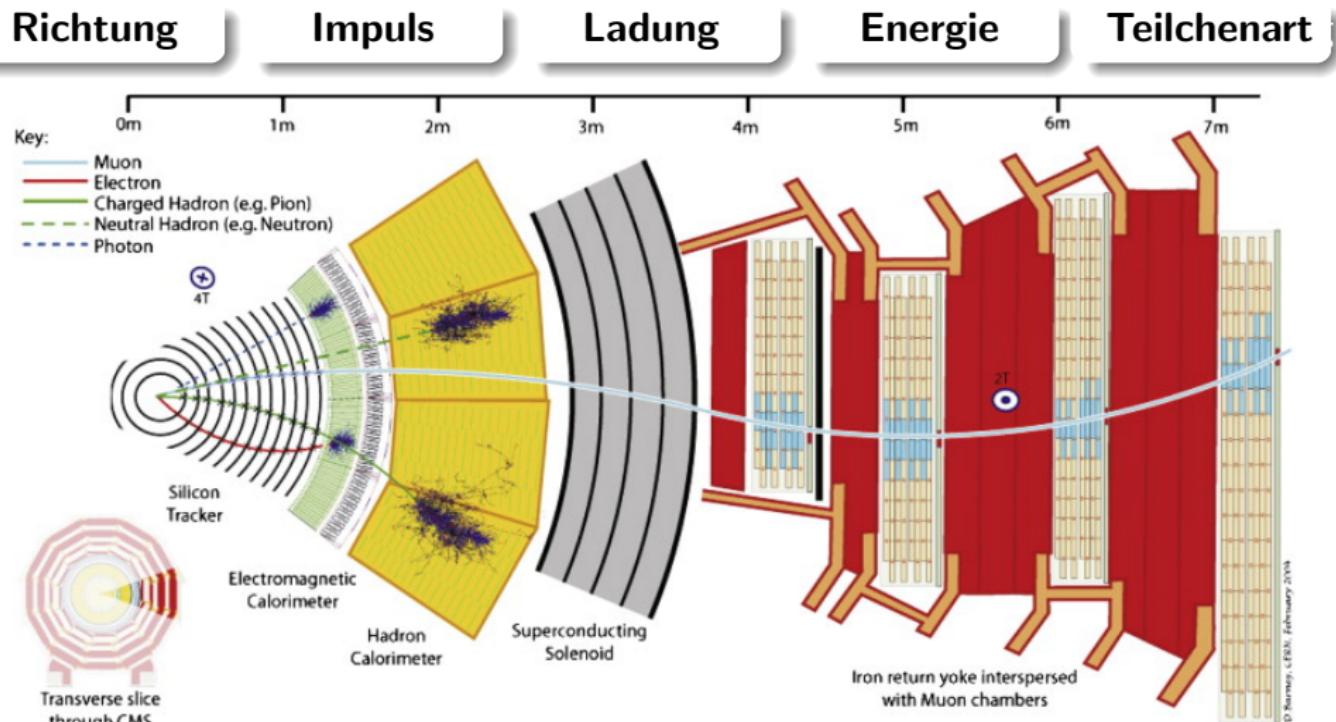
Ladung

Energie

Teilchenart

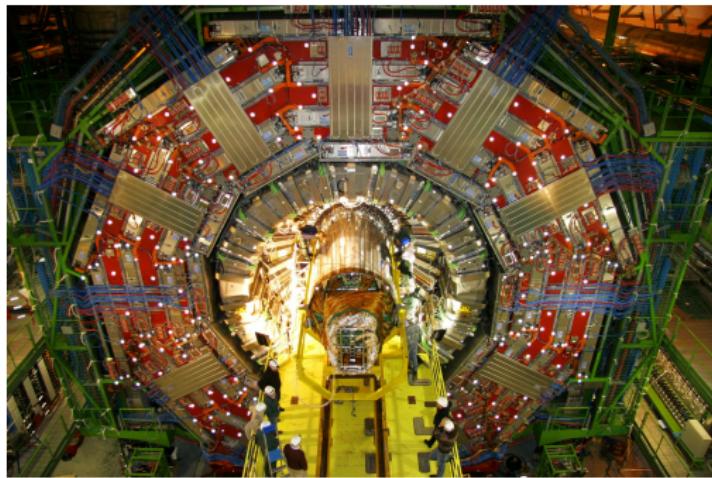


# Kombination aller Komponenten



# Insgesamt vier große Detektoren am LHC

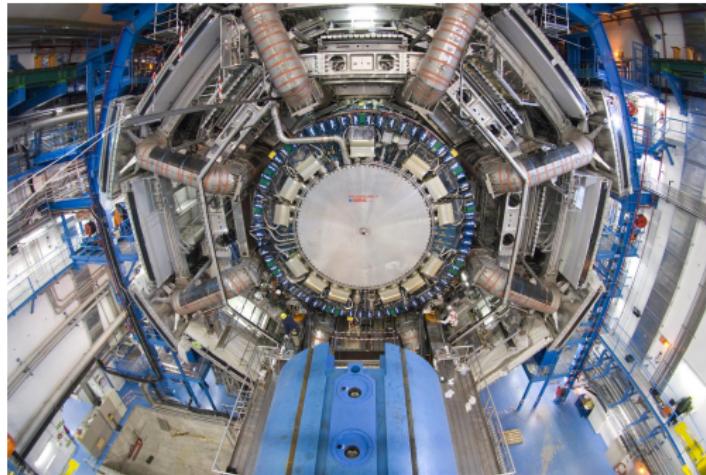
CMS Gibt es das Higgs? Gibt es noch weitere unbekannte Teilchen?



# Insgesamt vier große Detektoren am LHC

**CMS** Gibt es das Higgs? Gibt es noch weitere unbekannte Teilchen?

**ATLAS** Gibt es das Higgs? Gibt es noch weitere unbekannte Teilchen?



# Insgesamt vier große Detektoren am LHC

**CMS** Gibt es das Higgs? Gibt es noch weitere unbekannte Teilchen?

**ATLAS** Gibt es das Higgs? Gibt es noch weitere unbekannte Teilchen?

**LHCb** Warum gibt es mehr Materie als Antimaterie im Universum?



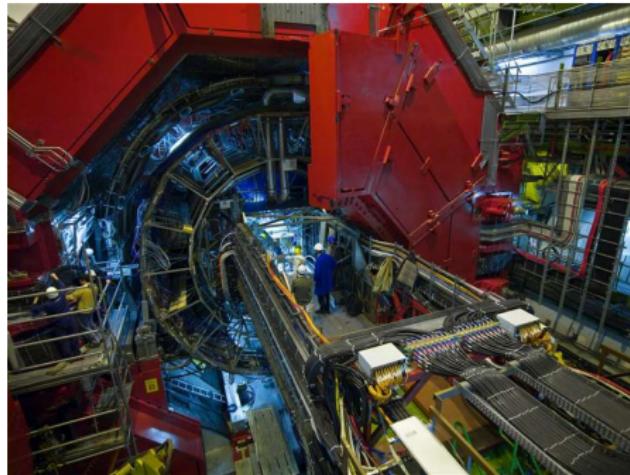
# Insgesamt vier große Detektoren am LHC

**CMS** Gibt es das Higgs? Gibt es noch weitere unbekannte Teilchen?

**ATLAS** Gibt es das Higgs? Gibt es noch weitere unbekannte Teilchen?

**LHCb** Warum gibt es mehr Materie als Antimaterie im Universum?

**ALICE** Wie sah das Universum in den ersten Sekunden aus?



# Übersicht

1

- Wie arbeiten Teilchenphysiker?
- Was wissen wir über Elementarteilchen?
- Was wissen wir **nicht** über Elementarteilchen?

Matthias

2

- Erforschung von Elementarteilchen
  - Wie kann man sie erzeugen?
  - Wie kann man sie sichtbar machen?

Arne

---

Mittagspause

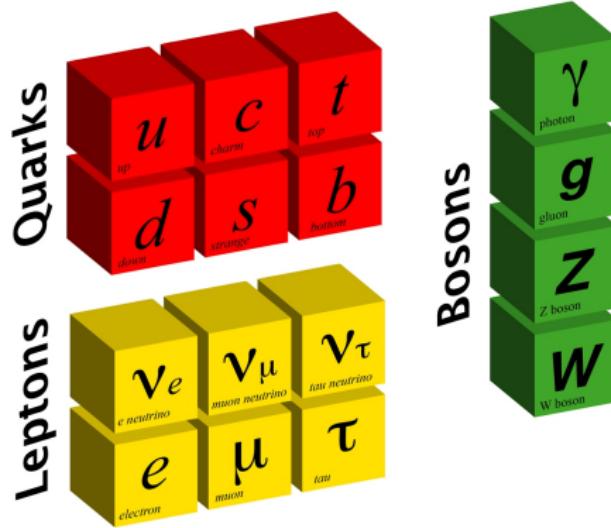
---

3

- Selber forschen!
  - Wie kann man sie erzeugen?
  - Wie kann man sie sichtbar machen?

Alle zusammen

# Das $Z^0$ -Teilchen



## $Z^0$ -Teilchen

- Austauschteilchen der Schwachen Kraft
- Elektrisch neutral
- 90 mal schwerer als das Proton
- Umwandlung ("Zerfall") in leichtere Teilchen nach  $3 \cdot 10^{-25}$  sec

# In welche Teilchen zerfällt das $Z^0$ ?

Es müssen bestimmte Bedingungen erfüllt sein:

# In welche Teilchen zerfällt das $Z^0$ ?

Es müssen bestimmte Bedingungen erfüllt sein:

## Ladungserhaltung



- Zerfallsprodukte müssen Ladung 0 haben

# In welche Teilchen zerfällt das $Z^0$ ?

Es müssen bestimmte Bedingungen erfüllt sein:

## Ladungserhaltung



- Zerfallsprodukte müssen Ladung 0 haben
- $Z^0$  zerfällt in Teilchen-Antiteilchen-Paar
- Z.B.  $Z^0 \rightarrow e^+ e^-$

# In welche Teilchen zerfällt das $Z^0$ ?

Es müssen bestimmte Bedingungen erfüllt sein:

## Ladungserhaltung



- Zerfallsprodukte müssen Ladung 0 haben
- $Z^0$  zerfällt in Teilchen-Antiteilchen-Paar
- Z.B.  $Z^0 \rightarrow e^+ e^-$

## Energie- und Impulserhaltung



# In welche Teilchen zerfällt das $Z^0$ ?

Es müssen bestimmte Bedingungen erfüllt sein:

## Ladungserhaltung



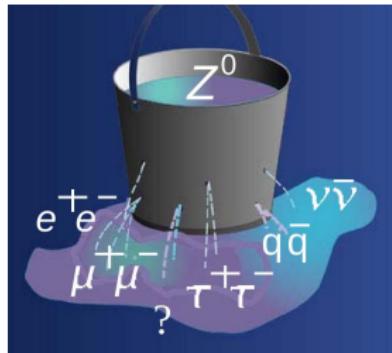
- Zerfallsprodukte müssen Ladung 0 haben
- $Z^0$  zerfällt in Teilchen-Antiteilchen-Paar
- Z.B.  $Z^0 \rightarrow e^+ e^-$

## Energie- und Impulserhaltung



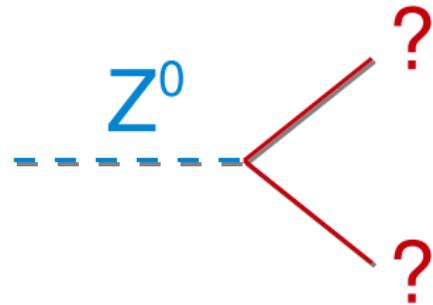
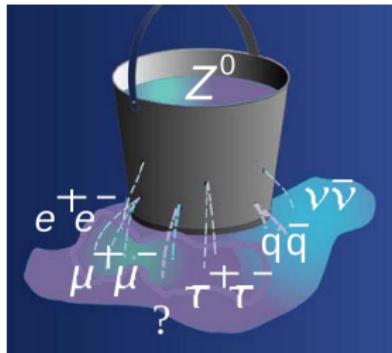
- Teilchen und Antiteilchen bewegen sich in entgegengesetzte Richtung
- Beide haben die gleiche Energie

# In welche Teilchen zerfällt das $Z^0$ ?



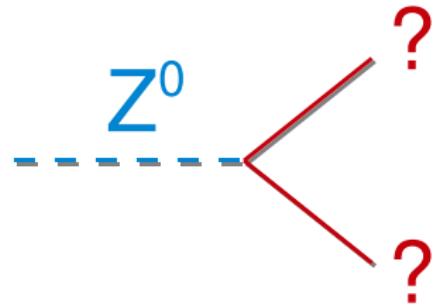
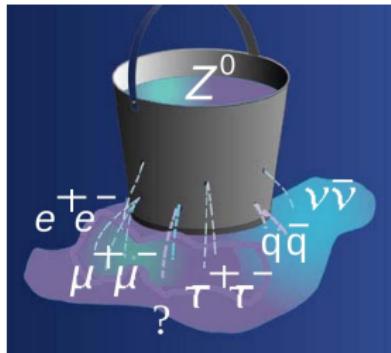
- Wasser kann durch verschiedene Löcher ausfließen

# In welche Teilchen zerfällt das $Z^0$ ?



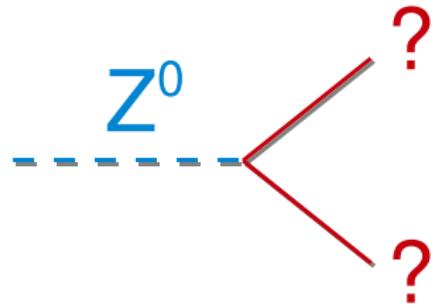
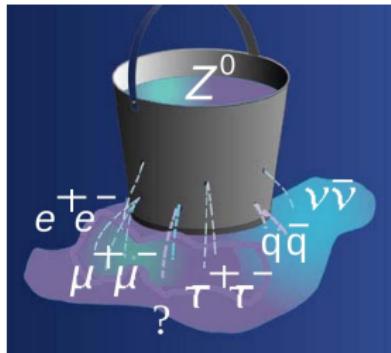
- Wasser kann durch verschiedene Löcher ausfließen
- $Z^0$  kann in verschiedene Teilchen-Antiteilchen-Paare (“Zerfallskanäle”) zerfallen

# In welche Teilchen zerfällt das $Z^0$ ?



- Wasser kann durch verschiedene Löcher ausfließen
- Für ein bestimmtes Molekül Loch nicht vorhersagbar
- $Z^0$  kann in verschiedene Teilchen-Antiteilchen-Paare (“Zerfallskanäle”) zerfallen
- Für ein bestimmtes  $Z^0$  Zerfallskanal nicht vorhersagbar

# In welche Teilchen zerfällt das $Z^0$ ?

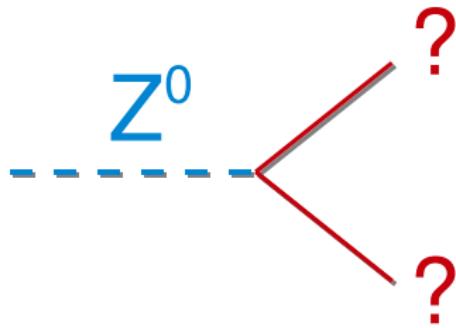


- Wasser kann durch verschiedene Löcher ausfließen
- Für ein bestimmtes Molekül Loch nicht vorhersagbar
- Verhältnis der Austrittsmengen  $\propto$  Größe der Löcher
- $Z^0$  kann in verschiedene Teilchen-Antiteilchen-Paare (“Zerfallskanäle”) zerfallen
- Für ein bestimmtes  $Z^0$  Zerfallskanal nicht vorhersagbar
- Verhältnis der Zerfallshäufigkeiten  $\propto$  Stärke der Kopplungen

# Unsere Aufgabe



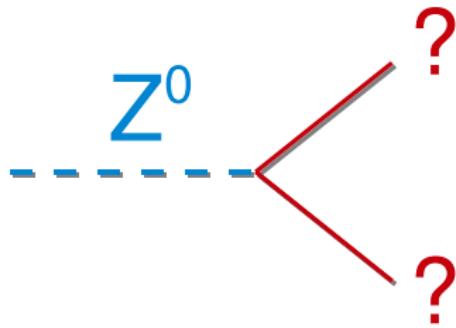
“Wie häufig zerfällt das  $Z^0$  über welchen Kanal?”



# Unsere Aufgabe



“Wie häufig zerfällt das  $Z^0$  über welchen Kanal?”



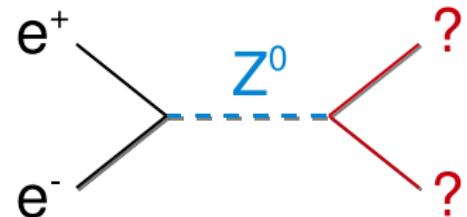
Wir betrachten vier Zerfallskanäle

- $Z^0 \rightarrow e^+ e^-$
- $Z^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$
- $Z^0 \rightarrow \tau^+ \tau^-$
- $Z^0 \rightarrow q\bar{q}$

# Woher bekommen wir die Daten?

## Large Electron Positron Collider (LEP)

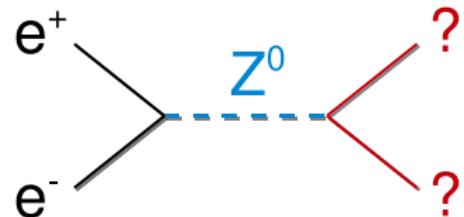
- $e^+e^-$ -Beschleuniger
- Vier große Experimente
  - ALEPH, Delphi, L3 und OPAL



# Woher bekommen wir die Daten?

## Large Electron Positron Collider (LEP)

- $e^+e^-$ -Beschleuniger
- Vier große Experimente
  - ALEPH, Delphi, L3 und OPAL

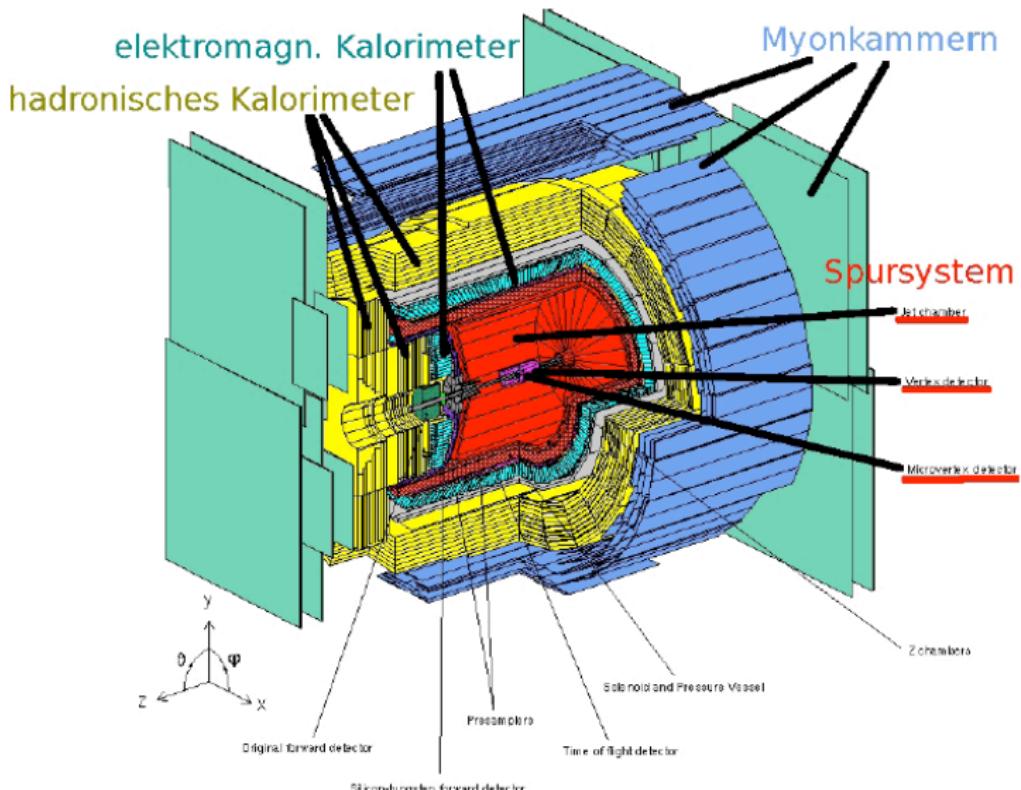


## Omni Purpose Apparatus at LEP (OPAL)

- Betrieb von 1989 bis 2000 am CERN
- Wichtige Aufgabe
  - Genaue Vermessung der  $Z^0$ -Zerfallsprodukte

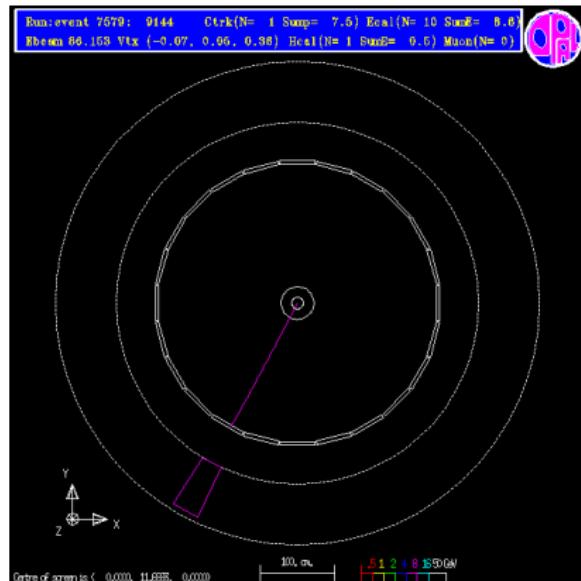


# Der OPAL-Detektor



# Was sehen wir denn nun im Detektor?

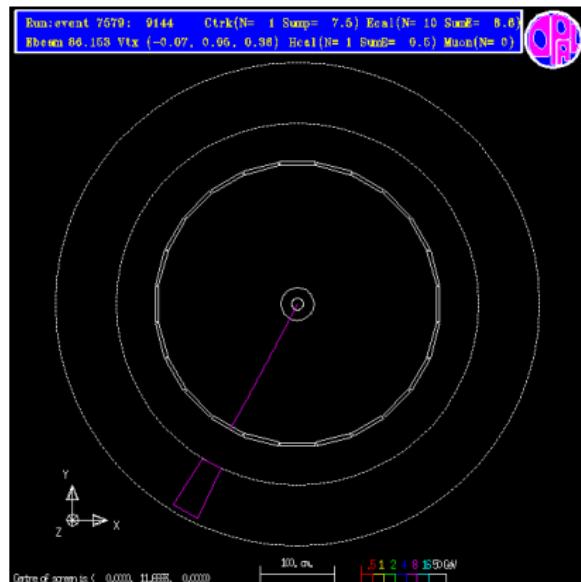
Beispiel Elektron: Sicht in den Detektor in Richtung Strahlachse



Frontalansicht

# Was sehen wir denn nun im Detektor?

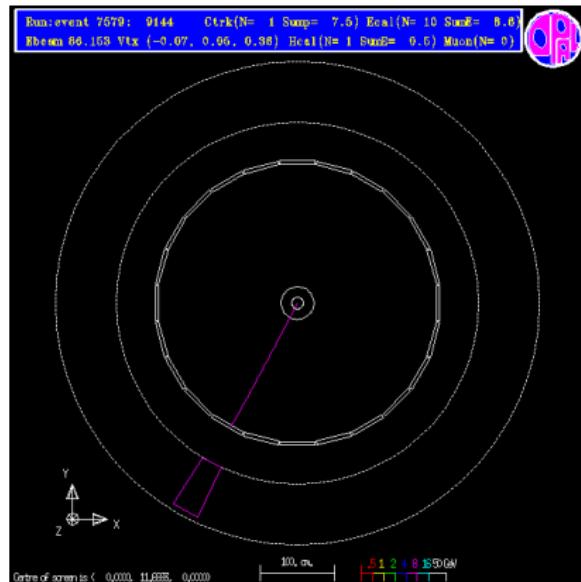
Beispiel Elektron: Sicht in den Detektor in Richtung Strahlachse



Frontalansicht

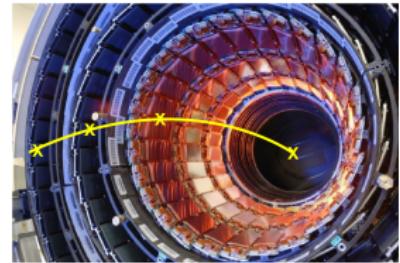
# Was sehen wir denn nun im Detektor?

Beispiel Elektron: Sicht in den Detektor in Richtung Strahlachse



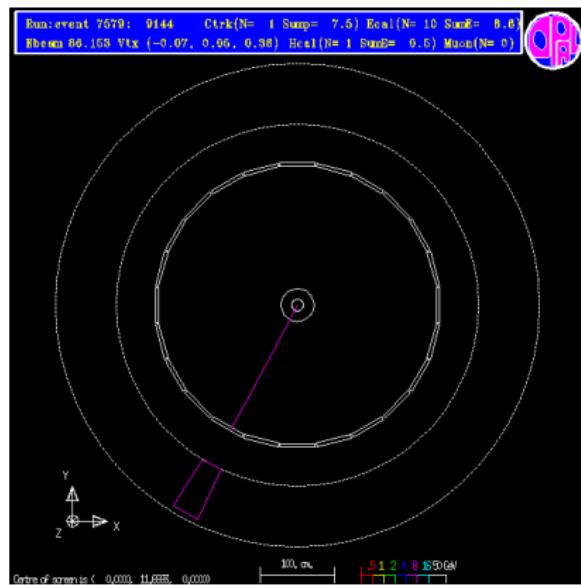
Frontalansicht

- ① Spur im Spurdetektor (—)

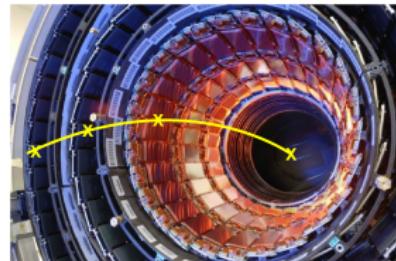


# Was sehen wir denn nun im Detektor?

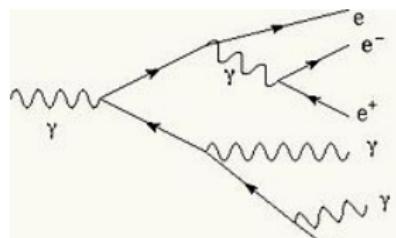
Beispiel Elektron: Sicht in den Detektor in Richtung Strahlachse



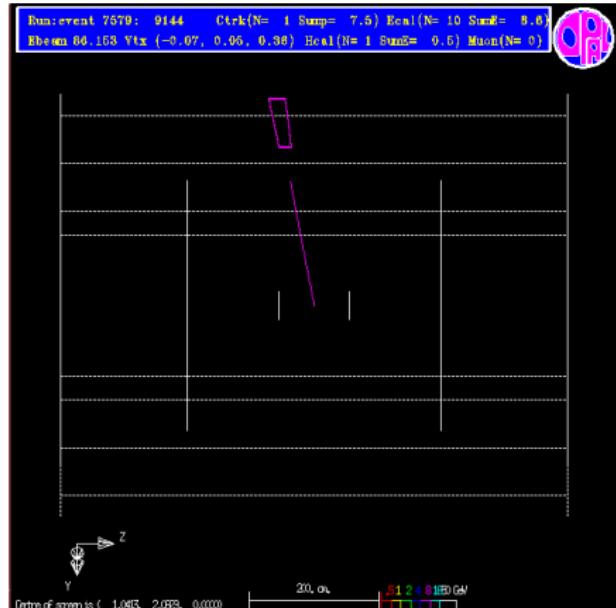
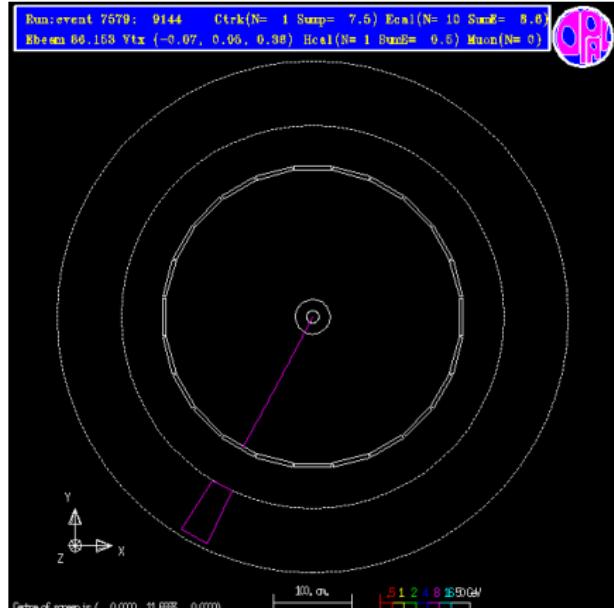
- ① Spur im Spurdetektor (—)



- ② Energie im elektromagnetischen Kalorimeter (□)



# Signatur eines Elektrons



# Eure Aufgabe

Untersucht die Ereignisbilder von  $Z^0$ -Zerfällen

- In welche Teilchen ist das  $Z^0$  zerfallen?
- Wie oft kommt welcher Zerfallskanal vor?
- Stimmt die Theorie?

# Eure Aufgabe

Untersucht die Ereignisbilder von  $Z^0$ -Zerfällen

- In welche Teilchen ist das  $Z^0$  zerfallen?
- Wie oft kommt welcher Zerfallskanal vor?
- Stimmt die Theorie?

Vorher schauen wir uns noch gemeinsam ein paar Beispiele an

# Was sieht man bei einem $Z^0$ -Zerfall?

# Was sieht man bei einem $Z^0$ -Zerfall?

## Ladungserhaltung

- $Z^0$  zerfällt in ein Teilchen-Antiteilchen-Paar
- Z. B.  $Z^0 \rightarrow e^+ e^-$

# Was sieht man bei einem $Z^0$ -Zerfall?

## Ladungserhaltung

- $Z^0$  zerfällt in ein Teilchen-Antiteilchen-Paar
- Z. B.  $Z^0 \rightarrow e^+ e^-$

## Energie- und Impulserhaltung

- Teilchen und Antiteilchen bewegen sich in entgegengesetzte Richtung
- Beide haben die gleiche Energie

# Was sieht man bei einem $Z^0$ -Zerfall?

## Ladungserhaltung

- $Z^0$  zerfällt in ein Teilchen-Antiteilchen-Paar
- Z. B.  $Z^0 \rightarrow e^+ e^-$

## Energie- und Impulserhaltung

- Teilchen und Antiteilchen bewegen sich in entgegengesetzte Richtung
- Beide haben die gleiche Energie



# Was sieht man bei einem $Z^0$ -Zerfall?

## Ladungserhaltung

- $Z^0$  zerfällt in ein Teilchen-Antiteilchen-Paar
- Z. B.  $Z^0 \rightarrow e^+ e^-$

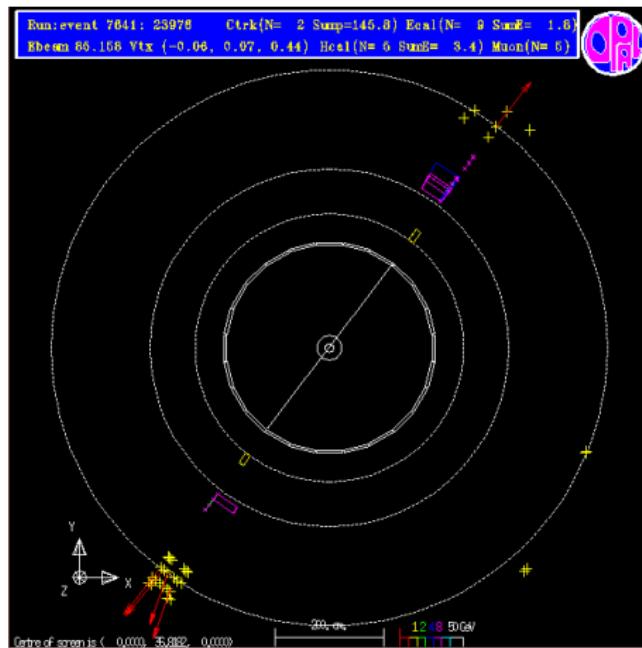
## Energie- und Impulserhaltung

- Teilchen und Antiteilchen bewegen sich in entgegengesetzte Richtung
- Beide haben die gleiche Energie



Es werden die Zerfallsprodukte und nicht das  $Z^0$  direkt beobachtet

$$Z^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$$



$Z^0 \rightarrow q\bar{q}$

$$Z^0 \rightarrow q\bar{q}$$

## Jets

- Energieriches Quark erzeugt Bündel von Teilchen ("Jet")



- Hauptsächlich Hadronen

$$Z^0 \rightarrow q\bar{q}$$

## Jets

- Energieriches Quark erzeugt Bündel von Teilchen ("Jet")



- Hauptsächlich Hadronen
  - Spuren im Spurdetektor

$$Z^0 \rightarrow q\bar{q}$$

## Jets

- Energieriches Quark erzeugt Bündel von Teilchen ("Jet")



- Hauptsächlich Hadronen
  - Spuren im Spurdetektor
  - Energie im elektromagnetischen und hadronischen Kalorimeter

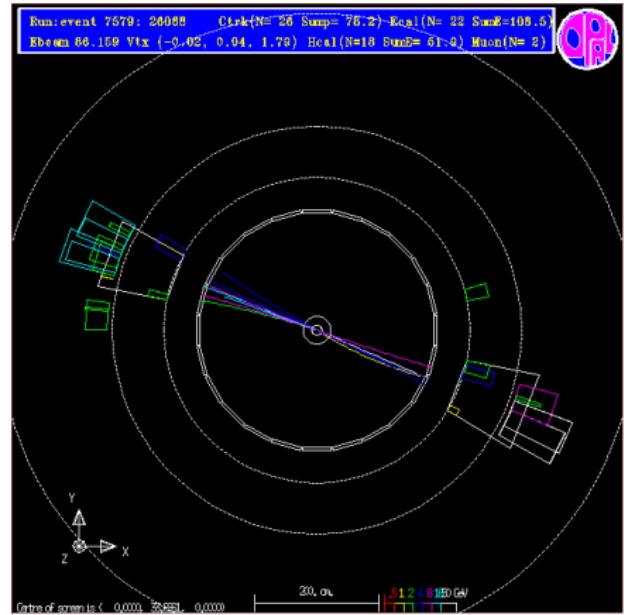
$$Z^0 \rightarrow q\bar{q}$$

## Jets

- Energieriches Quark erzeugt Bündel von Teilchen ("Jet")



- Hauptsächlich Hadronen
  - Spuren im Spurdetektor
  - Energie im elektromagnetischen und hadronischen Kalorimeter



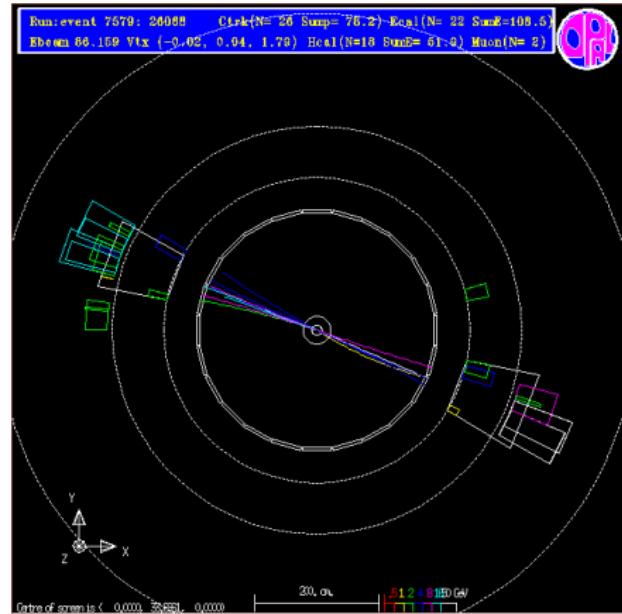
$$Z^0 \rightarrow q\bar{q}$$

## Jets

- Energierieiches Quark erzeugt Bündel von Teilchen ("Jet")



- Hauptsächlich Hadronen
  - Spuren im Spurdetektor
  - Energie im elektromagnetischen und hadronischen Kalorimeter



Quarks kann man nicht direkt beobachten:  $Z^0 \rightarrow q\bar{q} \rightarrow \text{Jets}$

$$Z^0 \rightarrow \tau^+ \tau^-$$

- $\tau$  selbst sind kurzlebig
  - Zerfall in leichtere Teilchen
- ⇒ Auch  $\tau$  kann man nur indirekt beobachten!

$$Z^0 \rightarrow \tau^+ \tau^-$$

- $\tau$  selbst sind kurzlebig
  - Zerfall in leichtere Teilchen
- ⇒ Auch  $\tau$  kann man nur indirekt beobachten!

Mögliche  $\tau$ -Zerfälle

$$Z^0 \rightarrow \tau^+ \tau^-$$

- $\tau$  selbst sind kurzlebig
  - Zerfall in leichtere Teilchen
- ⇒ Auch  $\tau$  kann man nur indirekt beobachten!

### Mögliche $\tau$ -Zerfälle

- $\tau \rightarrow e + X$

$$Z^0 \rightarrow \tau^+ \tau^-$$

- $\tau$  selbst sind kurzlebig
  - Zerfall in leichtere Teilchen
- ⇒ Auch  $\tau$  kann man nur indirekt beobachten!

### Mögliche $\tau$ -Zerfälle

- $\tau \rightarrow e + X$
- $\tau \rightarrow \mu + X$

$$Z^0 \rightarrow \tau^+ \tau^-$$

- $\tau$  selbst sind kurzlebig
  - Zerfall in leichtere Teilchen
- ⇒ Auch  $\tau$  kann man nur indirekt beobachten!

### Mögliche $\tau$ -Zerfälle

- $\tau \rightarrow e + X$
- $\tau \rightarrow \mu + X$
- $\tau \rightarrow \text{Jet } (1h^\pm) + X$

$$Z^0 \rightarrow \tau^+ \tau^-$$

- $\tau$  selbst sind kurzlebig
  - Zerfall in leichtere Teilchen
- ⇒ Auch  $\tau$  kann man nur indirekt beobachten!

### Mögliche $\tau$ -Zerfälle

- $\tau \rightarrow e + X$
- $\tau \rightarrow \mu + X$
- $\tau \rightarrow \text{Jet } (1h^\pm) + X$
- $\tau \rightarrow \text{Jet } (3h^\pm) + X$

$$Z^0 \rightarrow \tau^+ \tau^-$$

- $\tau$  selbst sind kurzlebig
  - Zerfall in leichtere Teilchen
- ⇒ Auch  $\tau$  kann man nur indirekt beobachten!

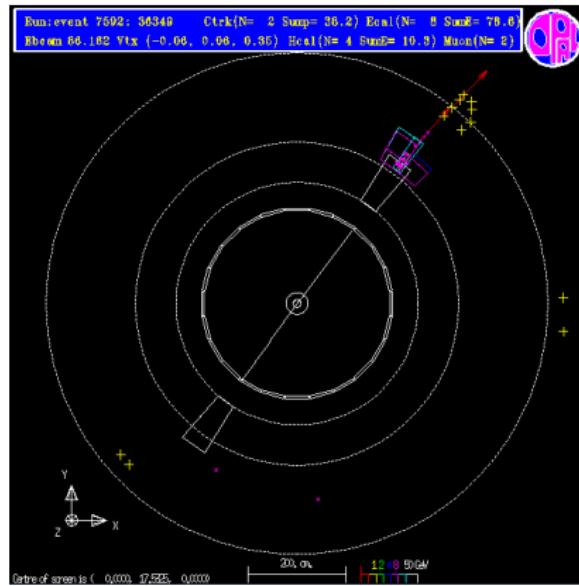
### Mögliche $\tau$ -Zerfälle

- $\tau \rightarrow e + X$
- $\tau \rightarrow \mu + X$
- $\tau \rightarrow \text{Jet } (1h^\pm) + X$
- $\tau \rightarrow \text{Jet } (3h^\pm) + X$

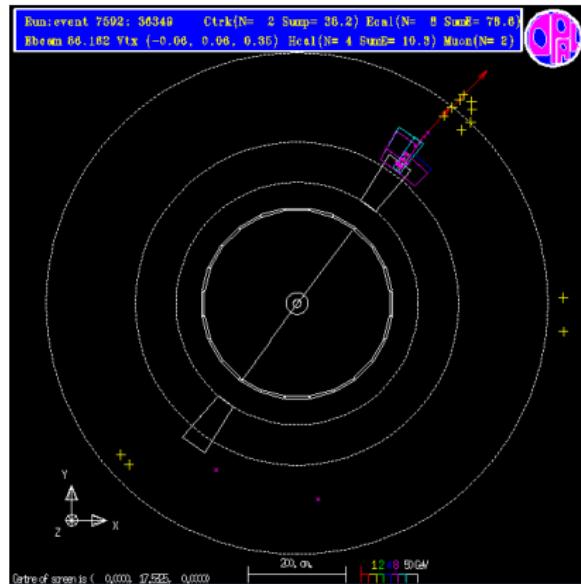


Beliebige Kombination möglich für  $Z^0 \rightarrow \tau^+ \tau^-$

# Zwei mögliche $Z^0 \rightarrow \tau^+\tau^-$ Ereignisse

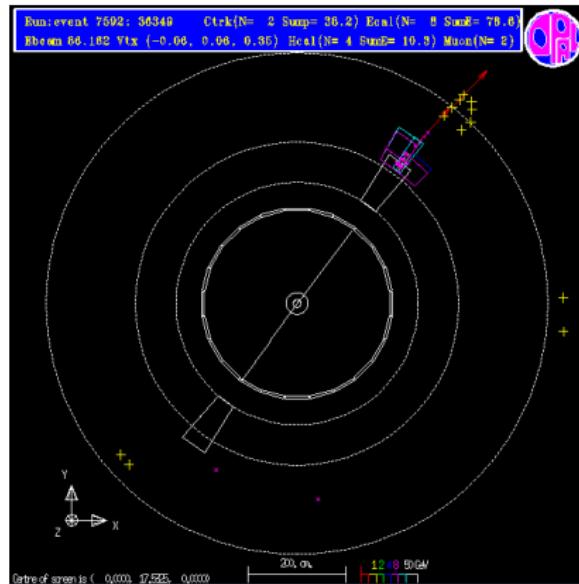


# Zwei mögliche $Z^0 \rightarrow \tau^+ \tau^-$ Ereignisse

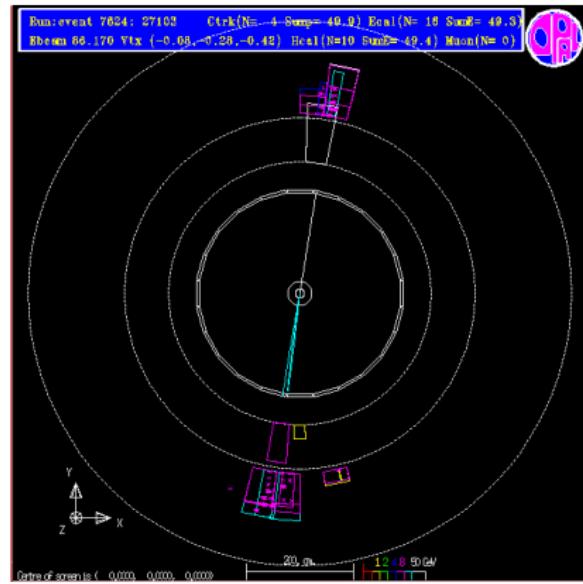


- ①  $\tau \rightarrow e + X$
- ②  $\tau \rightarrow \mu + X$

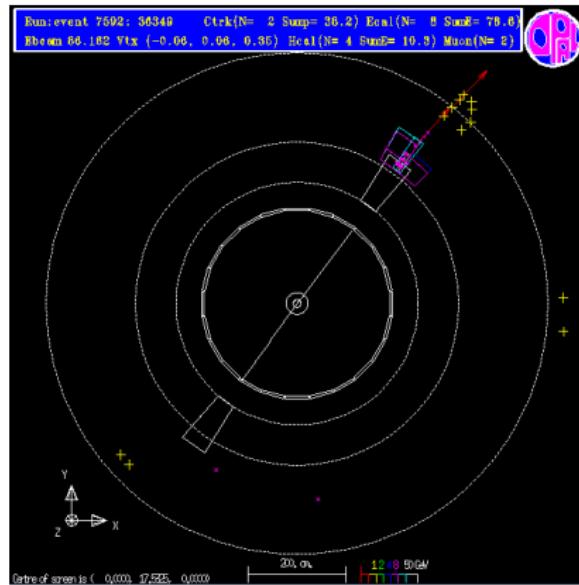
# Zwei mögliche $Z^0 \rightarrow \tau^+\tau^-$ Ereignisse



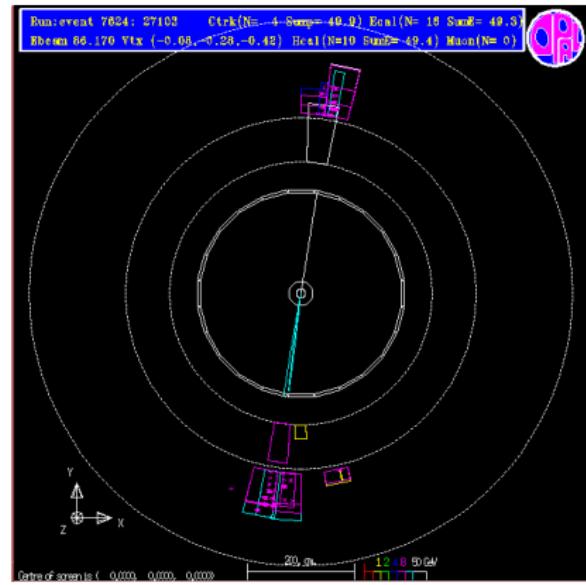
- 1  $\tau \rightarrow e + X$
- 2  $\tau \rightarrow \mu + X$



# Zwei mögliche $Z^0 \rightarrow \tau^+ \tau^-$ Ereignisse



- ①  $\tau \rightarrow e + X$
- ②  $\tau \rightarrow \mu + X$



- ①  $\tau \rightarrow \text{Jet } (1h^\pm) + X$
- ②  $\tau \rightarrow \text{Jet } (3h^\pm) + X$

# Zusammenfassung der $Z^0$ -Zerfälle

$$Z^0 \rightarrow e^+ e^-$$

- Je eine Spur und Signal im elektromagnetischen Kalorimeter

$$Z^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$$

- Je eine Spur, Signale in beiden Kalorimetern und Myonkammern

$$Z^0 \rightarrow q\bar{q}$$

- Je Jets (Spuren und Signale in beiden Kalorimetern, manchmal  $\mu$ )

Signale in Muon-Kammern

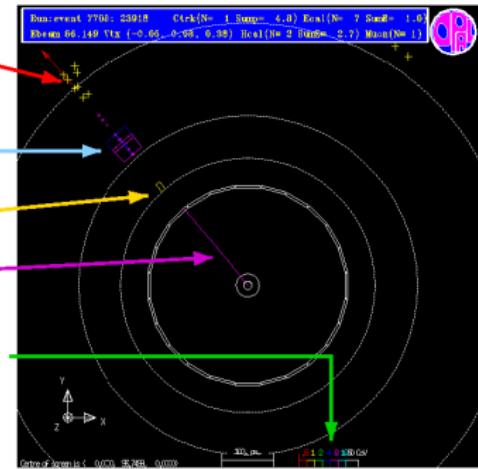
Signal im hadronischen Kalorimeter

Signal im elektromagnetischen Kalorimeter

Spur eines geladenen Teilchens

Farocode der Teilchenenergie :

< 0.5 GeV
0.5 - 1.0 GeV
1.0 - 2.0 GeV
2.0 - 4.0 GeV
4.0 - 8.0 GeV
8.0 - 16.0 GeV
> 16 GeV



$$Z^0 \rightarrow \tau^+ \tau^-$$

- Je  $e$  oder  $\mu$  oder Jet (1h oder 3h)

# Teilchenphysik, wir kommen!

- Wir
  - [arne-rasmus.draeger@desy.de](mailto:arne-rasmus.draeger@desy.de)  
(MC Vermittler)
  - [matthias.schroeder@desy.de](mailto:matthias.schroeder@desy.de)  
(MC Vermittler)
  - [anna-lotta.geyssel@desy.de](mailto:anna-lotta.geyssel@desy.de)  
(MC Organisatorin HH)
- Netzwerk Teilchenwelt
  - [www.teilchenwelt.de](http://www.teilchenwelt.de)
  - [www.facebook.com/  
teilchenwelt](http://www.facebook.com/teilchenwelt)
- TV & Radio
  - quarks&co
  - alphaCentauri
  - Deutschlandfunk
- Datenanalyse
  - [www.physicsmasterclasses.org](http://www.physicsmasterclasses.org)
- Einführung Teilchenphysik
  - [www.desy.de/Kworkquark](http://www.desy.de/Kworkquark)
  - [www.solstice.de/  
grundl\\_d\\_tph](http://www.solstice.de/grundl_d_tph)
  - [www.teilchenphysik.de](http://www.teilchenphysik.de)
  - [public.web.cern.ch/public](http://public.web.cern.ch/public)
  - [www.interactions.org](http://www.interactions.org)
  - [www.colorado.edu/  
physics/2000](http://www.colorado.edu/physics/2000)
- LHC
  - [www.weltmaschine.de](http://www.weltmaschine.de)
  - [www.lhc-facts.ch](http://www.lhc-facts.ch)