

Die Bausteine des Universums

Masterclass Teilchenphysik — Carl-von-Ossietzky-Gymnasium Hamburg

Arne Dräger, Matthias Schröder

29. Mai 2013



NETZWERK
TEILCHENWELT



Universität Hamburg
DER FORSCHUNG | DER LEHRE | DER BILDUNG

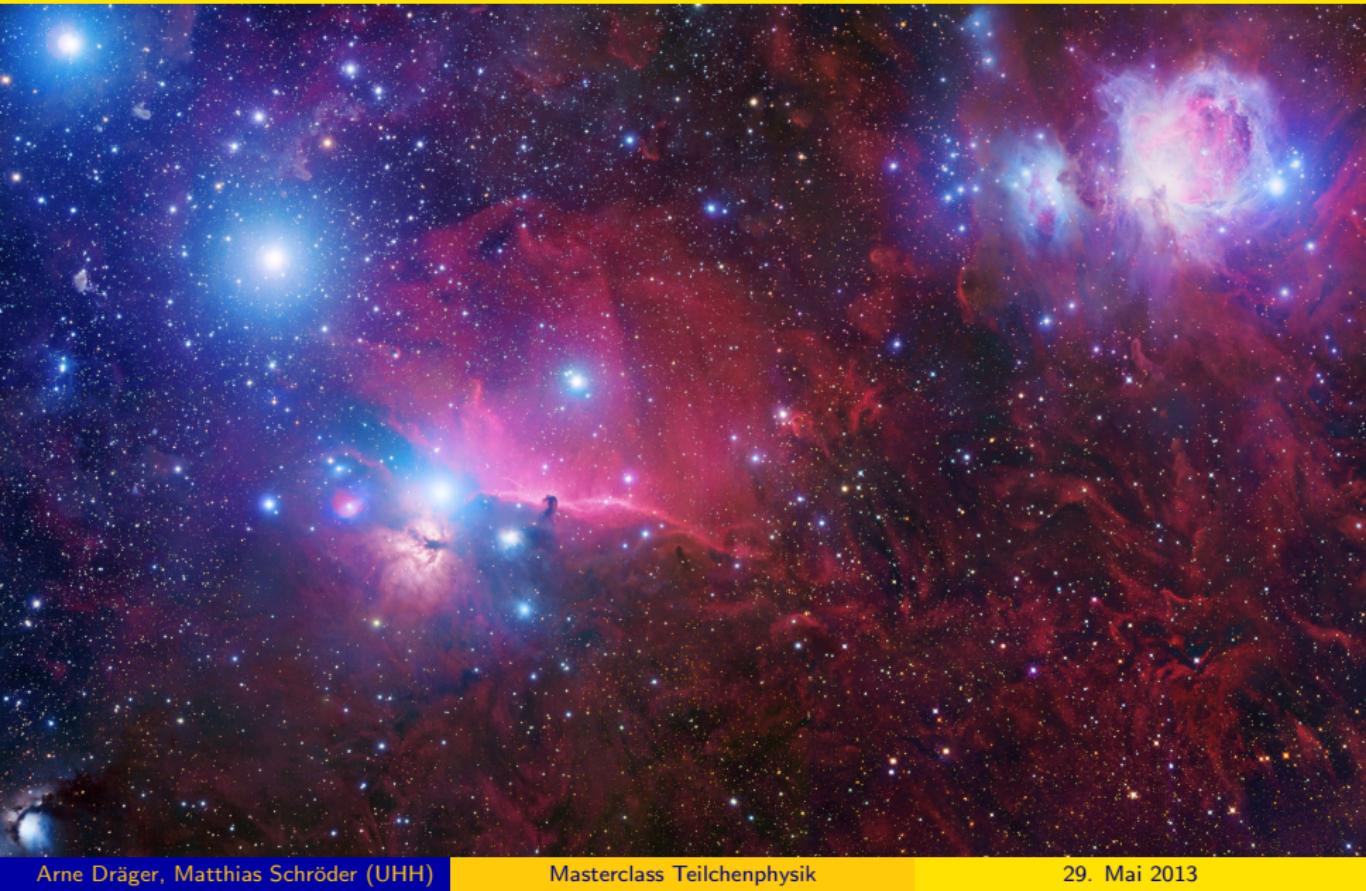


FRAGEN



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?

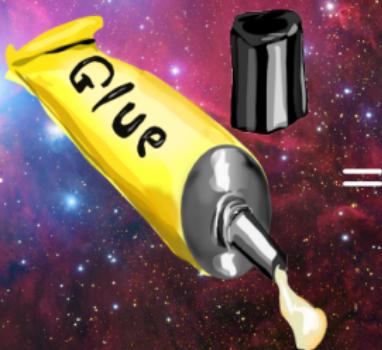
Grundbausteine der Materie

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?

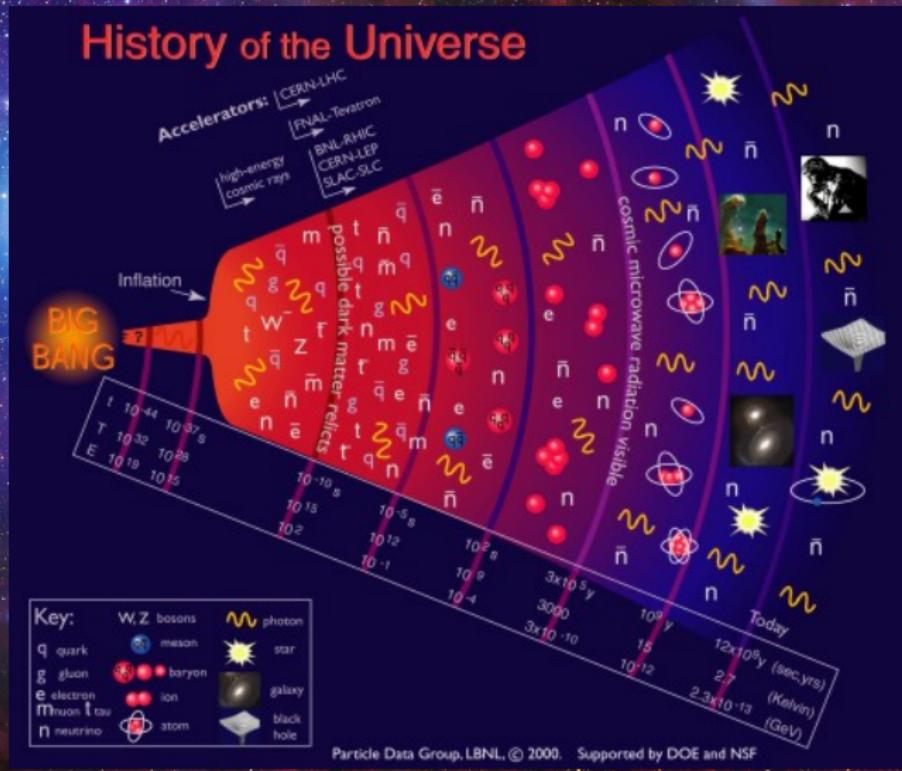
Wechselwirkungen

Wie ist das Universum entstanden?

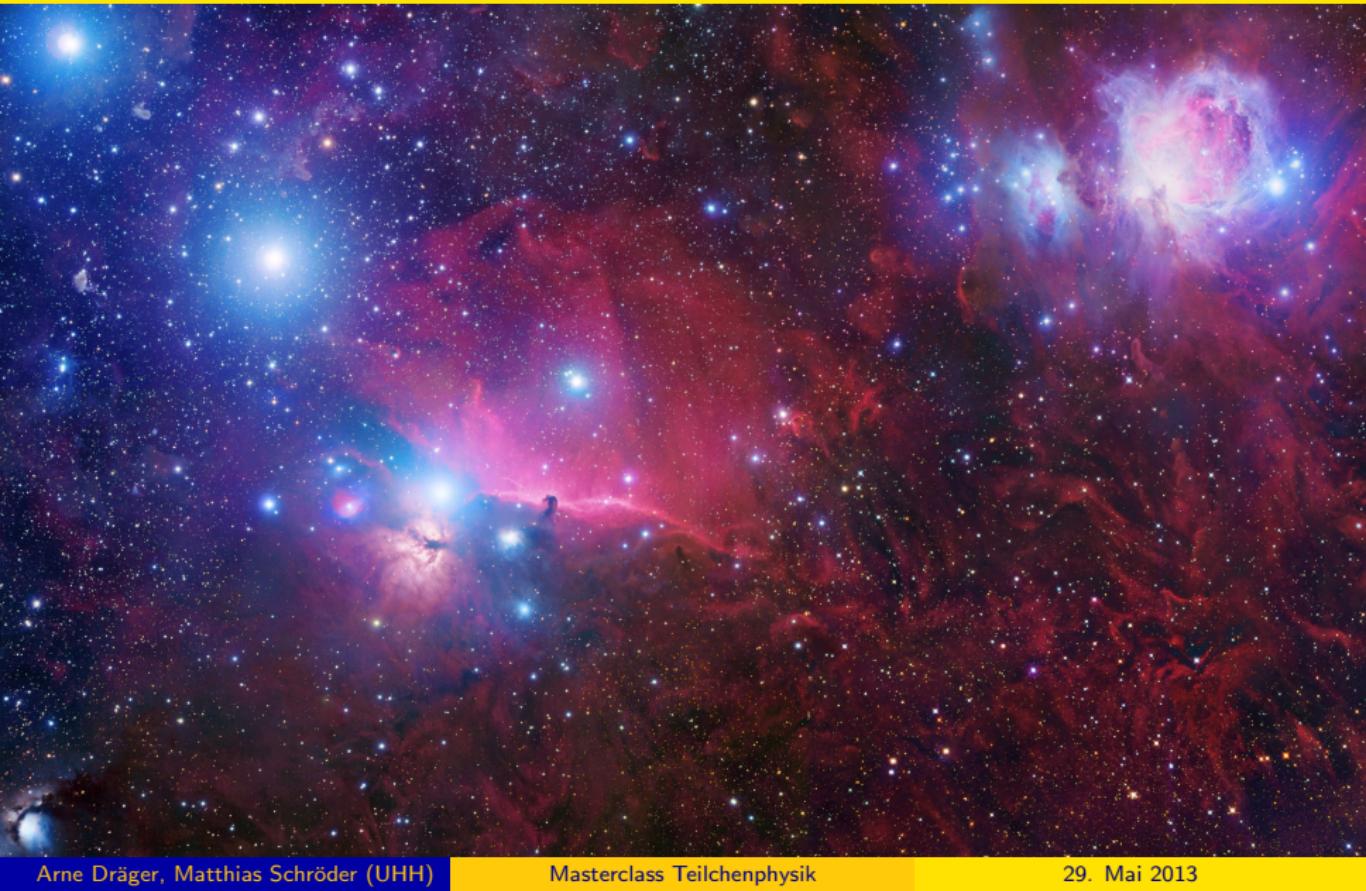
Zeitliche Entwicklung

Was sind die fundamentalen Bausteine
und Kräfte im Universum?

Unser Bild vom Universum



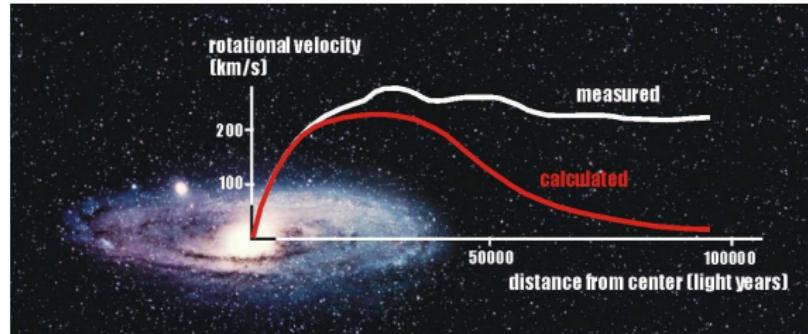
Unser Bild vom Universum



Unser Bild vom Universum

Rotation von Galaxien

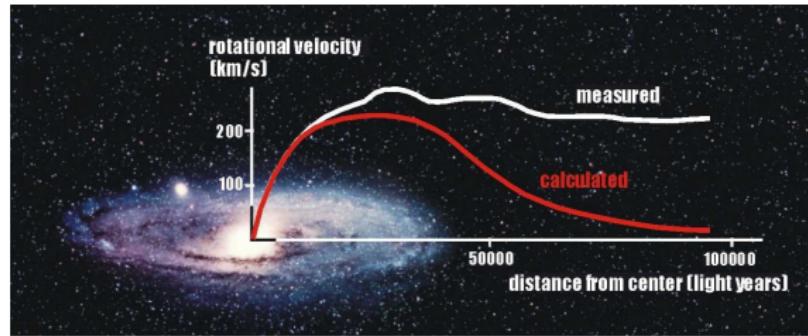
- Zu wenig sichtbare Materie



Unser Bild vom Universum

Rotation von Galaxien

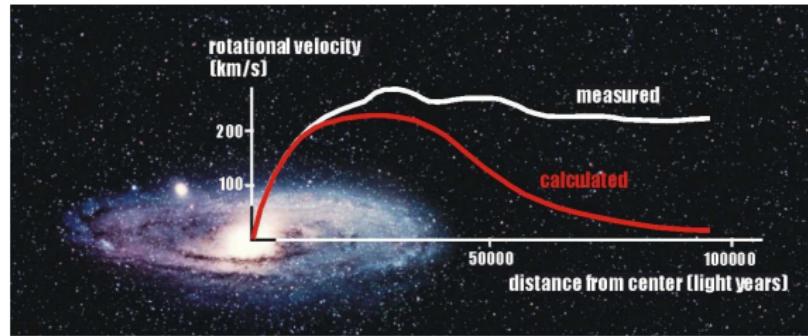
- Zu wenig sichtbare Materie
- Dunkle Materie



Unser Bild vom Universum

Rotation von Galaxien

- Zu wenig sichtbare Materie
- Dunkle Materie



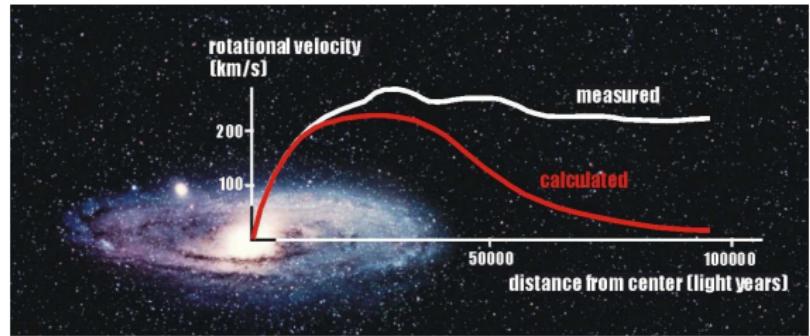
Expansion des Universums



Unser Bild vom Universum

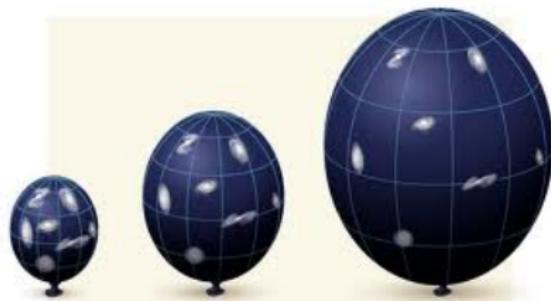
Rotation von Galaxien

- Zu wenig sichtbare Materie
- Dunkle Materie



Expansion des Universums

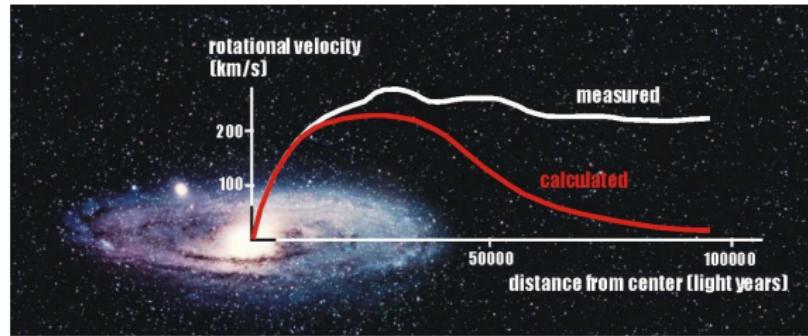
- Beschleunigte Expansion



Unser Bild vom Universum

Rotation von Galaxien

- Zu wenig sichtbare Materie
- Dunkle Materie

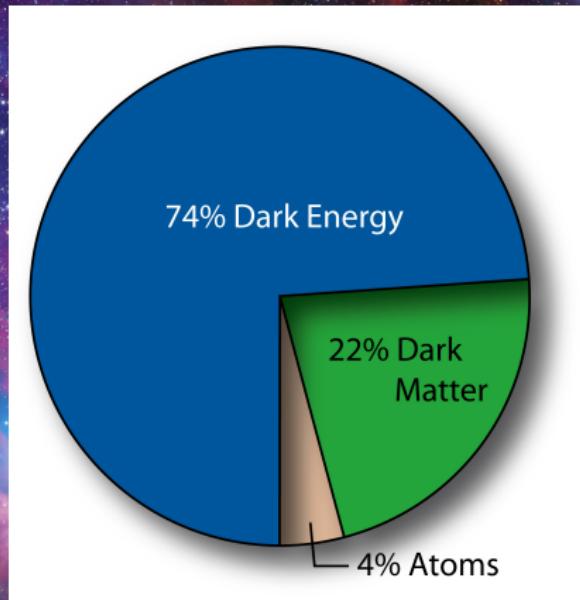


Expansion des Universums

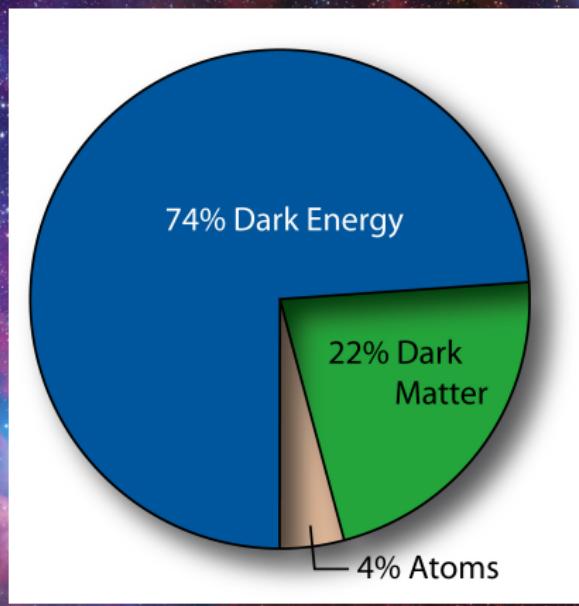
- Beschleunigte Expansion
- Dunkle Energie



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?

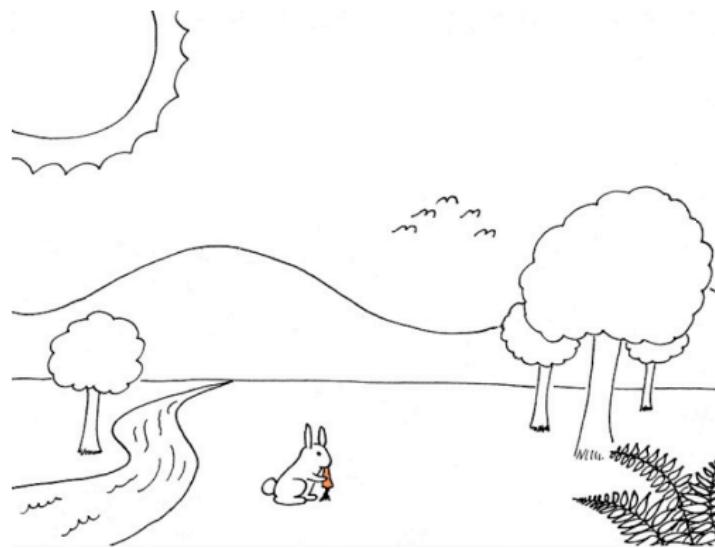
Alle zusammen

Regeln

FRAGEN stellen!

Wie erforscht man denn das Universum?

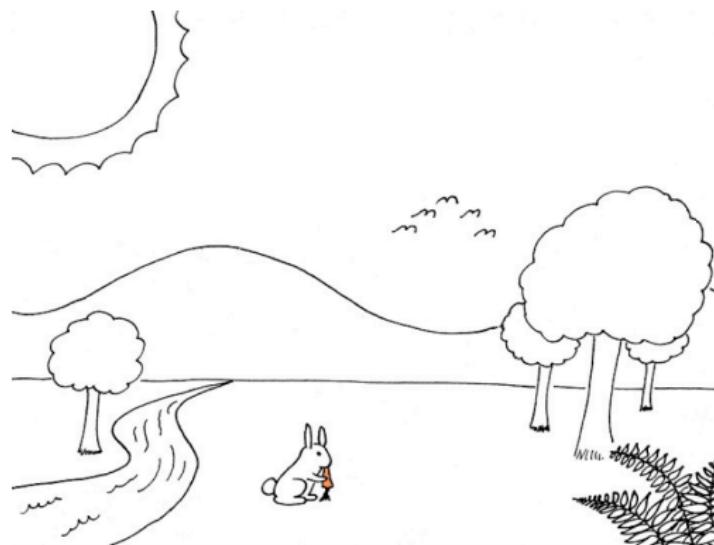
oder: Wie arbeiten Teilchenphysiker?



Wie erforscht man denn das Universum?

oder: Wie arbeiten Teilchenphysiker?

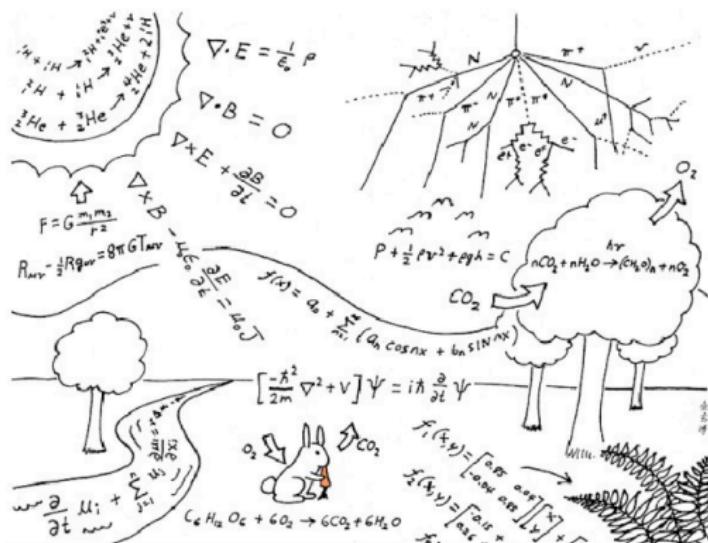
Theoretischer Physiker



Entwickelt Modelle

Wie erforscht man denn das Universum?

oder: Wie arbeiten Teilchenphysiker?



Theoretischer Physiker

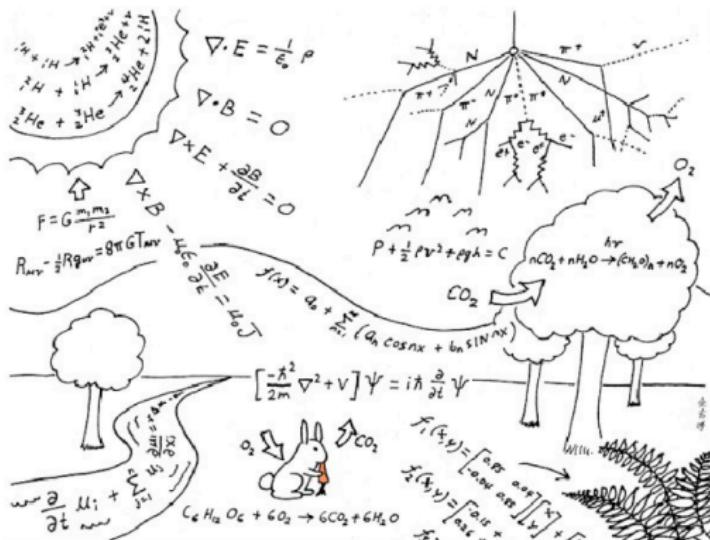


Entwickelt Modelle

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

Wie erforscht man denn das Universum?

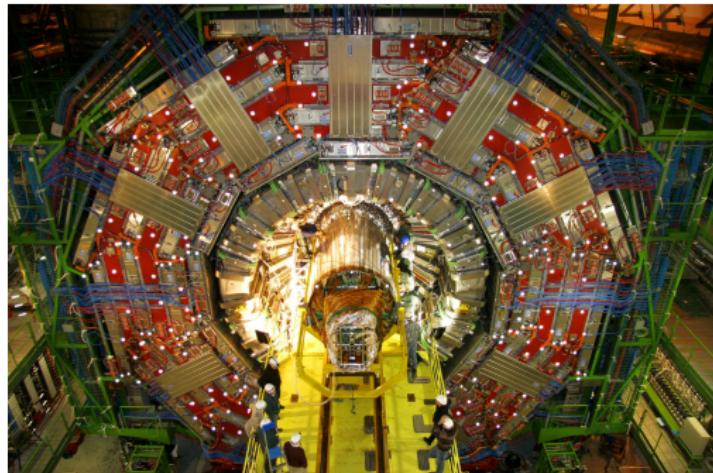
oder: Wie arbeiten Teilchenphysiker?



Wie erforscht man denn das Universum?

oder: Wie arbeiten Teilchenphysiker?

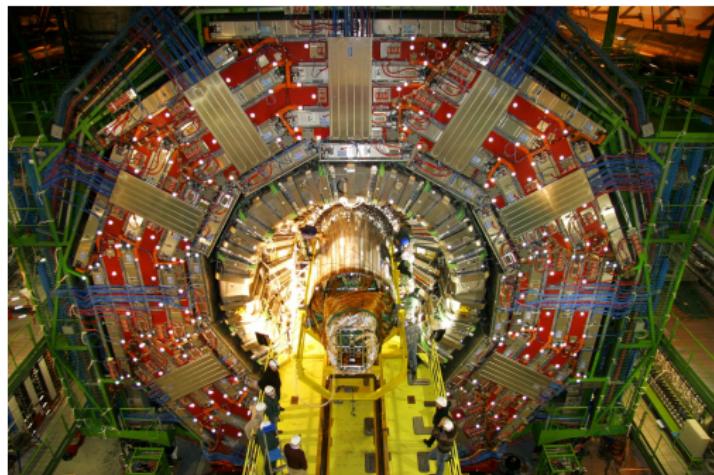
Experimentalphysiker



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?

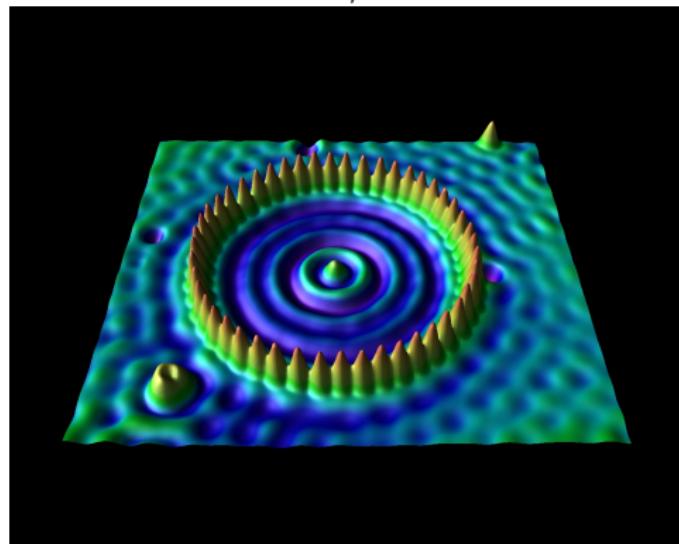
=0,01 m
Kristall
Crystal

1/10.000.000

10^{-9} m
Molekül
Molecule

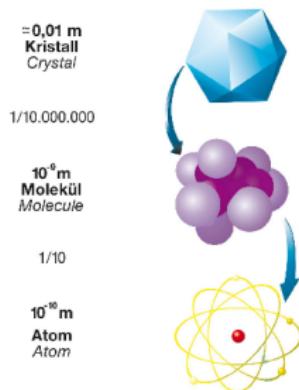


Moleküle $\approx 10^{-9}$ m, Atome $\approx 10^{-10}$ m

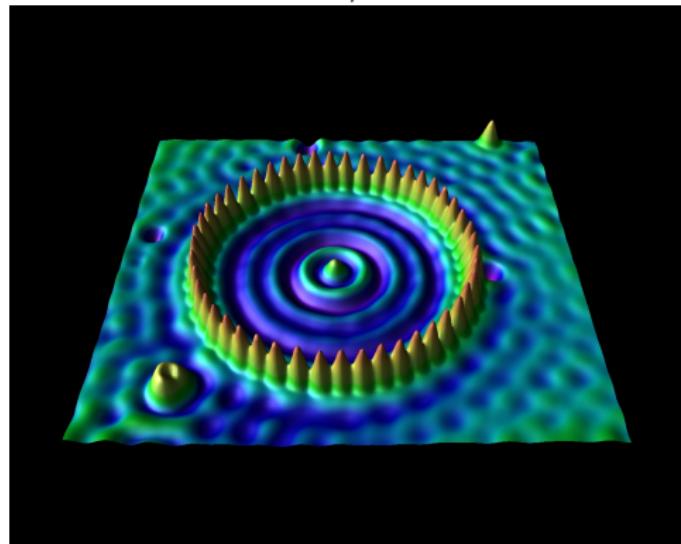


Atome sind Bausteine für alle makroskopischen Objekte

Wie groß sind Elementarteilchen?

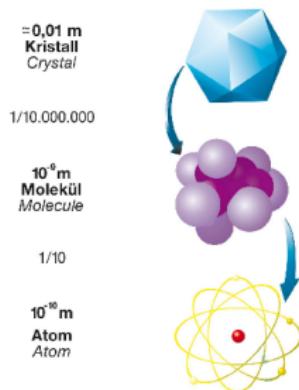


Moleküle $\approx 10^{-9}$ m, Atome $\approx 10^{-10}$ m



Atome sind Bausteine für alle makroskopischen Objekte

Wie groß sind Elementarteilchen?

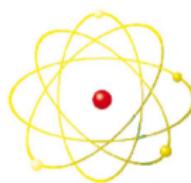


Wie groß sind 10^{-10} m ?



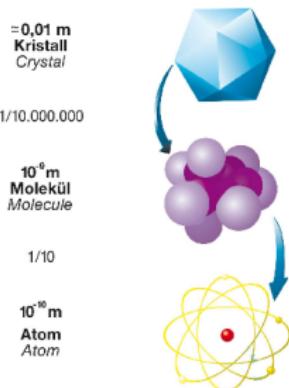
Kristall

⋮



Atom

Wie groß sind Elementarteilchen?



Wie groß sind 10^{-10} m ?



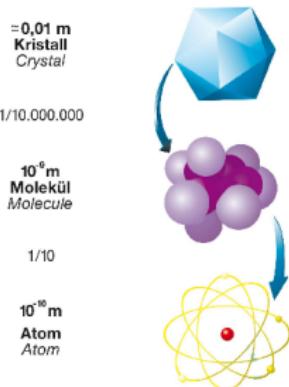
Kristall



Atom



Wie groß sind Elementarteilchen?



Wie groß sind 10^{-10} m?

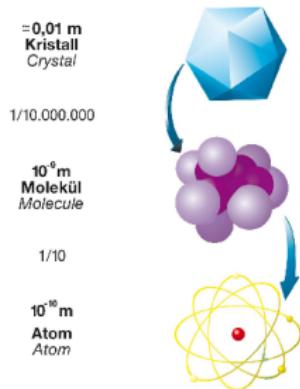


Kristall

Atom

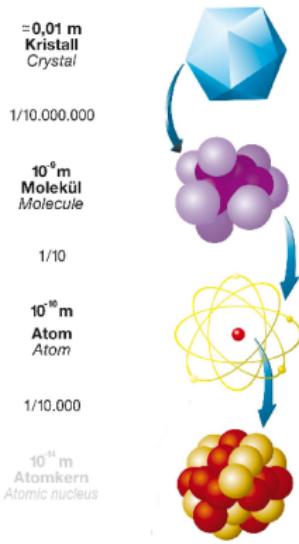


Wie groß sind Elementarteilchen?



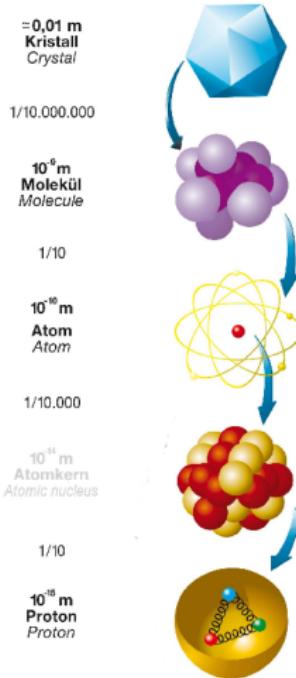
Wir schauen genauer hin...

Wie groß sind Elementarteilchen?



Wir schauen genauer hin...

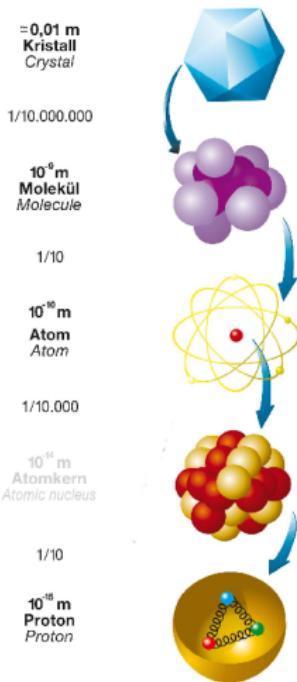
Wie groß sind Elementarteilchen?



Wir schauen genauer hin...

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

Wie groß sind Elementarteilchen?

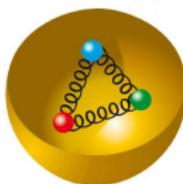


Wie groß sind 10^{-15} m ?



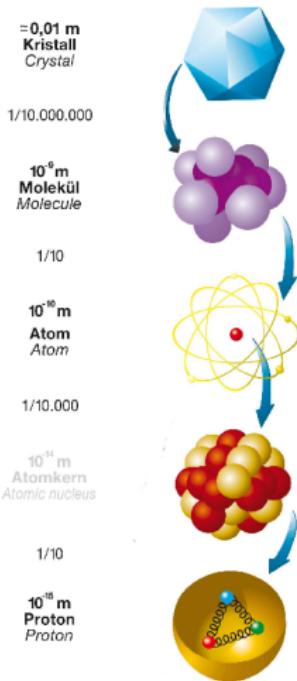
Kristall

⋮

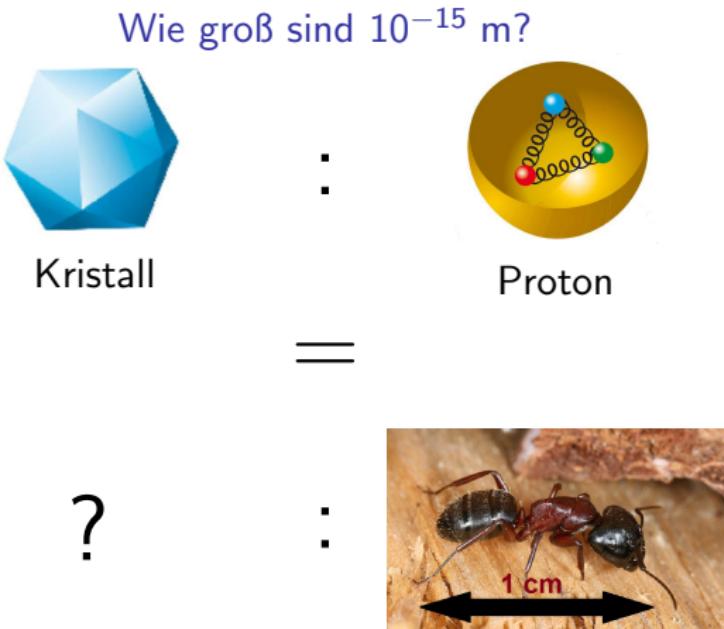


Proton

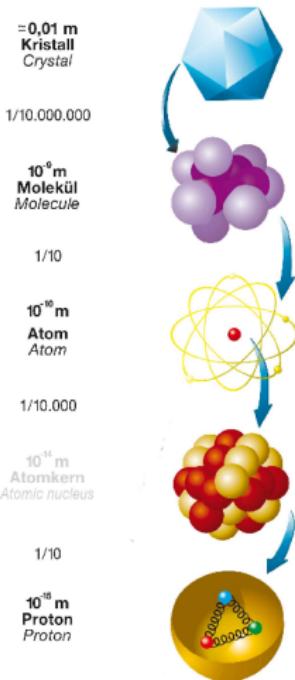
Wie groß sind Elementarteilchen?



Wie groß sind 10^{-15} m?



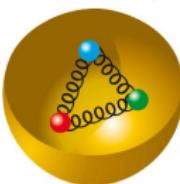
Wie groß sind Elementarteilchen?



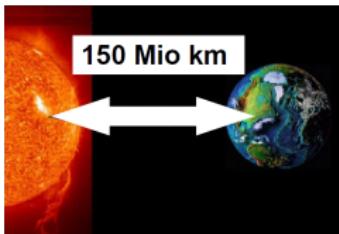
Wie groß sind 10^{-15} m ?



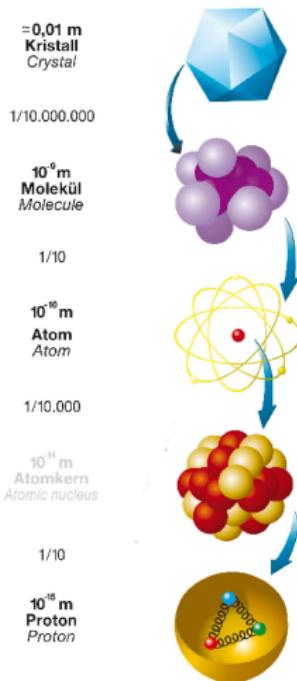
Kristall



Proton

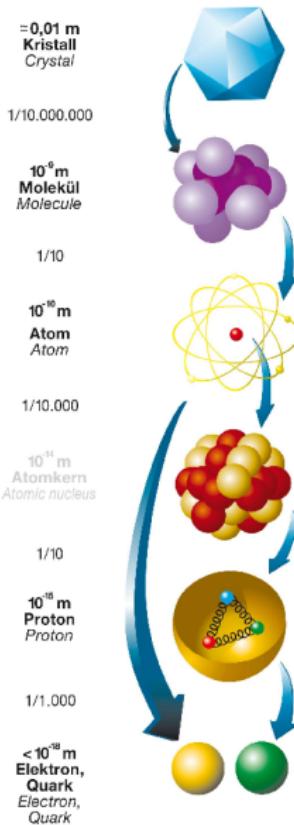


Wie groß sind Elementarteilchen?



Wir schauen genauer hin...

Wie groß sind Elementarteilchen?



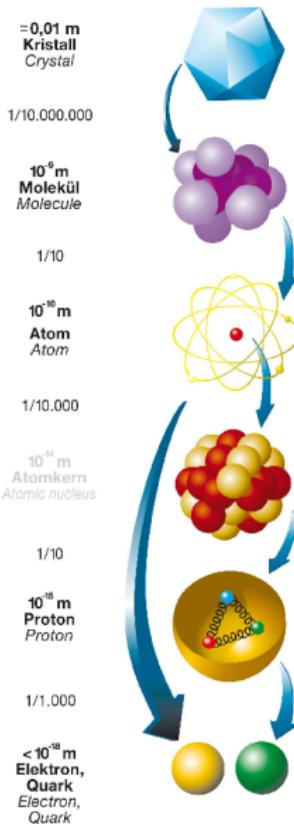
Wir schauen genauer hin...

Quarks, Elektronen

Elementarteilchen

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

Wie groß sind Elementarteilchen?



Wir schauen genauer hin...

Quarks, Elektronen

Elementarteilchen

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

Sichtbare Materie

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

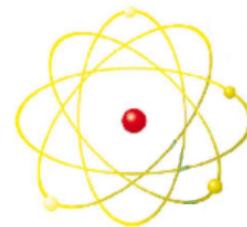
Atome

Sichtbare Materie

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

Atome

- Atomhülle
- Atomkern

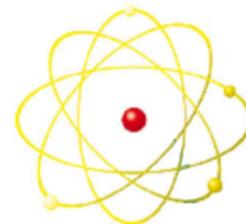


Sichtbare Materie

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

Atome

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

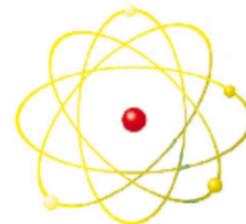
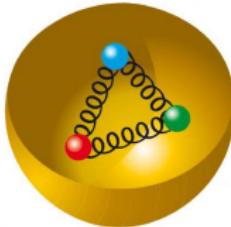


Sichtbare Materie

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

Atome

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

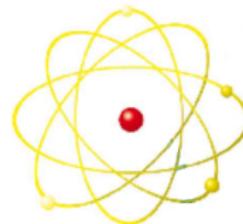
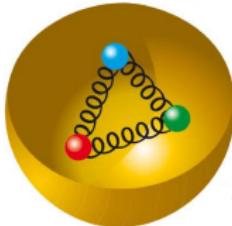


Sichtbare Materie

- 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: $Q = 0$

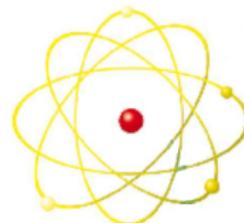
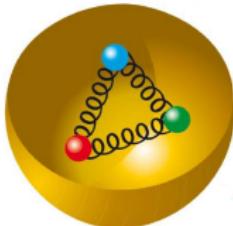


Sichtbare Materie

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

Atome

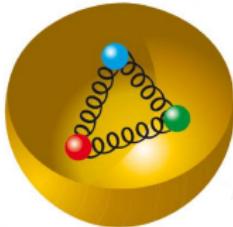
- Atomhülle
 - Elektronen: $Q = -1$
- Atomkern
 - Protonen: $Q = +1$
 - 2 up quarks $Q = +2/3$
 - 1 down quark $Q = -1/3$
 - Neutronen: $Q = 0$
 - 1 up quark $Q = +2/3$
 - 2 down quarks $Q = -1/3$



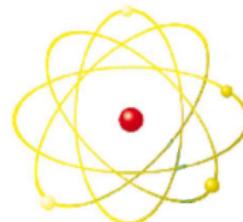
Sichtbare Materie

- 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: β -Zerfall

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

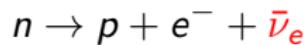
Problem: keine Energieerhaltung!

Sichtbare Materie

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



Neutron ist instabil: β -Zerfall



1932: Neutrino

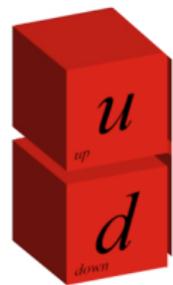
W. Pauli

Sichtbare Materie

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

4 Elementarteilchen

Quarks



Leptons

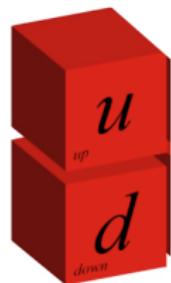


Sichtbare Materie

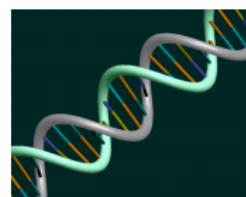
- Woraus besteht die sichtbare Welt?
- Woraus bestehen wir?

4 Elementarteilchen

Quarks



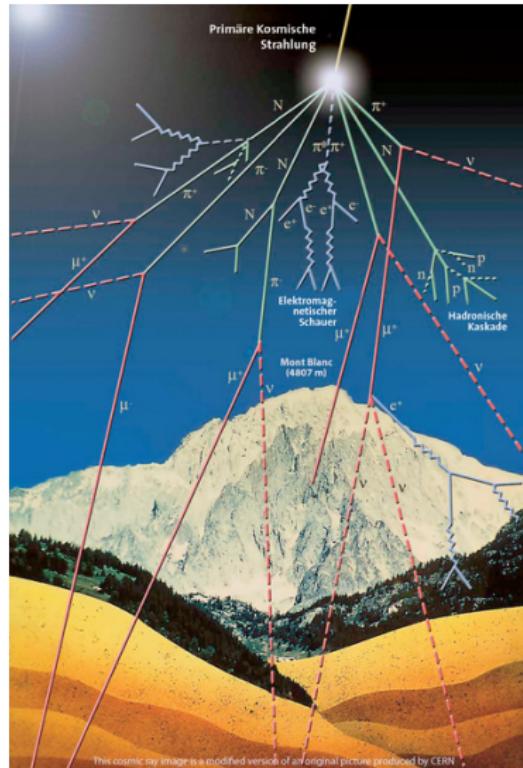
Leptons



zur Beschreibung der sichtbaren Materie!

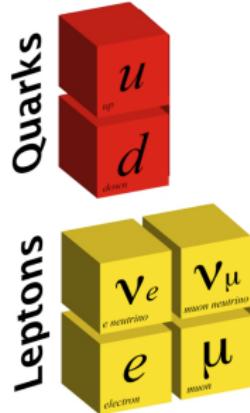
Gibt es noch weitere Elementarteilchen?

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

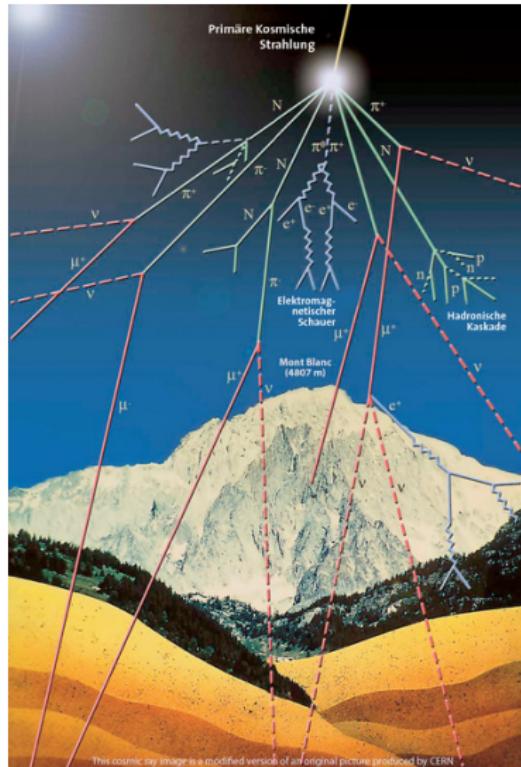


Gibt es noch weitere Elementarteilchen?

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



Myon μ^-
"Schweres Elektron"



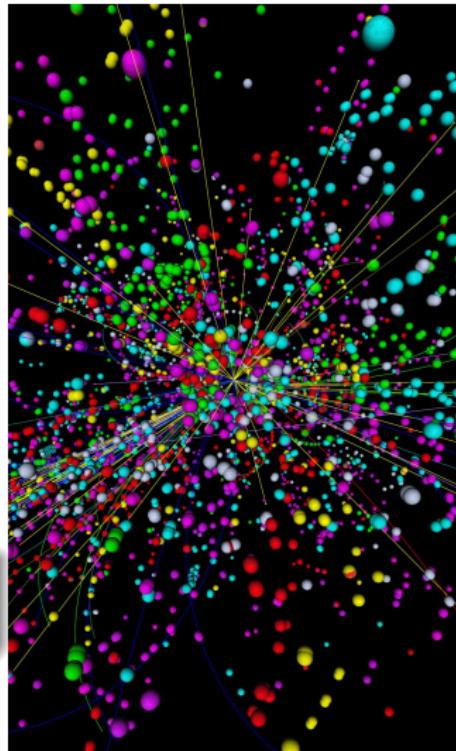
Gibt es noch weitere Elementarteilchen?

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

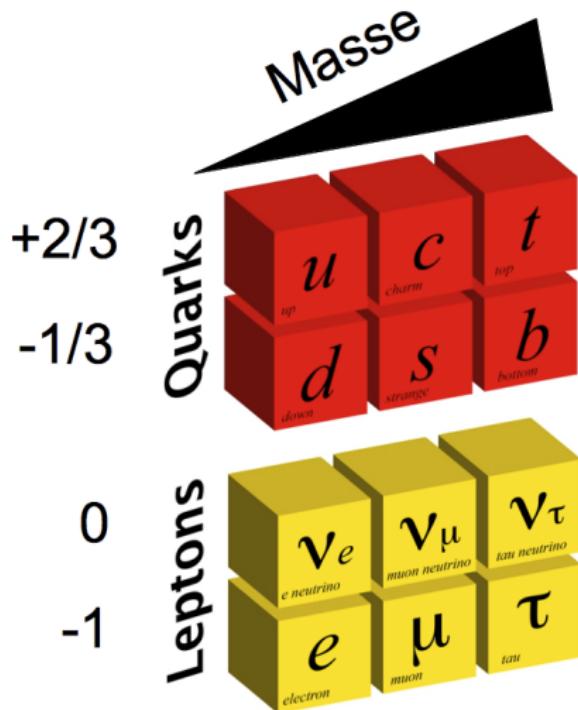


Experiment Teilchenzoo



“Ordne die Elementarteilchen anhand
ihrer Eigenschaften.”

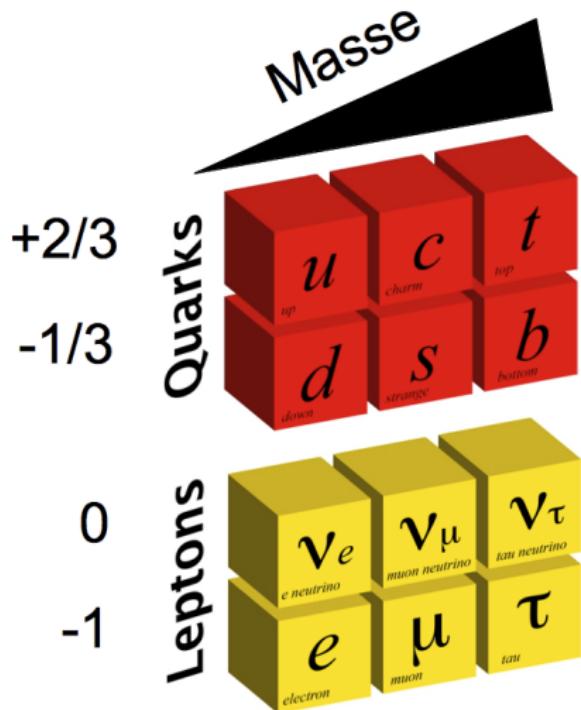
Die bekannten Elementarteilchen



Ordnung

- Masse
- Quantenzahlen
- Z.B. Ladung

Die bekannten Elementarteilchen



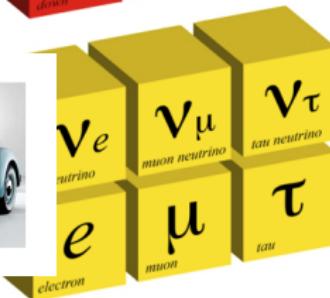
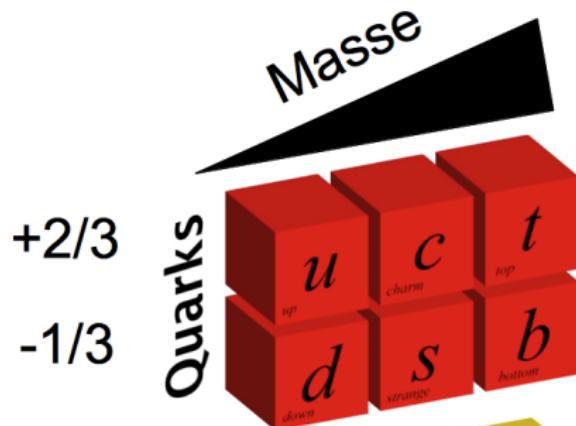
Ordnung

- Masse
- Quantenzahlen
- Z.B. Ladung

Teilchen der 2. und 3. Generation

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

Die bekannten Elementarteilchen



Ordnung

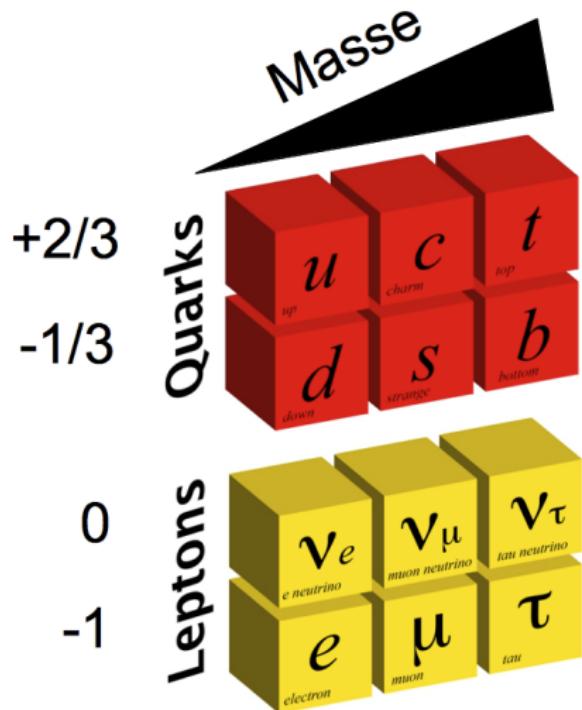


n
ng

1. 3. Generation
schaften wie 1.

- Aber deutlich schwerer
- Instabil

Die bekannten Elementarteilchen



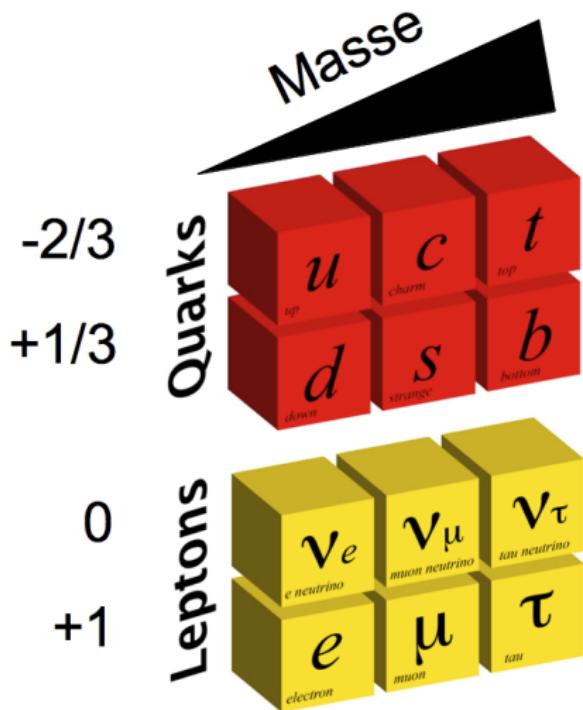
Ordnung

- 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

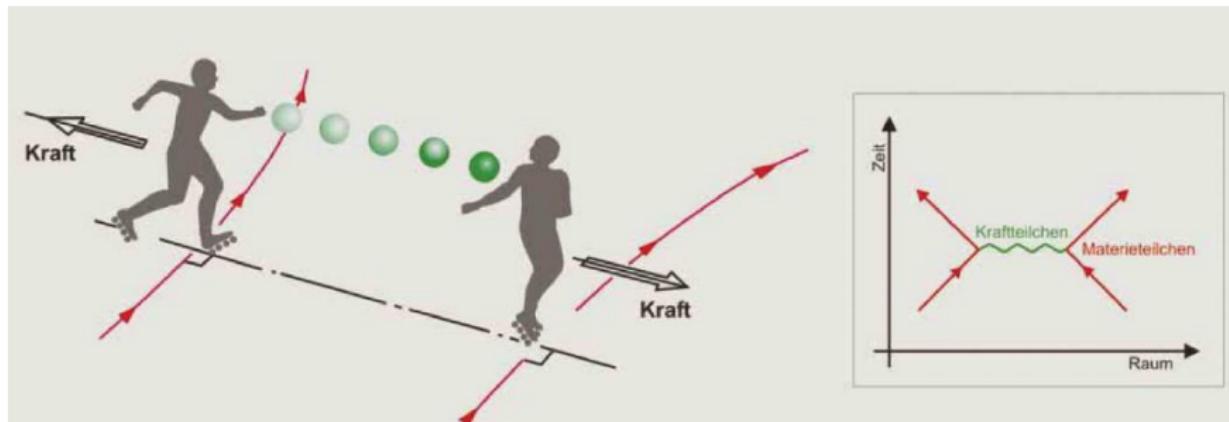
- Gleiche Eigenschaften wie 1.
- Aber deutlich schwerer
- Instabil

Zu jedem Teilchen: Antiteilchen

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

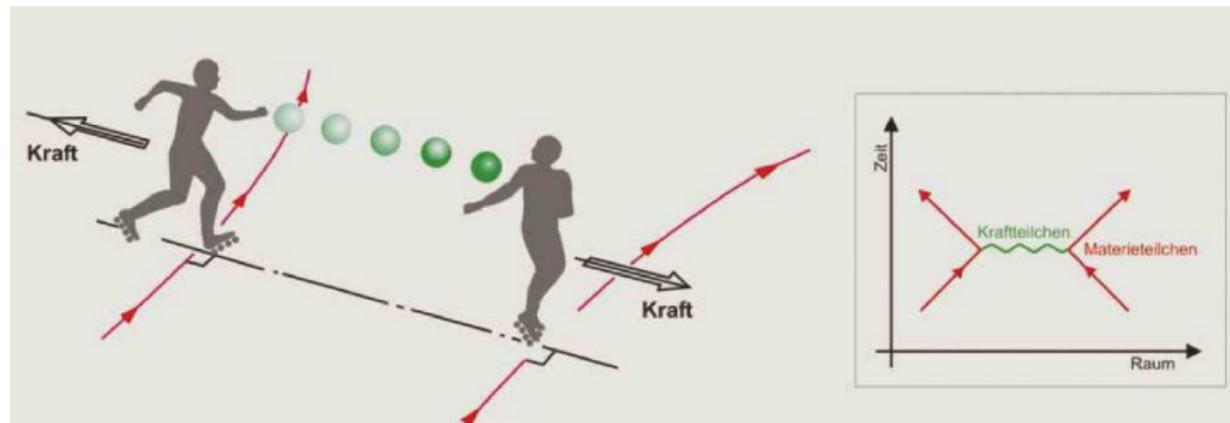
Kräfte: Interaktion zwischen den Elementarteilchen

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



Kräfte: Interaktion zwischen den Elementarteilchen

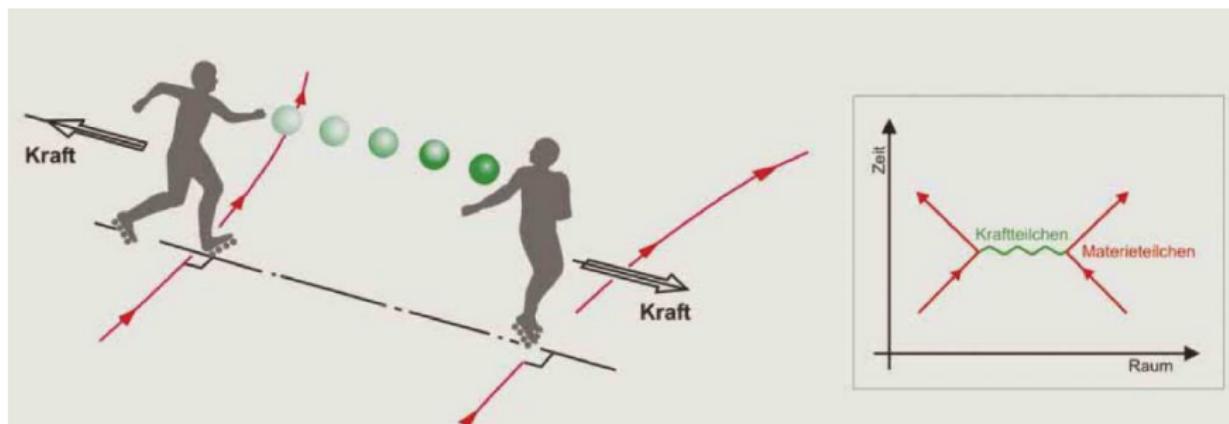
- Kräfte wirken zwischen geladenen Teilchen
- Kräfte entstehen durch den Austausch von Teilchen ("Bosonen")



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

Kräfte: Interaktion zwischen den Elementarteilchen

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

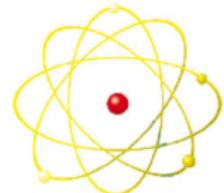


- Z.B. Elektron-Elektron Abstoßung durch Photon-Austausch
- Elektromagnetische Kraft

Fundamentale Kräfte

Elektromagnetische Kraft

- Elektrische Ladung, alle außer ν
- Vermittelt durch Photon γ
- *Chemie, Elektrizität*



Fundamentale Kräfte

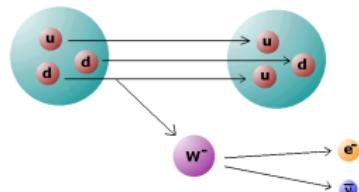
Elektromagnetische Kraft

- Elektrische Ladung, alle außer ν
- Vermittelt durch Photon γ
- *Chemie, Elektrizität*



Schwache Kraft

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



Fundamentale Kräfte

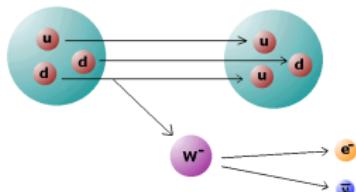
Elektromagnetische Kraft

- Elektrische Ladung, alle außer ν
- Vermittelt durch Photon γ
- *Chemie, Elektrizität*



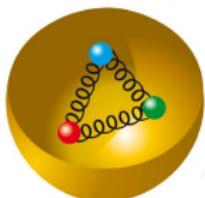
Schwache Kraft

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

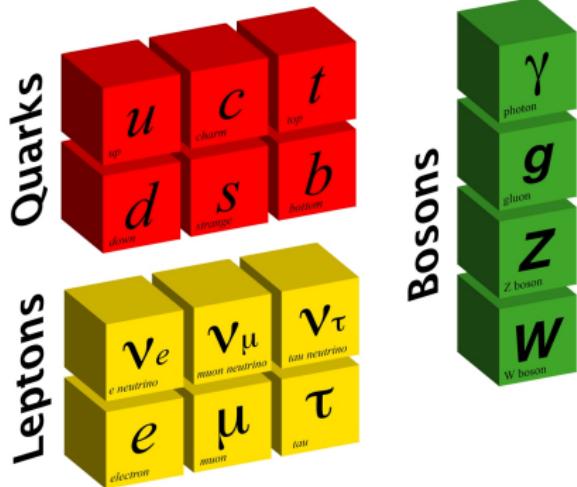


Starke Kraft

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

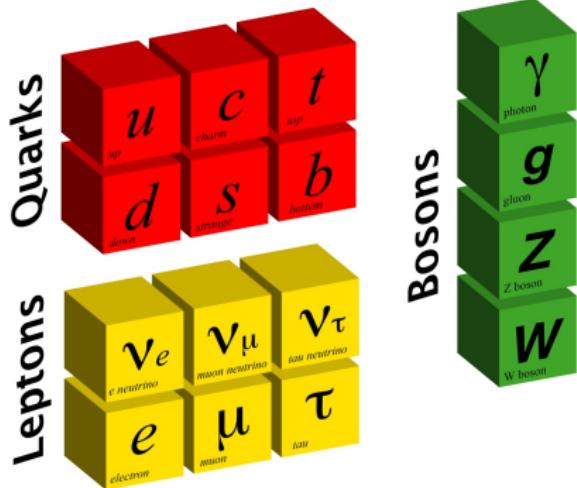


Das Standardmodell der Teilchenphysik



- 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!

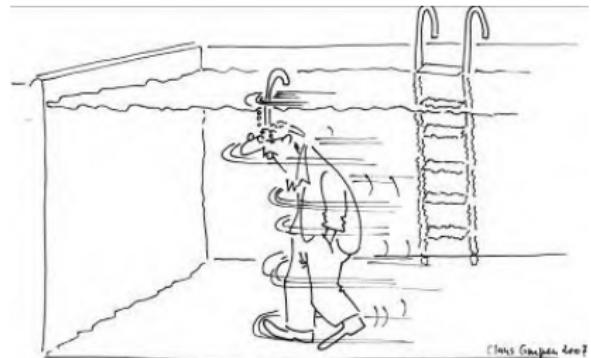


$$m_t \approx 340\,000 \cdot m_e$$

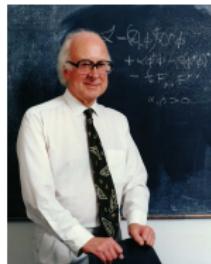
Higgs-Mechanismus

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

Vorhersage: **Higgs Teilchen**

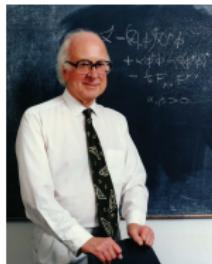


Die Higgs-Story



- Über 40 Jahre

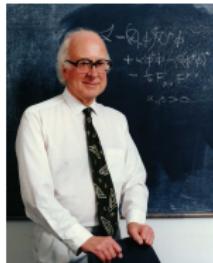
Die Higgs-Story



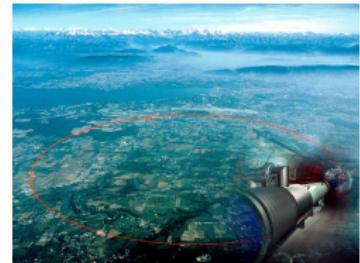
- Über 40 Jahre
- Viele Beschleunigerexperimente



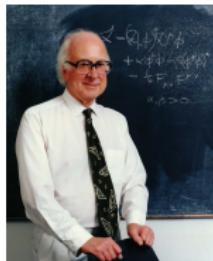
Die Higgs-Story



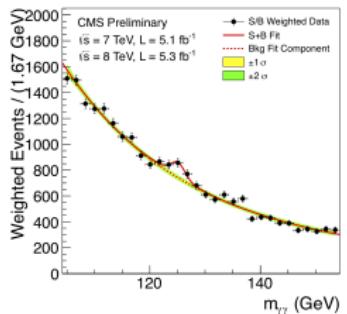
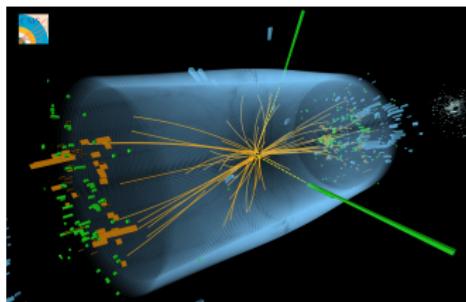
- Über 40 Jahre
- Viele Beschleunigerexperimente
- Ungezählte Teilchenphysiker



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?



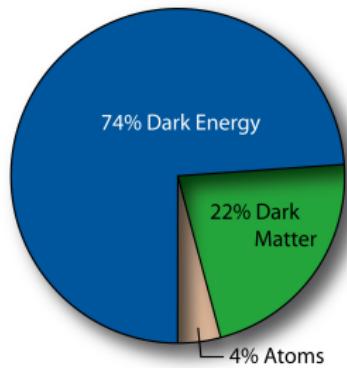
Offene Fragen der Teilchenphysik

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



Offene Fragen der Teilchenphysik

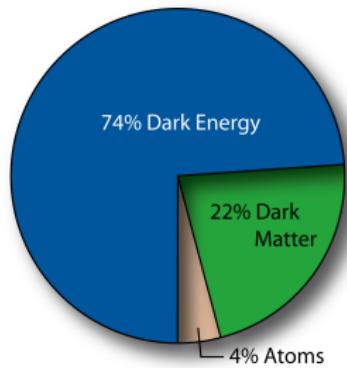
- Woher bekommen Teilchen ihre Massen?
 - Haben wir das Higgs-Teilchen gefunden?
- Warum gibt es mehr Materie als Antimaterie?
- Was ist dunkle Materie?
- Kann man die Gravitation durch Teilchenaustausch beschreiben?
 - Gibt es Supersymmetrie?





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

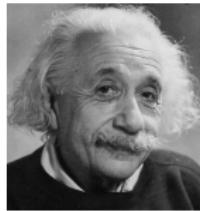
3

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

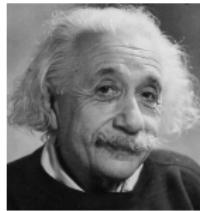
Alle zusammen

Wie können wir neue Teilchen erzeugen?

Wie können wir neue Teilchen erzeugen?



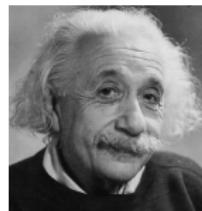
Wie können wir neue Teilchen erzeugen?



“Masse entspricht Energie”

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

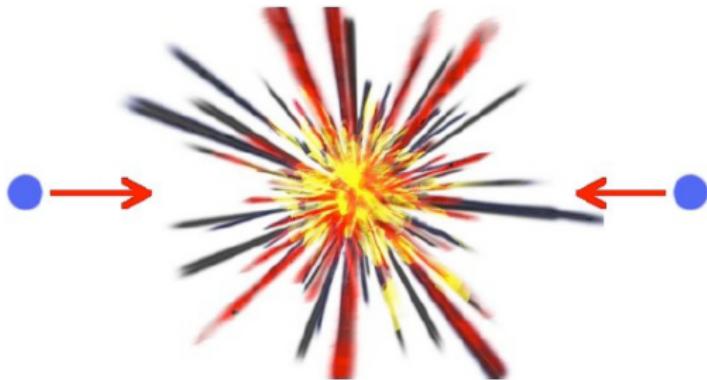
Wie können wir neue Teilchen erzeugen?



“Masse entspricht Energie”

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

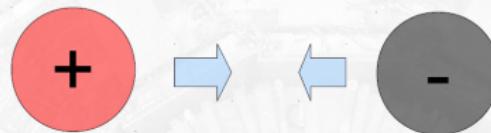
- Kollision von zwei Teilchen mit jeweils Energie E



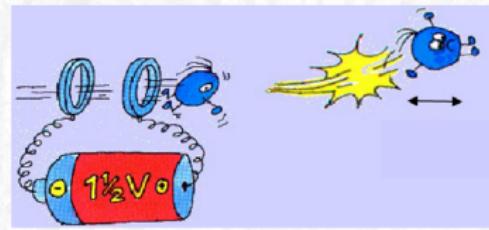
⇒ Erzeugung neuer Teilchen bis zur Masse $2m = 2E$ ($c = 1$)

Woher bekommt man schnelle Teilchen?

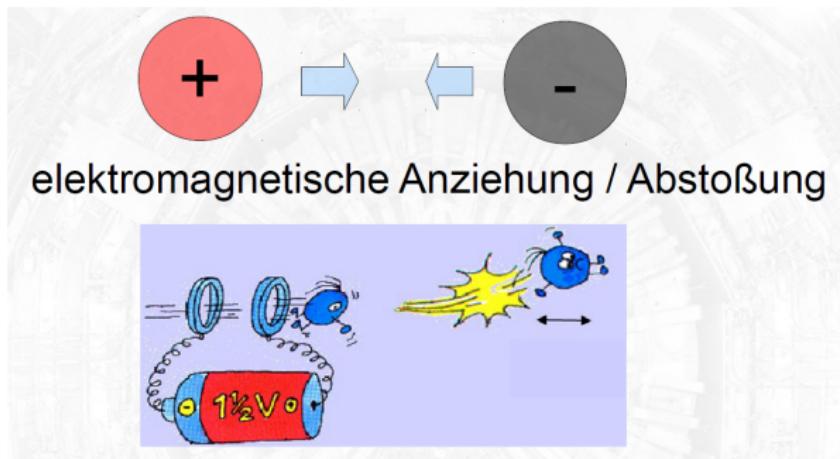
Woher bekommt man schnelle Teilchen?



elektromagnetische Anziehung / Abstoßung



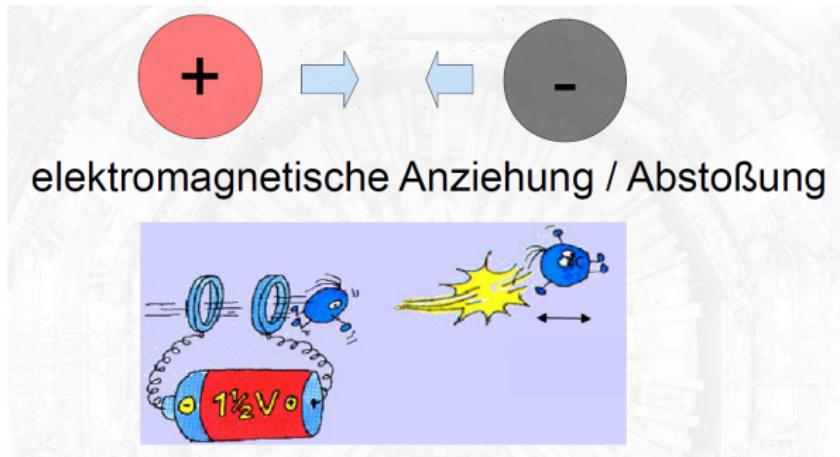
Woher bekommt man schnelle Teilchen?



Energieeinheit der Teilchenphysiker: Elektronenvolt eV

1 eV = Energie durch Beschleunigung mit Spannung von 1 V

Woher bekommt man schnelle Teilchen?

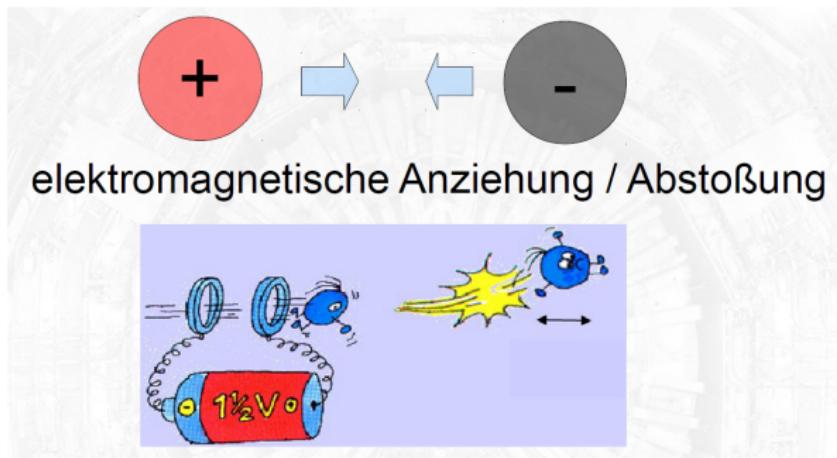


Energieeinheit der Teilchenphysiker: Elektronenvolt eV

1 eV = Energie durch Beschleunigung mit Spannung von 1 V

- Nach Batterie-Beschleunigung:

Woher bekommt man schnelle Teilchen?

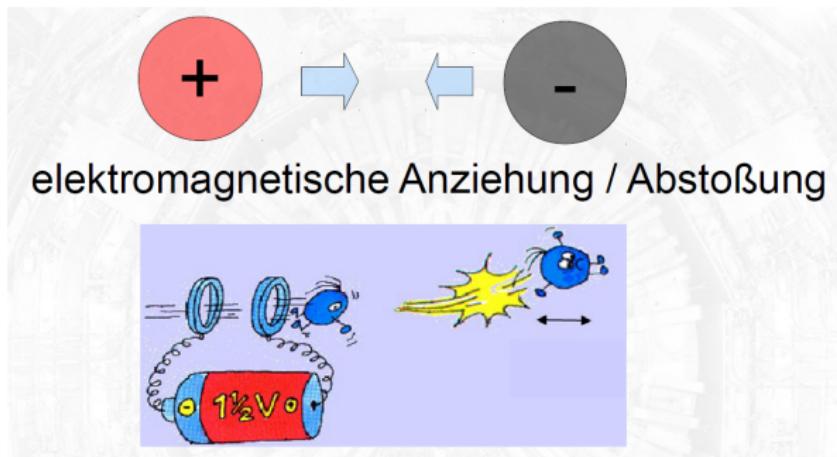


Energieeinheit der Teilchenphysiker: Elektronenvolt eV

1 eV = Energie durch Beschleunigung mit Spannung von 1 V

- Nach Batterie-Beschleunigung: 1,5 eV

Woher bekommt man schnelle Teilchen?

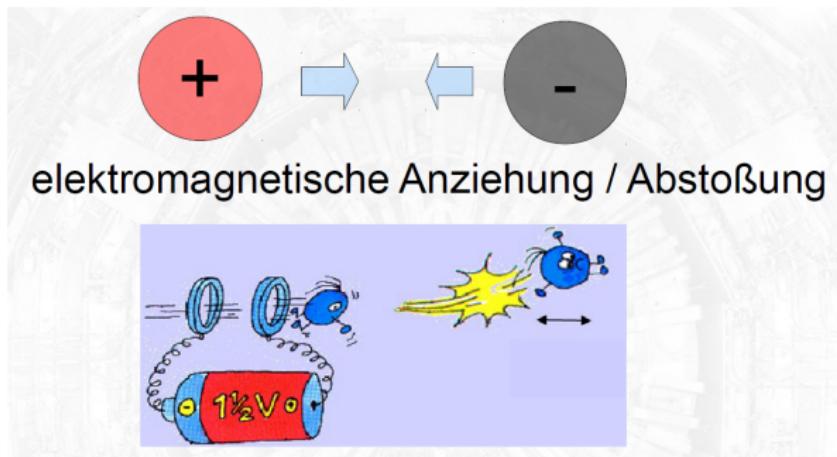


Energieeinheit der Teilchenphysiker: Elektronenvolt eV

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?

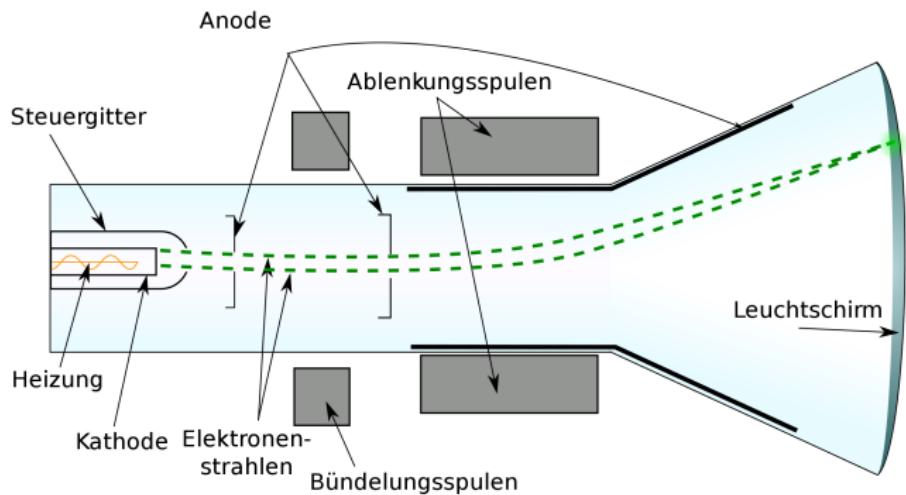


Energieeinheit der Teilchenphysiker: Elektronenvolt eV

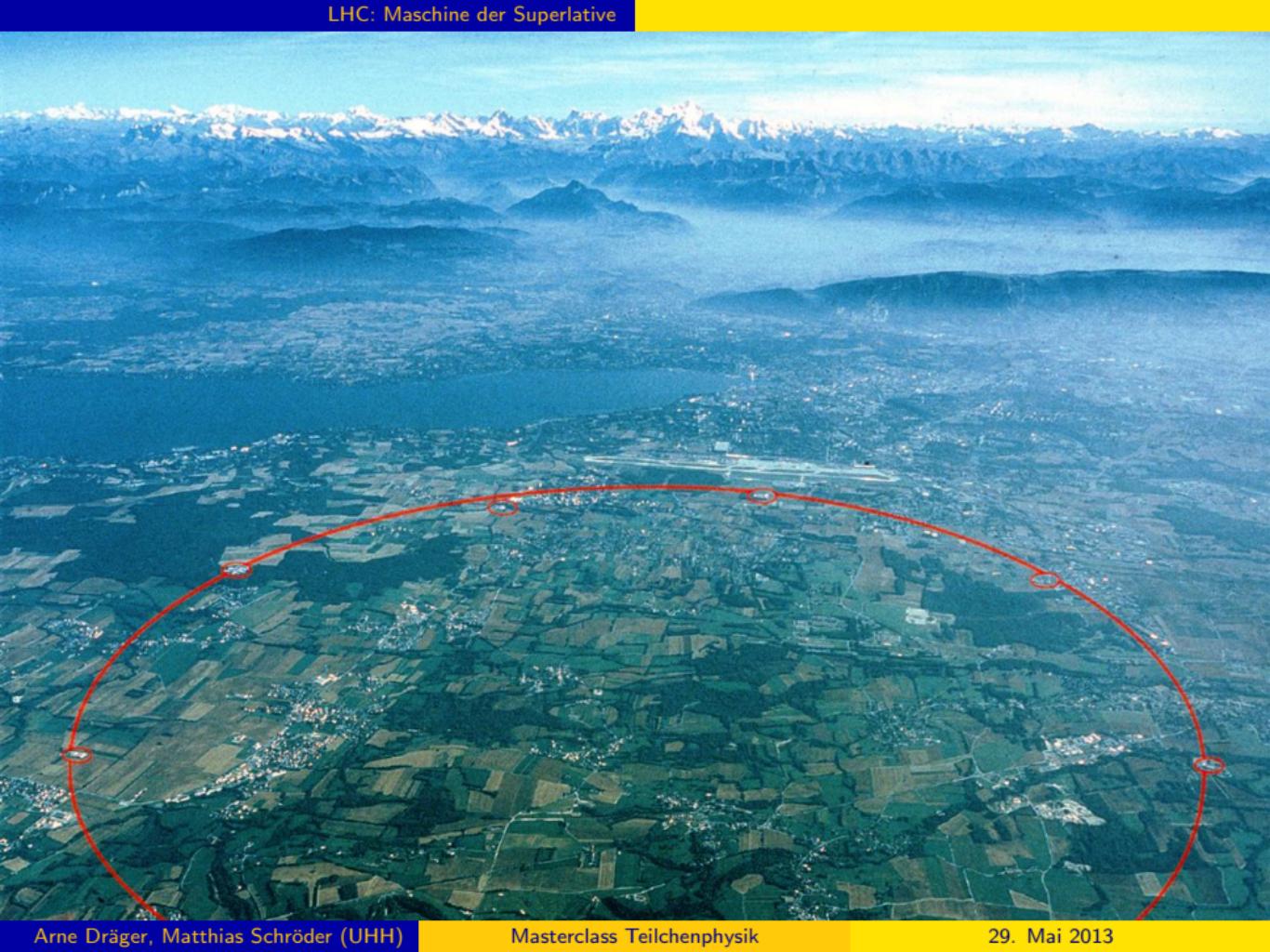
1 eV = Energie durch Beschleunigung mit Spannung von 1 V

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

Beispiel für einen Teilchenbeschleuniger: Röhrenfernseher

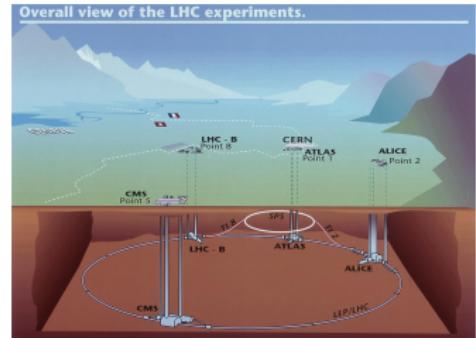


Spannung ca. 15 keV

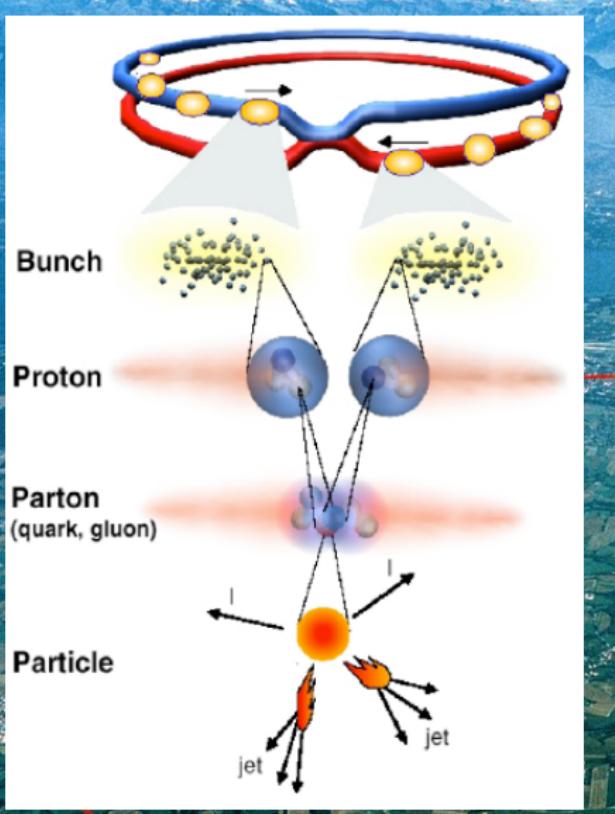


Large Hadron Collider (LHC)

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



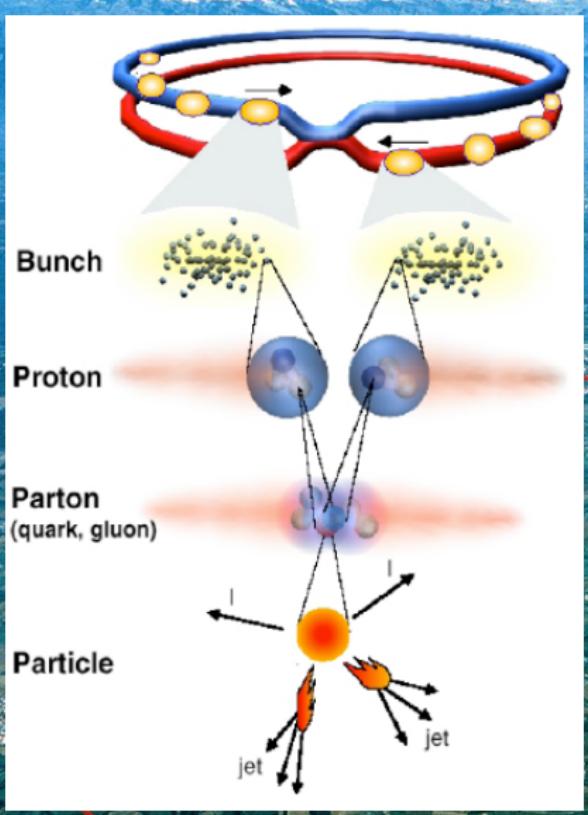
LHC: Der stärkste Beschleuniger der Welt



- 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



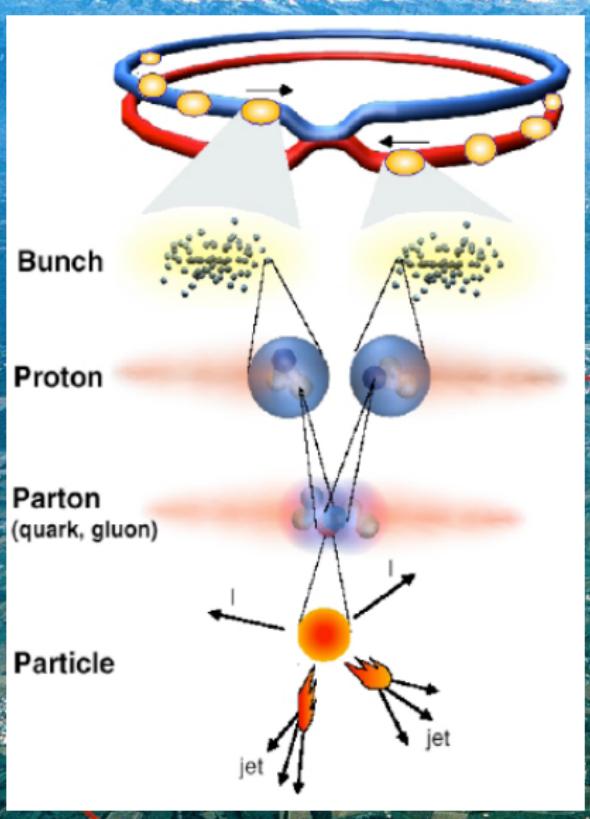
LHC: Kälter als das Weltall



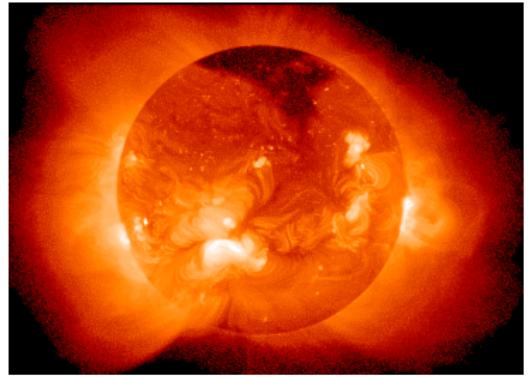
- Supraleitende Magnete zwingen Protonen auf Kreisbahn
 - 80 000 mal stärker als Erdmagnetfeld
- Erfordern Kühlung auf 1,9 K ($-271,3^{\circ}\text{C}$)
 - Kälter als das Weltall (2,7 K)



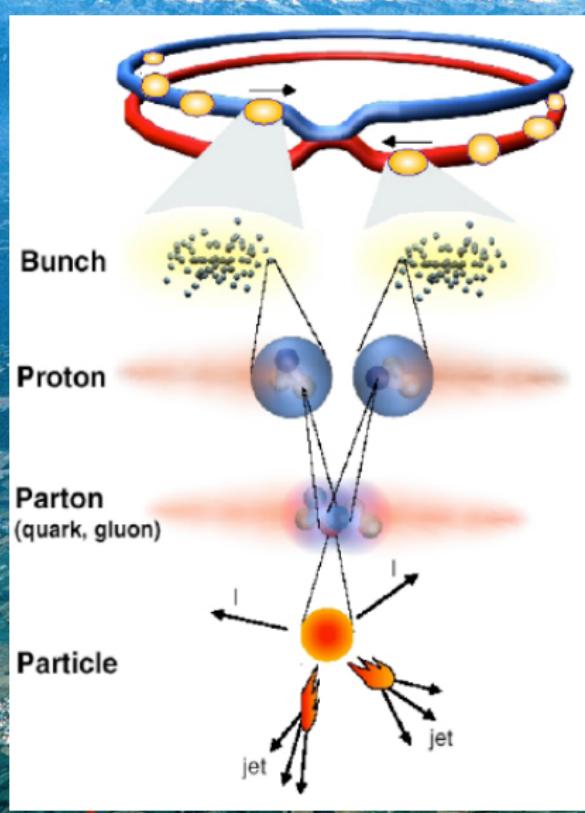
LHC: Heißer als die Sonne



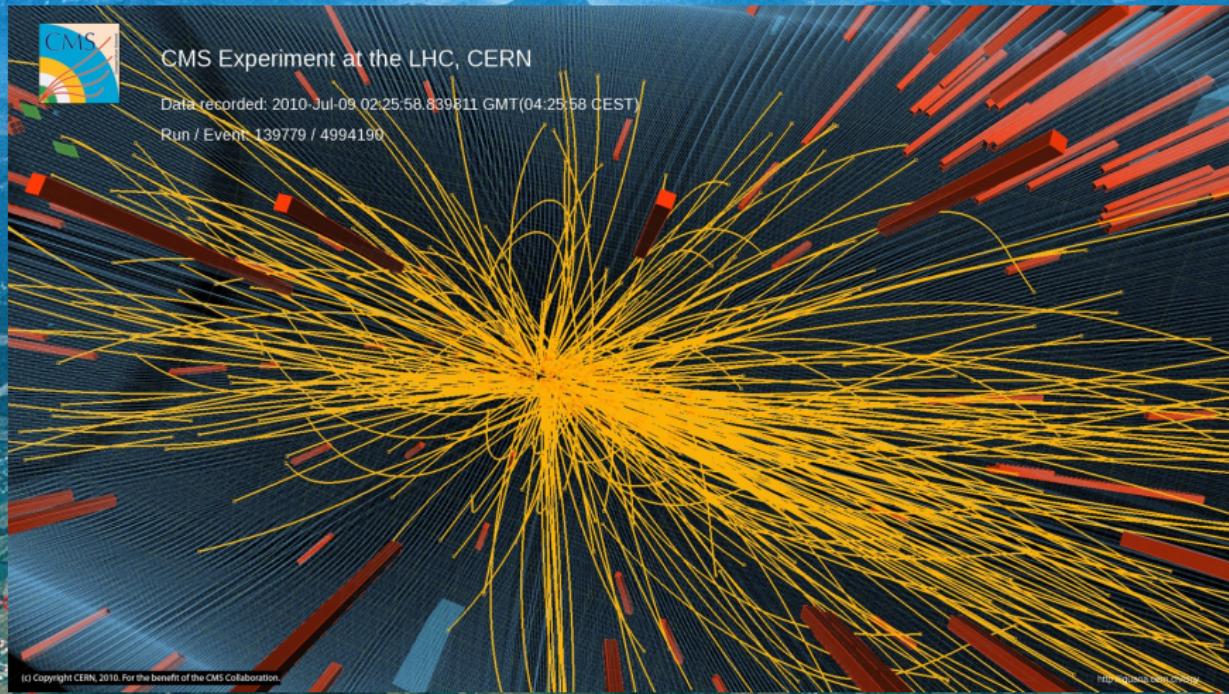
- ca. 400 Millionen Kollisionen pro Sekunde
- Energie von $7 \text{ TeV} \approx 80 m_{Z^0}$
 - *100 000 mal heißer als im Innern der Sonne*



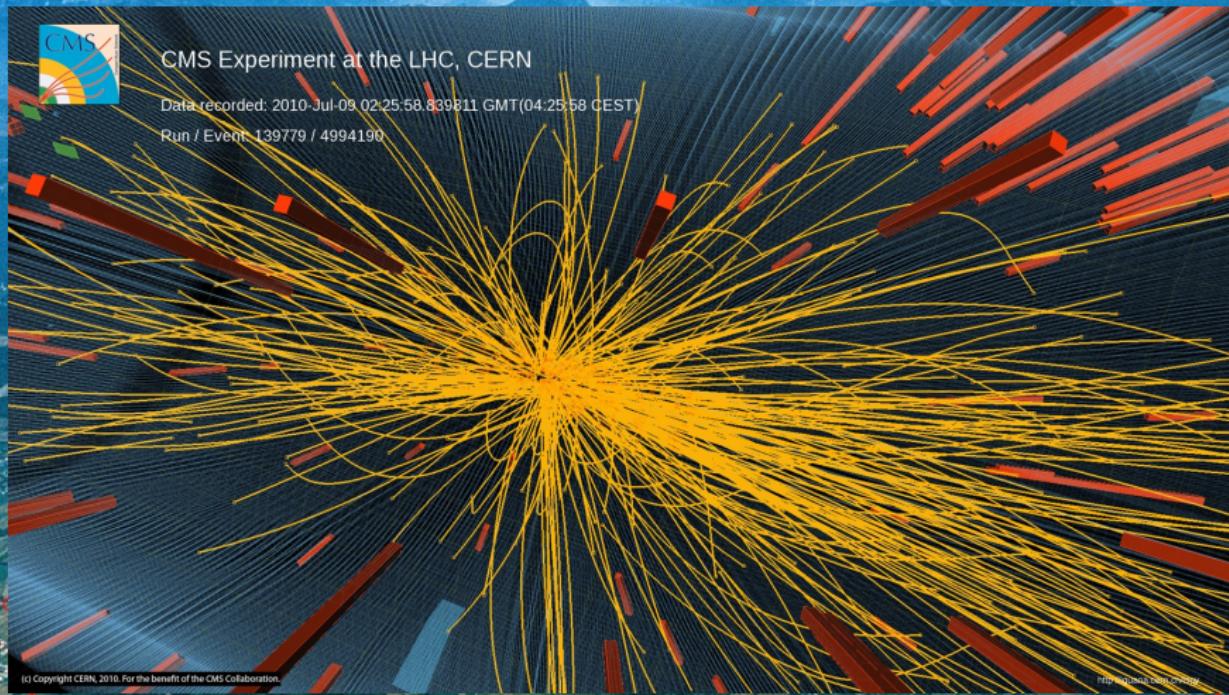
LHC: Proton-Proton Kollision



LHC: Proton-Proton Kollision



Wie misst man das??

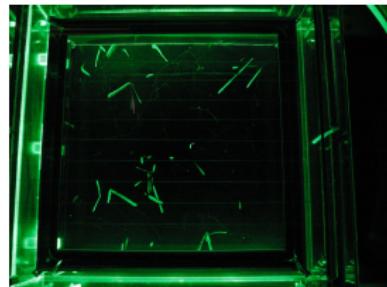


Detektoren: Teilchen “sehen”

Detektoren: Teilchen “sehen”

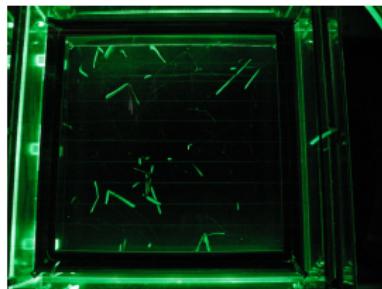
Teilchen wechselwirken mit Materie → messbares Signal

Detektoren: Teilchen “sehen”



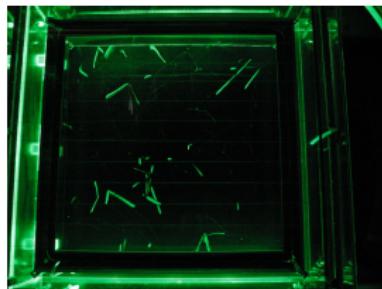
Teilchen wechselwirken mit Materie → messbares Signal

Detektoren: Teilchen “sehen”



Teilchen wechselwirken mit Materie → messbares Signal

Detektoren: Teilchen “sehen”

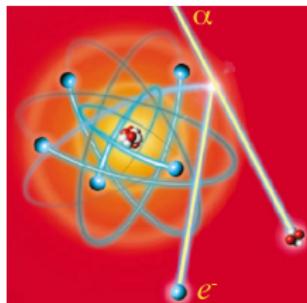


Teilchen wechselwirken mit Materie → messbares Signal

Wenn Teilchen auf Materie treffen...

Wenn Teilchen auf Materie treffen...

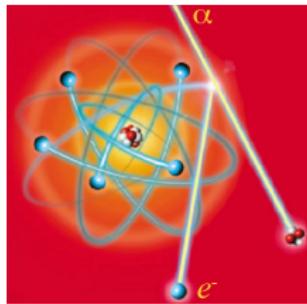
- Geladene Teilchen: Ionisation



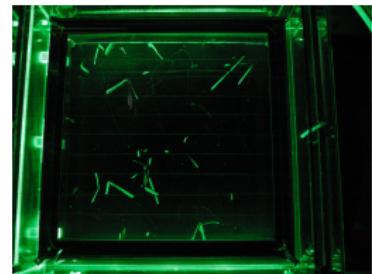
- **Freie Ladungsträger**

Wenn Teilchen auf Materie treffen...

- Geladene Teilchen: Ionisation

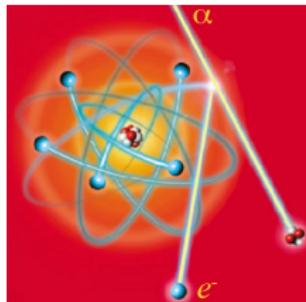


- **Freie Ladungsträger**
 - Nebelkammer
 \rightarrow "Kondensstreifen"



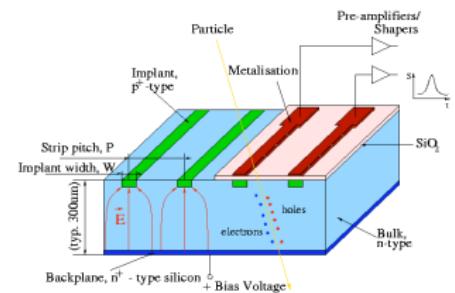
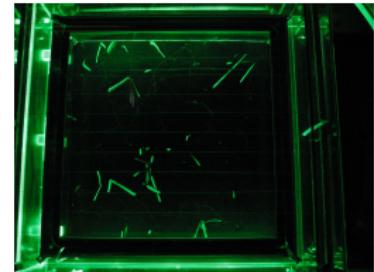
Wenn Teilchen auf Materie treffen...

- Geladene Teilchen: Ionisation



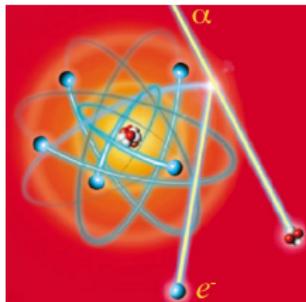
• Freie Ladungsträger

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

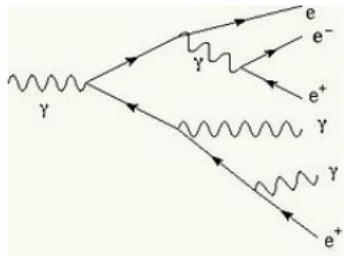


Wenn Teilchen auf Materie treffen...

- Geladene Teilchen: Ionisation

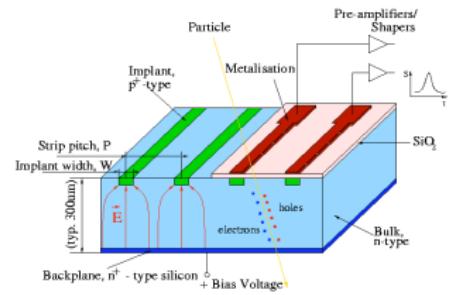
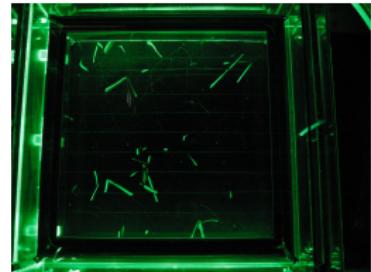


- Geladene & neutrale Teilchen: abgestoppt



Freie Ladungsträger

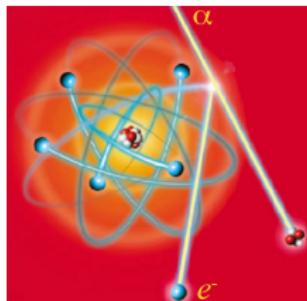
- Nebelkammer
→ "Kondensstreifen"
- Siliziumdetektor
→ Strompuls



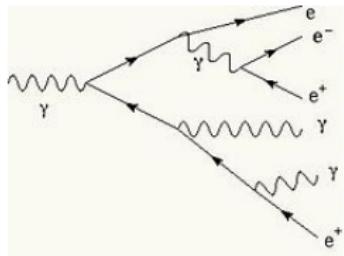
Teilchenschauer

Wenn Teilchen auf Materie treffen...

- Geladene Teilchen: Ionisation

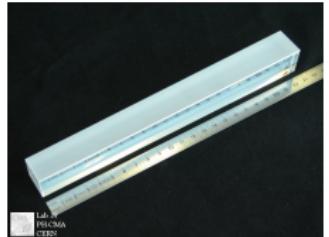
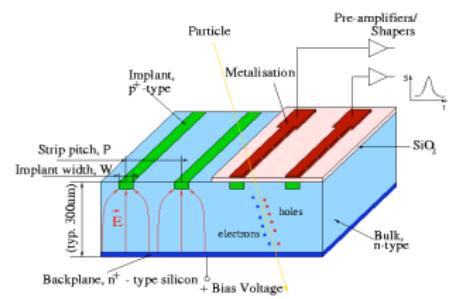
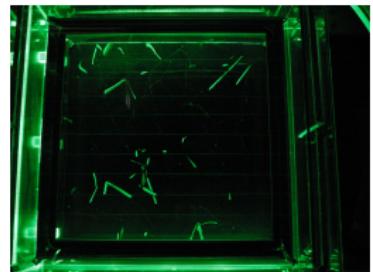


- Geladene & neutrale Teilchen: abgestoppt



Freie Ladungsträger

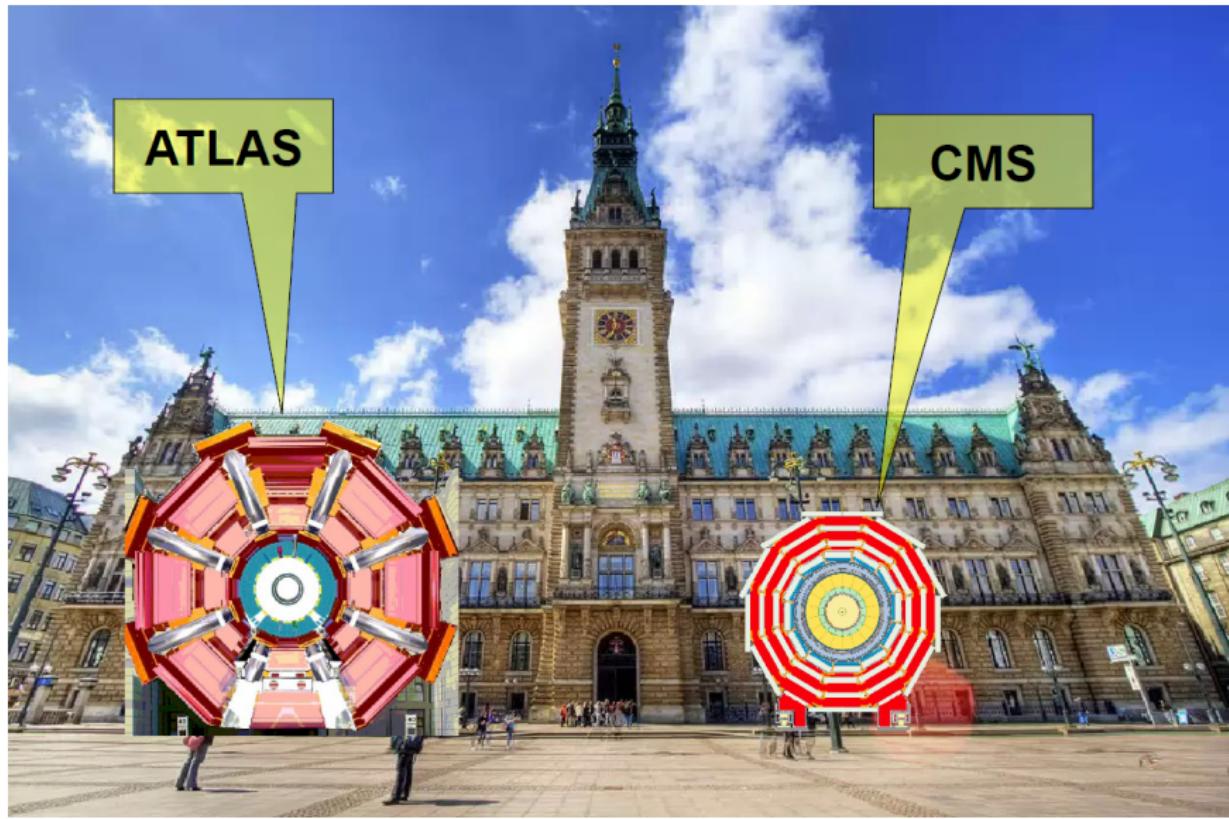
- Nebelkammer
→ "Kondensstreifen"
- Siliziumdetektor
→ *Strompuls*



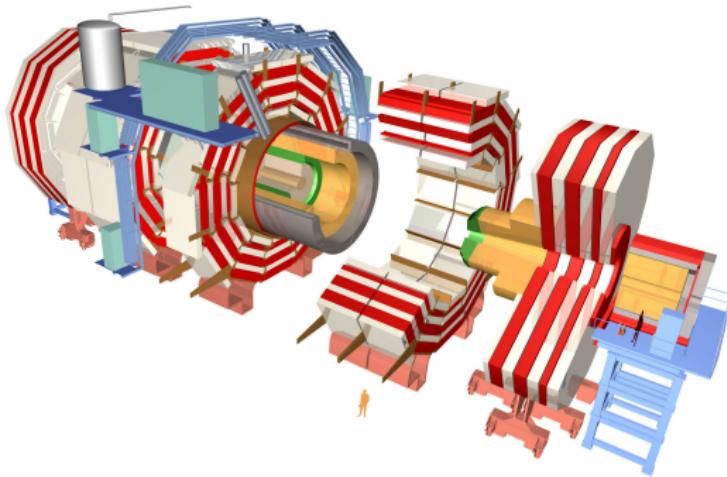
Teilchenschauer

- 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

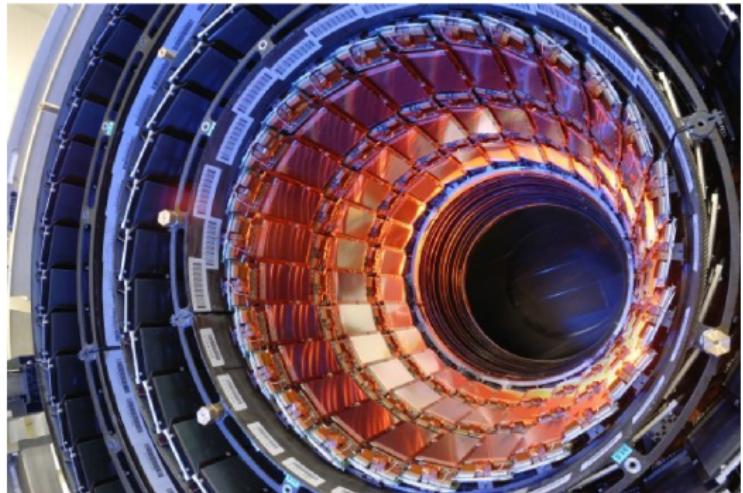
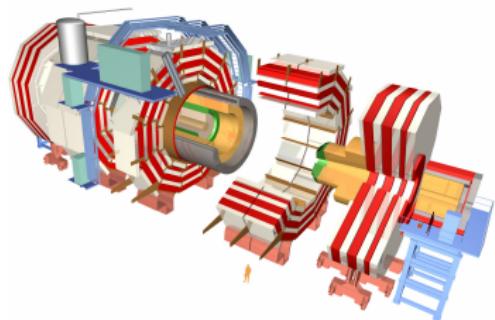
Richtung

Impuls

Ladung

Energie

Teilchenart



Spurdetektor

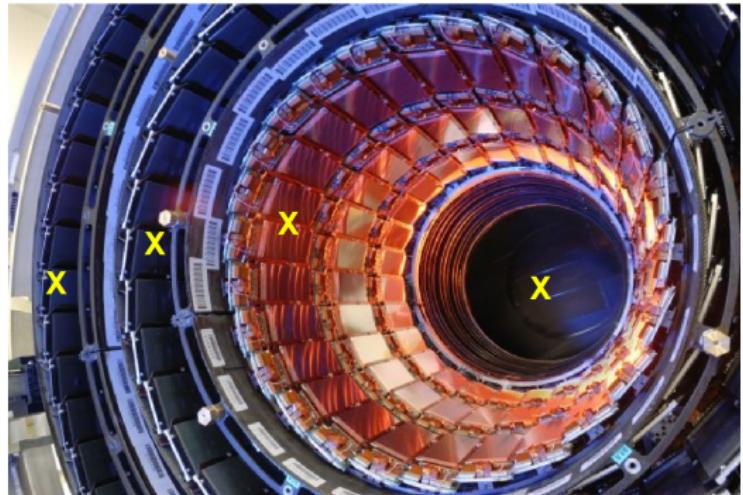
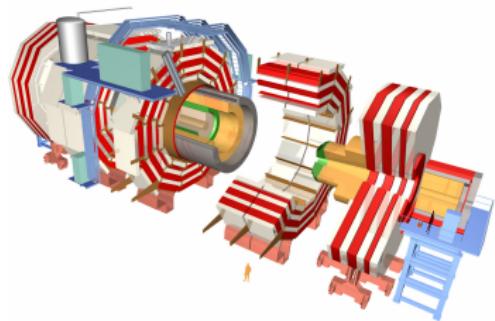
Richtung

Impuls

Ladung

Energie

Teilchenart



Spurdetektor

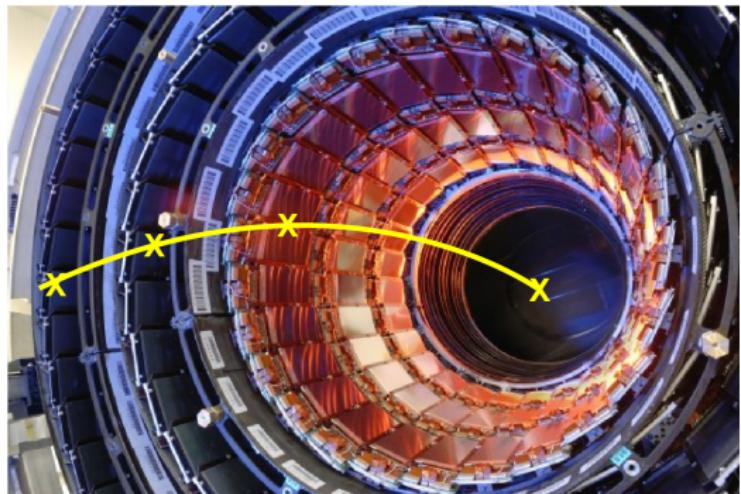
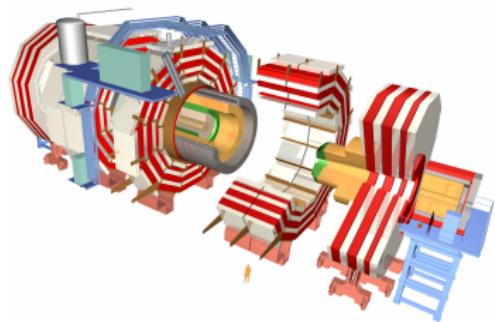
Richtung

Impuls

Ladung

Energie

Teilchenart



Spurdetektor

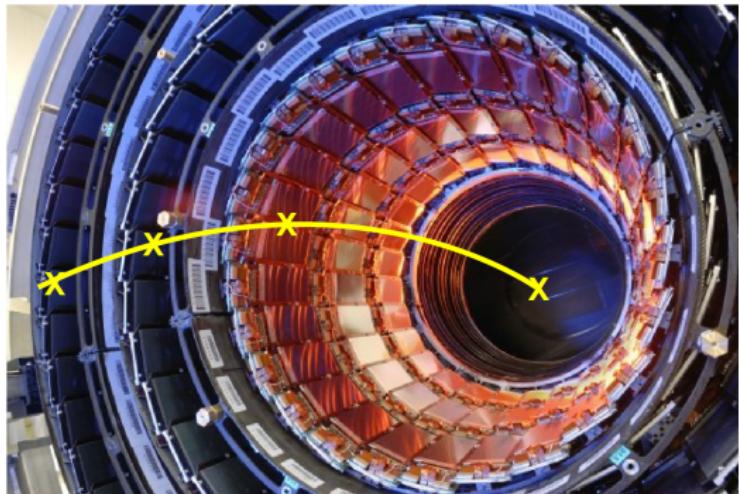
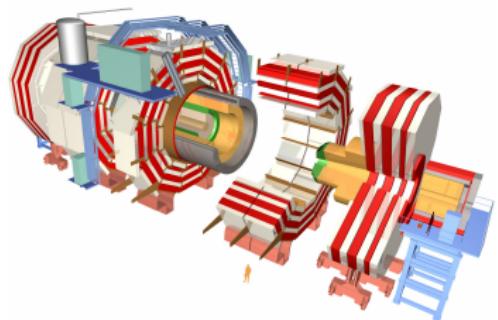
Richtung

Impuls

Ladung

Energie

Teilchenart



Spurdetektor + Magnetfeld

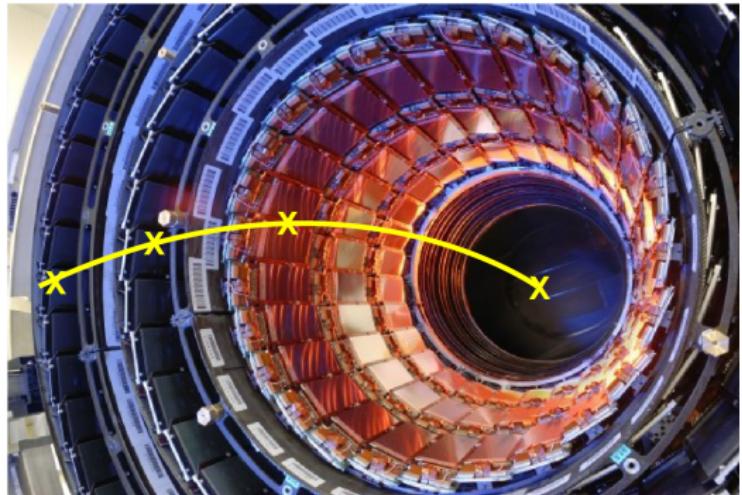
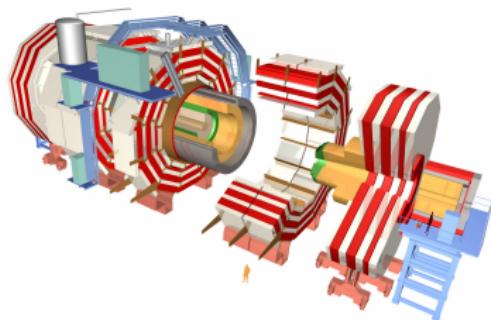
Richtung

Impuls

Ladung

Energie

Teilchenart



Kalorimeter

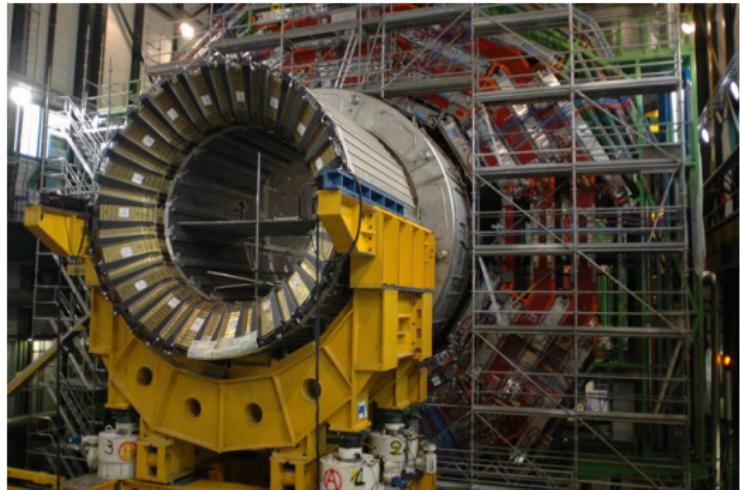
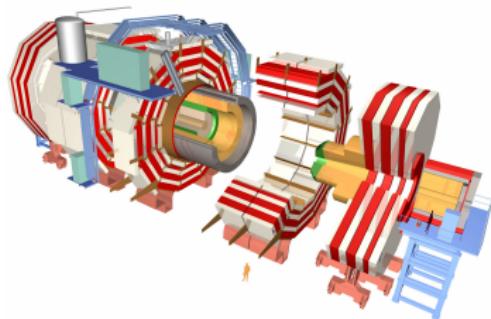
Richtung

Impuls

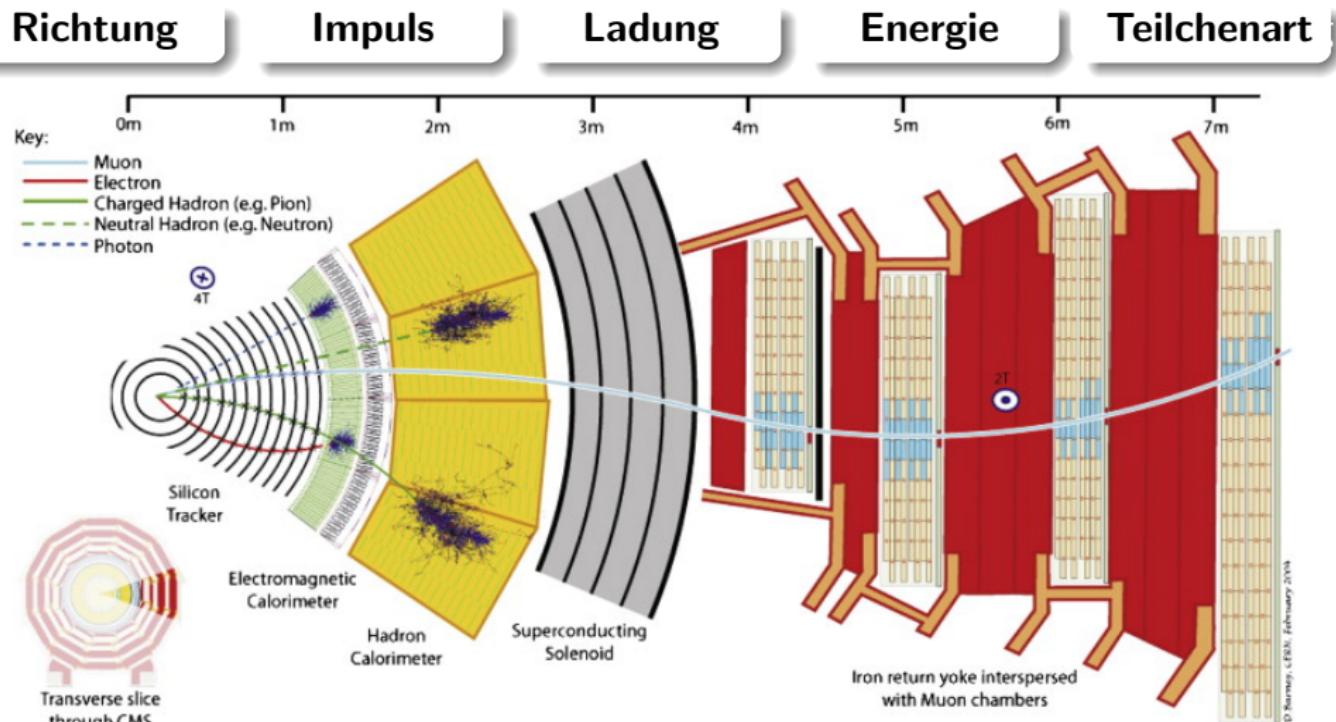
Ladung

Energie

Teilchenart

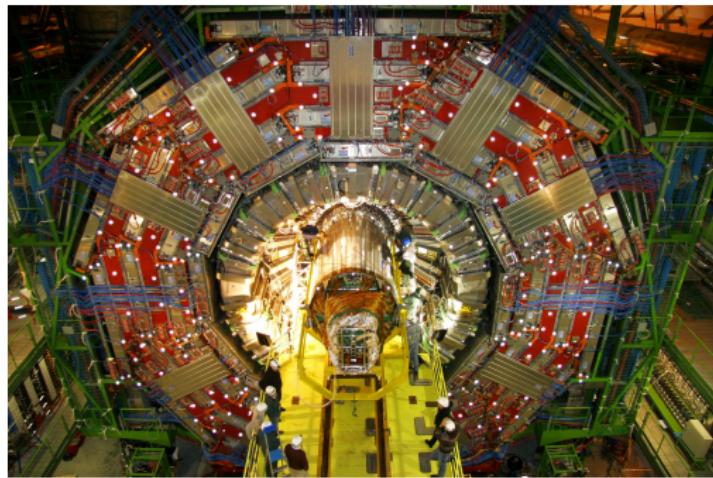


Kombination aller Komponenten



Insgesamt vier große Detektoren am LHC

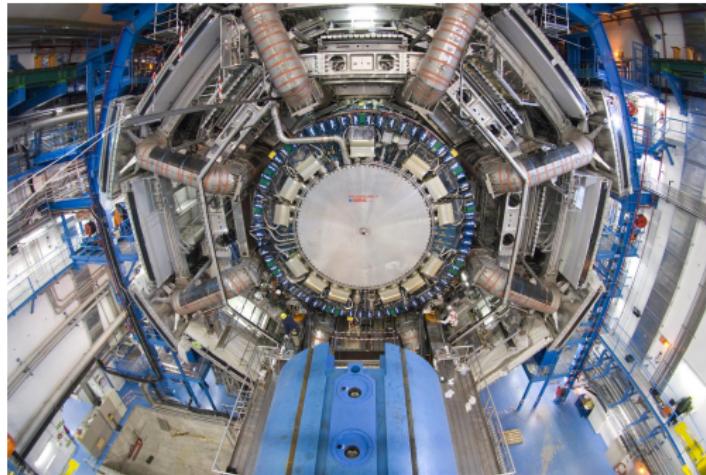
CMS Gibt es das Higgs? Gibt es noch weitere unbekannte Teilchen?



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?



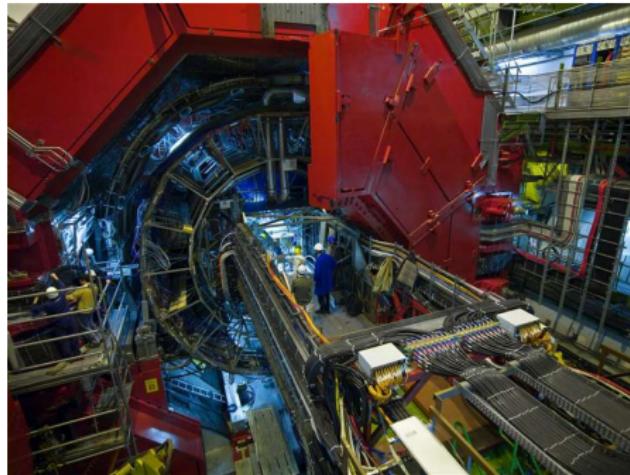
Insgesamt vier große Detektoren am LHC

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

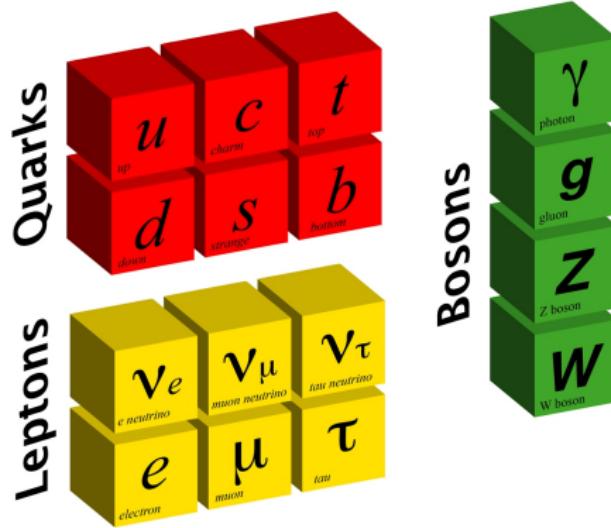
Mittagspause

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



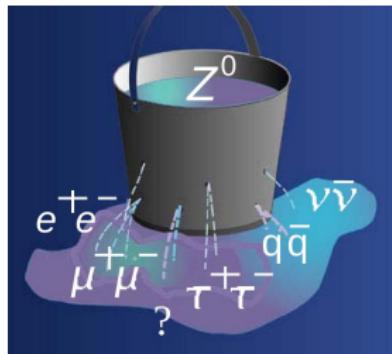
- Zerfallsprodukte müssen Ladung 0 haben
- Z^0 zerfällt in Teilchen-Antiteilchen-Paar
- Z.B. $Z^0 \rightarrow e^+ e^-$

Energie- und Impulserhaltung



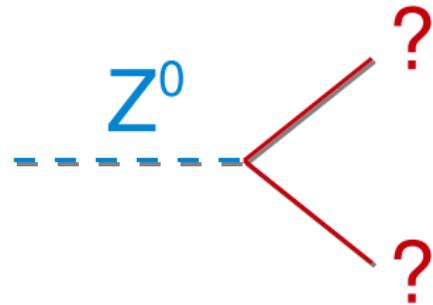
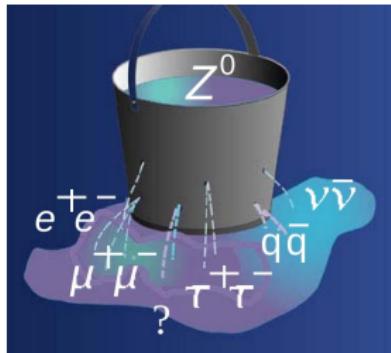
- Teilchen und Antiteilchen bewegen sich in entgegengesetzte Richtung
- Beide haben die gleiche Energie

In welche Teilchen zerfällt das Z^0 ?



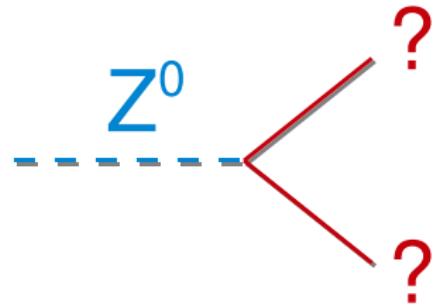
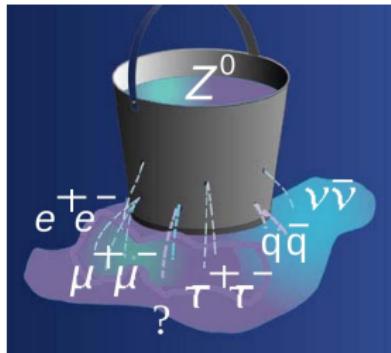
- Wasser kann durch verschiedene Löcher ausfließen

In welche Teilchen zerfällt das Z^0 ?



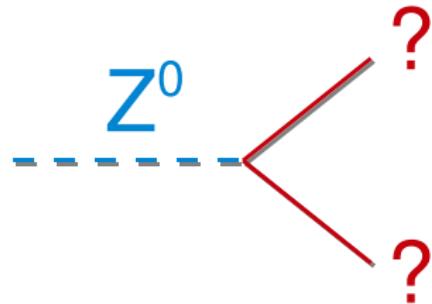
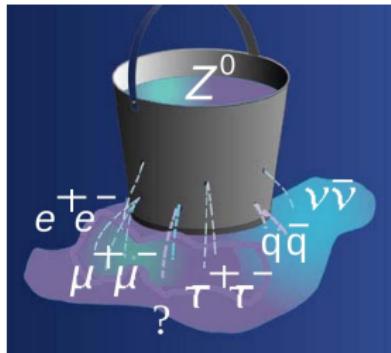
- Wasser kann durch verschiedene Löcher ausfließen
- Z^0 kann in verschiedene Teilchen-Antiteilchen-Paare (“Zerfallskanäle”) zerfallen

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 ?

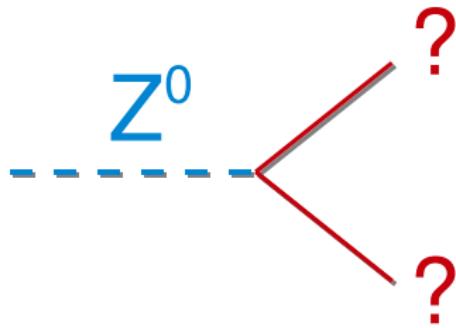


- Wasser kann durch verschiedene Löcher ausfließen
- Für ein bestimmtes Molekül Loch nicht vorhersagbar
- Verhältnis der Austrittsmengen \propto Größe der Löcher
- Z^0 kann in verschiedene Teilchen-Antiteilchen-Paare (“Zerfallskanäle”) zerfallen
- Für ein bestimmtes Z^0 Zerfallskanal nicht vorhersagbar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

Unsere Aufgabe



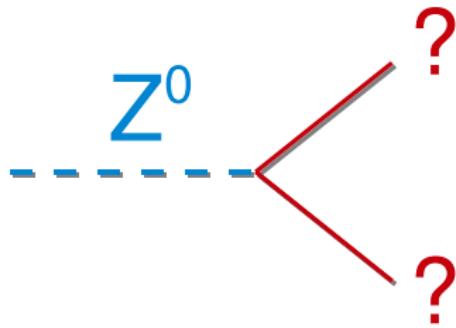
“Wie häufig zerfällt das Z^0 über welchen Kanal?”



Unsere Aufgabe



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



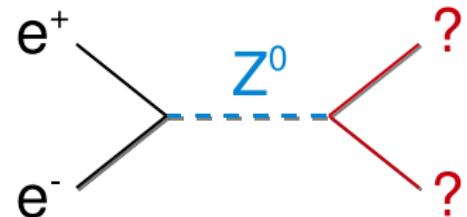
Wir betrachten vier Zerfallskanäle

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

Woher bekommen wir die Daten?

Large Electron Positron Collider (LEP)

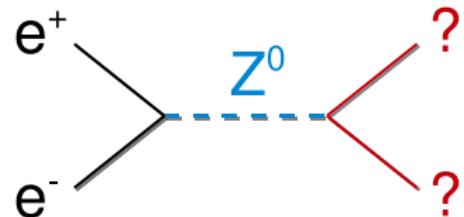
- e^+e^- -Beschleuniger
- Vier große Experimente
 - ALEPH, Delphi, L3 und OPAL



Woher bekommen wir die Daten?

Large Electron Positron Collider (LEP)

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

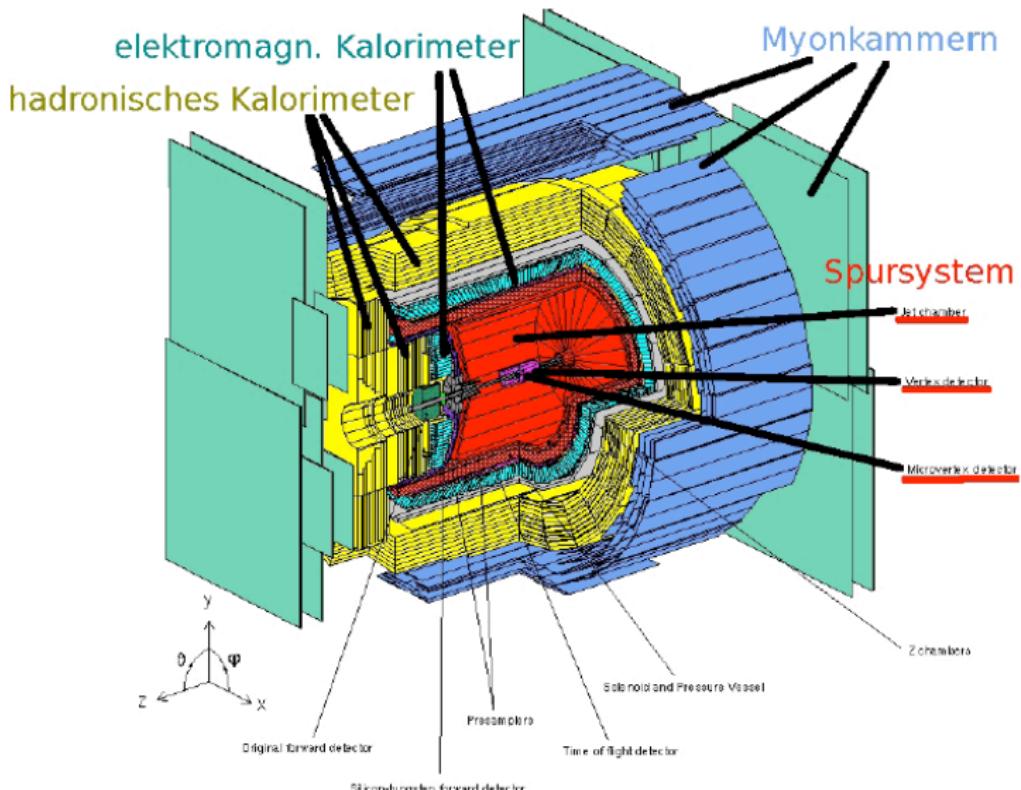


Omni Purpose Apparatus at LEP (OPAL)

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

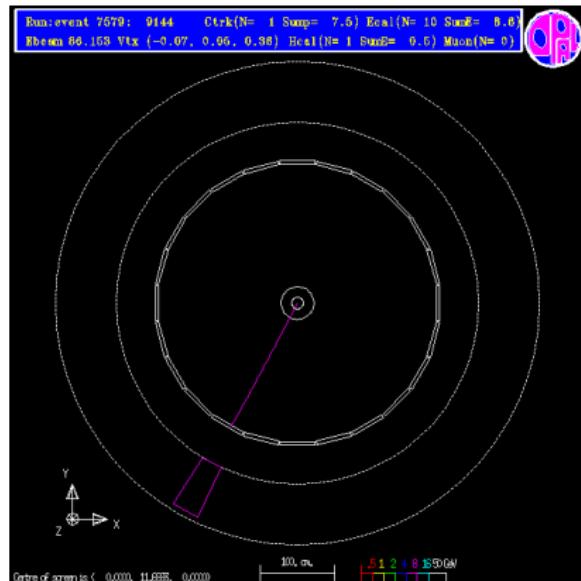


Der OPAL-Detektor



Was sehen wir denn nun im Detektor?

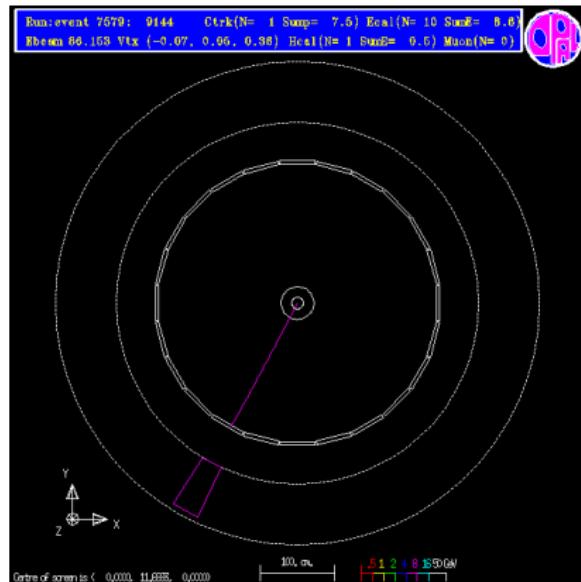
Beispiel Elektron: Sicht in den Detektor in Richtung Strahlachse



Frontalansicht

Was sehen wir denn nun im Detektor?

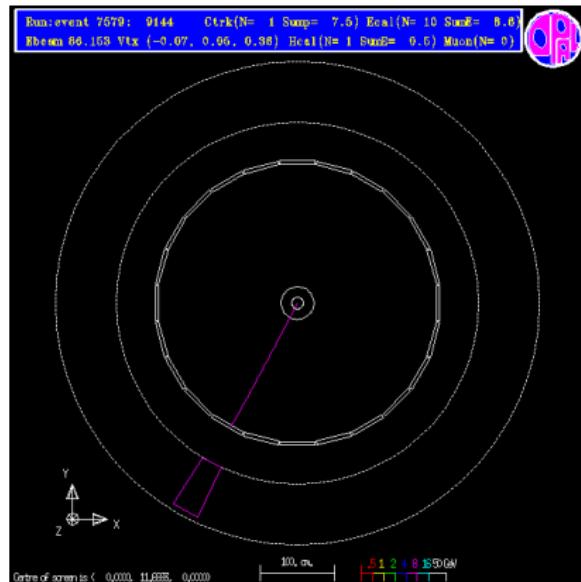
Beispiel Elektron: Sicht in den Detektor in Richtung Strahlachse



Frontalansicht

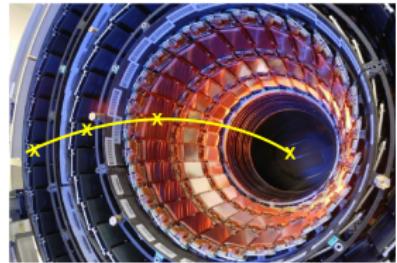
Was sehen wir denn nun im Detektor?

Beispiel Elektron: Sicht in den Detektor in Richtung Strahlachse



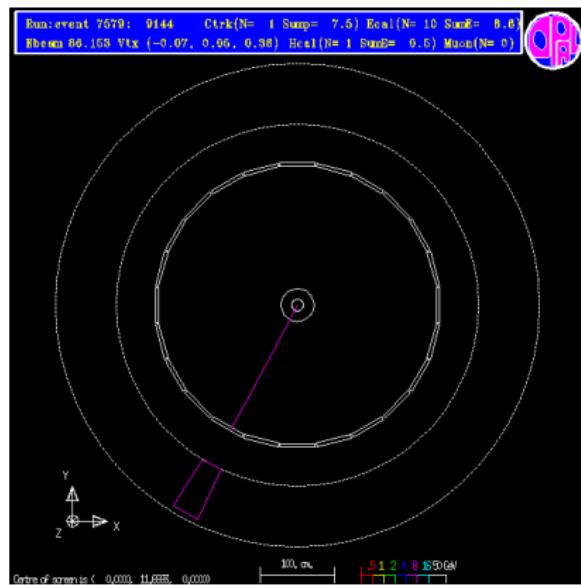
Frontalansicht

- ① Spur im Spurdetektor (—)

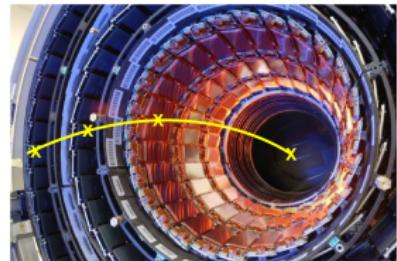


Was sehen wir denn nun im Detektor?

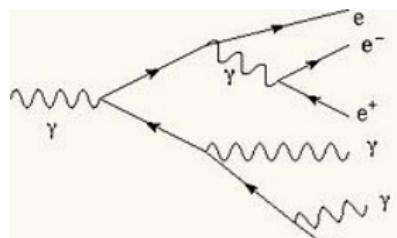
Beispiel Elektron: Sicht in den Detektor in Richtung Strahlachse



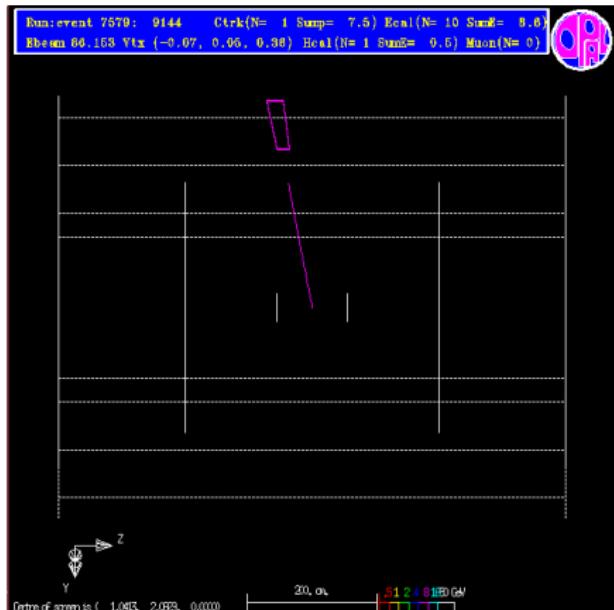
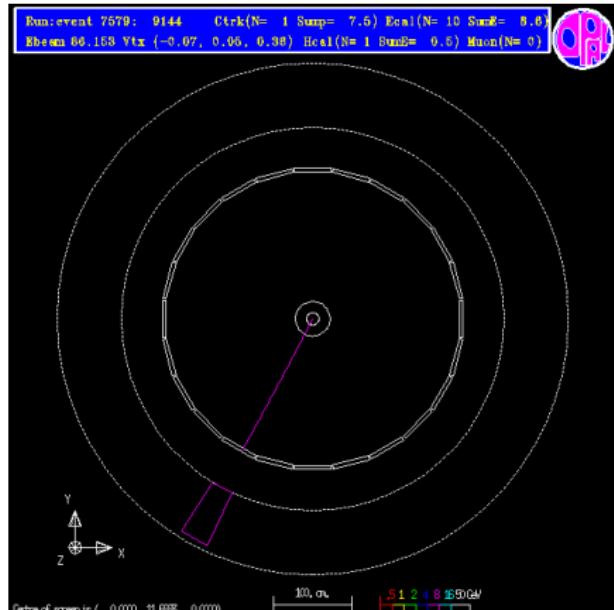
- ① Spur im Spurdetektor (—)



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

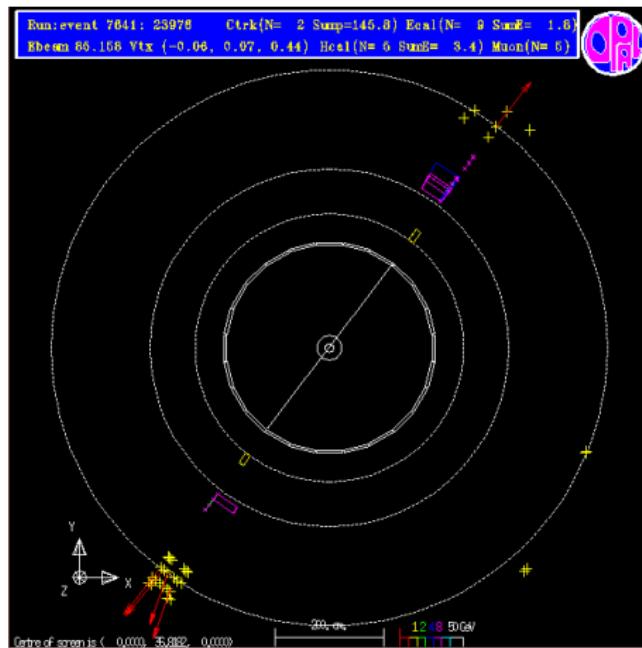
Energie- und Impulserhaltung

- 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

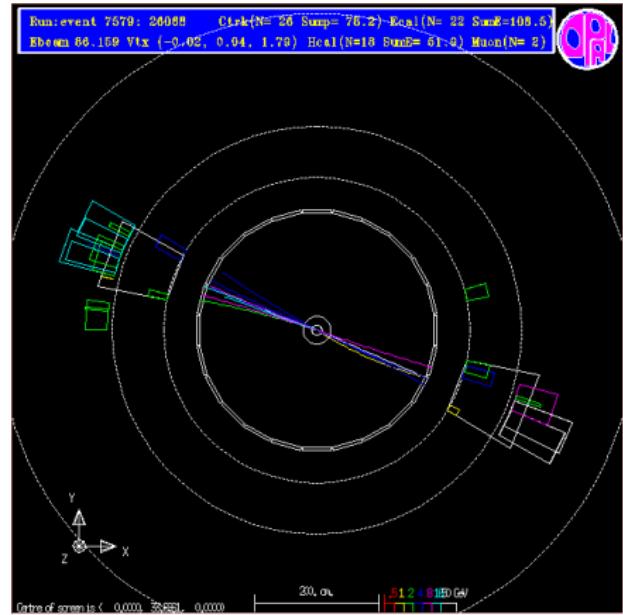
$$Z^0 \rightarrow q\bar{q}$$

Jets

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



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



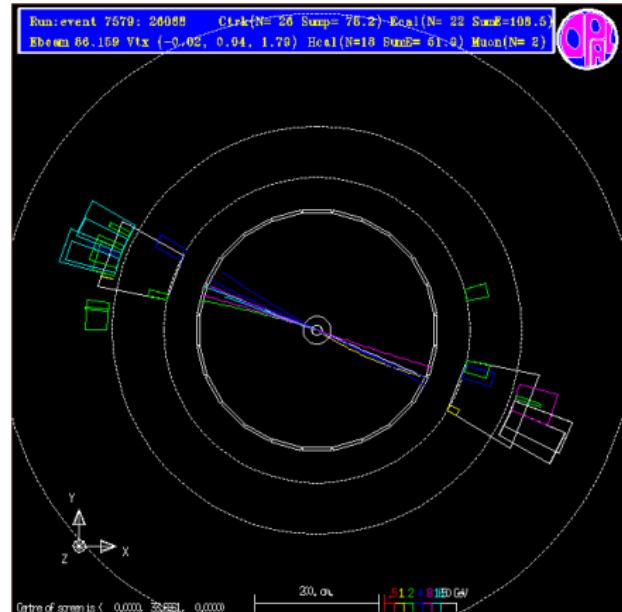
$$Z^0 \rightarrow q\bar{q}$$

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: $Z^0 \rightarrow q\bar{q} \rightarrow \text{Jets}$

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

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

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

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

Mögliche τ -Zerfälle

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

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

Mögliche τ -Zerfälle

- $\tau \rightarrow e + X$

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

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

Mögliche τ -Zerfälle

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

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

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

Mögliche τ -Zerfälle

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

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

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

Mögliche τ -Zerfälle

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

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

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

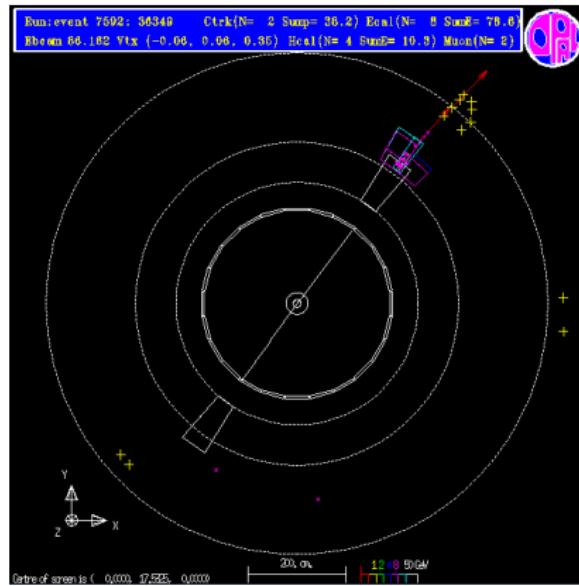
Mögliche τ -Zerfälle

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

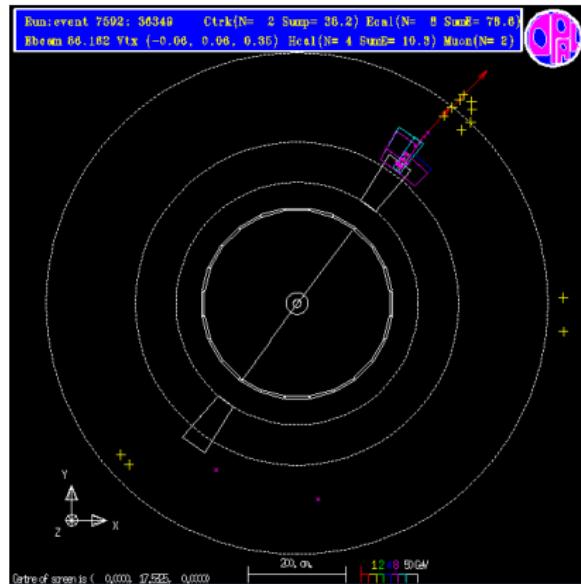


Beliebige Kombination möglich für $Z^0 \rightarrow \tau^+ \tau^-$

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

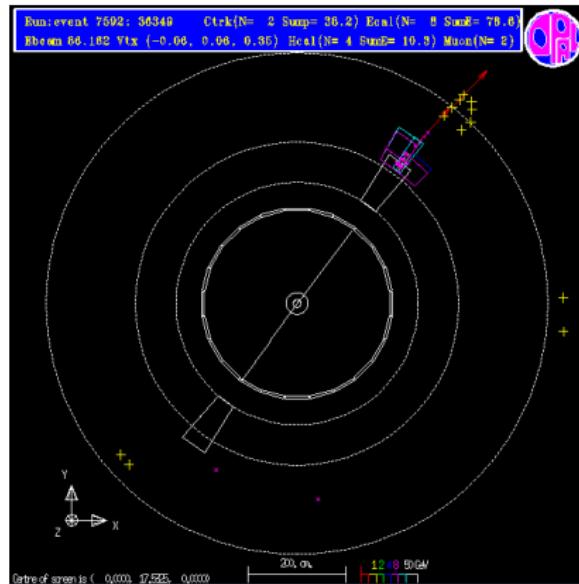


Zwei mögliche $Z^0 \rightarrow \tau^+ \tau^-$ Ereignisse

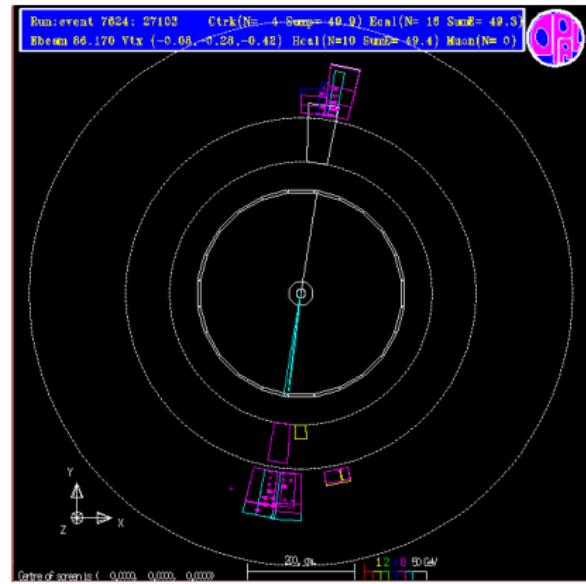


- ① $\tau \rightarrow e + X$
- ② $\tau \rightarrow \mu + X$

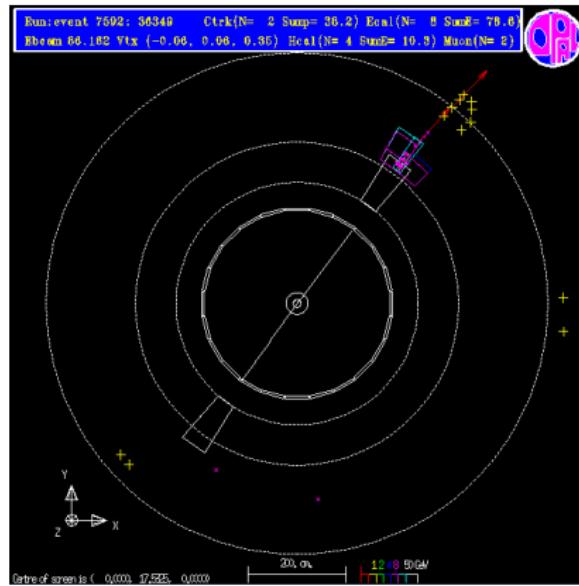
Zwei mögliche $Z^0 \rightarrow \tau^+\tau^-$ Ereignisse



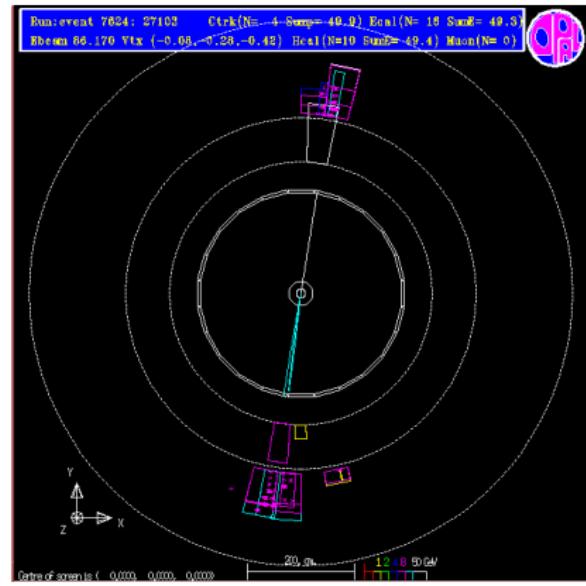
- 1 $\tau \rightarrow e + X$
- 2 $\tau \rightarrow \mu + X$



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

Physics → Identifying Particles → [German] jump to measurements of Z decays
[\(http://physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/challengez.html\)](http://physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/challengez.html)

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

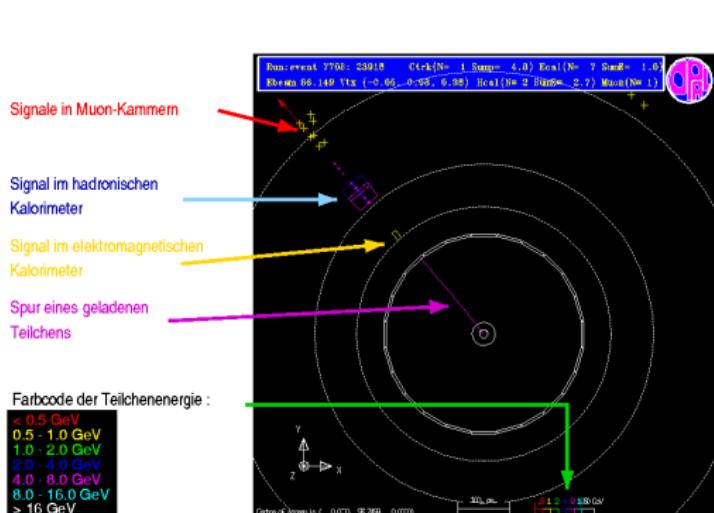
- Je eine Spur und Signal im elektromagnetischen Kalorimeter

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

- Je eine Spur, Signale in beiden Kalorimetern und Muonkammern

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

- Je Jets (Spuren und Signale in beiden Kalorimetern, manchmal μ)



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

- Je e oder μ oder Jet (1h oder 3h)

Teilchenphysik, wir kommen!

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