

Teilchenphysik Masterclasses

Das Leben, das Universum und der ganze Rest



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN



NETZWERK
TEILCHENWELT

Online Vorbereitungskurs



Raum Name:
TEILCHENWELT

Was weiß ich noch?





"Wir haben es!" CERN feiert Durchbruch bei Higgs-Suche

04.07.2012 | 11:02 | von Daniel Breuss (DiePresse.com)

Das Higgs-Boson verleiht den Bausteinen des Universums ihre Masse. Seit Jahrzehnten suchen Forscher das Elementarteilchen. Nun wurde am Teilchenbeschleuniger LHC ein neues Teilchen gefunden, das ihm entspricht.

30.11.2009

LHC

Teilchenbeschleuniger knackt Energie-Weltrekord

Teil 1: Einführung

Warum Teilchenphysik?



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN



NETZWERK
TEILCHENWELT

Wer ist ATLAS?



38 Länder

181 Institute

3000 Wissenschaftler



Warum Teilchenphysik?

- ▶ Erkenntnisgewinn!

- ...z.B. über die Geschichte, Funktionsweise und den Aufbau des Universums

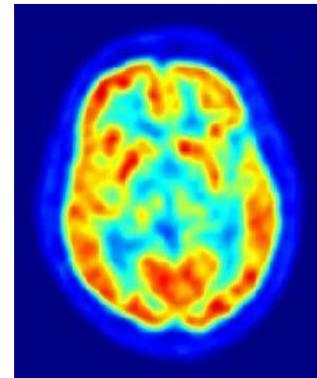
Warum Teilchenphysik?

- ▶ Erkenntnisgewinn!
 - ...z.B. über die Geschichte, Funktionsweise und den Aufbau des Universums
- ▶ Anwendungen:
 - World Wide Web



Warum Teilchenphysik?

- ▶ Erkenntnisgewinn!
 - ...z.B. über die Geschichte, Funktionsweise und den Aufbau des Universums
- ▶ Anwendungen:
 - World Wide Web
 - Medizin: Tumorthherapie, PET
 - Weiterentwicklung von Technologien für Computerchips, Detektoren, Magneten und vieles mehr





Wie forschen Teilchenphysiker?

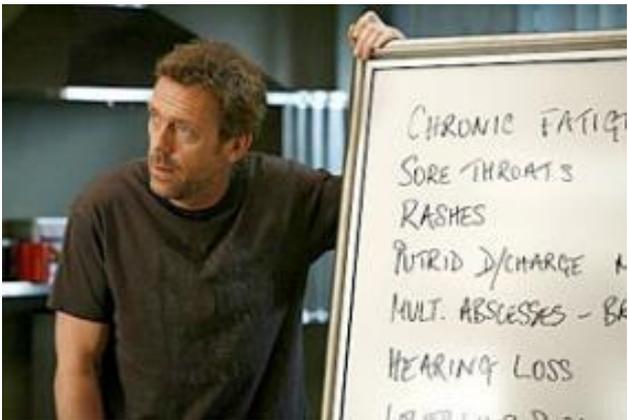
Wie forschen Teilchenphysiker?



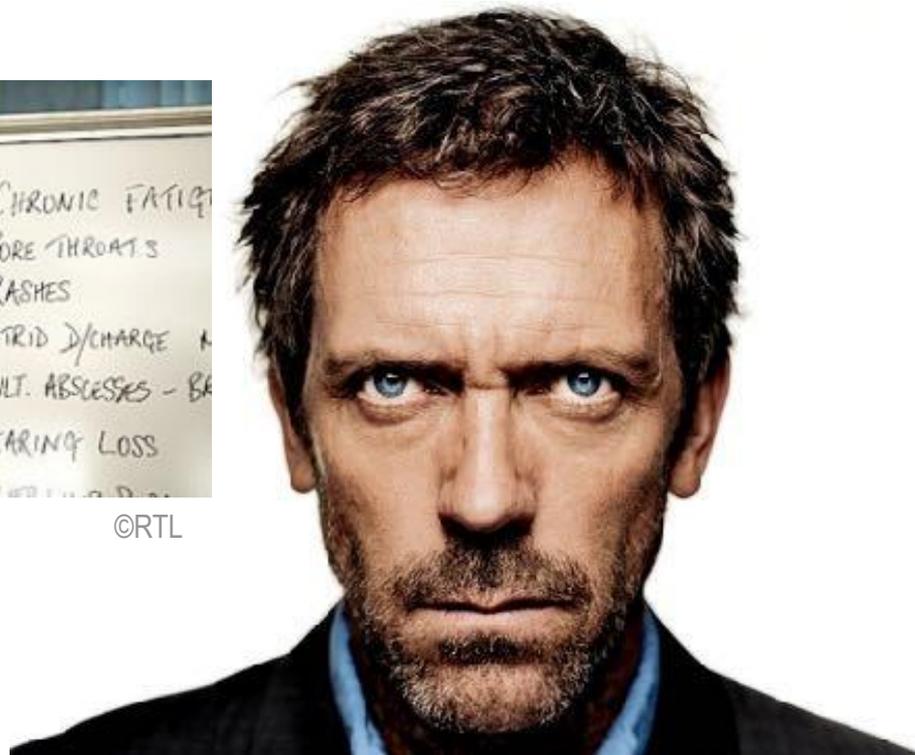
©RTL

Wie forschen Teilchenphysiker?

- ▶ Analogie zur Medizin:
 - Medizin: Krankheitserreger verursachen beobachtbare Symptome



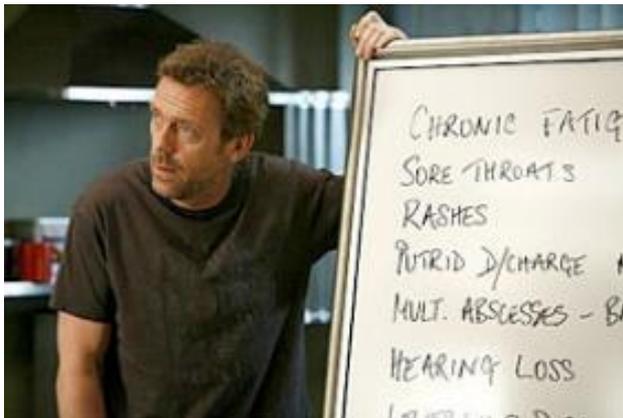
©RTL



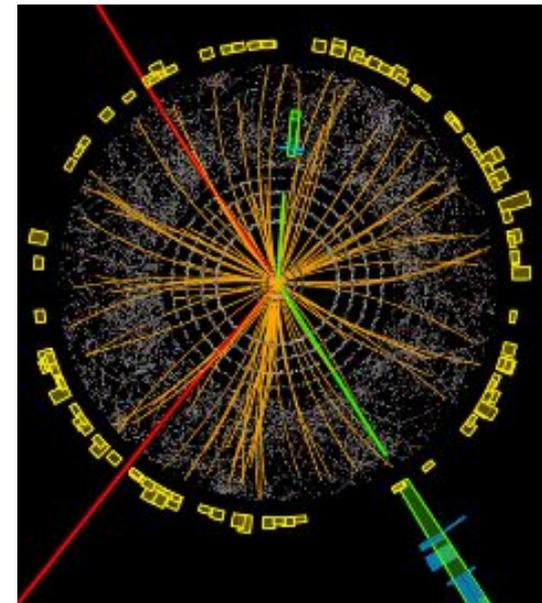
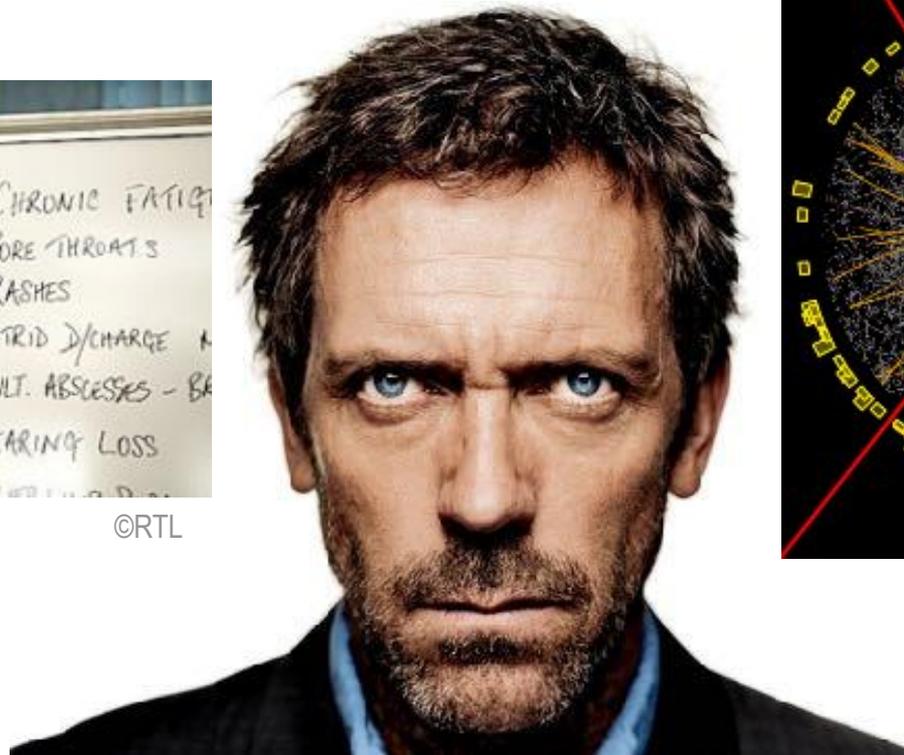
Wie forschen Teilchenphysiker?

► Analogie zur Medizin:

- Medizin: Krankheitserreger verursachen beobachtbare Symptome
- Teilchenphysik: Interaktion von Teilchen nicht direkt beobachtbar, nur sog. Endzustände



©RTL



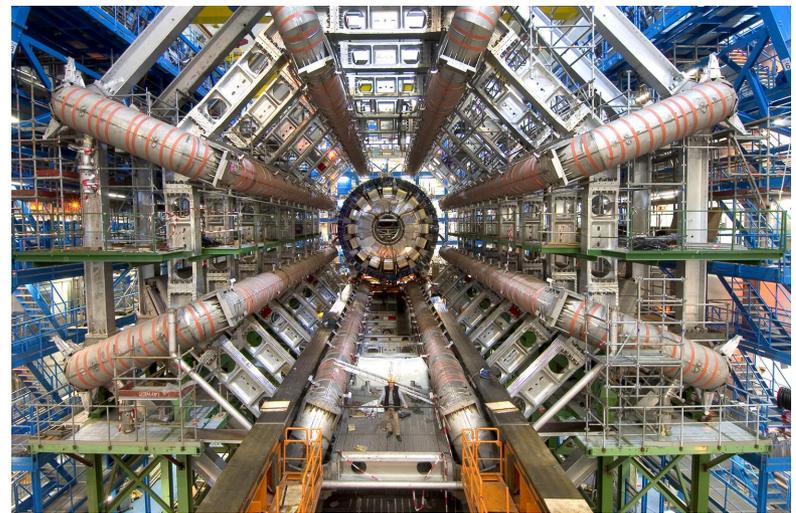
©CERN

Wie forschen Teilchenphysiker?

- ▶ Medizin: aufwendige Forschung mit hochkomplexen Maschinen notwendig



© Klinik Augustinum München



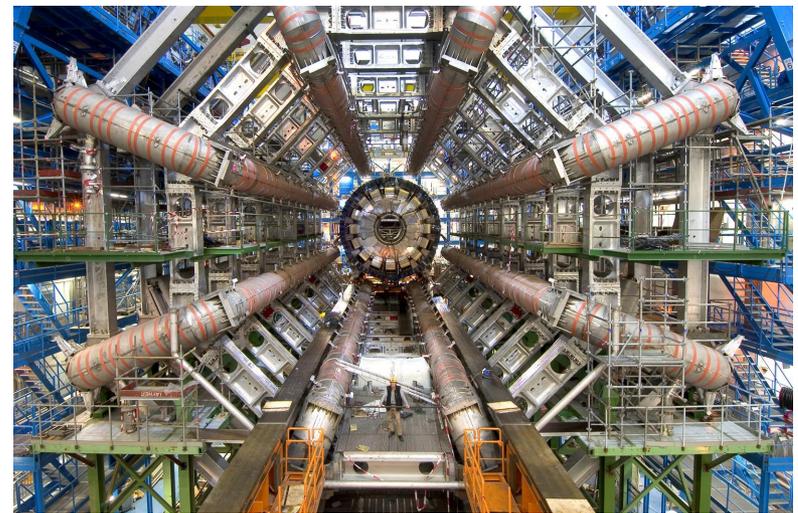
©CERN

Wie forschen Teilchenphysiker?

- ▶ Medizin: aufwendige Forschung mit hochkomplexen Maschinen notwendig
- ▶ Teilchenphysik: aufwendige Forschung mit hochkomplexen Maschinen notwendig



© Klinik Augustinum München



©CERN

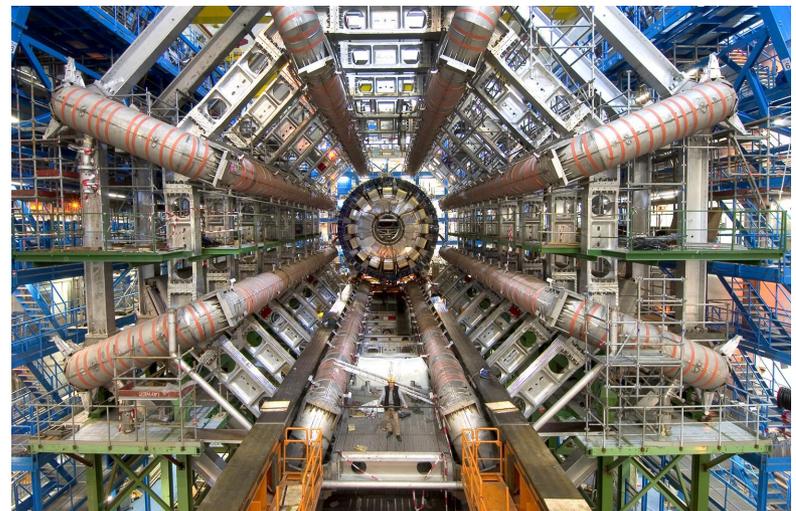
Wie forschen Teilchenphysiker?

- ▶ Medizin: aufwendige Forschung mit hochkomplexen Maschinen notwendig
- ▶ Teilchenphysik: aufwendige Forschung mit hochkomplexen Maschinen notwendig

\$1.5 Millionen



© Klinik Augustinum München



©CERN

Wie forschen Teilchenphysiker?

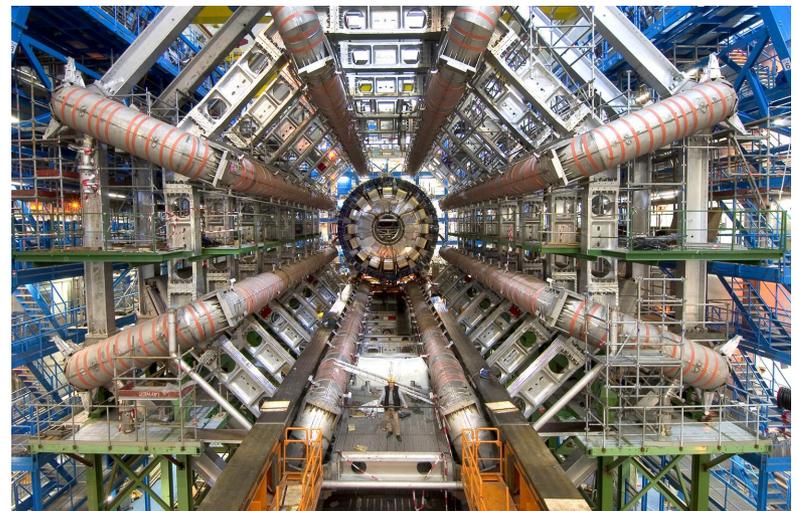
- ▶ Medizin: aufwendige Forschung mit hochkomplexen Maschinen notwendig
- ▶ Teilchenphysik: aufwendige Forschung mit hochkomplexen Maschinen notwendig

\$1.5 Millionen



© Klinik Augustinum München

\$450 Millionen



©CERN

Konkret in der Teilchenphysik

Theorie



<https://wallhere.com/de/wallpaper/255309>

Standardmodell der Teilchenphysik

- Macht Vorhersagen über:
- Art wie Teilchen wechselwirken
- Häufigkeiten dieser Wechselwirkungen

Konkret in der Teilchenphysik

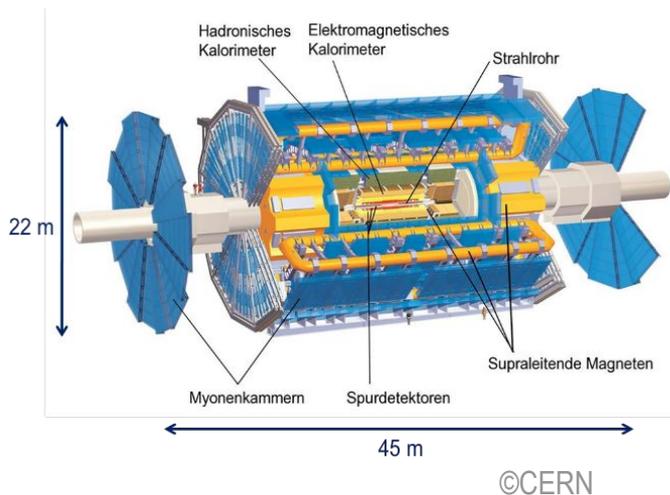
Theorie



<https://wallhere.com/de/wallpaper/255309>

Standardmodell der Teilchenphysik

- Macht Vorhersagen über:
- Art wie Teilchen wechselwirken
- Häufigkeiten dieser Wechselwirkungen



z.B. ATLAS und CMS am LHC

- prüft, ob die Vorhersagen der Theorie stimmen
- Aufnahme von Teilchenkollisionen
- Vergleich der erhaltenen Daten mit den Vorhersagen der Theorie



Kann man Theorien beweisen?

Kann man Theorien beweisen?



Kann man Theorien beweisen?



- ▶ Vermutete Pokerregeln → Theorie
- ▶ Beobachtung von Pokerspielen → Experiment

Kann man Theorien beweisen?



- ▶ Vermutete Pokerregeln → Theorie
- ▶ Beobachtung von Pokerspielen → Experiment
- ◀ Nein, man kann Theorien nur widerlegen!

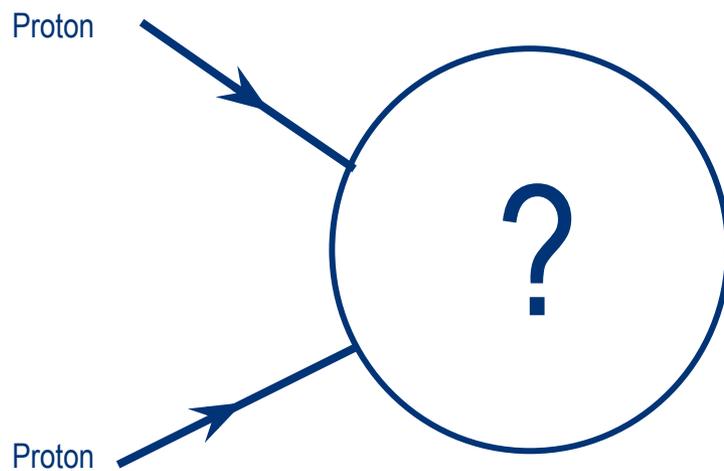


Wie forschen Teilchenphysiker?

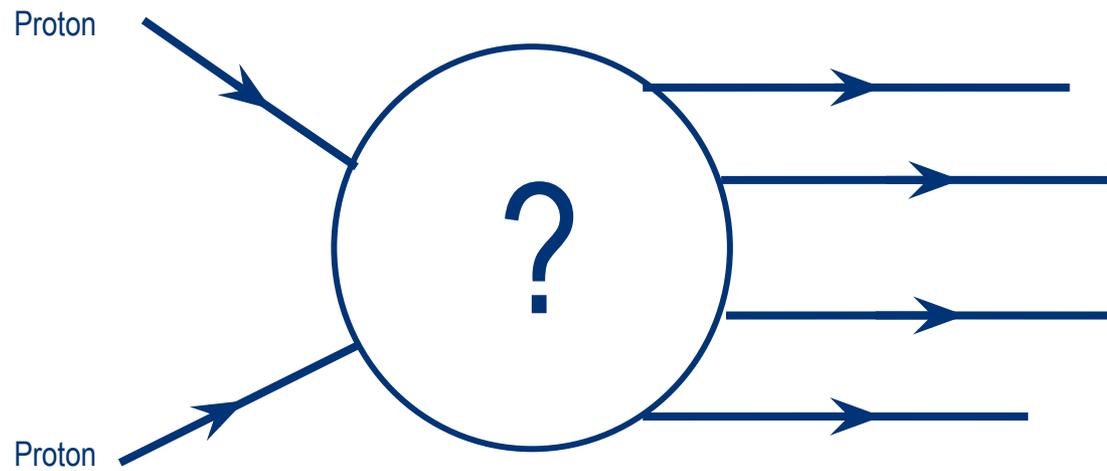
Wie forschen Teilchenphysiker?



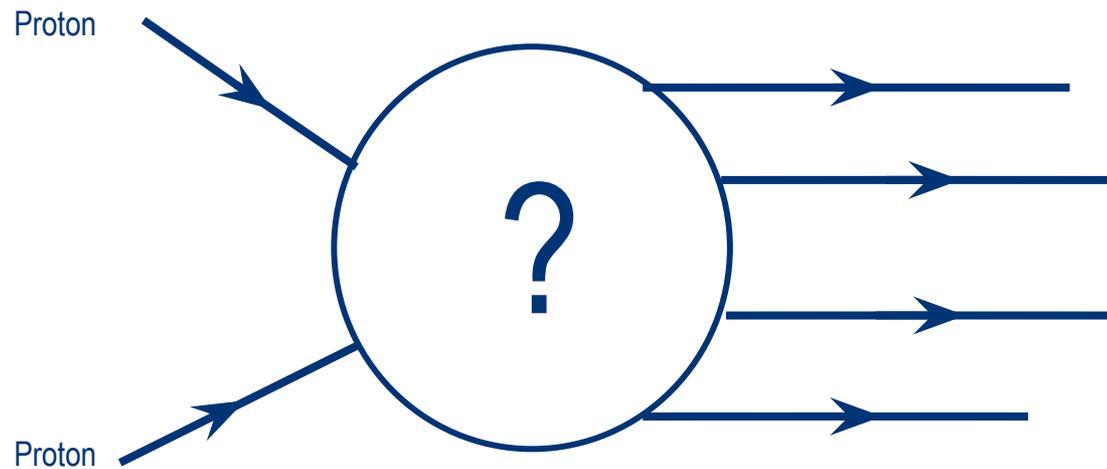
Wie forschen Teilchenphysiker?



Wie forschen Teilchenphysiker?



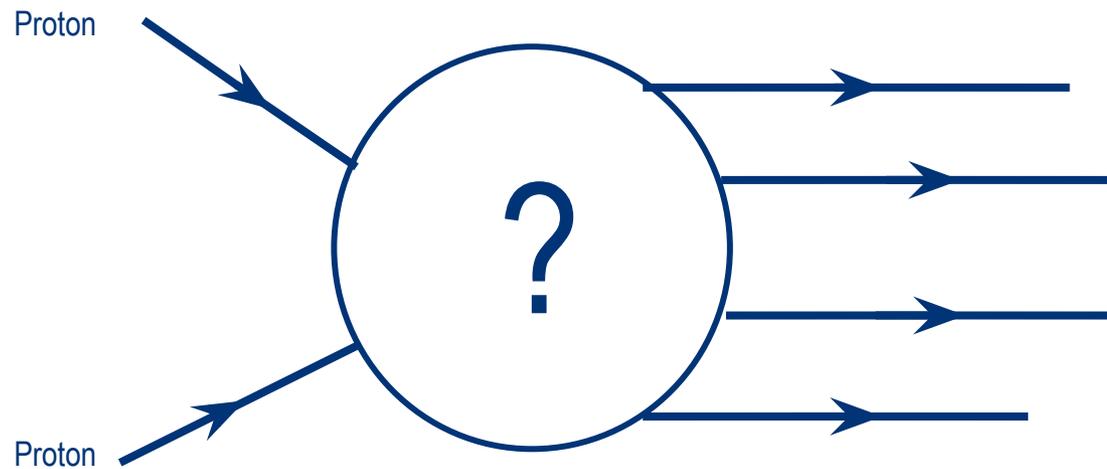
Wie forschen Teilchenphysiker?



©CERN

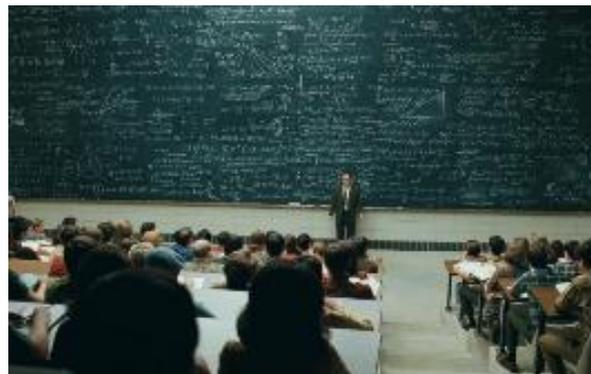
Beschleuniger

Wie forschen Teilchenphysiker?



©CERN

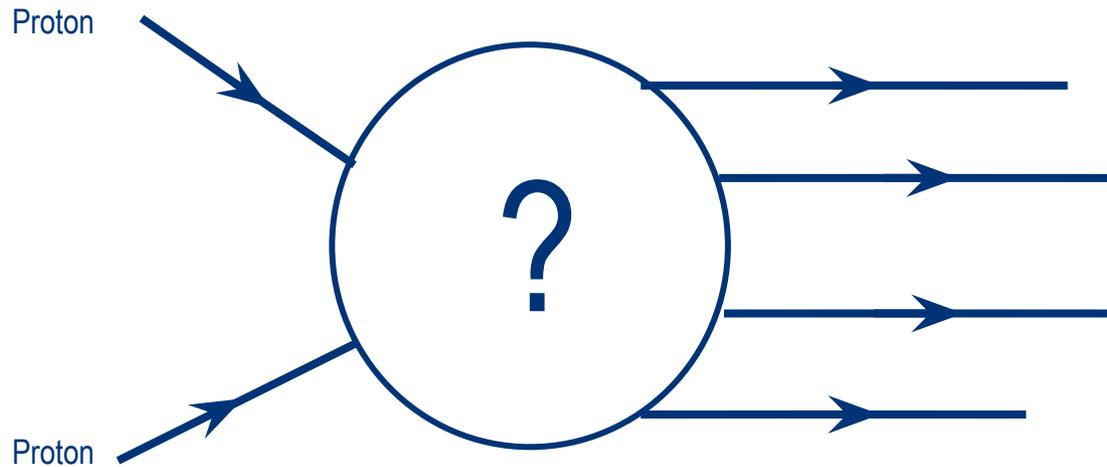
Beschleuniger



<https://wallhere.com/de/wallpaper/255309>

Theorie

Wie forschen Teilchenphysiker?



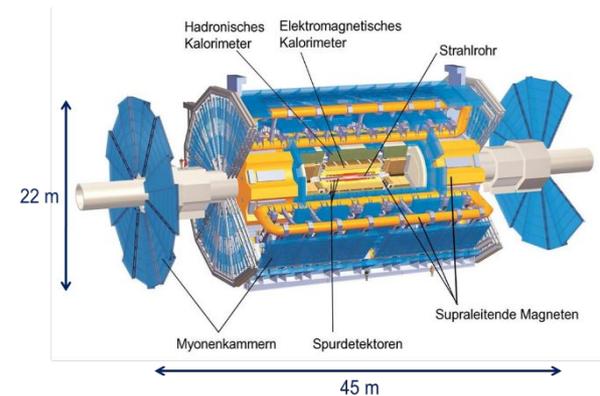
©CERN

Beschleuniger



<https://wallhere.com/de/wallpaper/255309>

Theorie



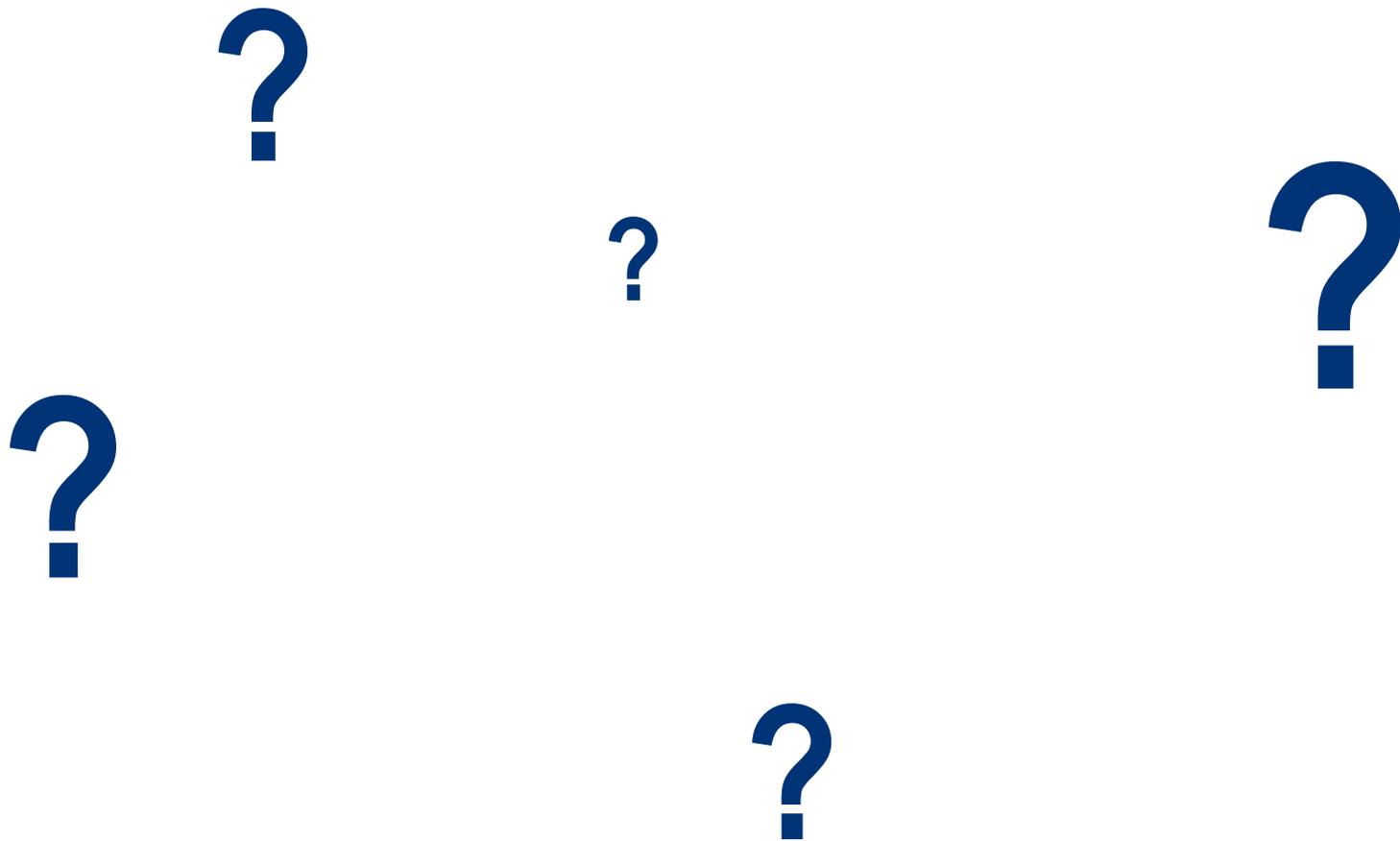
©CERN

Detektor

Gibt es Fragen soweit?



Room Name:
TEILCHENWELT





Pause



Room Name:
TEILCHENWELT

Forschen liegt in der Natur des Menschen

**Je überzeugter man von einer
Theorie ist, desto akribischer muss
man versuchen sie zu widerlegen**

**Wissenschaft bedeutet nicht
nur Kritik anzunehmen, sondern
auch selbst mit der eigenen
Forschung kritisch zu sein**

**Wissenschaft lebt davon, dass
man sich konstruktiv
widerspricht**

Teil 2: Theoretisches

Wie Physiker sich die Welt vorstellen



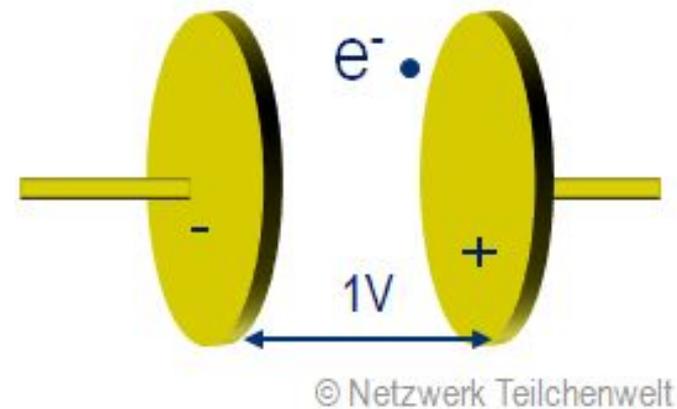
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN



NETZWERK
TEILCHENWELT

Elektronenvolt

- ▶ 1 eV ist die Energie, die ein Elektron gewinnt, wenn es eine Spannung von 1 Volt durchfliegt.
- ▶ $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$
 $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$
 $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$



Elektronenvolt

- ▶ 1 eV ist die Energie, die ein Elektron gewinnt, wenn es eine Spannung von 1 Volt durchfliegt.

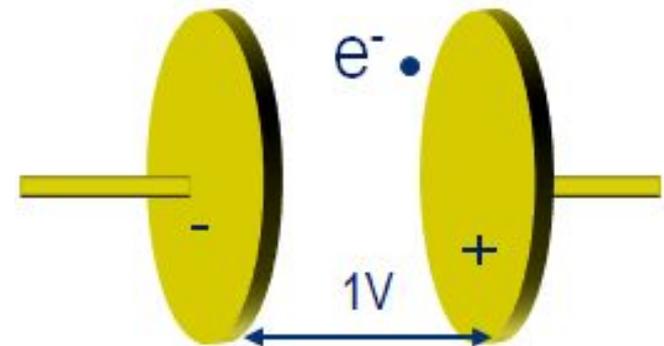
- ▶ $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$

$$1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$$

$$1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$$

- ▶ Beispiele:

- 6,5 TeV: Bewegungsenergie eines Protons im LHC, \approx Bewegungsenergie einer Mücke
- Man kann auch Massen in eV/c^2 angeben! (wegen $E=mc^2$)
- $0,94 \text{ GeV}/c^2$: Masse eines Protons



© Netzwerk Teilchenwelt

Bekannte Wechselwirkung



Bekannte Wechselwirkung

Gravitation



Elektro-
magnetische
Wechselwirkung

Bekannte Wechselwirkung

Gravitation



Elektro-
magnetische
Wechselwirkung

Warum „halten“ die Protonen im Atomkern zusammen,
obwohl sie sich elektromagnetisch abstoßen?

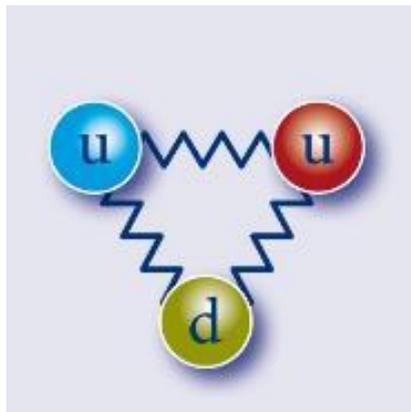
Was ist Teilchenphysik?

Gravitation



Elektro-
magnetische
Wechselwirkung

Starke
Wechselwirkung



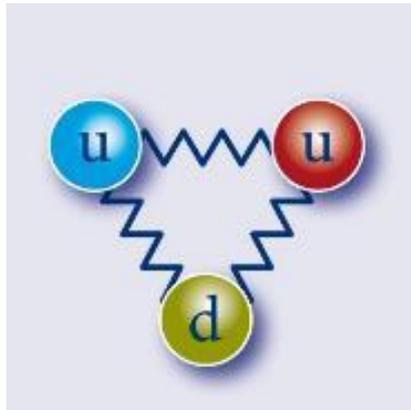
Was ist Teilchenphysik?

Gravitation



Elektro-
magnetische
Wechselwirkung

Starke
Wechselwirkung



Warum scheint die Sonne seit
nunmehr über vier Milliarden Jahren?
Umwandlung: $p \rightarrow n$

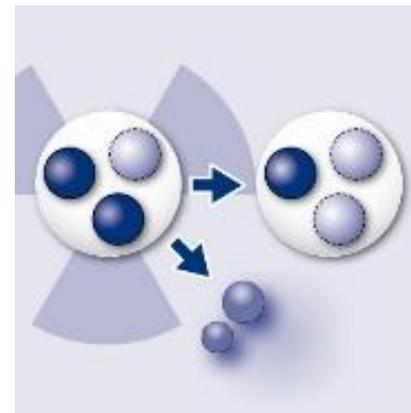
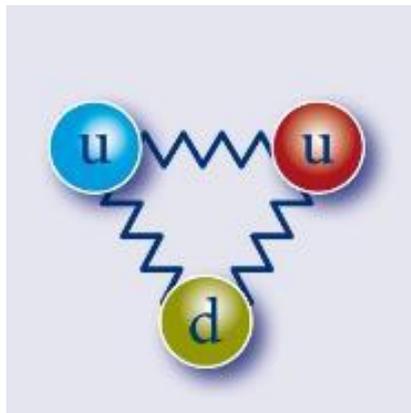
Was ist Teilchenphysik?

Gravitation



Elektro-
magnetische
Wechselwirkung

Starke
Wechselwirkung



Schwache WW

Was ist Teilchenphysik?

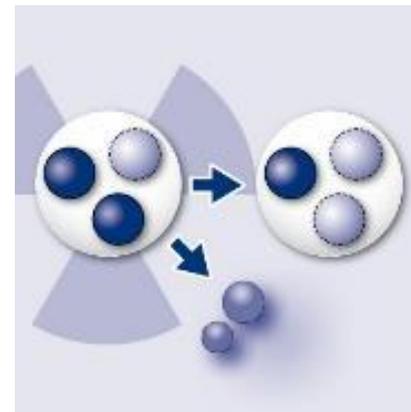
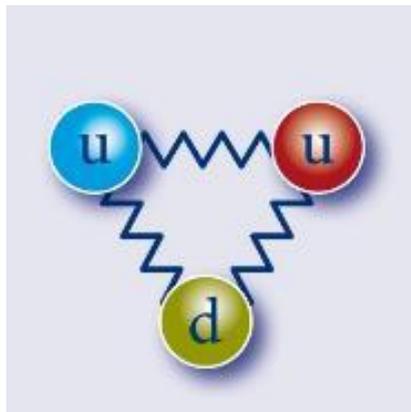
- ▶ Lehre von den **Wechselwirkungen** zwischen den fundamentalen Bausteinen der Natur.

Gravitation



Elektro-
magnetische
Wechselwirkung

Starke
Wechselwirkung



Schwache WW



Room Name:
TEILCHENWELT

Wechselwirkungen

- ▶ Welche Wechselwirkung spielt die Hauptrolle?
 - Jemand telefoniert mit dem Handy
 - Ein Atomkern wandelt sich durch eine Beta-Umwandlung um
 - Viele Atomkerne sind stabil, obwohl sich Protonen gegenseitig abstoßen
 - Eine Kompassnadel richtet sich nach Norden aus
 - Zwei Atome gehen eine chemische Bindung ein
 - Ein Glas fällt vom Tisch
 - Zwei Up-Quarks und ein Down-Quark bilden ein Proton; Quarks kommen nie einzeln vor

Wechselwirkungen



Room Name:
TEILCHENWELT

▶ Welche Wechselwirkung spielt die Hauptrolle?



- Jemand telefoniert mit dem Handy
- Ein Atomkern wandelt sich durch eine Beta-Umwandlung um
- Viele Atomkerne sind stabil, obwohl sich Protonen gegenseitig abstoßen
- Eine Kompassnadel richtet sich nach Norden aus
- Zwei Atome gehen eine chemische Bindung ein
- Ein Glas fällt vom Tisch
- Zwei Up-Quarks und ein Down-Quark bilden ein Proton; Quarks kommen nie einzeln vor

Wechselwirkungen



Room Name:
TEILCHENWELT

▶ Welche Wechselwirkung spielt die Hauptrolle?



- Jemand telefoniert mit dem Handy



- Ein Atomkern wandelt sich durch eine Beta-Umwandlung um
- Viele Atomkerne sind stabil, obwohl sich Protonen gegenseitig abstoßen
- Eine Kompassnadel richtet sich nach Norden aus
- Zwei Atome gehen eine chemische Bindung ein
- Ein Glas fällt vom Tisch
- Zwei Up-Quarks und ein Down-Quark bilden ein Proton; Quarks kommen nie einzeln vor

Wechselwirkungen



Room Name:
TEILCHENWELT

▶ Welche Wechselwirkung spielt die Hauptrolle?



- Jemand telefoniert mit dem Handy



- Ein Atomkern wandelt sich durch eine Beta-Umwandlung um



- Viele Atomkerne sind stabil, obwohl sich Protonen gegenseitig abstoßen

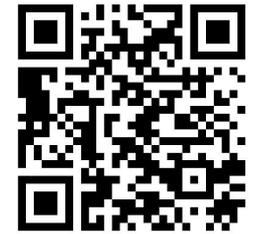
- Eine Kompassnadel richtet sich nach Norden aus

- Zwei Atome gehen eine chemische Bindung ein

- Ein Glas fällt vom Tisch

- Zwei Up-Quarks und ein Down-Quark bilden ein Proton; Quarks kommen nie einzeln vor

Wechselwirkungen



Room Name:
TEILCHENWELT

► Welche Wechselwirkung spielt die Hauptrolle?



- Jemand telefoniert mit dem Handy



- Ein Atomkern wandelt sich durch eine Beta-Umwandlung um



- Viele Atomkerne sind stabil, obwohl sich Protonen gegenseitig abstoßen



- Eine Kompassnadel richtet sich nach Norden aus

- Zwei Atome gehen eine chemische Bindung ein

- Ein Glas fällt vom Tisch

- Zwei Up-Quarks und ein Down-Quark bilden ein Proton; Quarks kommen nie einzeln vor

Wechselwirkungen



Room Name:
TEILCHENWELT

► Welche Wechselwirkung spielt die Hauptrolle?



- Jemand telefoniert mit dem Handy



- Ein Atomkern wandelt sich durch eine Beta-Umwandlung um



- Viele Atomkerne sind stabil, obwohl sich Protonen gegenseitig abstoßen



- Eine Kompassnadel richtet sich nach Norden aus



- Zwei Atome gehen eine chemische Bindung ein

- Ein Glas fällt vom Tisch

- Zwei Up-Quarks und ein Down-Quark bilden ein Proton; Quarks kommen nie einzeln vor



Room Name:
TEILCHENWELT

Wechselwirkungen

► Welche Wechselwirkung spielt die Hauptrolle?



- Jemand telefoniert mit dem Handy



- Ein Atomkern wandelt sich durch eine Beta-Umwandlung um



- Viele Atomkerne sind stabil, obwohl sich Protonen gegenseitig abstoßen



- Eine Kompassnadel richtet sich nach Norden aus

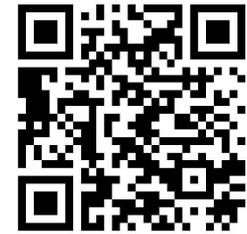


- Zwei Atome gehen eine chemische Bindung ein



- Ein Glas fällt vom Tisch

- Zwei Up-Quarks und ein Down-Quark bilden ein Proton; Quarks kommen nie einzeln vor



Room Name:
TEILCHENWELT

Wechselwirkungen

► Welche Wechselwirkung spielt die Hauptrolle?



- Jemand telefoniert mit dem Handy



- Ein Atomkern wandelt sich durch eine Beta-Umwandlung um



- Viele Atomkerne sind stabil, obwohl sich Protonen gegenseitig abstoßen



- Eine Kompassnadel richtet sich nach Norden aus



- Zwei Atome gehen eine chemische Bindung ein



- Ein Glas fällt vom Tisch



- Zwei Up-Quarks und ein Down-Quark bilden ein Proton; Quarks kommen nie einzeln vor



Die fundamentalen Wechselwirkungen

- ▶ lassen sich auf sehr ähnliche Prinzipien zurückführen und mathematisch beschreiben!



Die fundamentalen Wechselwirkungen

- ▶ lassen sich auf sehr ähnliche Prinzipien zurückführen und mathematisch beschreiben!
- ▶ Coulombsches Gesetz:

Die fundamentalen Wechselwirkungen

- ▶ lassen sich auf sehr ähnliche Prinzipien zurückführen und mathematisch beschreiben!
- ▶ Coulombsches Gesetz:

$$F_C = \frac{e^2}{4 \pi \epsilon_0} \cdot \frac{Z_1 \cdot Z_2}{r^2}$$

Die fundamentalen Wechselwirkungen

- ▶ lassen sich auf sehr ähnliche Prinzipien zurückführen und mathematisch beschreiben!
- ▶ Coulombsches Gesetz:

$$F_C = \frac{e^2}{4 \pi \epsilon_0} \cdot \frac{Z_1 \cdot Z_2}{r^2}$$

Elektrische Ladungszahl ist wesentliche Einflussgröße der elektromagnetischen Wechselwirkung und auf die durch diese hervorgerufenen Kräfte



Elektrische Ladung und Ladungszahl

$$Q = Z \cdot e$$

Elektrische Ladung und Ladungszahl

$$Q = Z \cdot e$$



Elektrische Ladung

Elektrische Ladung und Ladungszahl

$$Q = Z \cdot e$$



Elektrische Ladung



Elektrische
Ladungszahl

Elektrische Ladung und Ladungszahl

$$Q = Z \cdot e$$

Elektrische Ladung

Elektrische
Ladungszahl

Elementarladung

Elektrische Ladung und Ladungszahl



Bsp.: Elektron

$$Q_{\text{Elektron}} = -1 \cdot e$$

Elektrische Ladung und Ladungszahl

$$Q = Z \cdot e$$

Elektrische Ladung

Elektrische
Ladungszahl

Elementarladung

Bsp.: Elektron

$$Q_{\text{Elektron}} = (-1) \cdot e$$

Beschränkung auf elektrische Ladungszahl Z
als charakteristische Teilcheneigenschaft



Erweiterung: Konzept der Ladung



Erweiterung: Konzept der Ladung

- ▶ Einführung: Zu jeder Wechselwirkung existiert eine Ladung



Erweiterung: Konzept der Ladung

- ▶ Einführung: Zu jeder Wechselwirkung existiert eine Ladung
- ▶ Ladungszahlen bzw. -vektoren als charakteristische Teilcheneigenschaften

Erweiterung: Konzept der Ladung

- ▶ **Einführung:** Zu jeder Wechselwirkung existiert eine Ladung
- ▶ Ladungszahlen bzw. -vektoren als charakteristische Teilcheneigenschaften
- ▶ Bekannt:
 - Elektrische Ladung

elektrische Ladungszahl

Z

Erweiterung: Konzept der Ladung

- ▶ **Einführung:** Zu jeder Wechselwirkung existiert eine Ladung
- ▶ Ladungszahlen bzw. -vektoren als charakteristische Teilcheneigenschaften
- ▶ Bekannt:
 - Elektrische Ladung
- ▶ Neu:
 - Schwache Ladung
 - Starke (Farb-)Ladung

| | |
|---------------------------|-----------|
| elektrische Ladungszahl | Z |
| schwache Ladungszahl | I |
| starker Farbladungsvektor | \vec{C} |

Erweiterung: Konzept der Ladung

- ▶ **Einführung:** Zu jeder Wechselwirkung existiert eine Ladung
- ▶ Ladungszahlen bzw. -vektoren als charakteristische Teilcheneigenschaften

- ▶ Bekannt:

- Elektrische Ladung

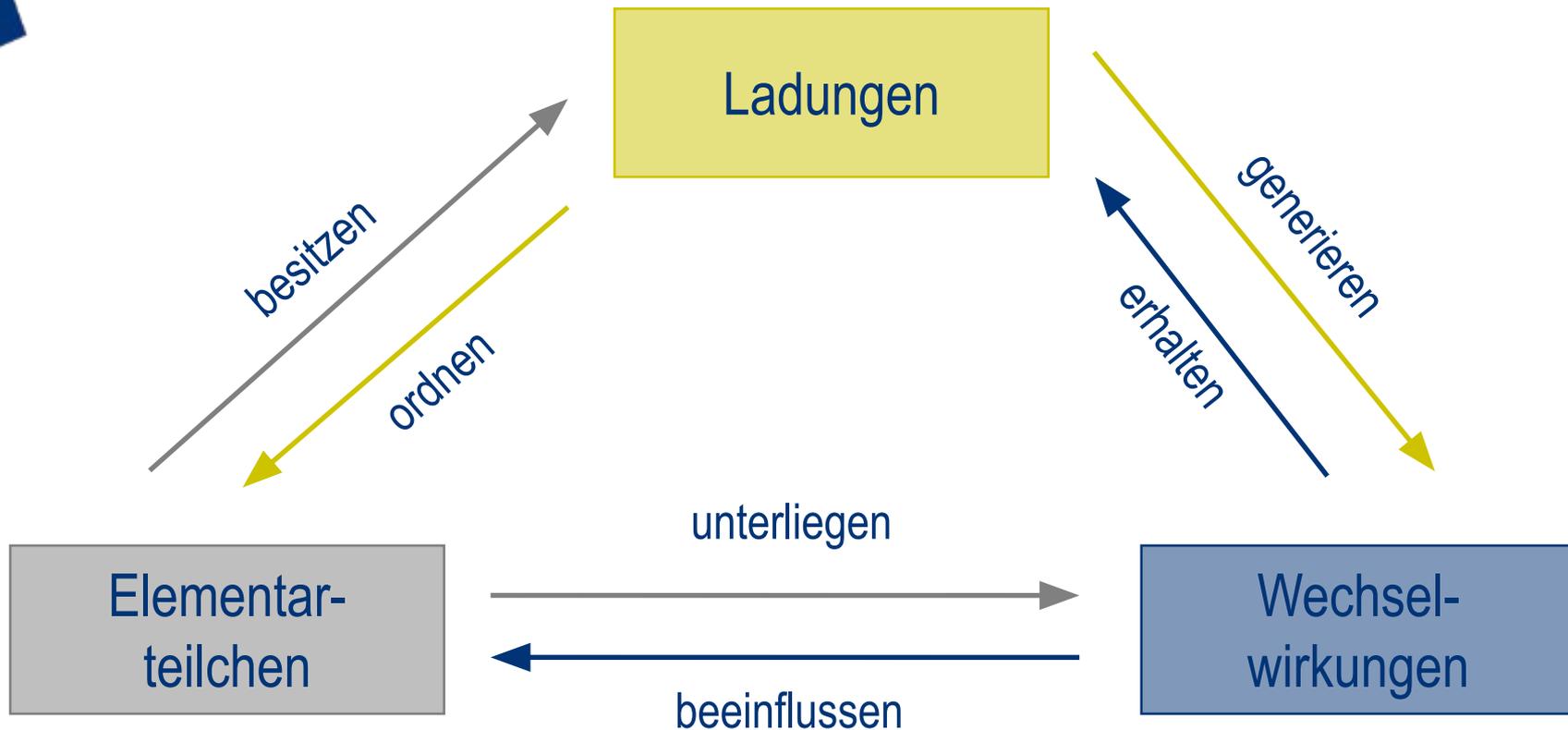
- ▶ Neu:

- Schwache Ladung
- Starke (Farb-)Ladung

| | |
|---------------------------|-----------|
| elektrische Ladungszahl | Z |
| schwache Ladungszahl | I |
| starker Farbladungsvektor | \vec{C} |

- ▶ Produkt zweier Ladungen kann positiv oder negativ sein

Die drei Grundpfeiler des Standardmodells



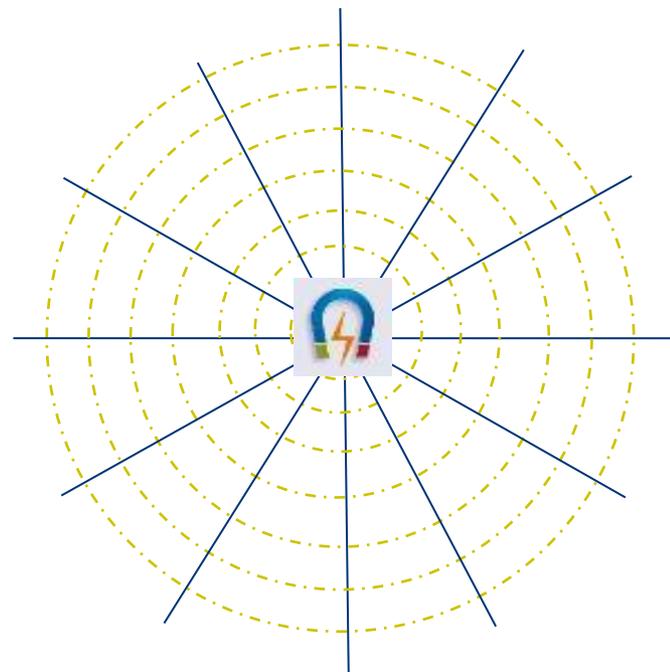
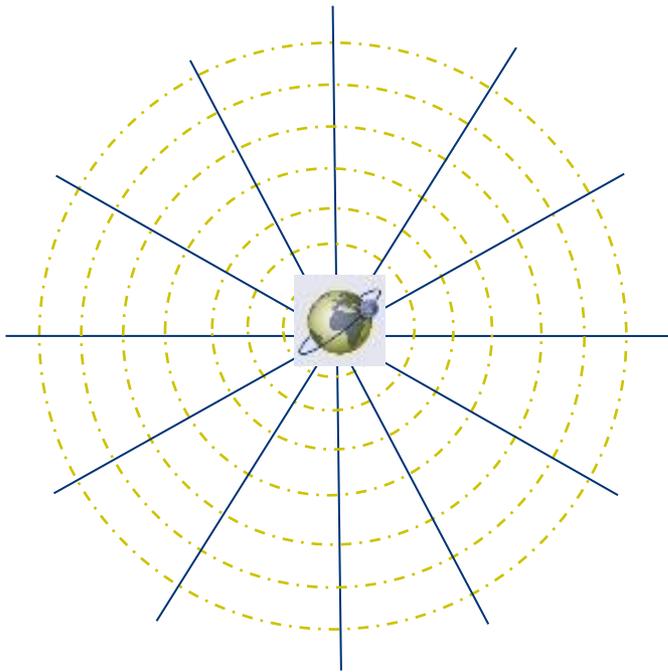


Reichweiten der fundamentalen Wechselwirkungen

- ▶ Nur 2 der 4 fundamentalen Wechselwirkungen besitzen eine unendliche Reichweite:

Reichweiten der fundamentalen Wechselwirkungen

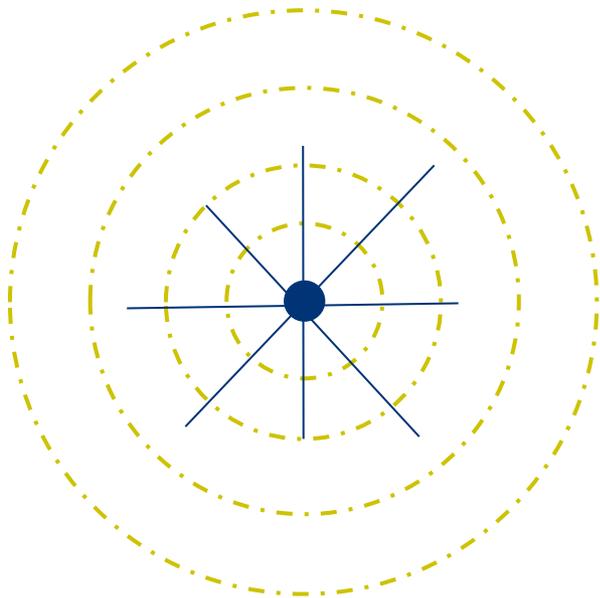
- ▶ Nur 2 der 4 fundamentalen Wechselwirkungen besitzen eine unendliche Reichweite:
 - Gravitation und elektromagnetische Wechselwirkungen



© Netzwerk Teilchenwelt

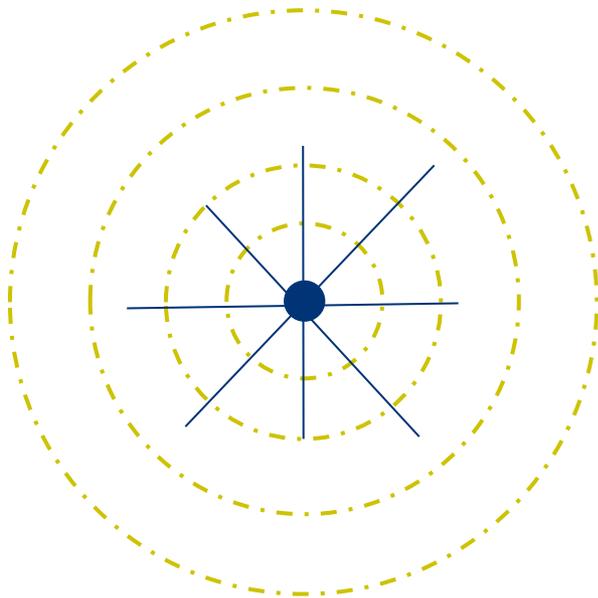
Reichweiten der fundamentalen Wechselwirkungen

- ▶ Reichweiten der starken und der schwachen Wechselwirkung sind auf subnukleare Abstände beschränkt
- ▶ Wie müsste ein zugehöriges Feldlinienbild aussehen?

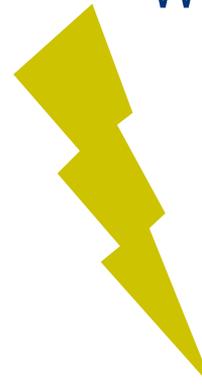


Reichweiten der fundamentalen Wechselwirkungen

- ▶ Reichweiten der starken und der schwachen Wechselwirkung sind auf subnukleare Abstände beschränkt
- ▶ Wie müsste ein zugehöriges Feldlinienbild aussehen?

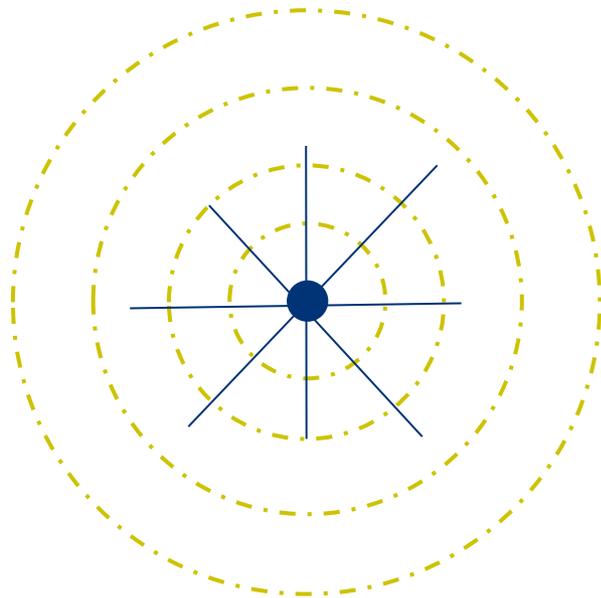


Widerspruch zum Feldlinienmodell

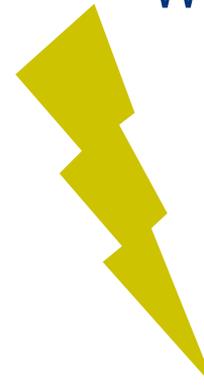


Reichweiten der fundamentalen Wechselwirkungen

- ▶ Reichweiten der starken und der schwachen Wechselwirkung sind auf subnukleare Abstände beschränkt
- ▶ Wie müsste ein zugehöriges Feldlinienbild aussehen?

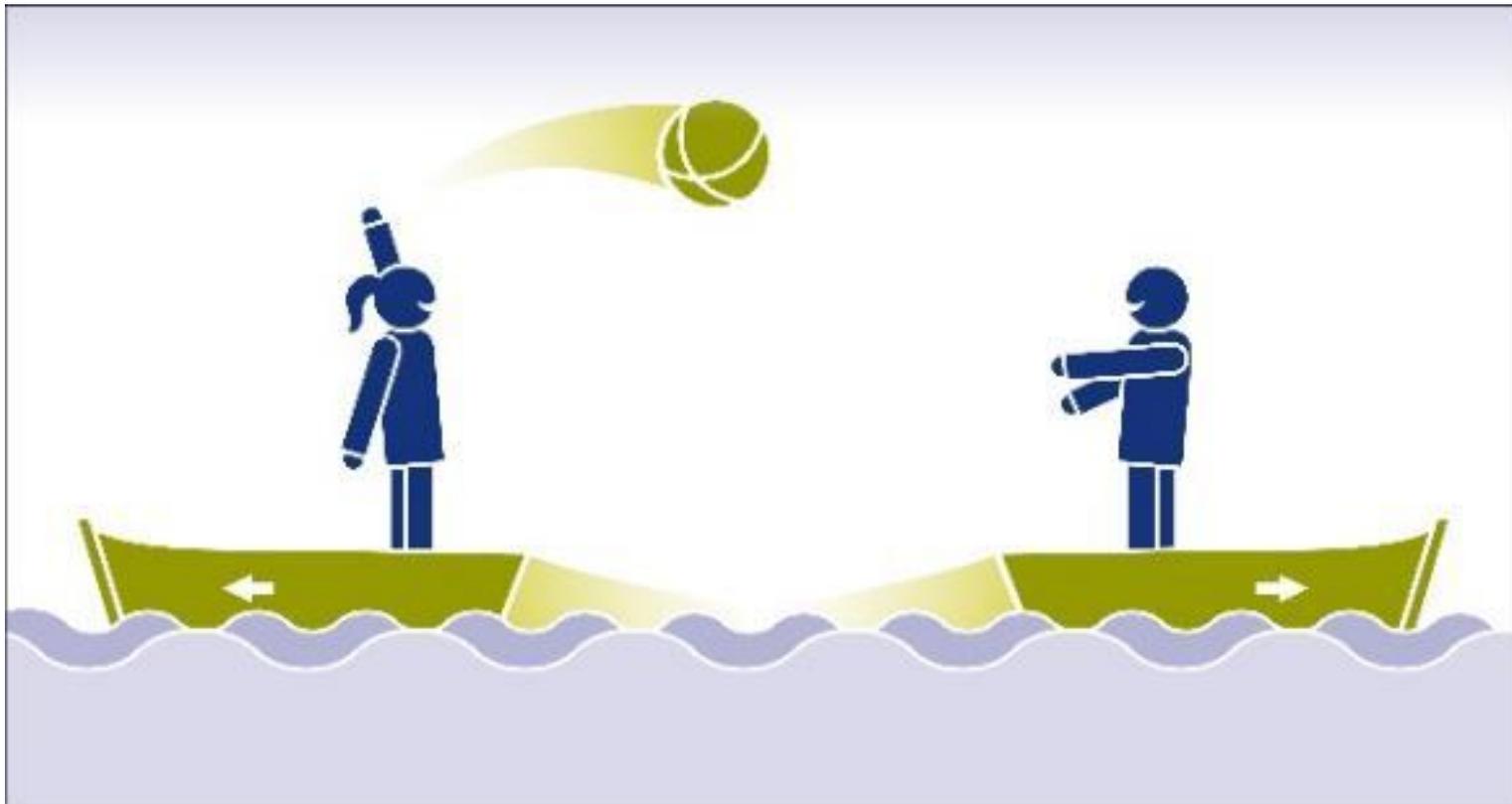


Widerspruch zum Feldlinienmodell



Neues Modell notwendig!

Botenteilchen als Vermittler der Wechselwirkungen

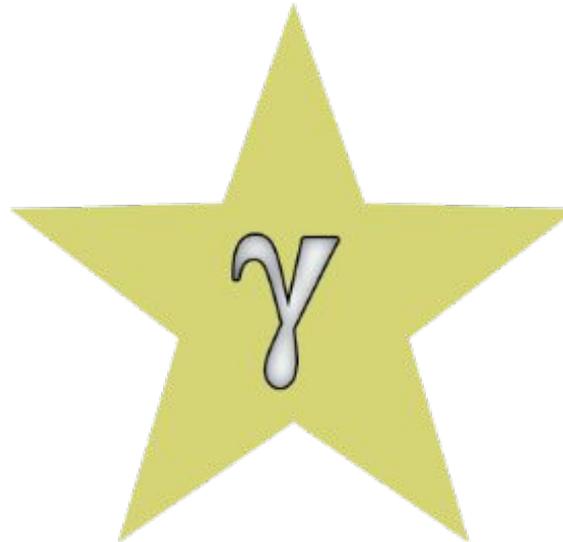


© Netzwerk Teilchenwelt

- ▶ Die elementaren Materieteilchen “kommunizieren” miteinander, indem sie **Botenteilchen** aussenden bzw. einfangen.

Die Botenteilchen der elektromagnetischen Wechselwirkung

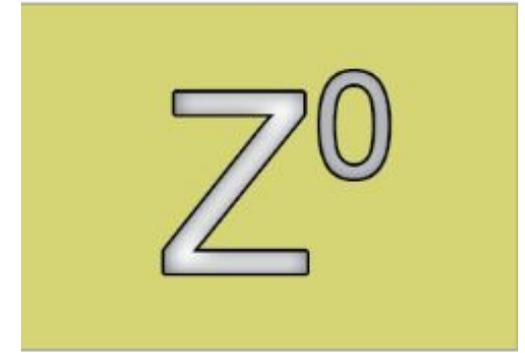
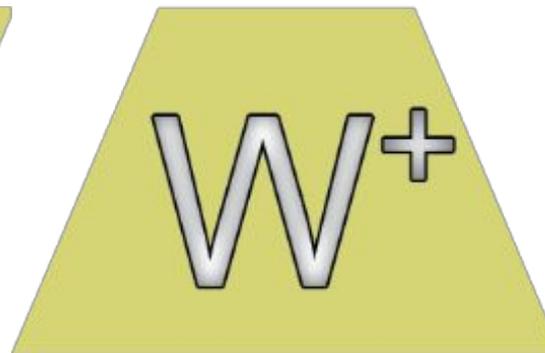
► Photonen („Lichtteilchen“)



- besitzen keine Masse ($m_\gamma = 0$)
- besitzen unendliche Reichweite

Die Botenteilchen der schwachen Wechselwirkung

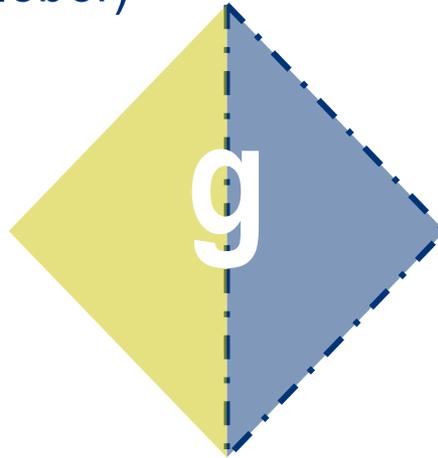
- ▶ W- und Z-Teilchen



- besitzen sehr große Massen ($m_W \approx 85 \cdot m_{\text{Proton}}$)
- aus Quantenmechanik folgt \rightarrow haben geringe Reichweite

Die Botenteilchen der starken Wechselwirkung

▶ Gluonen (engl.: glue=Kleber)



- besitzen keine Masse ($m_{\text{gluon}} = 0$)
- **Aber:** besitzen selbst starke Ladung(en)
 - Gluonen können selbst Gluonen abstrahlen
 - Sie wechselwirken miteinander
 - Starke Wechselwirkung hat begrenzte Reichweite

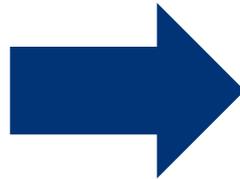


Zusammenfassung: Botenteilchen

- ▶ Im Standardmodell werden Wechselwirkungen durch Botenteilchen vermittelt

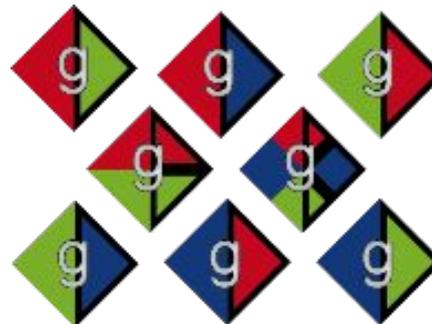
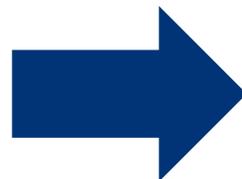
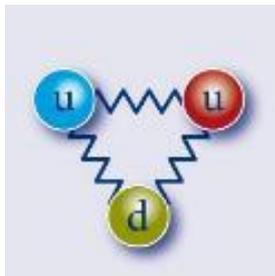
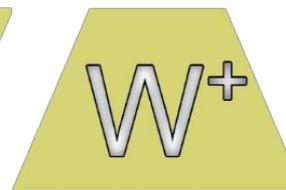
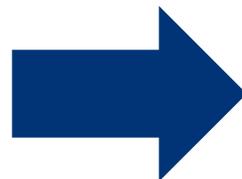
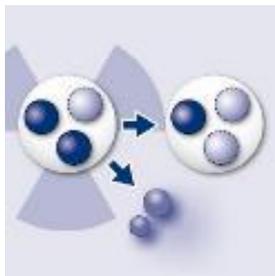
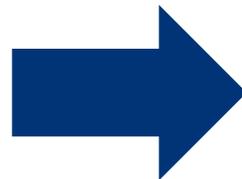
Zusammenfassung: Botenteilchen

- ▶ Im Standardmodell werden Wechselwirkungen durch Botenteilchen vermittelt



Zusammenfassung: Botenteilchen

- ▶ Im Standardmodell werden Wechselwirkungen durch Botenteilchen vermittelt



© Netzwerk Teilchenwelt

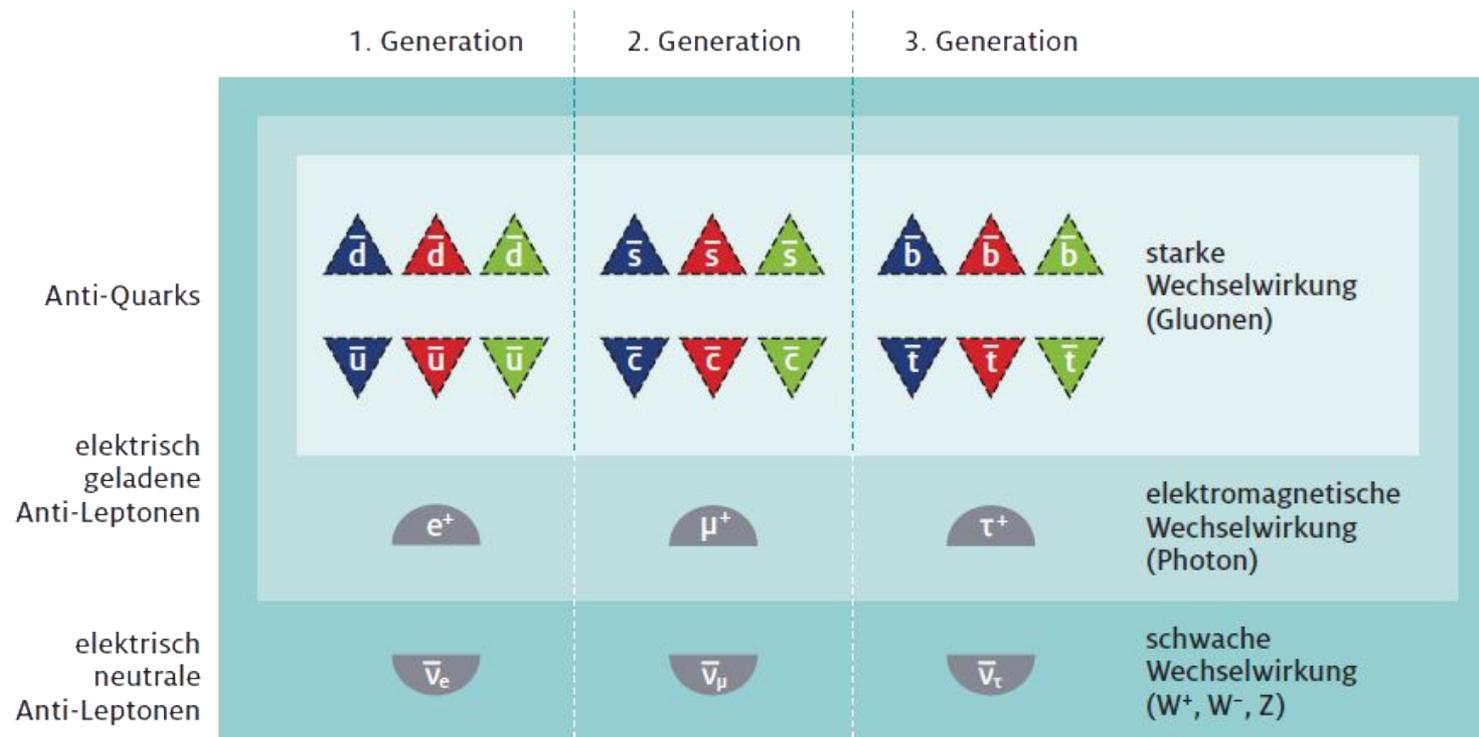
Elementarteilchen sortieren

- ▶ Bringt Ordnung in die Elementarteilchen!
Dabei helfen euch die Teilchen-Steckbriefe.



Anti-Materieteilchen

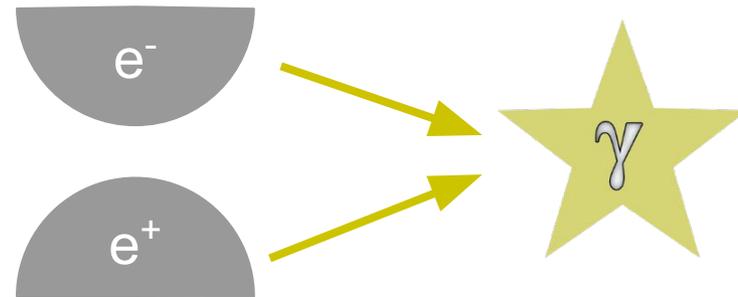
- Zu jeder Materieteilchensorte gibt es eine Anti-Teilchensorte mit gleicher Masse und entgegengesetzten Ladungen.



© Netzwerk Teilchenwelt

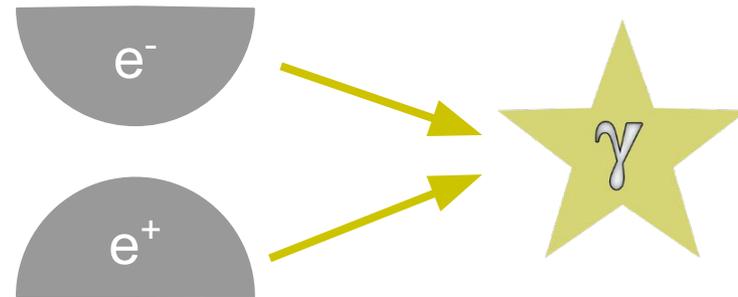
Anti-Materie

- ▶ Trifft ein Materieteilchen auf sein Anti-Teilchen, so „vernichten“ sie sich, d.h. aus der vorhandenen Energie entstehen Photonen (oder andere Botenteilchen):

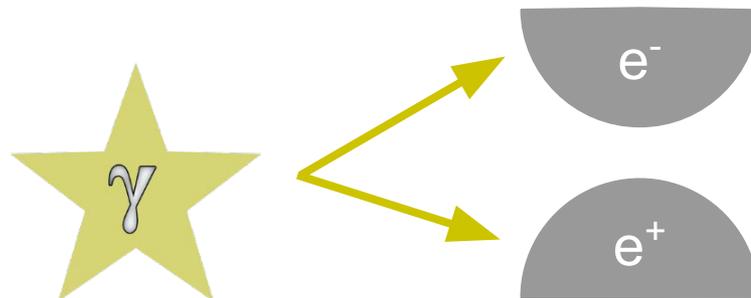


Anti-Materie

- ▶ Trifft ein Materieteilchen auf sein Anti-Teilchen, so „vernichten“ sie sich, d.h. aus der vorhandenen Energie entstehen Photonen (oder andere Botenteilchen):

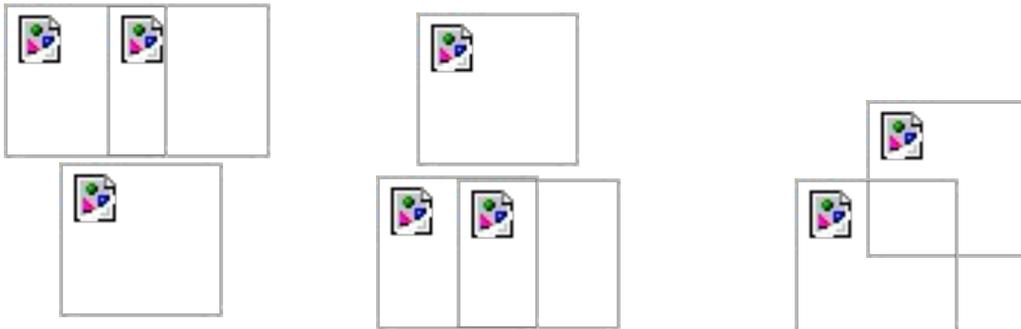


- ▶ Umgekehrt kann aus Botenteilchen ein Teilchen-Anti-Teilchen-Paar entstehen:



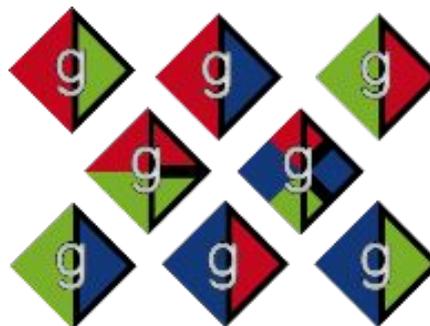
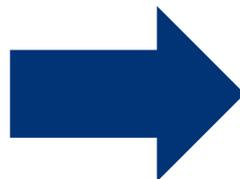
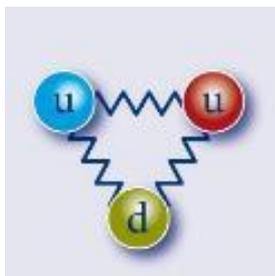
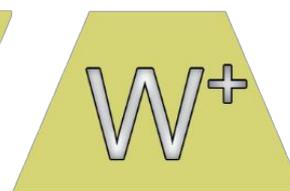
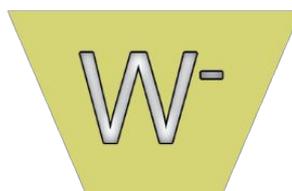
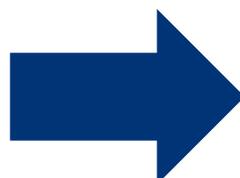
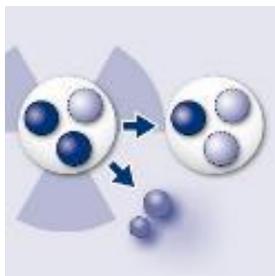
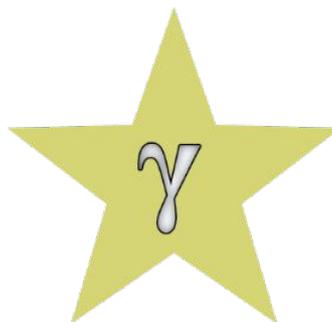
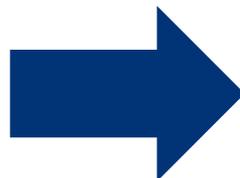
Quarks

- ▶ Man findet Quarks nie einzeln, sondern nur als „Hadronen“
 - Kombination aus 3 Quarks
 - Paar aus Quark und Anti-Quark



Zusammenfassung: Botenteilchen

- ▶ Im Standardmodell werden Wechselwirkungen durch Botenteilchen vermittelt



© Netzwerk Teilchenwelt

Feynman-Diagramme

... veranschaulichen Wechselwirkungen zwischen Elementarteilchen. Jedes Teilchen wird durch eine Linienart dargestellt:

Materieteilchen



Antimaterieteilchen



W- oder Z-Boson,
Photon



Gluon





Feynman - Diagramme

... zeigen:

Feynman - Diagramme

... zeigen:

- ▶ welche Materieteilchen vor der Wechselwirkung vorhanden sind

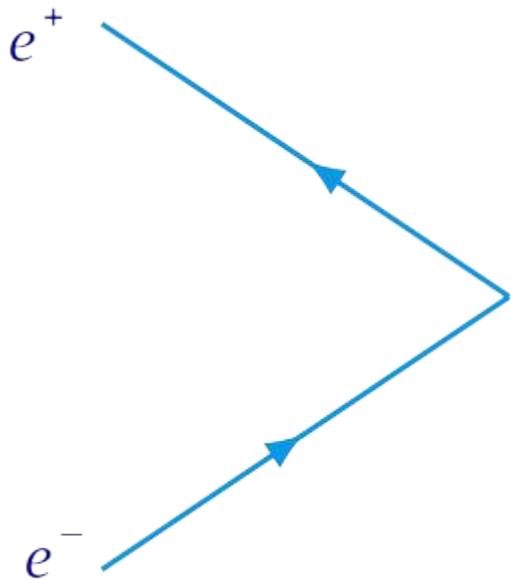
e^+

e^-

Feynman - Diagramme

... zeigen:

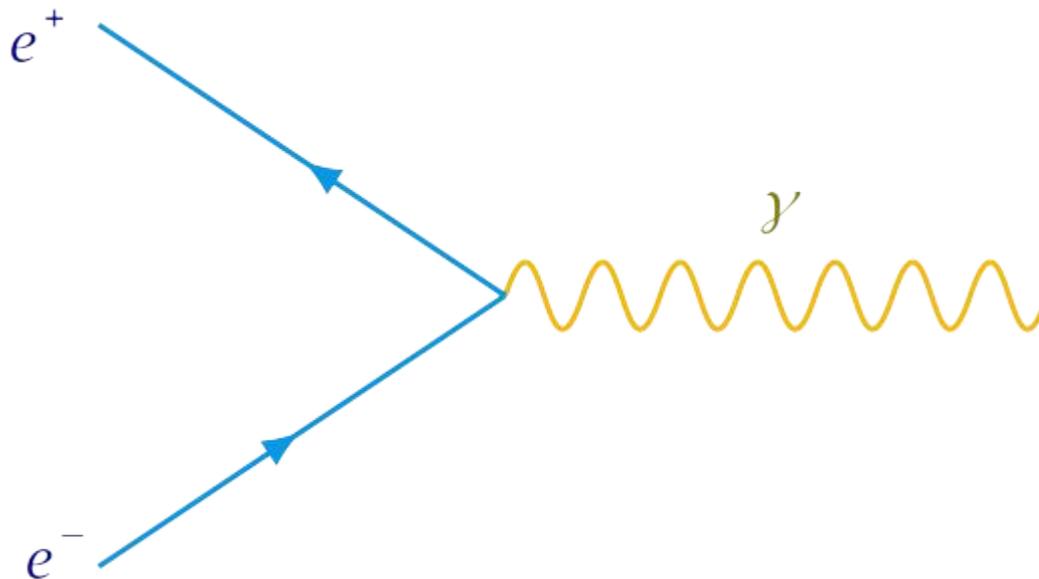
- ▶ welche Materieteilchen vor der Wechselwirkung vorhanden sind
- ▶ wie sie wechselwirken (Botenteilchen)



Feynman - Diagramme

... zeigen:

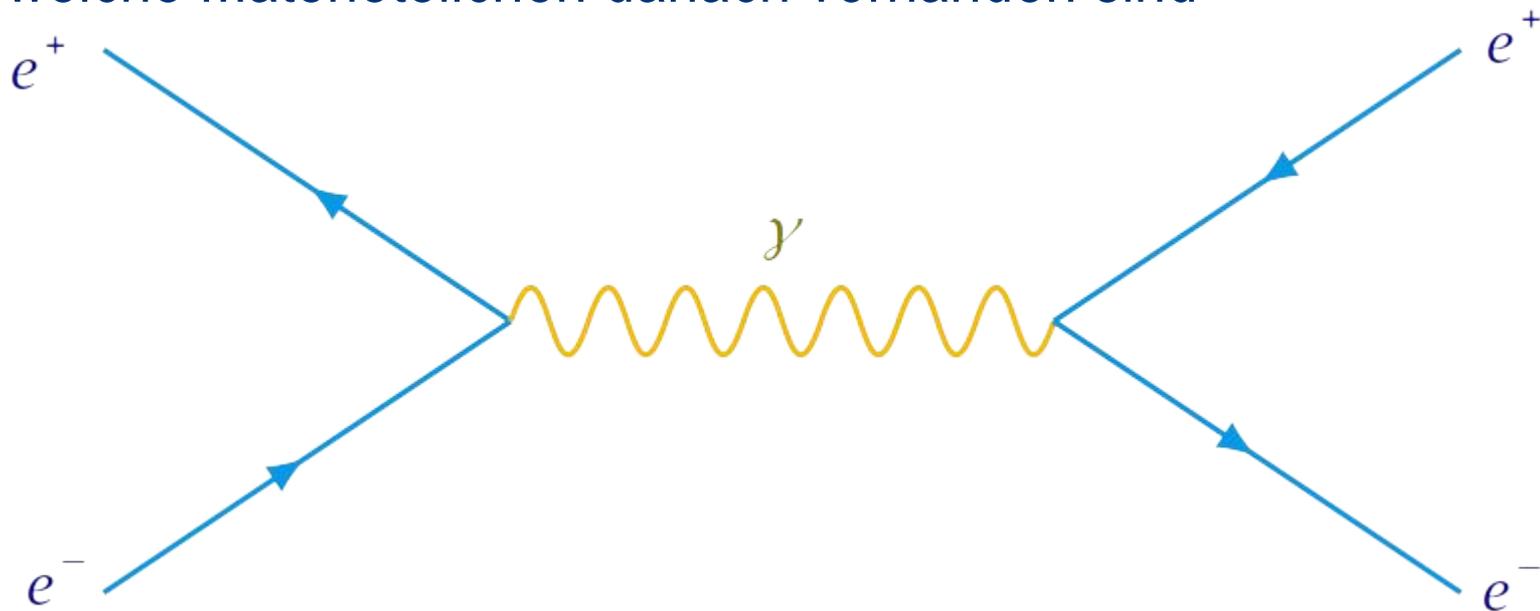
- ▶ welche Materieteilchen vor der Wechselwirkung vorhanden sind
- ▶ wie sie wechselwirken (Botenteilchen)



Feynman - Diagramme

... zeigen:

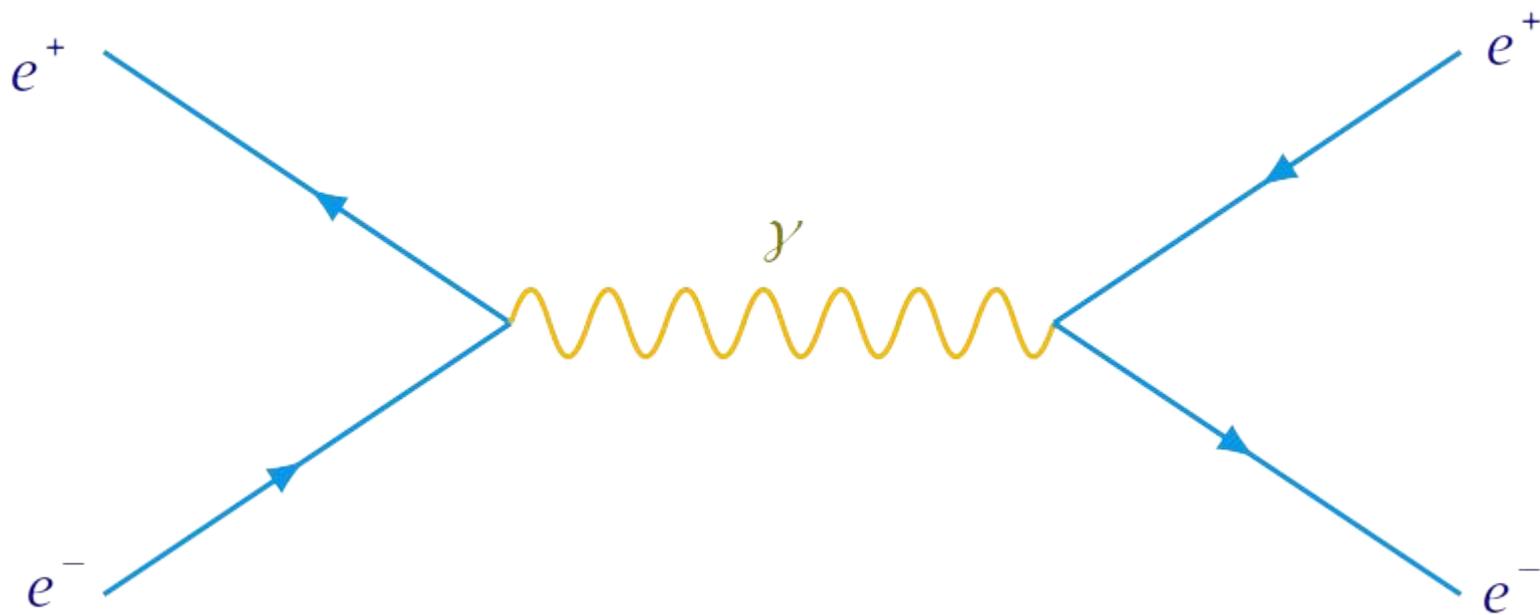
- ▶ welche Materieteilchen vor der Wechselwirkung vorhanden sind
- ▶ wie sie wechselwirken (Botenteilchen)
- ▶ welche Materieteilchen danach vorhanden sind



Feynman - Diagramme

Beispiele:

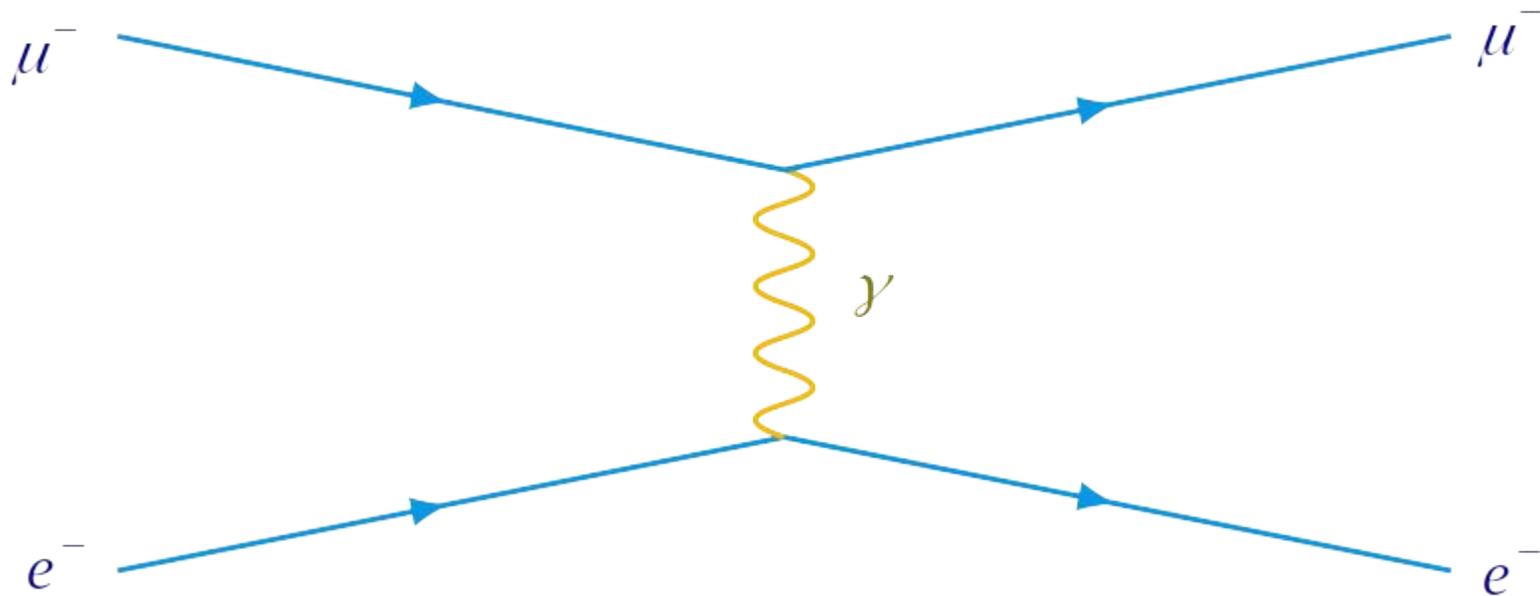
► Streuung von Elektron und Positron



Feynman - Diagramme

Beispiele:

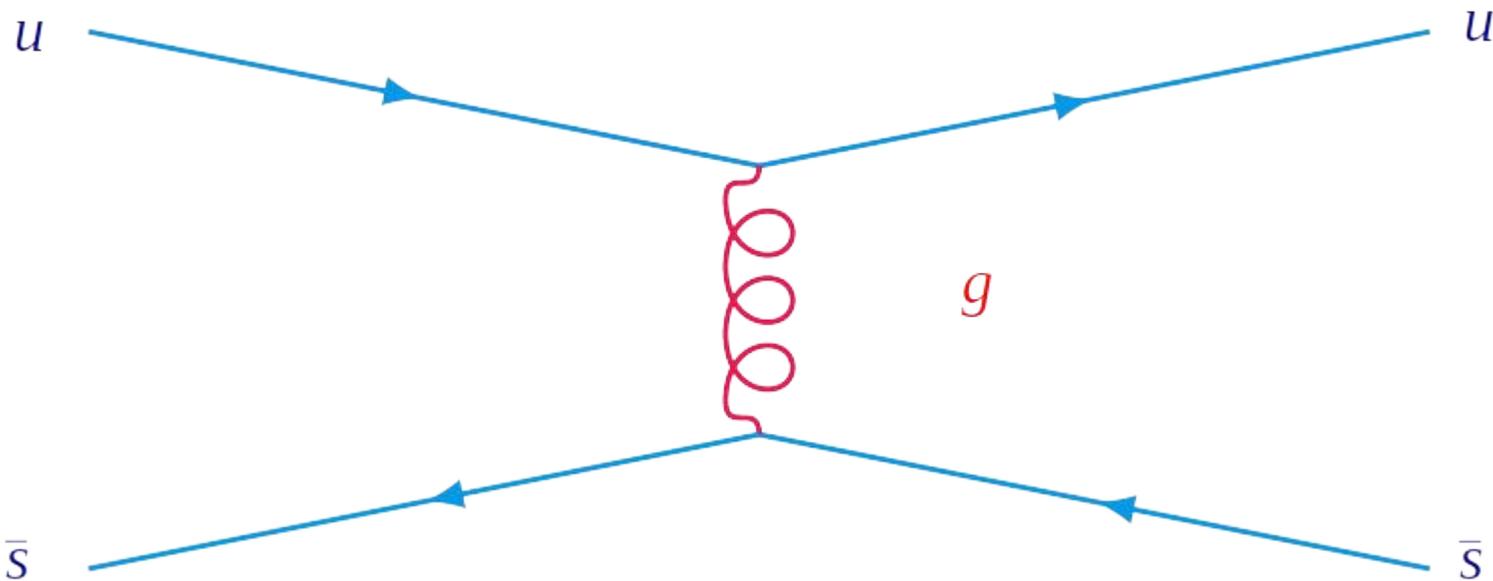
- ▶ Streuung von Elektron und Myon



Feynman - Diagramme

Beispiele:

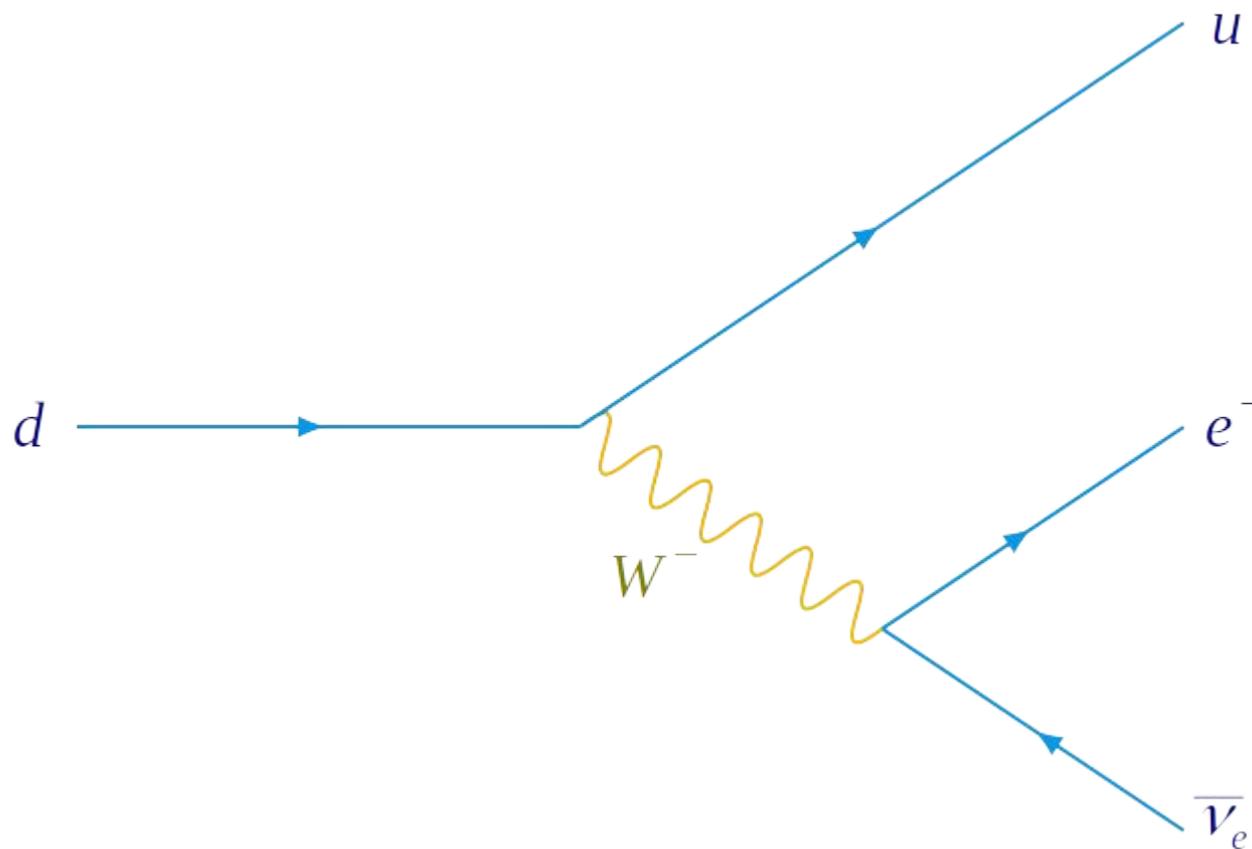
- ▶ Streuung von Up-Quark und Anti-Strange-Quark



Feynman - Diagramme

Beispiele:

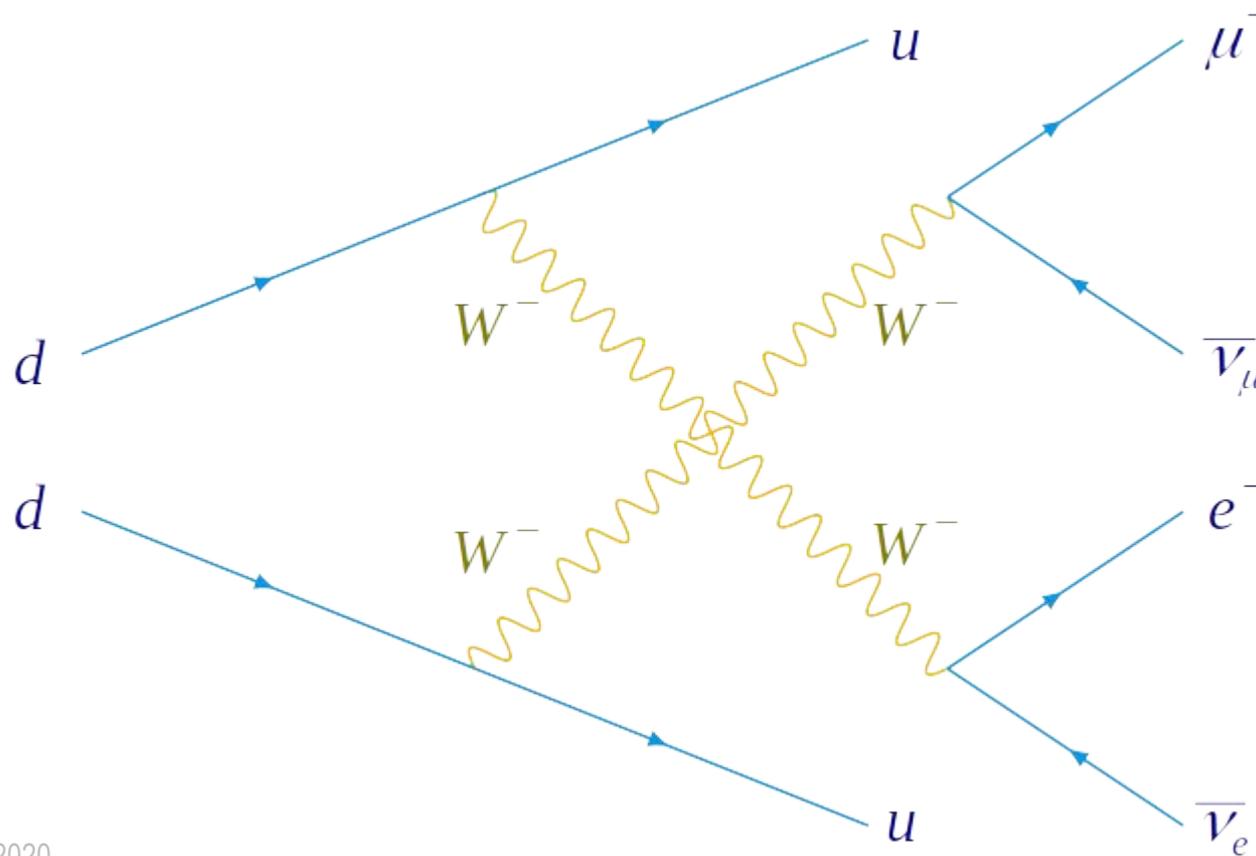
- ▶ Umwandlung eines Down-Quarks in ein Up-Quark



Feynman - Diagramme

Beispiele:

► Streuung zweier W^- Bosonen





Was ist das Higgs Teilchen?



Was ist das Higgs Teilchen?

- ▶ Standardmodell: beste Erklärung der Natur die wir haben



Was ist das Higgs Teilchen?

- ▶ Standardmodell: beste Erklärung der Natur die wir haben
- ▶ Massen der Elementarteilchen im Standardmodell nicht “einfach so” einführbar



Was ist das Higgs Teilchen?

- ▶ Standardmodell: beste Erklärung der Natur die wir haben
- ▶ Massen der Elementarteilchen im Standardmodell nicht “einfach so” einführbar
- ▶ Higgs-Mechanismus ermöglicht dies, bedingt Existenz des Higgs-Teilchens



Was ist das Higgs Teilchen?

- ▶ Standardmodell: beste Erklärung der Natur die wir haben
- ▶ Massen der Elementarteilchen im Standardmodell nicht “einfach so” einführbar
- ▶ Higgs-Mechanismus ermöglicht dies, bedingt Existenz des Higgs-Teilchens
- ▶ fehlendes Puzzle-Teil → Higgs-Teilchen

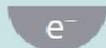
Was ist das Higgs Teilchen?

- ▶ Standardmodell: beste Erklärung der Natur die wir haben
- ▶ Massen der Elementarteilchen im Standardmodell nicht “einfach so” einführbar
- ▶ Higgs-Mechanismus ermöglicht dies, bedingt Existenz des Higgs-Teilchens
- ▶ fehlendes Puzzle-Teil → Higgs-Teilchen

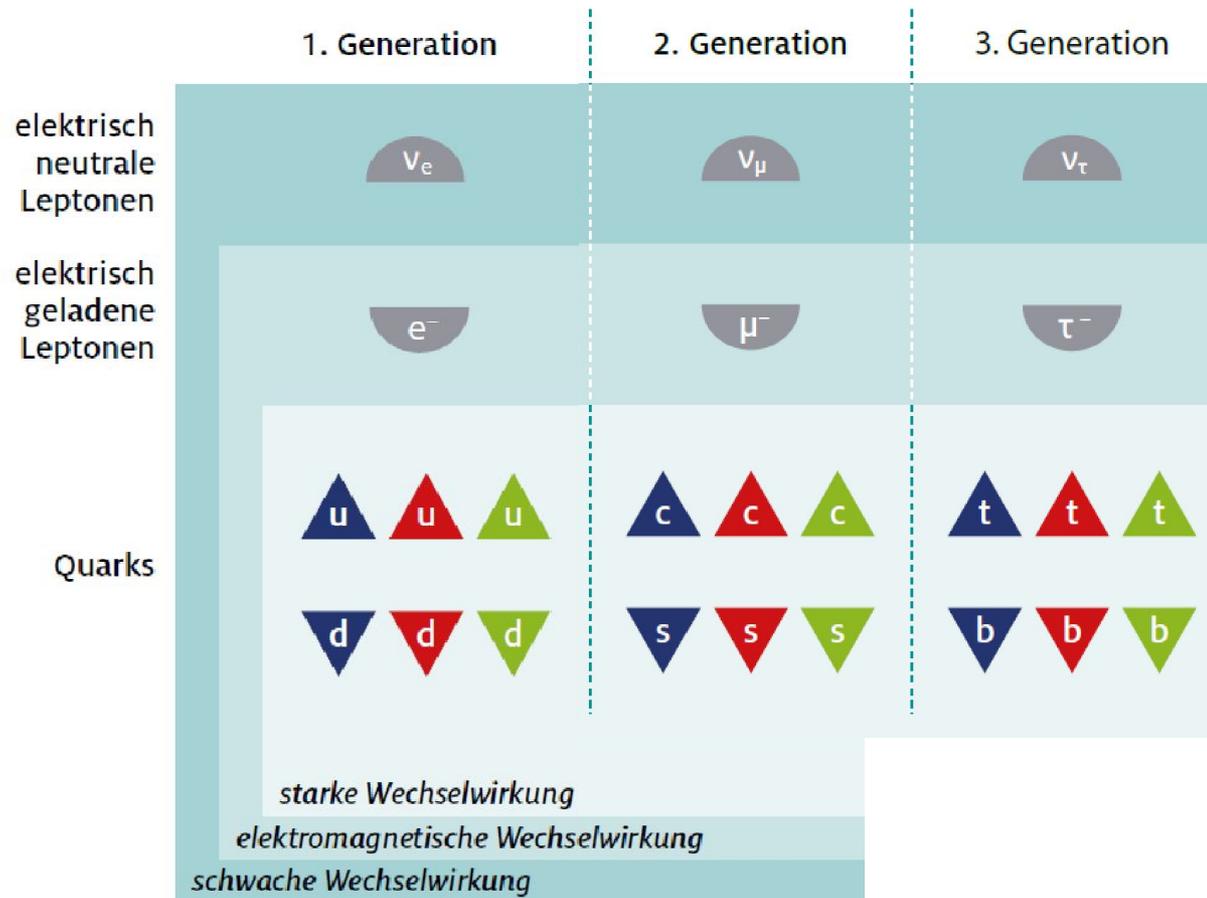


$$m_{\text{Higgs}} \approx 125 \text{ GeV}/c^2 \approx 134 \cdot m_{\text{Proton}}$$

Anordnung von Teilchen in Generationen

| | 1. Generation | I | Z | |
|------------------------------|---|----------------|----------------|-----------|
| elektrisch neutrale Leptonen |  ν_e | $+\frac{1}{2}$ | 0 | |
| elektrisch geladene Leptonen |  e^- | $-\frac{1}{2}$ | -1 | |
| Quarks |  u u u | $+\frac{1}{2}$ | $+\frac{2}{3}$ | blau ↓ |
| |  d d d | $-\frac{1}{2}$ | $-\frac{1}{3}$ | blau ↓ |
| | starke Wechselwirkung | | | |
| | elektromagnetische Wechselwirkung | | | |
| | schwache Wechselwirkung | | | |

Anordnung von Teilchen in Generationen



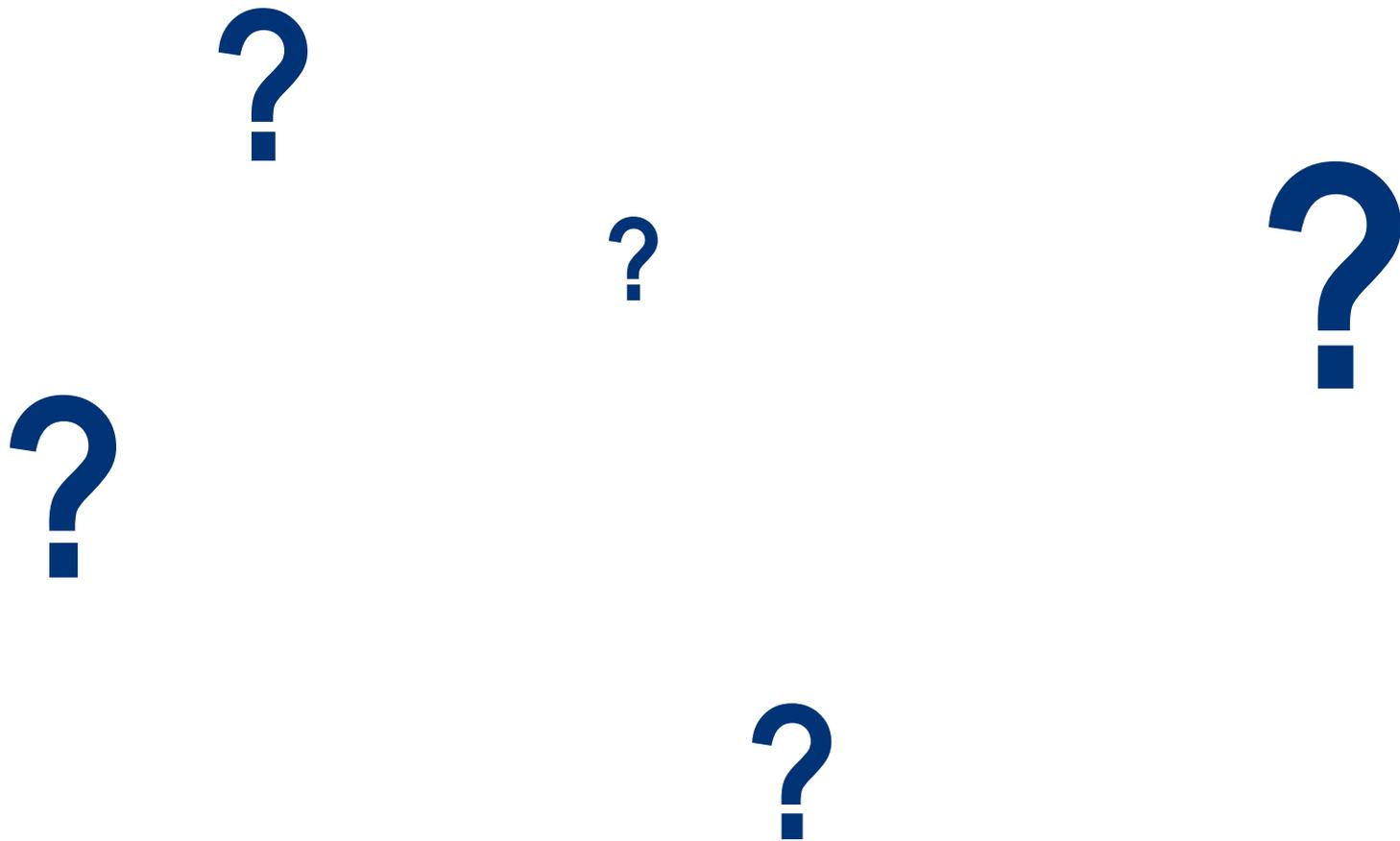
Anordnung von Teilchen in Generationen

| | 1. Generation | 2. Generation | 3. Generation | I | Z | \vec{c} |
|------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------------|----------------|--|
| elektrisch neutrale Leptonen | ν_e | ν_μ | ν_τ | $+\frac{1}{2}$ | 0 | farblos $\vec{0}$ |
| elektrisch geladene Leptonen | e^- | μ^- | τ^- | $-\frac{1}{2}$ | -1 | farblos $\vec{0}$ |
| Quarks | u u u d d d | c c c s s s | t t t b b b | $+\frac{1}{2}$ | $+\frac{2}{3}$ | blau \downarrow rot \nearrow grün \nwarrow blau \downarrow rot \nearrow grün \nwarrow |
| | | | | $-\frac{1}{2}$ | $-\frac{1}{3}$ | |
| | starke Wechselwirkung | | starke Wechselwirkung | | | |
| | elektromagnetische Wechselwirkung | | | elektromagnetische Wechselwirkung | | |
| | schwache Wechselwirkung | | | schwache Wechselwirkung | | |

Gibt es Fragen soweit?



Room Name:
TEILCHENWELT





Pause



Room Name:
TEILCHENWELT

Warum es drei Generationen von Teilchen gibt ist unklar. Aber vielleicht gibt es ja noch mehr...

Standardmodell ist ja ganz toll, aber was ist nun dunkle Materie und dunkle Energie?

Warum ist Gravitation so viel schwächer als alle anderen Kräfte? Sind dafür vielleicht höhere Raumdimensionen die verantwortlich?

Teil 3: Wie findet man das Higgs?



Wie erzeugt man das Higgs-Teilchen?

- ▶ Teilchenbeschleuniger → Erzeugung massereicher Teilchen
- ▶ $E = mc^2$ → Masse ist eine Form von Energie!
- ▶ Masse und andere Energieformen können sich ineinander umwandeln.

Wie erzeugt man das Higgs-Teilchen?

- ▶ Teilchenbeschleuniger → Erzeugung massereicher Teilchen
- ▶ $E = mc^2$ → Masse ist eine Form von Energie!
- ▶ Masse und andere Energieformen können sich ineinander umwandeln.

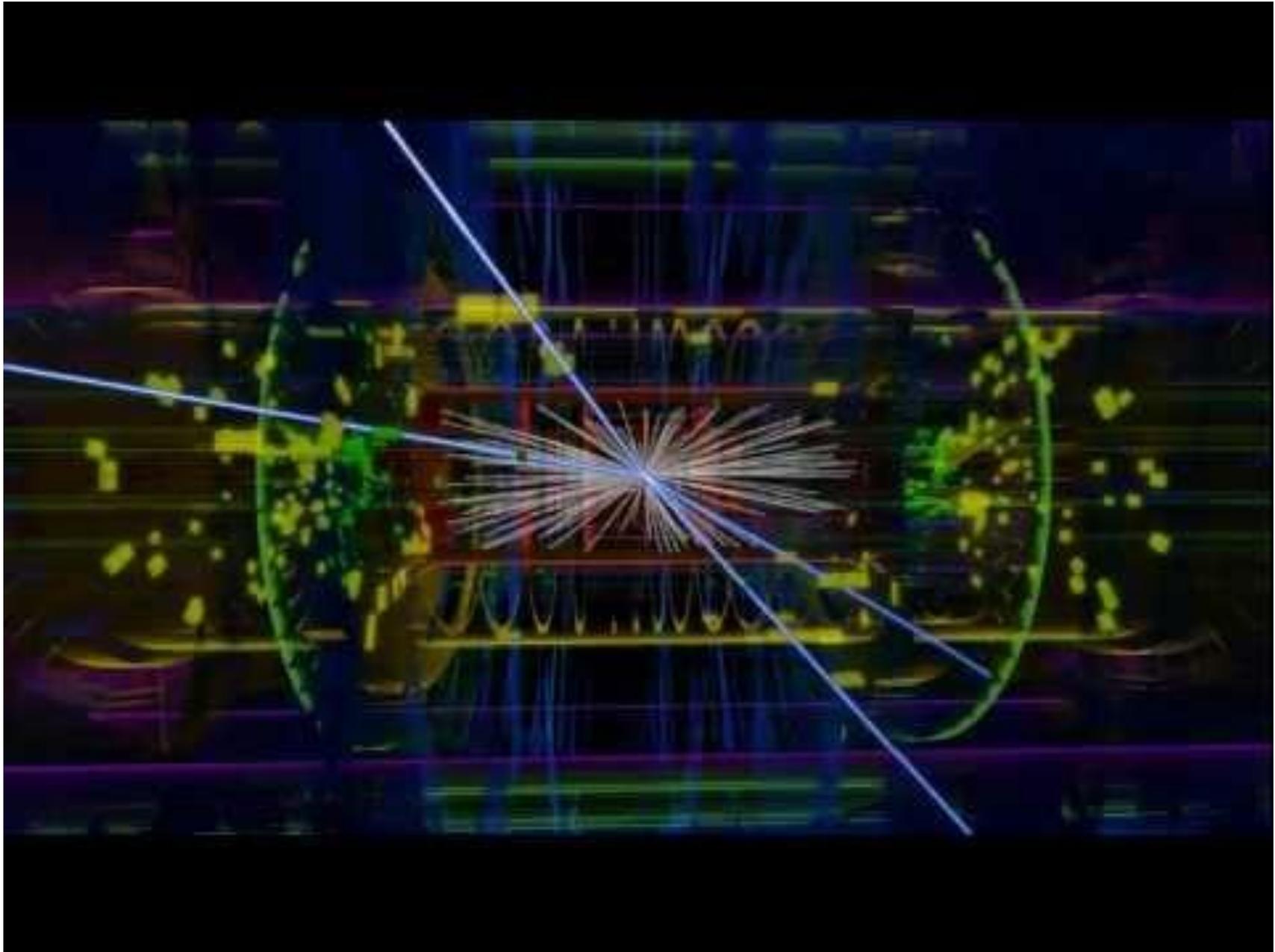
- ▶ Beispiel:
 - Kernspaltung im Kraftwerk!
 - (Masse → Wärme → elektrische Energie)

Wie erzeugt man das Higgs-Teilchen?

- ▶ Teilchenbeschleuniger → Erzeugung massereicher Teilchen
- ▶ $E = mc^2$ → Masse ist eine Form von Energie!
- ▶ Masse und andere Energieformen können sich ineinander umwandeln.

- ▶ Beispiel:
 - Kernspaltung im Kraftwerk!
 - (Masse → Wärme → elektrische Energie)
 - Teilchenkollisionen!
 - (Bewegungsenergie → Masse)

Wie sieht eine Kollision aus?



Das CERN

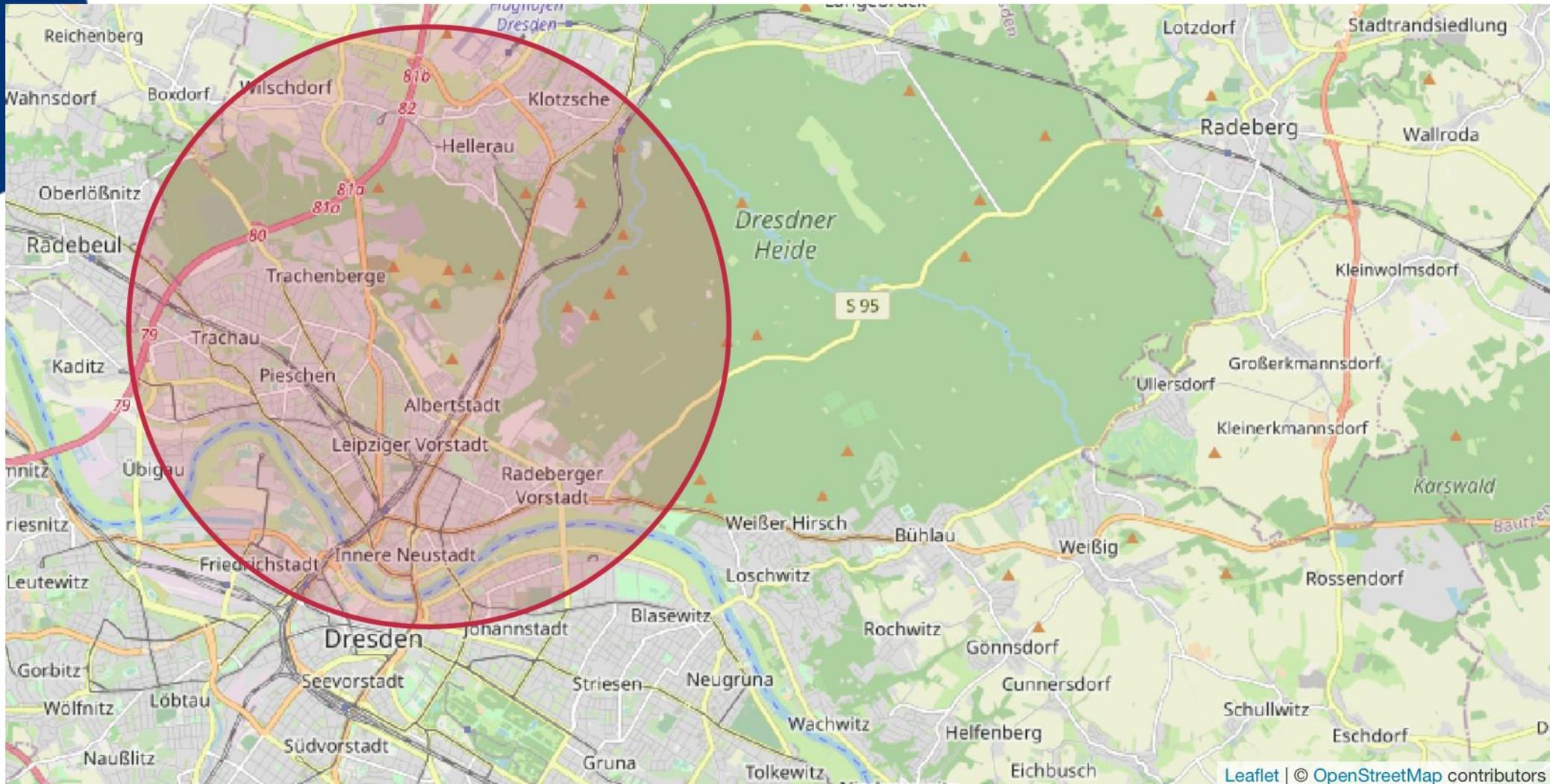
(Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire)



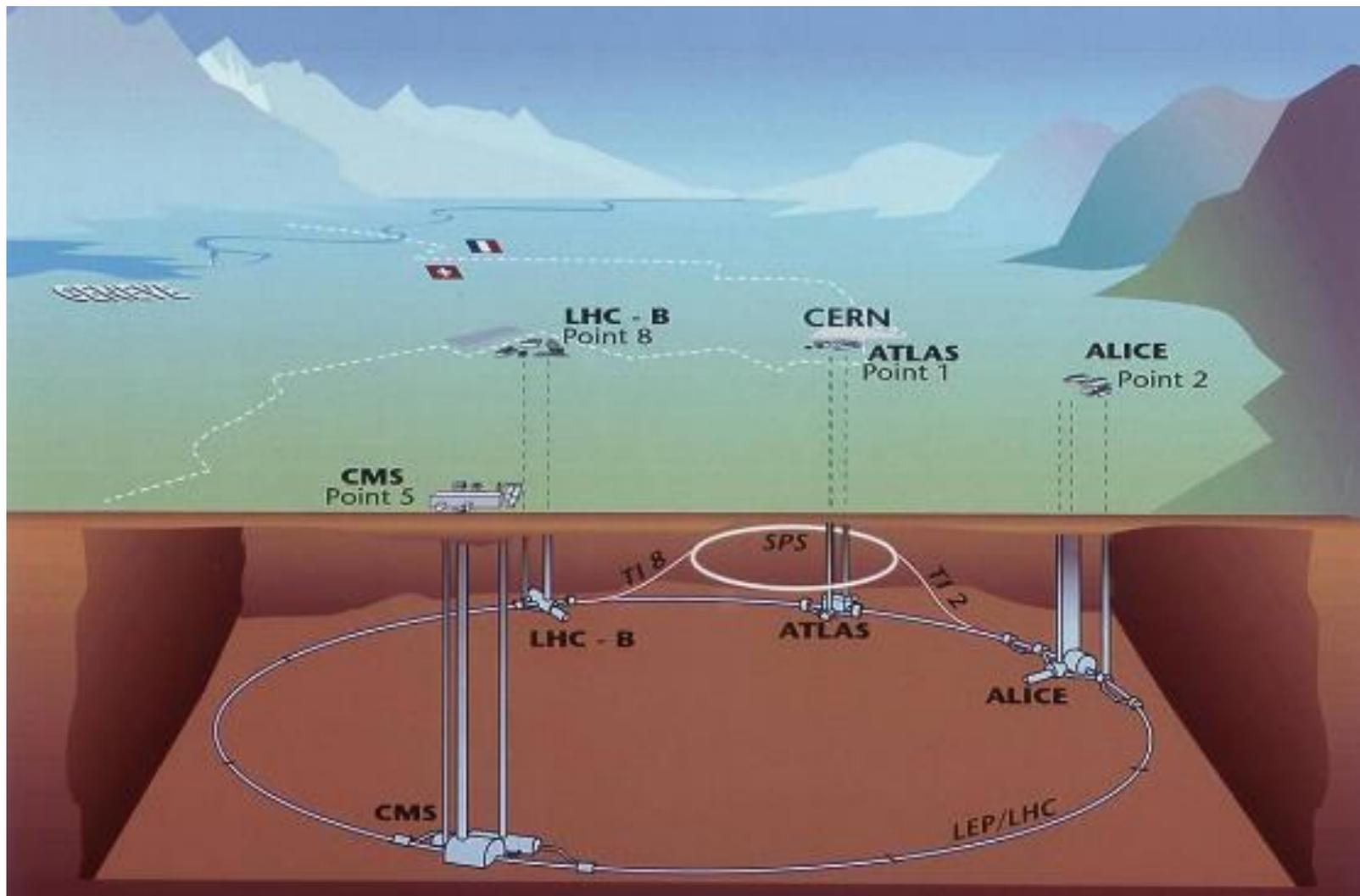
© CERN

Das CERN

(Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire)



Der LHC (Large Hadron Collider)





Was geschieht am LHC?



Was geschieht am LHC?

- ▶ Protonen kreisen in entgegengesetzten Richtungen mit einer Energie von je 6.5 Tera-Elektronenvolt (TeV)
- ▶ Wenn Protonen zusammenstoßen, entstehen neue Teilchen, die man in Detektoren nachweist

Was geschieht am LHC?

- ▶ Protonen kreisen in entgegengesetzten Richtungen mit einer Energie von je 6.5 Tera-Elektronenvolt (TeV)
- ▶ Wenn Protonen zusammenstoßen, entstehen neue Teilchen, die man in Detektoren nachweist

Aber von Anfang an:

Es beginnt mit einer Flasche voller Wasserstoff...



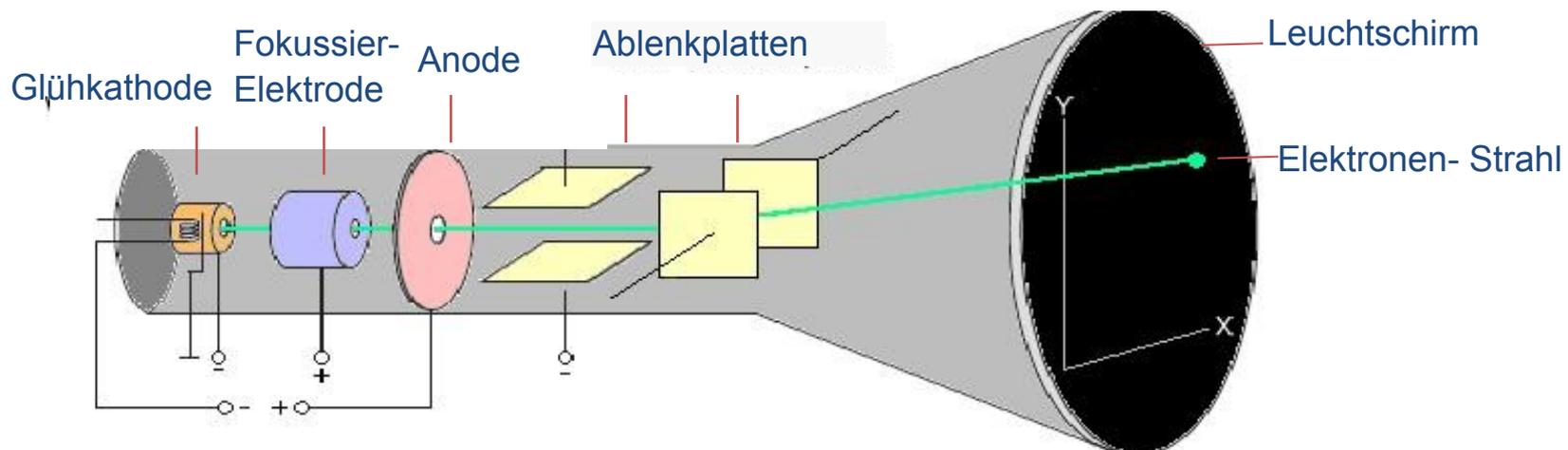
Wie funktioniert ein Teilchenbeschleuniger?

- ▶ Der einfachste Beschleuniger:
- ▶ Ein alter Fernseher (Braun'sche Röhre!)
 - Elektronen erzeugen: Glühkathode
 - ... beschleunigen: elektrisches Feld (Hochspannung)
 - ... ablenken und/oder fokussieren: elektrisches oder magnetisches Feld



Wie funktioniert ein Teilchenbeschleuniger?

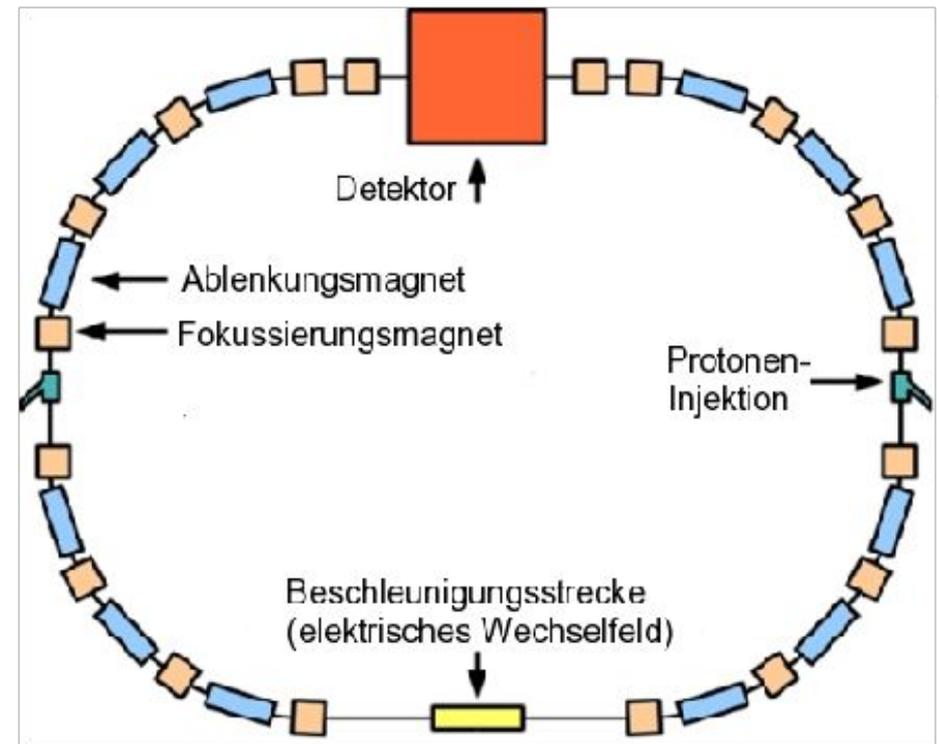
- ▶ Der einfachste Beschleuniger:
- ▶ Ein alter Fernseher (Braun'sche Röhre!)
 - Elektronen erzeugen: Glühkathode
 - ... beschleunigen: elektrisches Feld (Hochspannung)
 - ... ablenken und/oder fokussieren: elektrisches oder magnetisches Feld



Wie funktioniert der LHC?

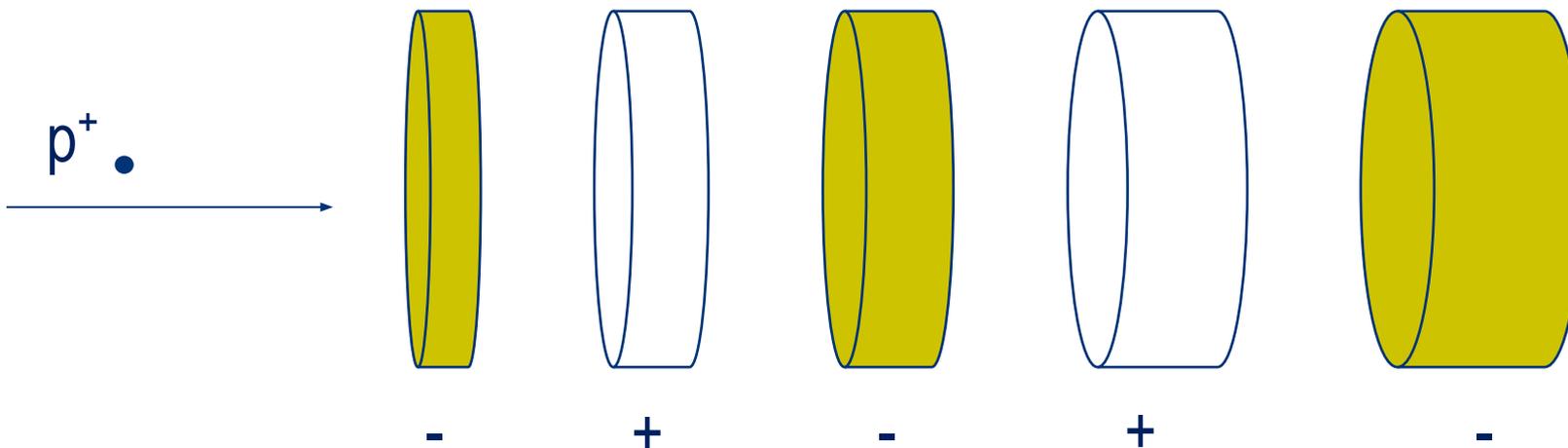
► Im LHC durchlaufen Pakete (Bunches) eine kreisförmige Bahn, auf der sie ...

- ... **beschleunigt** werden,...
(elektrisches Wechselfeld)
- ...**abgelenkt** werden...
(Dipol-Magnete)
- ...und **fokussiert** werden.
(Quadropol-Magnete)



Wie funktioniert ein Teilchenbeschleuniger?

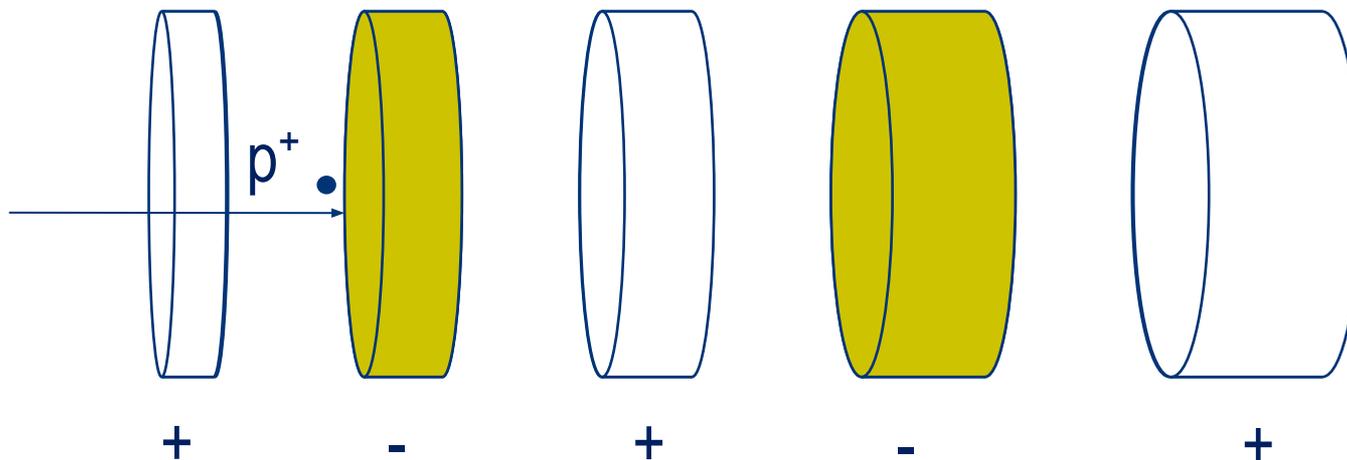
- ▶ Um in Teilchenbeschleunigern höhere Energien zu erreichen, durchlaufen die geladenen Teilchen ein elektrisches Wechselfeld:



- ▶ Wird die Polung des elektrischen Feldes im richtigen Moment umgekehrt, wird das Teilchen beschleunigt.

Wie funktioniert ein Teilchenbeschleuniger?

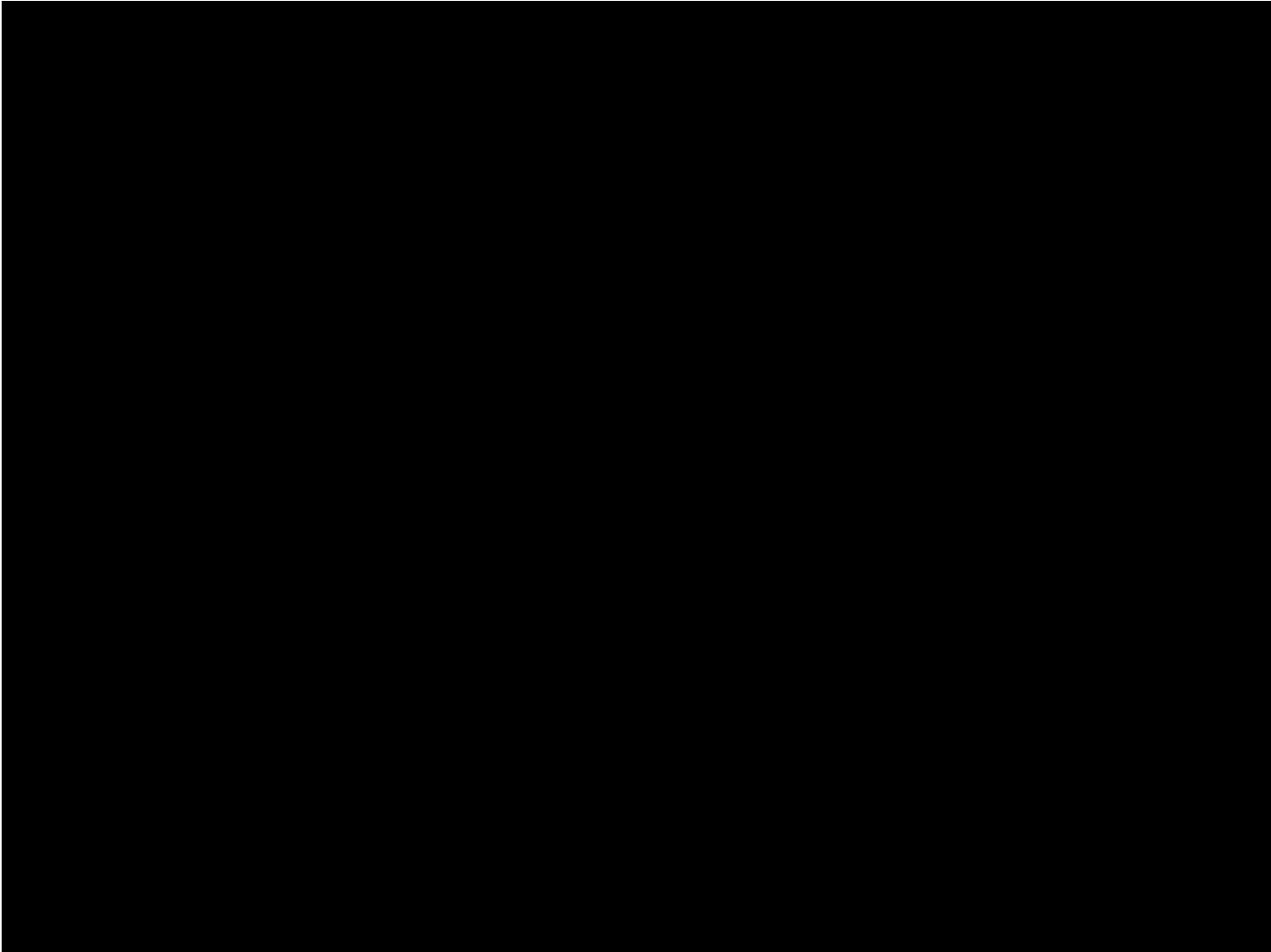
- ▶ Um in Teilchenbeschleunigern höhere Energien zu erreichen, durchlaufen die geladenen Teilchen ein elektrisches Wechselfeld:



- ▶ Wird die Polung des elektrischen Feldes im richtigen Moment umgekehrt, wird das Teilchen beschleunigt.

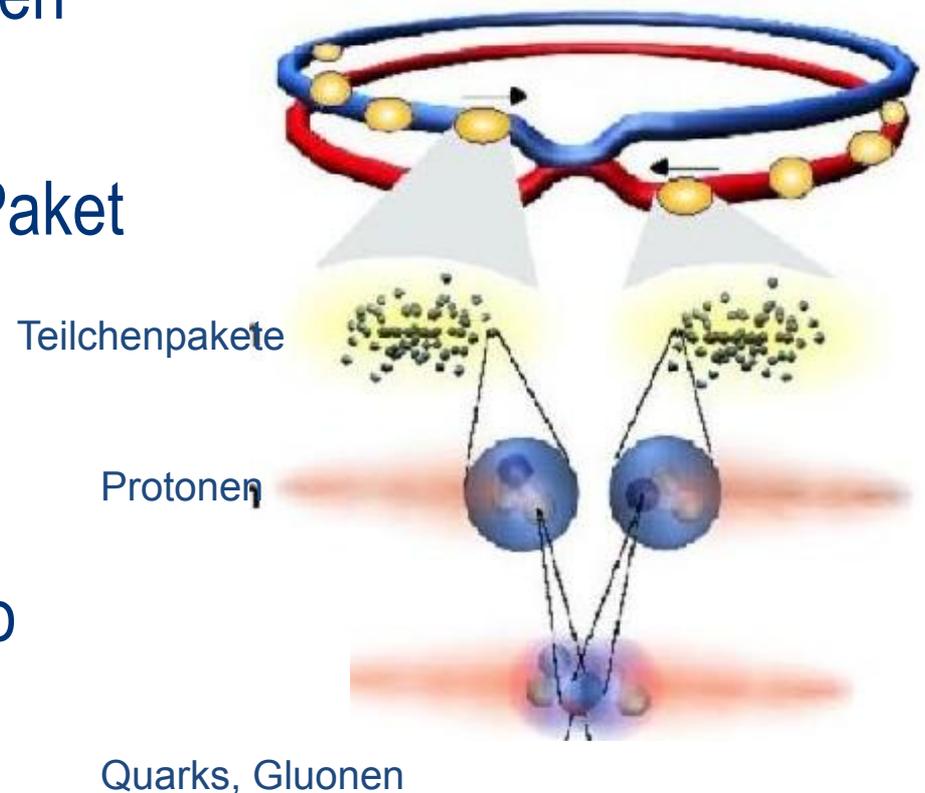


Hohlraumresonatoren des LHC



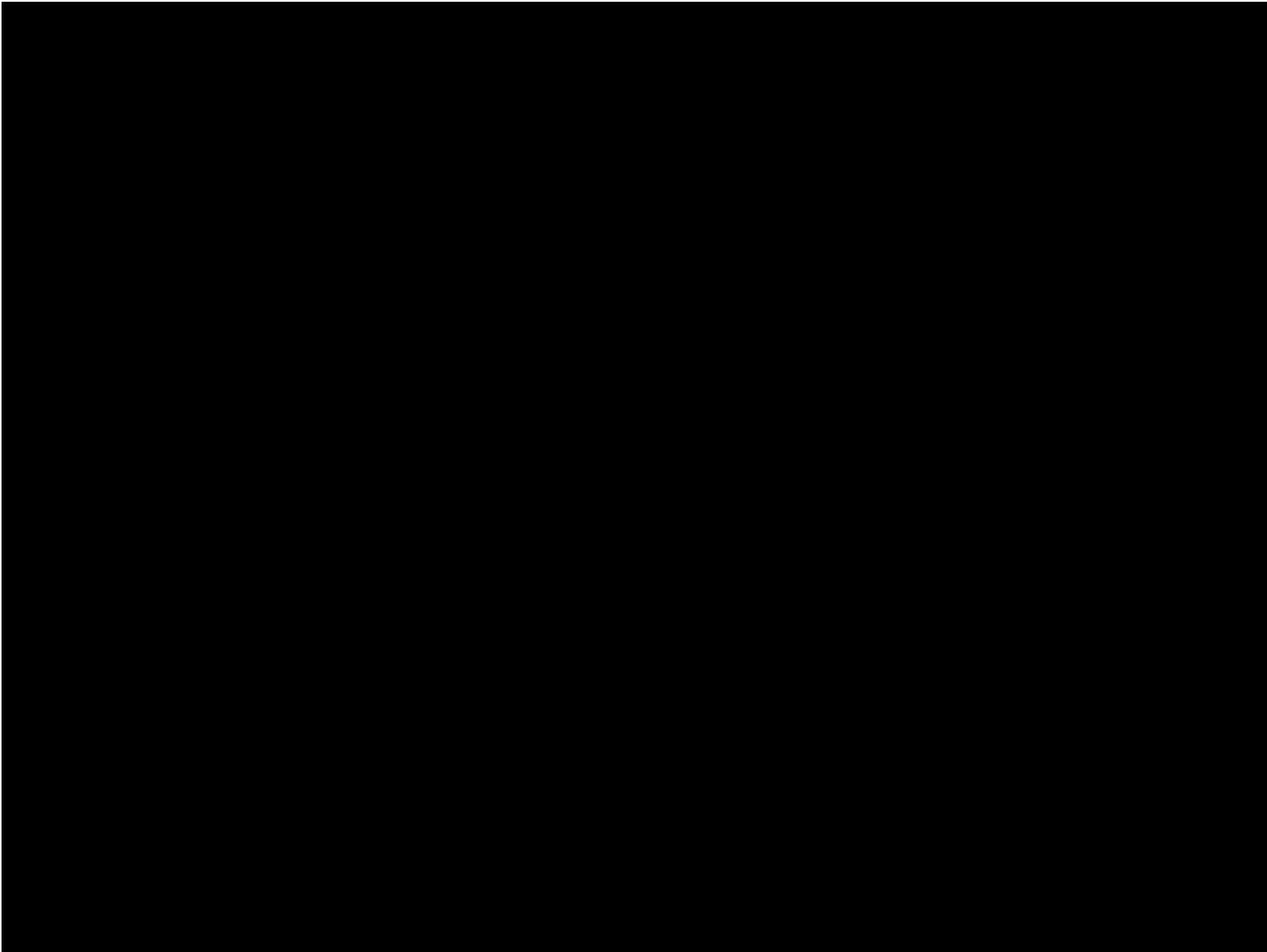
Teilchenkollisionen im LHC

- ▶ 2 gegenläufige Protonenstrahlen
 - ▶ mit je 2808 Teilchenpaketen
 - ▶ 120 Milliarden Protonen pro Paket
 - ▶ 1 Paket-Kreuzung alle 25 ns
 - ▶ Mit je etwa 40 Proton-Proton-Kollisionen
- 1.6 Milliarden Kollisionen pro Sekunde!



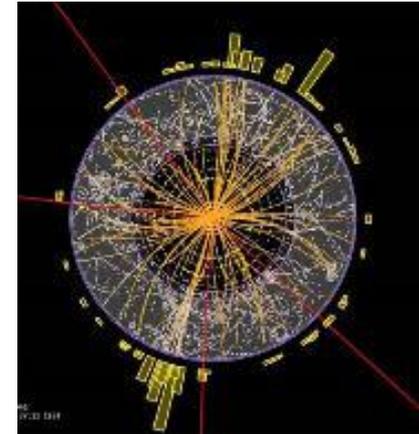


Teilchenkollisionen im LHC



Teilchenkollisionen im LHC

- ▶ 1,6 Milliarden Kollisionen pro Sekunde! Warum?
 - „Interessante“ Teilchen entstehen sehr selten: ca. 1×10^{10} Kollisionen!
 - Welche Teilchen bei einer bestimmten Kollision entstehen, ist vom Zufall bestimmt
 - Man kann nur vorhersagen, wie häufig welche Teilchenkombinationen vorkommen werden
- ▶ Vergleich der Messergebnisse mit Vorhersagen aus dem Standardmodell und anderen Theorien



© CERN

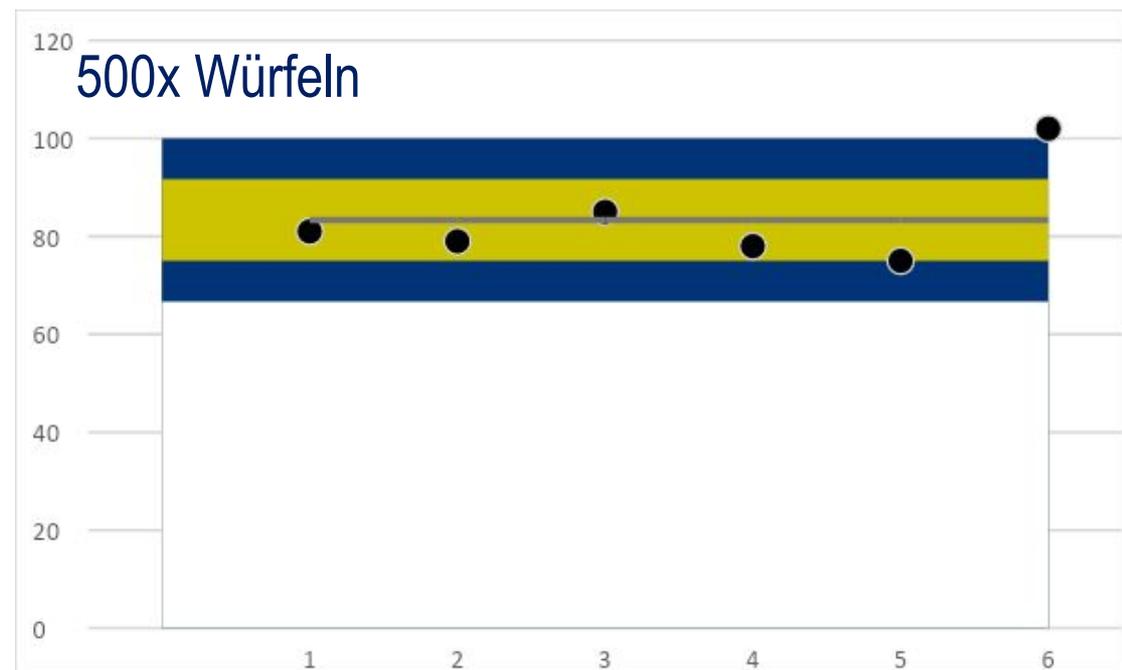
Warum so viele Kollisionen?

- ▶ Unsicherheiten einer Messung
- ▶ Beispiel: Ist der Würfel manipuliert oder nicht?
 - Erwartung: Jede Augenseite ist gleich wahrscheinlich
 - Test: Würfeln

----- Erwartungswert

68,3% 1σ

95,4% 2σ



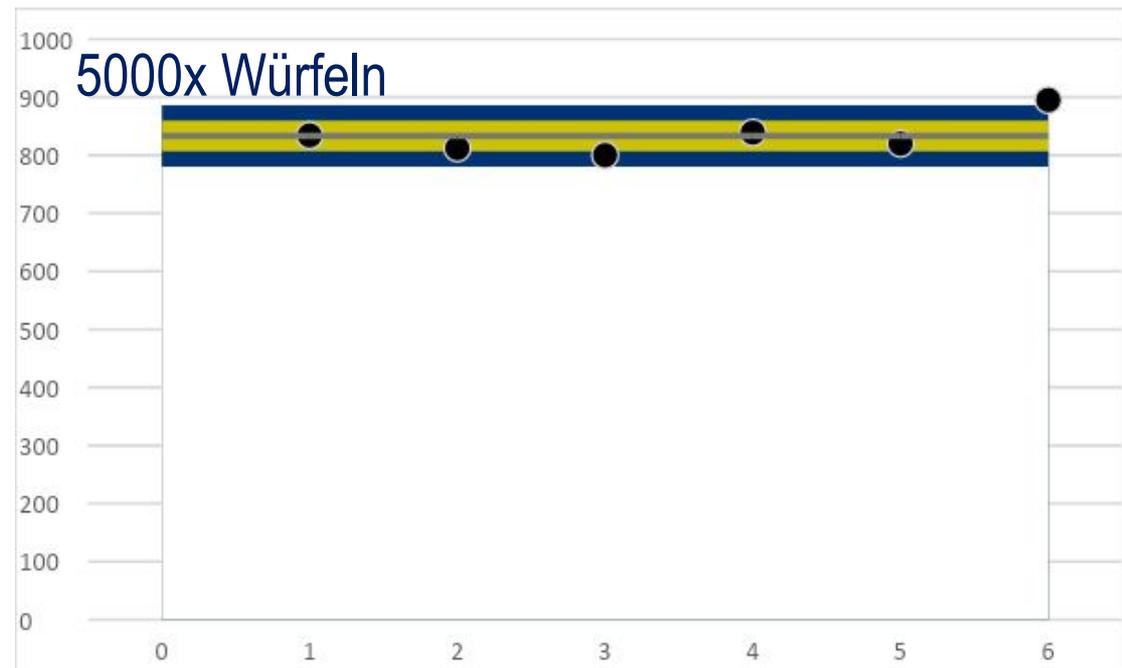
Warum so viele Kollisionen?

- ▶ Unsicherheiten einer Messung
- ▶ Beispiel: Ist der Würfel manipuliert oder nicht?
 - Erwartung: Jede Augenseite ist gleich wahrscheinlich
 - Test: Würfeln

----- Erwartungswert

68,3% 1σ

95,4% 2σ



Warum so viele Kollisionen?

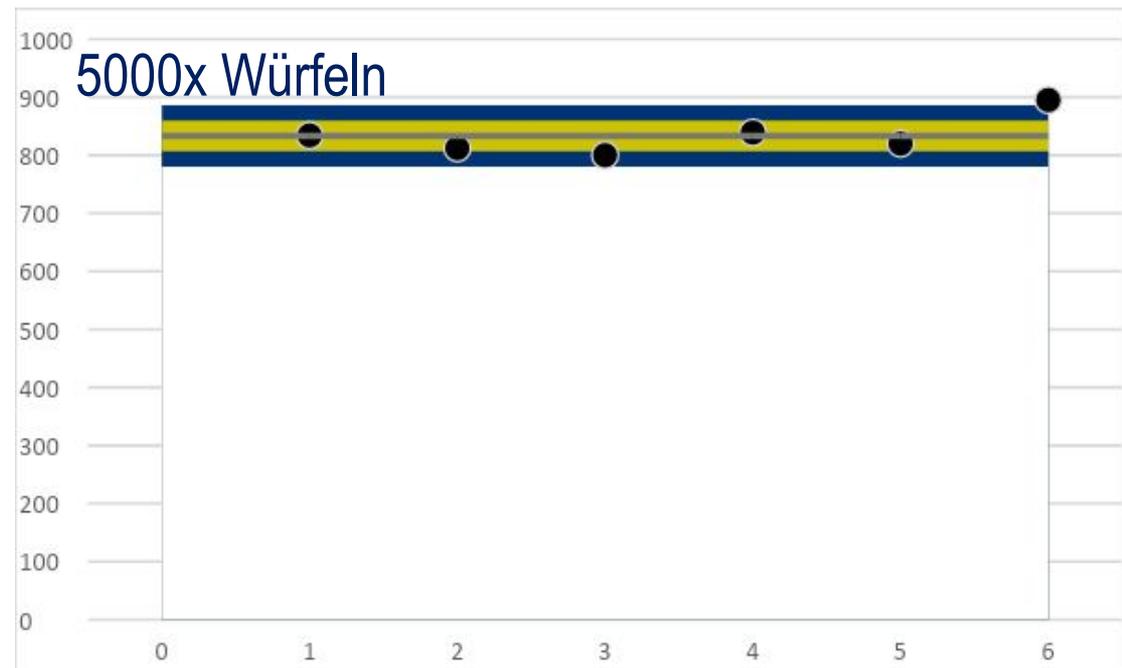
- ▶ Unsicherheiten einer Messung
- ▶ Beispiel: Ist der Würfel manipuliert oder nicht?
 - Erwartung: Jede Augenseite ist gleich wahrscheinlich
 - Test: Würfeln

----- Erwartungswert

68,3% 1σ

95,4% 2σ

Die Wahrscheinlichkeit das die hohe Anzahl an 6en Zufall ist, liegt bei etwa 2%.



Warum so viele Kollisionen?

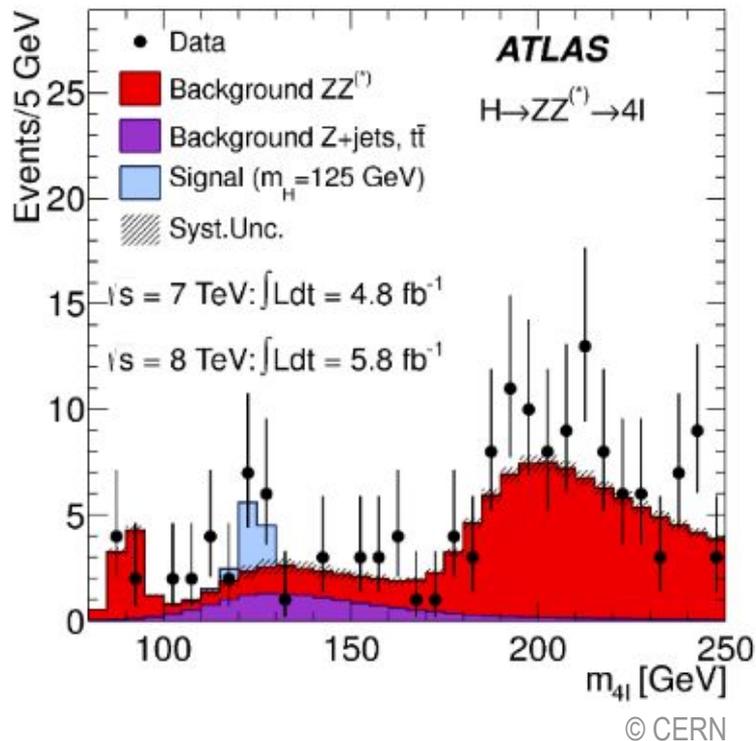
- ▶ Existiert das Higgs-Teilchen oder nicht?
 - Sind die gemessenen Daten zufällig überhöht?
 - Messung des Higgs mit 5σ
 - Die Wahrscheinlichkeit einer Fluktuation liegt bei $< 0.0001\%$

- · - Erwartung
■ $\pm 1\sigma$
■ $\pm 2\sigma$

Warum so viele Kollisionen?

- ▶ Existiert das Higgs-Teilchen oder nicht?
 - Sind die gemessenen Daten zufällig überhöht?
 - Messung des Higgs mit 5σ
 - Die Wahrscheinlichkeit einer Fluktuation liegt bei $< 0.0001\%$

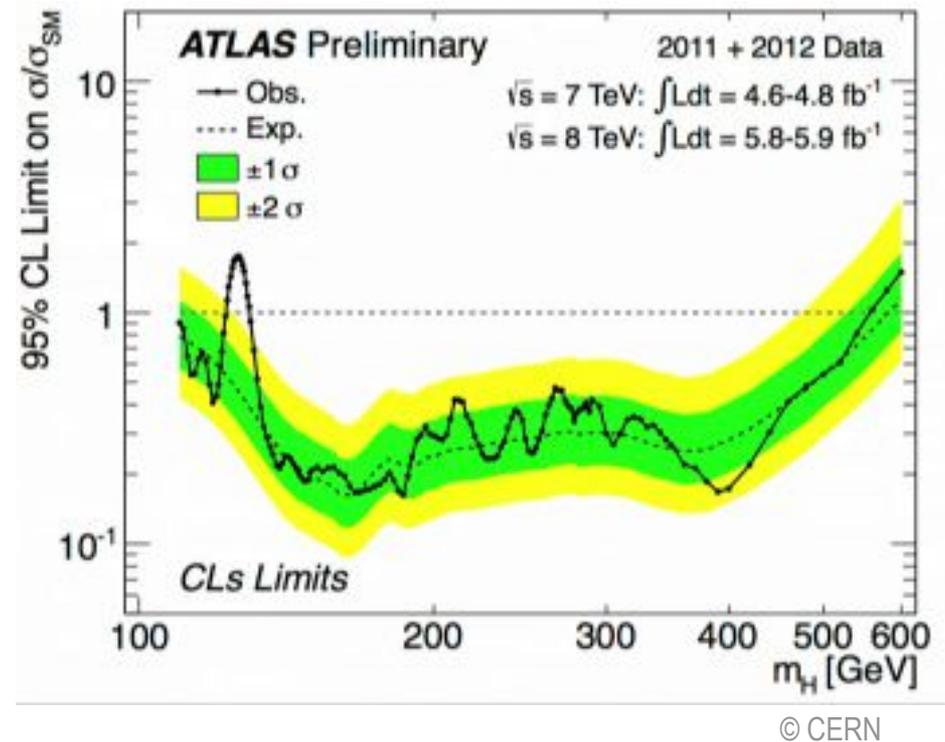
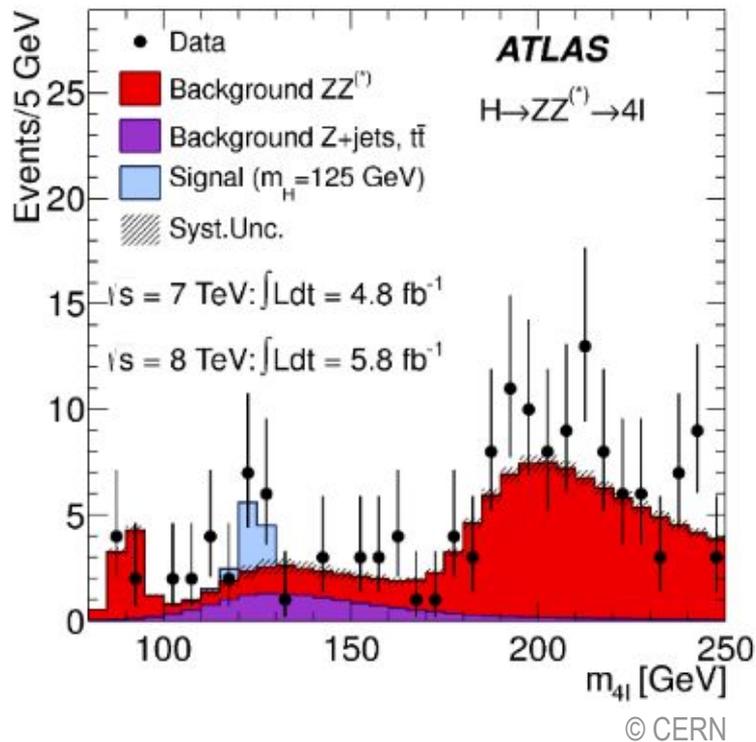
- - - Erwartung
■ $\pm 1\sigma$
■ $\pm 2\sigma$



Warum so viele Kollisionen?

- ▶ Existiert das Higgs-Teilchen oder nicht?
 - Sind die gemessenen Daten zufällig überhöht?
 - Messung des Higgs mit 5σ
 - Die Wahrscheinlichkeit einer Fluktuation liegt bei $< 0.0001\%$

- · - Erwartung
■ $\pm 1\sigma$
■ $\pm 2\sigma$

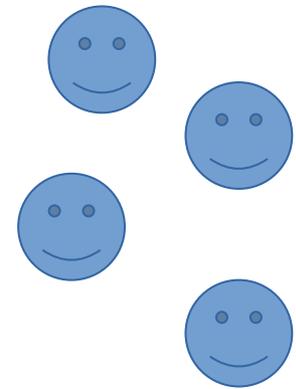




Spiel: Welches Teilchen bin ich?

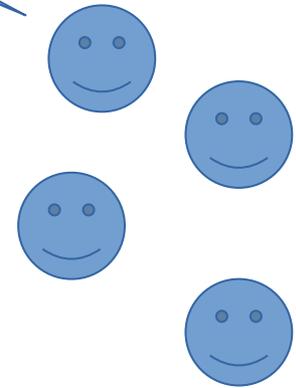
- ▶ Jeder in einer Gruppe bekommt ein Teilchen zugeordnet.
- ▶ Die anderen müssen jeweils erraten welches Teilchen man ist.
- ▶ Sobald es erraten ist, ist der nächste dran.
- ▶ Nur „Ja-Nein“-Fragen!

Spiel: Welches Teilchen bin ich?

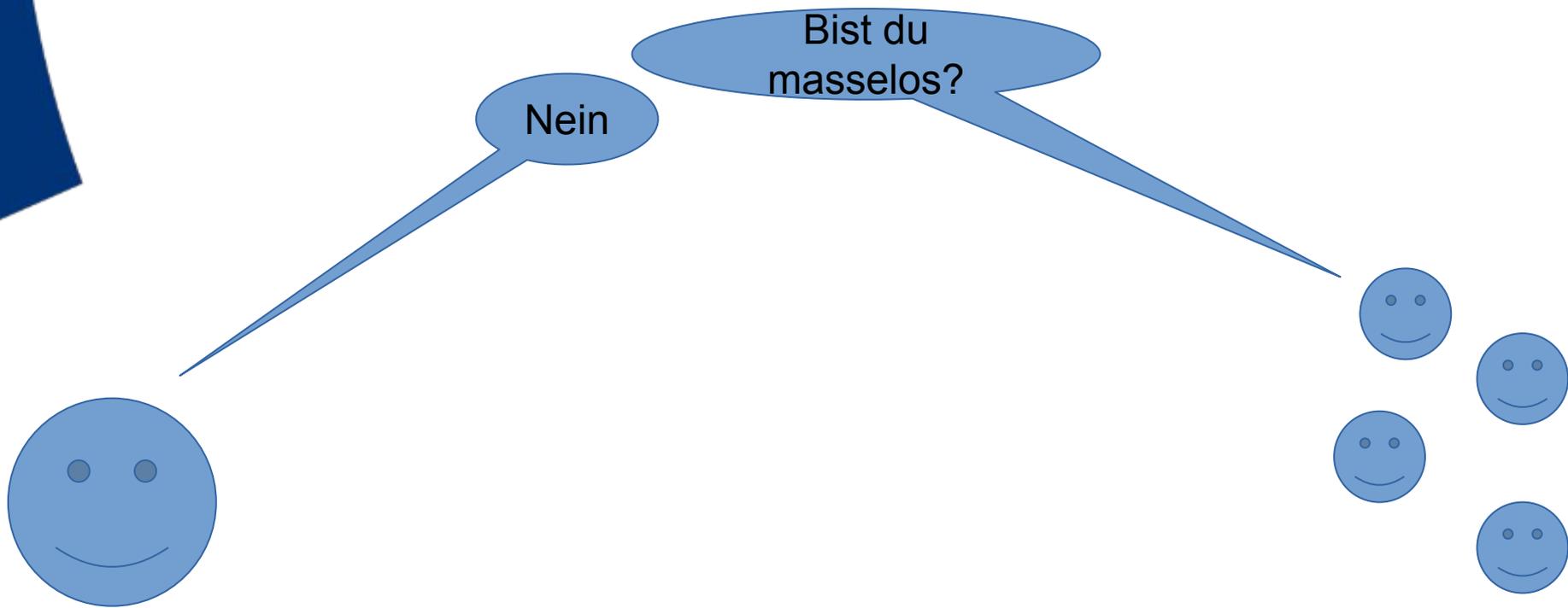


Spiel: Welches Teilchen bin ich?

Bist du
masselos?



Spiel: Welches Teilchen bin ich?



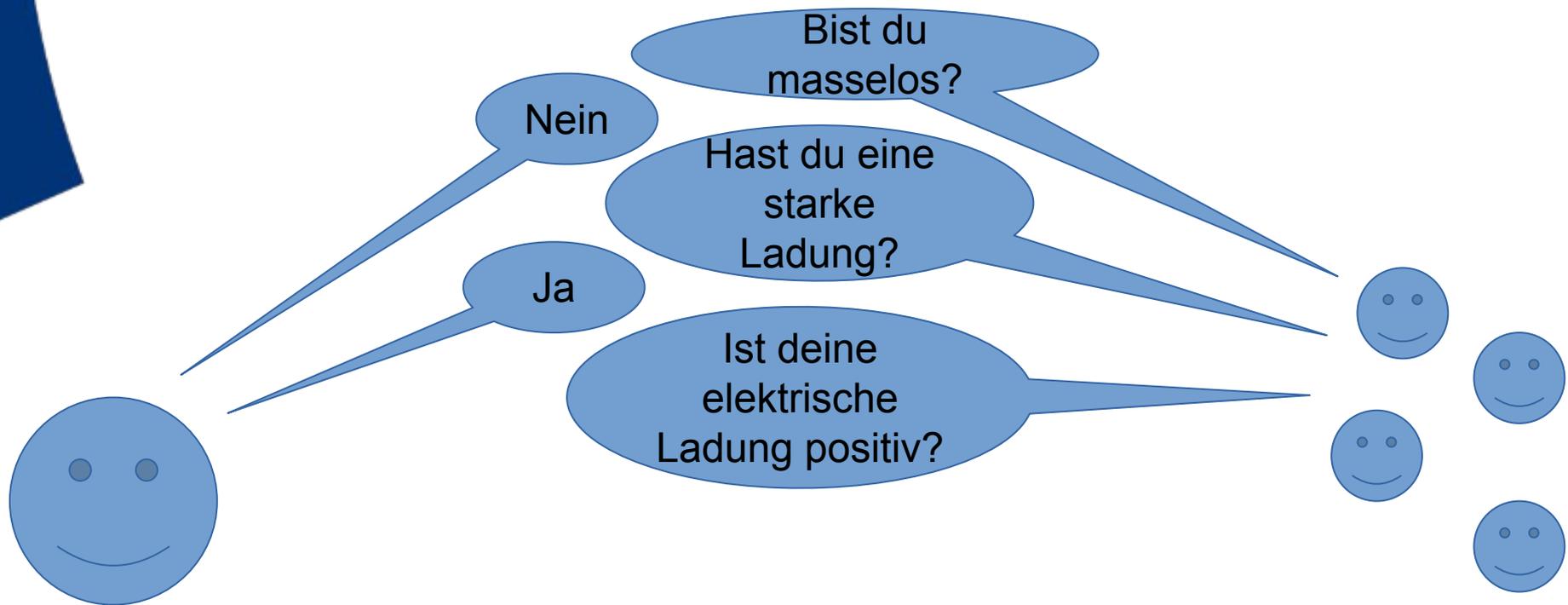
Spiel: Welches Teilchen bin ich?



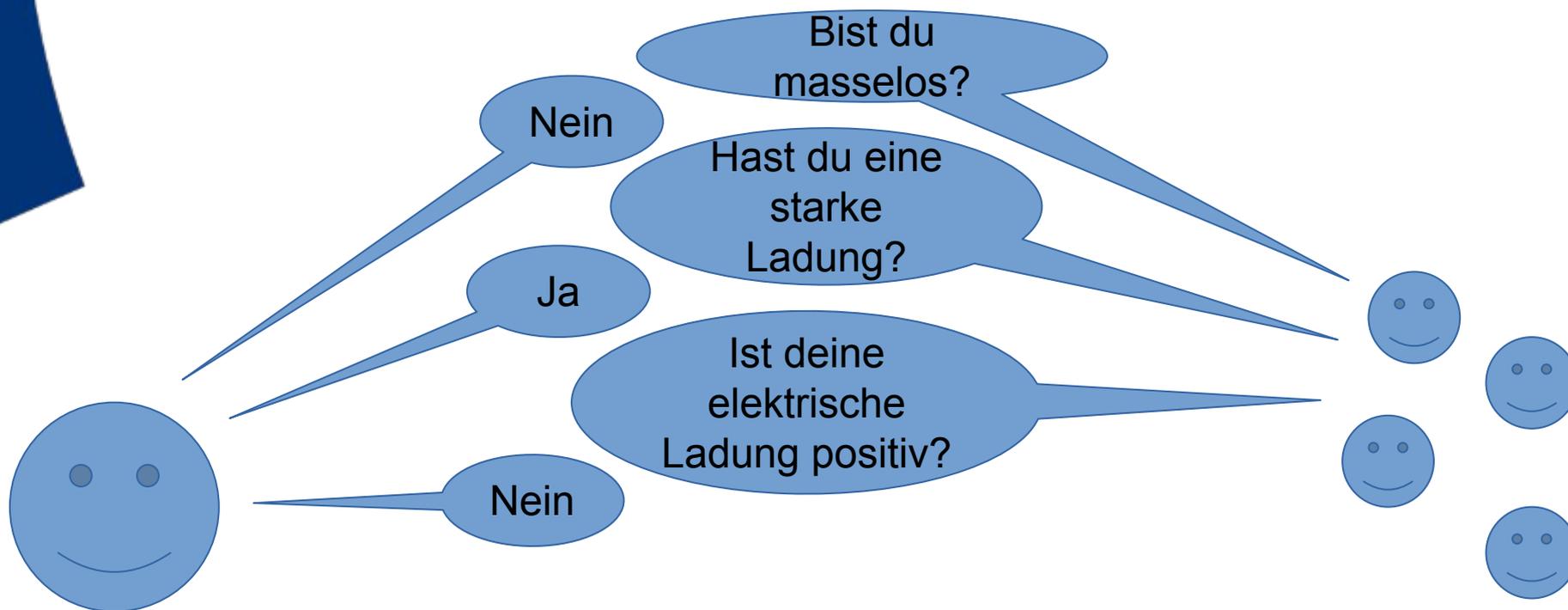
Spiel: Welches Teilchen bin ich?



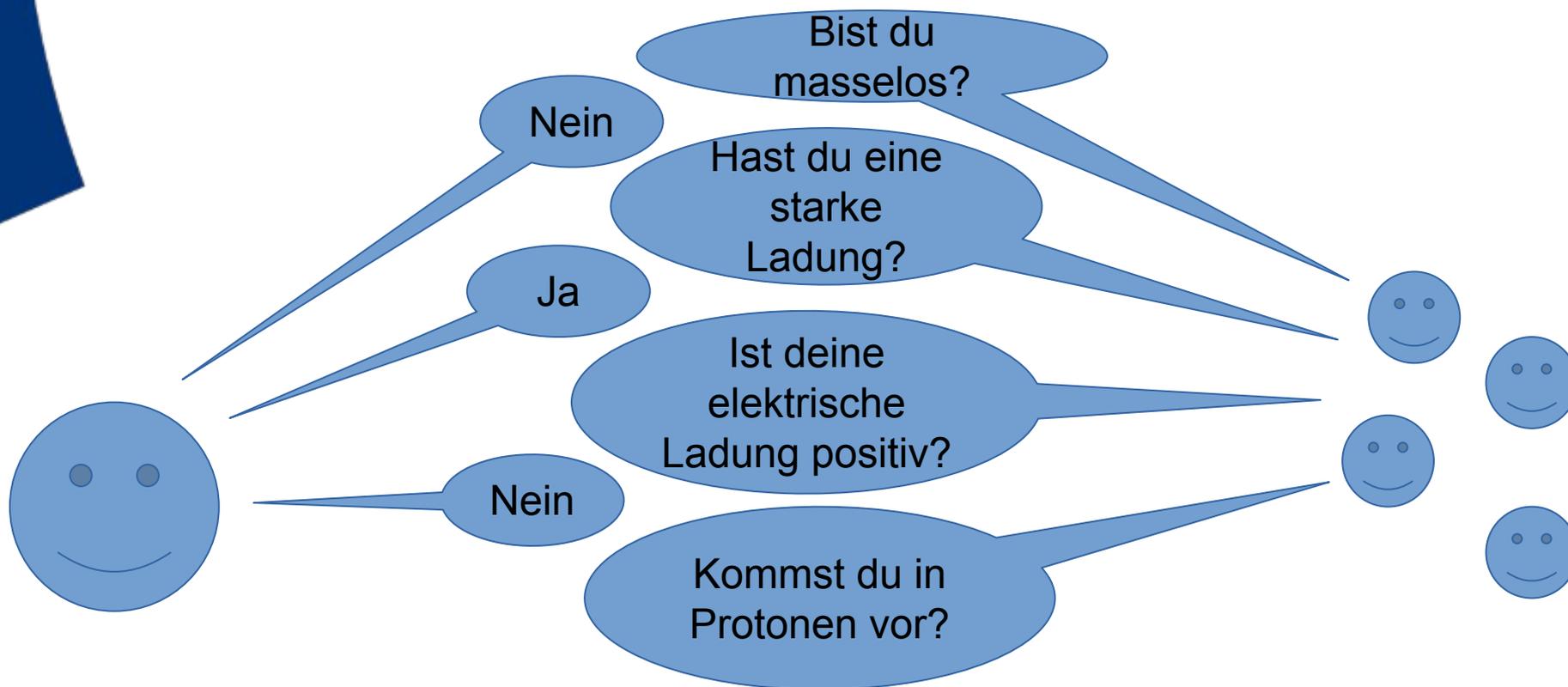
Spiel: Welches Teilchen bin ich?



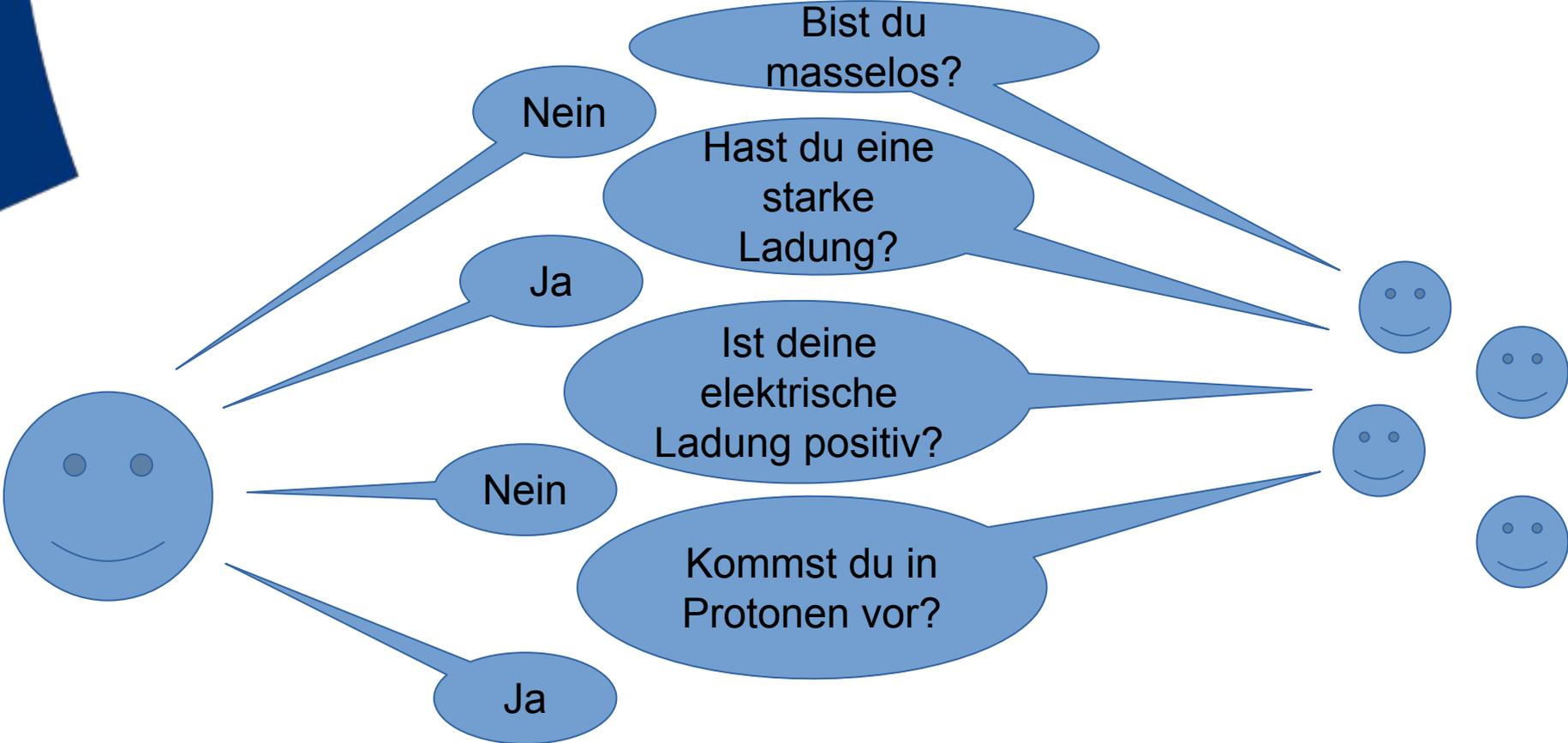
Spiel: Welches Teilchen bin ich?



Spiel: Welches Teilchen bin ich?



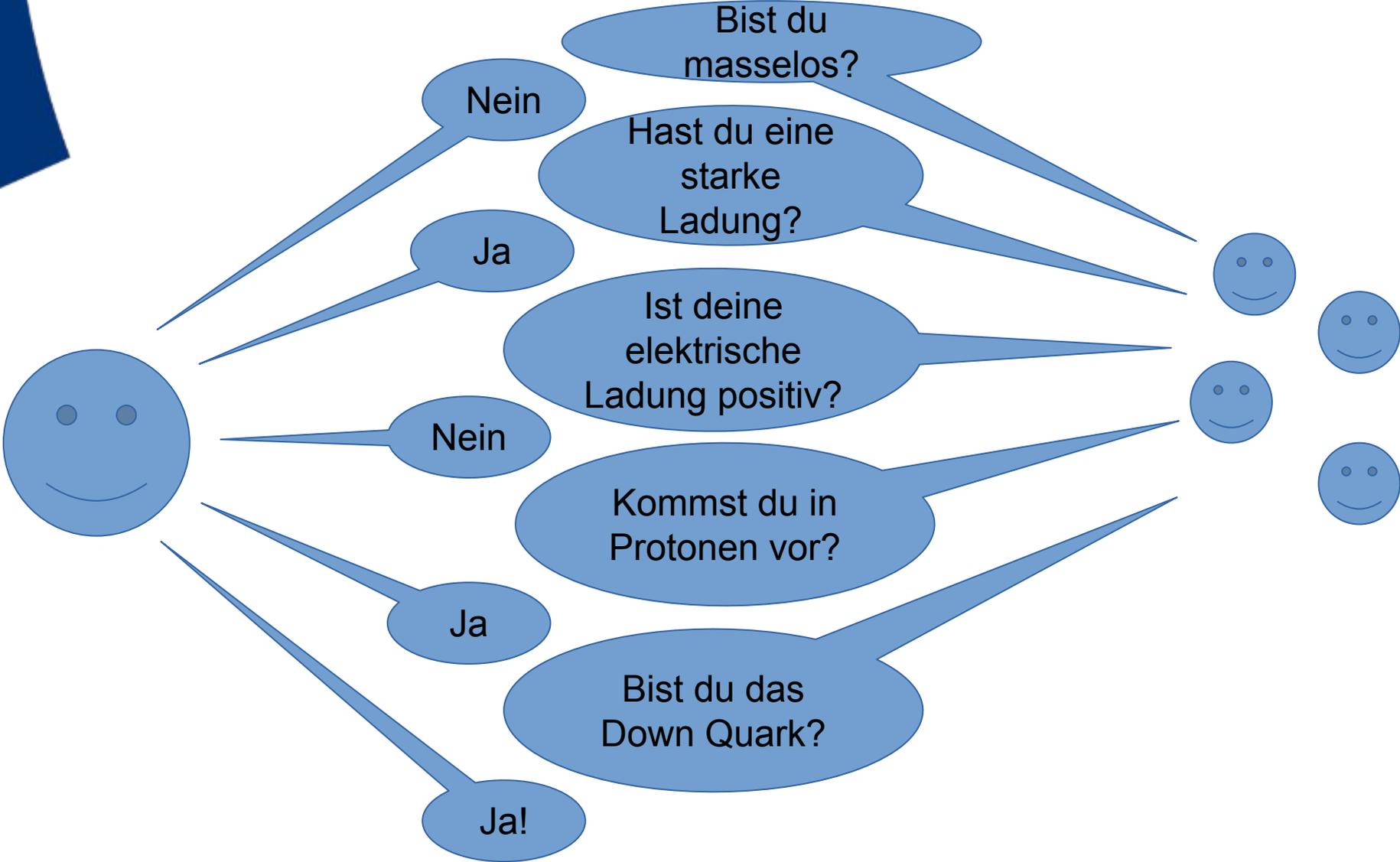
Spiel: Welches Teilchen bin ich?



Spiel: Welches Teilchen bin ich?



Spiel: Welches Teilchen bin ich?



Analyse von Teilchenspuren im ATLAS Detektor





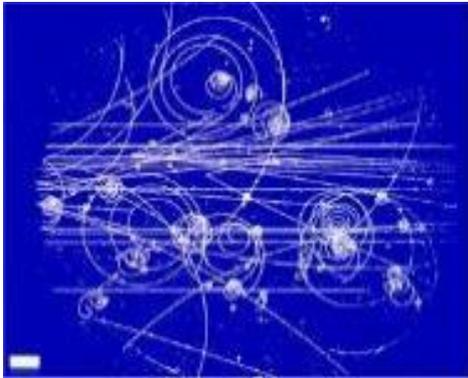
Wie weist man Elementarteilchen nach?

- ▶ Bildgebende Detektoren

Wie weist man Elementarteilchen nach?

► Bildgebende Detektoren

- z.B.: Nebelkammer, Blasenkammer

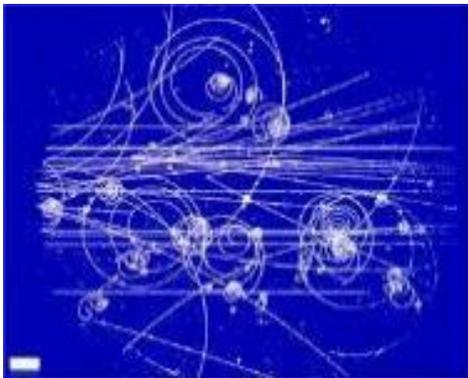


© CERN

Wie weist man Elementarteilchen nach?

► Bildgebende Detektoren

- z.B.: Nebelkammer, Blasenkammer



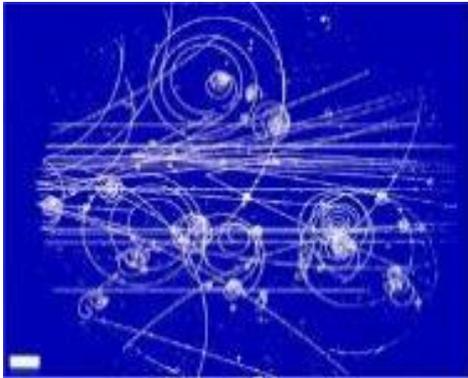
© CERN

- sichtbare Teilchenspuren

Wie weist man Elementarteilchen nach?

► Bildgebende Detektoren

- z.B.: Nebelkammer, Blasenkammer



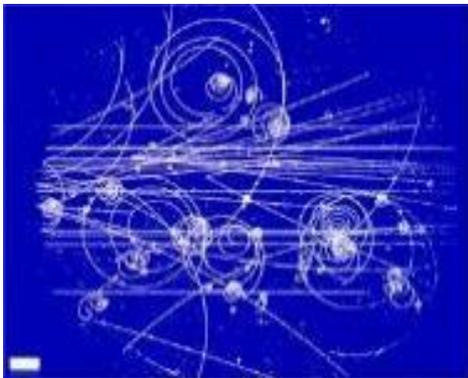
© CERN

- sichtbare Teilchenspuren
- Eigenschaften der Teilchen werden daraus rekonstruiert

Wie weist man Elementarteilchen nach?

▶ Bildgebende Detektoren

- z.B.: Nebelkammer, Blasenkammer



© CERN

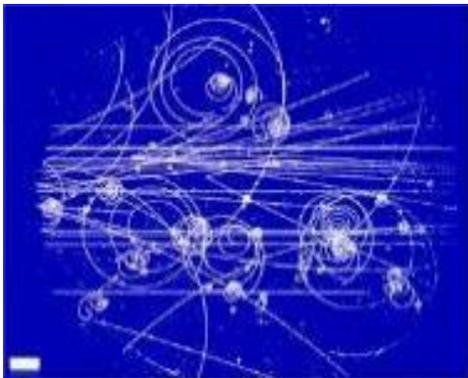
- sichtbare Teilchenspuren
- Eigenschaften der Teilchen werden daraus rekonstruiert

▶ Elektronische Detektoren

Wie weist man Elementarteilchen nach?

▶ Bildgebende Detektoren

- z.B.: Nebelkammer, Blasenkammer

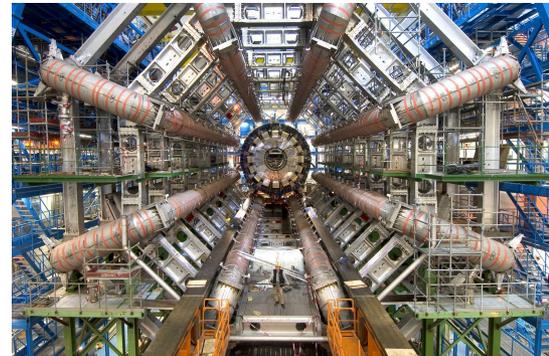


© CERN

- sichtbare Teilchenspuren
- Eigenschaften der Teilchen werden daraus rekonstruiert

▶ Elektronische Detektoren

- z.B.: ATLAS-Detektor, Geigerzähler

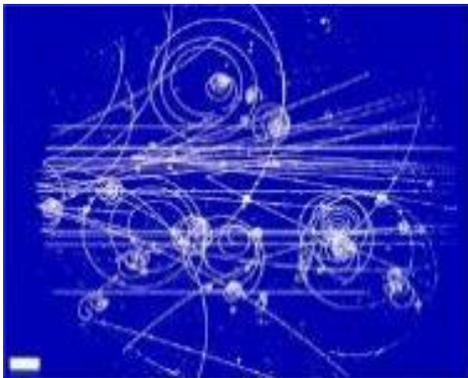


© CERN

Wie weist man Elementarteilchen nach?

▶ Bildgebende Detektoren

- z.B.: Nebelkammer, Blasenkammer

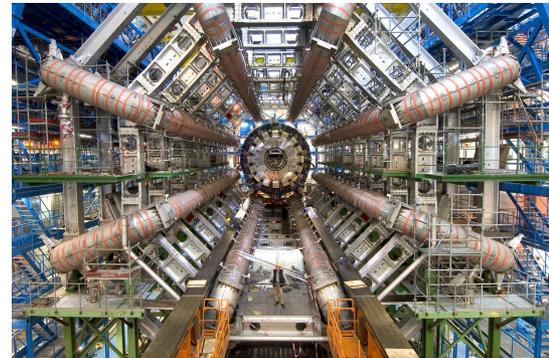


© CERN

- sichtbare Teilchenspuren
- Eigenschaften der Teilchen werden daraus rekonstruiert

▶ Elektronische Detektoren

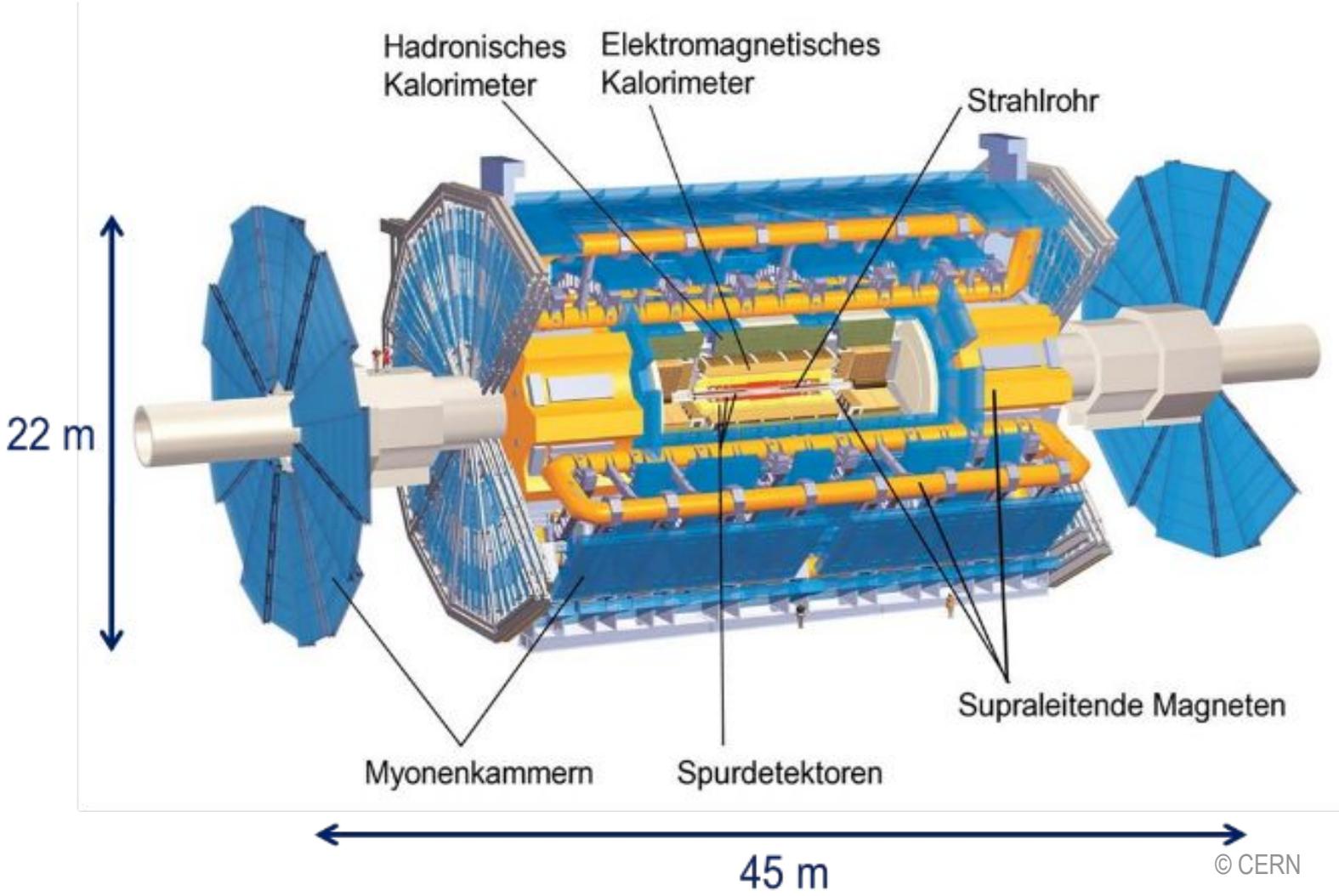
- z.B.: ATLAS-Detektor, Geigerzähler



© CERN

- elektrische Signale
- Eigenschaften der Teilchen werden daraus rekonstruiert

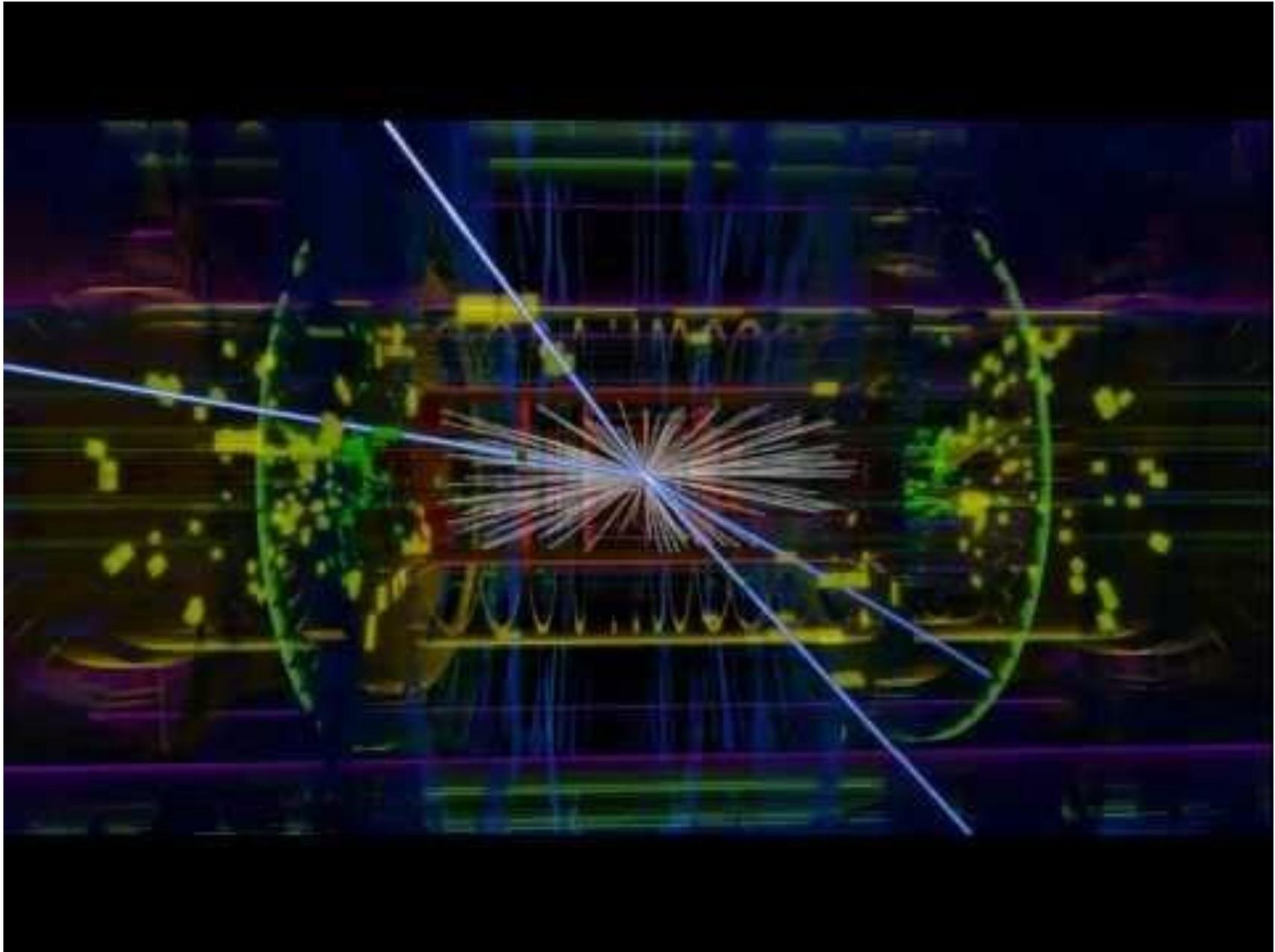
Der ATLAS-Detektor



Der ATLAS-Detektor



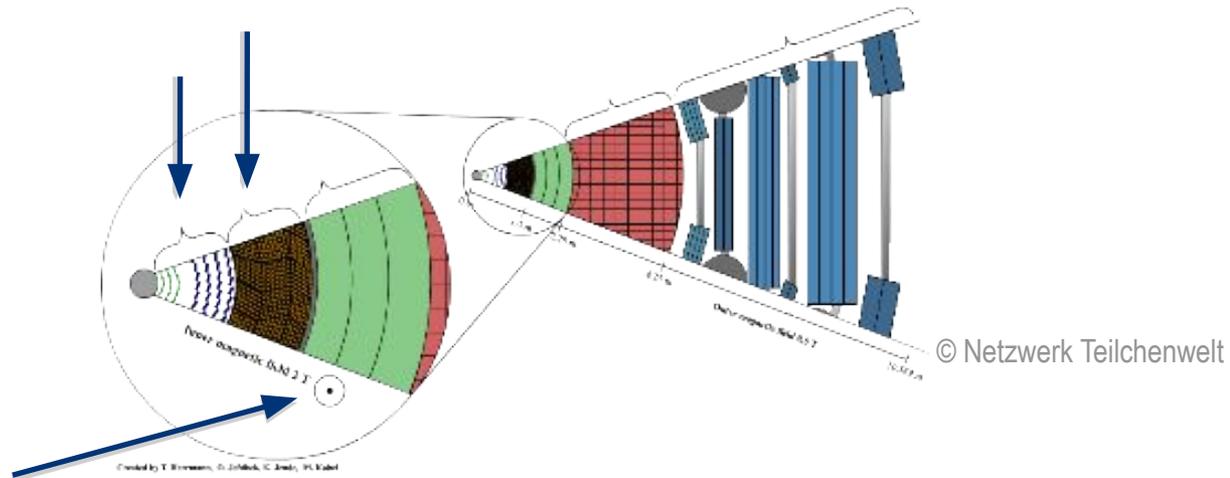
Wie sieht eine Kollision aus?



Der ATLAS-Detektor

▶ Spurdetektoren

- ... messen die Spuren und Impulse von elektrisch geladenen Teilchen
- ... befinden sich in einem Magnetfeld

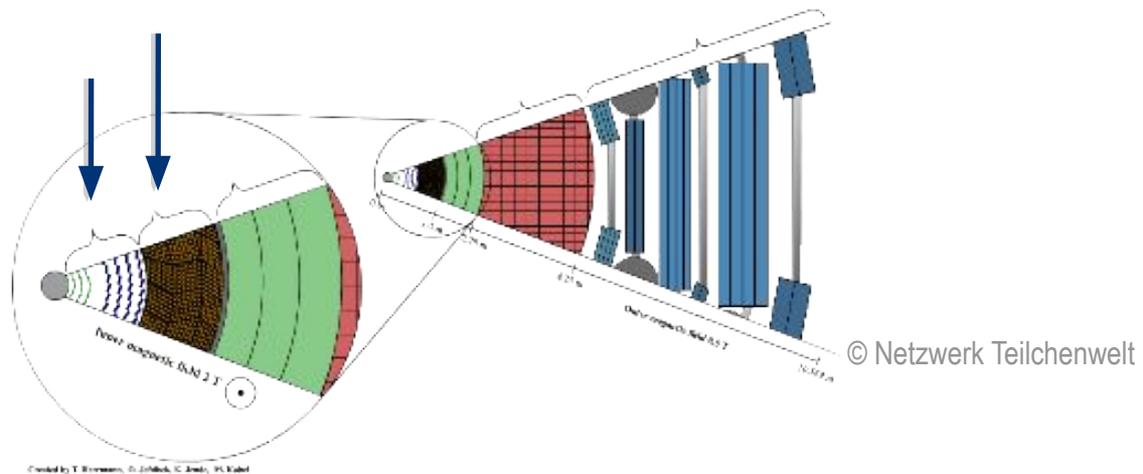


▶ Elektromagnetisches Kalorimeter

- ... misst die Energie von Elektronen, Positronen und Photonen

Der ATLAS-Detektor

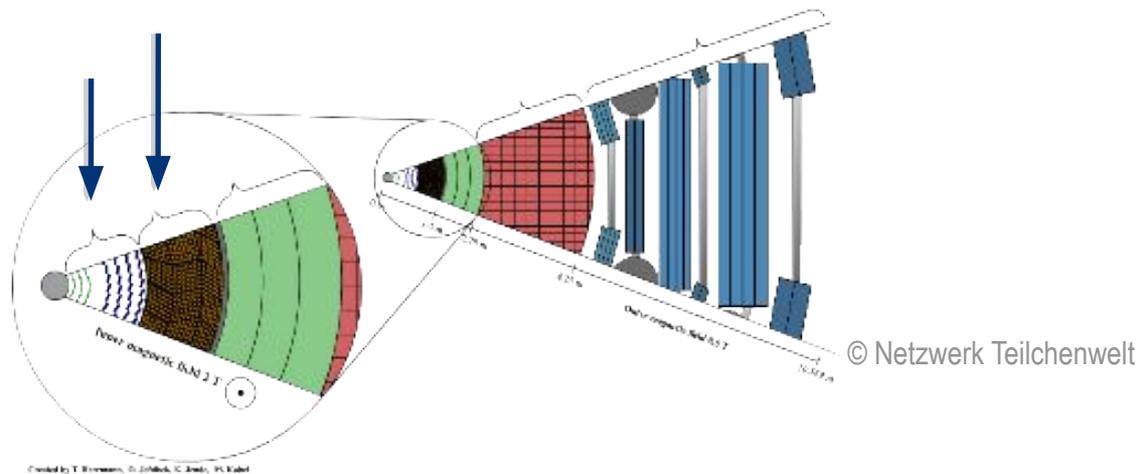
- ▶ Spurdetektoren
 - ... messen die Spuren und Impulse von elektrisch geladenen Teilchen



Der ATLAS-Detektor

▶ Spurdetektoren

- ... messen die Spuren und Impulse von elektrisch geladenen Teilchen
- ... befinden sich in einem Magnetfeld



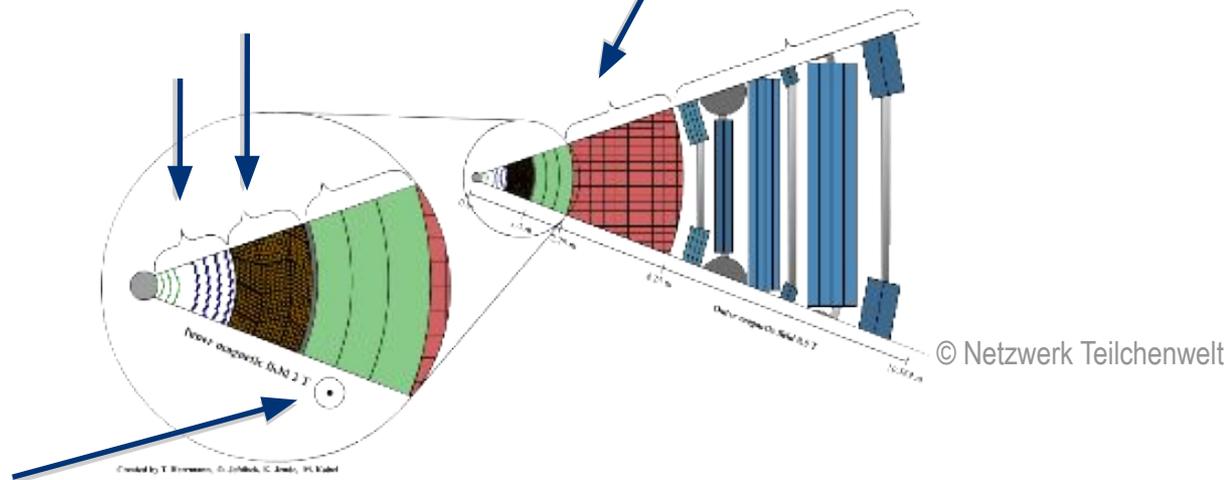
Der ATLAS-Detektor

▶ Spurdetektoren

- ... messen die Spuren und Impulse von elektrisch geladenen Teilchen
- ... befinden sich in einem Magnetfeld

▶ Hadronisches Kalorimeter

- ... misst die Energie von Hadronen (= aus Quarks bestehende Teilchen)



▶ Elektromagnetisches Kalorimeter

- ... misst die Energie von Elektronen, Positronen und Photonen

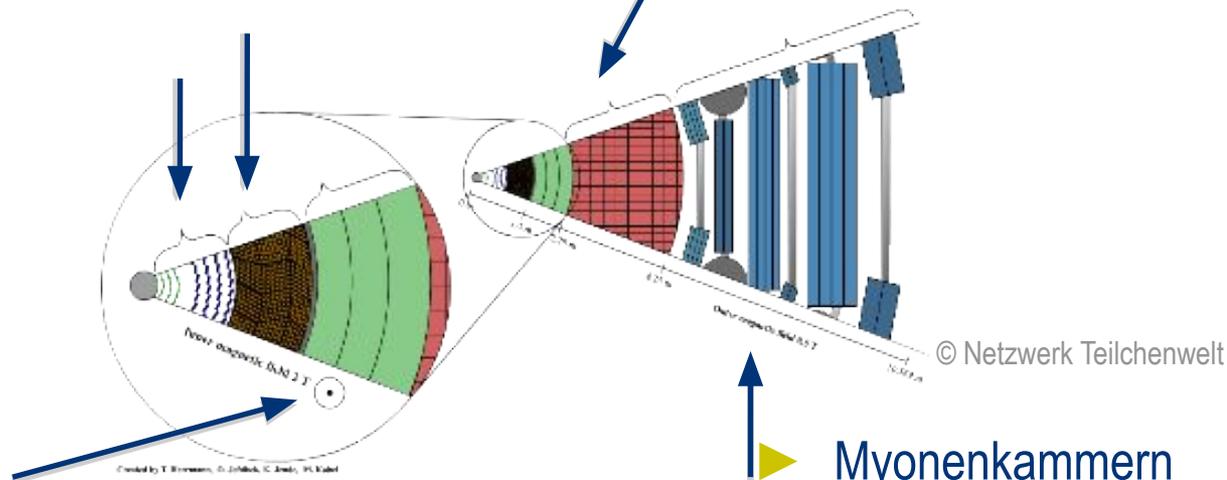
Der ATLAS-Detektor

▶ Spurdetektoren

- ... messen die Spuren und Impulse von elektrisch geladenen Teilchen
- ... befinden sich in einem Magnetfeld

▶ Hadronisches Kalorimeter

- ... misst die Energie von Hadronen (= aus Quarks bestehende Teilchen)



▶ Elektromagnetisches Kalorimeter

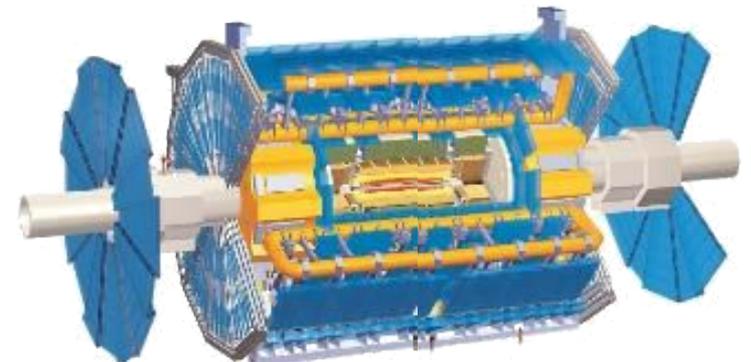
- ... misst die Energie von Elektronen, Positronen und Photonen

▶ Myonenkammern

- ... messen die Spuren und Impulse von Myonen
- ... befinden sich in einem Magnetfeld

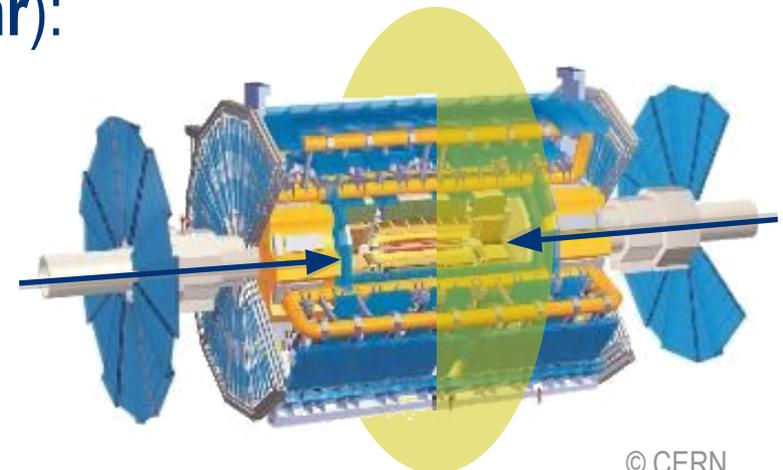
Was misst ATLAS?

- ▶ Spurdetektoren:
 - **Spur**
 - **Impuls** und Vorzeichen der **elektrischen Ladung**
- ▶ Kalorimeter:
 - **Energie**
- ▶ Besonders wichtig sind die **transversalen Anteile** von Impuls und Energie (**senkrecht zum Strahlrohr**):
 - E_T : transversale Energie
 - P_T : transversaler Impuls



Was misst ATLAS?

- ▶ Spurdetektoren:
 - **Spur**
 - **Impuls** und Vorzeichen der **elektrischen Ladung**
- ▶ Kalorimeter:
 - **Energie**
- ▶ Besonders wichtig sind die **transversalen Anteile** von Impuls und Energie (**senkrecht zum Strahlrohr**):
 - E_T : transversale Energie
 - P_T : transversaler Impuls



Transversaler Impuls?

► Impuls:

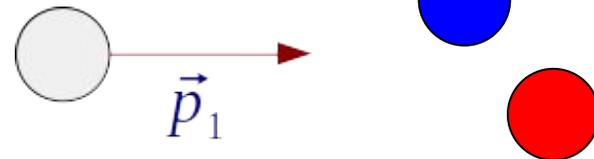
- Produkt aus Masse und Geschwindigkeit $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$
- Impuls ist ein Vektor (richtungsabhängig)
- Gesamt-Impuls ist wie Energie eine Erhaltungsgröße

Transversaler Impuls?

► Impuls:

- Produkt aus Masse und Geschwindigkeit $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$
- Impuls ist ein Vektor (richtungsabhängig)
- Gesamt-Impuls ist wie Energie eine Erhaltungsgröße
- Bsp: Billard

Vor Stoß:

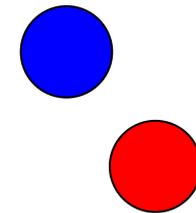
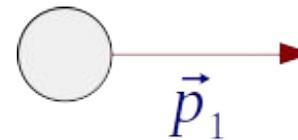


Transversaler Impuls?

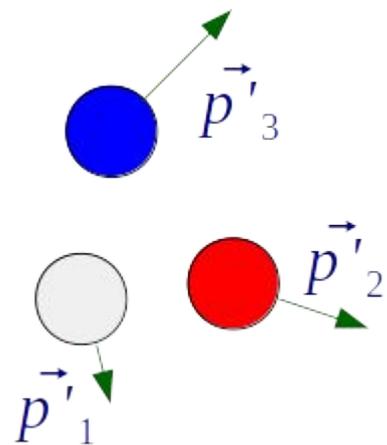
► Impuls:

- Produkt aus Masse und Geschwindigkeit $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$
- Impuls ist ein Vektor (richtungsabhängig)
- Gesamt-Impuls ist wie Energie eine Erhaltungsgröße
- Bsp: Billard

Vor Stoß:



Nach Stoß:

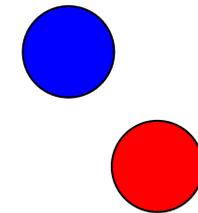
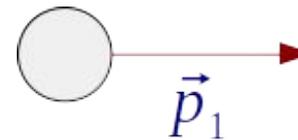


Transversaler Impuls?

► Impuls:

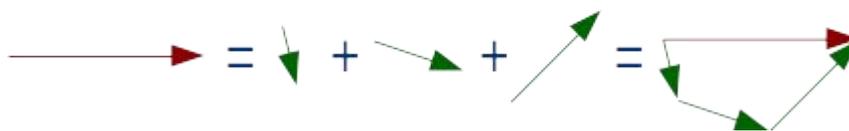
- Produkt aus Masse und Geschwindigkeit $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$
- Impuls ist ein Vektor (richtungsabhängig)
- Gesamt-Impuls ist wie Energie eine Erhaltungsgröße
- Bsp: Billard

Vor Stoß:

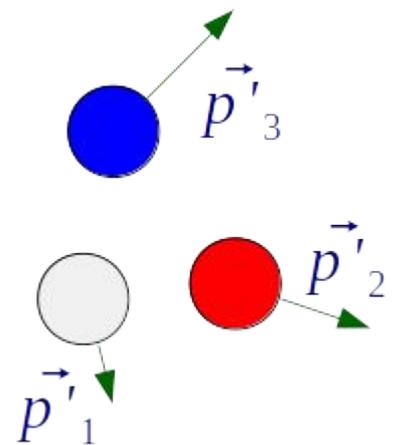


Impulserhaltung:

$$\vec{p}_1 = \vec{p}'_1 + \vec{p}'_2 + \vec{p}'_3$$

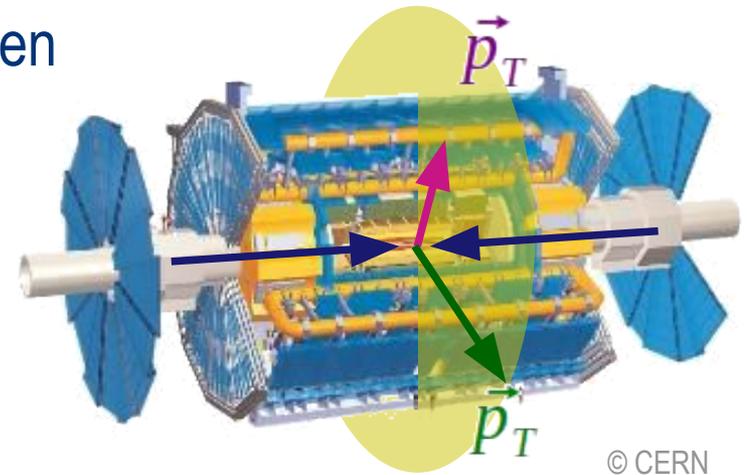
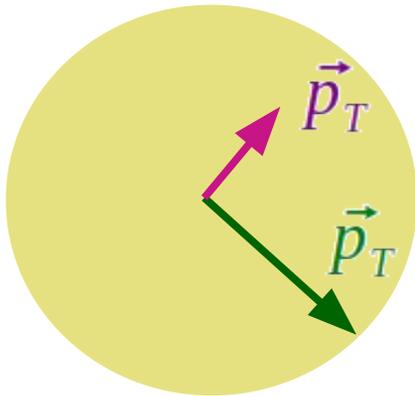


Nach Stoß:



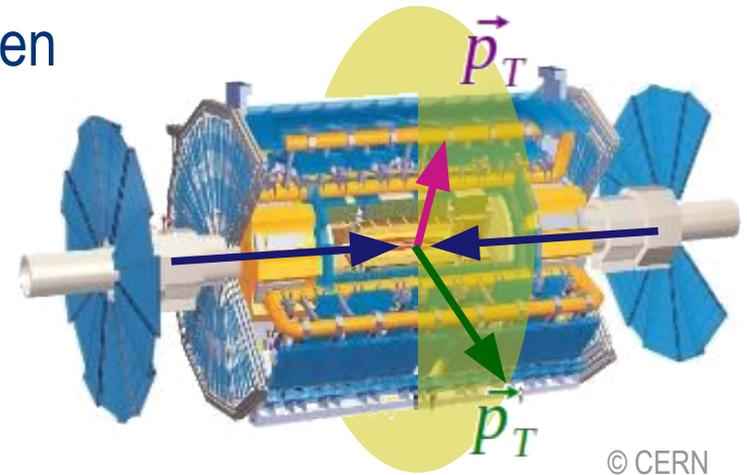
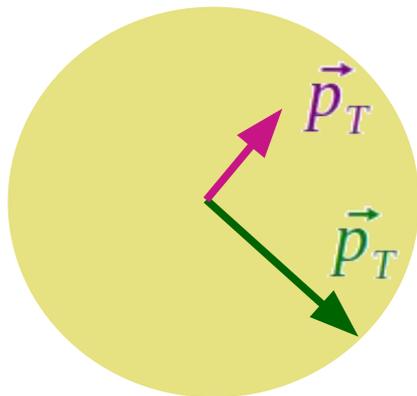
Transversaler Impuls?

- Betrachte den Impuls in der Ebene senkrecht zur Strahlachse
- Bsp: zwei Teilchen werden gemessen
- Transversale Impulse: \vec{p}_T und \vec{p}_T



Transversaler Impuls?

- Betrachte den Impuls in der Ebene senkrecht zur Strahlachse
- Bsp: zwei Teilchen werden gemessen
- Transversale Impulse: \vec{p}_T und \vec{p}_T



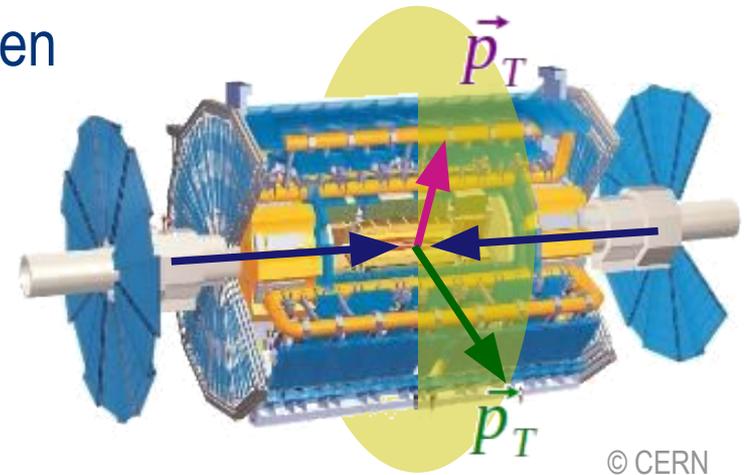
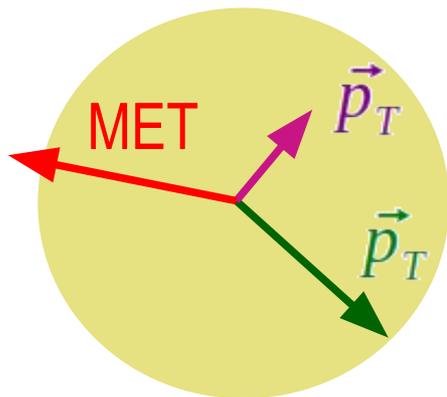
$$= \vec{p}_T + \vec{p}_T \neq \vec{0}$$

► Problem:

- Vor Kollision war der Impuls senkrecht zur Strahlachse exakt $\vec{0}$
Impulserhaltung scheint verletzt

Transversaler Impuls?

- Betrachte den Impuls in der Ebene senkrecht zur Strahlachse
- Bsp: zwei Teilchen werden gemessen
- Transversale Impulse: \vec{p}_T und \vec{p}_T



© CERN

A vector diagram showing the sum of the two transverse momentum vectors and the MET vector. The purple vector \vec{p}_T , the green vector \vec{p}_T , and the red vector 'MET' are arranged tip-to-tail to form a closed triangle, representing the equation $\vec{p}_T + \vec{p}_T + MET = \vec{0}$.

$$= \vec{p}_T + \vec{p}_T + MET = \vec{0}$$

► Fehlender transversaler Impuls:

- Mindestens ein Teilchen mit $P_T = MET$ konnte nicht gemessen werden
- Welche Teilchen kommen dafür in Frage?

Morgen geht es weiter :)





Jetzt seid ihr dran!

▶ Fragen soweit?

▶ Teilchenidentifikation zum Verstehen und Ausprobieren

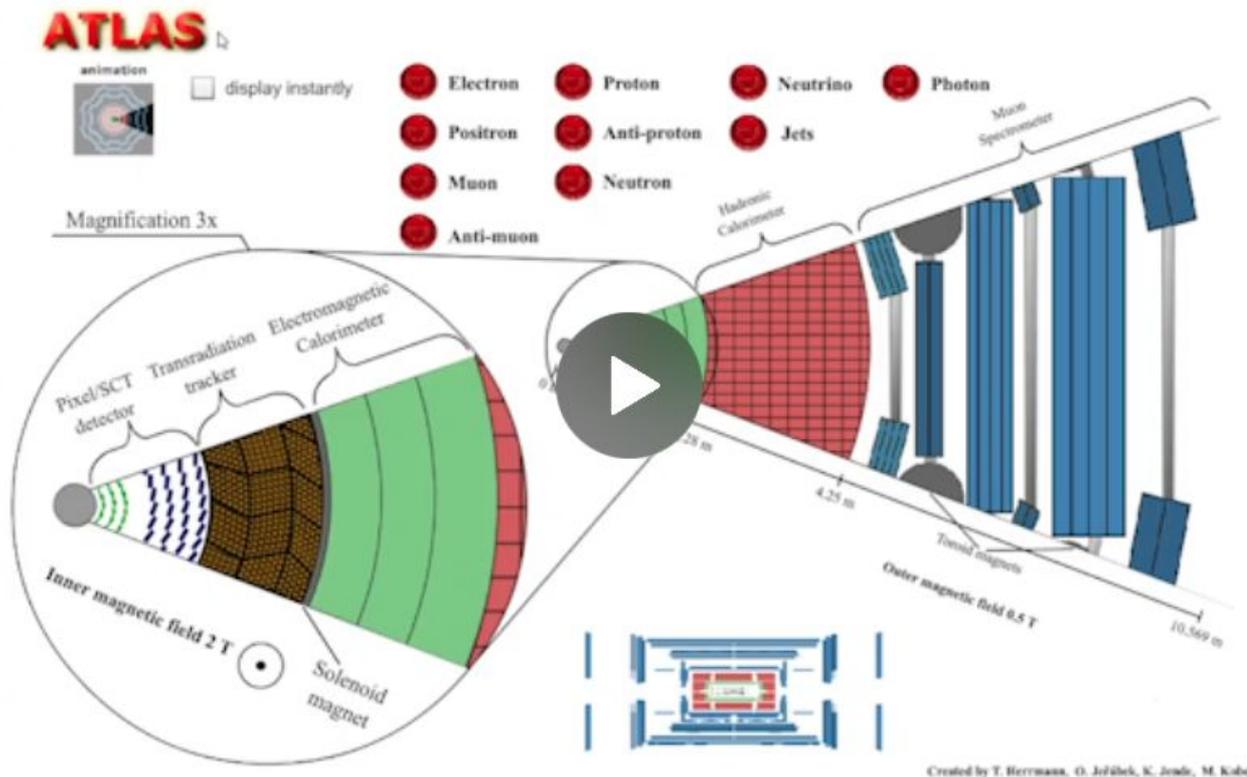
http://atlas.physicsmasterclasses.org/de/wpath_teilchenid1.htm

→ Teilchenidentifikation

Teilchenidentifikation

http://atlas.physicsmasterclasses.org/de/wpath_teilchenid1.htm

→ Teilchenidentifikation



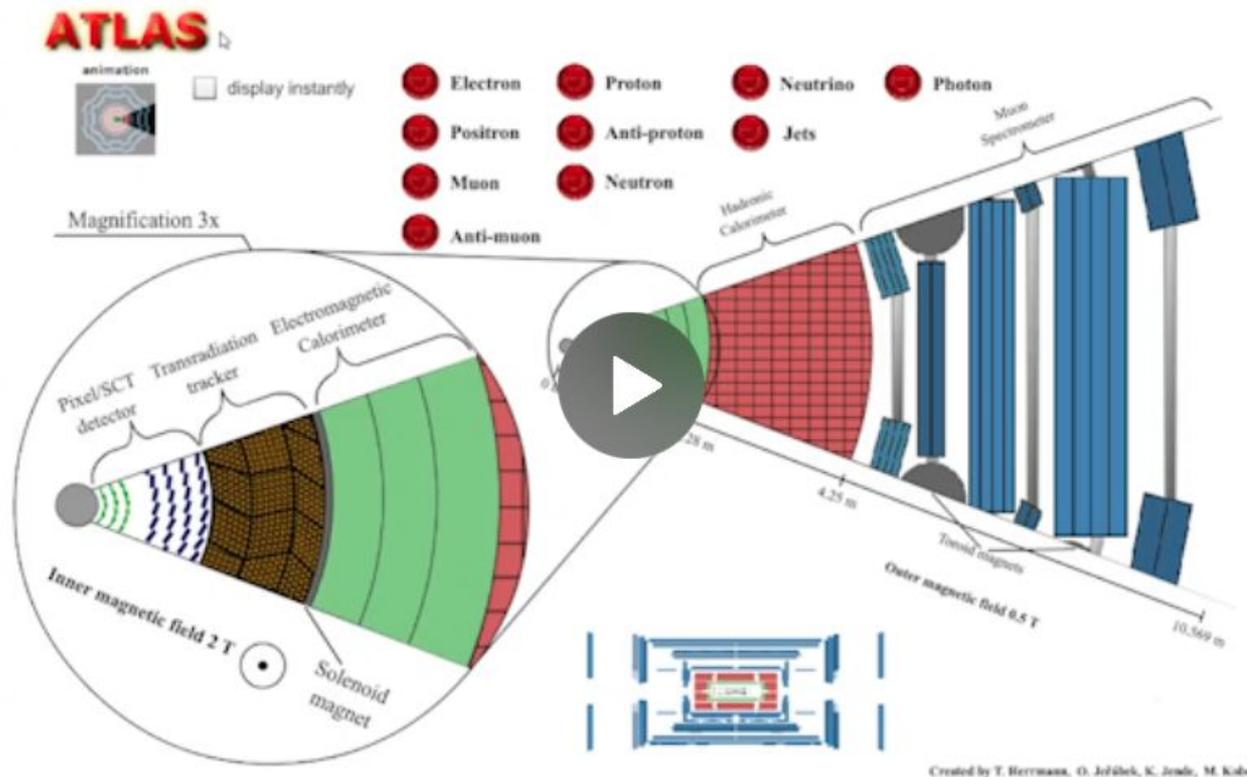
Antimuon
 Antiproton
 Electron
 Jets
 Muon
 Neutrino
 Neutron
 Photon
 Positron
 Proton

Teilchenidentifikation

http://atlas.physicsmasterclasses.org/de/wpath_teilchenid1.htm

→ Teilchenidentifikation

Auswahl des Teilchens



- Antimuon
- Antiproton**
- Electron
- Jets
- Muon
- Neutrino
- Neutron
- Photon
- Positron
- Proton

Teilchenidentifikation

| | Spurdetektor | Elektromagn. Kalorimeter | Hadron. Kalorimeter | Myonen-kammern |
|-----------|--------------|-----------------------------|---------------------|----------------|
| Elektron | | | | |
| Positron | | | | |
| Photon | | | | |
| Myon | | | | |
| Anti-Myon | | | | |
| Jet | | | | |
| Neutrino | | | | |

Teilchenidentifikation

| | Spurdetektor | Elektromagn. Kalorimeter | Hadron. Kalorimeter | Myonen-kammern |
|-----------|--------------|-----------------------------|---------------------|----------------|
| Elektron | ✓ | ✓ | X | X |
| Positron | | | | |
| Photon | | | | |
| Myon | | | | |
| Anti-Myon | | | | |
| Jet | | | | |
| Neutrino | | | | |

Teilchenidentifikation

| | Spurdetektor | Elektromagn. Kalorimeter | Hadron. Kalorimeter | Myonen-kammern |
|-----------|--------------|-----------------------------|---------------------|----------------|
| Elektron | ✓ | ✓ | X | X |
| Positron | ✓ | ✓ | X | X |
| Photon | | | | |
| Myon | | | | |
| Anti-Myon | | | | |
| Jet | | | | |
| Neutrino | | | | |

Teilchenidentifikation

| | Spurdetektor | Elektromagn. Kalorimeter | Hadron. Kalorimeter | Myonen-kammern |
|-----------|--------------|-----------------------------|---------------------|----------------|
| Elektron | ✓ | ✓ | X | X |
| Positron | ✓ | ✓ | X | X |
| Photon | X | ✓ | X | X |
| Myon | | | | |
| Anti-Myon | | | | |
| Jet | | | | |
| Neutrino | | | | |

Teilchenidentifikation

| | Spurdetektor | Elektromagn. Kalorimeter | Hadron. Kalorimeter | Myonen-kammern |
|-----------|--------------|-----------------------------|---------------------|----------------|
| Elektron | ✓ | ✓ | X | X |
| Positron | ✓ | ✓ | X | X |
| Photon | X | ✓ | X | X |
| Myon | ✓ | ✓ (schwach) | ✓ (schwach) | ✓ |
| Anti-Myon | | | | |
| Jet | | | | |
| Neutrino | | | | |

Teilchenidentifikation

| | Spurdetektor | Elektromagn. Kalorimeter | Hadron. Kalorimeter | Myonen-kammern |
|-----------|--------------|-----------------------------|---------------------|----------------|
| Elektron | ✓ | ✓ | X | X |
| Positron | ✓ | ✓ | X | X |
| Photon | X | ✓ | X | X |
| Myon | ✓ | ✓ (schwach) | ✓ (schwach) | ✓ |
| Anti-Myon | ✓ | ✓ (schwach) | ✓ (schwach) | ✓ |
| Jet | | | | |
| Neutrino | | | | |

Teilchenidentifikation

| | Spurdetektor | Elektromagn. Kalorimeter | Hadron. Kalorimeter | Myonen-kammern |
|-----------|--------------|-----------------------------|---------------------|----------------|
| Elektron | ✓ | ✓ | X | X |
| Positron | ✓ | ✓ | X | X |
| Photon | X | ✓ | X | X |
| Myon | ✓ | ✓ (schwach) | ✓ (schwach) | ✓ |
| Anti-Myon | ✓ | ✓ (schwach) | ✓ (schwach) | ✓ |
| Jet | ✓✓✓ | ✓✓✓ | ✓✓✓ | X |
| Neutrino | | | | |

Teilchenidentifikation

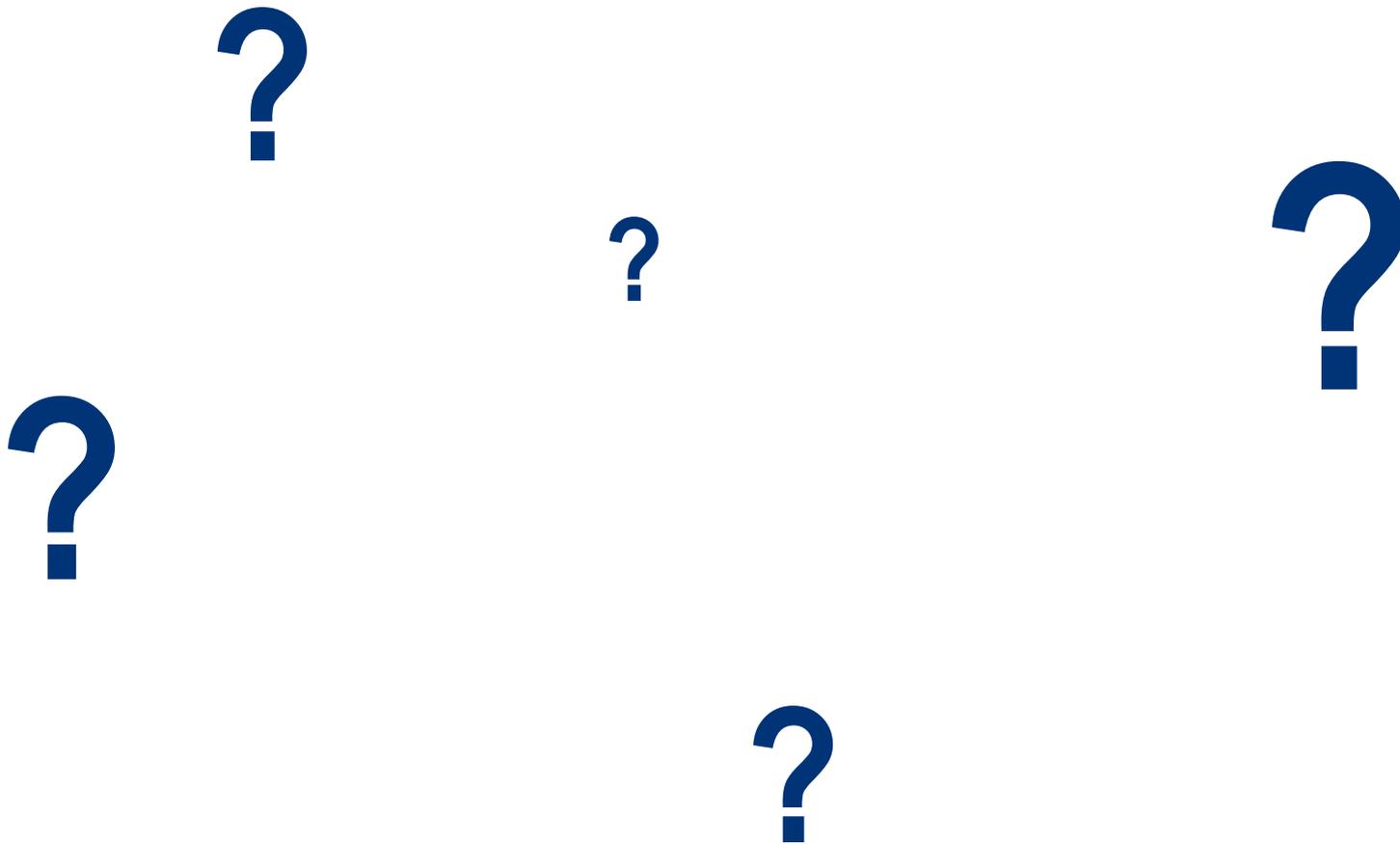
| | Spurdetektor | Elektromagn. Kalorimeter | Hadron. Kalorimeter | Myonen-kammern |
|-----------|--------------|-----------------------------|---------------------|----------------|
| Elektron | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ |
| Positron | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ |
| Photon | ✗ | ✓ | ✗ | ✗ |
| Myon | ✓ | ✓ (schwach) | ✓ (schwach) | ✓ |
| Anti-Myon | ✓ | ✓ (schwach) | ✓ (schwach) | ✓ |
| Jet | ✓✓✓ | ✓✓✓ | ✓✓✓ | ✗ |
| Neutrino | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ |



Gibt es Fragen soweit?



Room Name:
TEILCHENWELT



Teil 4: Vor der Messung

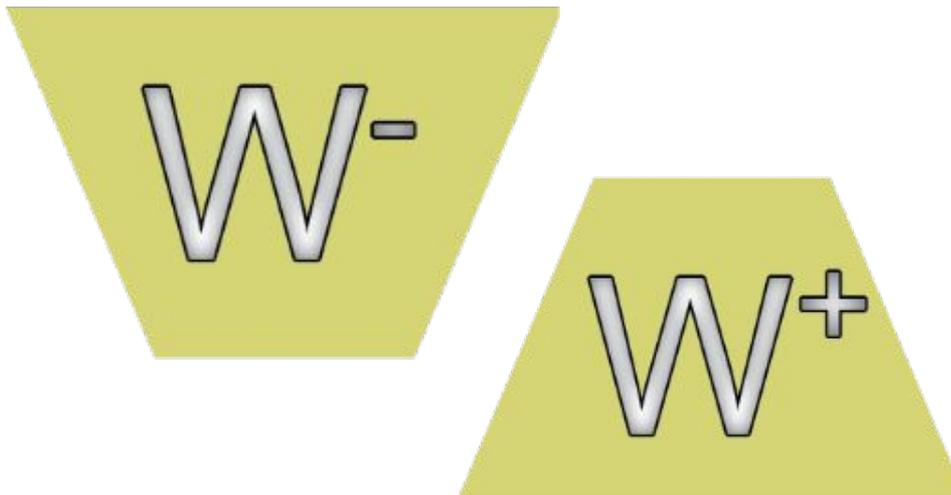
Alle Zutaten um selbst als Teilchendetektiv tätig zu werden!



Die Hauptdarsteller heute: W-Teilchen



- ▶ Mit ihrer Hilfe werdet ihr den Aufbau von Protonen erforschen...
- ▶ ...und erfahren, wie Physiker nach dem Higgs-Teilchen suchen.



W⁻-BOSON
NACHWEIS: 1983

AUSTAUSCHTEILCHEN

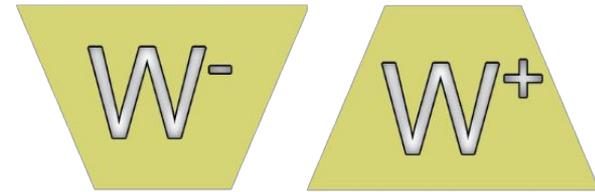
| | |
|-----------------------|---------------------------|
| Masse: | 80 400 MeV/c ² |
| Elektrische Ladung: | -1 |
| Starke Ladung: | - |
| Schwache Ladung: | -1 |
| Mittlere Lebensdauer: | ~ 3 · 10 ⁻²⁵ s |
| Reichweite: | ~ 10 ⁻¹⁸ m |

W⁺-BOSON
NACHWEIS: 1983

AUSTAUSCHTEILCHEN

| | |
|-----------------------|---------------------------|
| Masse: | 80 400 MeV/c ² |
| Elektrische Ladung: | +1 |
| Starke Ladung: | - |
| Schwache Ladung: | +1 |
| Mittlere Lebensdauer: | ~ 3 · 10 ⁻²⁵ s |
| Reichweite: | ~ 10 ⁻¹⁸ m |

W-Teilchen...

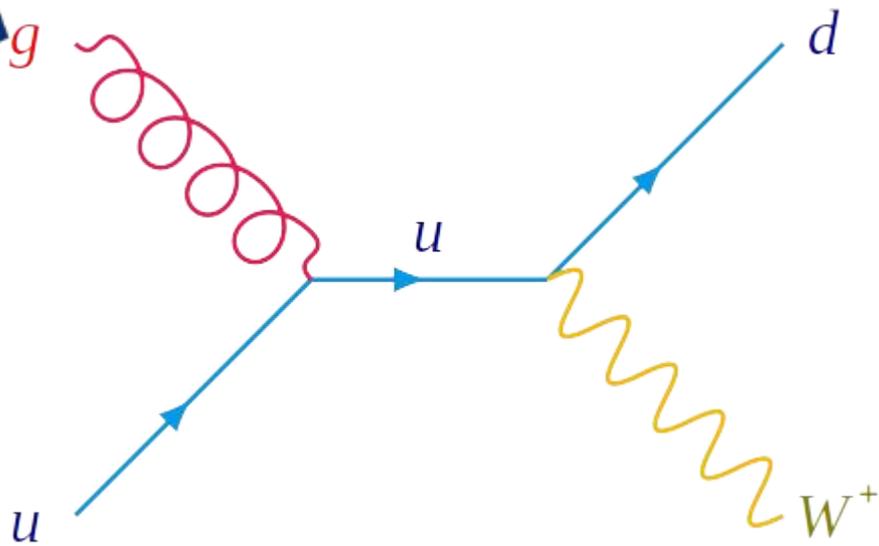


- ▶ sind Botenteilchen der schwachen Wechselwirkung
- ▶ sind elektrisch geladen: W^+ , W^-
- ▶ gehören zu den massereichsten Teilchen die wir kennen ($80,4 \text{ GeV}/c^2$!)
- ▶ wandeln sich nach ca. 10^{-25} s in leichtere Teilchen um (kurze Reichweite)

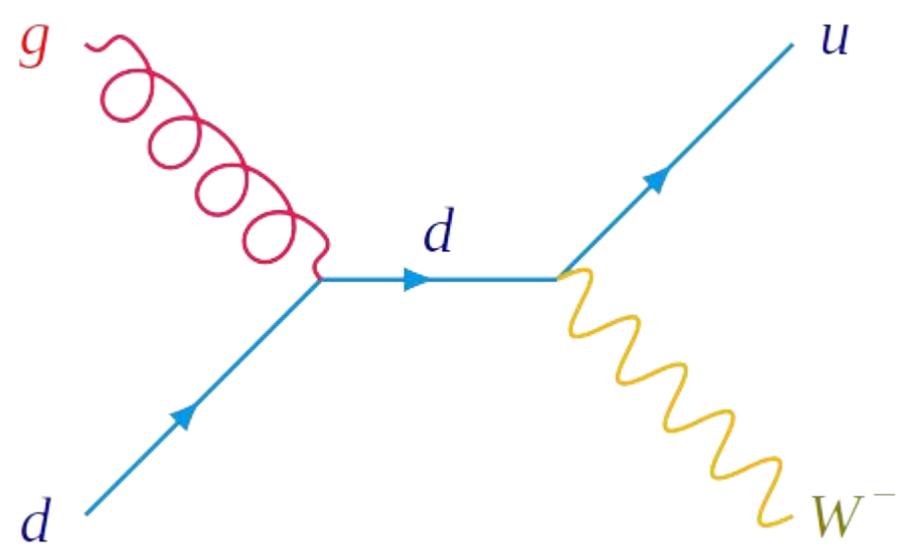
Daher können wir sie nicht direkt im Detektor beobachten, sondern erkennen sie anhand ihrer Umwandlungsprodukte!

Wie entstehen W-Teilchen?

► Kollision von Protonen im LHC:



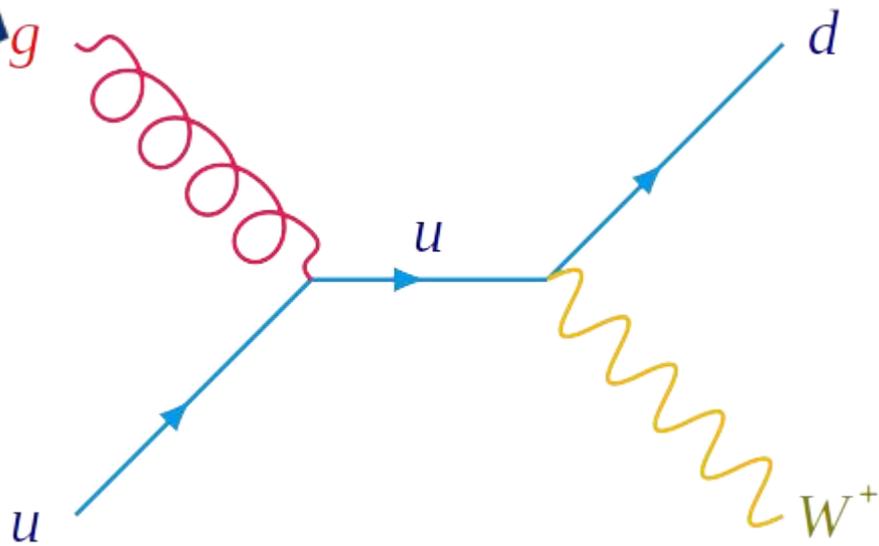
$$u + g \rightarrow W^+ + d$$



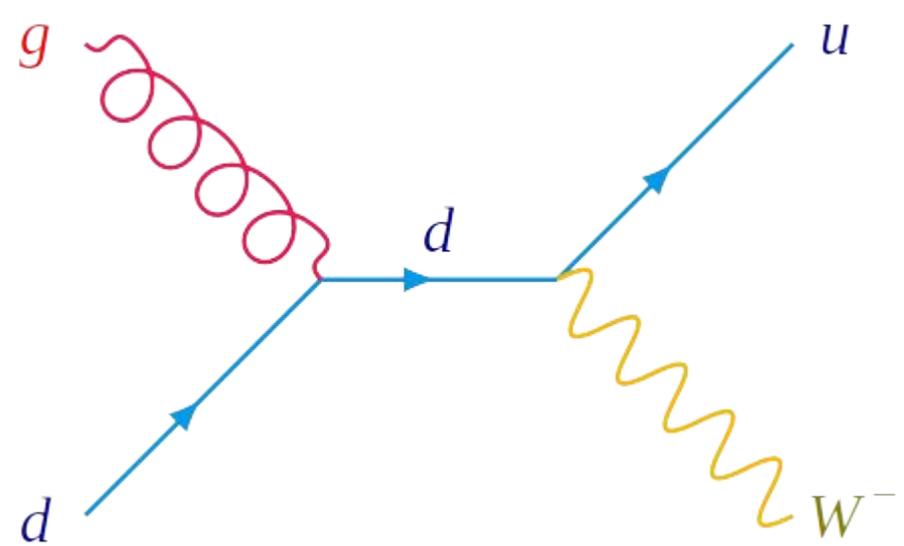
$$d + g \rightarrow W^- + u$$

Wie entstehen W-Teilchen?

► Kollision von Protonen im LHC:



$$u + g \rightarrow W^+ + d$$



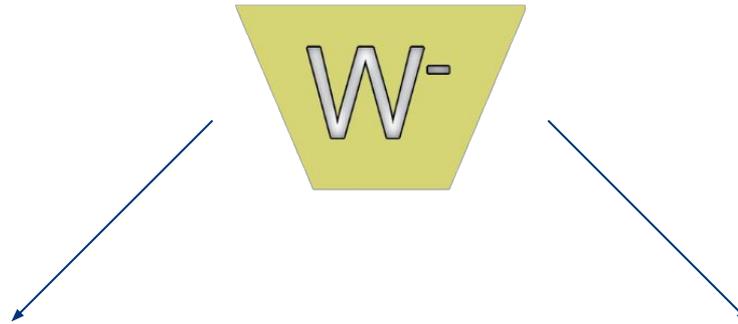
$$d + g \rightarrow W^- + u$$

1. Messaufgabe:

In welchem Verhältnis entstehen W^+ - und W^- -Teilchen im LHC?

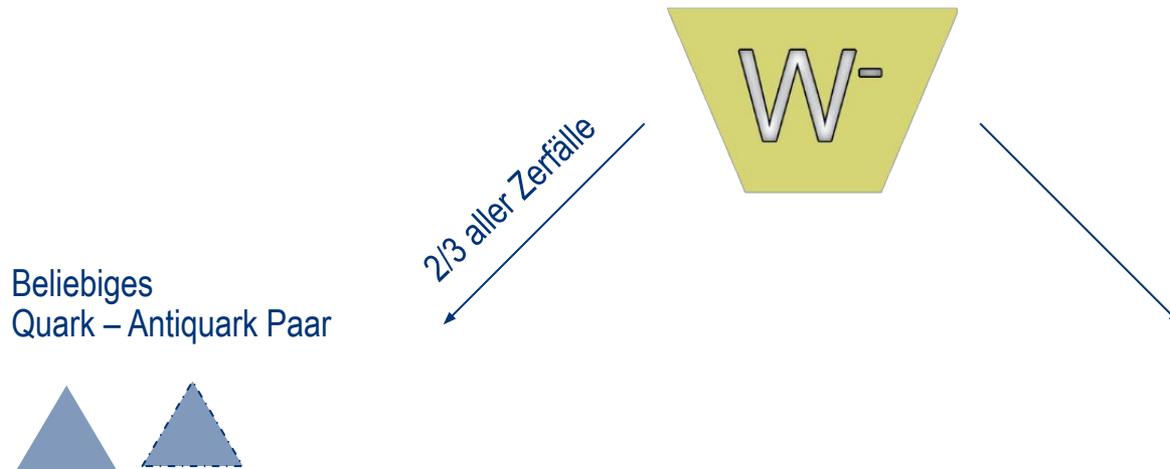
Wie findet man W^- -Teilchen?

- ▶ Man sucht nach Umwandlungsprodukten, die man in Detektoren beobachten kann



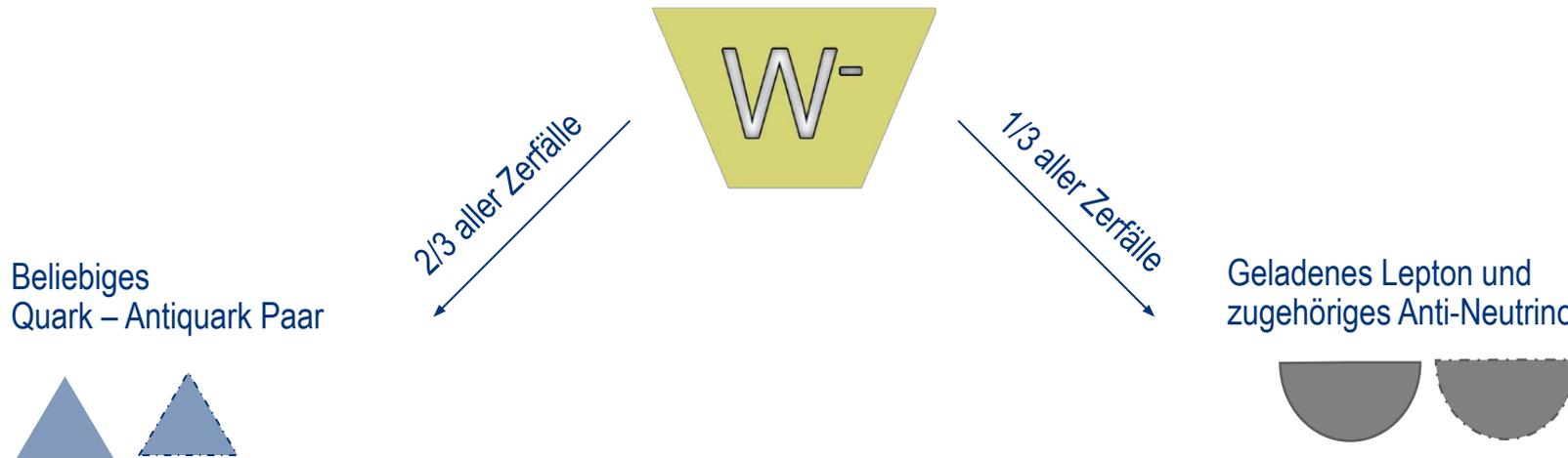
Wie findet man W^- -Teilchen?

- ▶ Man sucht nach Umwandlungsprodukten, die man in Detektoren beobachten kann



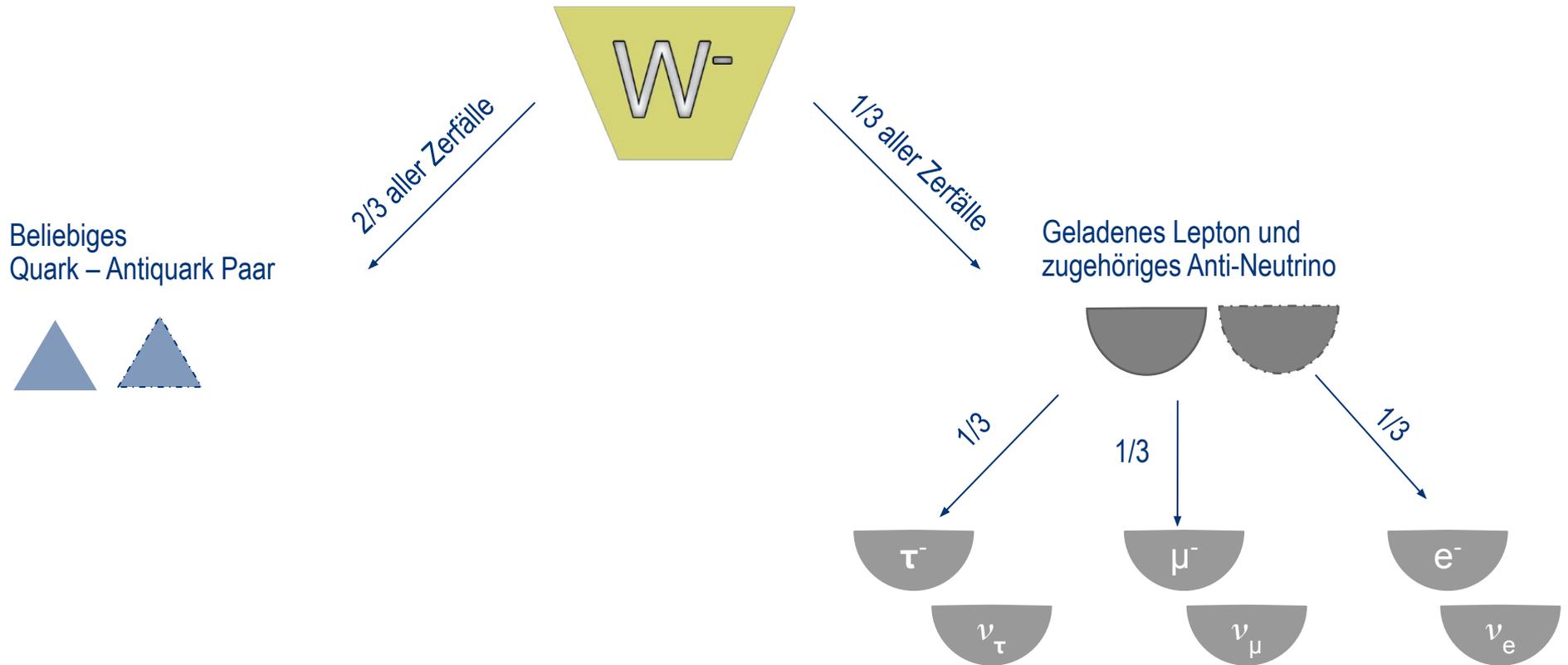
Wie findet man W^- -Teilchen?

- ▶ Man sucht nach Umwandlungsprodukten, die man in Detektoren beobachten kann



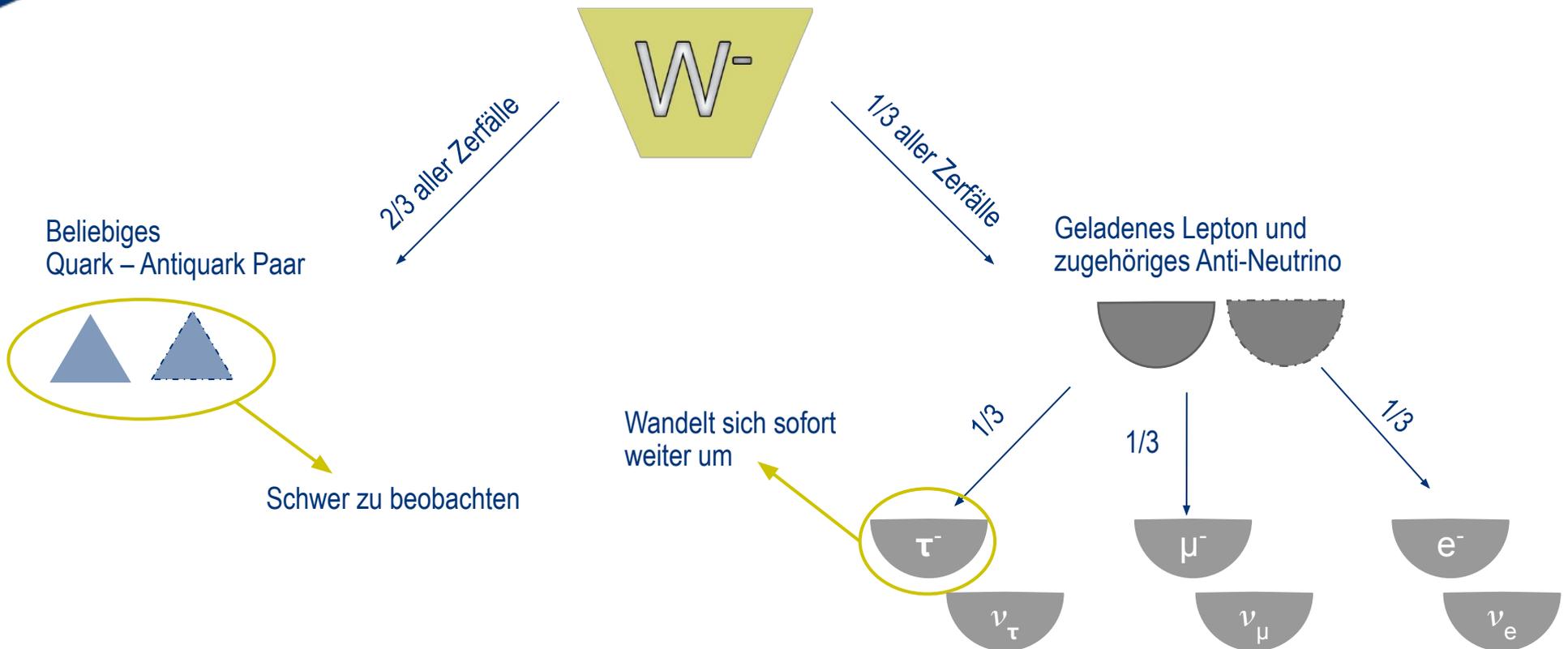
Wie findet man W^- -Teilchen?

- ▶ Man sucht nach Umwandlungsprodukten, die man in Detektoren beobachten kann



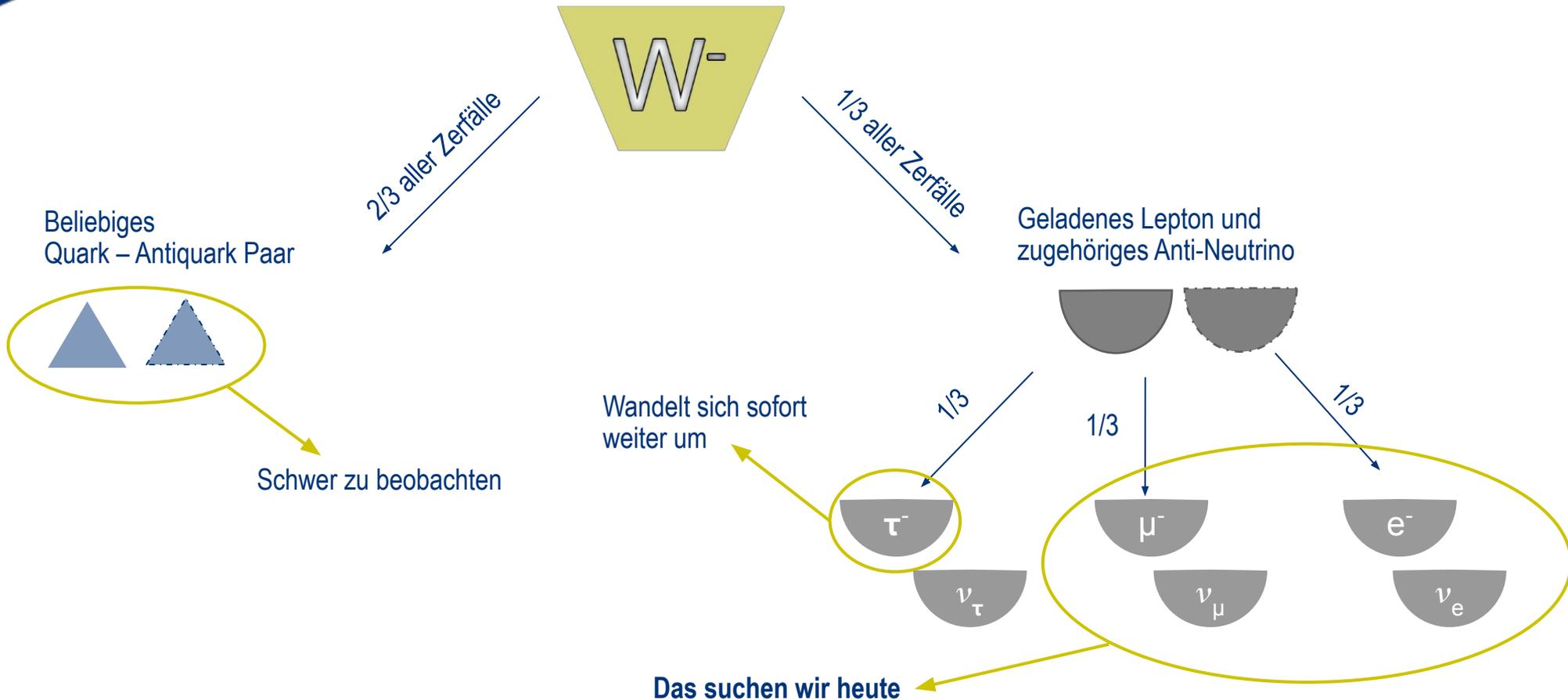
Wie findet man W^- -Teilchen?

- ▶ Man sucht nach Umwandlungsprodukten, die man in Detektoren beobachten kann



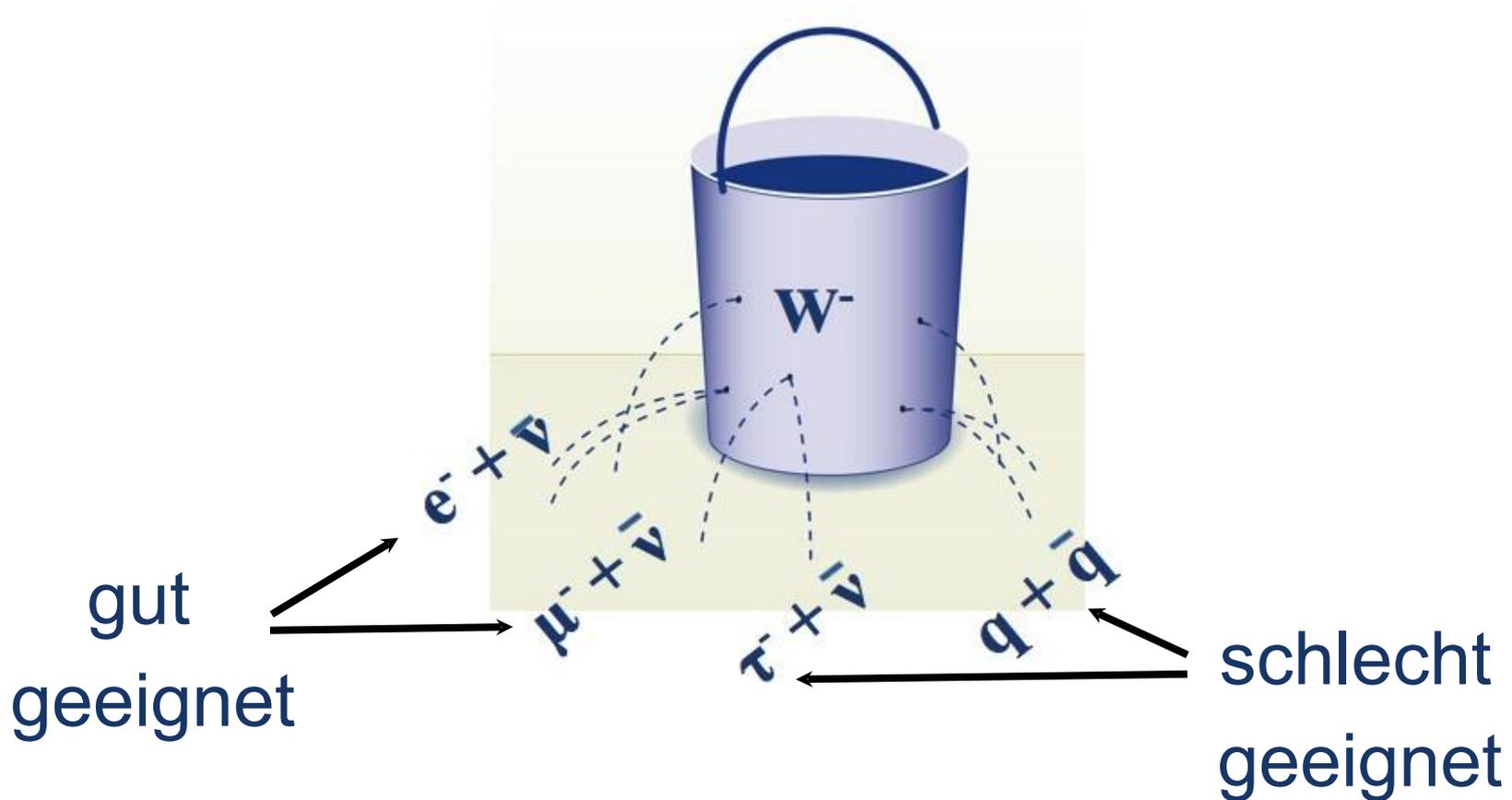
Wie findet man W^- -Teilchen?

- ▶ Man sucht nach Umwandlungsprodukten, die man in Detektoren beobachten kann



Wie findet man W^- -Teilchen?

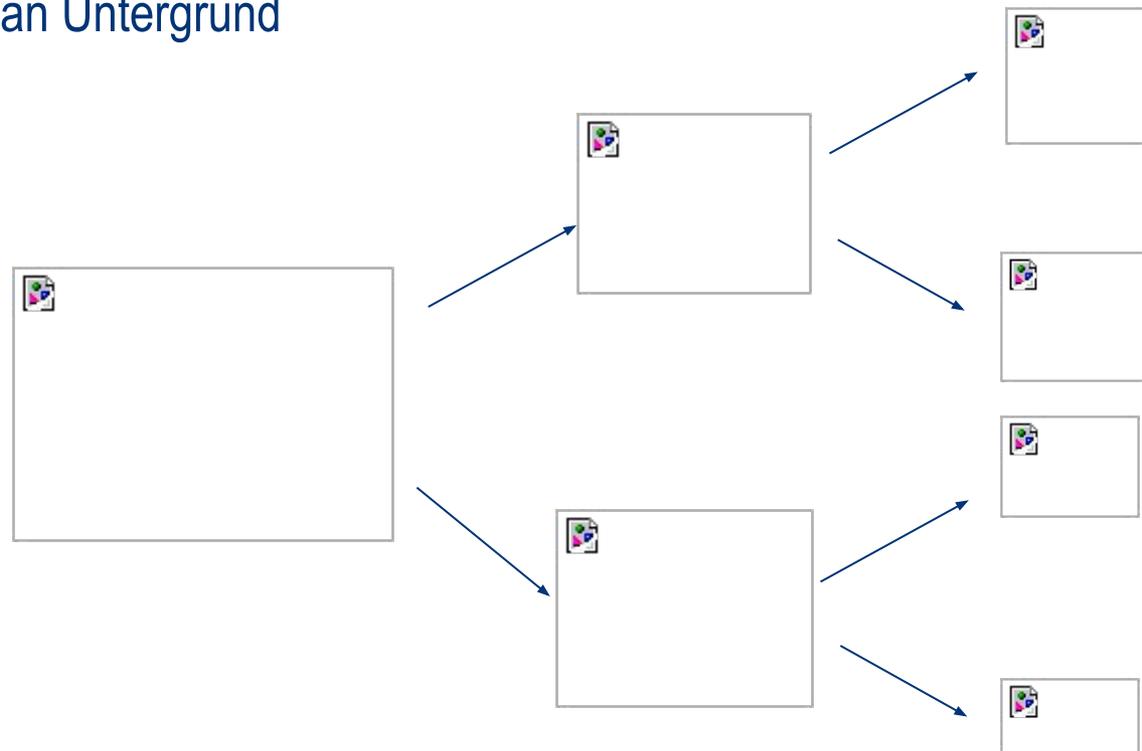
- ▶ Man sucht nach Umwandlungsprodukten, die man in Detektoren beobachten kann





Die Suche nach dem Higgs-Teilchen

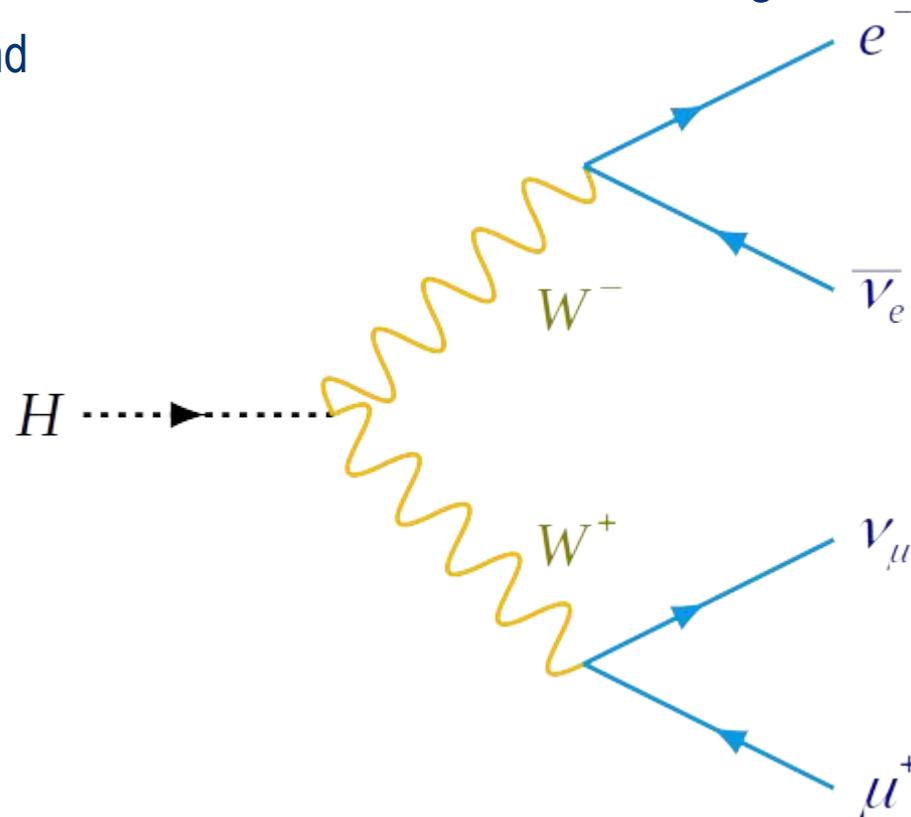
- ▶ Umwandlung des Higgs-Teilchens in 2 W-Teilchen
- ▶ W-Teilchen wandeln sich in Leptonen um
- ▶ Aber: Endprodukte können auch aus anderen Umwandlungen kommen
 - Dies nennt man Untergrund





Die Suche nach dem Higgs-Teilchen

- ▶ Umwandlung des Higgs-Teilchens in 2 W-Teilchen
- ▶ W-Teilchen wandeln sich in Leptonen um
- ▶ Aber: Endprodukte können auch aus anderen Umwandlungen kommen
 - Dies nennt man Untergrund



Higgs-Teilchen oder Untergrund?

- ▶ Bei der Umwandlung eines Higgs-Teilchens in zwei W-Teilchen entstehen schließlich zwei elektrisch geladene Leptonen
- ▶ Diese bewegen unter einem bestimmten Winkel zueinander durch den Detektor
- ▶ Dieser Winkel liegt in einem charakteristischen Bereich
 - Messung des Winkels hilft Untergrundereignisse auszuschließen

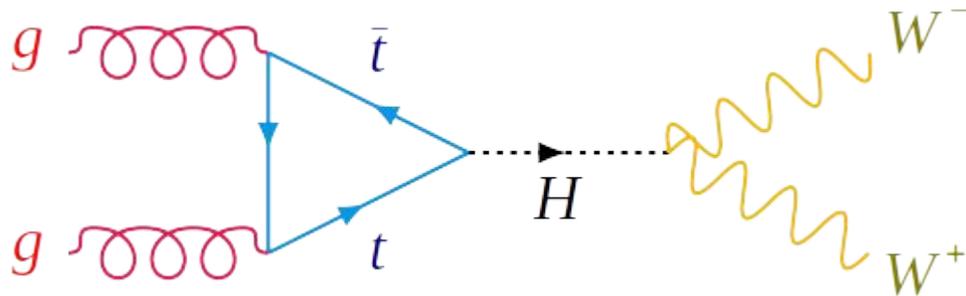
2. Messaufgabe:

Suche nach W-Teilchen und Bestimmung des Winkels zwischen den detektierten Leptonen



Higgs-Teilchen oder Untergrund?

- ▶ Zwei W-Teilchen können von einem Higgs-Teilchen stammen:

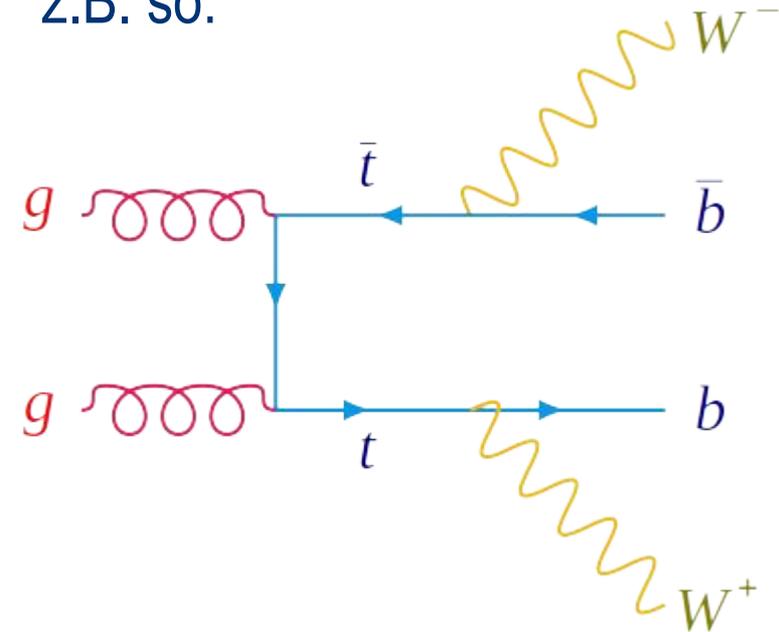
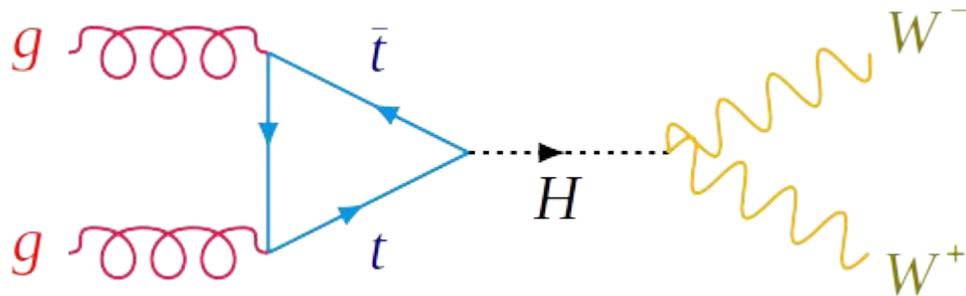




Higgs-Teilchen oder Untergrund?

- ▶ Zwei W-Teilchen können von einem Higgs-Teilchen stammen:

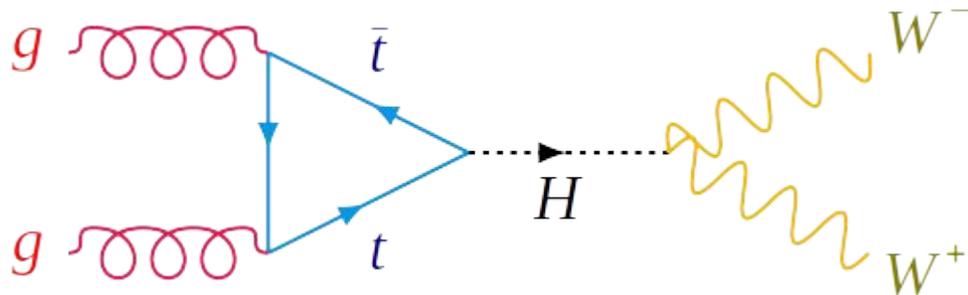
- ▶ ...aber sie können auch anders entstanden sein (Untergrund), z.B. so:



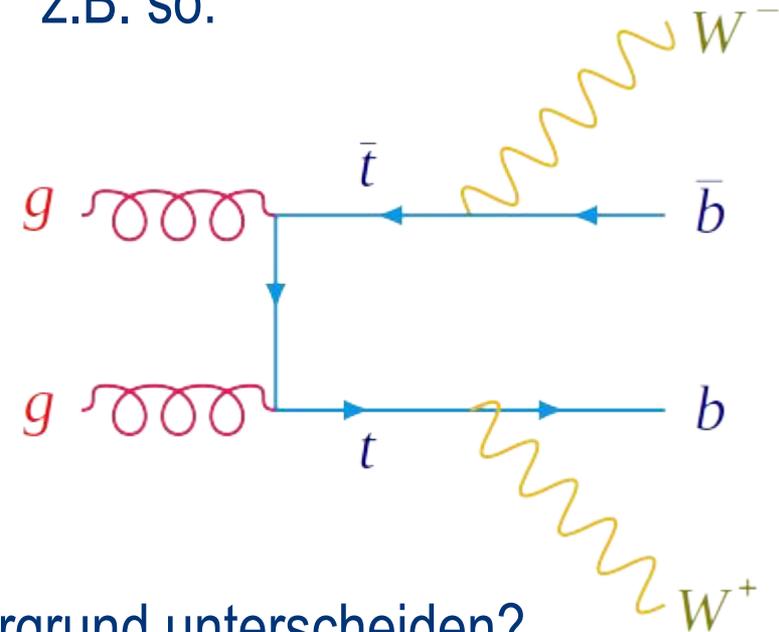


Higgs-Teilchen oder Untergrund?

- ▶ Zwei W-Teilchen können von einem Higgs-Teilchen stammen:



- ▶ ...aber sie können auch anders entstanden sein (Untergrund), z.B. so:



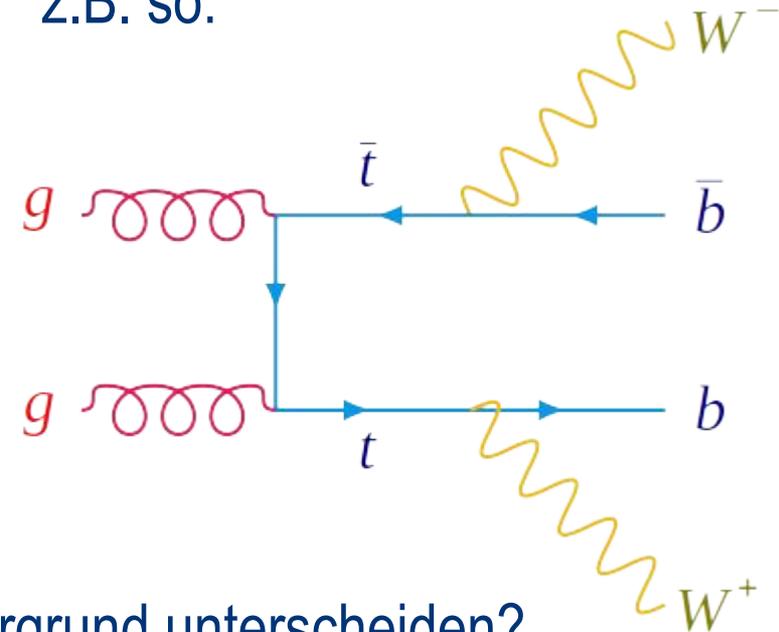
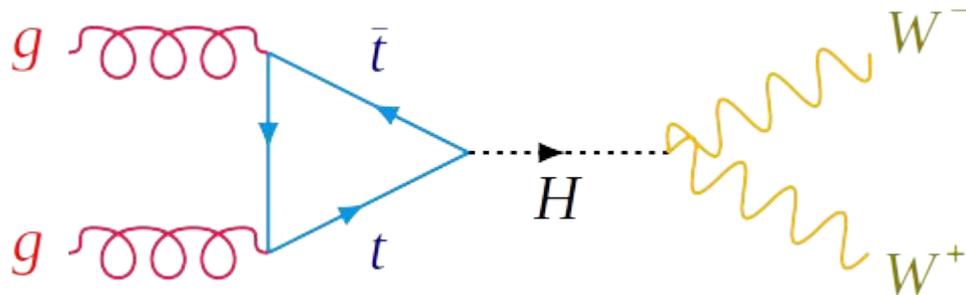
- ▶ Können wir Higgs-Teilchen von Untergrund unterscheiden?



Higgs-Teilchen oder Untergrund?

- ▶ Zwei W-Teilchen können von einem Higgs-Teilchen stammen:

- ▶ ...aber sie können auch anders entstanden sein (Untergrund), z.B. so:



- ▶ Können wir Higgs-Teilchen von Untergrund unterscheiden?
- ▶ Ja, durch Winkel $\Delta\Phi$ zwischen den beiden Leptonen

2. Messaufgabe: Suche nach W-Bosonen und Bestimmen des Winkels!



Gibt es Fragen soweit?



Room Name:
TEILCHENWELT





Pause



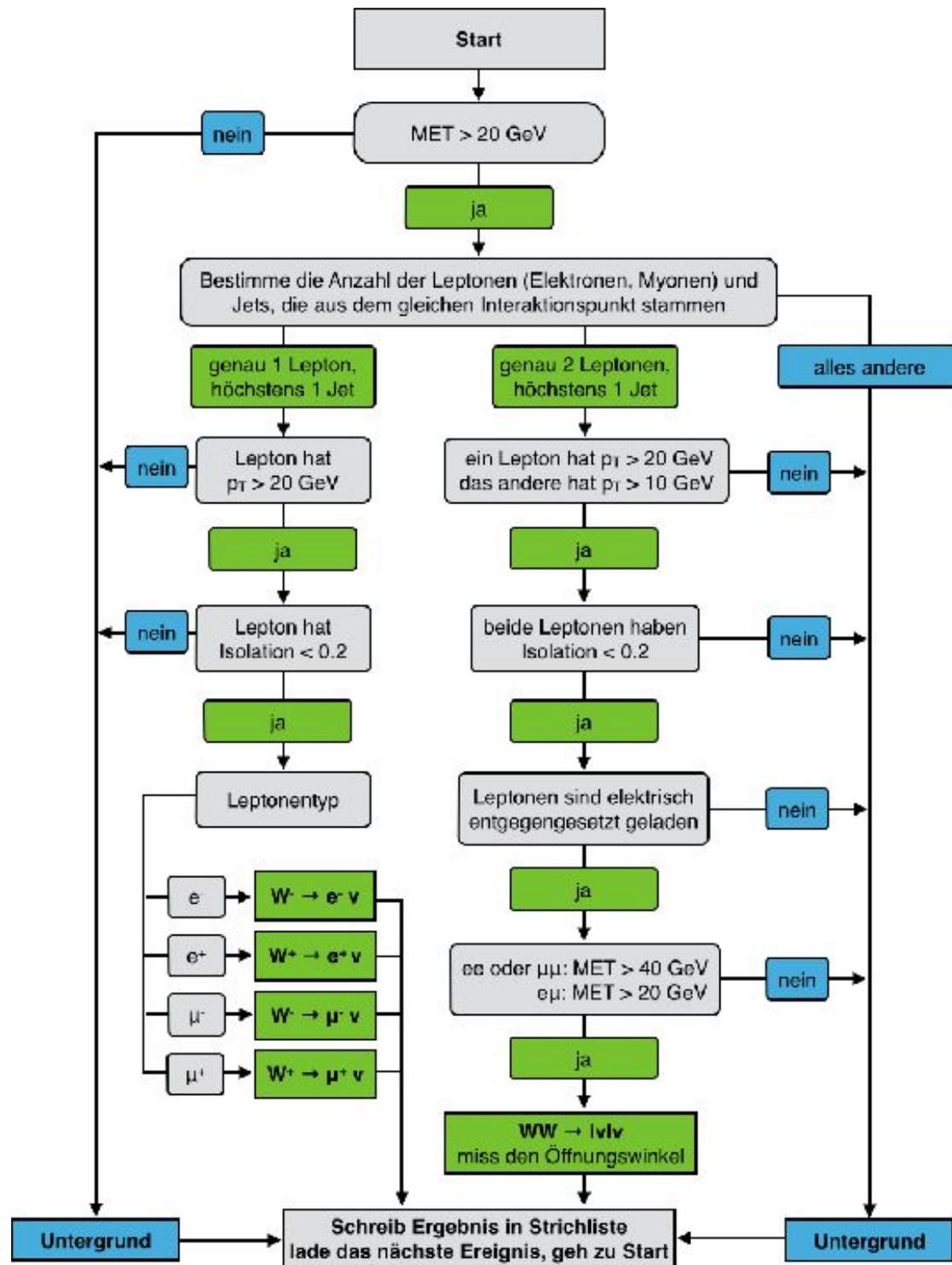
Room Name:
TEILCHENWELT

**Das Vakuum im LHC ist
so rein wie auf der
Mondoberfläche**

**Die Magnete werden auf 1.9
Kelvin abgekühlt. Das ist kälter
als in den abgelegensten Orten
des Universums**

**Im Magnetsystem des CMS
Detektors ist mehr Eisen
verbaut als im Eiffelturm**

**Der LHC könnte mit einem
Gramm Wasserstoff über eine
Millionen Jahre betrieben werden**



Aktiv werden!

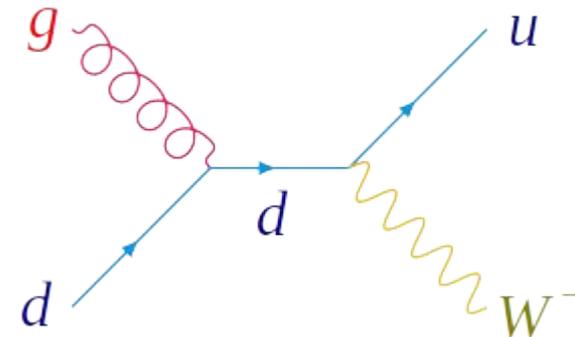
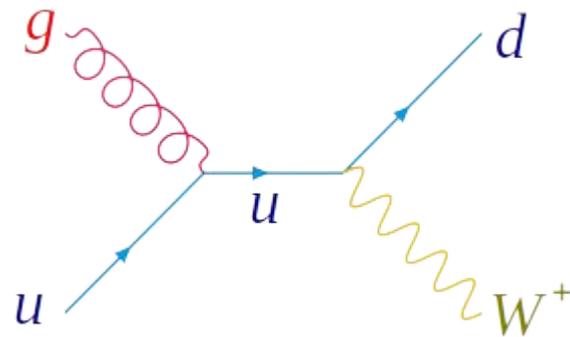
- ▶ Jedes Team erhält ein Datenpaket (Buchstabe A-T) mit Ereignisbildern aus 50 Kollisionen.
- ▶ Jedes Team durchsucht sein Datenpaket nach Signalereignissen für W- und WW-Zerfälle
- ▶ Strichliste nicht vergessen!

Auswertung



Das W^+ / W^- -Verhältnis

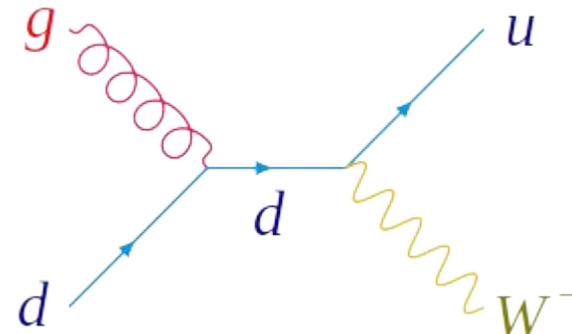
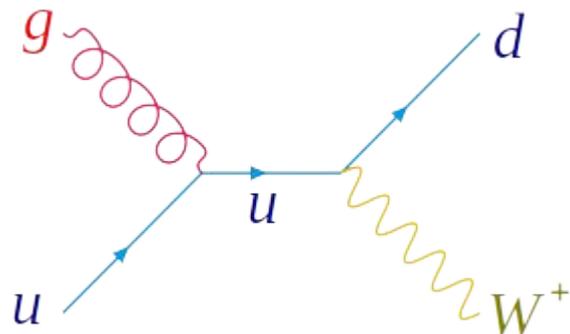
- ▶ W^+ und W^- Bosonen entstehen bei Quark-Gluon-Wechselwirkungen



- ▶ Erwartetes Verhältnis $W^+ / W^- = 2 : 1$

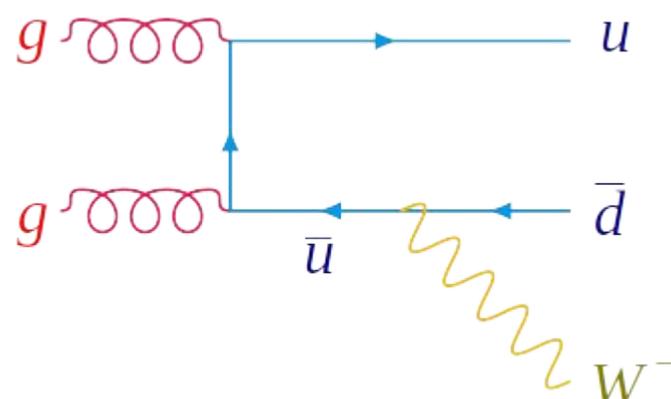
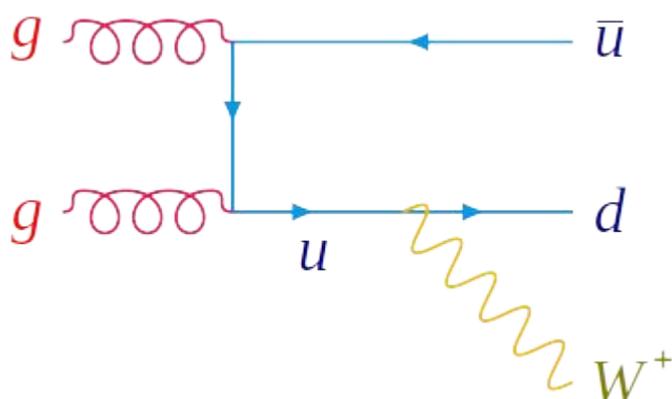
Das W^+ / W^- -Verhältnis

- ▶ W^+ und W^- Bosonen entstehen bei Quark-Gluon-Wechselwirkungen



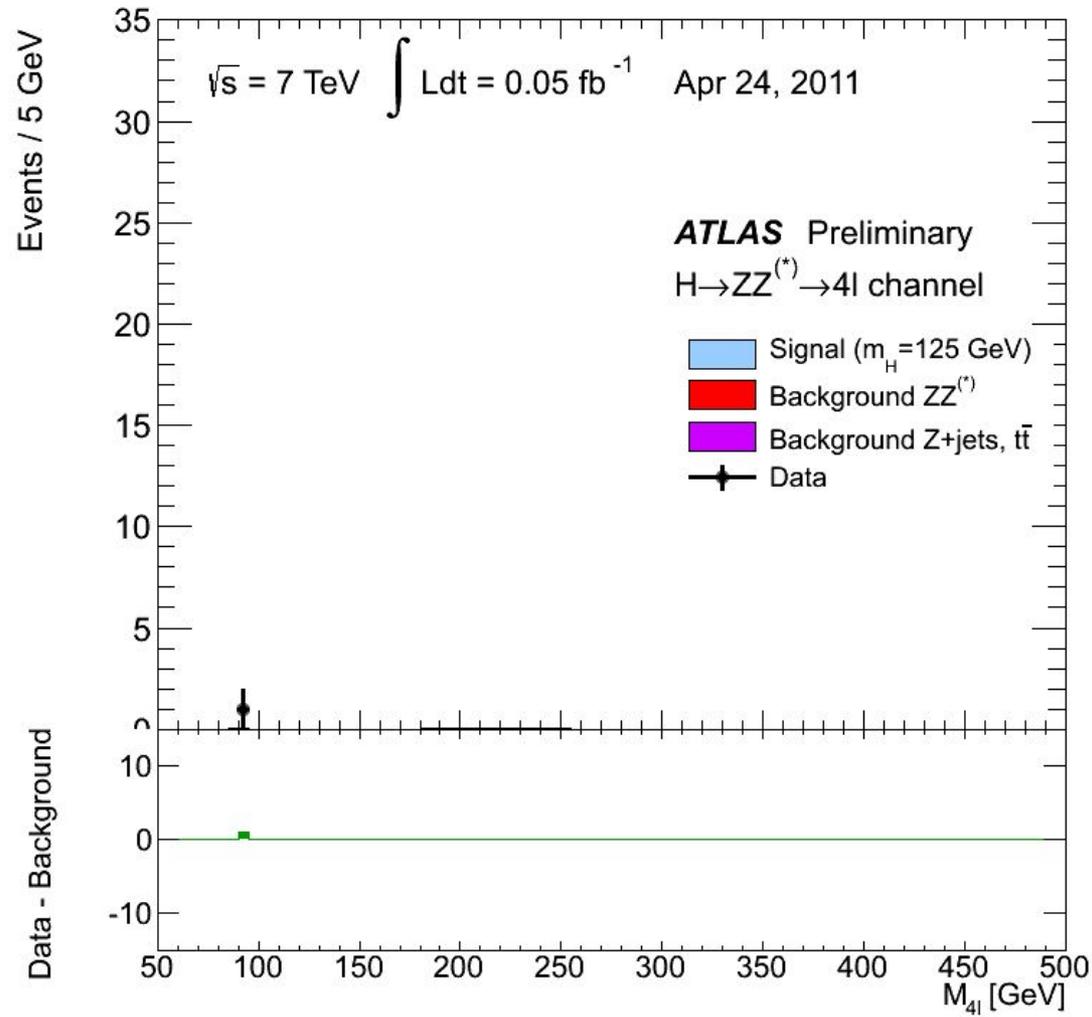
- ▶ Erwartetes Verhältnis $W^+ / W^- = 2 : 1$

- ▶ Doch W Bosonen entstehen auch bei Quark Wechselwirkungen

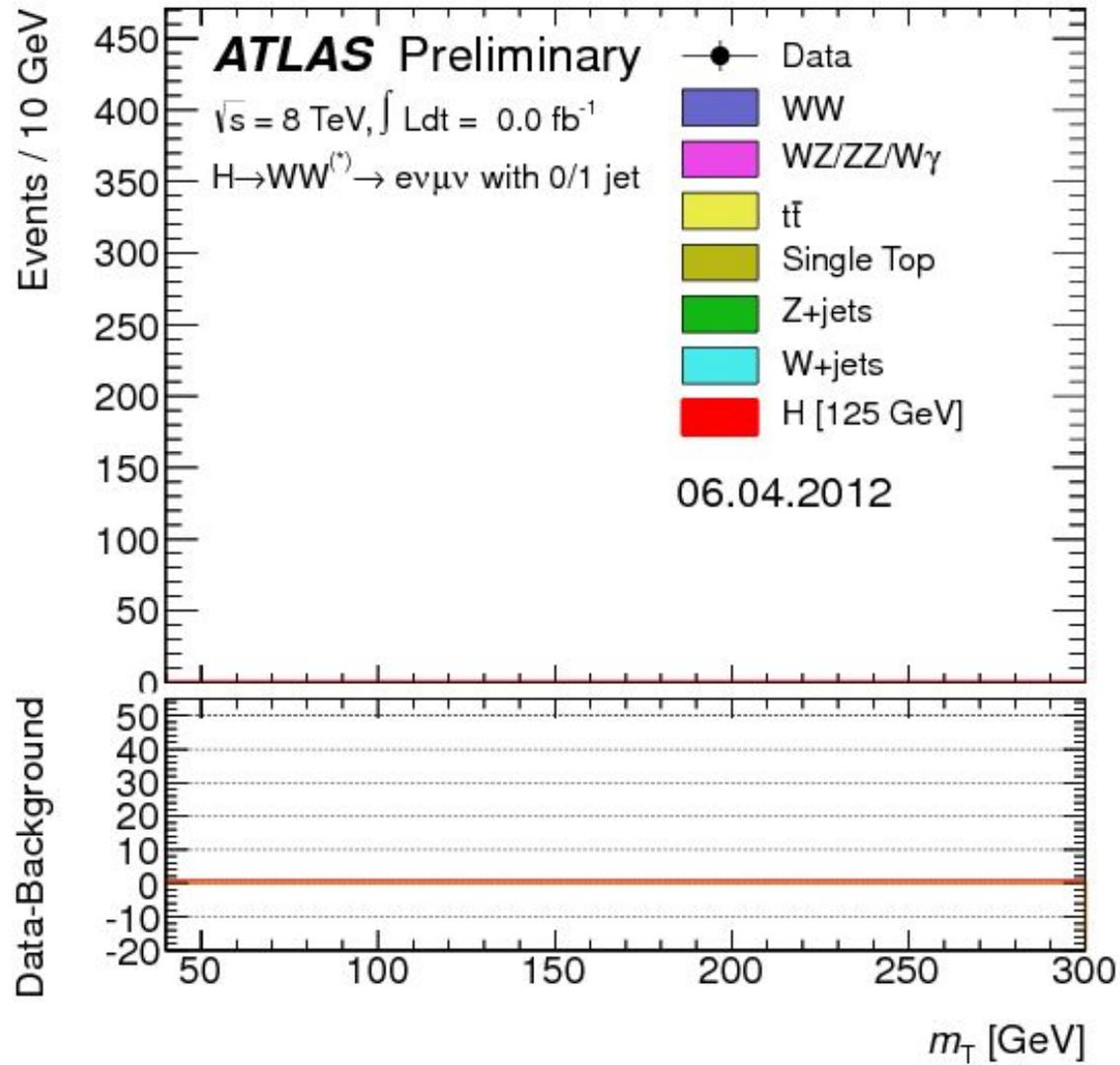


- ▶ W^+ und W^- entstehen dabei gleich häufig, was das Verhältnis verzerrt

Higgs Suche bei ATLAS

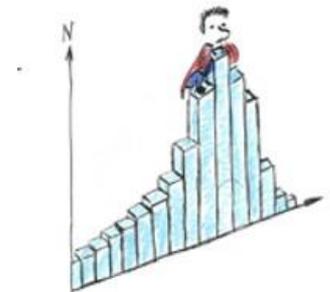


Higgs Suche bei ATLAS



Datenanalyse am CERN

- ▶ Auswahl „interessanter“ Kollisionen (Trigger)
- ▶ Zusammenfassung von benötigten Messgrößen (z.B. Winkel zwischen zwei Teilchen, Masse eines zerfallenen Teilchens...)
- ▶ ...oft in Histogramm (wie oft tritt ein bestimmter Wert auf?)
- ▶ Abschätzung von Messunsicherheiten
- ▶ Vergleich mit theoretischen Vorhersagen und Simulationen
- ▶ ... das haben wir heute auch gemacht!

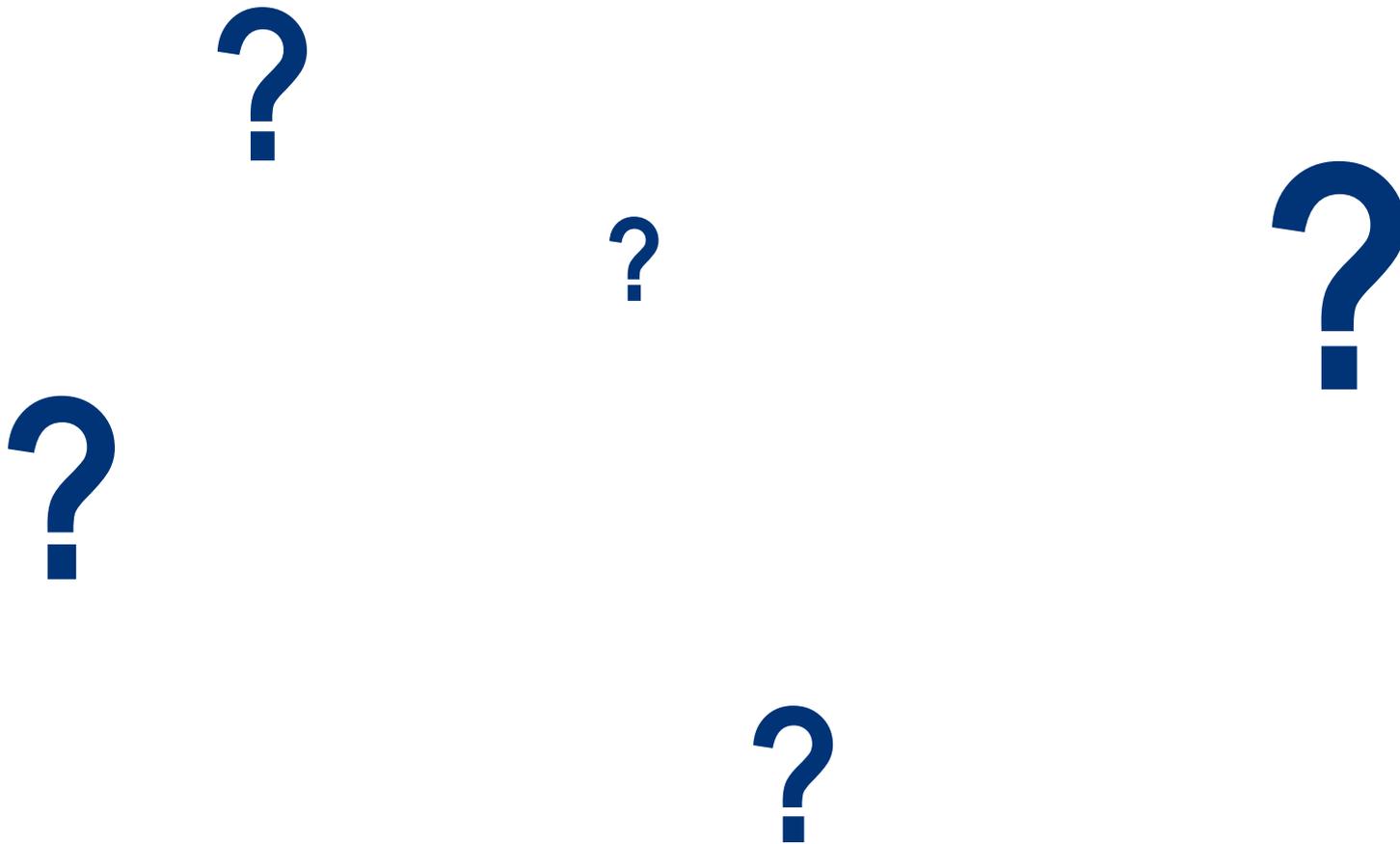




Gibt es Fragen soweit?



Room Name:
TEILCHENWELT



Externe Bildnachweise

- CERN: 2, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 36, 38
- Wikipedia (Jens Maus): 5
- Wikipedia (Coolcaeser): 5
- FOX: 6,7
- The Nobel Prize in Physics 2008 © The Royal Swedish Academy of Sciences: 12
- Netzwerk Teilchenwelt: 13 - 60
- ATLAS: 35-51, 59, 63, 64
- <http://natronics.github.io/science-hack-day-2014/lhc-map/>: 37
- The Particle Zoo, www.particlezoo.net: 54
- International Particle Physics Outreach Group, www.physicsmasterclasses.org: 65