

Forschungsmethoden in der Teilchenphysik



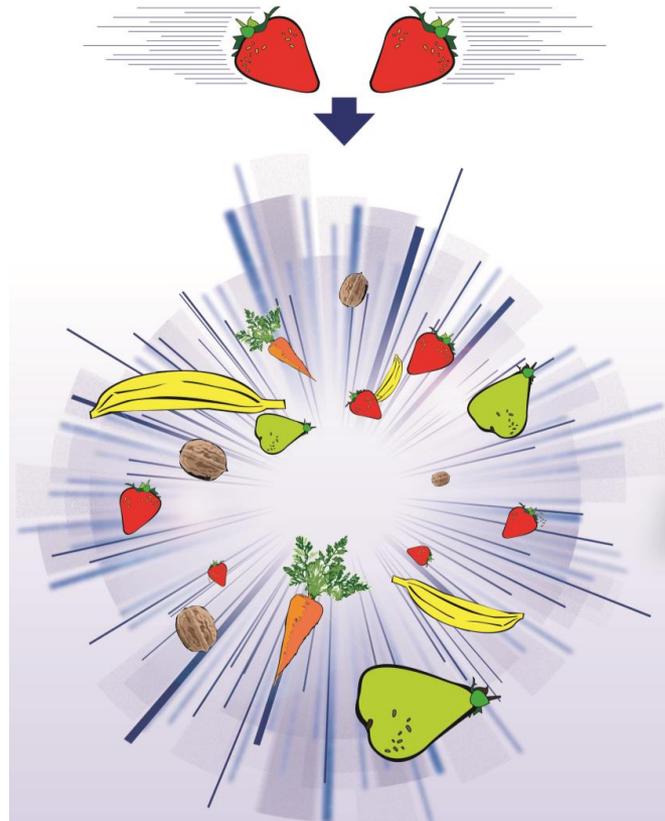
DR. HANS RIEGEL-STIFTUNG

Michael Kobel, Philipp Lindenau, Claudia Behnke
Ratingen | 04. – 05.09.2017

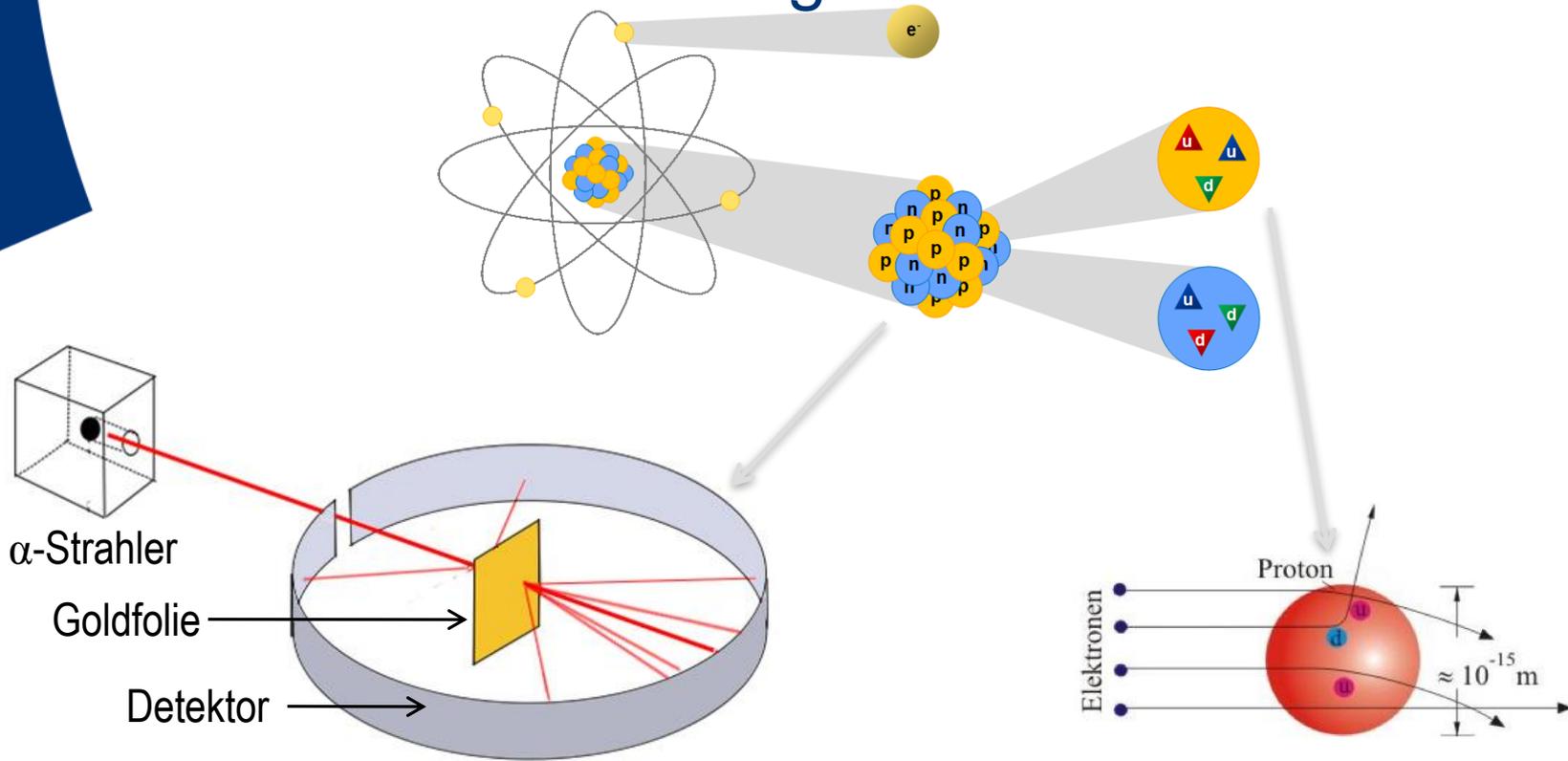


NETZWERK
TEILCHENWELT

Forschungsmethoden in der Teilchenphysik



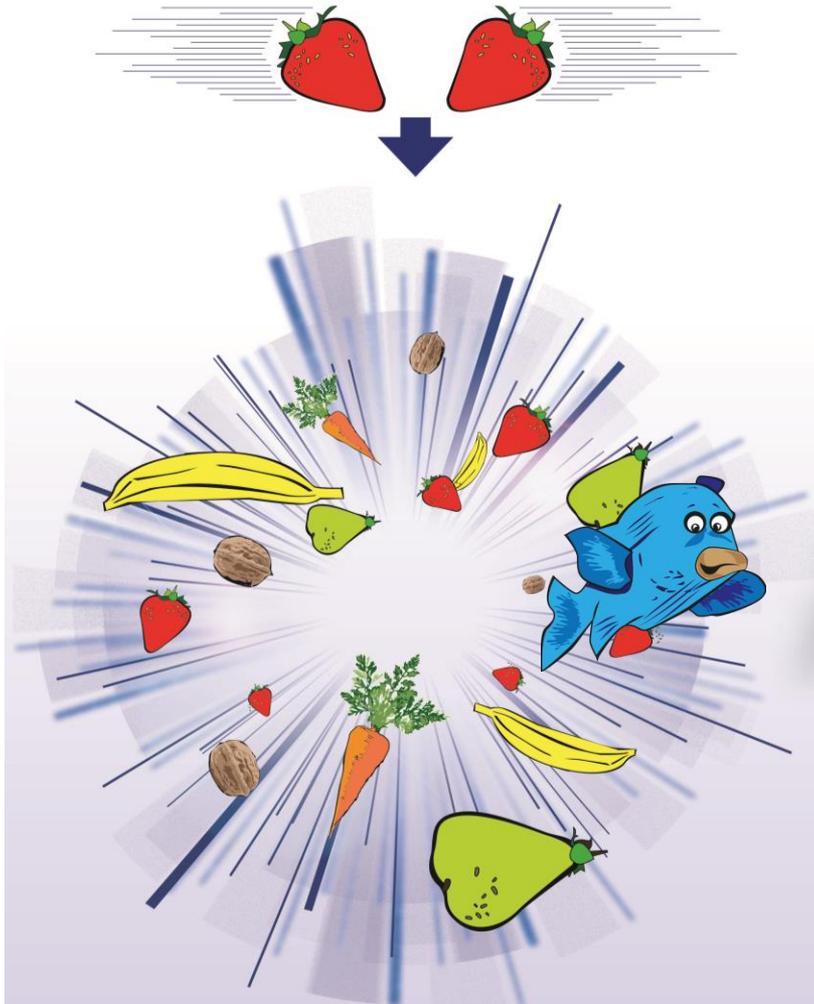
Wozu Teilchenbeschleuniger? Strukturuntersuchungen



Rutherford-Streuexperiment (1911)
Streuung von α -Teilchen an Goldatomen -
→ Atomkern

Experiment am SLAC (1969)
Streuung von Elektronen an Protonen
→ Quarks

Wozu Teilchenbeschleuniger? Strukturuntersuchungen



- ▶ Bei Teilchenkollisionen wandelt sich ein Teil der Bewegungsenergie in Masse um
- ▶ So werden völlig neue Teilchen erzeugt
- ▶ Diese waren vorher keine Bestandteile der kollidierenden Teilchen!

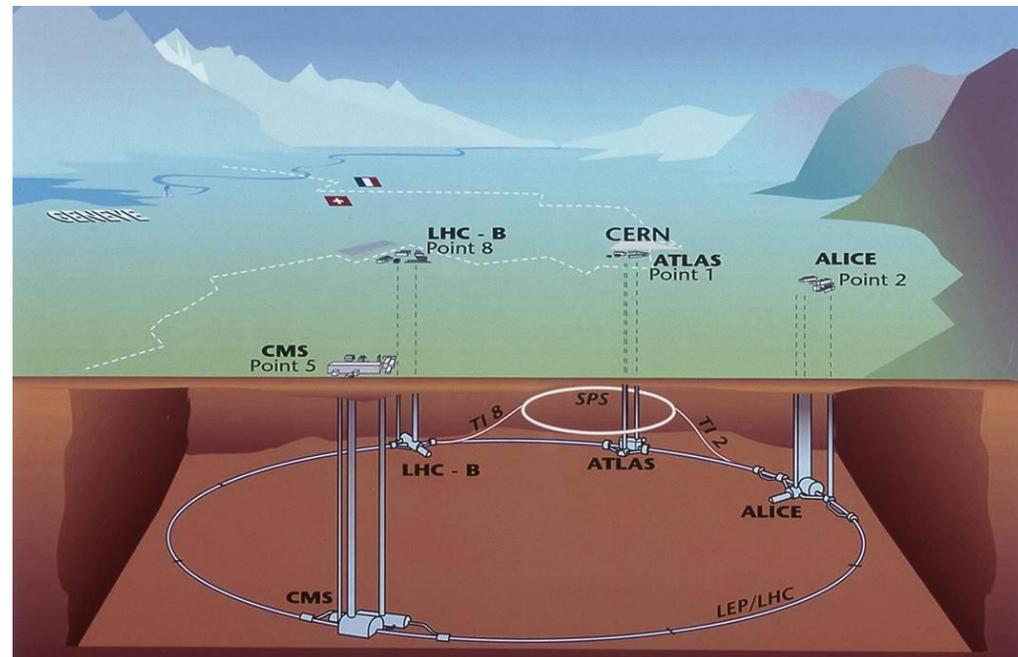
Das CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire)

- ▶ Das größte Teilchenphysik-Forschungszentrum der Welt im Grenzgebiet zwischen der Schweiz und Frankreich
- ▶ Gegründet 1954
- ▶ Vor Ort
 - 12.500 Wissenschaftler
 - Aus 110 Ländern
- ▶ Viele mehr in Kollaborationen wie z.B. Atlas
- ▶ CERN's Jahresbudget 2016 = 1.1 Milliarde €
 - Entspricht 1 Cappuccino pro EU Bürger
 - 1% des US Militärbudgets



Der LHC (Large Hadron Collider)

- ▶ 27 km Umfang
- ▶ Bis zu 175 tief in der Erde
- ▶ Große Experimente:
 - ATLAS
 - CMS
 - ALICE
 - LHCb



Man kann den LHC
in google street view besuchen

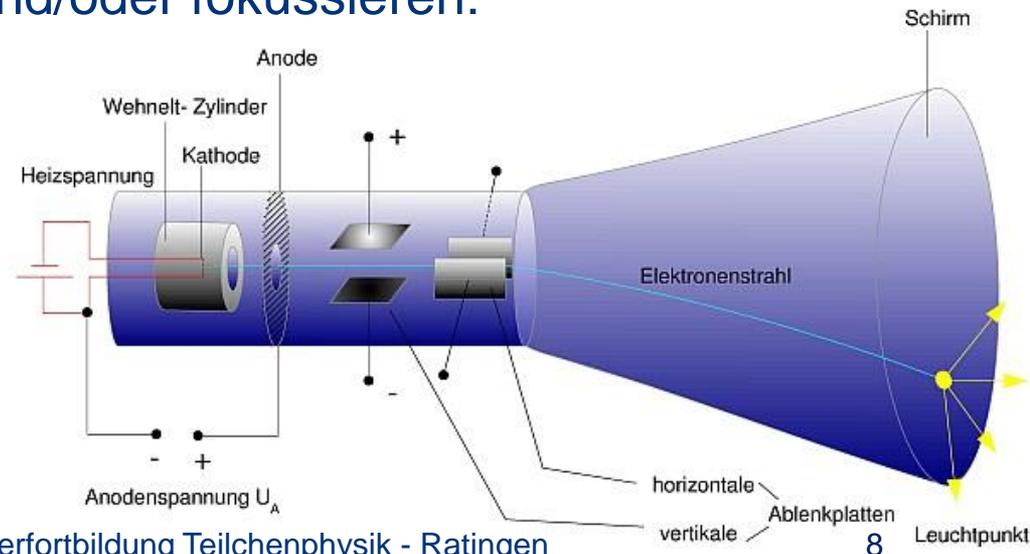
LHC Fun Facts

- ▶ Der LHC ist kälter als das Universum
 - Temperatur Dipolmagnete: 1.9 K
 - Kosmische Hintergrundstrahlung: 2.7 K
- ▶ Das Vakuum im LHC ist ähnlich dem im Weltall
 - Vakuum LHC: 1.013×10^{-10} mbar
 - Benötigte Pumpzeit: 2 Wochen
- ▶ Temperaturen höher als in der Sonne
 - Temperatur in einer Schwerionenkollision: 5.5×10^{12} K
 - Temperatur Sonne: 5778 K

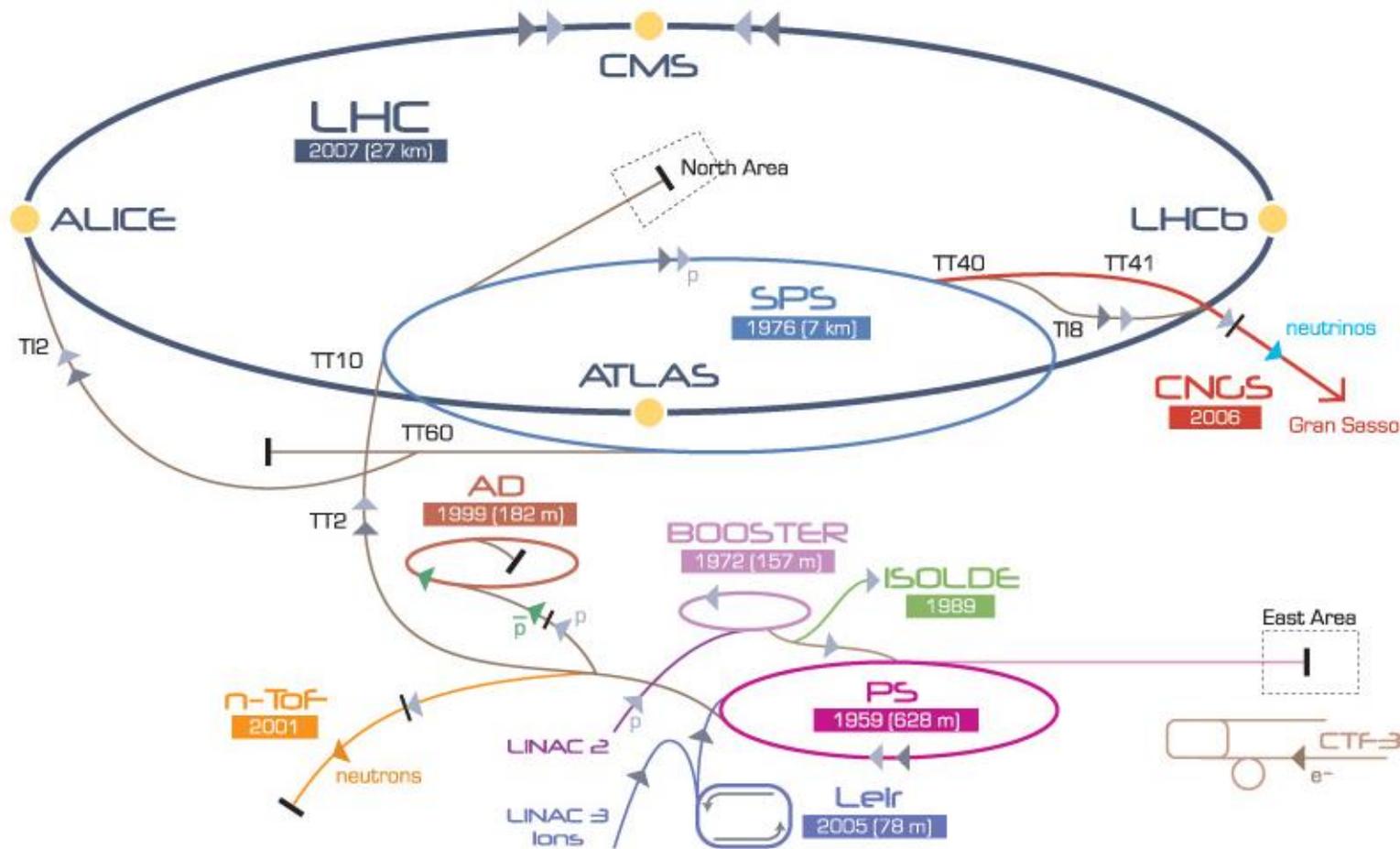
Wie funktioniert ein Teilchenbeschleuniger?

► Der einfachste Beschleuniger: Ein alter Fernseher (Braun'sche Röhre)

- Elektronen erzeugen: Glühkathode
- Elektronen beschleunigen: elektrisches Feld (Hochspannung)
- Elektronen ablenken und/oder fokussieren: elektrisches oder magnetisches Feld



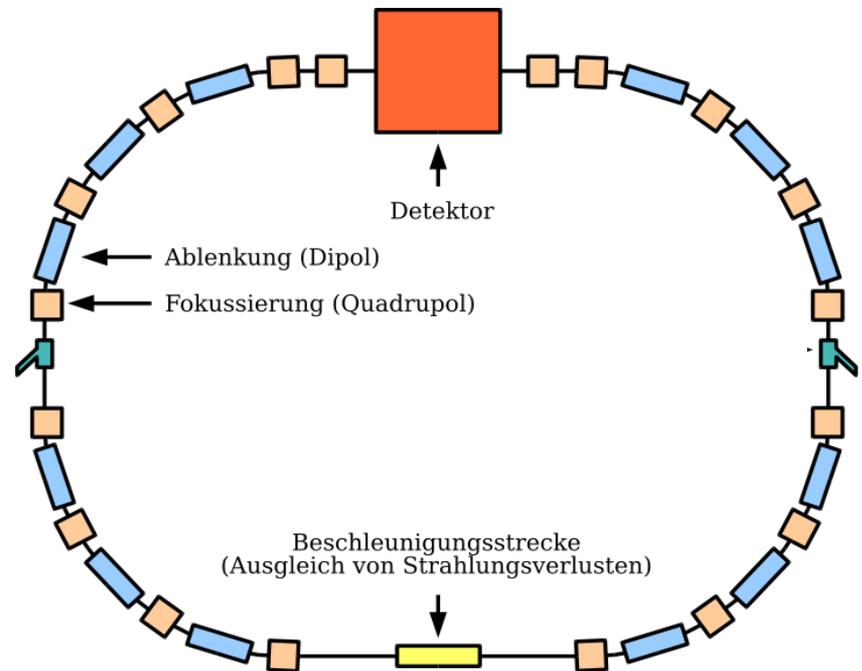
Die Beschleuniger am CERN



Wie funktioniert der LHC

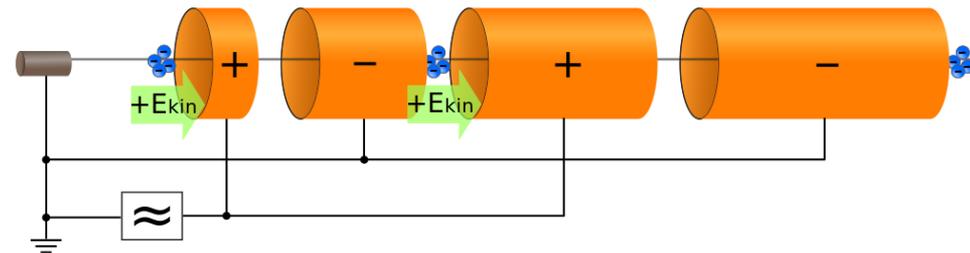
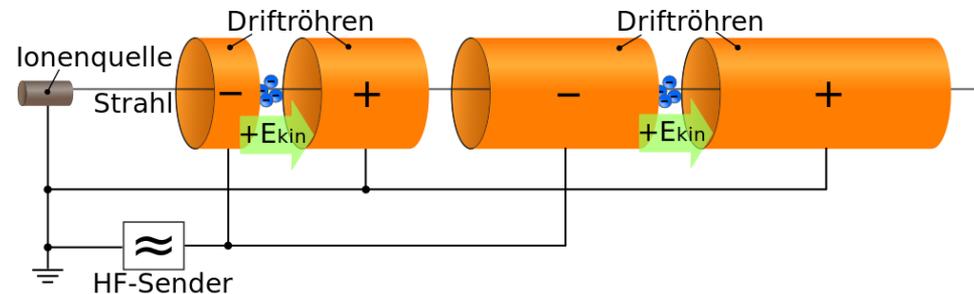
► Im LHC durlaufen Teilchenpakete (Bunches) von Protonen eine kreisförmige Bahn, auf der sie:

- Beschleunigt werden (elektrisches Wechselfeld)
- Abgelenkt werden (Dipol magnete)
- Fokussiert werden (Quadrupol Magnete)

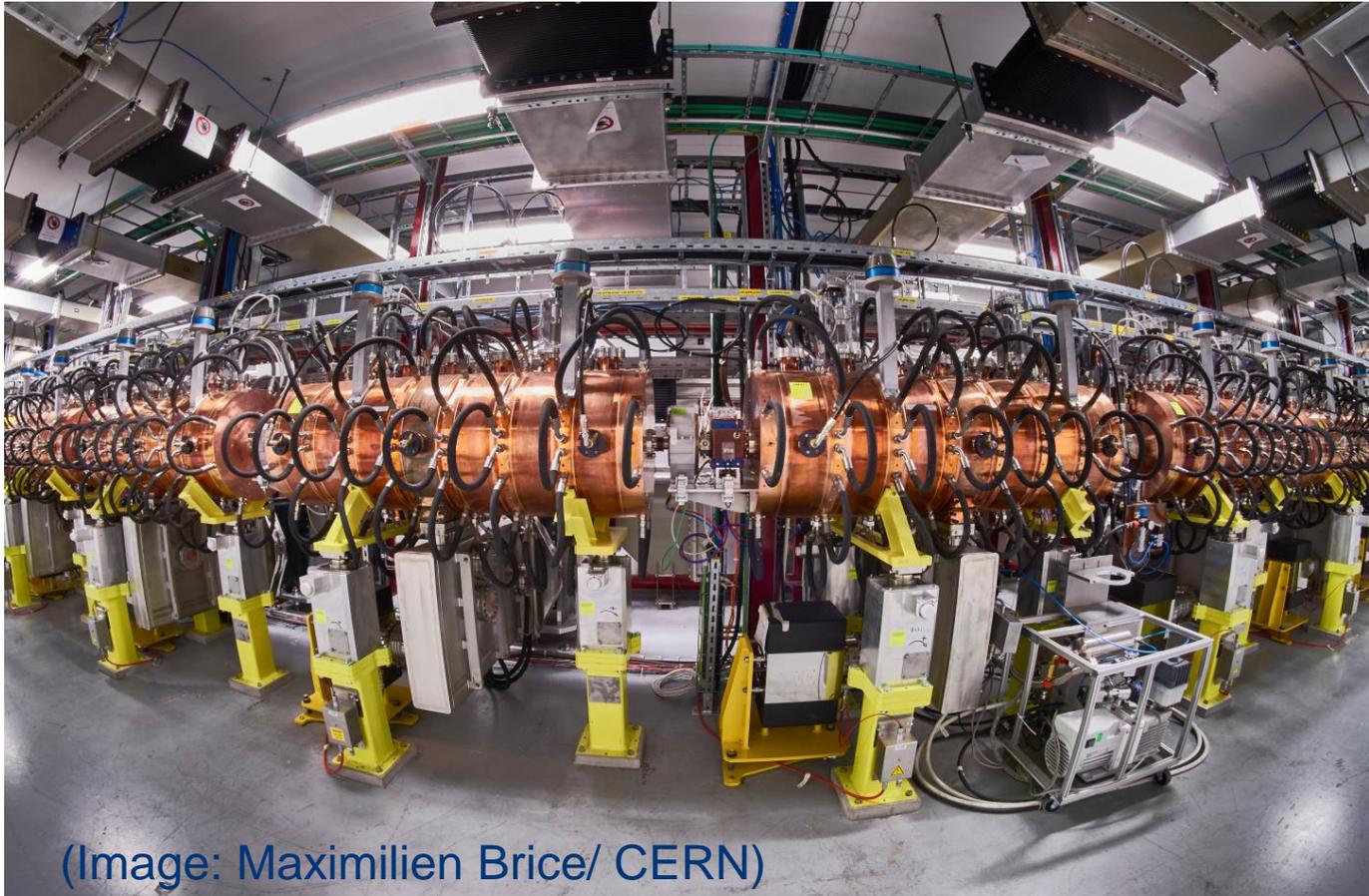


Beschleunigung durch elektrische Felder

- ▶ 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



Der LINAC 4 am CERN



(Image: Maximilien Brice/ CERN)

Was geschieht im LHC?

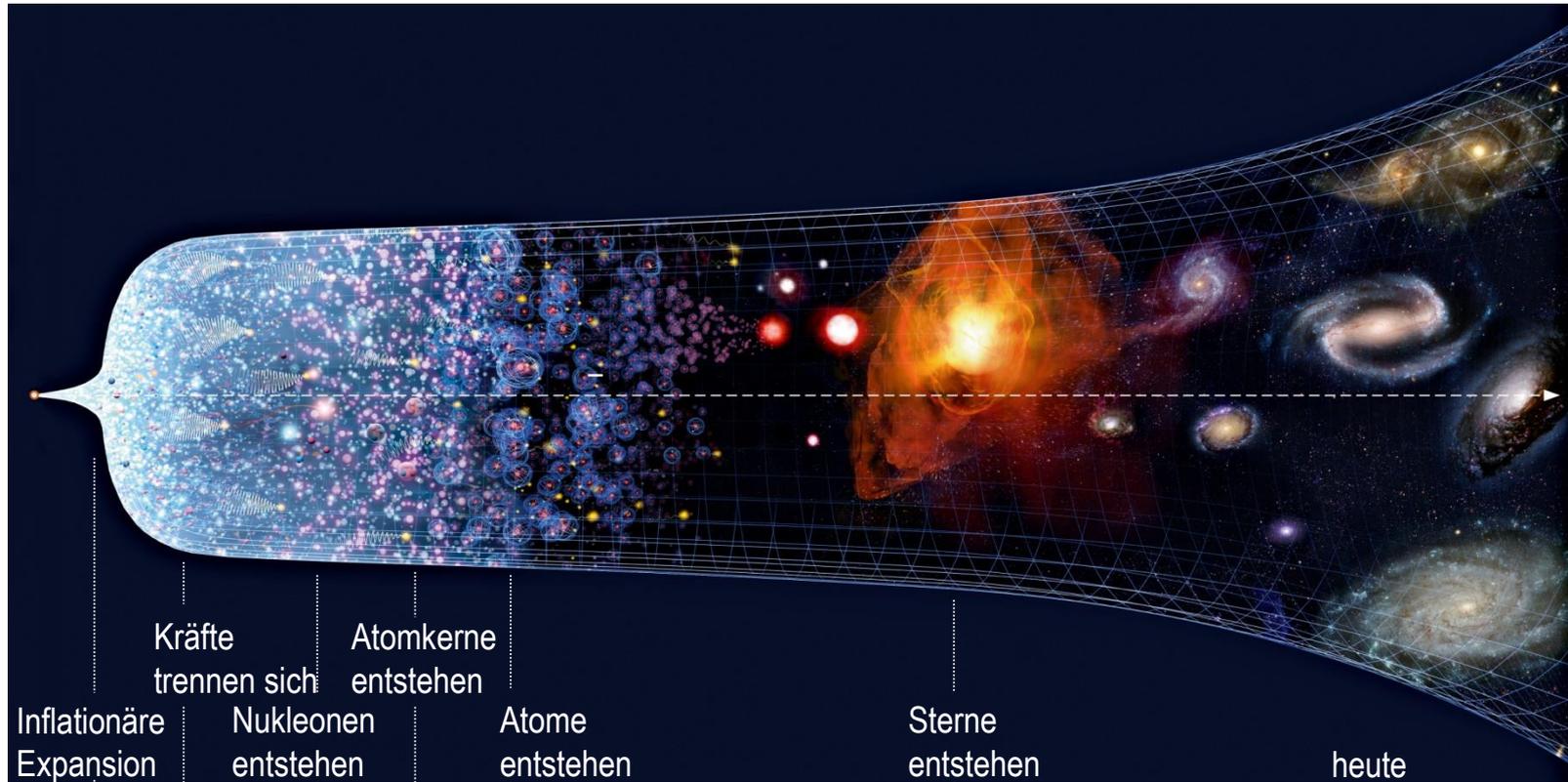
- ▶ Protonen kreisen in entgegengesetzten Richtungen mit einer Energie von je ~ 7 TeV.
- ▶ Wenn die Protonen zusammenstoßen, entstehen neue Teilchen, die man in Detektoren nachweist.





Die Geschichte des Universums

Urknall



Zeit



Energie



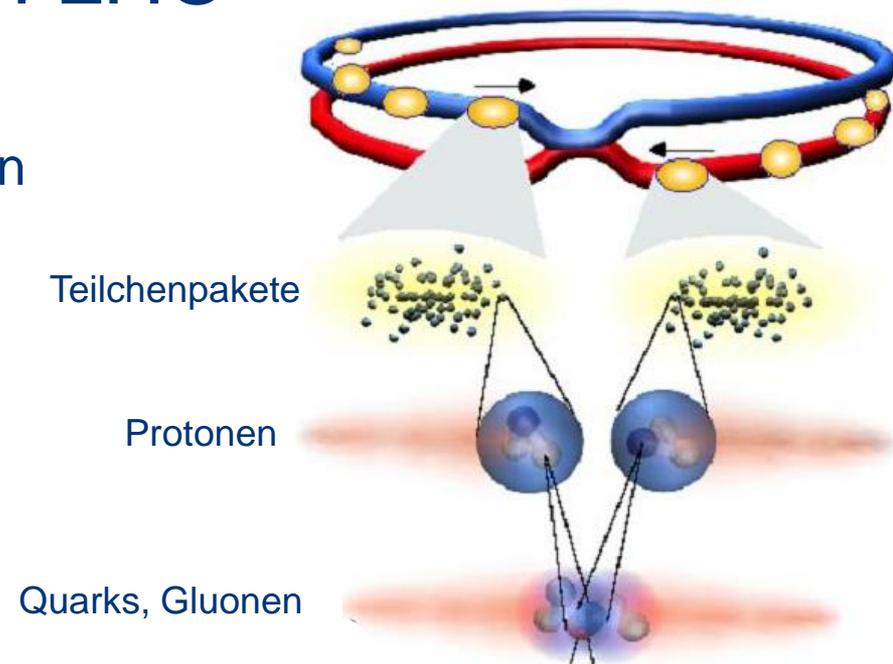
LHC-Energie

Teilchenkollisionen im LHC

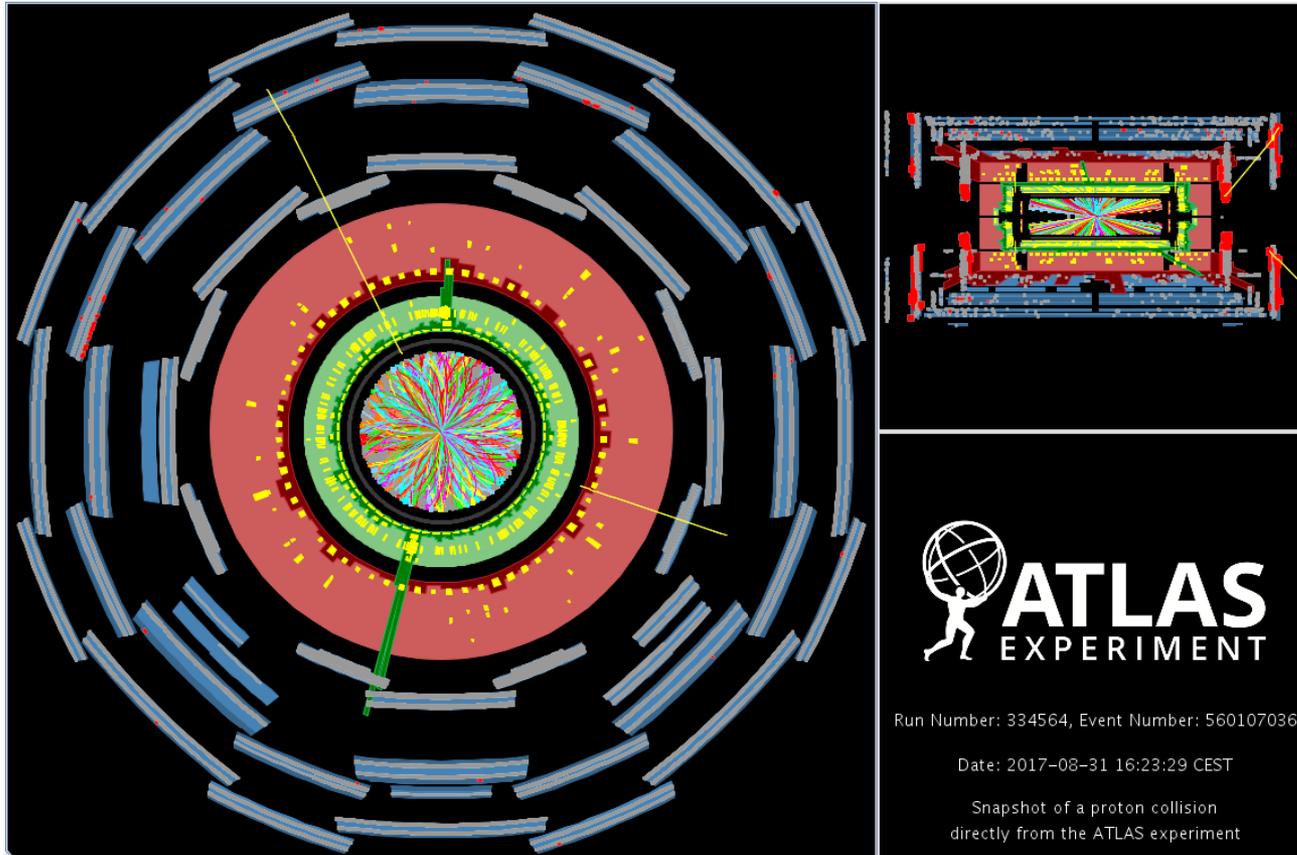
- ▶ 2 gegenläufige Protonenstrahlen
- ▶ ...mit je 1400 Teilchenpaketen

- ▶ 100 Milliarden Protonen pro Paket
- ▶ 20 Millionen Paket-Kreuzungen pro Sekunde...
- ▶ ...mit je etwa 30 Kollisionen

→ ca. 600 Millionen Kollisionen pro Sekunde!

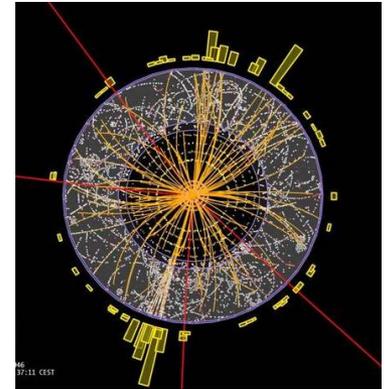


Teilchenkollisionen im LHC



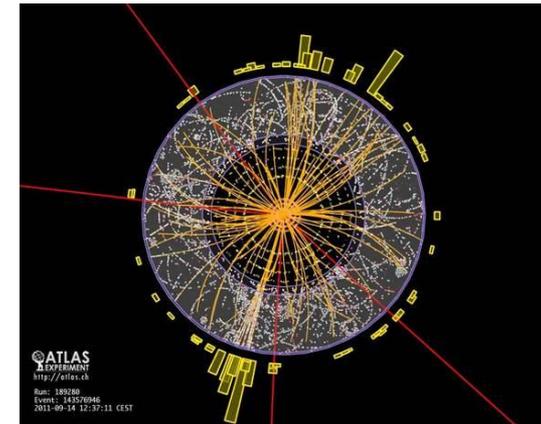
Teilchenkollisionen im LHC

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



Wohin mit so vielen Daten?

- ▶ 20 Mio. Protonenpaket-Kreuzungen pro Sekunde
 - Detektoren weisen die entstandenen Teilchen nach
 - einige MB pro Ereignis
- ▶ ...das wären mehrere Terabyte pro Sekunde!
 - Datenreduktion notwendig
 - "Trigger": automatische Auswahl interessanter Messdaten
 - etwa 1000 Ereignisse pro Sekunde bleiben übrig
- ▶ Verteilung der Daten auf ca. 200 000 Rechner in 34 Ländern (LHC-Grid)
- ▶ ...etwa 15 Petabyte/Jahr!



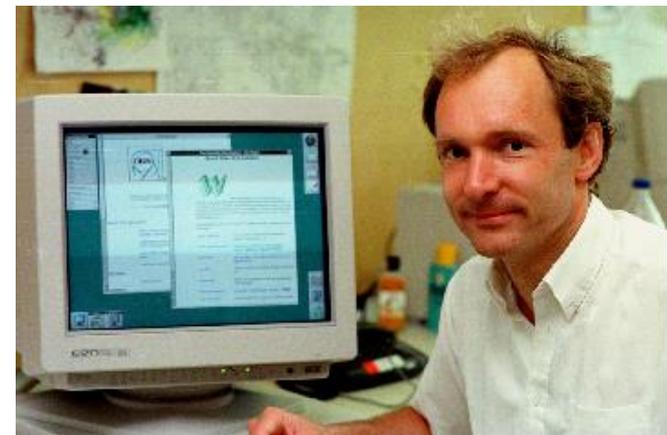
Wohin mit so vielen Daten?



Server Farm im 1450 m² großen Hauptraum des Data Centers

Das World Wide Web

- ▶ Erfunden 1989 am CERN von Tim Berners-Lee
- ▶ Methode, um schnell und einfach wissenschaftliche Daten auszutauschen
- ▶ Erster Webserver lief am CERN

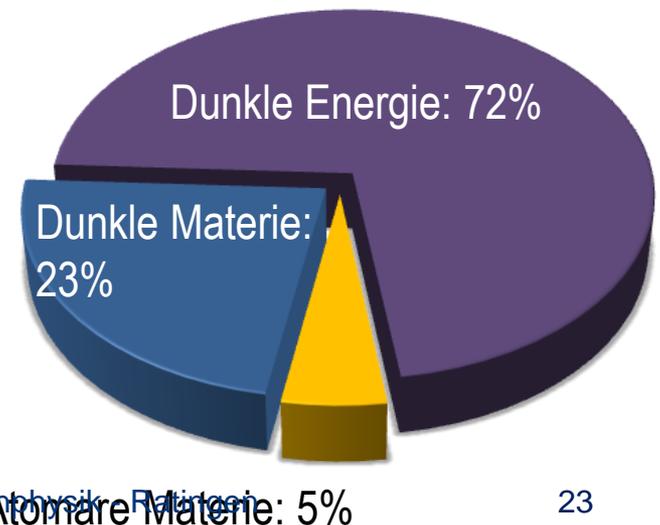


Was noch?



Was ist Dunkle Materie?

- ▶ Beobachtungen zeigen, dass es nicht nur atomare Materie geben kann:
 - Galaxien rotieren zu schnell: Viel mehr Materie wäre nötig!
 - Die Strukturen von Galaxienhaufen sind nur mit viel mehr Materie zu erklären.
 - Es muss eine bisher unbekannte Materieform geben: Dunkle Materie.
- ▶ Das Universum dehnt sich heute schneller aus als früher.
 - Etwas beschleunigt die Ausdehnung des Universums: Dunkle Energie.
- ▶ Der größte Teil des Universums besteht aus Dunkler Materie und Dunkler Energie!
 - Am CERN sucht man nach Teilchen, aus denen Dunkle Materie bestehen könnte.

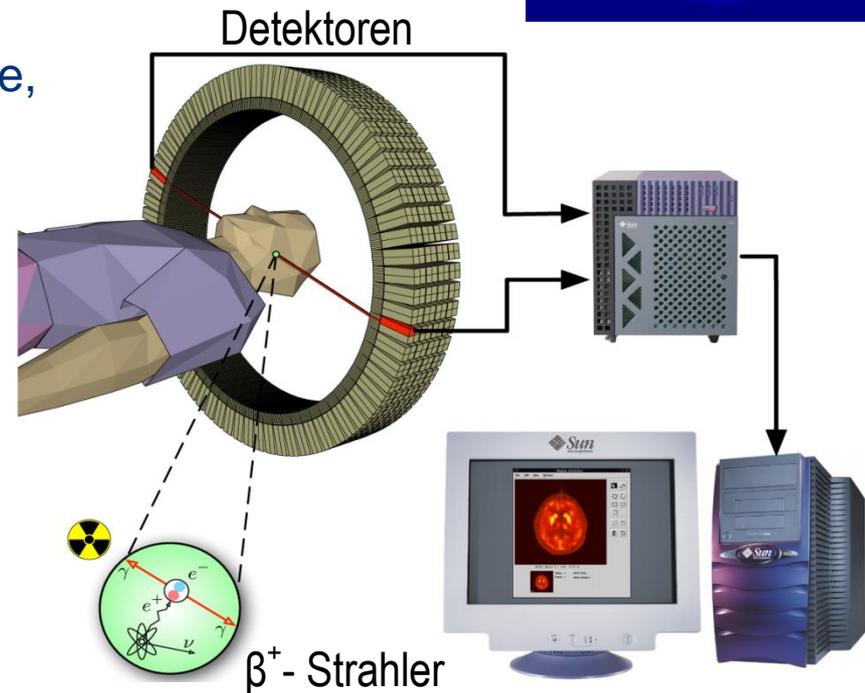
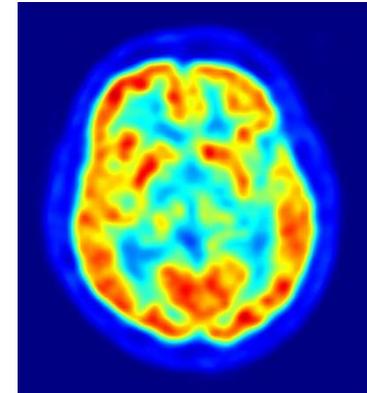




Positronen-Emissions-Tomografie

► Ein bildgebendes Verfahren für die Medizin

- Patienten wird eine spezielle Zuckerlösung gespritzt
- Diese enthält ein Fluor-Isotop, das Positronen abstrahlt (β^+ - Strahler)
- Zucker sammelt sich in Gewebe, das viel Energie benötigt, besonders in Tumorgewebe
- Positronen und Elektronen zerstrahlen in zwei Photonen
- Detektoren registrieren die Photonen
- Eine Software berechnet den Ursprungsort der Photonen und setzt daraus ein Bild zusammen



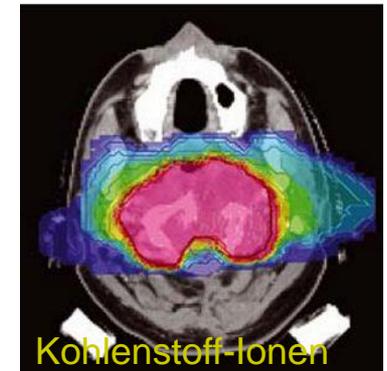
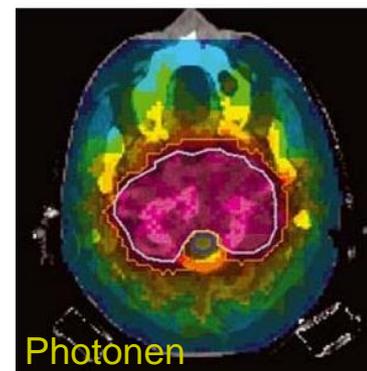
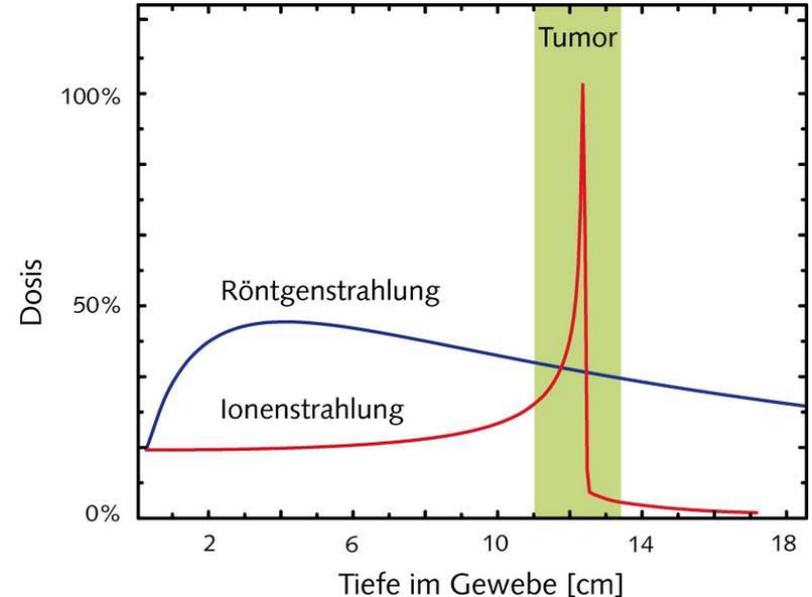
Tumorthherapie mit Hadronen (meist C)

► Vorteil gegenüber Bestrahlung mit Elektronen oder Photonen:

- Eindringtiefe einstellbar, genaue Fokussierung auf den Tumor möglich
- es werden mehr Tumorzellen als gesunde Zellen zerstört
- gut für tiefliegende Tumore geeignet
- geringere Dosis nötig

► Nachteile:

- hohe Kosten
- großer Beschleuniger nötig



„The CERN Weasel“

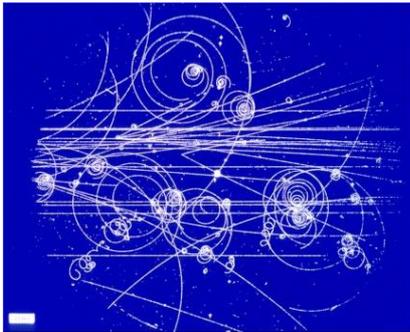
- ▶ Der Marder schaffte es im November 2016 den gesamten LHC auszuschalten, indem er in eine 18.000 V Leitung biss.
- ▶ Jetzt Ausstellungstück im Rotterdam Natural History Museum
- ▶ Das war der 2. Vorfall dieser Art



Wie weist man Elementarteilchen nach?

▶ Bildgebende Detektoren

- Nebelkammer
- Blasenkammer



▶ sichtbare Teilchenspuren

▶ Elektronische Detektoren

- ATLAS-Detektor
- Geigerzähler



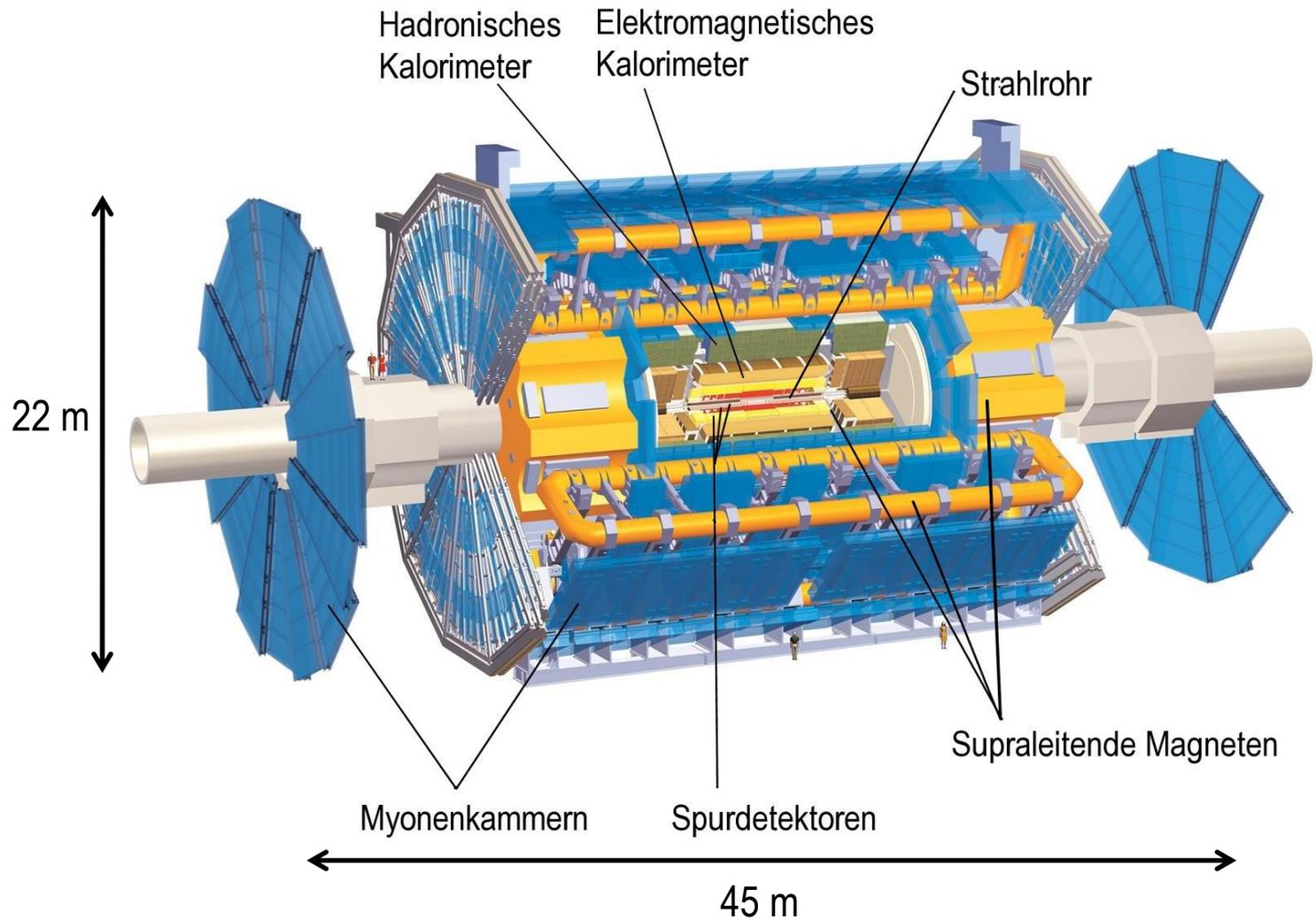
▶ elektrische Signale

- ▶ Eigenschaften der Teilchen werden daraus rekonstruiert

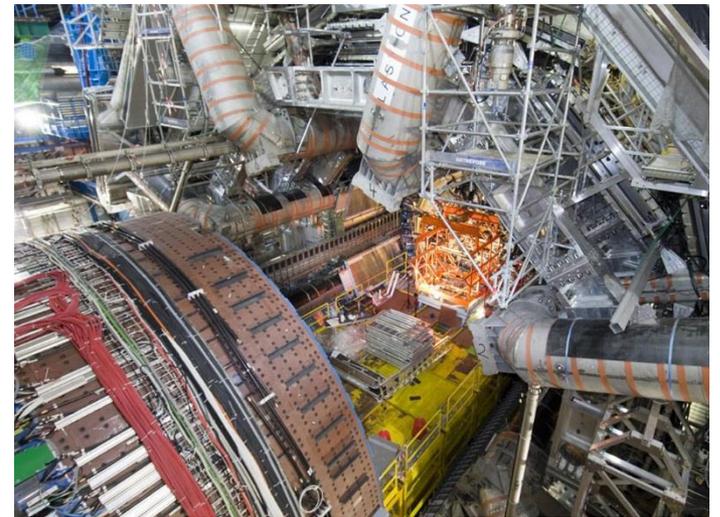
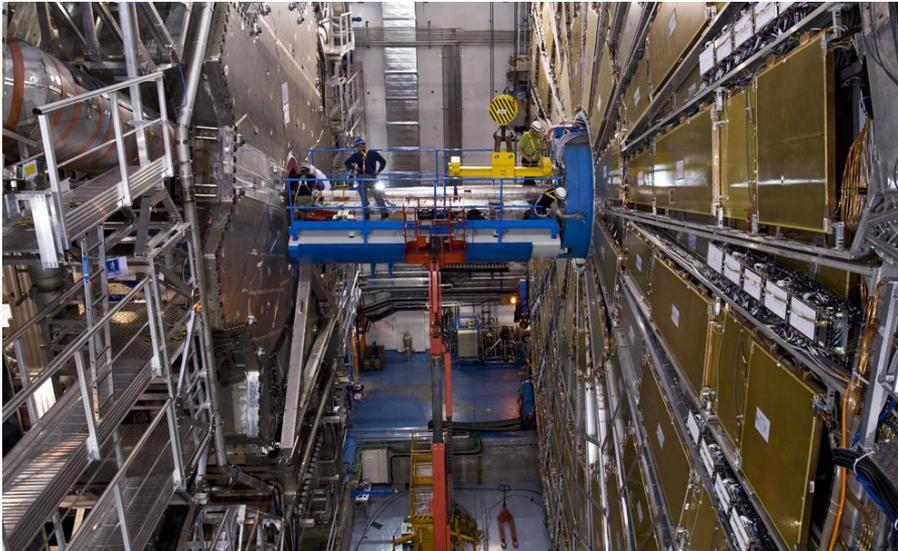
Der ATLAS-Detektor ist das hier nicht!



Der ATLAS-Detektor



Der ATLAS-Detektor

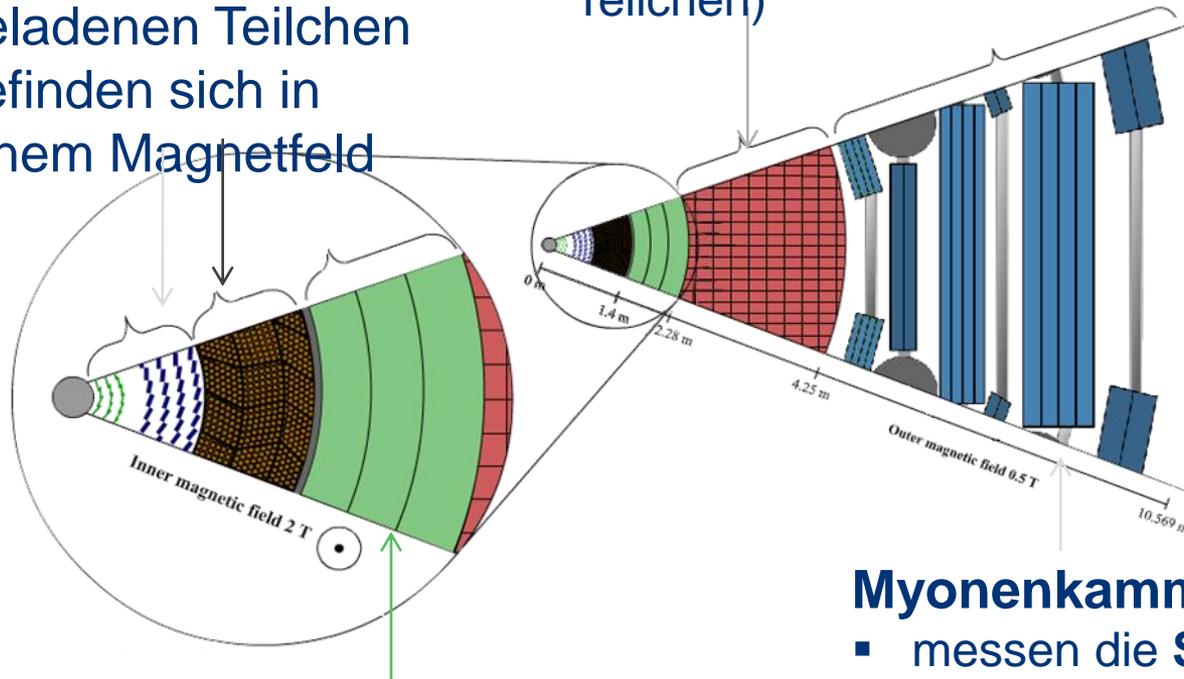


Spurdetektoren

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

Hadronisches Kalorimeter

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



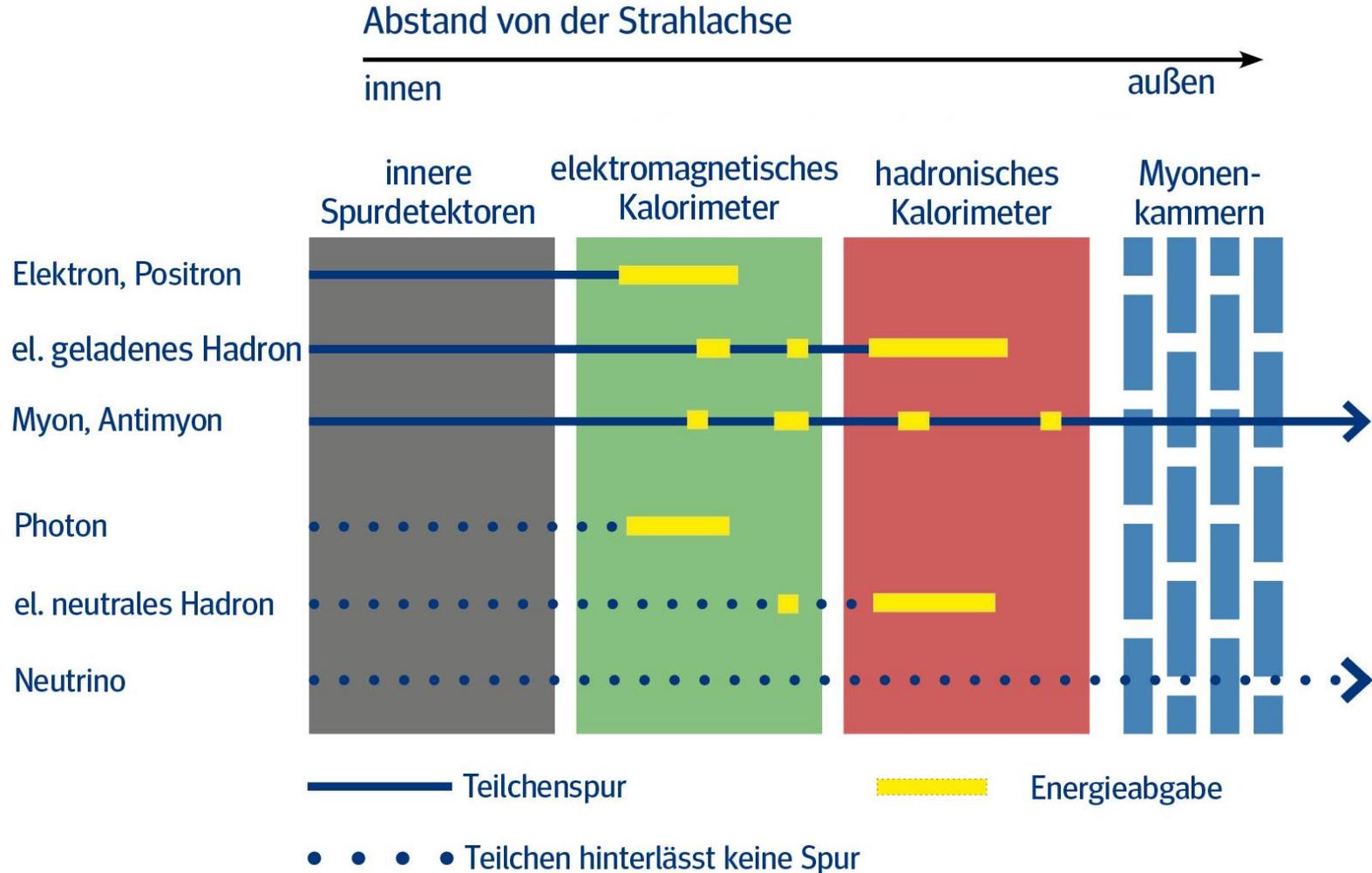
Elektromagnetisches Kalorimeter

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

Myonenkammern

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

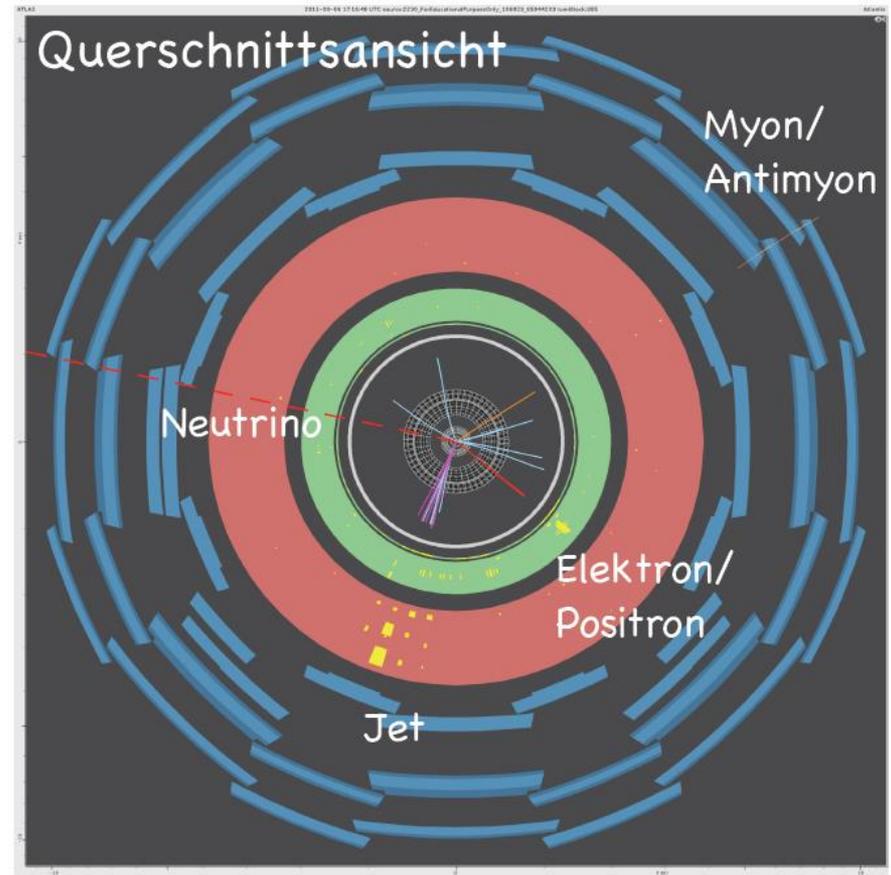
Teilchenspuren im ATLAS-Detektor



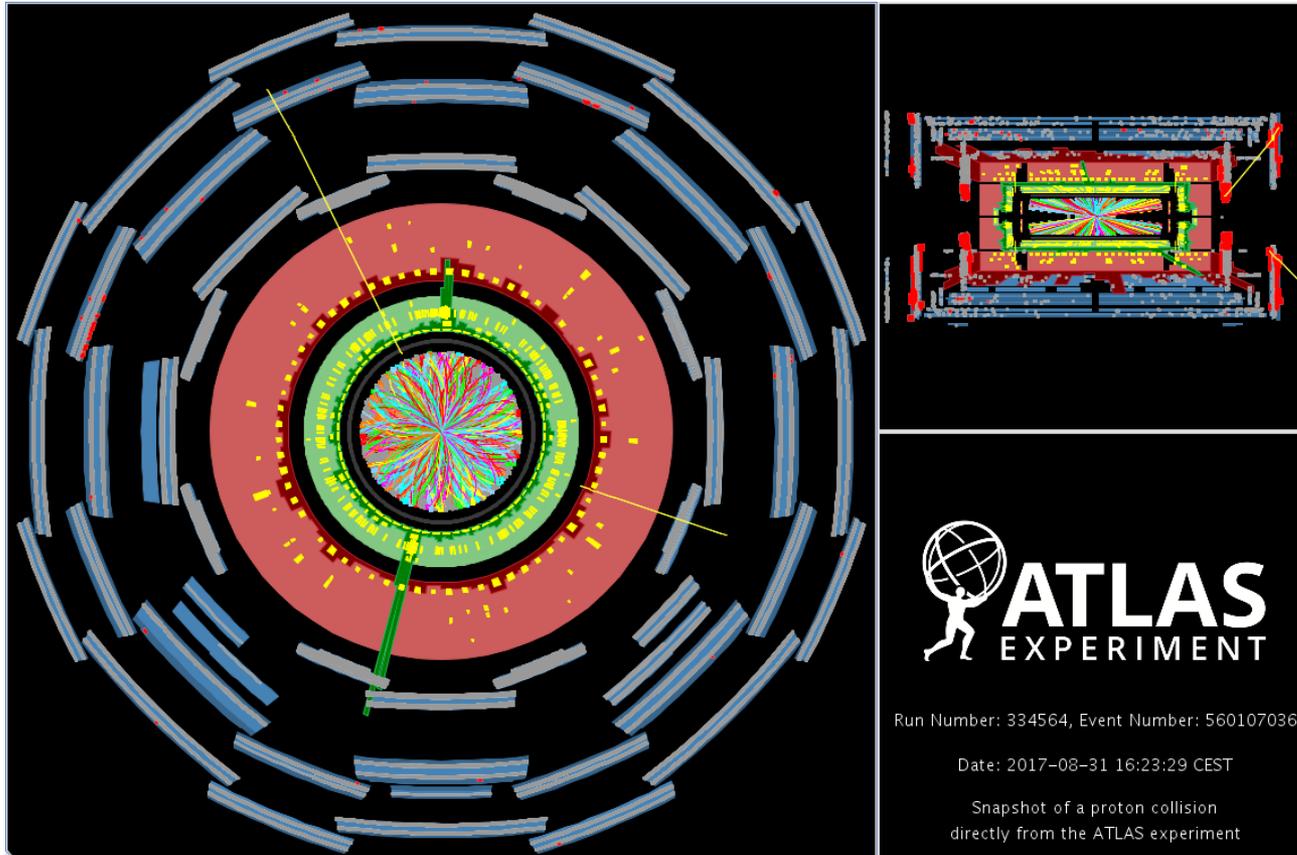
Darstellung von Teilchenspuren

► So stellt eine vom CERN entwickelte Software Teilchenspuren im ATLAS-Detektor dar:

- Spurdetektoren
- elektromagnetisches Kalorimeter
- hadronisches Kalorimeter
- Myonenkammern



Teilchenkollisionen im LHC





Beispiele - Das OPAL-Eventdisplay

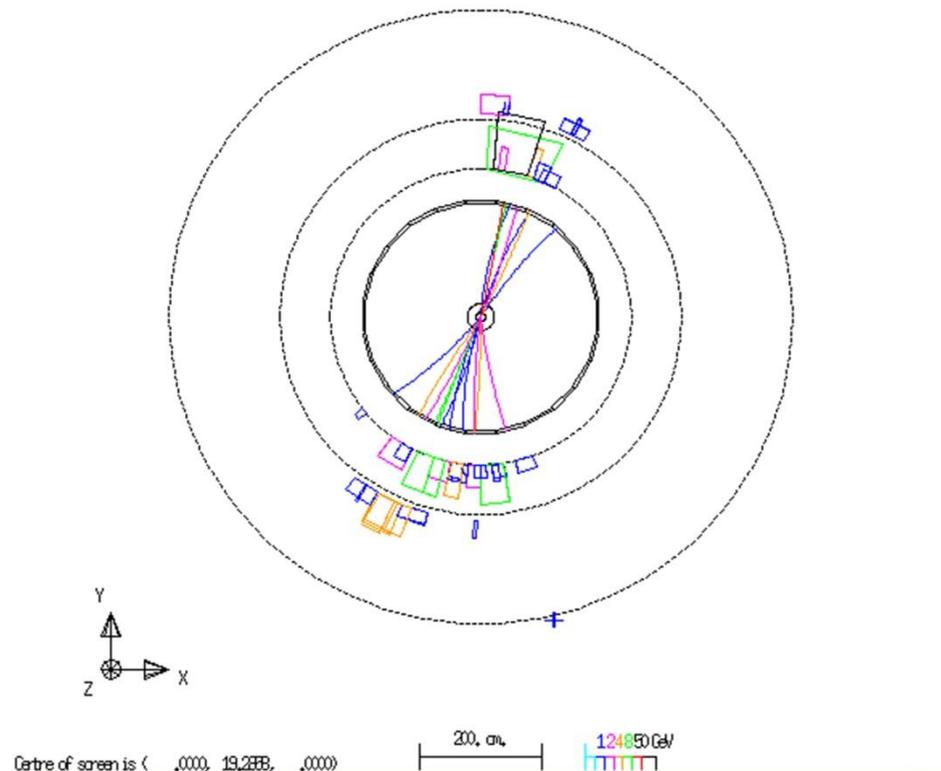
- ▶ Der OPAL-Detektor war ein Detektor bei LEP
- ▶ Teilchenbeschleuniger, der bis 2000 im selben Tunnel wie der LHC betrieben wurde
- ▶ Kollisionen von Elektronen und Positronen bei Energien bis 104 GeV pro Teilchen
- ▶ Erzeugung sehr vieler Z-Teilchen (LEP1) und Paaren von W-Teilchen (LEP2)

LEP oder LHC in der Schule?

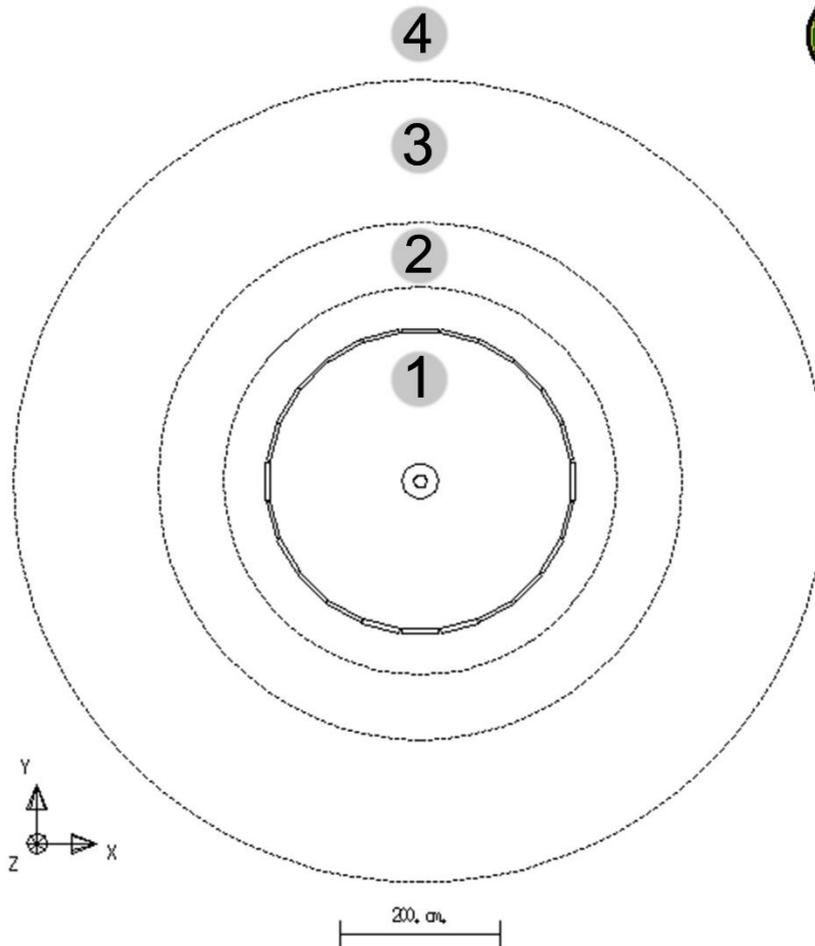
- ▶ LHC zwar aktueller, aber interessante Ereignisse bei LEP einfacher analysierbar
- ▶ Liegt u.a. an der Struktur der Projektile: Elektronen und Positronen sind Elementarteilchen, die Protonen am LHC nicht
- Einfachere Ausgangszustände vereinfachen auch die möglichen Endzustände und deren Beschreibung

Das OPAL-Eventdisplay

Run: event 5293: 20246 Ctrk(N= 26 SumE= 53.4) Ecal(N= 41 SumE= 63.0)
Ebeam 45.800 Vtx (-.04, .04, 1.88) Hcal(N=17 SumE= 10.2) Muon(N= 0)



Das OPAL-Eventdisplay



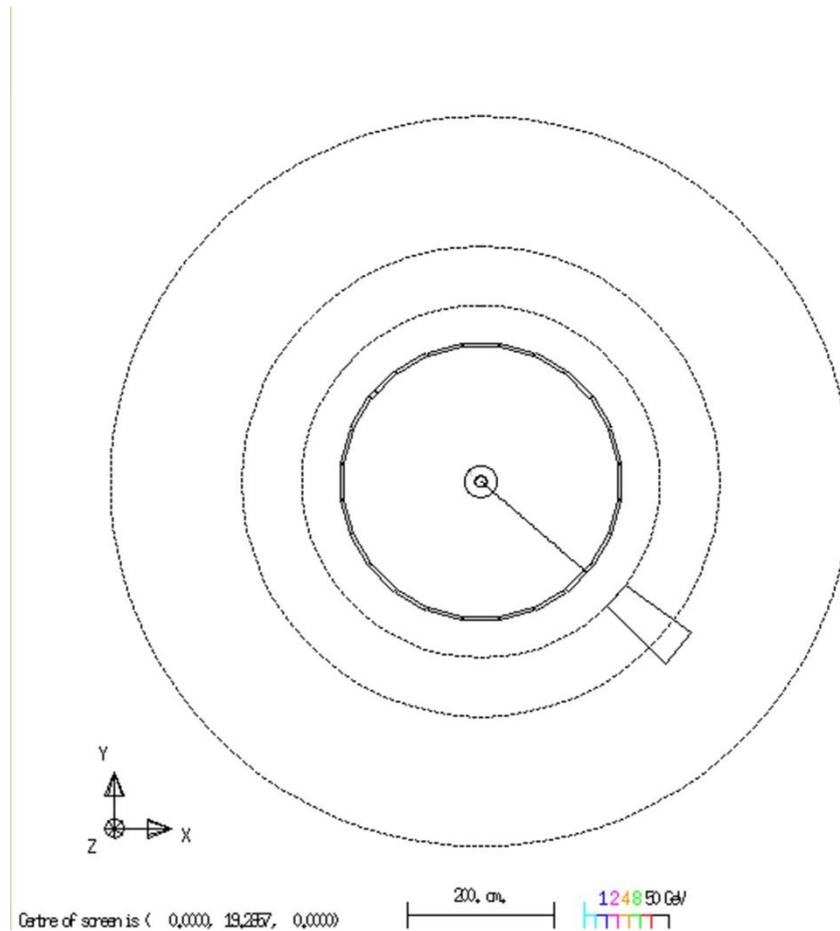
1 Spurkammer

2 elektromagn. Kalorimeter

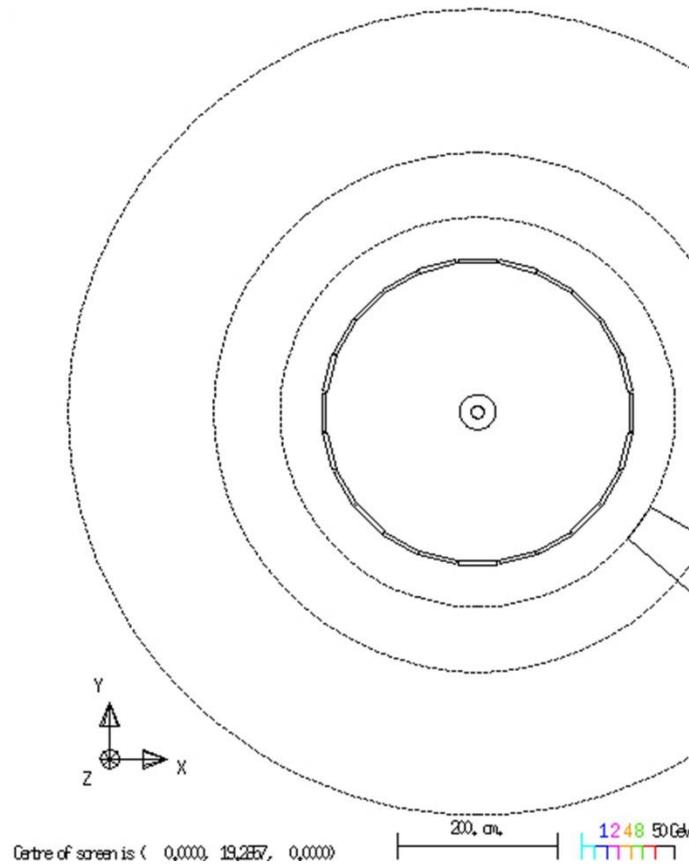
3 hadronisches Kalorimeter

4 Myonkammer

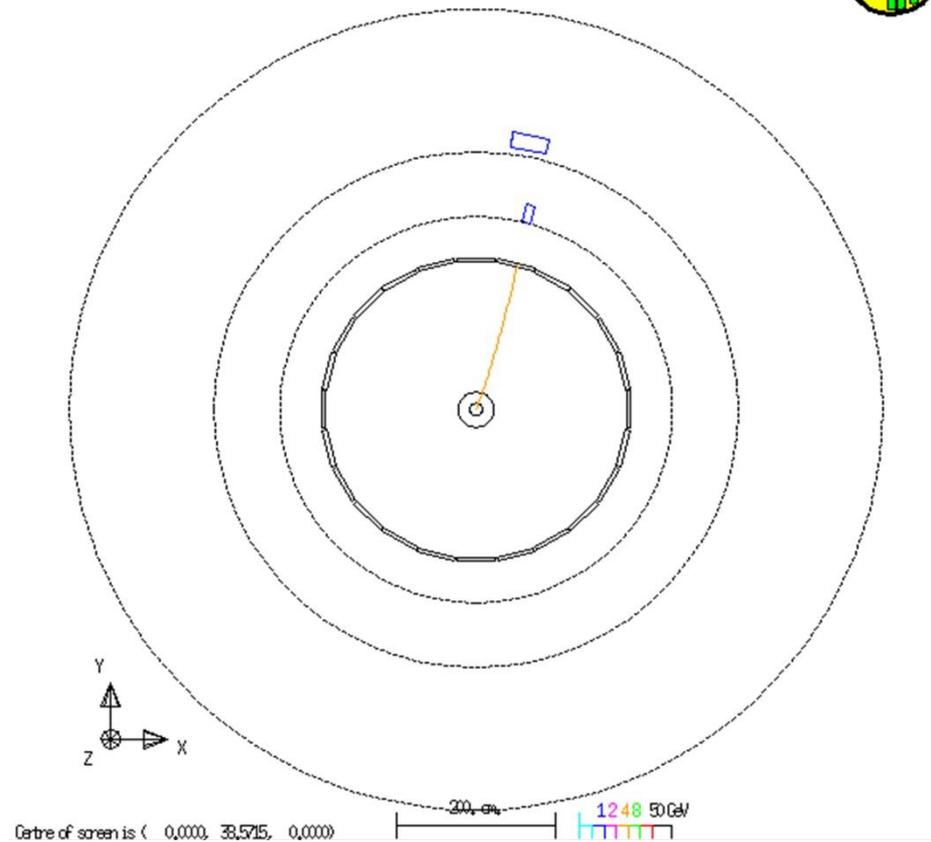
Elektron oder Positron



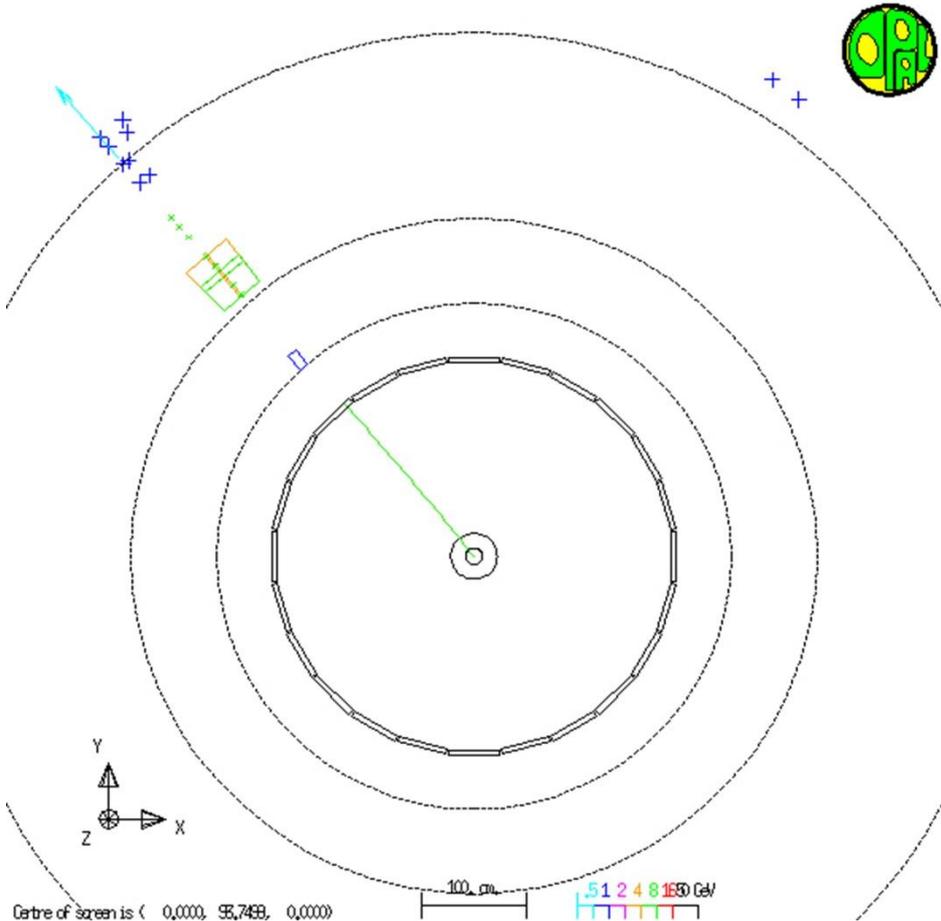
Photon



Elektrisch geladenes Hadron

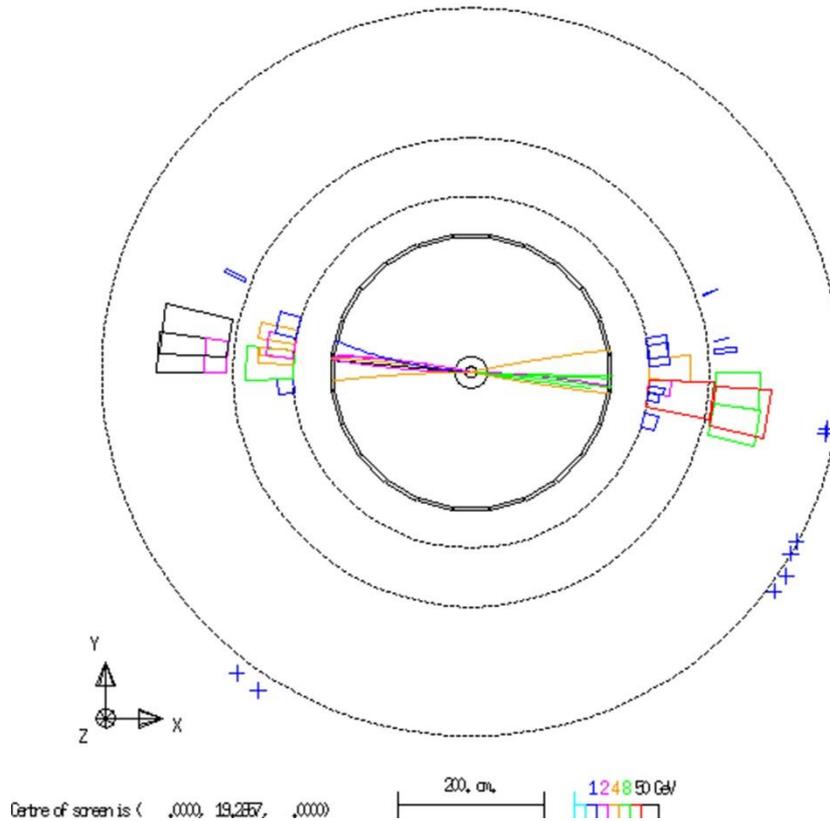


Anti-/Myon



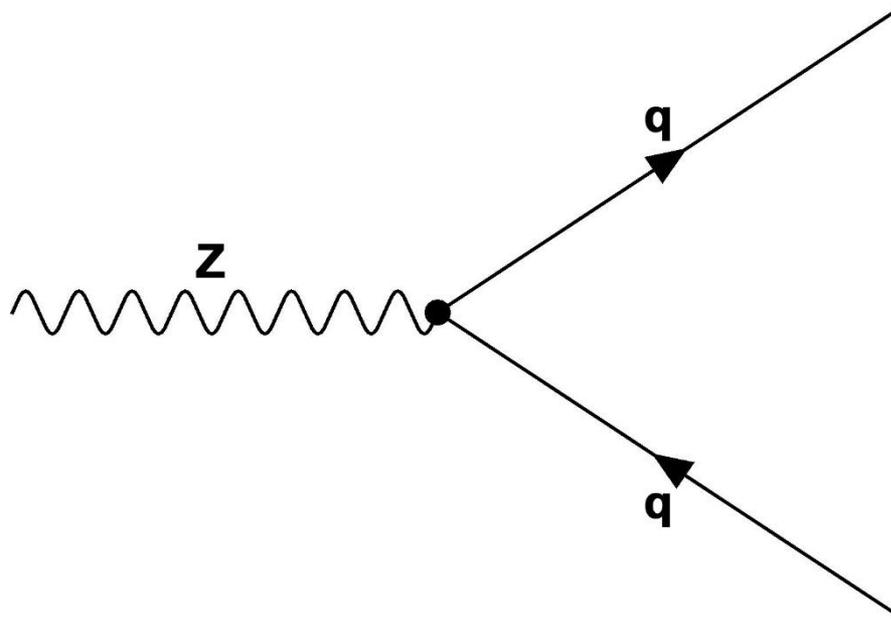
Jets - erzeugt durch Quarks oder Gluonen

Run: event 5293: 54644 CTrk(N= 26 Sump= 59.9) Ecal(N= 28 SumE= 40.2)
Ebeam 45.599 Vtx (.00, .04, .17) Hcal(N=14 SumE= 33.0) Muon(N= 0)



Was hat man gemessen?

- ▶ Bei LEP wurde unter anderem der starke Kopplungsparameter bei verschiedenen Energien sehr genau gemessen
- ▶ Wie?

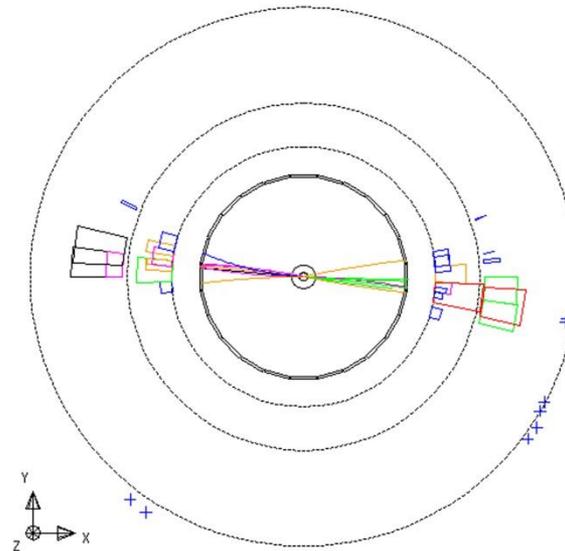


Bestimmung des starken Kopplungsparameters

- ▶ Bei LEP wurde unter anderem der starke Kopplungsparameter bei verschiedenen Energien sehr genau gemessen

- ▶ Wie?

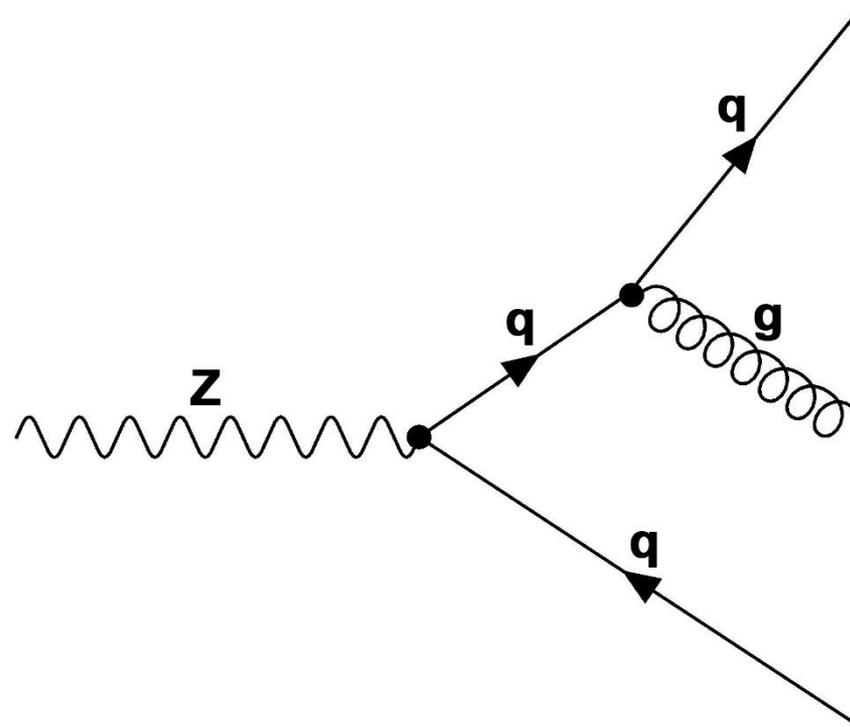
```
Run:event 5293: 54644 Ctrk(N= 26 SumE= 59.9) Ecal(N= 28 SumE= 40.2)
Ebeam 46.599 Vtx ( .00, .04, .17) Hcal(N=14 SumE= 33.0) Muon(N= 0)
```



Centre of screen is (.000, 13.287, .000) | 200 cm | 124850 GeV

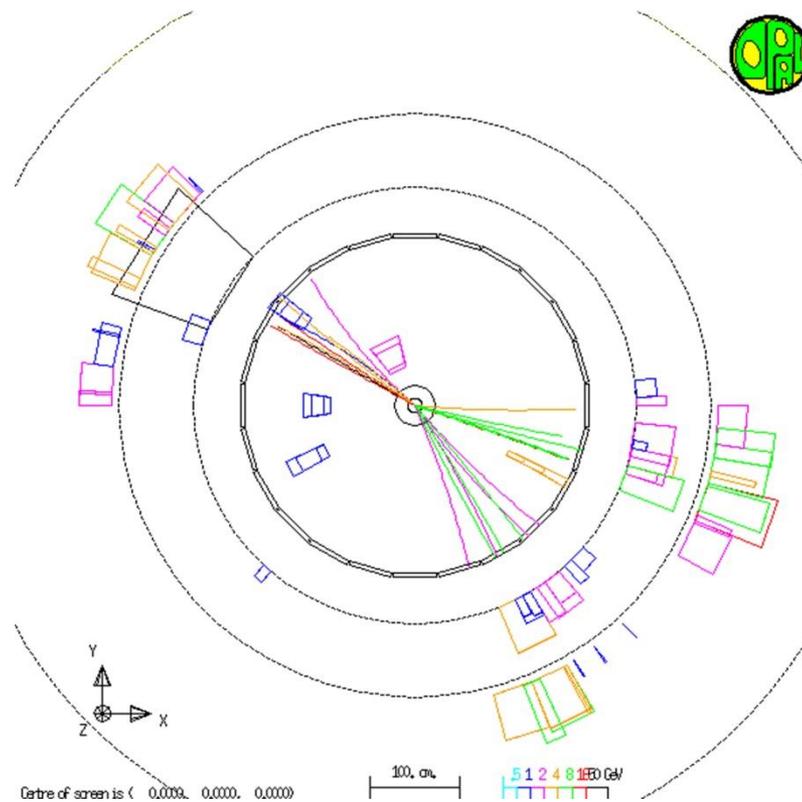
Bestimmung des starken Kopplungsparameters

- ▶ Manchmal passiert aber auch das:

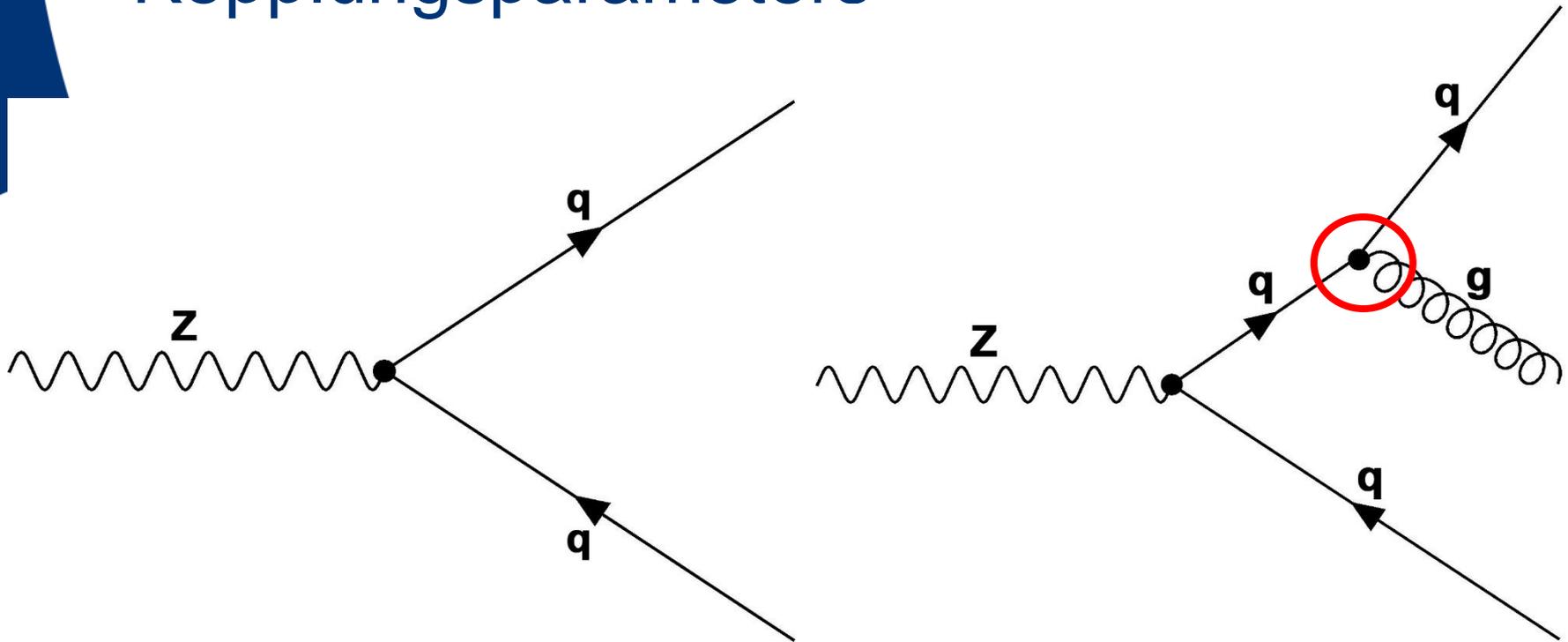


Bestimmung des starken Kopplungsparameters

- ▶ Manchmal passiert aber auch das:



Bestimmung des starken Kopplungsparameters



- Feynman-Diagramme unterscheiden sich nur durch einen zusätzlichen Vertex, an dem ein Prozess der starken WW stattfindet

Bestimmung des starken Kopplungsparameters

- ▶ Die Wsk., dass ein Prozess der starken Wechselwirkung abläuft ist direkt proportional zum starken Kopplungsparameter

$$P(3 - Jet) = P(2 - Jet) \cdot k \cdot \alpha_s$$

$$\alpha_s \sim \frac{P(3 - Jet)}{P(2 - Jet)}$$

- ▶ Dabei ist k ein Faktor, der durch weitere Kennwerte des Prozesses bestimmt wird und berechnet werden kann

Bestimmung des starken Kopplungsparameters

- ▶ Bei sehr vielen Ereignissen kann aus absoluten Häufigkeiten auf Wsk. geschlossen werden

$$\alpha_s \sim \frac{H(3 - Jet)}{H(2 - Jet)}$$

Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit!

www.teilchenwelt.de

PROJEKTLEITUNG



PARTNER



SCHIRMHERRSCHAFT



FÖRDERER

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



DR. HANS RIEGEL-STIFTUNG



www.facebook.de/teilchenwelt/



NETZWERK
TEILCHENWELT

Diskussion / Fragen

