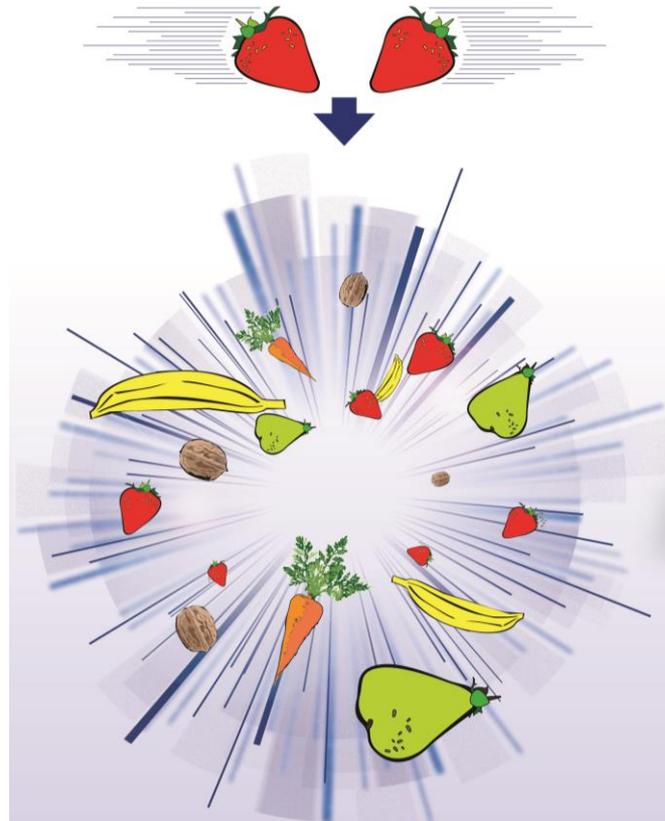
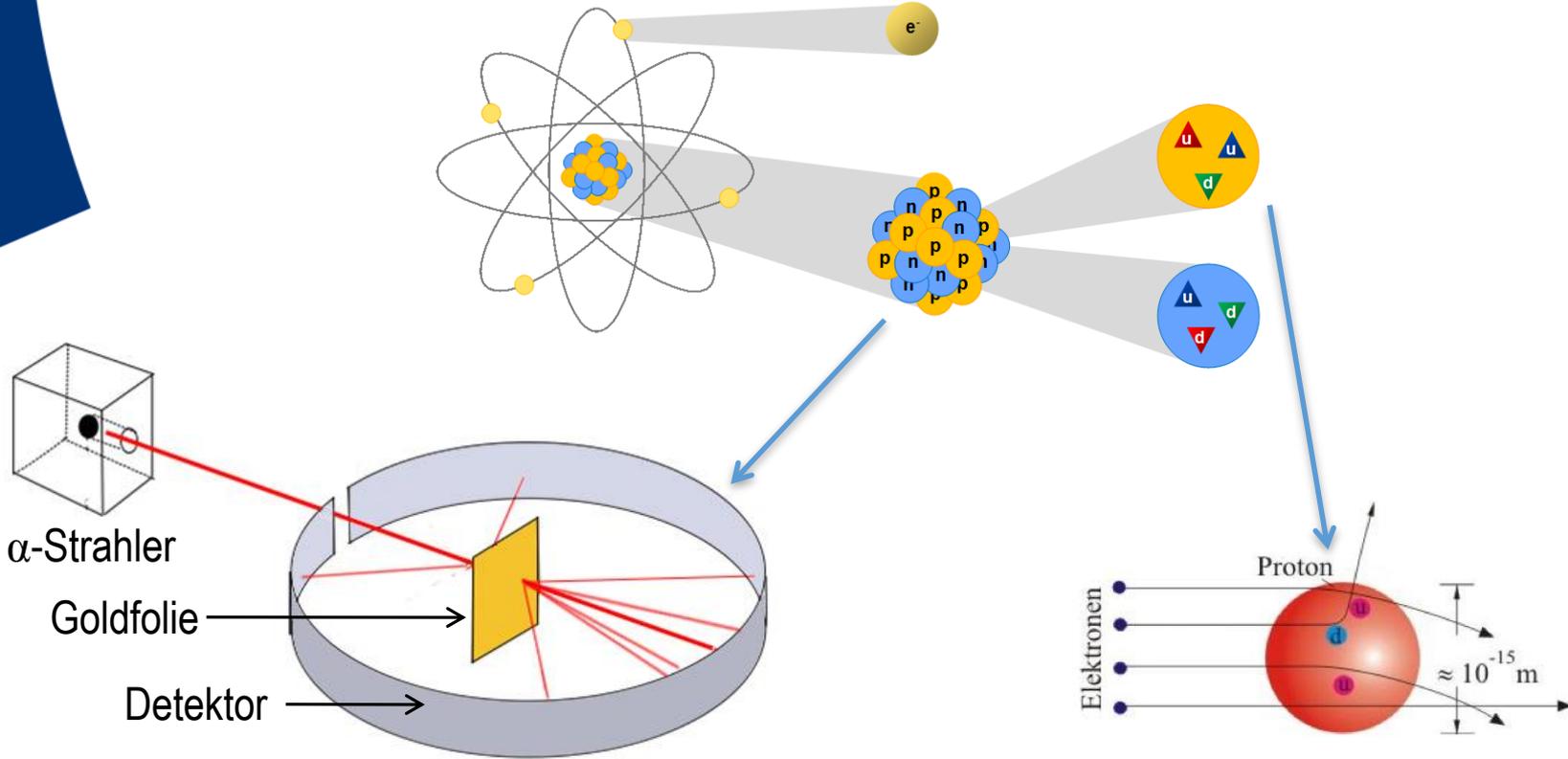


# Forschungsmethoden in der Teilchenphysik



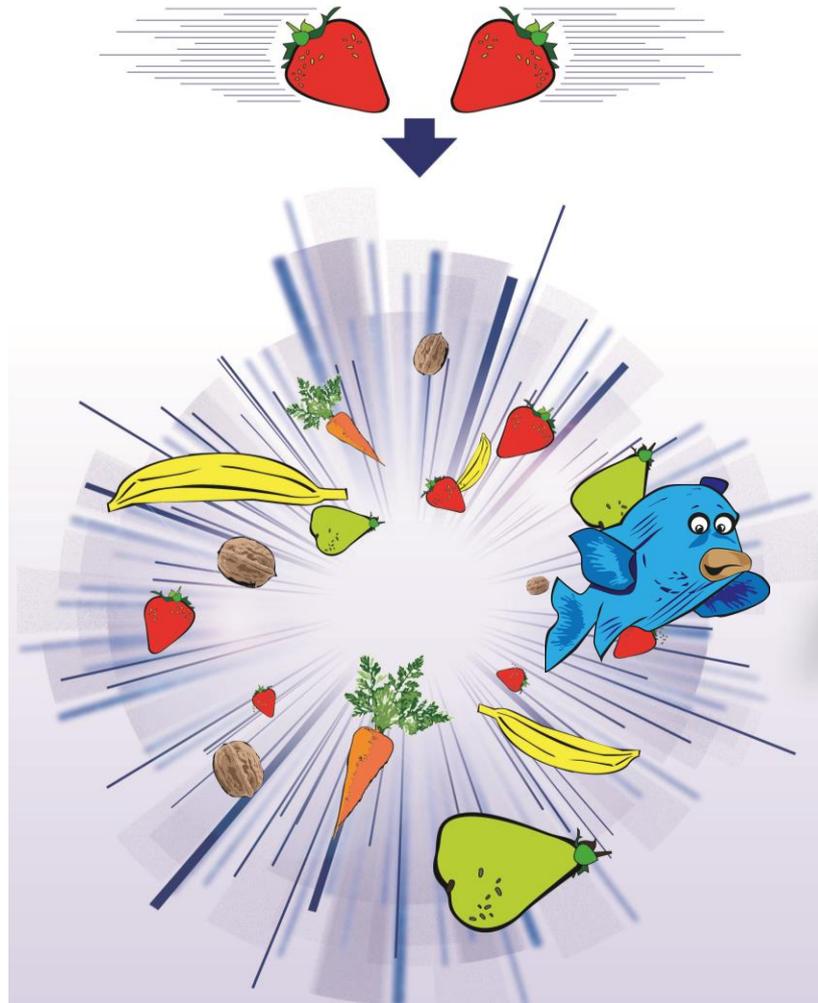
# Wozu Teilchenbeschleuniger? Strukturuntersuchungen



**Rutherford-Streuexperiment (1911)**  
Streuung von  $\alpha$ -Teilchen an Goldatomen -  
--> Atomkern

**Experiment am SLAC (1969)**  
Streuung von Elektronen an Protonen  
--> Quarks

# Wozu Teilchenbeschleuniger? Erzeugung massereicher Teilchen



- 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!

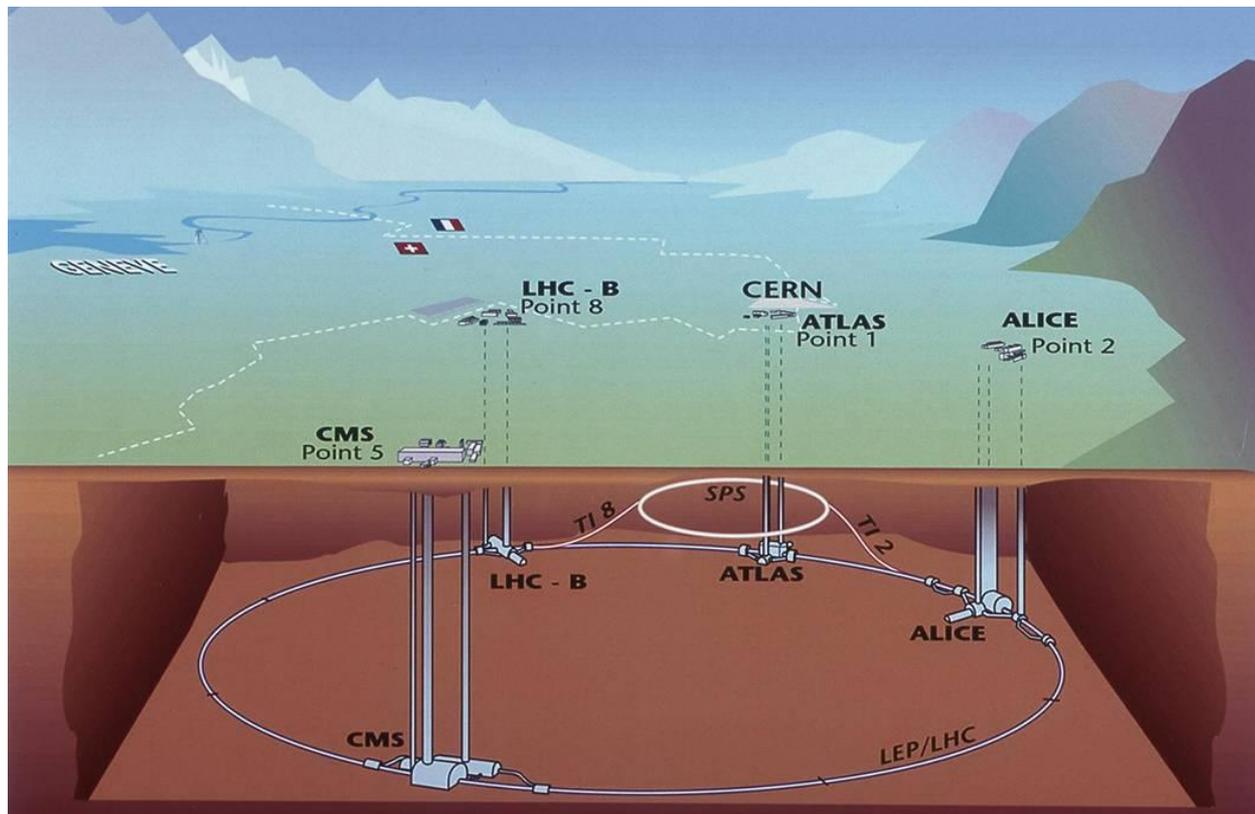
# Das CERN (*Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*)

- ▶ Das größte Teilchenphysik-Forschungszentrum der Welt im Grenzgebiet zwischen der Schweiz und Frankreich



# Der LHC (Large Hadron Collider)

- ▶ Ein 27 km langer, ringförmiger **Teilchenbeschleuniger** mit 4 **Teilchen-Detektoren**: ATLAS, ALICE, CMS und LHC-b



# Wie funktioniert ein Teilchenbeschleuniger?

**Der einfachste Beschleuniger:**

**Ein alter Fernseher (Braun'sche Röhre)!**

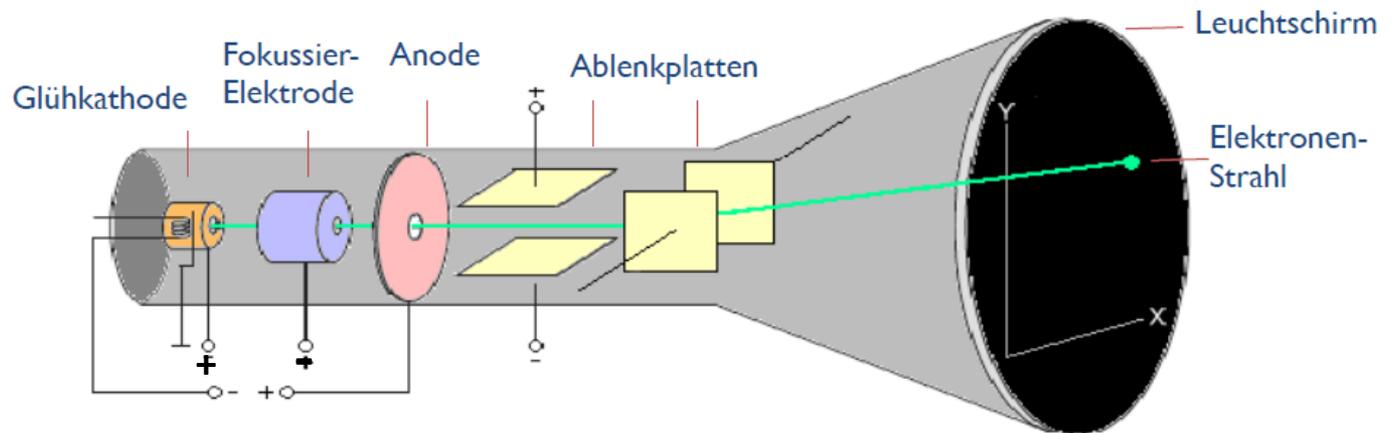
- Elektronen erzeugen: Glühkathode
- ...beschleunigen: elektrisches Feld (Hochspannung)
- ...ablenken und fokussieren: elektrisches oder magnetisches Feld



# Wie funktioniert ein Teilchenbeschleuniger?

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

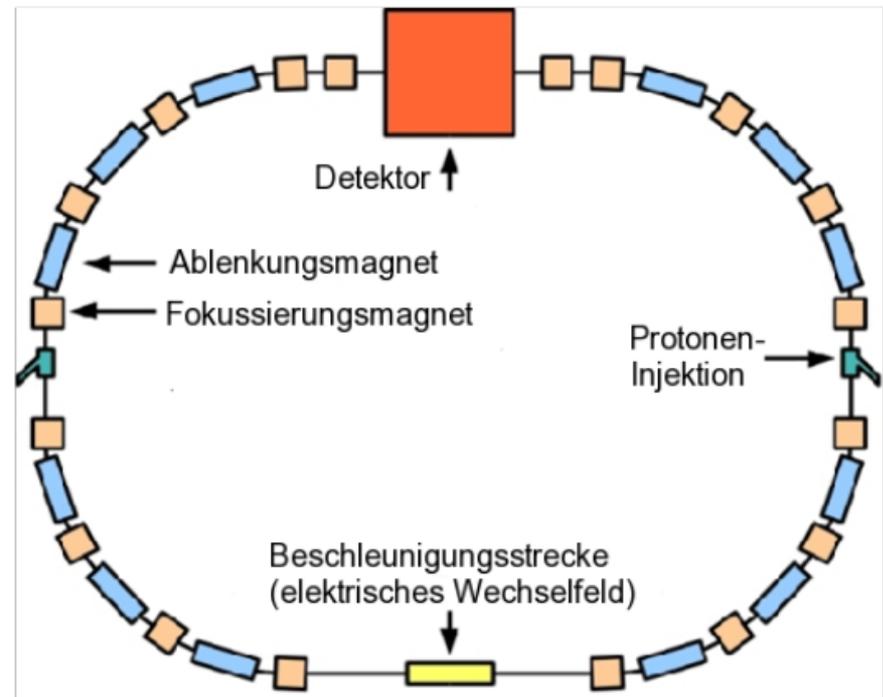
- Elektronen erzeugen: Glühkathode
- ...beschleunigen: elektrisches Feld (Hochspannung)
- ...ablenken und fokussieren: elektrisches oder magnetisches Feld



# Wie funktioniert der LHC?

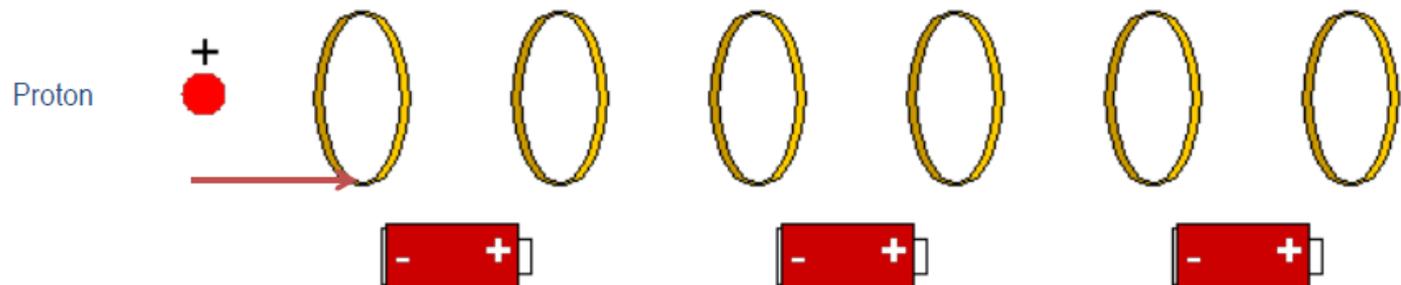
Im LHC durchlaufen Pakete (Bunches) von Protonen eine kreisförmige Bahn, auf der sie...

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

# Was geschieht im LHC?

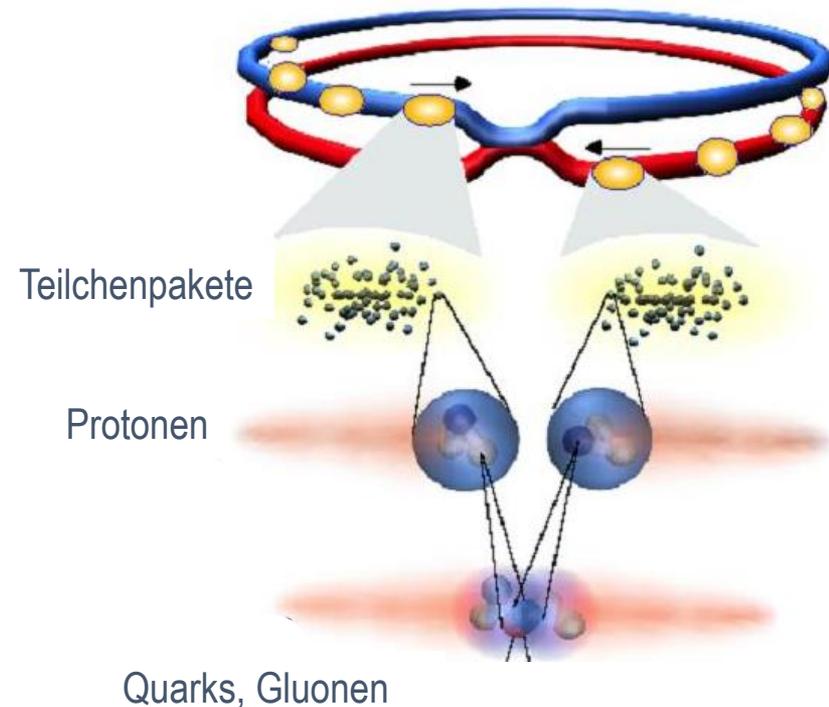
- Protonen kreisen in entgegengesetzten Richtungen mit einer Energie von je 6,5 Tera-Elektronenvolt (TeV).
- Wenn die Protonen zusammenstoßen, entstehen neue Teilchen, die man in Detektoren nachweist.



# 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

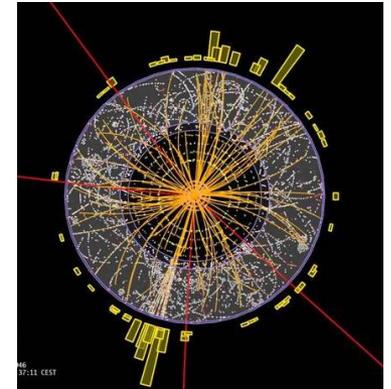
- **600 Mio. Kollisionen pro Sekunde! Warum?**

- „Interessante“ Teilchen entstehen sehr selten:  
ca.  $1 \times 10^{10}$  Kollisionen!

- Welche Teilchen bei einer bestimmten Kollision entstehen,  
ist nicht eindeutig vorhersagbar

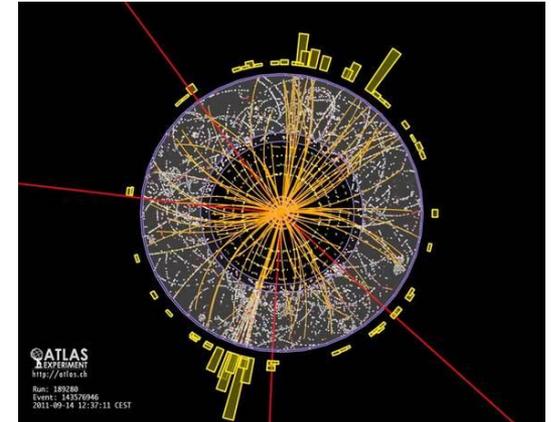
- Man kann nur vorhersagen, wie häufig welche  
Teilchenkombinationen vorkommen werden

- --> Vergleich der Messergebnisse mit Vorhersagen aus dem  
Standardmodell der Teilchenphysik und anderen Theorien



# Wohin mit so vielen Daten?

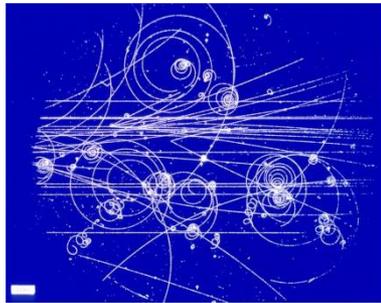
- 20 Mio. Protonenpaket-Kreuzungen pro Sekunde
- Detektoren weisen die entstandenen Teilchen nach
- einige MB pro Ereignis  
...das wären mehrere Terabyte pro Sekunde!
- Datenreduktion notwendig
- "Trigger": automatische Auswahl interessanter Messdaten
- etwa 1000 Ereignisse pro Sekunde bleiben übrig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



# Wie weist man Elementarteilchen nach?

## Bildgebende Detektoren

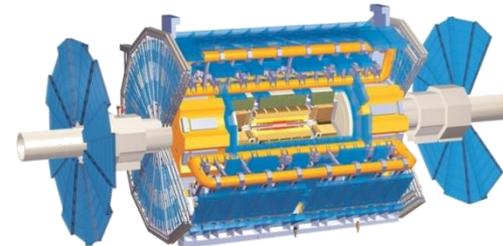
z.B.: Nebelkammer, Blasenkammer



- sichtbare Teilchenspuren

## Elektronische Detektoren

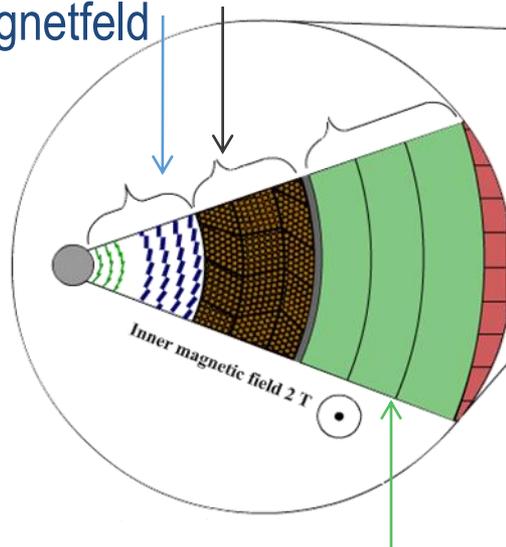
z.B: **ATLAS**-Detektor, Geigerzähler



- elektrische Signale
- Eigenschaften der Teilchen werden daraus rekonstruiert

## Spurdetektoren

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

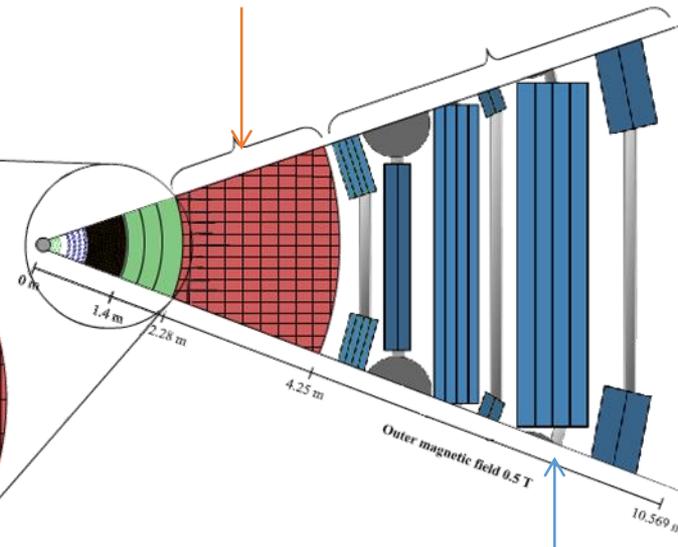


## Elektromagnetisches Kalorimeter

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

## Hadronisches Kalorimeter

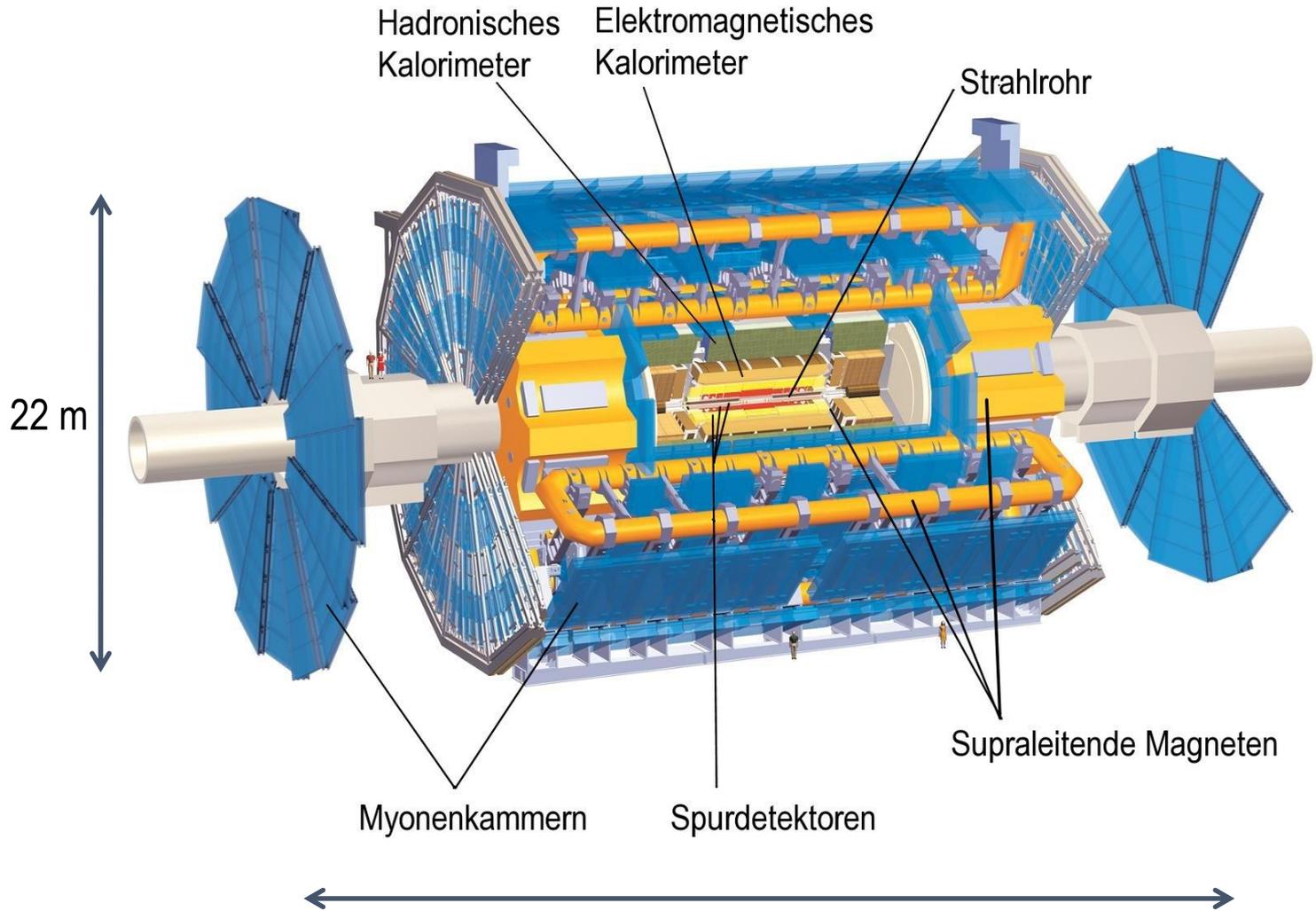
- ... misst die **Energie** von Hadronen (= aus Quarks bestehende Teilchen)



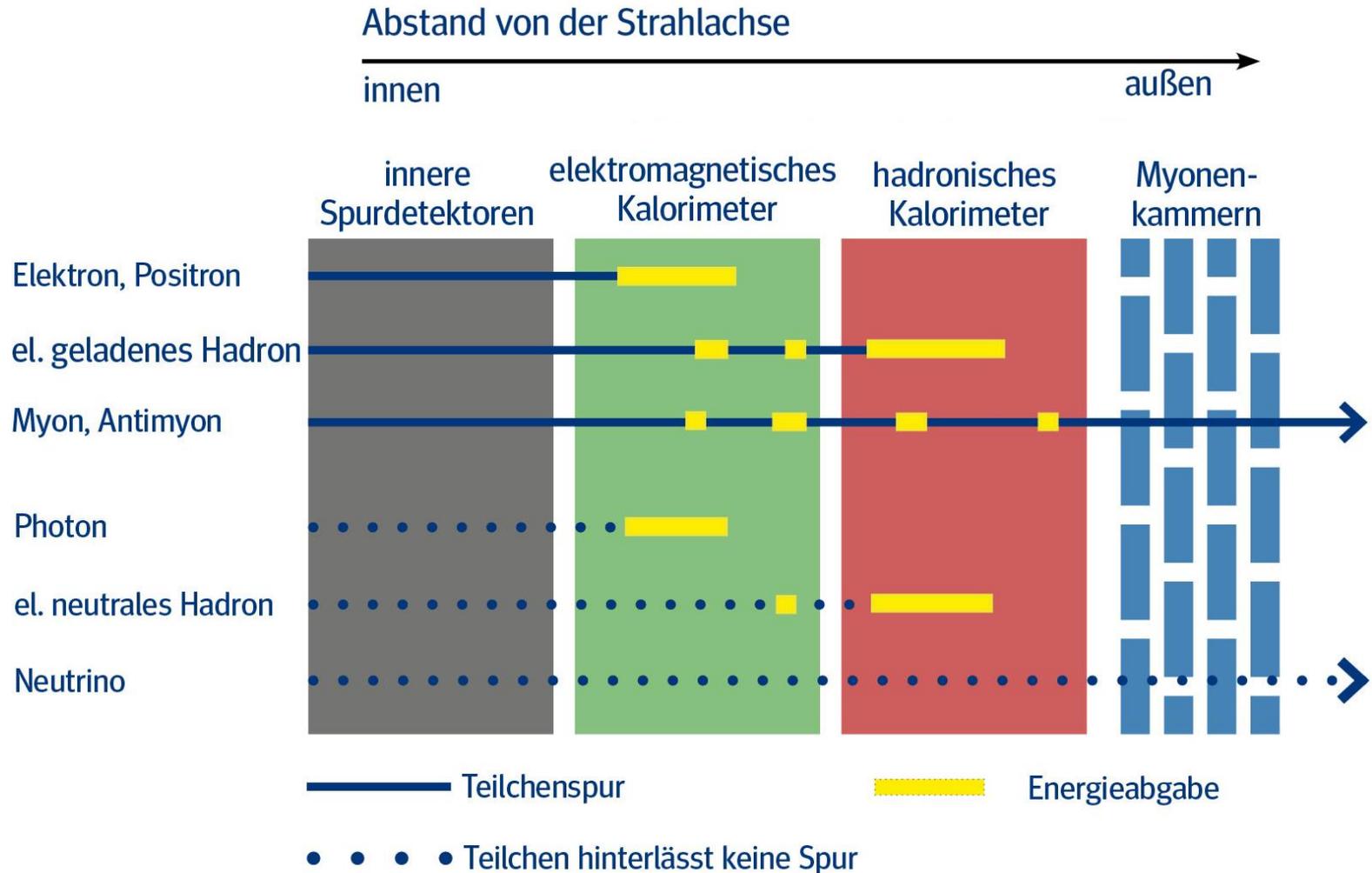
## Myonenkammern

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

# Der ATLAS-Detektor



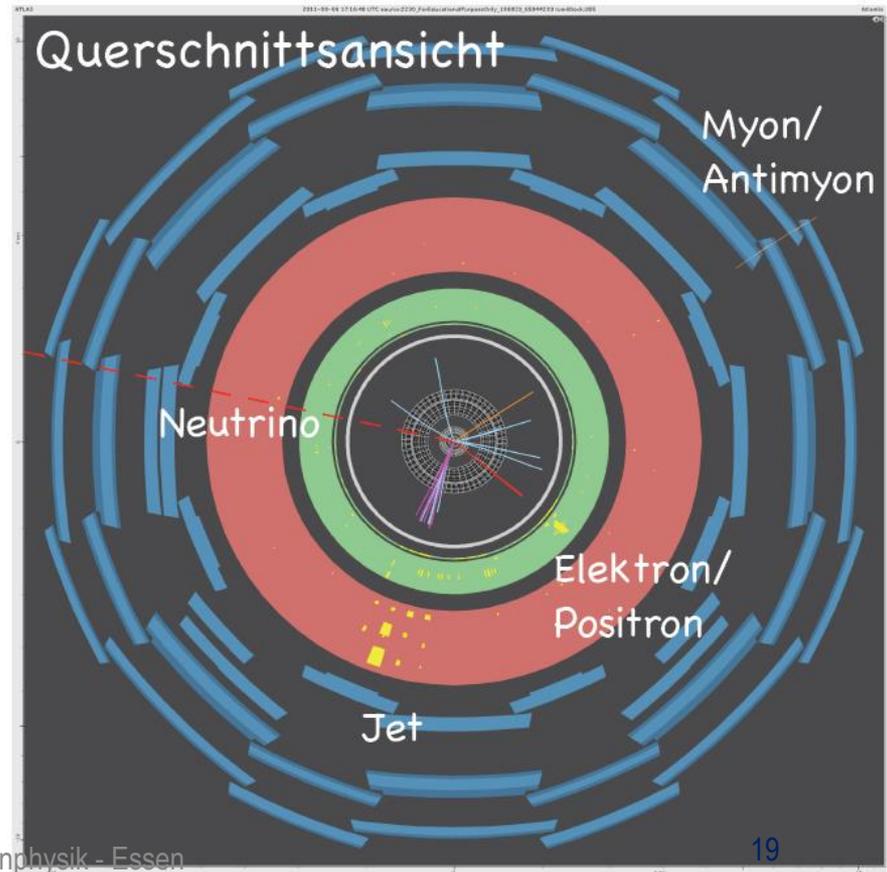
# Teilchenspuren im ATLAS-Detektor



# Darstellung von Teilchenspuren

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

- Spurdetektoren
- elektromagnetisches Kalorimeter
- hadronisches Kalorimeter
- Myonenkammern





## 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)

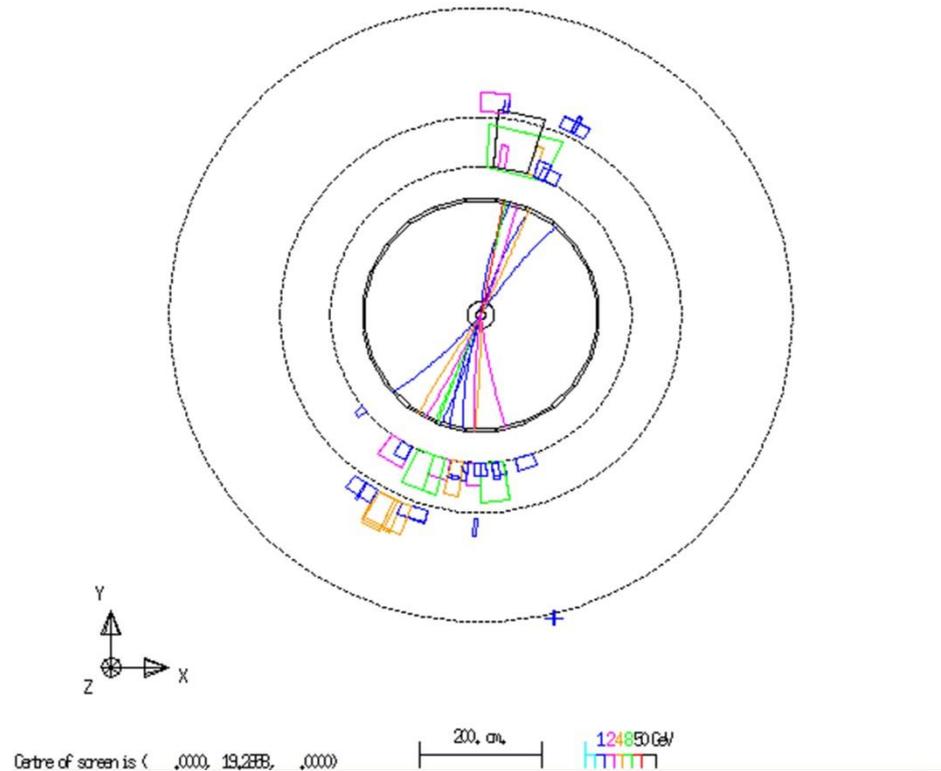


## LEP oder LHC in der Schule?

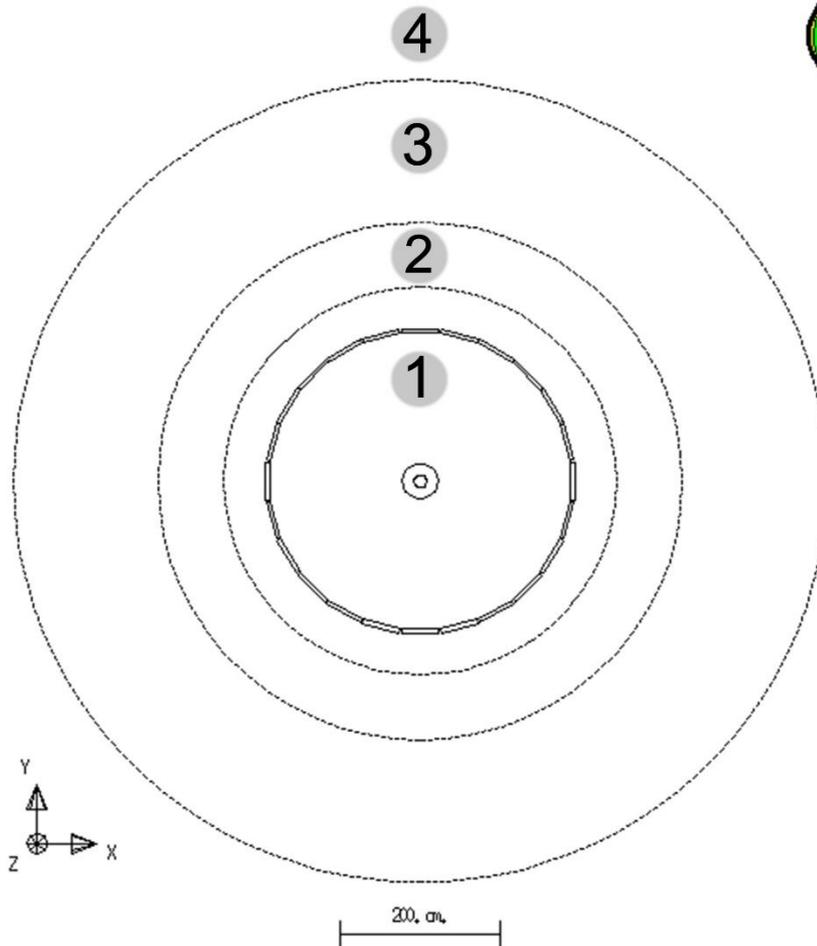
- ▶ LHC zwar aktueller, aber interessante Ereignisse bei LEP einfacher analysierbar
- ▶ Liegt u.a. an der Struktur der Projektile: Elektronen und Positronen sind Elementarteilchen, die Protonen am LHC nicht
  - Einfachere Ausgangszustände vereinfachen auch die möglichen Endzustände und deren Beschreibung

# Das OPAL-Eventdisplay

Run: event 5293: 20246 Ctrk(N= 26 Sump= 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



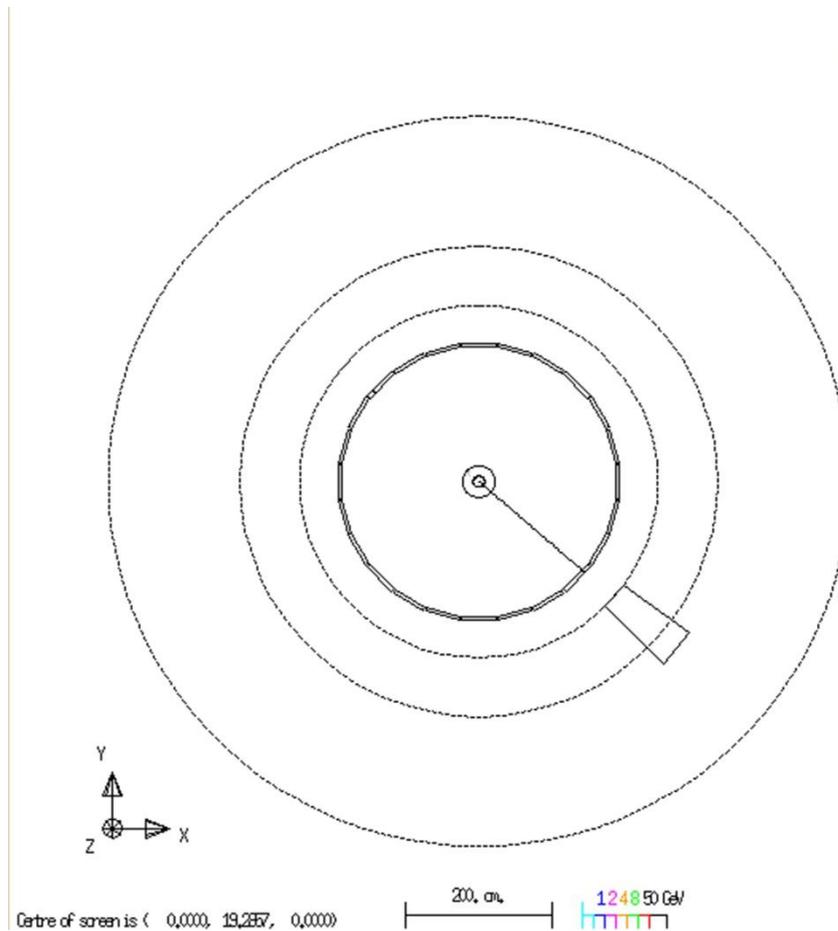
1 Spurkammer

2 elektromagn. Kalorimeter

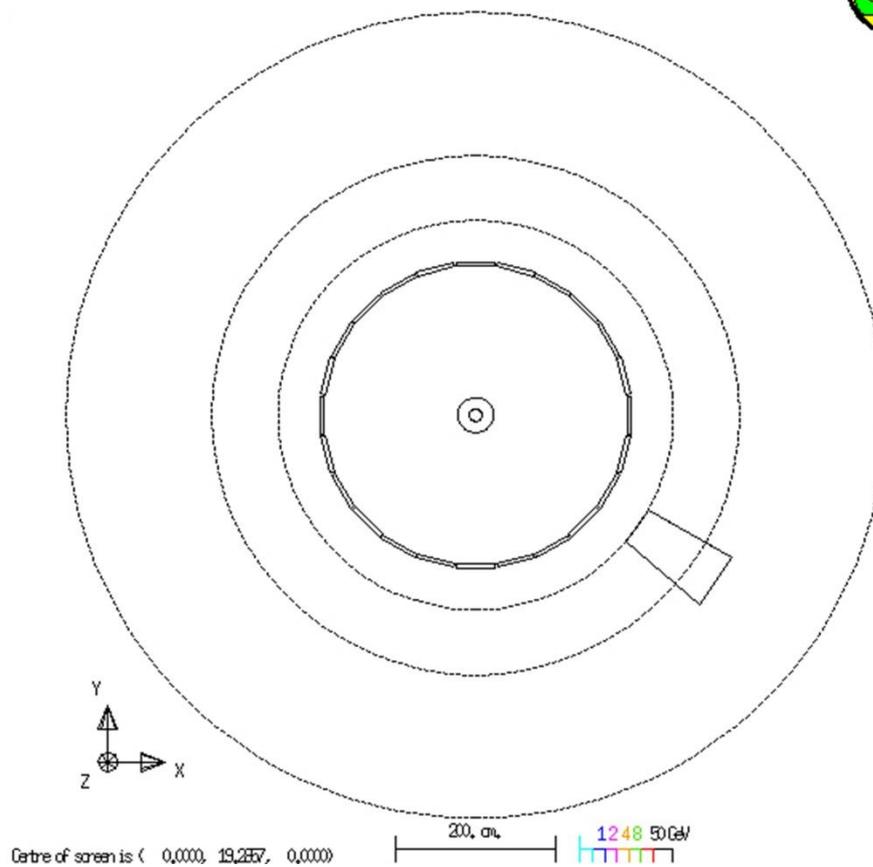
3 hadronisches Kalorimeter

4 Myonkammer

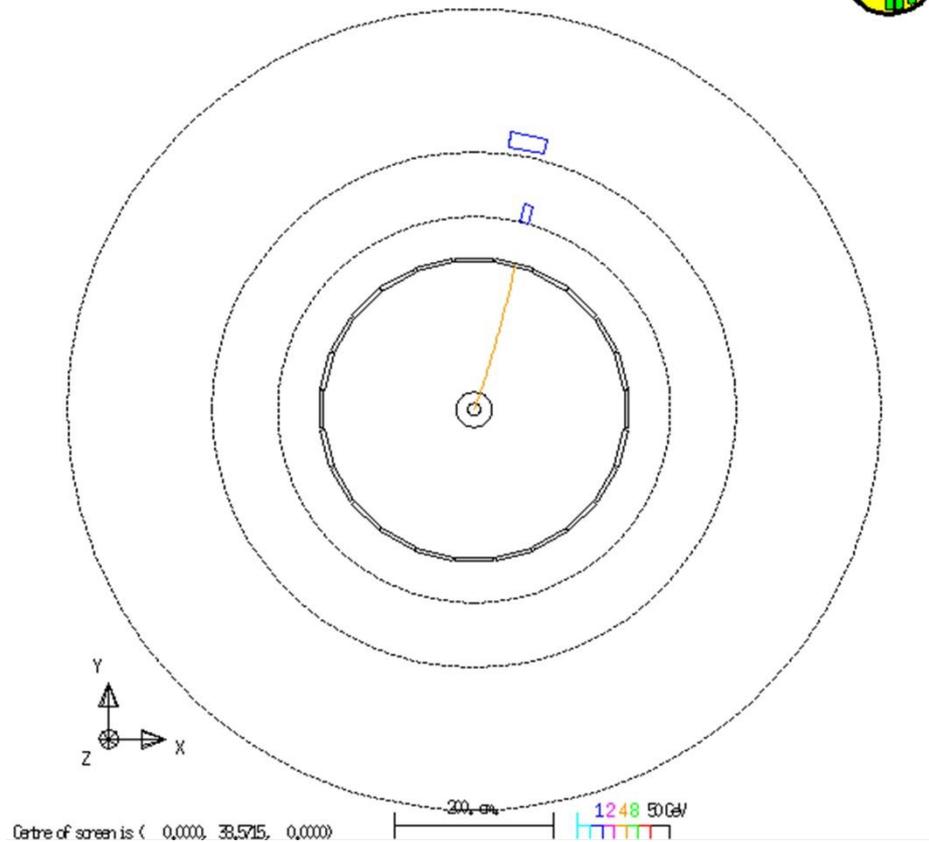
# Elektron oder Positron



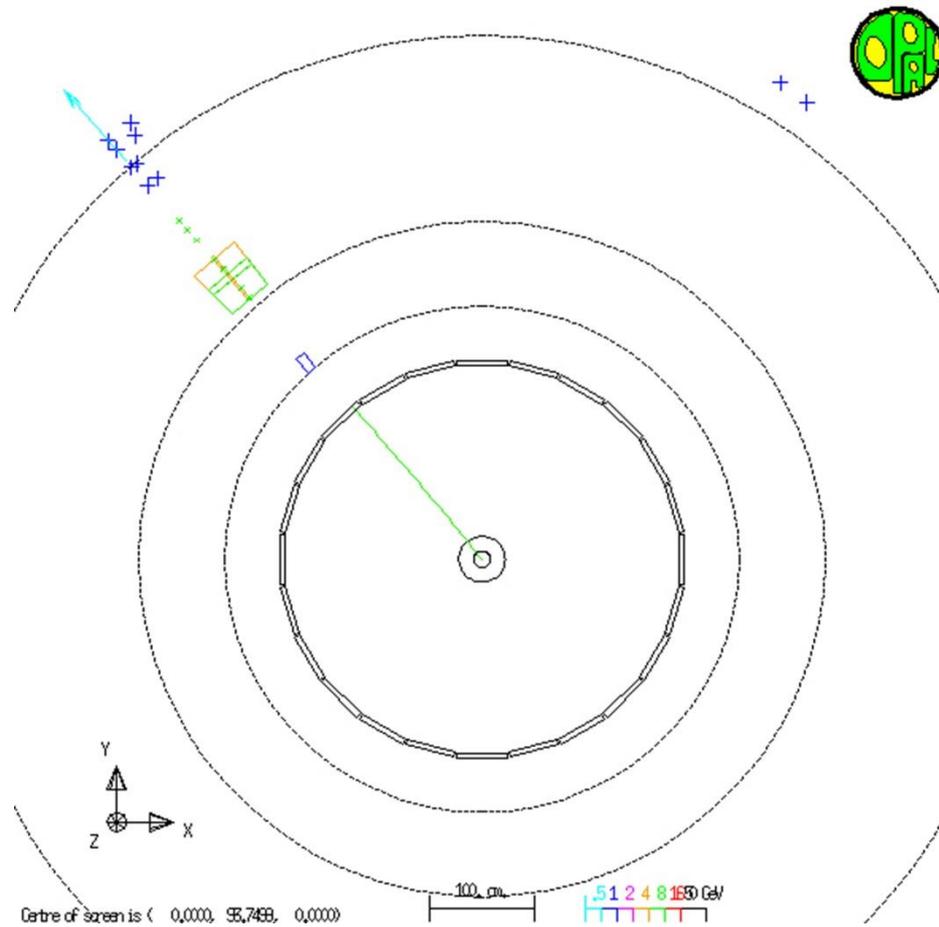
# Photon



# Elektrisch geladenes Hadron

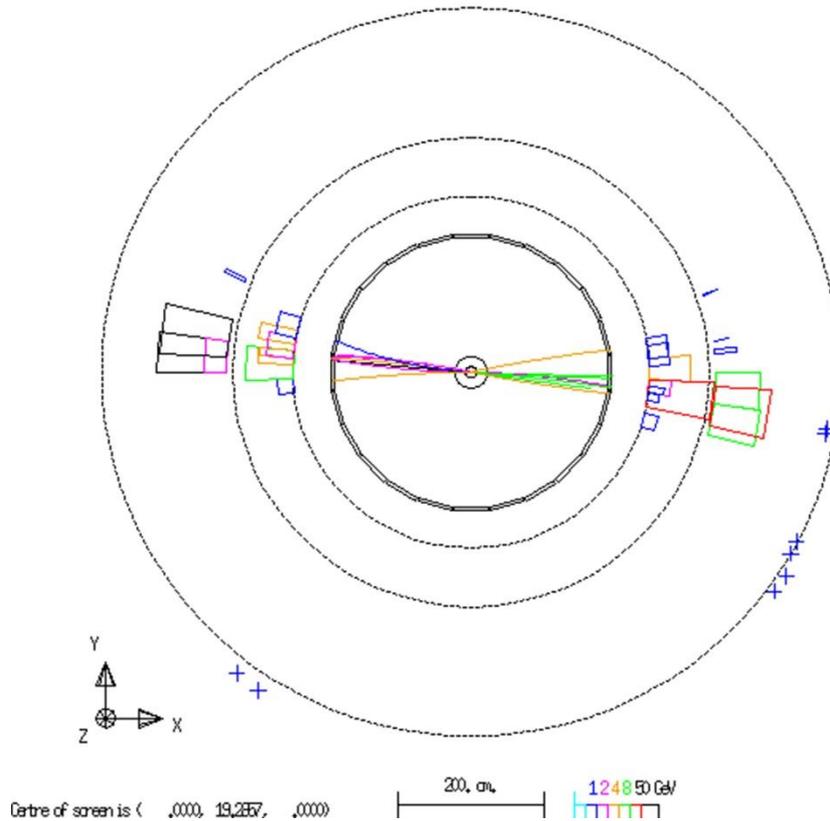


# Anti-/Myon



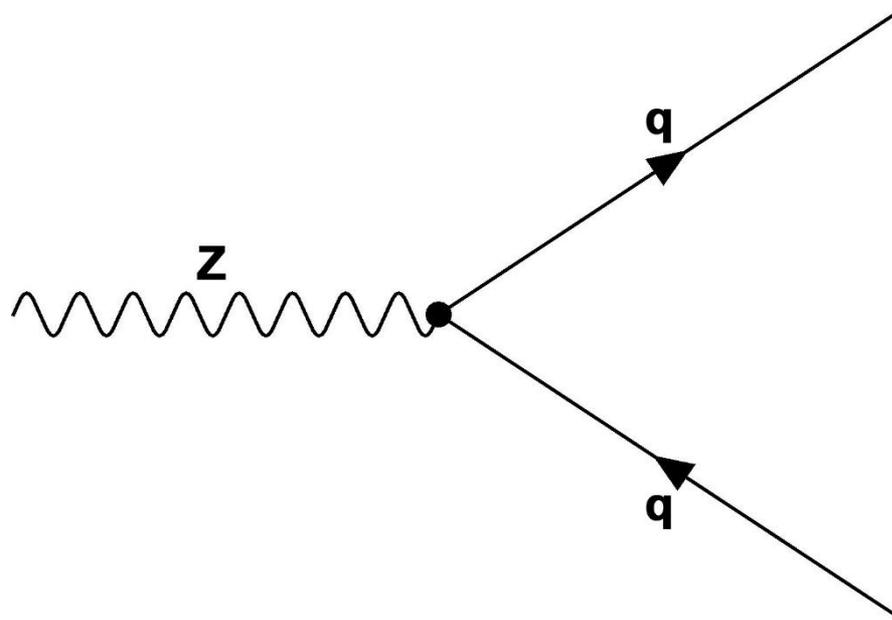
# Jets - erzeugt durch Quarks oder Gluonen

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?

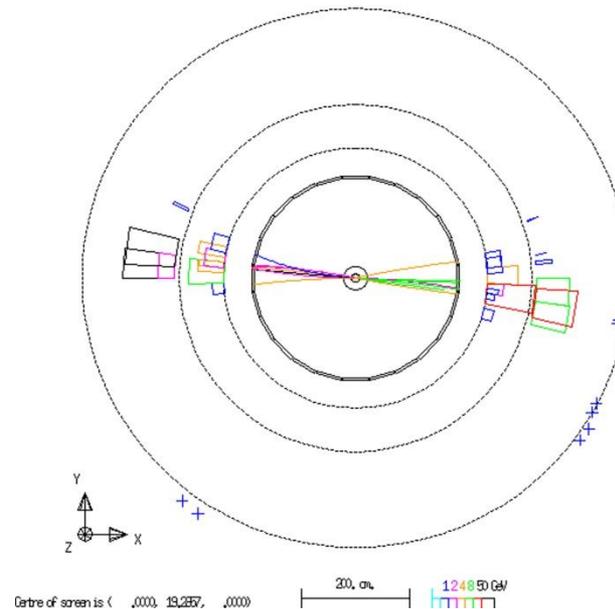
- ▶ Bei LEP wurde unter anderem der starke Kopplungsparameter bei verschiedenen Energien sehr genau gemessen
- ▶ Wie?



# Bestimmung des starken Kopplungsparameters

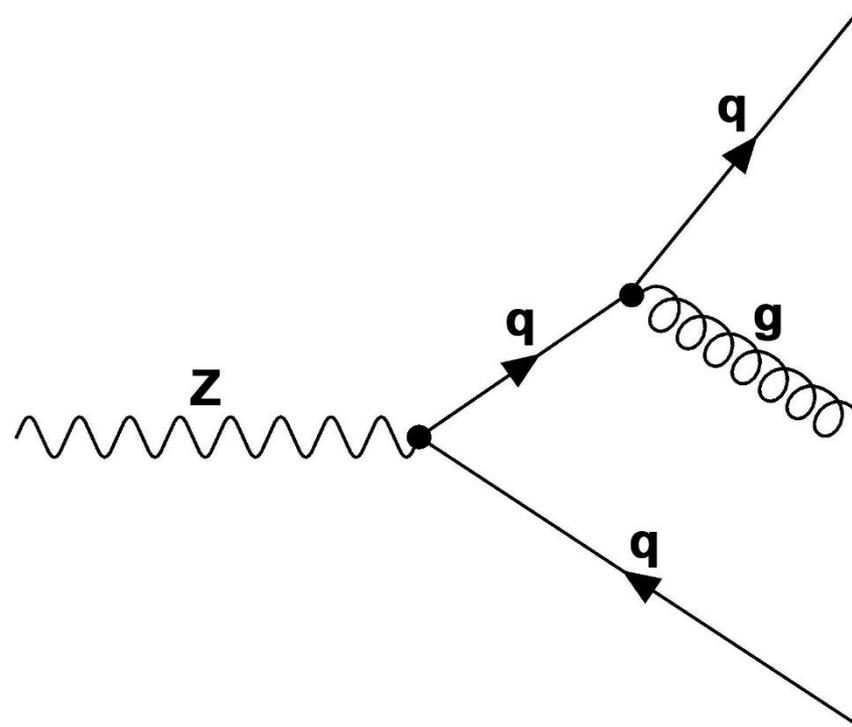
- ▶ Bei LEP wurde unter anderem der starke Kopplungsparameter bei verschiedenen Energien sehr genau gemessen
- ▶ Wie?

```
Run: event 5293: 54644 CTrk(N= 26 SumE= 59.9) Ecal(N= 28 SumE= 40.2)  
Ebeam 46.589 Vtx ( .00, .04, .17) Hcal(N=14 SumE= 33.0) Muon(N= 0)
```



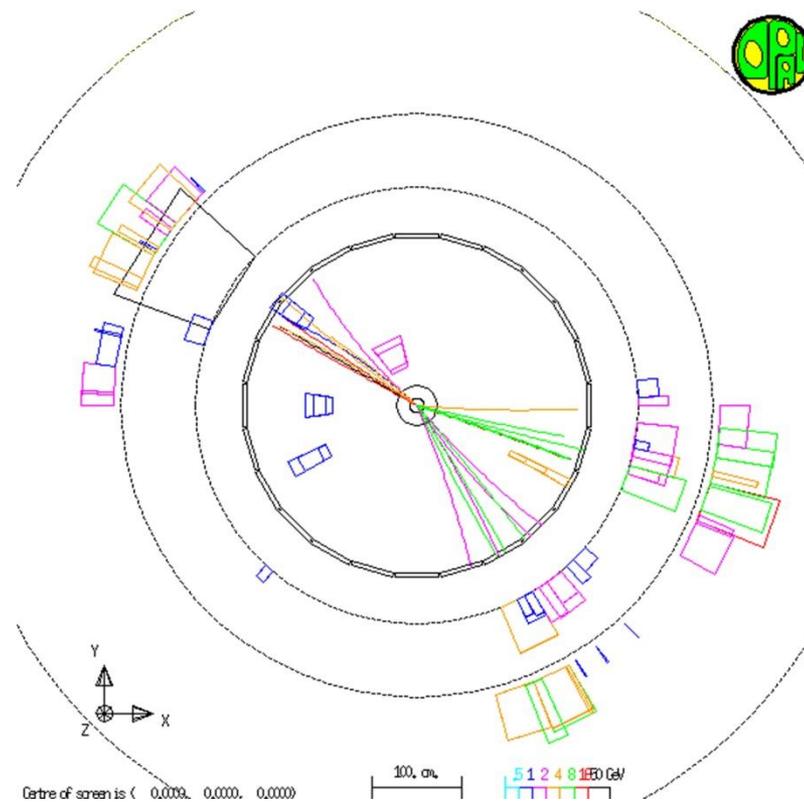
# Bestimmung des starken Kopplungsparameters

- ▶ Manchmal passiert aber auch das:

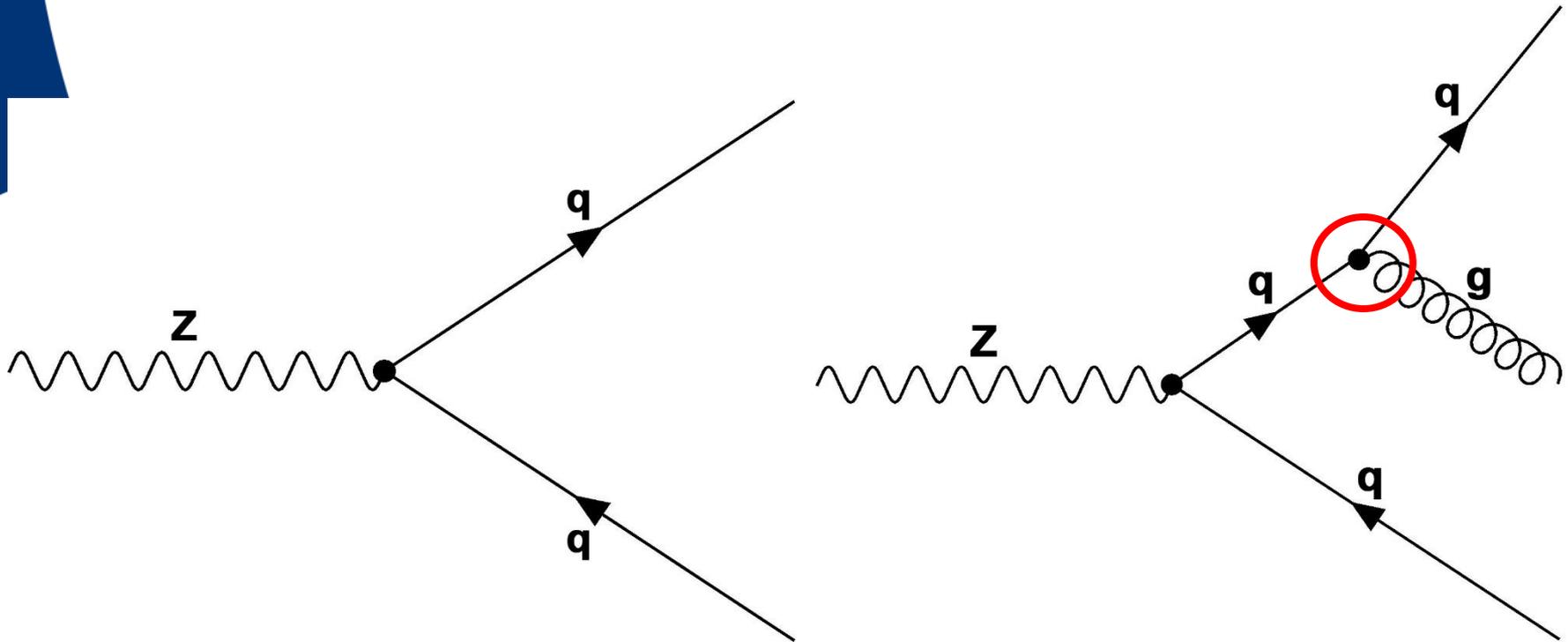


# Bestimmung des starken Kopplungsparameters

- ▶ 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

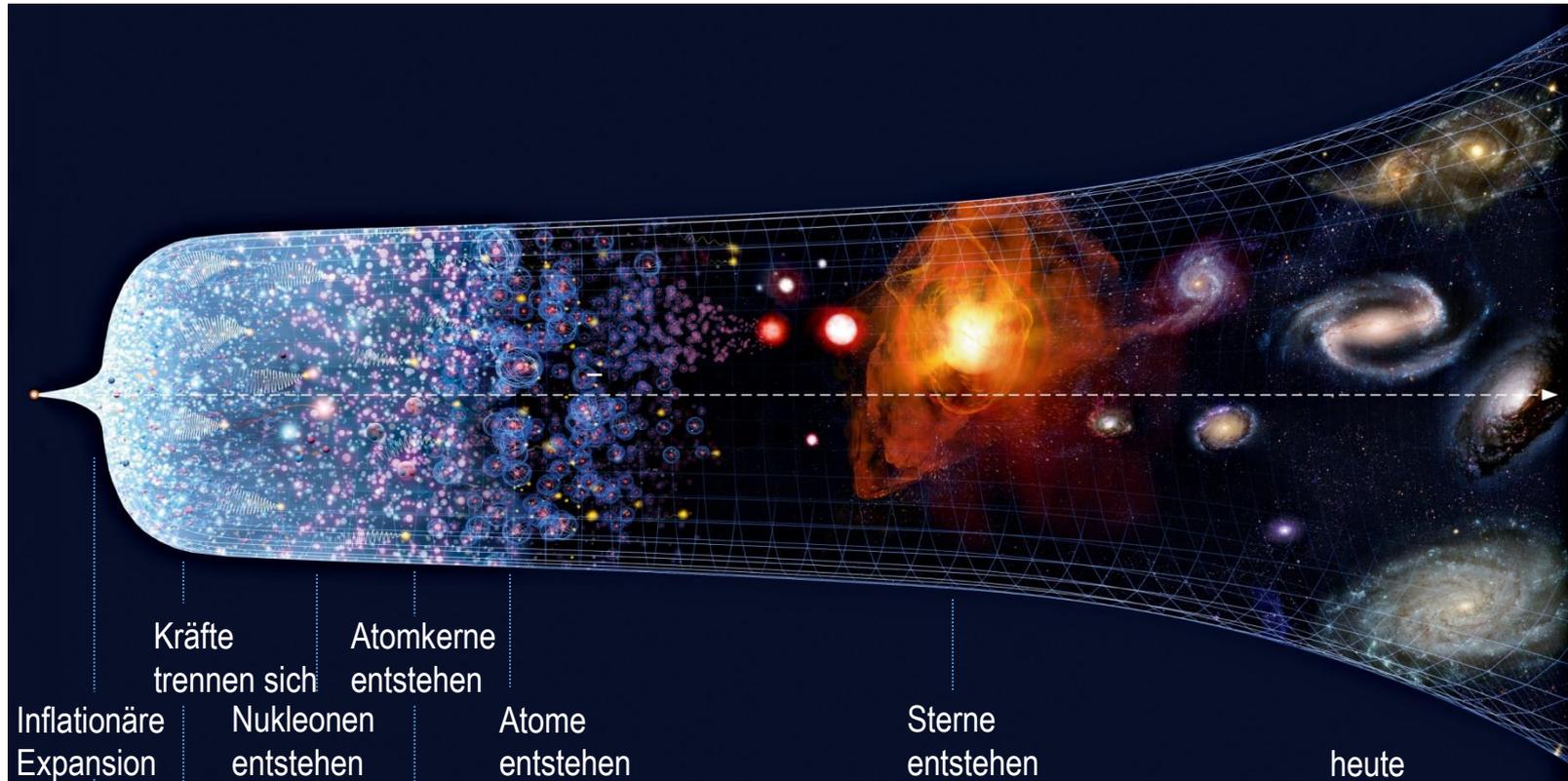
- ▶ Bei sehr vielen Ereignissen kann aus absoluten Häufigkeiten auf Wsk. geschlossen werden

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



# Die Geschichte des Universums

Urknall



Zeit

$10^{-35}$  s    $10^{-10}$  s    $10^{-5}$  s   3 min   376 000 Jahre    $10^9$  Jahre    $14 \cdot 10^9$  Jahre

Energie

$10^{13}$  TeV   1 TeV   150 MeV   0,1 MeV   1 eV   1 meV   0,25 meV

09.03.2016

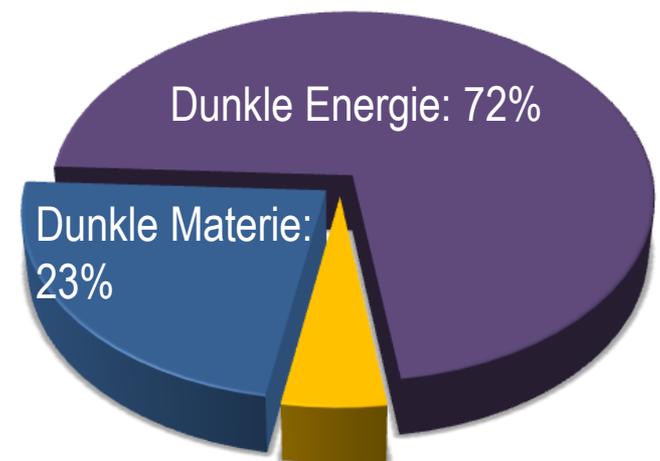
LHC-Energie



# Was ist Dunkle Materie?

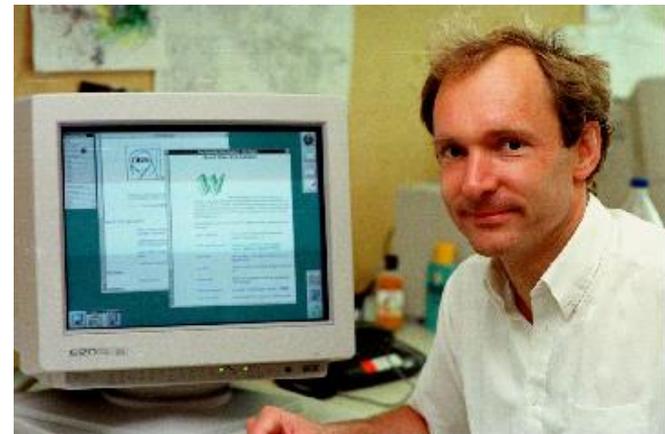
Beobachtungen zeigen, dass es nicht nur atomare Materie geben kann:

- 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.



# 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

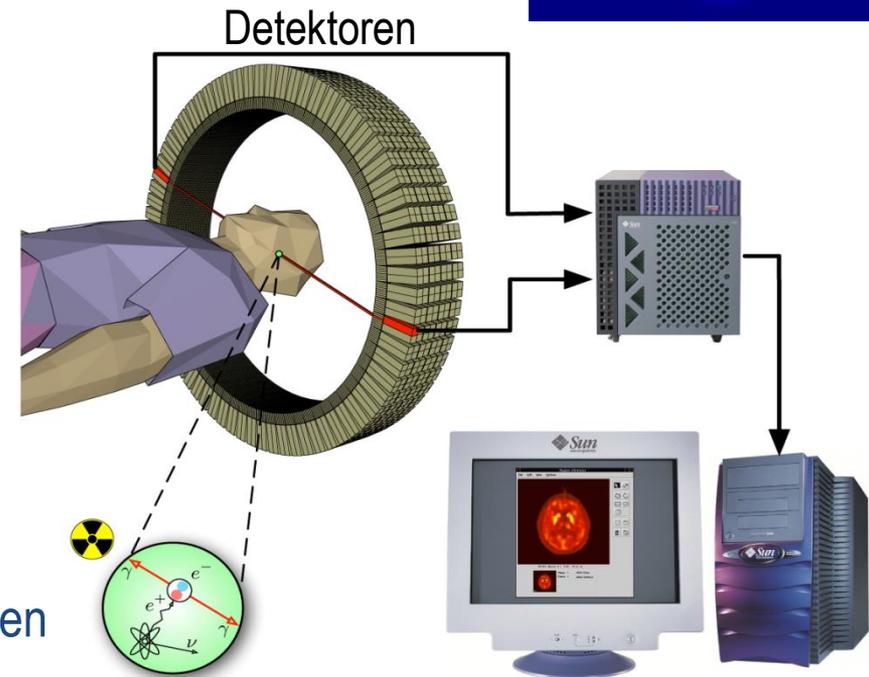
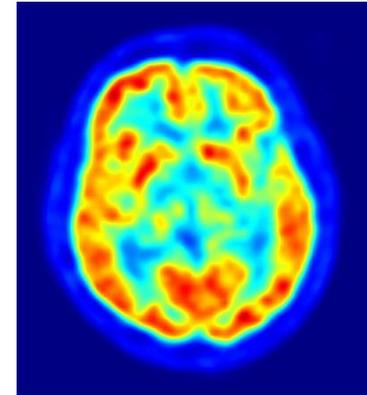




# Positronen-Emissions-Tomografie

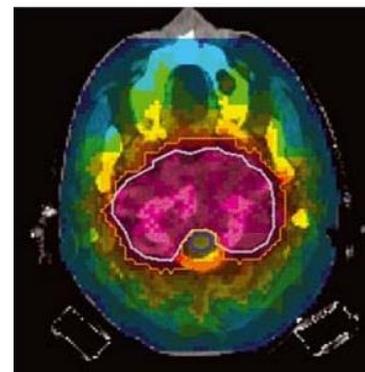
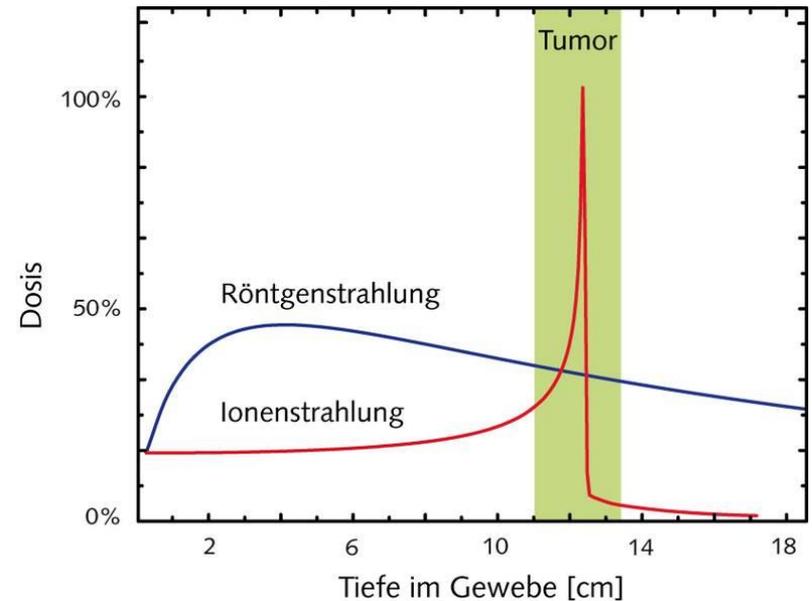
PET: Ein bildgebendes Verfahren für die Medizin

- Patienten wird eine spezielle Zuckerlösung gespritzt
- Diese enthält ein Fluor-Isotop, das Positronen abstrahlt ( $\beta^+$ -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

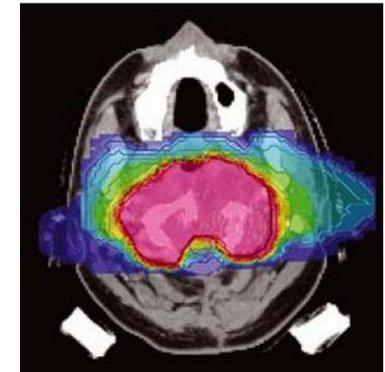


# Tumorthherapie mit Hadronen

- 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



Photonen



Kohlenstoff-Ionen

# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

[www.teilchenwelt.de](http://www.teilchenwelt.de)

ORIGINALSCHAUPLATZ



SCHIRMHERRSCHAFT



PROJEKTLEITUNG



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

JOACHIM  
HERZ  
STIFTUNG



23.03.2017



# Diskussion / Fragen

