

# Forschungsmethoden in der Teilchenphysik I



DR. HANS RIEGEL-STIFTUNG

Philipp Lindenau, Claudia Behnke  
Dillingen | 04. – 06.10.2017



NETZWERK  
TEILCHENWELT

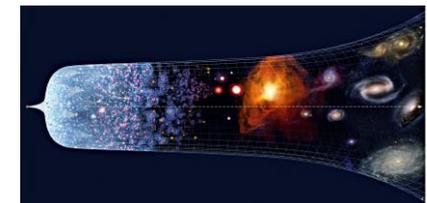
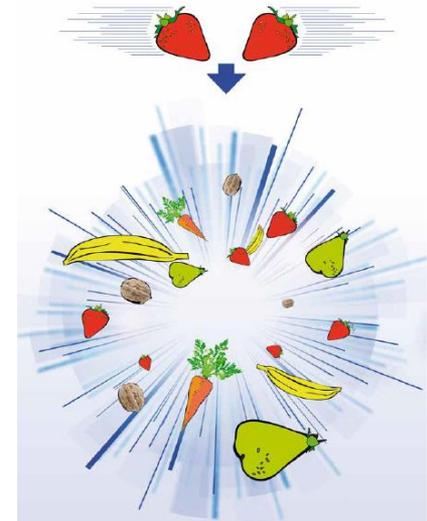
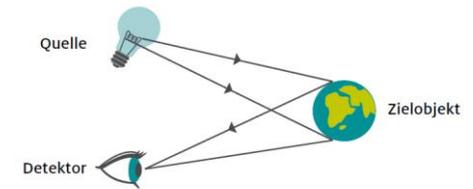
# Basierend auf Band 2:

- ▶ Forschungsziele
  - ▶ Beschleuniger
  - ▶ Detektoren
  - ▶ Zahlreiche Aufgaben & Lösungen
- 
- ▶ (Bald) Kostenfrei erhältlich
    - Online [www.teilchenwelt.de/tp](http://www.teilchenwelt.de/tp)
    - Druckexemplar Bestellbar bei Netzwerk Teilchenwelt



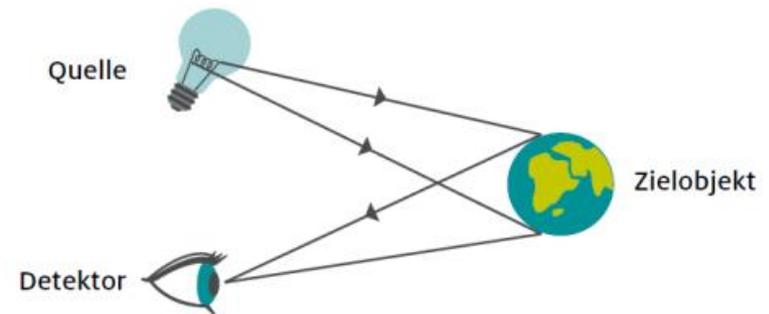
# Forschungsziele

- ▶ Strukturuntersuchungen
- ▶ Erzeugung bisher unbekannter Teilchen
- ▶ Erzeugung extremer Bedingung



# Strukturuntersuchungen

- ▶ Das Prinzip der Beobachtung von Objekten und Strukturen hat dabei immer drei Komponenten
  - Projektile, die aus einer Quelle auf das Zielobjekt treffen (z. B. Photonen aus einer Lichtquelle)
  - Das Zielobjekt, das die Projektile reflektiert oder streut (z. B. ein Ball)
  - Einen Detektor, der die gestreuten Projektile nachweist (z. B. Auge)



# Strukturuntersuchungen

- ▶ Auflösungsgrenze, hängt davon ab wie genau sich das Projektil lokalisieren lässt, mit dem das zu beobachtende Objekt abgetastet wird.
- ▶ Bei Licht entspricht diese der Wellenlänge
- ▶  $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h \cdot c}{E}$ 
  - Grenze für optisches Licht ~400 nm
  - Wie also kleinere Objekte auflösen?

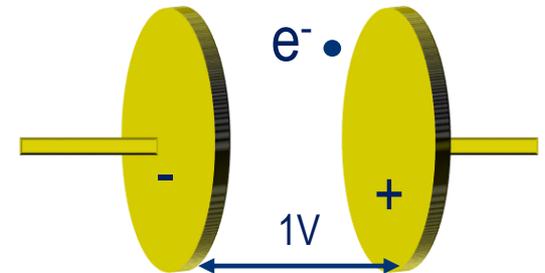
# Einschub: Elektronenvolt

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

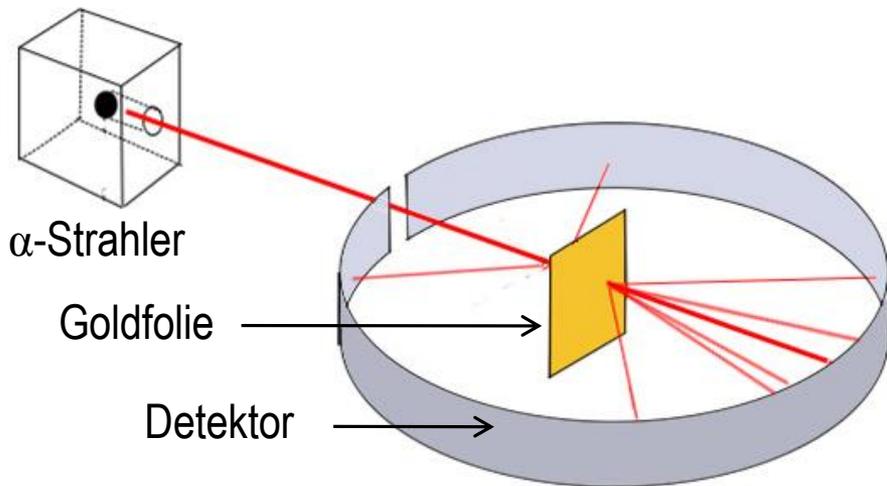
- $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$
- $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$
- $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$

- ▶ Wegen  $E=mc^2$  können Massen in  $\text{eV}/c^2$  angegeben werden! (c: Lichtgeschwindigkeit)

- Elektron  $0,5 \text{ MeV}/c^2$
- Proton  $938 \text{ MeV}/c^2 \sim 1 \text{ GeV}/c^2$
- Higgs-Teilchen  $\sim 125 \text{ GeV}/c^2$

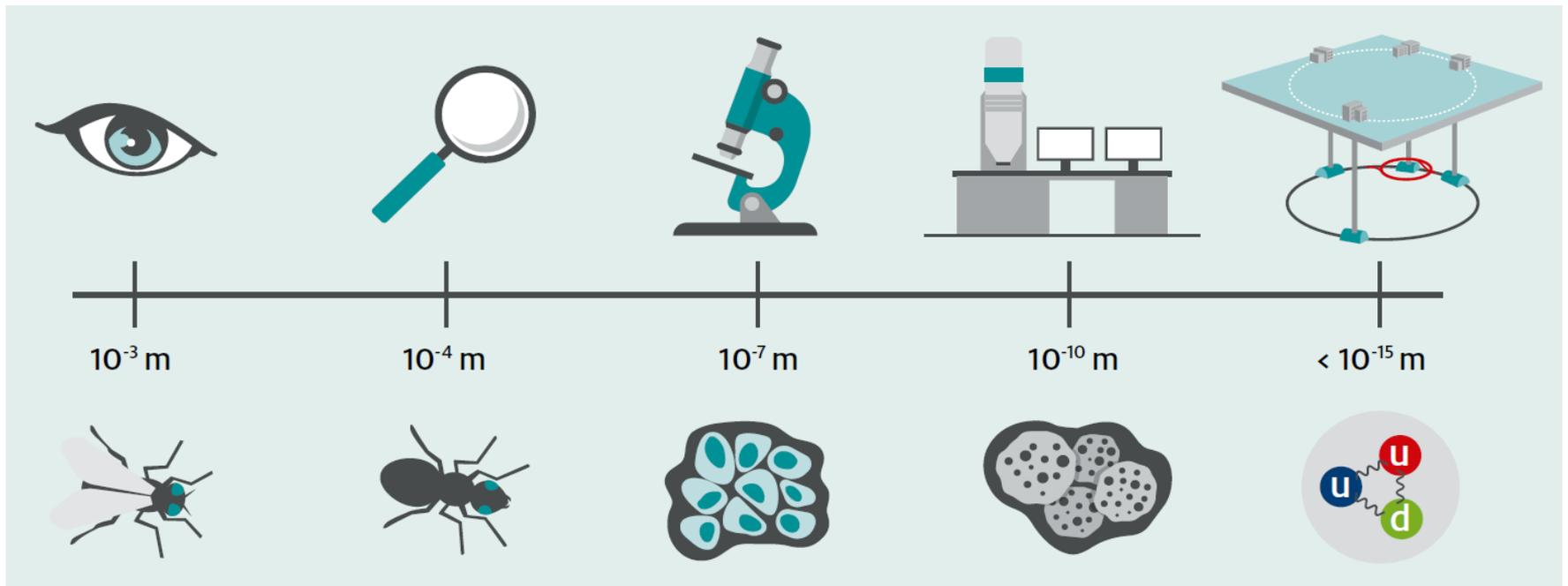


# Strukturuntersuchungen

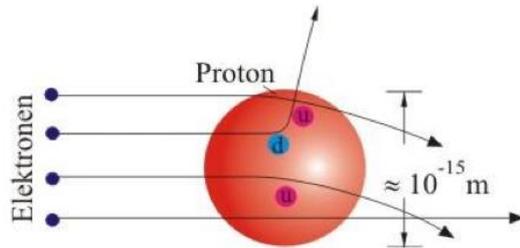


- ▶ Rutherford-Streuexperiment (1911)
  - Nachweis des Atomkerns
- ▶ Streuung von  $\alpha$ -Teilchen an Goldatomen
- ▶ Energie des  $\alpha$ -Teilchen einige MeV
- ▶  $\lambda = \frac{h \cdot c}{E} = \frac{200 \text{ MeV fm}}{\text{MeV}} = \sim 200 \text{ fm}$ 
  - Größe eines Protons  $\sim 1 \text{ fm}$
- ▶ Um kleine Strukturen aufzulösen benötigt man mehr Energie

# Strukturuntersuchungen



# Strukturuntersuchungen



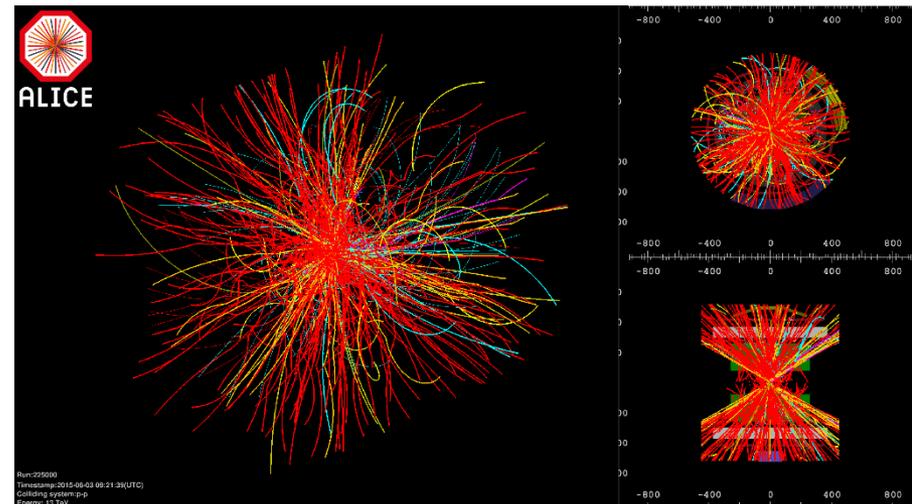
- ▶ Experiment am SLAC (1969)
  - Nachweis der Quarks
  - Nobelpreis 1990: Friedman, Kendall, und Taylor.
- ▶ Streuung von Elektronen an Protonen
- ▶ Elektronen Energie bis zu 50 GeV
- ▶  $\lambda = \frac{h \cdot c}{E} = \frac{200 \text{ MeV fm}}{50 \text{ GeV}} = \sim 0.01 \text{ fm}$
- ▶ Um (noch) kleiner Strukturen aufzulösen benötigt man (noch) mehr Energie



3,2 km

# Erzeugung „neuer“ Teilchen

- ▶ Teilchenphysik versucht (bisher unbekannte, meist schwere) Teilchen zu erzeugen
- ▶ Annahme: 2 Teilchen kollidieren, annihilieren und ihre totale Energie  $E_{\text{tot}} = E_{\text{kin}} + E_0$  steht zur Verfügung
- ▶ Elektronen + Positron mit je  $E_{\text{kin}} = 50\text{GeV}$ 
  - $\sim 100\text{GeV}$



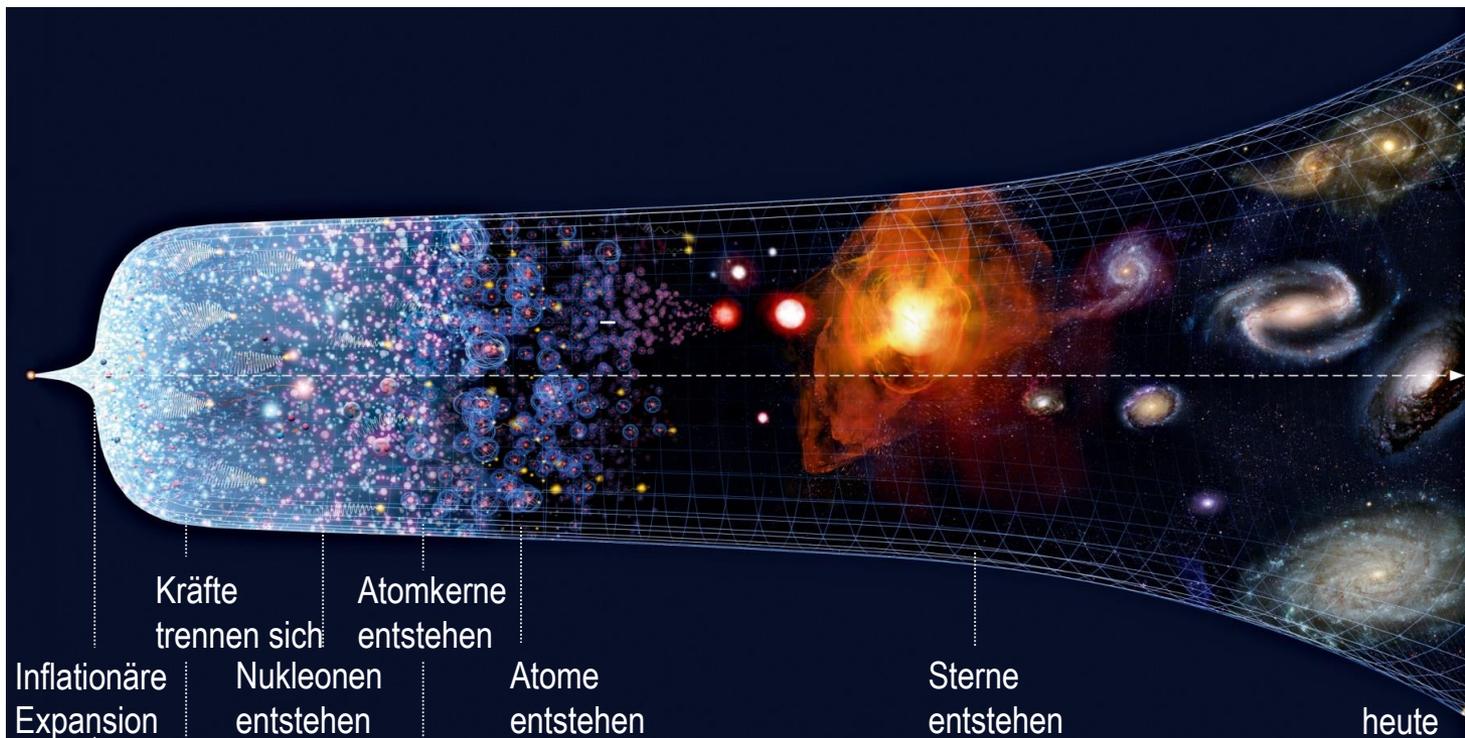
# Erzeugung „neuer“ Teilchen



- ▶ Entdeckung der  $W^\pm$  und  $Z^0$  Austauscheteilchen
- ▶ Massen vorhergesagt 1946 (Higgs)
  - $m_W: 83 \pm 3 \text{ GeV}$   $m_Z: 94 \pm 3 \text{ GeV}$
- ▶ Existierender Beschleuniger: SPS (CERN)
  - Protonenstrahl mit  $E_{\text{kin}} 400 \text{ GeV}$  😊
  - Strahl kollidiert mit festem Target
  - Zur Verfügung stehende Energie  $\sim \sqrt{E_{\text{kin}}}$  ☹
- ▶ Idee: Kollision von Proton von Antiproton!
  - Zur Verfügung stehende Energie  $\sim 530 \text{ GeV}$
  - Teilchen nachgewiesen: 20 Januar 1983
  - Nobelpreise für Carlo Rubbia und Luigi Di Lella

# Erzeugung extremer Bedingung

Urknall



Zeit



Energie



05.10.2017

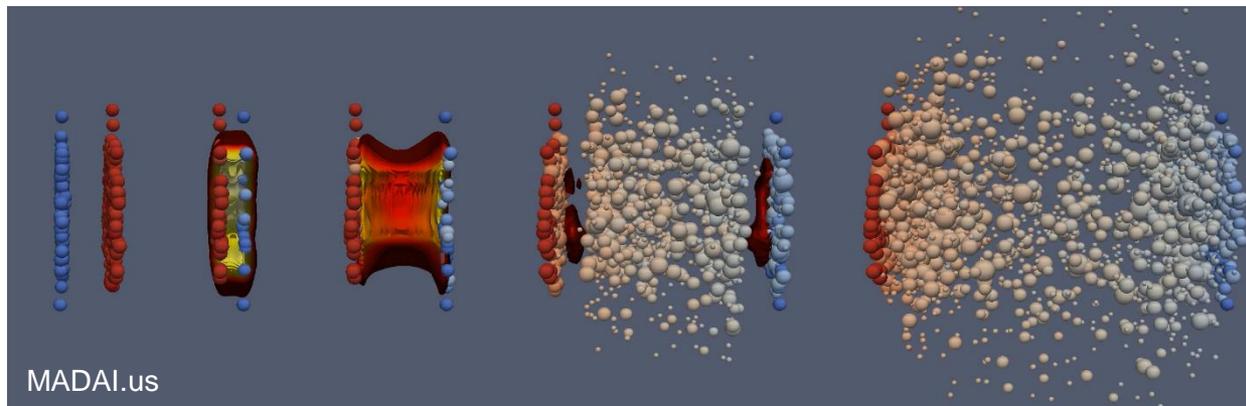
LHC-Energie

Forschung trifft Schule - Lehrerfortbildung Teilchenphysik - Dillingen

12

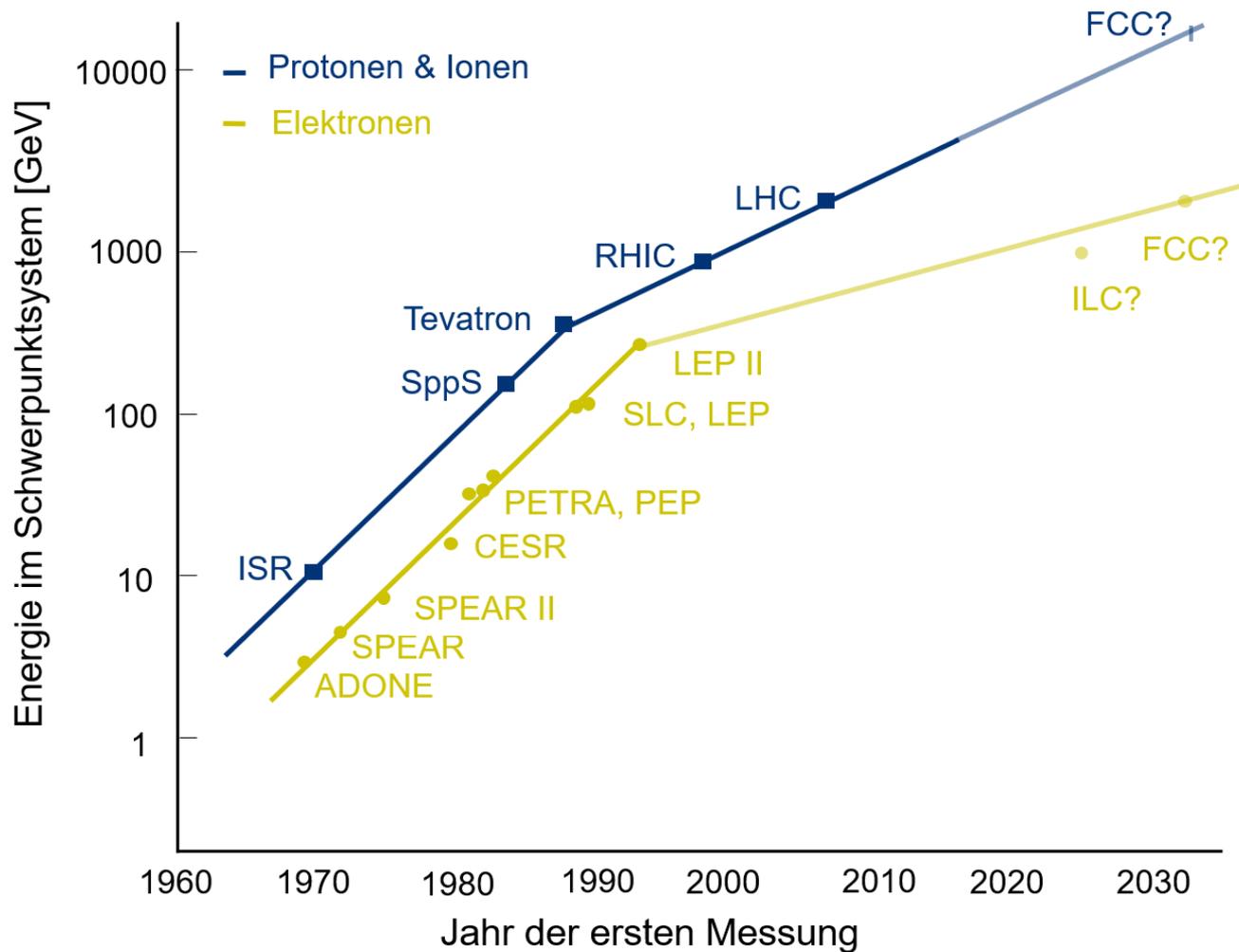
# Erzeugung extremer Bedingung

- ▶ In Schwerionenkollisionen werden Temperaturen und Dichten erzeugt die ähnlich extrem sind wie:
  - Kurz Nach dem Urknall
  - In Neutronensternen
- ▶ Momentaufnahmen einer solchen Kollision:



$\tau = 10^{-23}\text{s}$

# Beschleunigeranlagen



# Das CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire)

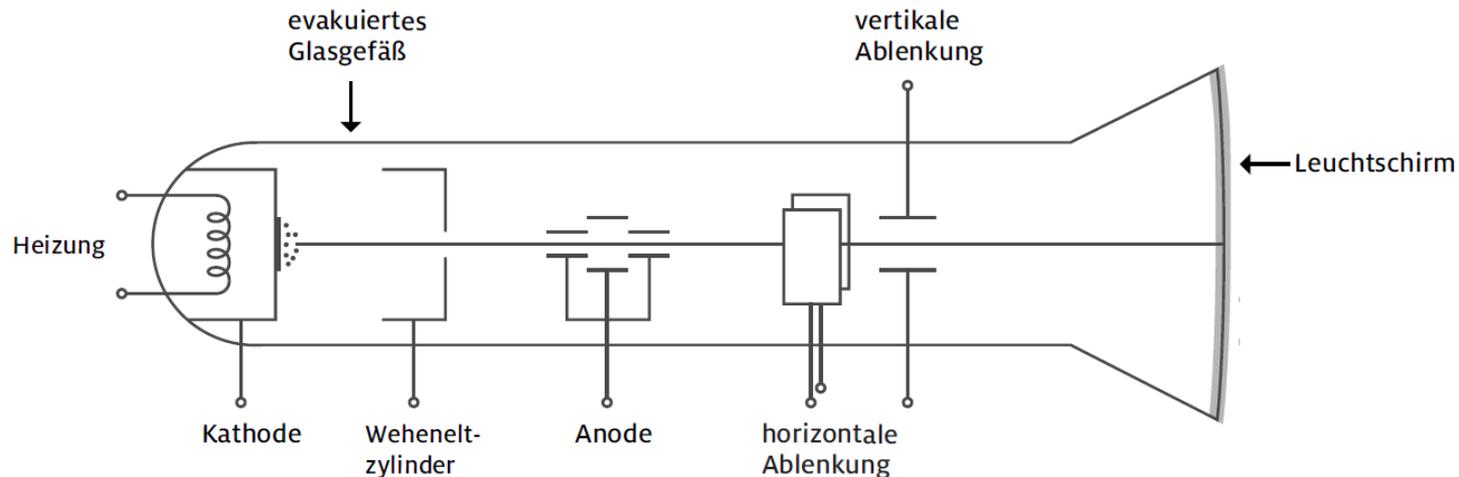
- ▶ Das größte Teilchenphysik-Forschungszentrum der Welt im Grenzgebiet zwischen der Schweiz und Frankreich
- ▶ Gegründet 1954
- ▶ Dort arbeiten
  - 12.500 Wissenschaftler
  - Aus 110 Ländern
- ▶ CERN's Jahresbudget 2016 = 1.1 Milliarde €
  - Entspricht 1 Cappuccino pro EU Bürger
  - Entspricht 1% des US Militärbudgets



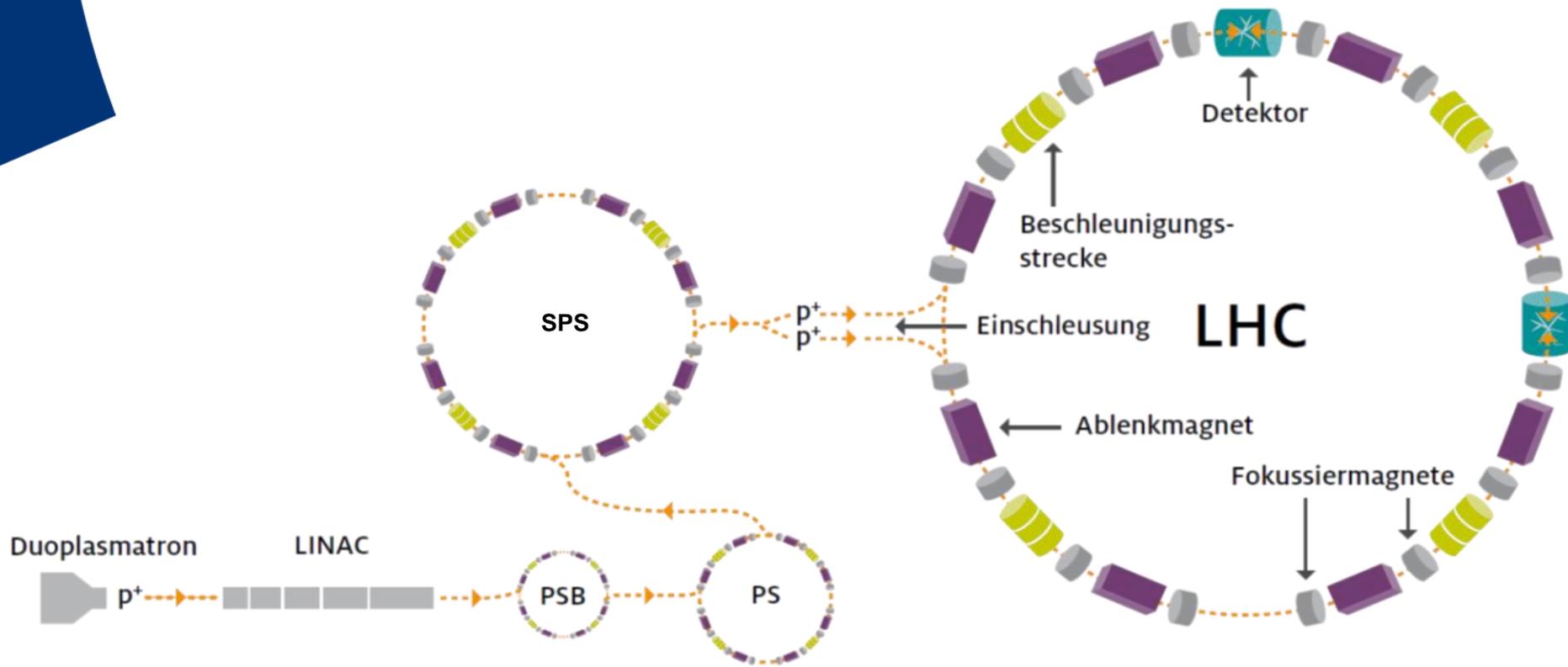
# Elektronenstrahlröhre

## ► Der einfachste Beschleuniger

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

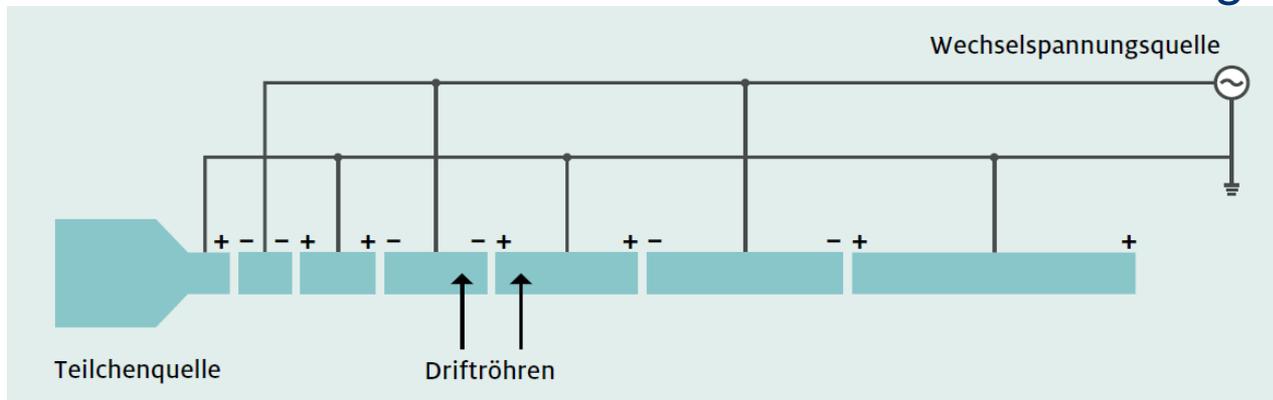


# Die Beschleuniger am CERN

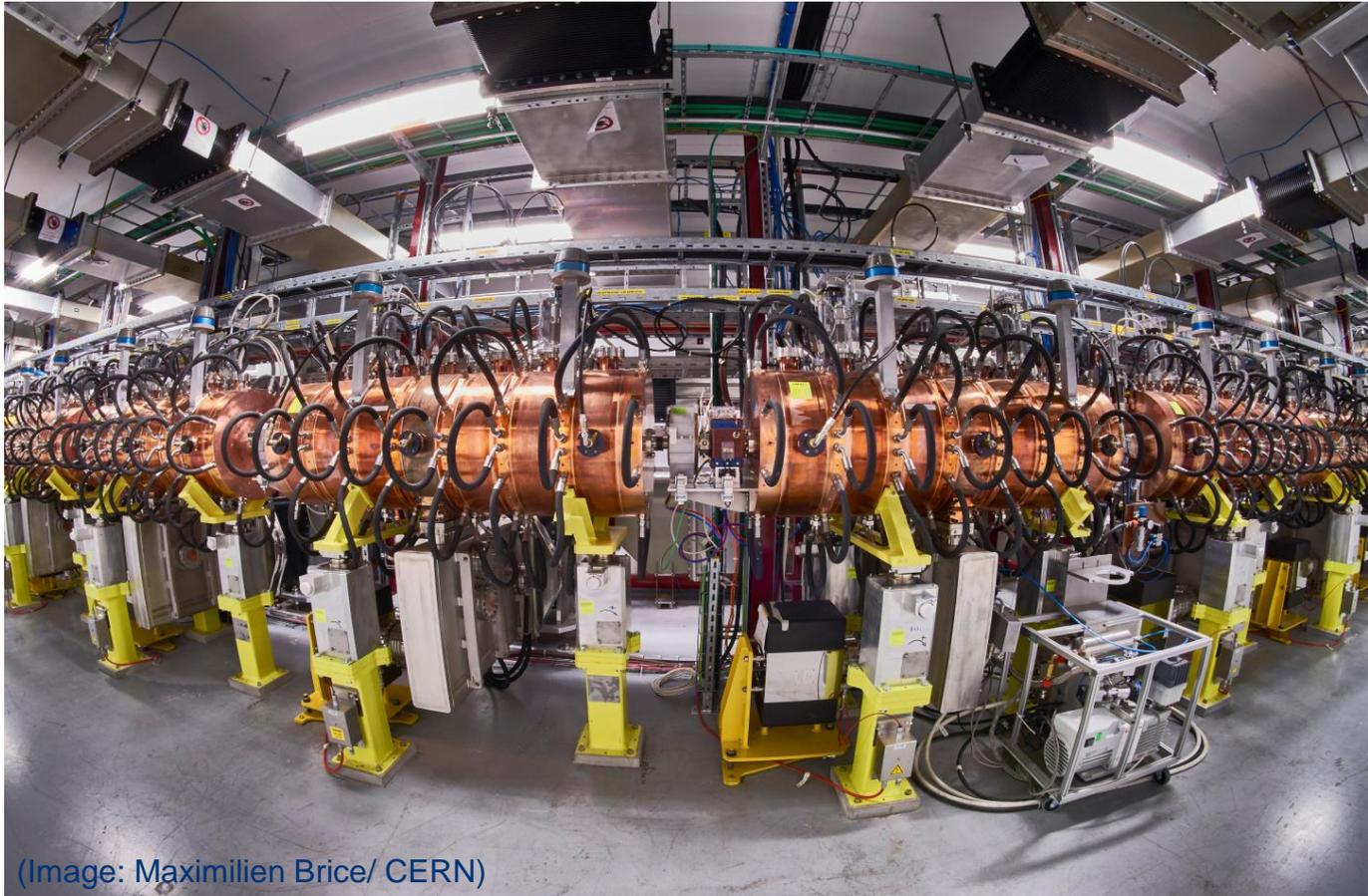


# Linearbeschleuniger

- ▶ Elektrisch geladenen Teilchen durchlaufen ein elektrisch „anziehendes“ Feld
- ▶ In Driftröhren sind diese Felder abgeschirmt
- ▶ Die Polung des elektrischen Feldes während des Durchfliegens umgekehrt
- ▶ Das Teilchen sieht erneut ein anziehendes Feld
- ▶ Teilchen werden schneller → Driftröhren werden länger



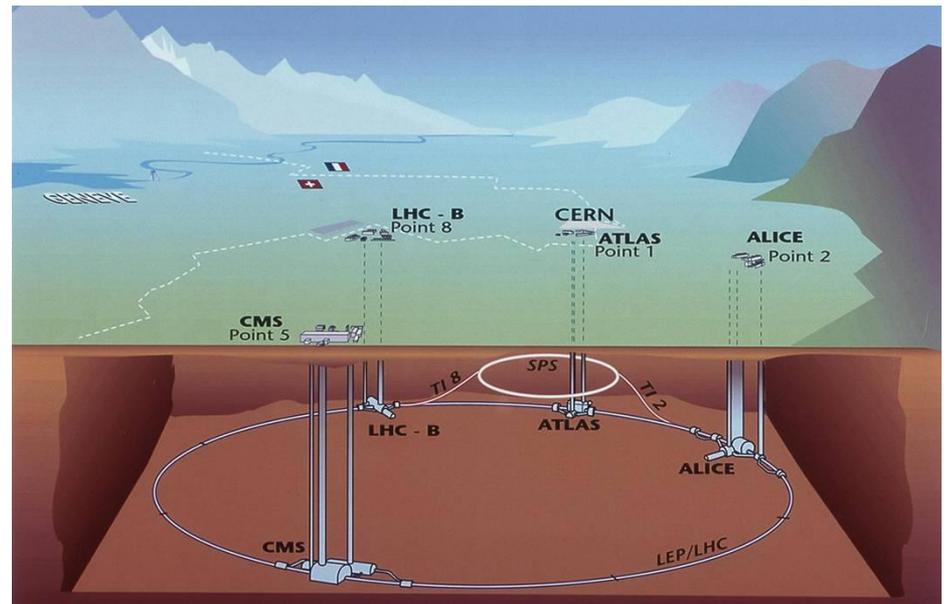
# Der LINAC 4 am CERN



(Image: Maximilien Brice/ CERN)

# Der LHC (Large Hadron Collider)

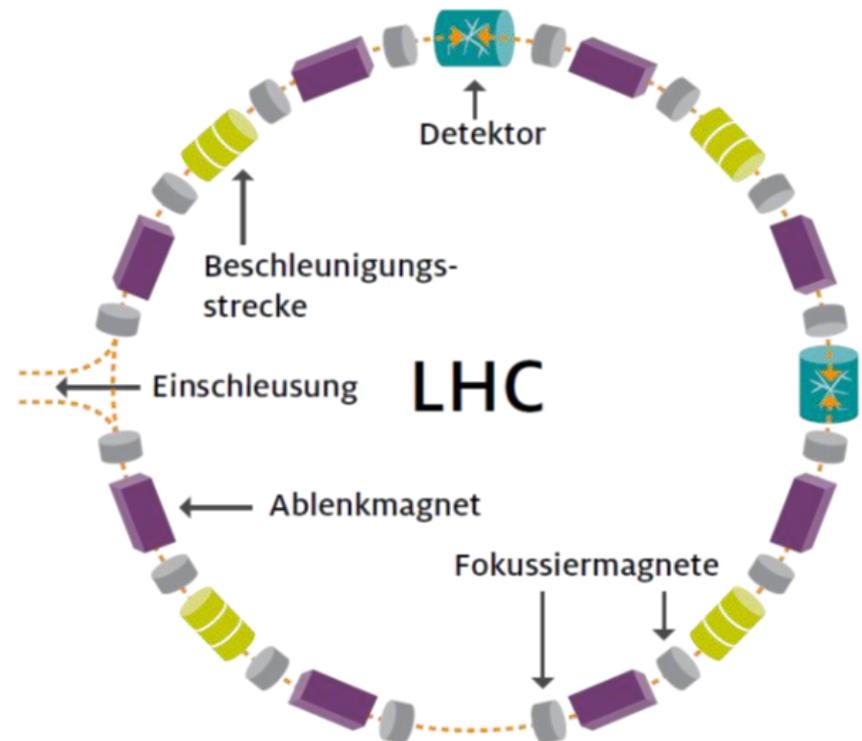
- ▶ 27 km Umfang
- ▶ Bis zu 175m tief in der Erde
- ▶ Große Experimente:
  - ATLAS
  - CMS
  - ALICE
  - LHCb



Man kann den LHC  
in google street view besuchen

# 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 )



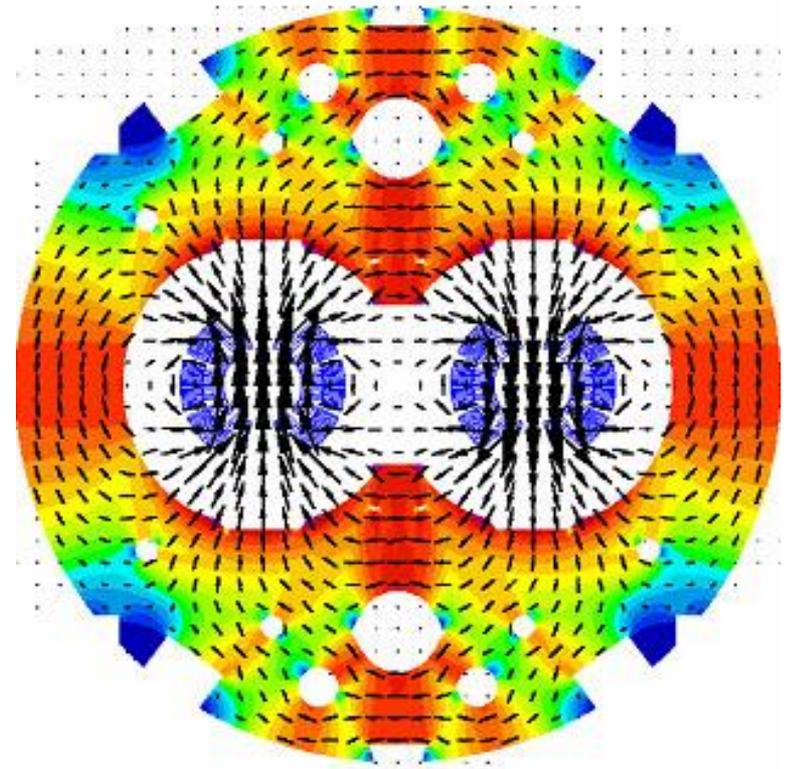
# LHC Beschleunigungsstrecke

- ▶ Zur Beschleunigung dienen 16 supraleitende Hochfrequenz-Hohlraumresonatoren (je 8 pro Strahlrohr).
- ▶ Die LHC Kavitäten erreichen einen Beschleunigungsgradient von bis zu 5.5 MV pro Meter.



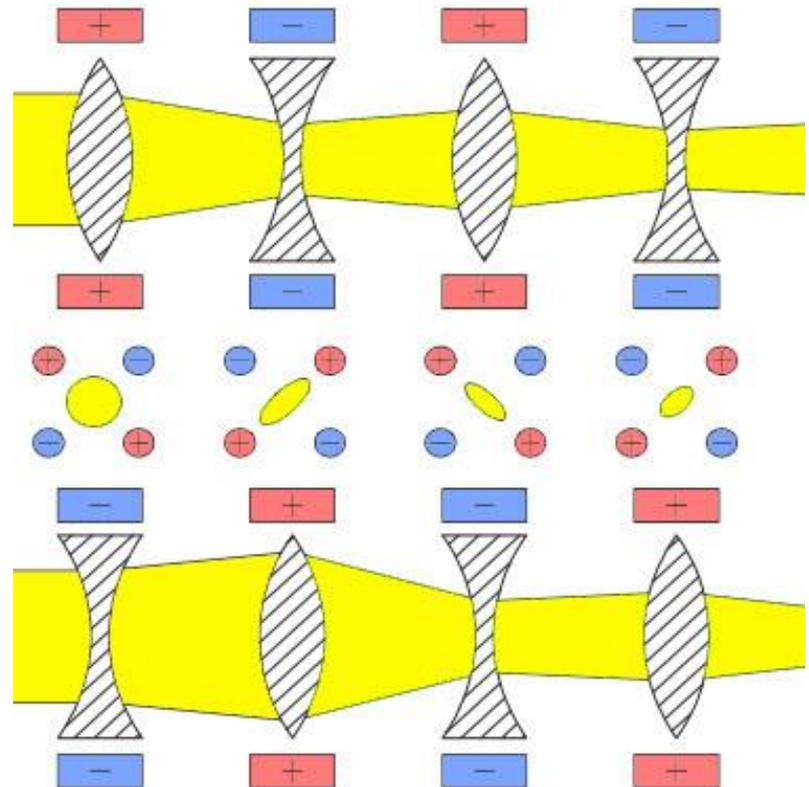
# LHC Dipol Magnete

- ▶ 1232 Dipolmagnete mit kupferverkleideten supraleitende Niob-Titan Leitern
- ▶ Jeder Magnet ist 15 Meter
- ▶ Die Betriebstemperatur wird durch das Kühlsystem auf 1.9 K gehalten.
- ▶ Die max. magnetische Flussdichte beträgt 8.36 Tesla.

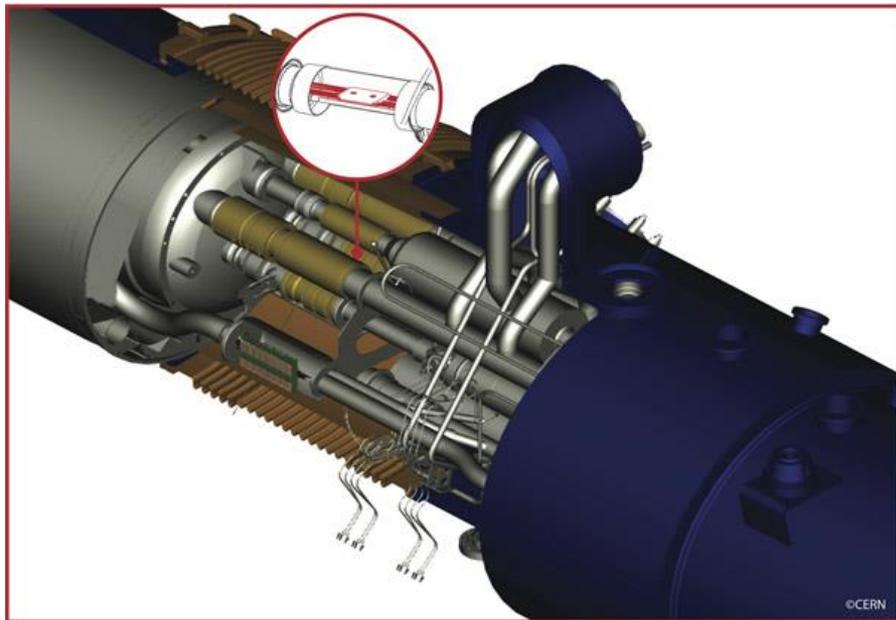


# Ein Quadrupolmagnet

- ▶ Besteht aus vier Polen, von denen jeweils zwei gegenüberliegende, gleichpolig ausgerichtet sind
- ▶ Fokussierung ist notwendig, da die Teilchen sich gegenseitig durch die abstoßen
- ▶ Wirkt in Flugrichtung immer durch zwei gegenüberliegende Pole fokussierend, während die anderen zwei Pole defokussierend wirken.
- ▶ Um eine radiale Fokussierung zu erreichen, werden mehrere Quadrupolmagnete, hintereinander angeordnet.



# Zwischenfall 19. September 2008

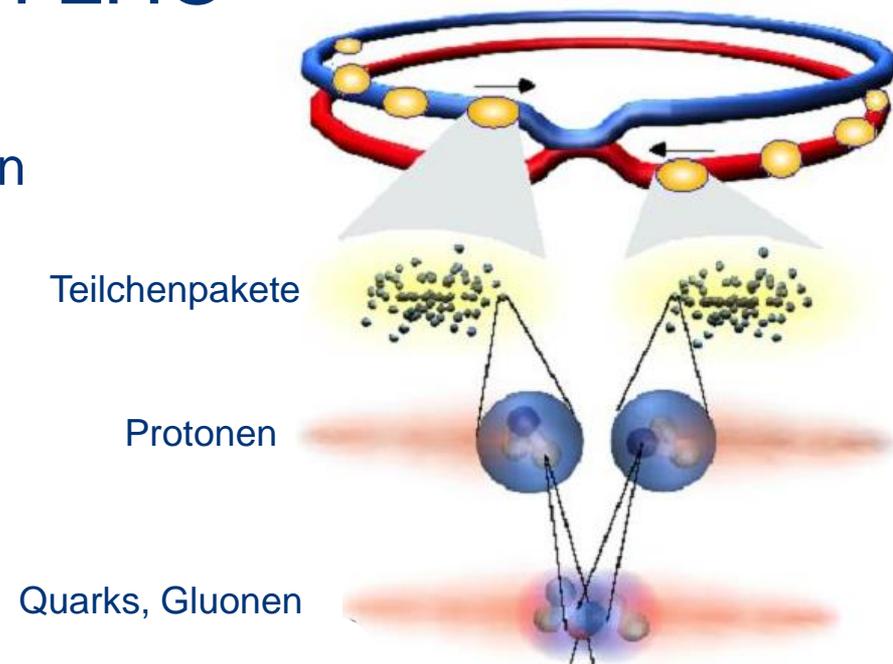


# LHC Fun Facts

- ▶ 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:  $1.013 \times 10^{-10}$  mbar
  - Benötigte Pump Zeit: 2 Wochen
- ▶ Temperaturen höher als in der Sonne
  - Temperatur in einer Schwerionenkollision:  $5.5 \times 10^{12}$  K
  - Temperatur Sonne:  $15 \times 10^6$  K

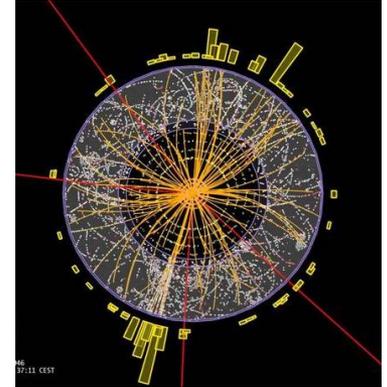
# Teilchenkollisionen im LHC

- ▶ 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!



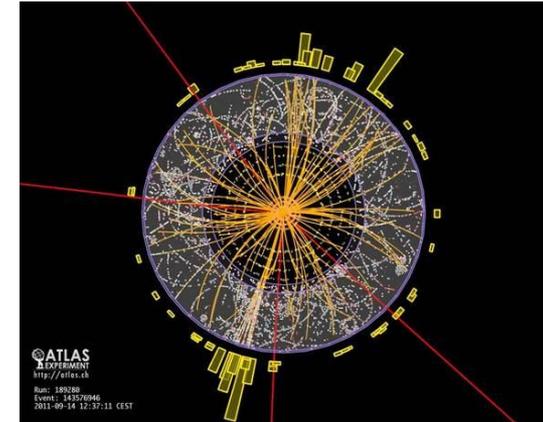
# Teilchenkollisionen im LHC

- ▶ 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!



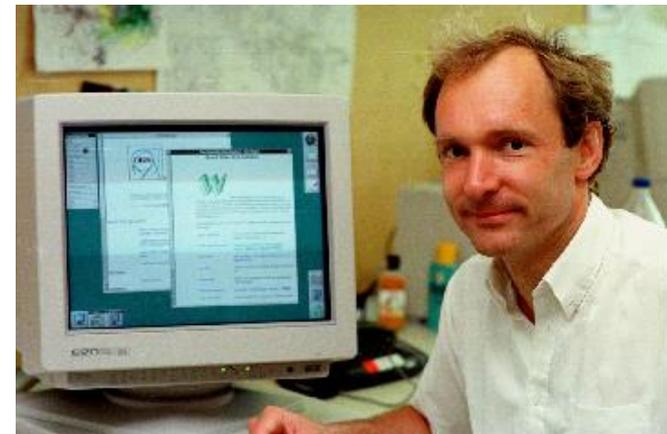
# Wohin mit so vielen Daten?



Server Farm im 1450 m<sup>2</sup> 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



# Besuche am CERN

## ► Was ist besuchbar

- Globe Ausstellung (ohne Anmeldung)
- Microcosm Ausstellung (ohne Anmeldung)
- Visiting points auf dem CERN Gelände (Buchbar vorab)
- Kostenfrei
- Deutschsprachige Guides
- Kombinierbar mit Besuch beim S'Cool Lab:
  - Nebelkammer Workshops
  - S'Cool Lab Day



Vielen Dank für Ihre  
Aufmerksamkeit!

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

PROJEKTLEITUNG



PARTNER



SCHIRMHERRSCHAFT



FÖRDERER

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



DR. HANS RIEGEL-STIFTUNG



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



NETZWERK  
TEILCHENWELT

# Diskussion / Fragen



# „The CERN Weasel“

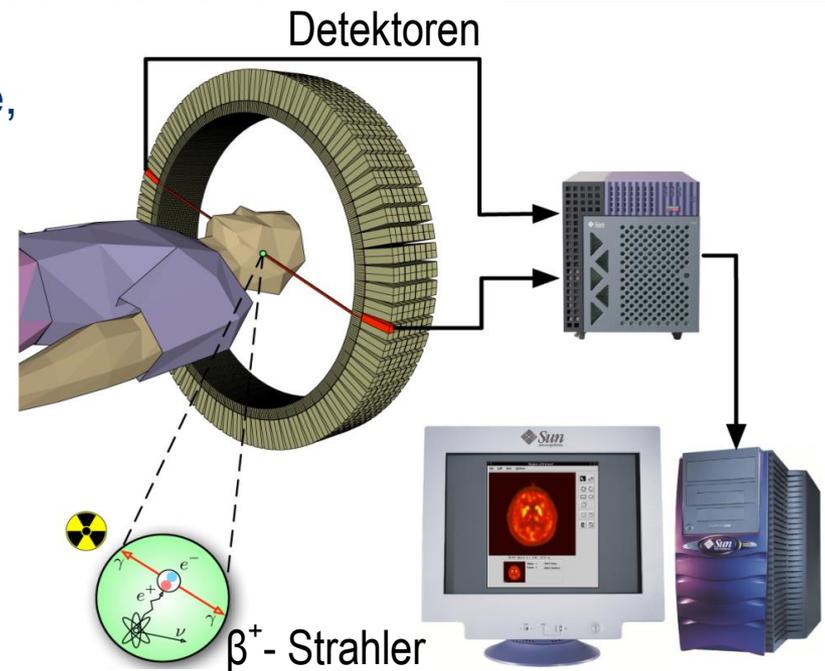
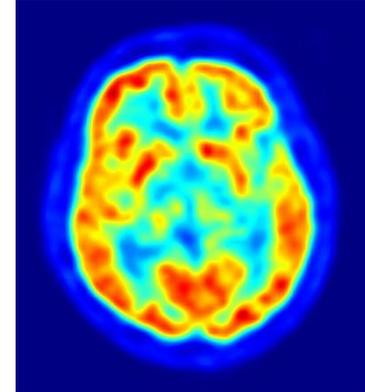
- ▶ Das Wiesel schaffte es im November 2016 den gesamten LHC auszuschalten, indem es in eine 18,000 Leitung biss.
- ▶ Jetzt Ausstellungstück im Rotterdam Natural History Museum
- ▶ Das war der 2. Vorfall dieser Art



# Positronen-Emissions-Tomografie

## ► 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



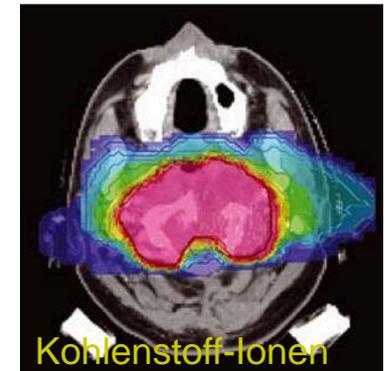
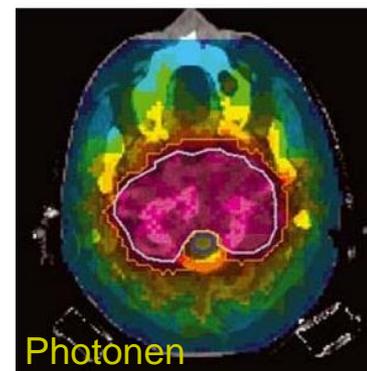
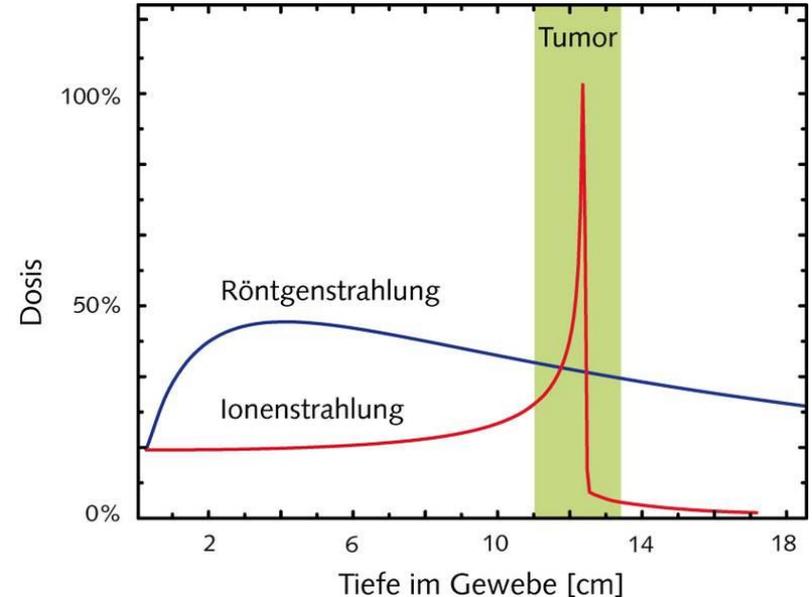
# Tumorthherapie mit Hadronen (meist C)

## ► 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





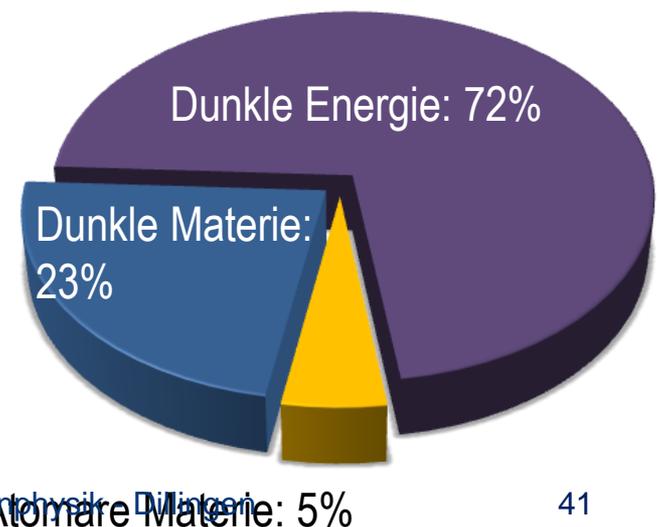
# The SppS

- ▶  $\sqrt{s} = 540 \text{ GeV}$
- ▶ 3 bunches protons, 3 bunches antiprotons,
- ▶  $10^{11}$  particles per bunch
- ▶ Luminosity =  $5 \times 10^{27} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$
- ▶ first collisions in December 1981

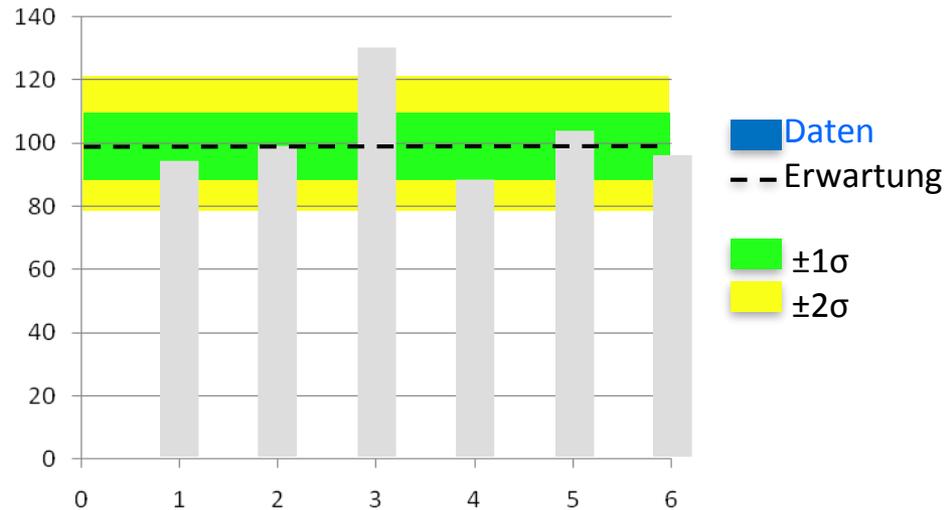
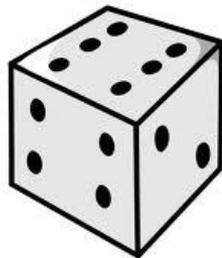


# Was ist Dunkle Materie?

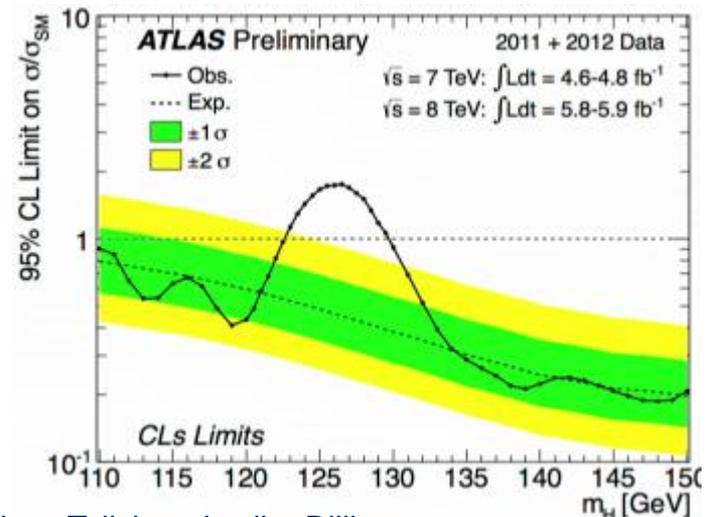
- ▶ Beobachtungen zeigen, dass es nicht nur atomare Materie geben kann:
  - Galaxien rotieren zu schnell: Viel mehr Materie wäre nötig!
  - Die Strukturen von Galaxienhaufen sind nur mit viel mehr Materie zu erklären.
  - Es muss eine bisher unbekannte Materieform geben: Dunkle Materie.
- ▶ Das Universum 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.



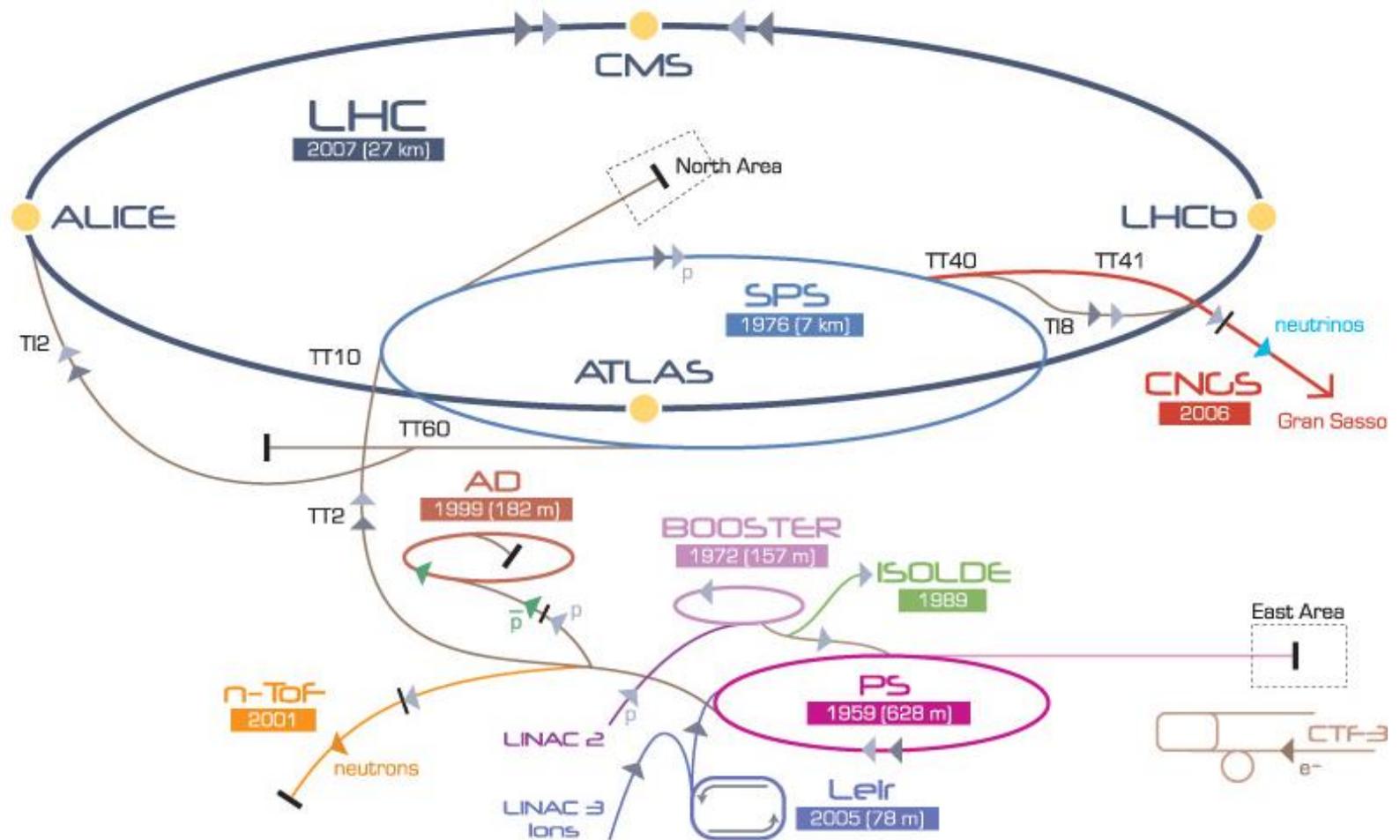
# Warum so viele Kollisionen?



- ▶ Ist der Würfel manipuliert oder nicht?
- ▶ Existiert das Higgs-Teilchen oder nicht?



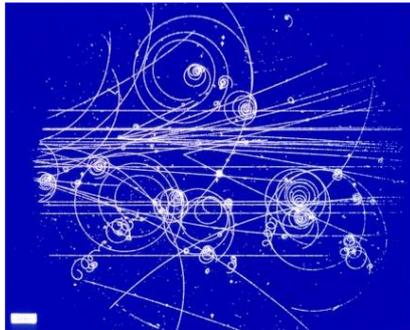
# Die Beschleuniger am CERN (Realität)



# Wie weist man Elementarteilchen nach?

## ▶ Bildgebende Detektoren

- Nebelkammer
- Blasenkammer



## ▶ sichtbare Teilchenspuren

## ▶ Elektronische Detektoren

- ATLAS-Detektor
- Geigerzähler



## ▶ elektrische Signale

- ▶ Eigenschaften der Teilchen werden daraus rekonstruiert

# LHC Kavitäten

THE USE OF SUPRACONDUCTIVITY TO INCREASE PERFORMANCES AND CONSIDERABLY REDUCE ELECTRICITY CONSUMPTION

