

# Grosse Beschleuniger für kleinste Teilchen

- ▶ Fragen an die experimentelle Elementarteilchenphysik
- ▶ Konzepte der Beschleuniger
- ▶ Beispiel: Der LHC am Cern
- ▶ Erkenntnisgewinne: Wo stehen wir? - Was erwarten wir?

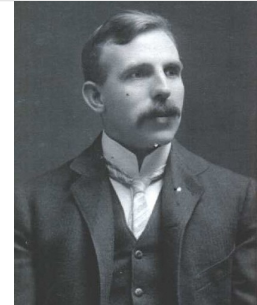
# Experimentelle Forschung mit Hilfe von Teilchen - Beschleunigern

2 Bereiche:

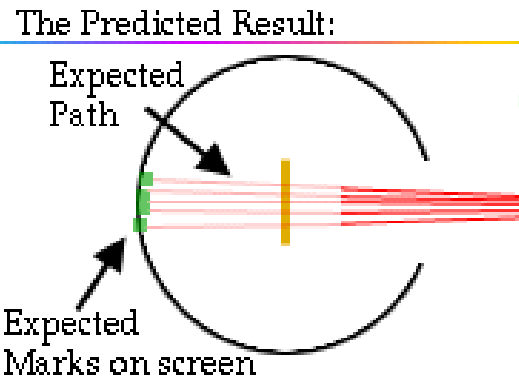
- Untersuchen der inneren Struktur der Materie
- Entdecken elementarer Teilchen, Messung derer Eigenschaften

# Untersuchung von Strukturen: Goldfolienexperiment: Interpretation von Rutherford 1911

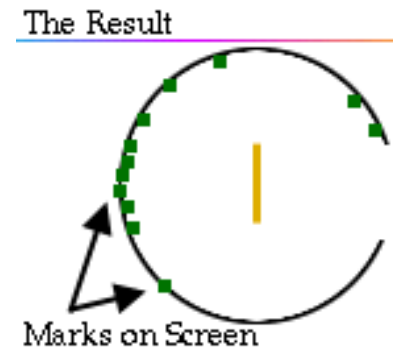
Experiment von Geiger und Marsden  
in Manchester 1909:  
Schiesse  $\alpha$  Teilchen auf Goldfolie



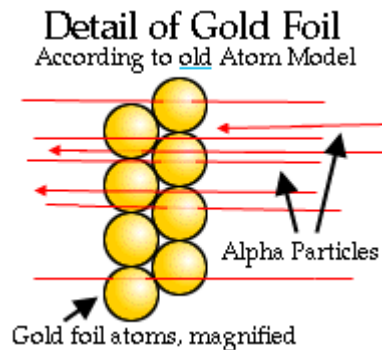
erwartet:



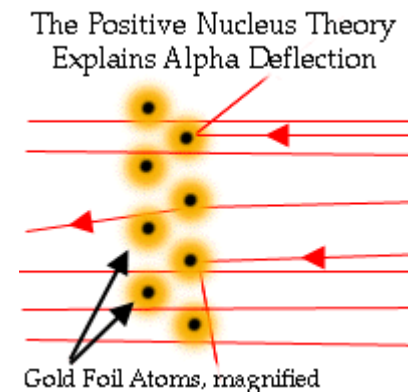
beobachtet:



"plum pudding  
model"  
(J.J.Thomson):

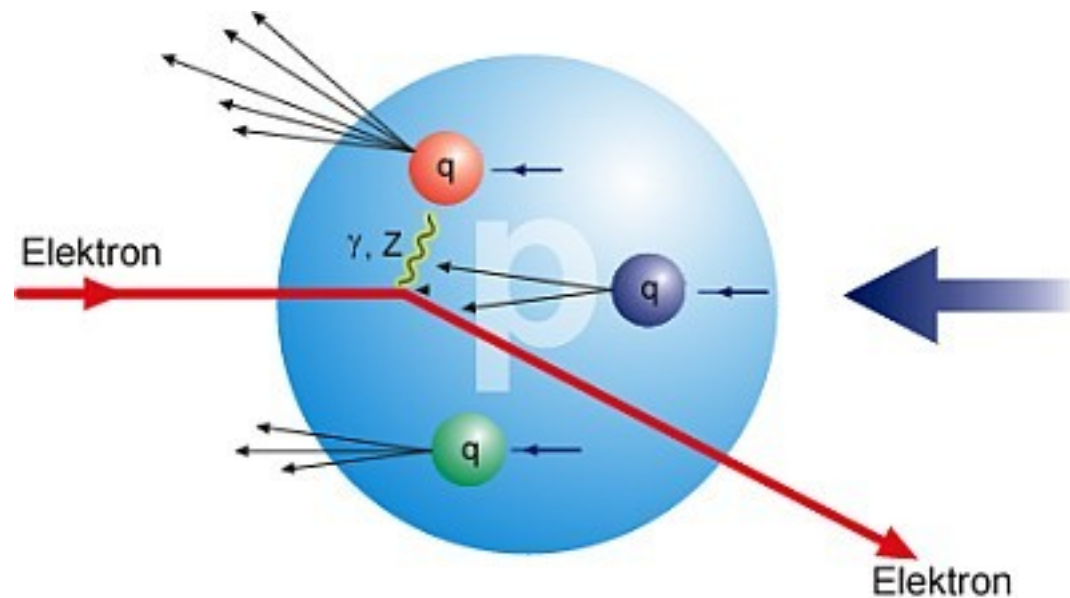


Rutherfords  
Schlussfolgerung:  
Es gibt einen  
kleinen, positiv  
geladenen Atomkern



# Untersuchung von Strukturen heute: Tiefinelastische Streuung

Experimente am Elektron – Proton Collider HERA  
am Teilchenphysiklabor DESY  
in Hamburg 1992 bis 2007



Aus was besteht das Proton?

→ Aus Quarks und Gluonen

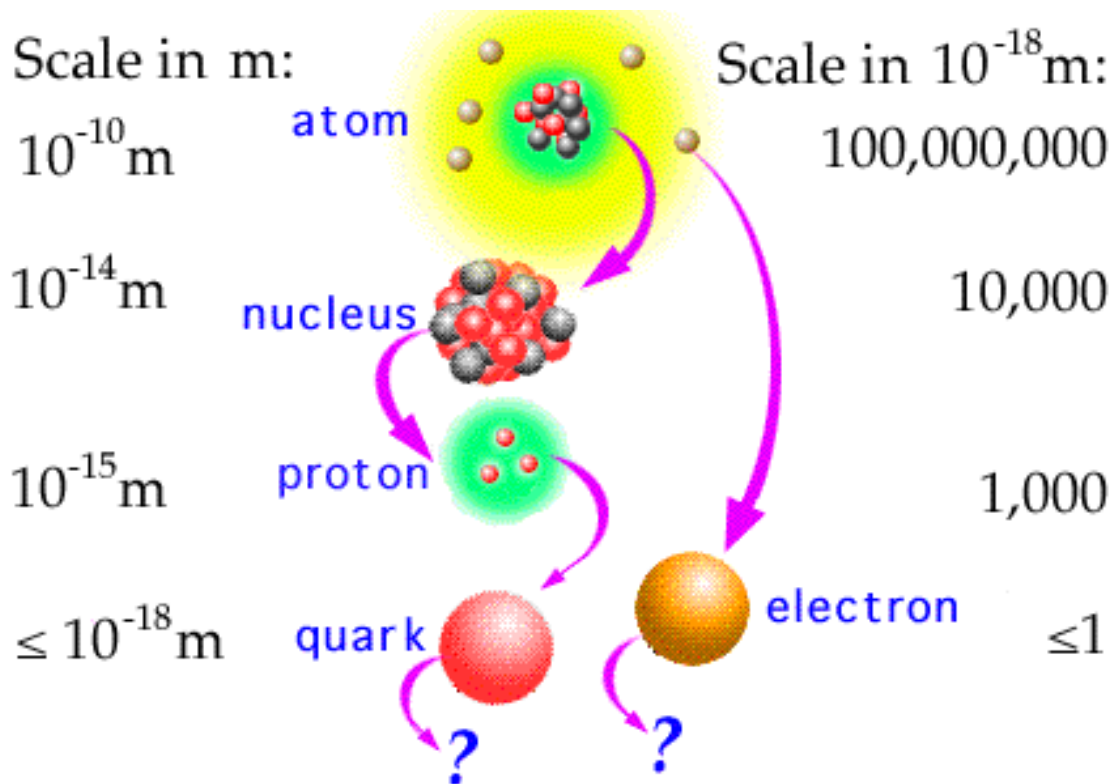
# Untersuchung von Strukturen:

## Was wir bis heute gelernt haben

Atome bestehen aus Elektronen und Kernen:  
**Elektrische Kraft**

Kerne bestehen aus Protonen und Neutronen

Protonen bestehen aus Quarks und Gluonen  
**Starke Kraft**



# Elementare Teilchen: Welche Teilchen kennen wir heute?

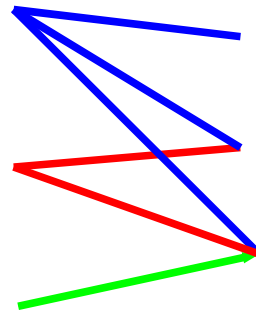
Was ist ein elementares Teilchen?

- ein lokalisierbarer Zustand (im Sinne der Quantenmechanik: unscharfer Ort, Zeit, Energie...)
- bestimmte Eigenschaften (zum Beispiel Masse, Drehimpuls, Ladung, ...)
- keine innere Struktur beobachtbar

Wir kennen heute als **Teilchen**:

- Quarks: up, charm, top  
down, strange, bottom
- geladene Leptonen:  
Elektronen, Muonen, Tauonen
- Neutrinos (3 unterschiedliche)

Sie  
spüren



Wir kennen heute als **Wechselwirkungen**  
(grundlegende Kräfte)

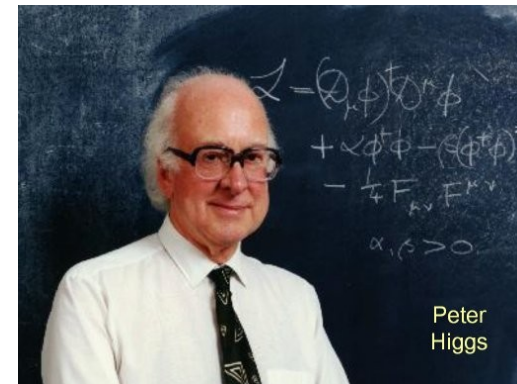
- starke WW
- elektromagnetische WW
- schwache WW

(Gravitation)

Relativ präzise und konsistente Beschreibung durch Theorie,  
basierend auf der Quantenfeldtheorie (**Standardmodell der Teilchenphysik**)  
(Typische Genauigkeiten Prozent bis Promille)

# Wieso sind wir nicht zufrieden mit dem Standardmodell?

- Das Higgs Teilchen wurde nicht beobachtet,  
(wird benötigt, um die Massen der Teilchen zu erklären)
- Ultraviolett Divergenzen für die Higgs Masse
- Wieso haben die Wechselwirkungen verschiedene Stärken?
- Die Theorie hat ziemlich viele, scheinbar willkürliche Konstanten
- Aus was für Teilchen besteht die "Dunkle Materie"?

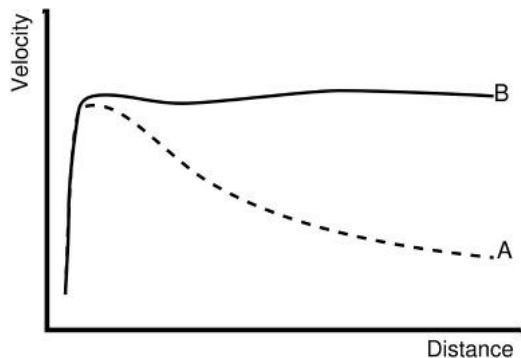
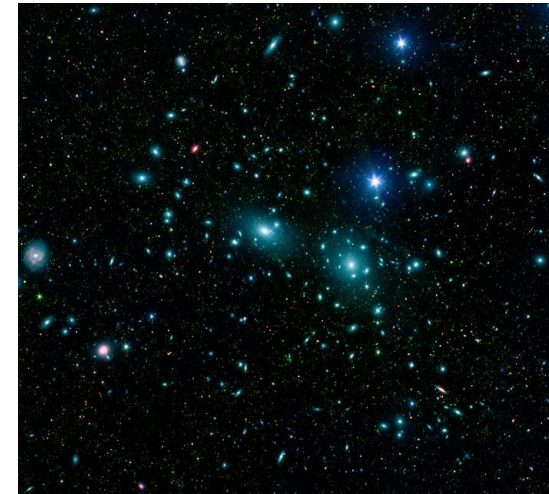


# Dunkle Materie: erstmalig postuliert von F. Zwicky am CalTech



1933 beobachtete Zwicky die Rotations -  
Geschwindigkeiten der Galaxien  
im Galaxienhaufen der "Coma Berenice":

Stimmt nicht mit dem Gravitationsgesetz  
von Newton überein  
→ braucht mehr Masse



Seit 1959 auch Messungen der Rotation von Spiralgalaxien

Kurve B: gemessen  
Kurve A: erwartet

→ Es muss noch mehr Materie geben, als wir sehen.

Heute: verschiedene Experimente zur direkten Suche nach Teilchen der dunklen Materie



## Dunkle Materie:

direkte Evidenz beobachtet in 2006



Zwei Galaxienhaufen  
durchquerten einander

"Bullet Cluster"

**rot:** Verteilung der  
leuchtenden Masse,  
beobachtet in der  
Röntgenstrahlung

**blau:** Verteilung der  
Gesamt-Masse  
beobachtet durch  
Gravitationslinseneffekt

**Weitere Evidenzen** für "dunkle Materie" im Universum

- Fluktuationen der 2.7 K Hintergrundstrahlung
- Struktur – Bildung

**Aus was für Teilchen  
besteht die dunkle Materie?**

## Zusammenfassung:

### Fragen an die experimentelle Elementarteilchenphysik

Welches sind die Strukturen der Materie?

Atome, Atomkerne, Elektronen

Protonen, Neutronen, Kraftfelder innerhalb der Protonen, Quarks

Was gibt es für elementare Teilchen und Wechselwirkungen?

Standardmodell beschreibt:

6 Quarks, 6 Leptonen,

El.magn, schwache, starke Wechselwirkung

Aktuell offene Fragen:

Wo ist das Higgs?

Aus was besteht dunkle Materie?

Mathematische Probleme mit dem Standardmodell

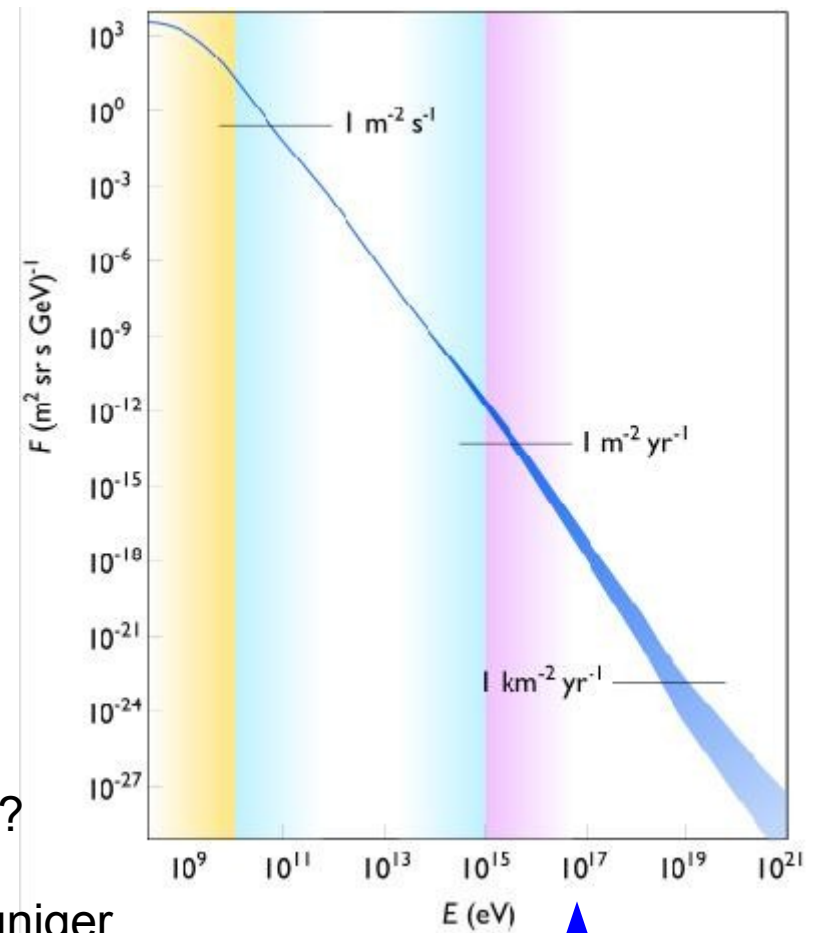
# Methoden der experimentellen Elementarteilchenphysik: Messungen mit Hilfe kosmischer Strahlung

entdeckt von Hess (Innsbruck) in 1912

## Protonen aus dem Universum

- stammen von der Sonne (gelb),  
aus unserer Galaxie (blau),  
aus anderen Galaxien (rot)
  - stoßen mit atmosphärischen Atomen  
zusammen.  
→ Es werden neue Teilchen kreiert  
(beobachtet seit 1937)
- Heute wieder verschiedene Experimente  
am Boden und auf Satelliten:
- Wie kommt das Spektrum zustande?
  - Welche Teilchen kommen vor in der Strahlung?

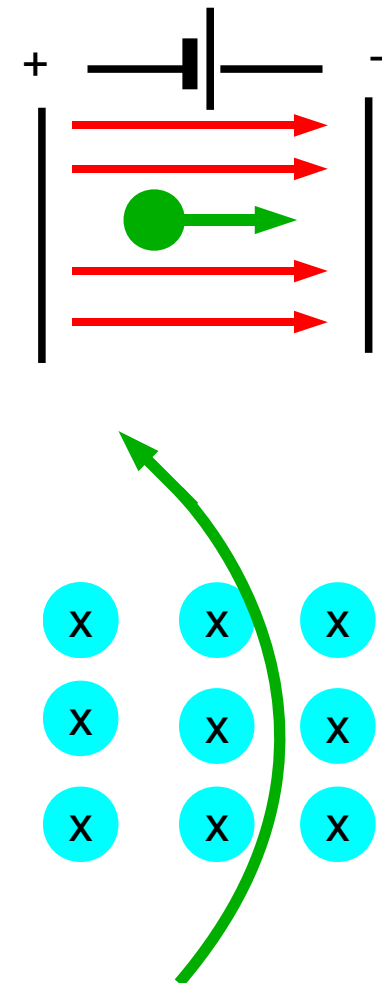
Aber es gibt viel zu wenige Teilchen → Beschleuniger



# Beschleuniger – basierte Teilchenphysik

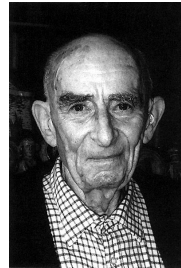
Ein Beschleunigeranlage zur Anwendung in der experimentellen Teilchenphysik besteht aus:

1. geladene Teilchen erzeugen: **Quelle**  
Es kommen in Frage:  $e^-$ ,  $e^+$ ,  $p$ , Anti- $p$ , (Muonen)
2. **Teilchen** auf hohe Energie **beschleunigen**  
z.B. Linearbeschleuniger, Synchrotron  
Prinzip: Beschleunigen mit **elektrischen Feldern**  
Führen mit **magnetischen Feldern**
3. Teilchen kollidieren mit ruhendem Material (**fixed target**)  
oder mit anderen Teilchen (**Collider**)
4. **Detektoren** messen die entstehenden Reaktionsprodukte

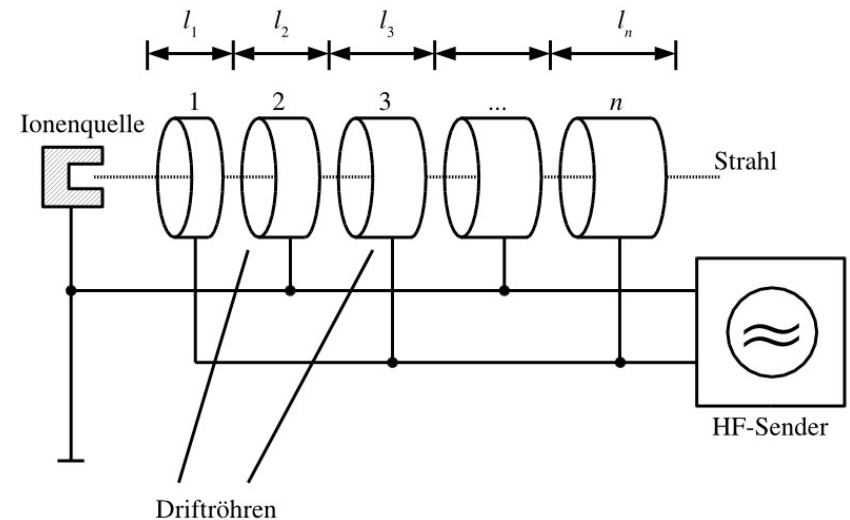


# Beschleuniger: Linearbeschleuniger

- Rolf Wideröe 1902 - 1996
- Tit.prof. an der ETHZ
- Dr. h.c. von der med. Fak. der UniZ
- ab 1946 bei BBC baute er Betatrons für medizinische Zwecke
- erste Installation im Kantonsspital Zürich.



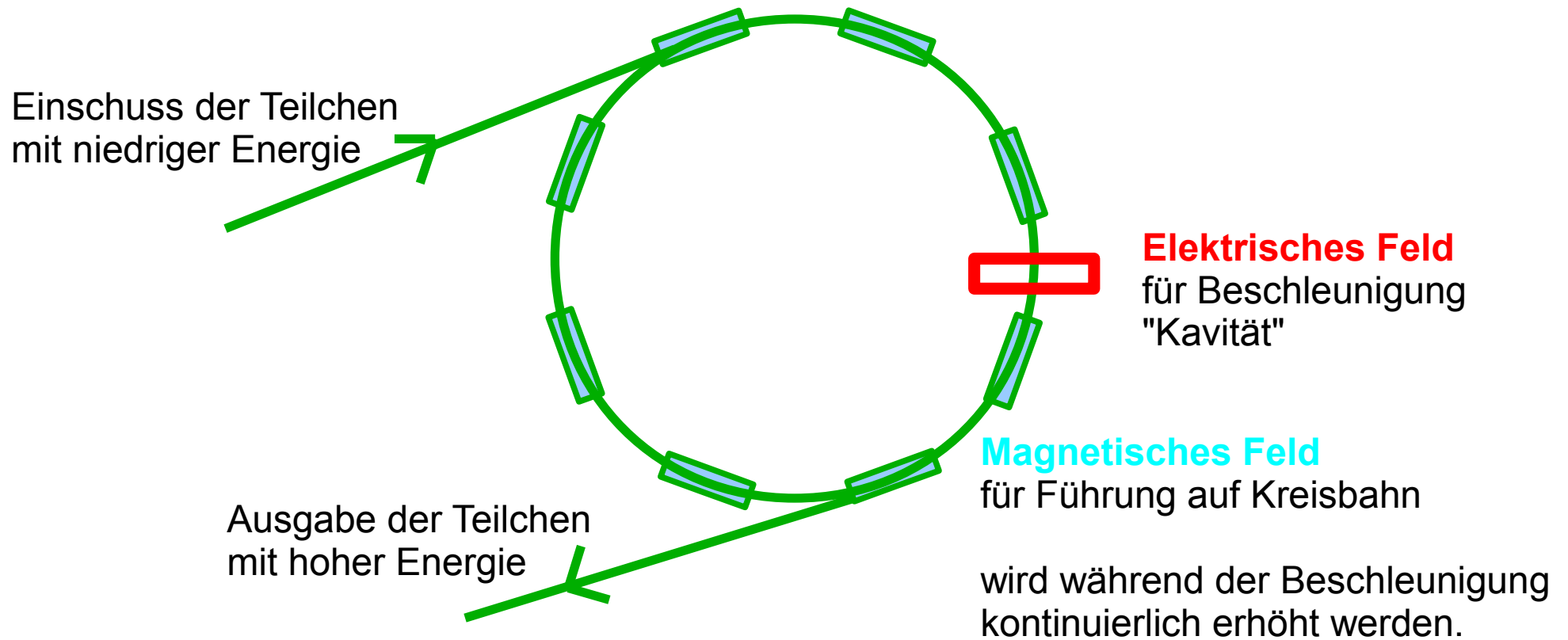
LINAC - Konzept von Rolf Wideröe  
(erstmalig gebaut in Aachen 1928)



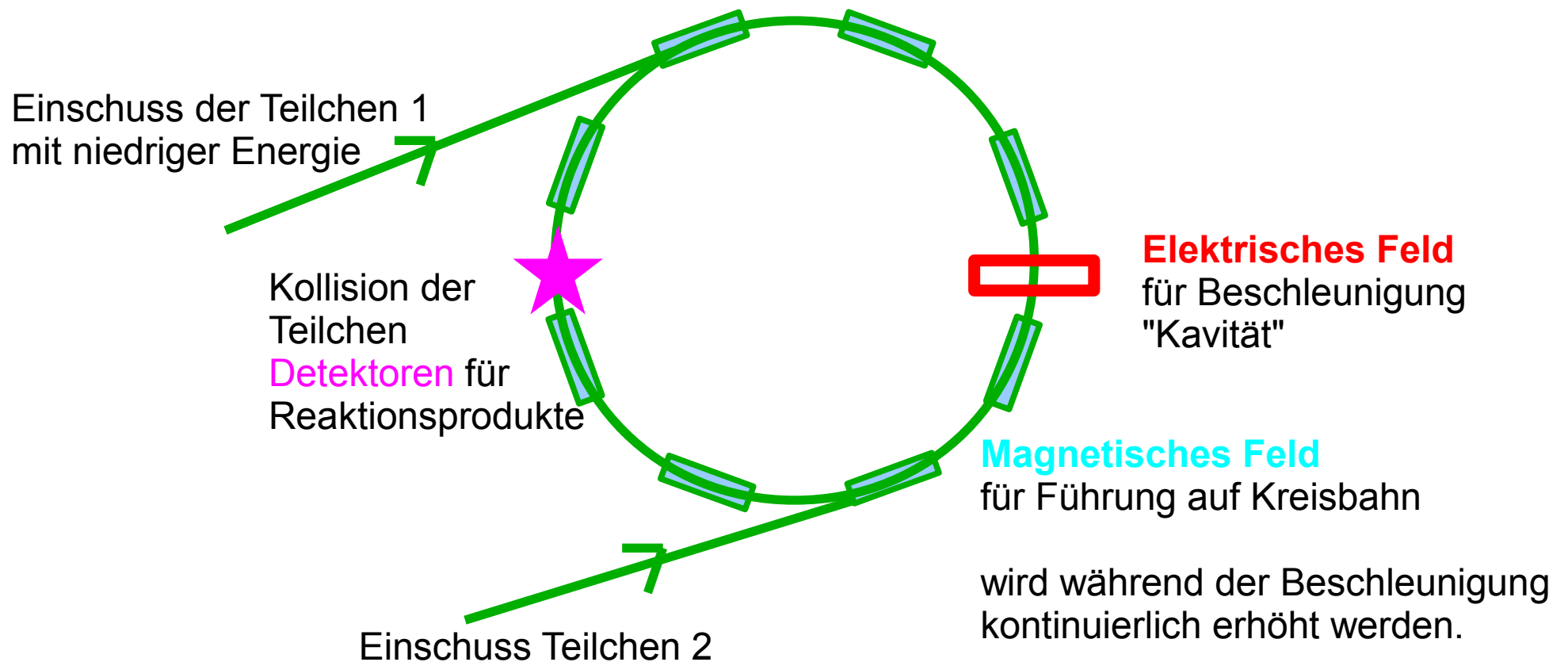
Proton Linac am CERN  
(Linac 2, "Alvarez Linac")  
in Betrieb seit 1978  
50 MeV, 150 mA (bis 180 mA)

Der Balken oben, trägt die Driftröhren

# Beschleuniger: Synchrotron



# Beschleuniger: Synchrotron als Collider



# Beschleuniger: Large Hadron Collider am CERN





# Beschleuniger: Large Hadron Collider am CERN

Schematische Darstellung  
der Elemente des LHC

Einige Parameter:

Umfang 27 km

Einschussenergie 450 GeV

Nominale Energie 7000 GeV

Anzahl Magnete: 9300

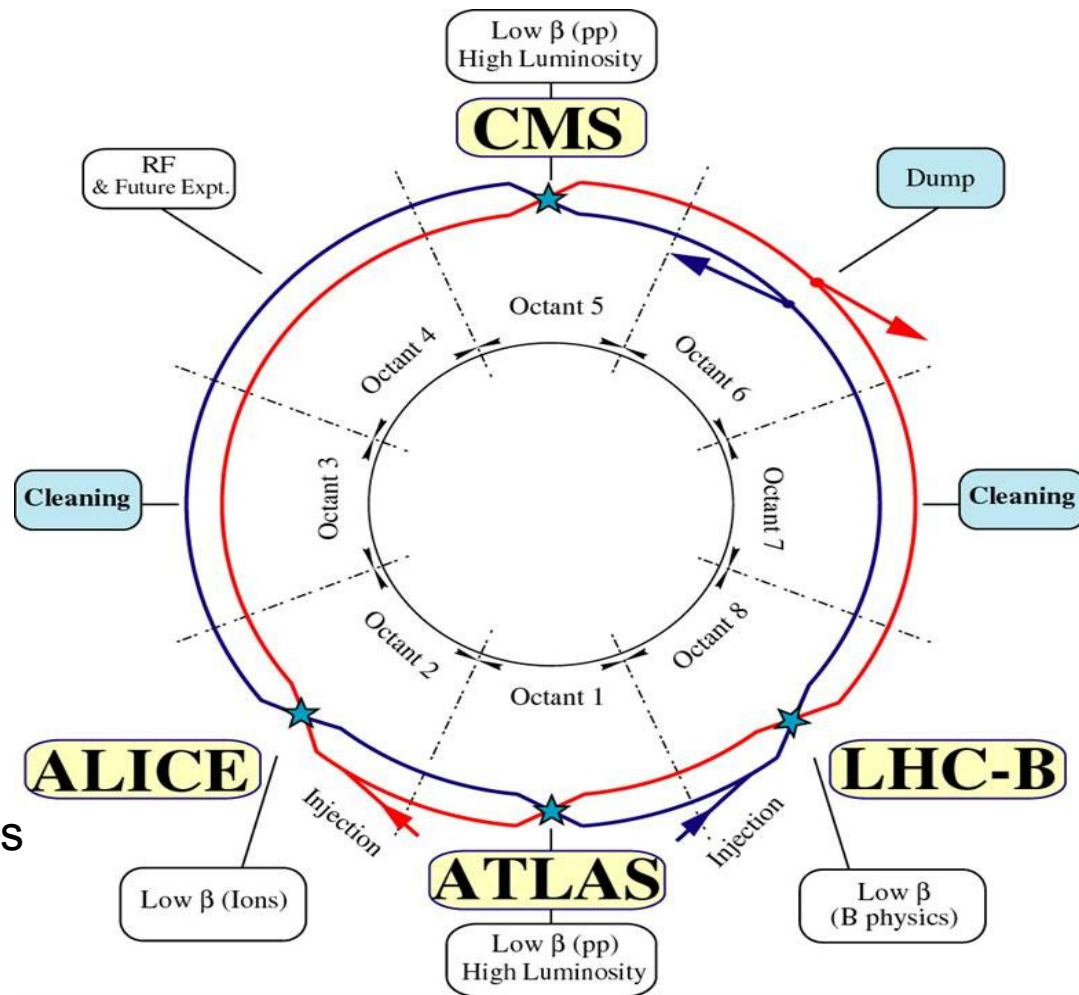
Anzahl Kavitäten: 8 pro Strahl

Teilchenpakete:

2808 Pakete im Abstand von 25 ns

Durchmesser 16  $\mu\text{m}$ , Länge 5 cm

$10^{11}$  Protonen pro Paket.



# Beschleuniger: Large Hadron Collider am CERN

Supraleitende  
Magnete führen  
den Strahl im  
Kreis herum

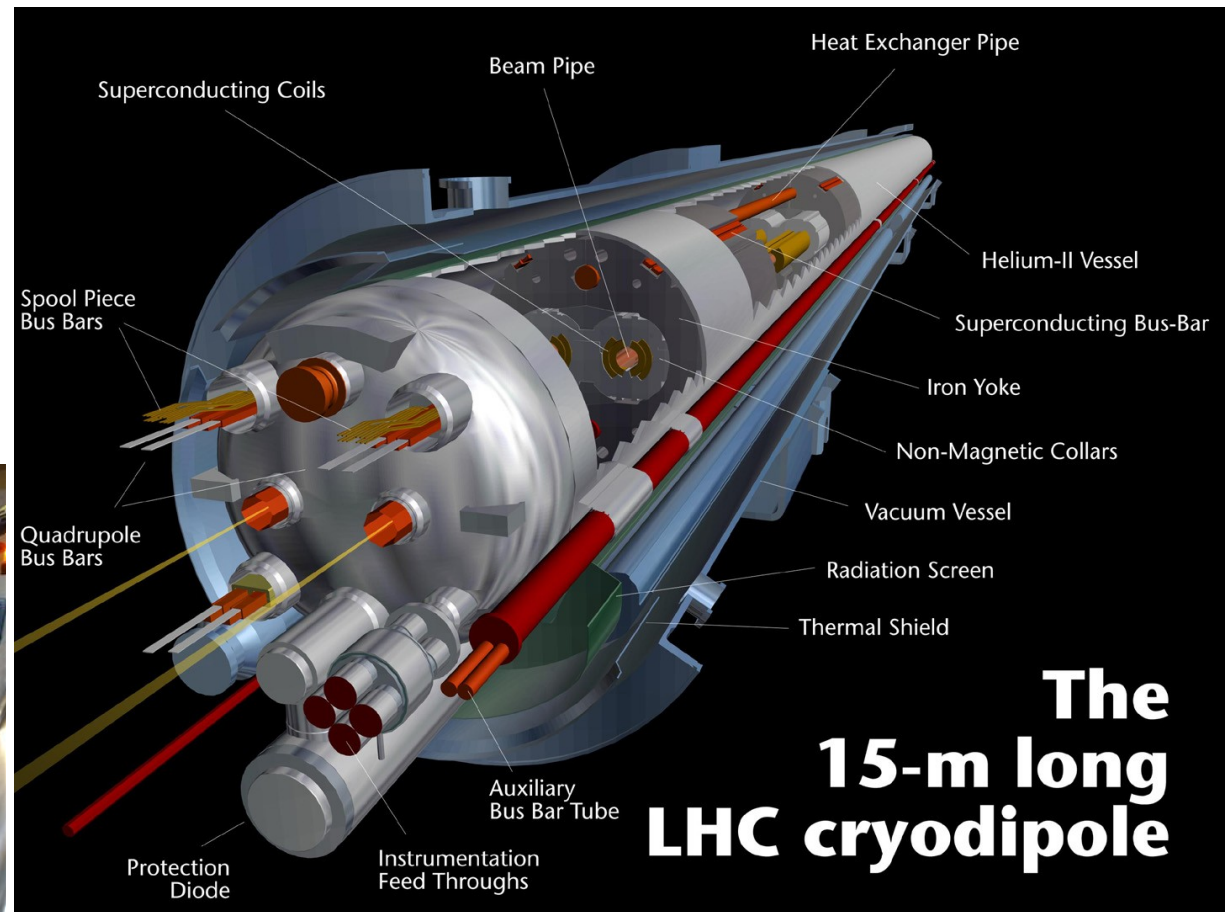


# Beschleuniger: Large Hadron Collider am CERN

2 Vakuum Strahlröhren

Supraleitende Magnetspulen:  
Feldstärke 8.33 Tesla  
Strom ca. 11000 A

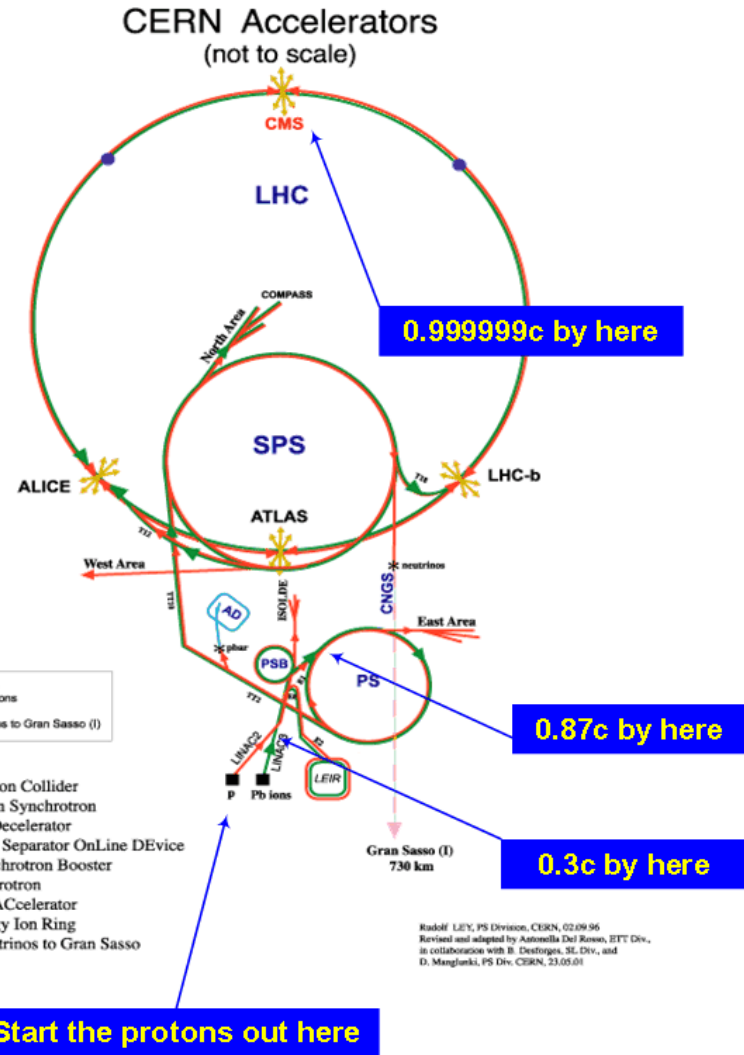
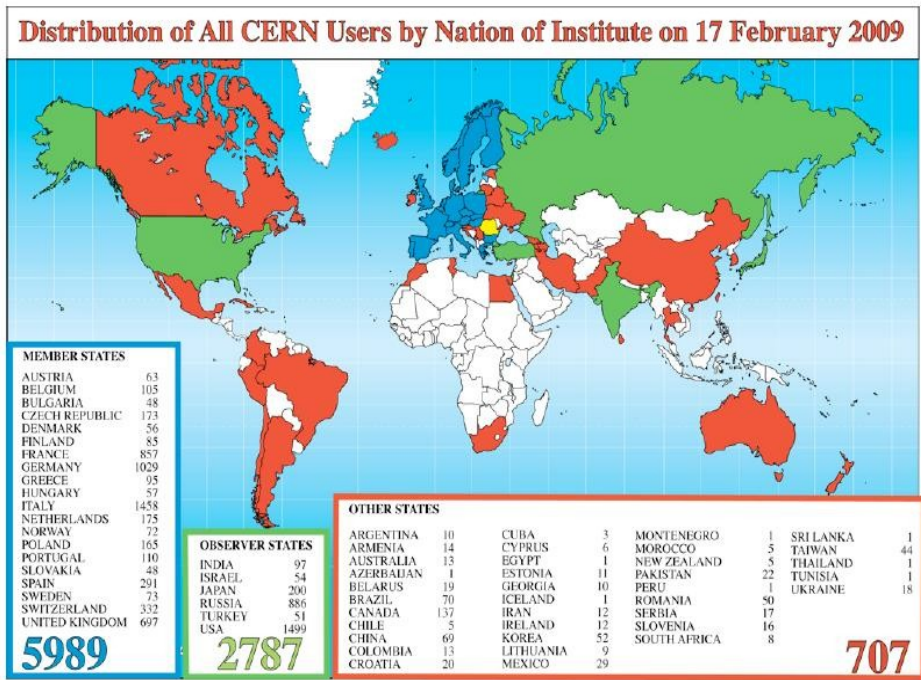
Kühlung durch  
superflüssiges Helium  
bei 1.9 Kelvin



# CERN und sein Beschleuniger - Komplex

CERN ist eine internationale Organisation seit 1954

- getragen von 20 europäischen Mitgliedsländern
- 2500 Angestellte
- 9000 Physiker als Nutzer aus aller Welt
- ca. 1 Mia CHF Umsatz pro Jahr



# Detektoren für die Reaktionsprodukte: Beispiel CMS

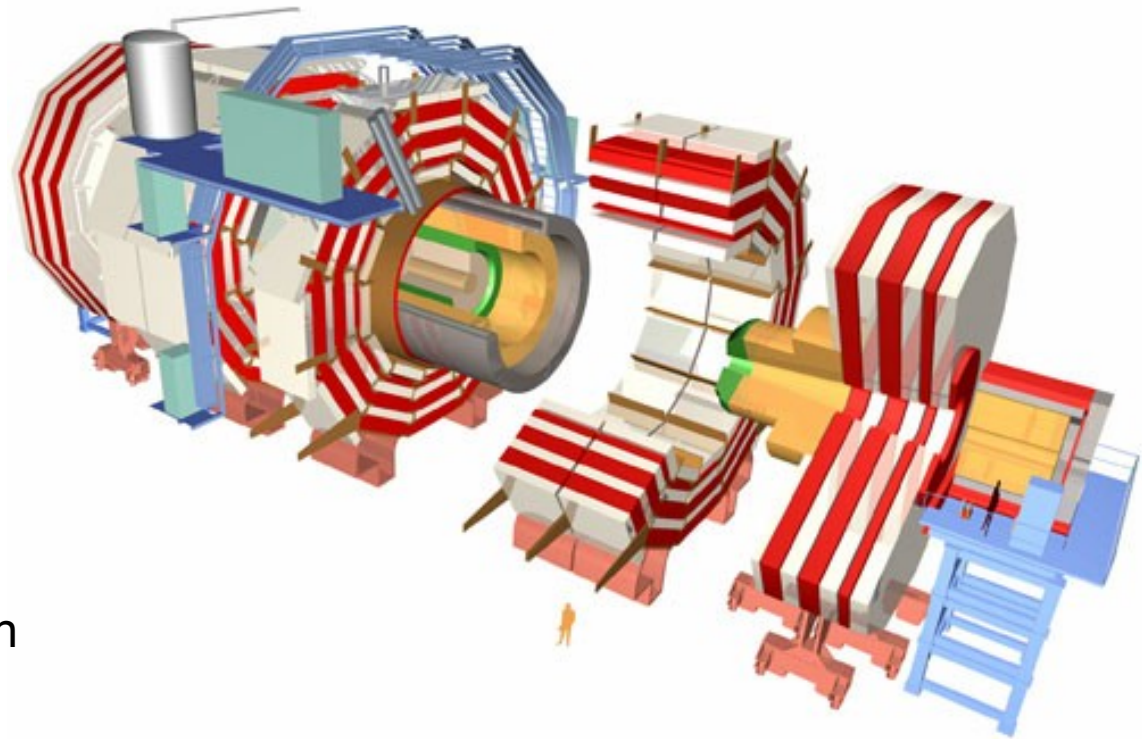
Will alle neuen und bereits bekannten Teilchen detektieren.

Das heisst: deren Impuls und Energie bestimmen.

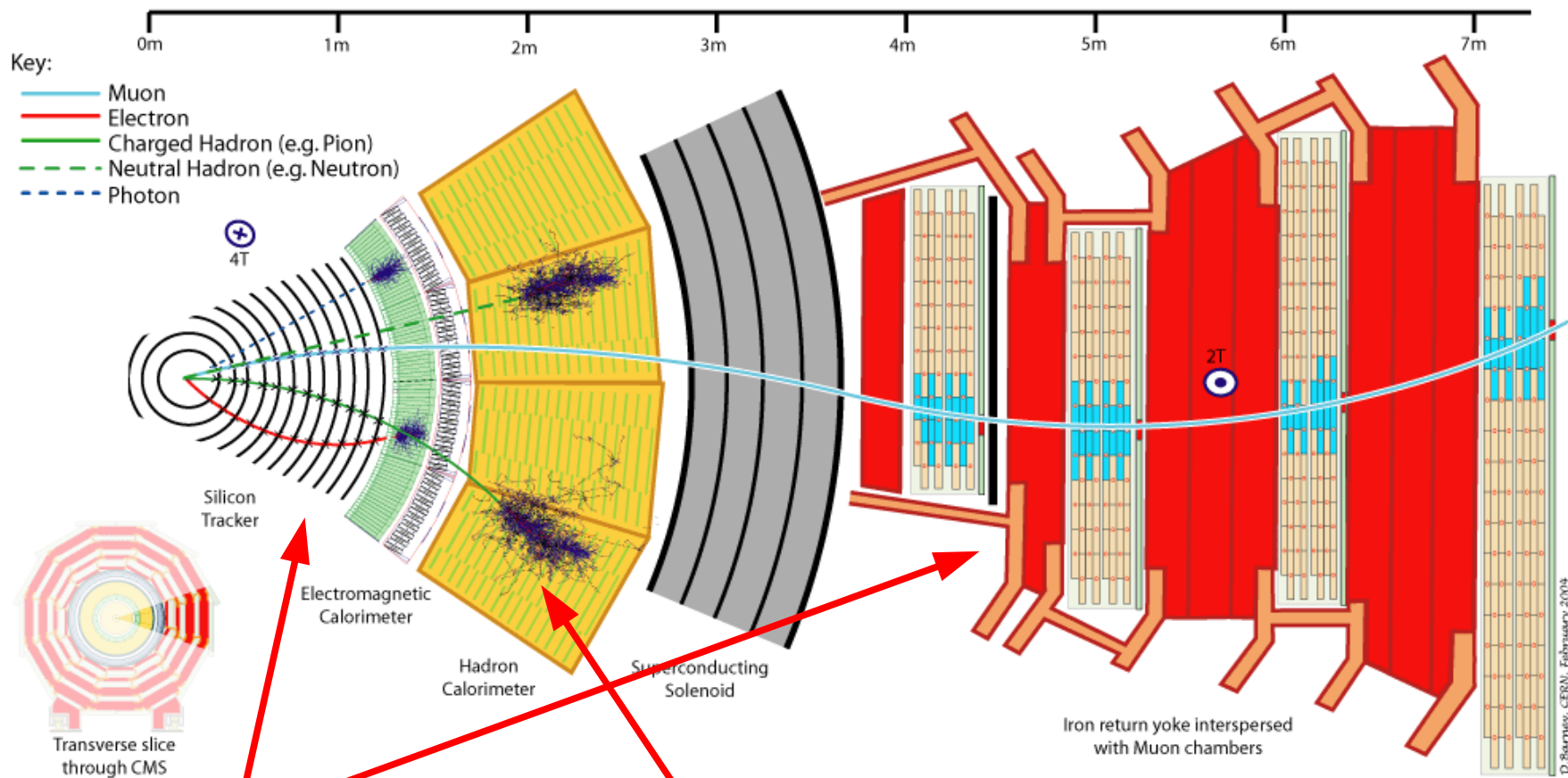
Die meisten Teilchen leben nur sehr kurz, sodass sie nicht aus dem Kollisionsbereich herauskommen.

→ Zerfallsprodukte detektieren und auf deren Urheber schliessen

Es kommen in Frage: Elektronen, Positronen, Muonen, Pionen, Kaonen, Photonen



# Detektoren für die Reaktionsprodukte: Beispiel CMS



Spurdetektoren im Magnetfeld  
→ Impuls messen

Calorimeter stoppt Teilchen:  
→ Energie messen

# Häufige Fragen zur Anwendung von Beschleunigern (1):

## Wieso brauchen wir Teilchen so hoher Energie?

- Strukturuntersuchungen:
  - Die Wellenlänge bestimmt die kleinsten erkennbare Strukturen
  - Lichtmikroskop → Röntgenstrahlung
  - Materiewellen: de Broglie Wellenlänge  $\lambda = \frac{h}{p}$ 
    - Elektronenmikroskop,
    - Elektron-Protonbeschleuniger HERA
- neue Teilchen:
  - Kollisions-Energie mindestens deren Masse, meistens etwas mehr

## Wieso ist das Synchrotron so gross?

- Beschleunigte Ladung (auch in der Kurve) strahlt Energie ab: Synchrotronstrahlung
- Magnetfeld für die Führung der Teilchen muss umso grösser sein, je enger die Kurve

## Wieso müssen wir so viele Ereignisse beobachten?

- Oft sind die Prozesse sehr selten (Erzeugung, Zerfall)
- Je mehr Prozesse wir "befragen", umso genauer wird es.

## Häufige Fragen zur Anwendung von Beschleunigern (2):

### Wieso sind die Detektoren so gross?

Man muss Impuls und Energie der Teilchen messen

- Spurdetektor: prozentuale Genauigkeit der Impulsmessung =  $\frac{p \cdot \Delta x}{B \cdot L^2}$
- Calorimeter: Länge des "Showers"  $\propto \log(E)$

### Wieso braucht es so viele Physiker?

- Komplexer Aufbau
- Komplexe Analyse

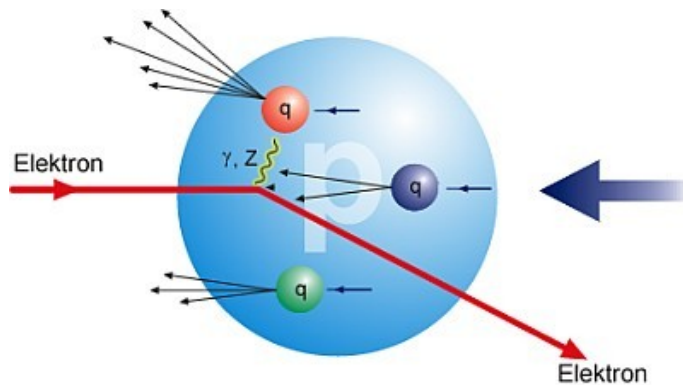
### Streiten die Physiker nicht?

- doch, manchmal. spezielle Charakter, spezielle Soziologie

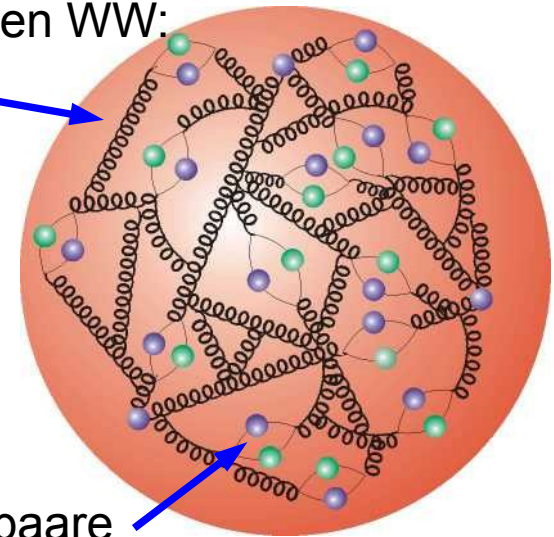


# Erkenntnisgewinne (1): aus Streuexperimenten:

- Rutherford
  - positiv geladene Atomkerne
- Elektron und Muonstreuung an Atomkernen
  - Protonen und Neutronen bestehen aus Quarks
- Elektron-Proton Kollisionsexperimente bei hohen Energien (HERA, Hamburg)
  - die Quantenchromodynamik ist die richtige Theorie für die starke Wechselwirkung



Quanten der starken WW:  
Gluonen



Quarks:  
"kurzfristig" auch  
Quark-Antiquarkpaare

# Erkenntnisgewinne (2): Elementare Teilchen

## Fermionen (Drehimpuls $1/2 \hbar$ , es gilt Pauli Ausschlussprinzip)

Elektron	J.J. Thomson	1897	Cambridge	Labor	durch andere Beobachtungen erwartet
Positron	C.D. Anderson	1932	CalTech	Höhenstrahlung	durch Theorie vorhergesagt (Dirac)
Muon	C.D. Anderson	1936	CalTech	Höhenstrahlung	überraschend
Tauon	Mark I	1976	Stanford	ee Collider	überraschend
Elektron-Neutrino (anti~)	C. Cowan	1956	Augusta, Georgia	Kern-Reaktor	durch Theorie vorhergesagt (Pauli)
Muon-Neutrino	L. Ledermann et al.	1962	Brookhaven	p fixed target	durch andere Beobachtungen erwartet
Tau-Neutrino	DONUT	2000	Fermilab	p fixed target	durch Theorie vorhergesagt
charm quark	Mark I	1974	Stanford	ee Collider	durch Theorie vorhergesagt
bottom quark		1974	Brookhaven	p fixed target	
top quark	CDF	1995	Fermilab	p fixed target	durch andere Beobachtungen erwartet
		1995	Fermilab	$p \bar{p}$ Collider	durch Theorie vorhergesagt

## Bosonen (ganzzahliger Drehimpuls)

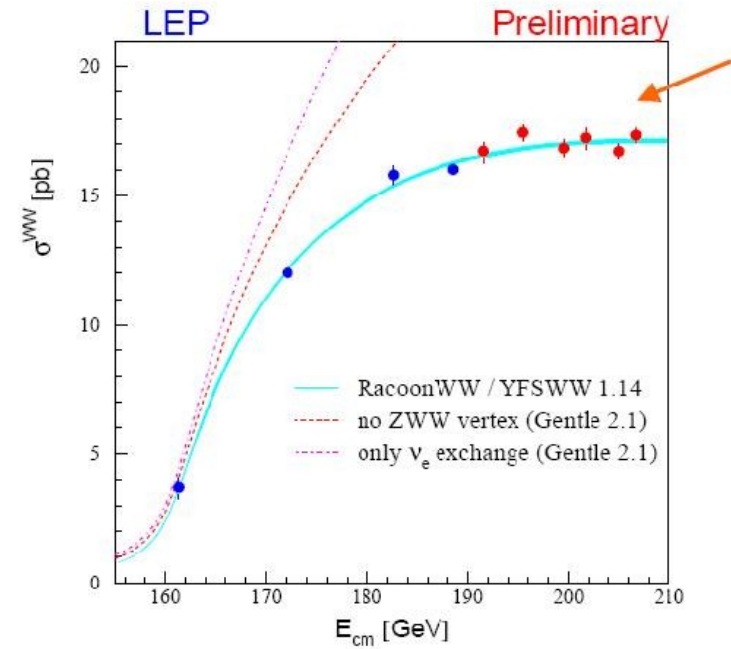
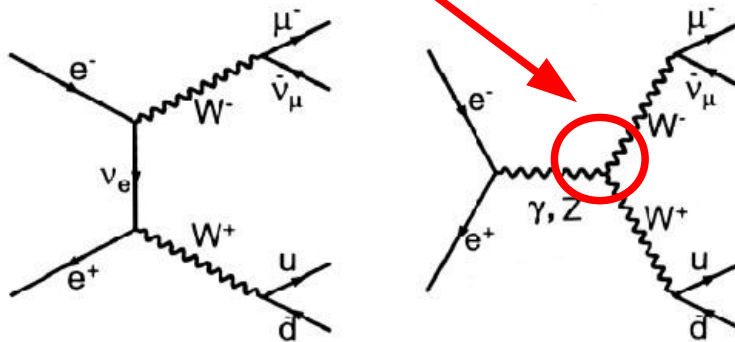
Pion	C. Powell et al.	1947	Pyrenäen	Höhenstrahlung	durch Theorie vorausgesagt (Yukawa)
Kaon (strange quark)	G.D. Rochester	1947	Berkeley	Höhenstrahlung	überraschend
Photon	H.R. Hertz	(1887)	Karlsruhe	photoel. Effekt	durch Theorie interpretiert (Einstein, 1905)
Gluon	Tasso	1978	DESY	ee Collider	durch Theorie vorhergesagt
W und Z Boson	UA 1	1983	Cern	$p \bar{p}$ Collider	durch Theorie vorhergesagt

# Erkenntnisgewinne (3): wichtigste Resultate von LEP

LEP: Elektron – Positron Collider im Tunnel des heutigen LHC  
1990 – 2000, Totalenergie bis maximal 209 GeV  
4 Detektoren (DELPHI, ALEPH, OPAL, L3)

## einige Resultate:

- Präzisionsmessung der Z Masse, Genauigkeit 0.02 Promille
- Es gibt genau drei verschiedene Neutrinos
- Konsistenz des Standardmodells
- Triple Boson Vertex



# Beispiel: Ein Ereignis der Top - Quark - Entdeckung: Methode der invarianten Masse

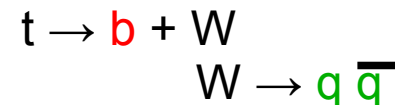
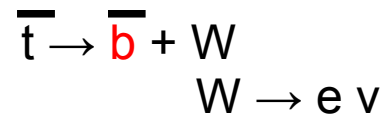
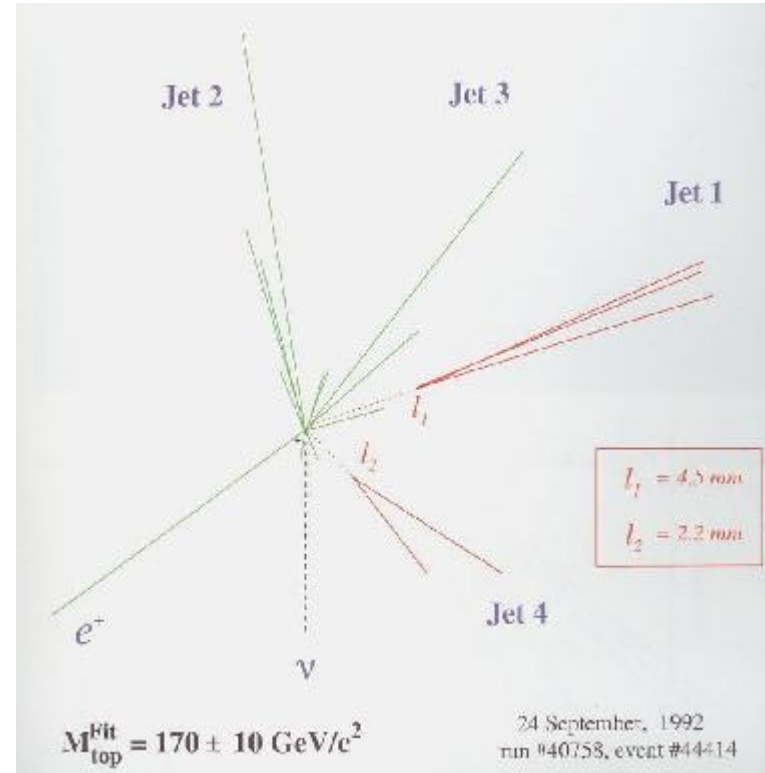
Detektor CDF am Tevatron im Fermilab (USA)  
Es entsteht ein top – antitop Paar:

Aus der Kollisionsenergie können Teilchen mit Masse entstehen, dafür brauchen wir Energie  
 $E = mc^2$

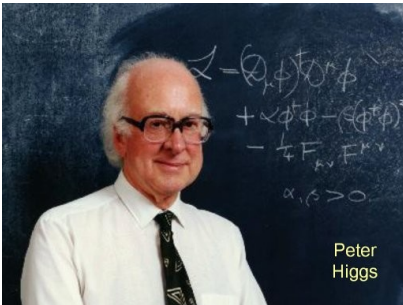
Wenn die Teilchen sich dazu noch bewegen:  
 $E^2 = p^2c^2 + m^2c^4$

Das neue Teilchen (hier das top) zerfällt sofort wieder, man sieht nur die Zerfallsprodukte.

Energie bleibt erhalten: Aus den Summen der Energien und Impulse der Zerfallsprodukte, können wir die Masse ausrechnen:  
 $m^2c^4 = E^2 - p^2c^2$



# Die Suche nach dem Higgs - Teilchen



1964 entwickelte Peter Higgs einen formalen Mechanismus, durch den zunächst masselose Teilchen in Wechselwirkung mit einem Hintergrundfeld (dem Higgs-Feld) massiv werden.

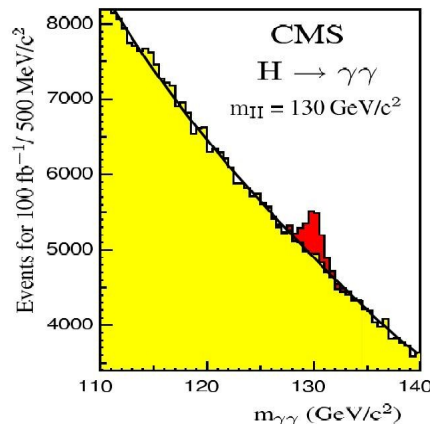
Damit erhalten nicht nur alle Quarks und Leptonen ihre Masse, sondern auch die für die schwache Wechselwirkung verantwortlichen W- und Z-Bosonen.

Wie sollen wir nach dem Higgs Teilchen suchen?

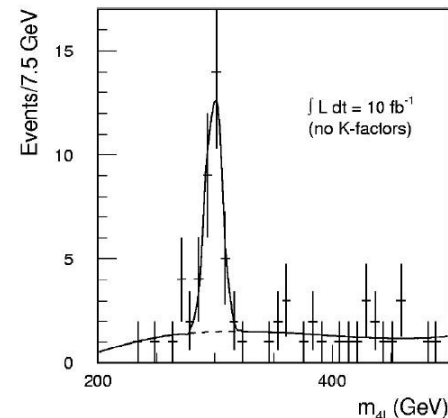
Wir kennen seine Masse nicht, aber wir wissen, wie es zerfällt.

Aus früheren Experimenten wissen wir:  $m_H > 114.4 \text{ GeV}$

Falls  $m_H < 160 \text{ GeV}$   
dann suche  
z.B. nach  
 $H \rightarrow \gamma\gamma$



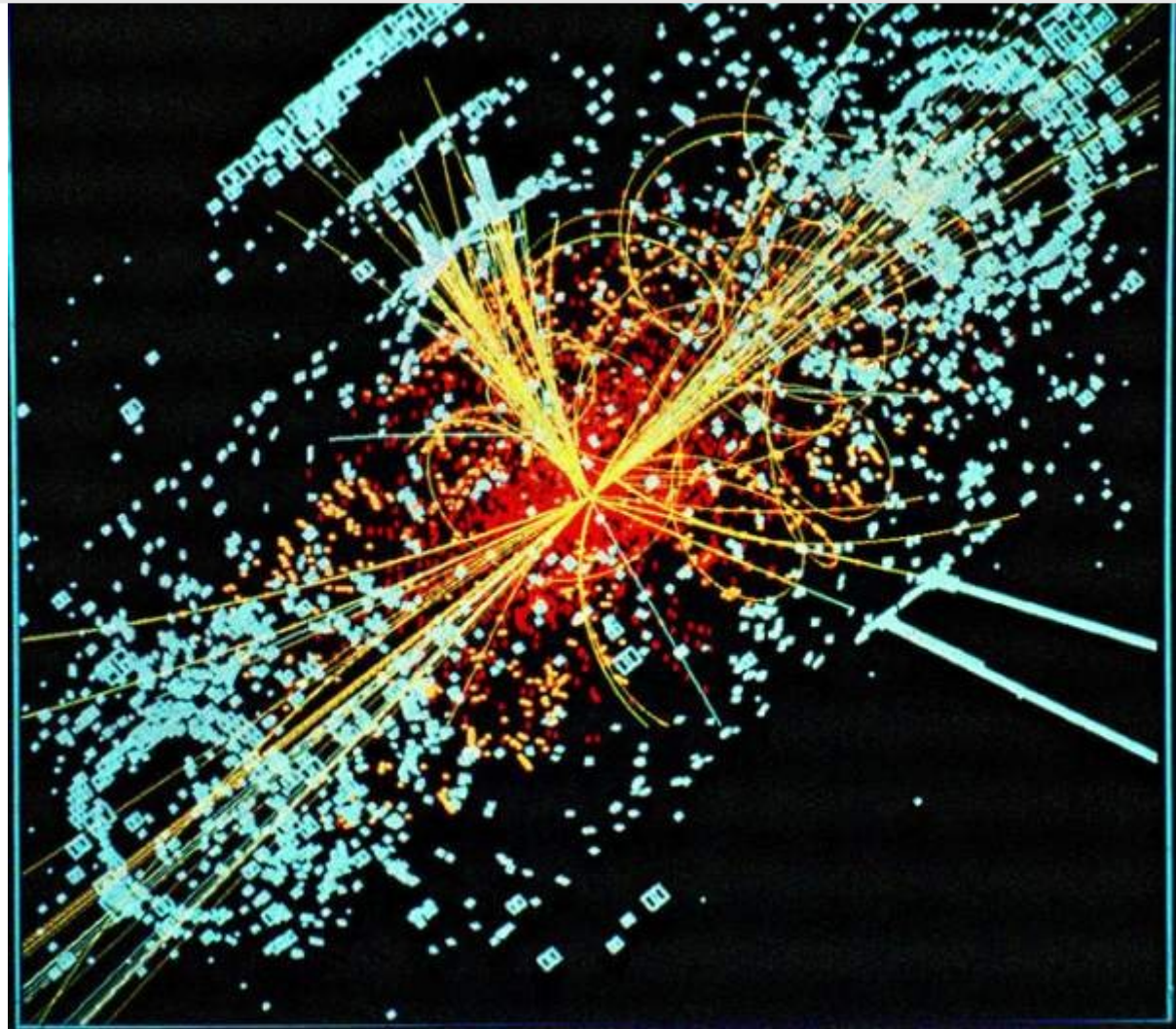
3 Jahre  
am LHC  
messen!



Falls  $m_H > 160 \text{ GeV}$   
dann suche  
z.B. nach  
 $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 e$   
( $< 1$  Jahr messen)

## Simuliertes Higgs Ereignis im CMS Detektor:

Es ist nicht ganz einfach...



## Erkenntnisgewinne: Was erwarten wir?

Wir warten mit Spannung auf die Ergebnisse vom LHC

Es wird aber ein paar Jahre dauern, bis wir gute Resultate haben

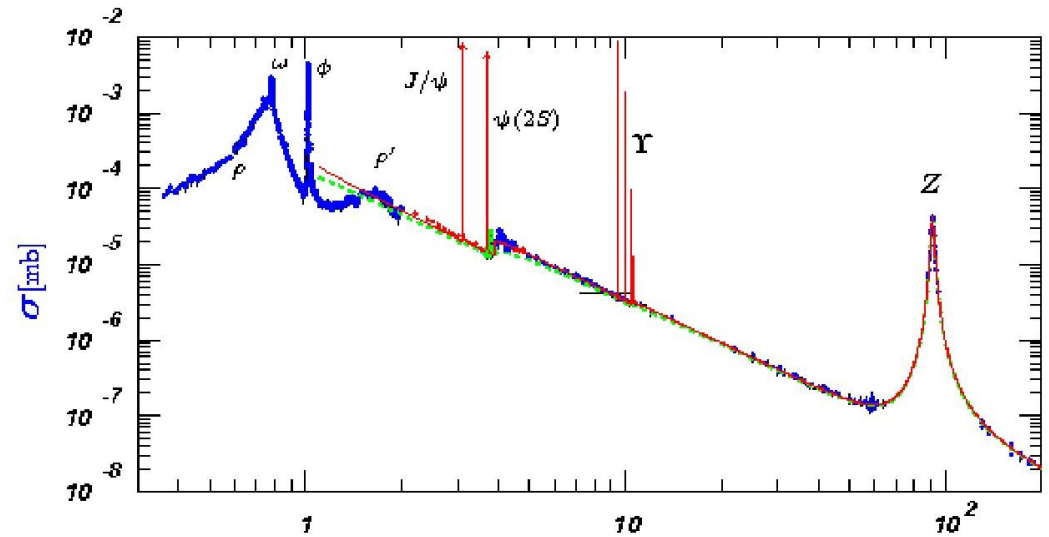
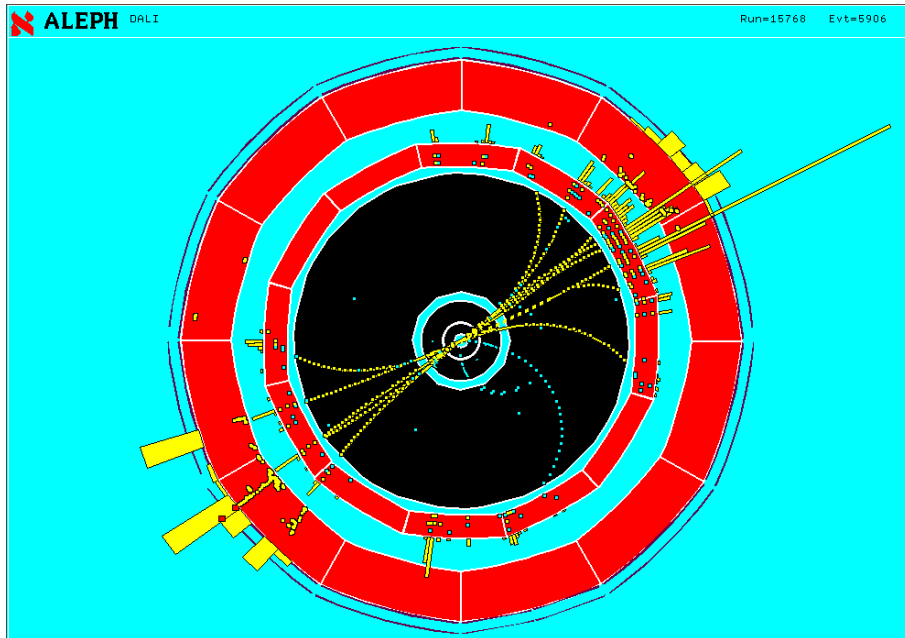
- ▶ Existiert das Higgs? bei welcher Masse?
- ▶ Wenn wir es nicht finden: Warum?
- ▶ Existieren supersymmetrische Teilchen?
- ▶ Finden wir Kandidaten für die dunkle Materie?

Ende

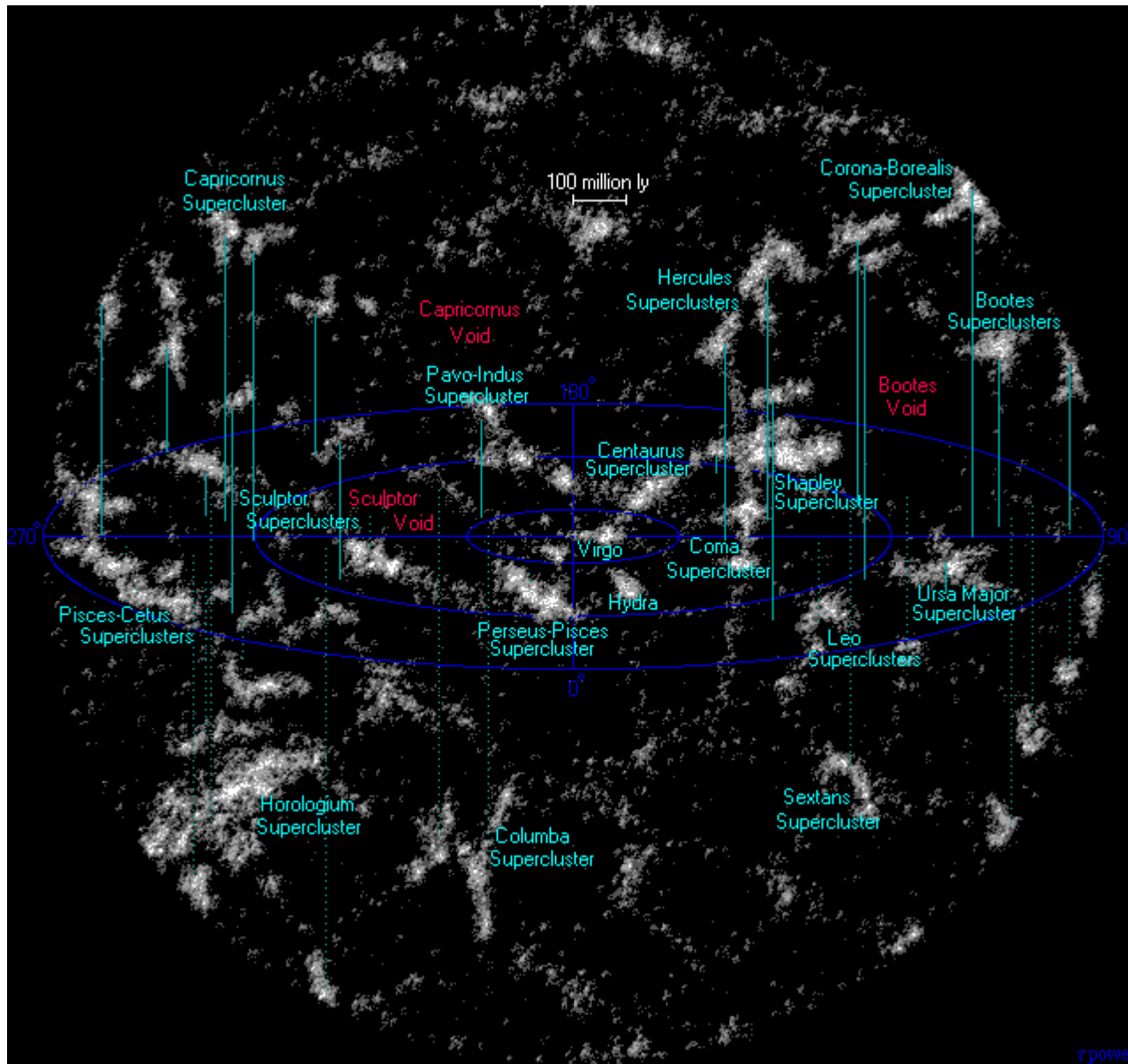


# Erkenntnisgewinne: LEP: $Z \rightarrow q \bar{q}$

Ein Ereignis:  $e^+ + e^- \rightarrow q + \bar{q}$



# Large-scale structure of the cosmos



# "Observable Universe"

