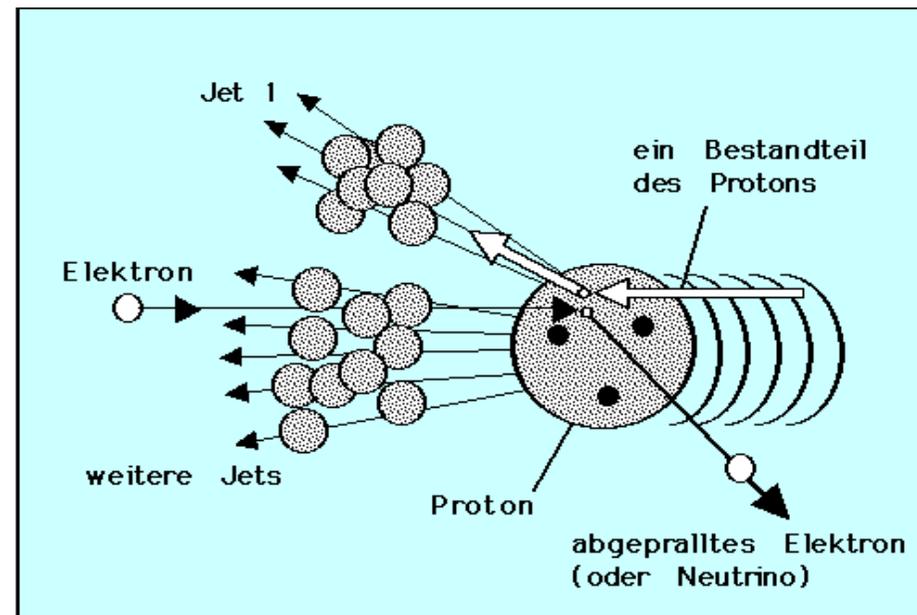
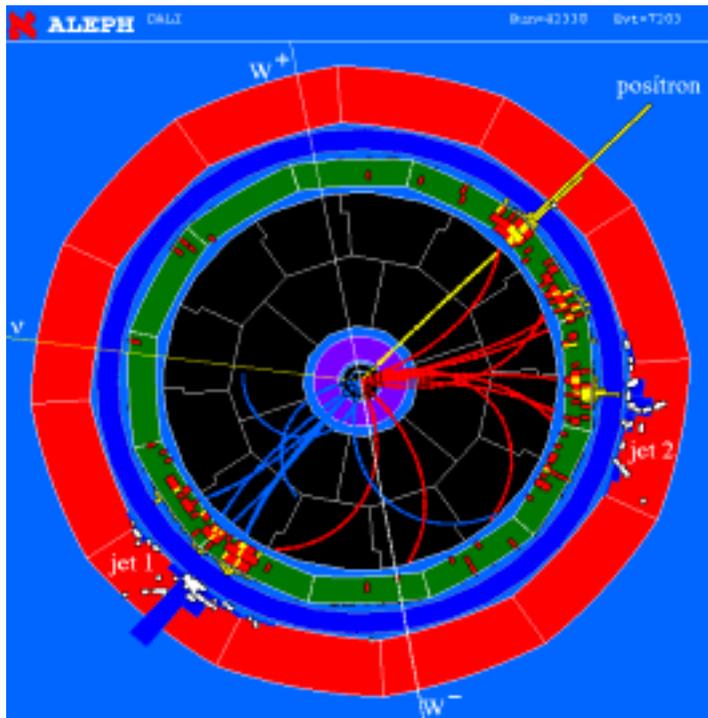


Bausteine der Materie

Christian Zeitnitz
Universität Mainz



Warum Teilchenphysik ?

Erforschen, was die Welt im Innersten zusammenhält

- ◆ Woraus besteht die Materie die uns umgibt ?
- ◆ Was hält die Materie zusammen ?
- ◆ Ist die Materie teilbar ? Und wenn wie weit ?



Demokrit (ca. 400 v.Chr):

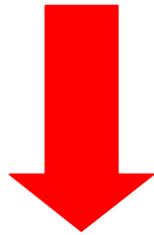
“Scheinbar ist Farbe, scheinbar Süßigkeit, scheinbar Bitterkeit, wirklich sind nur Atome und Leeres”



Ziel der Teilchenphysik

- ◆ Beschreibung der Naturgesetze von den

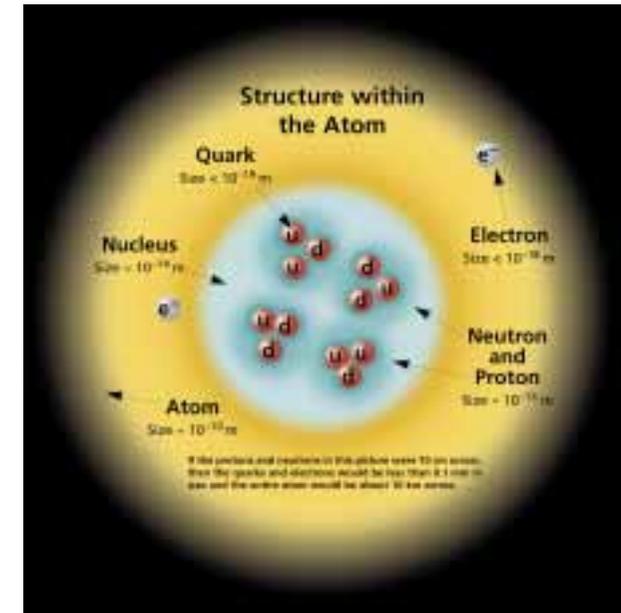
kleinsten Abständen 10^{-18} m



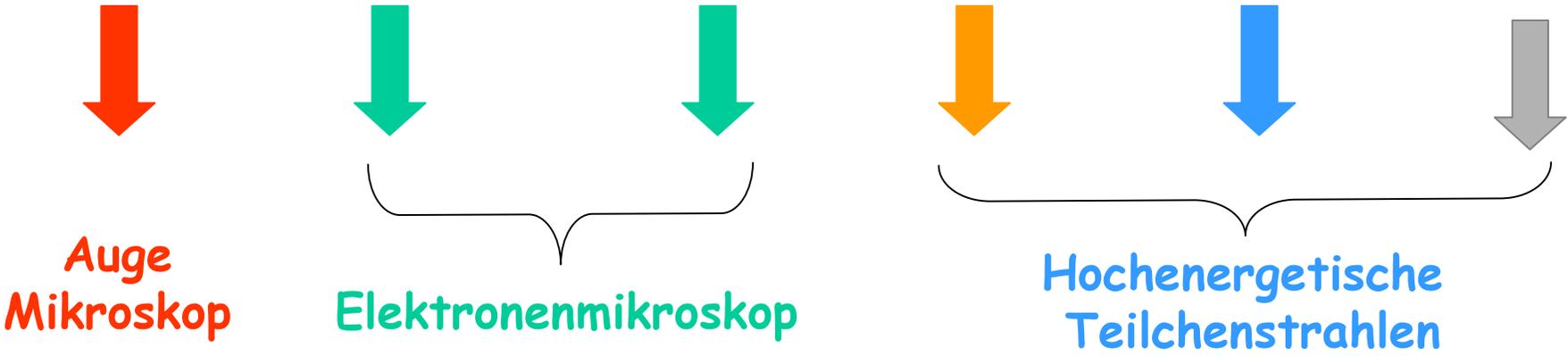
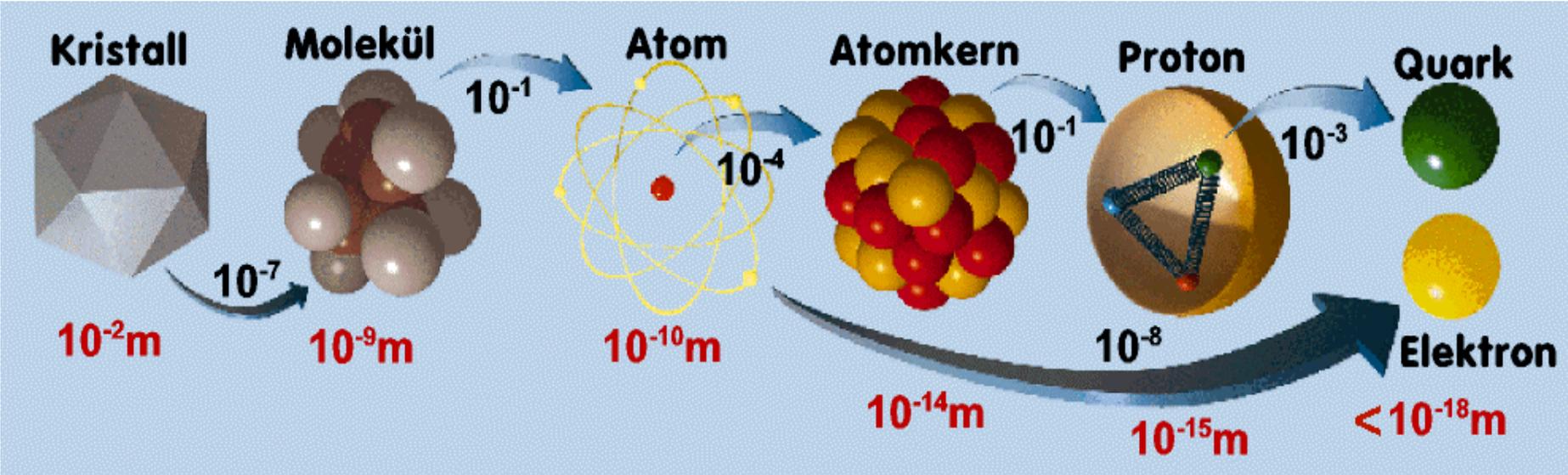
kosmischen Abständen 10^{25} m



Entstehung und Entwicklung
des Universums

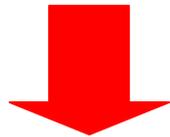


Strukturen sichtbar machen



Objekte mit Wellen sichtbar machen

- ◆ Kleine Objekte (kleiner als Wellenlänge λ)
stören Welle nicht

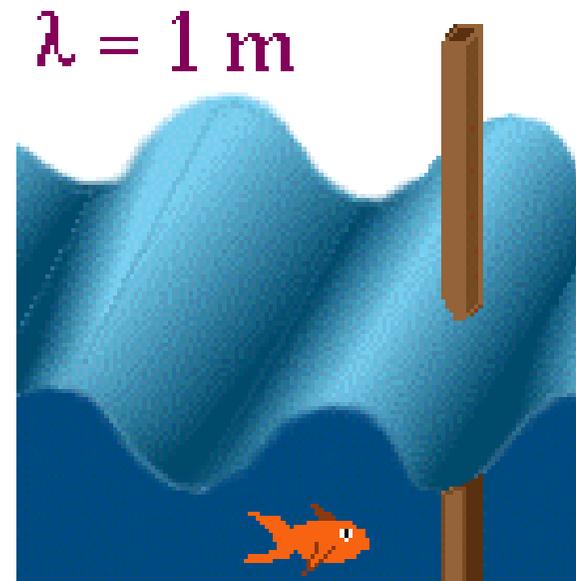


Objekt ist nicht sichtbar

- ◆ Große Objekte stören Welle



Objekt ist sichtbar



Warum funktioniert ein Elektronenmikroskop ?

◆ Lichtmikroskop

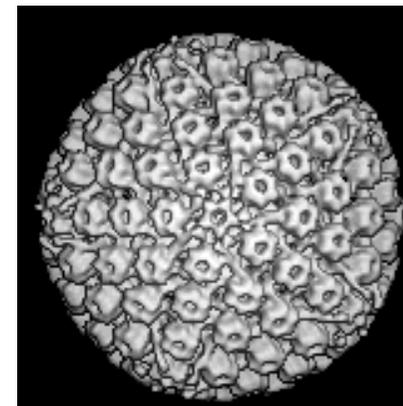
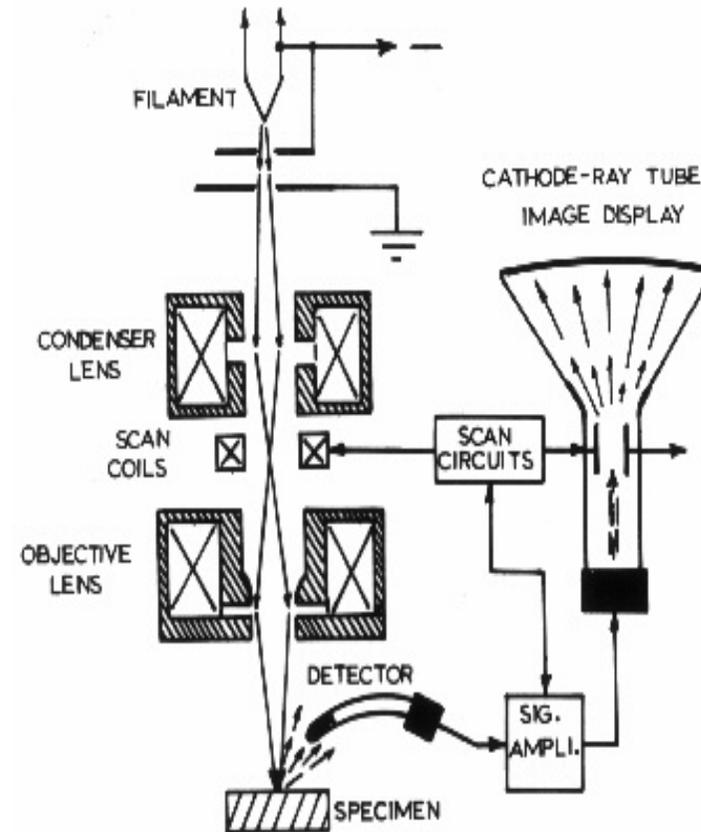
Auflösung hängt von Wellenlänge des Lichts ab:

$$\Delta x > \lambda$$

d.h. $\sim 1\mu\text{m}$ für sichtbares Licht

◆ Elektronenmikroskop

- ◆ Elektronquelle (z.B. Heizdraht) statt Lampe
- ◆ Auflösung hängt von der Geschwindigkeit der Elektronen ab



Herpesvirus

Welleneigenschaft von Teilchen

- ◆ Jedem Teilchen wird eine Wellenlänge (de Broglie Wellenlänge) zugeordnet

$$\lambda = \frac{\hbar}{p}$$



die räumliche Auflösung wird bei hohen Impulsen besser

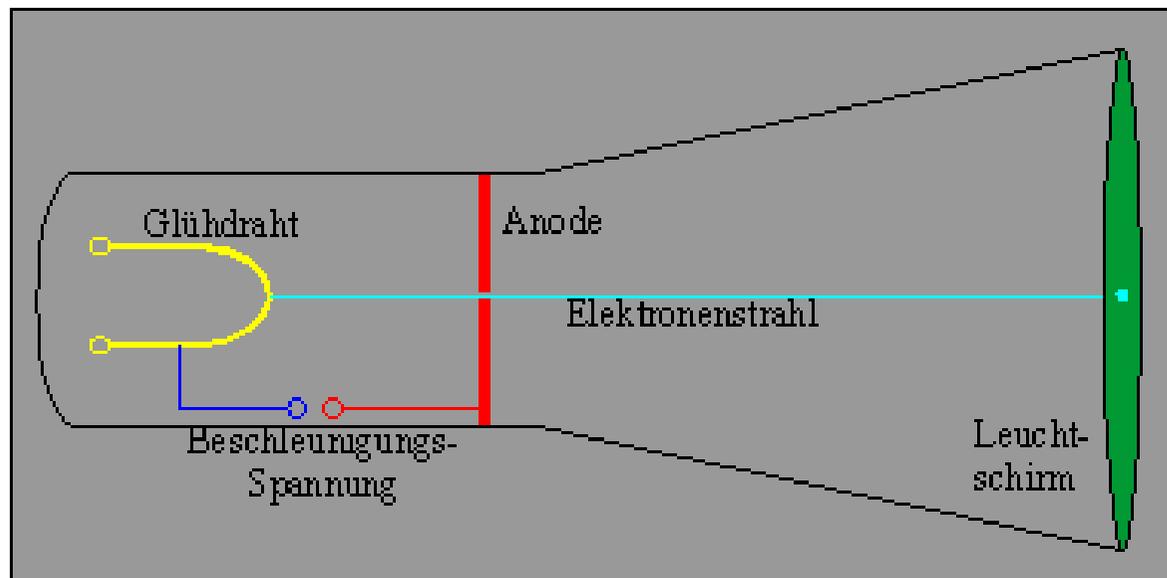
$$\Delta x = \frac{\hbar}{p}$$

- ◆ Hohe Teilchenimpulse notwendig, um das Innere des Atomkerns und kleinere Strukturen untersuchen zu können

Beschleunigung von geladenen Teilchen

- ◆ Elektrisch geladene Teilchen (z.B. Elektronen) können in einem elektrischen Feld beschleunigt werden

Einfacher Elektronenbeschleuniger: "Braunsche Röhre"



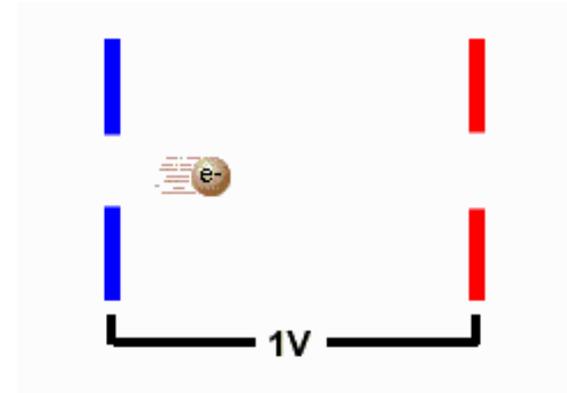
Beschleunigungsspannung $V=1\text{Volt} \Rightarrow$ kinetische Energie = 1eV

Beschleunigungsspannung $V=1000\text{Volt} \Rightarrow$ kinetische Energie = $1000\text{eV}=1\text{keV}$

- ◆ Elektron durchläuft eine Spannungsdifferenz von 1 Volt



Elektron wird „schneller“
und seine Energie erhöht sich um
1 eV

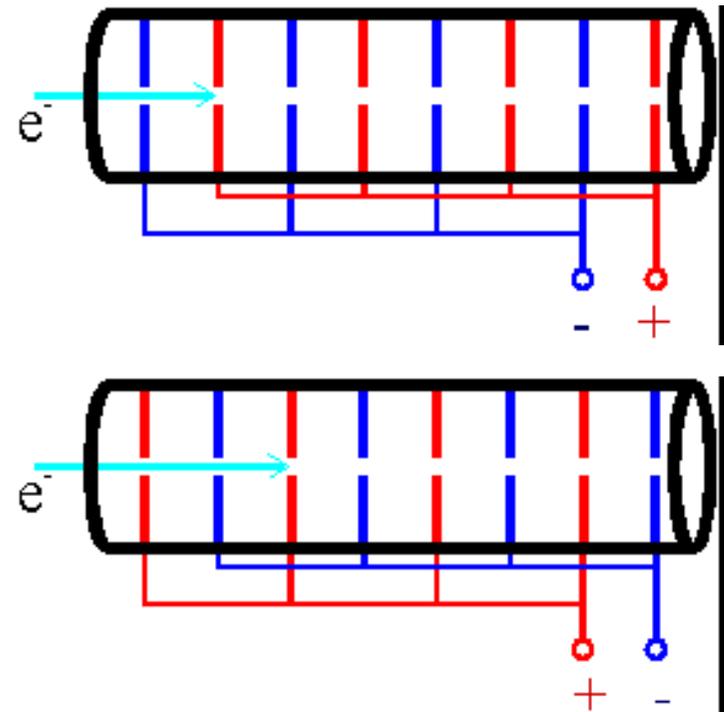


- ◆ Hintereinanderschalten vieler Beschleunigungsstrecken

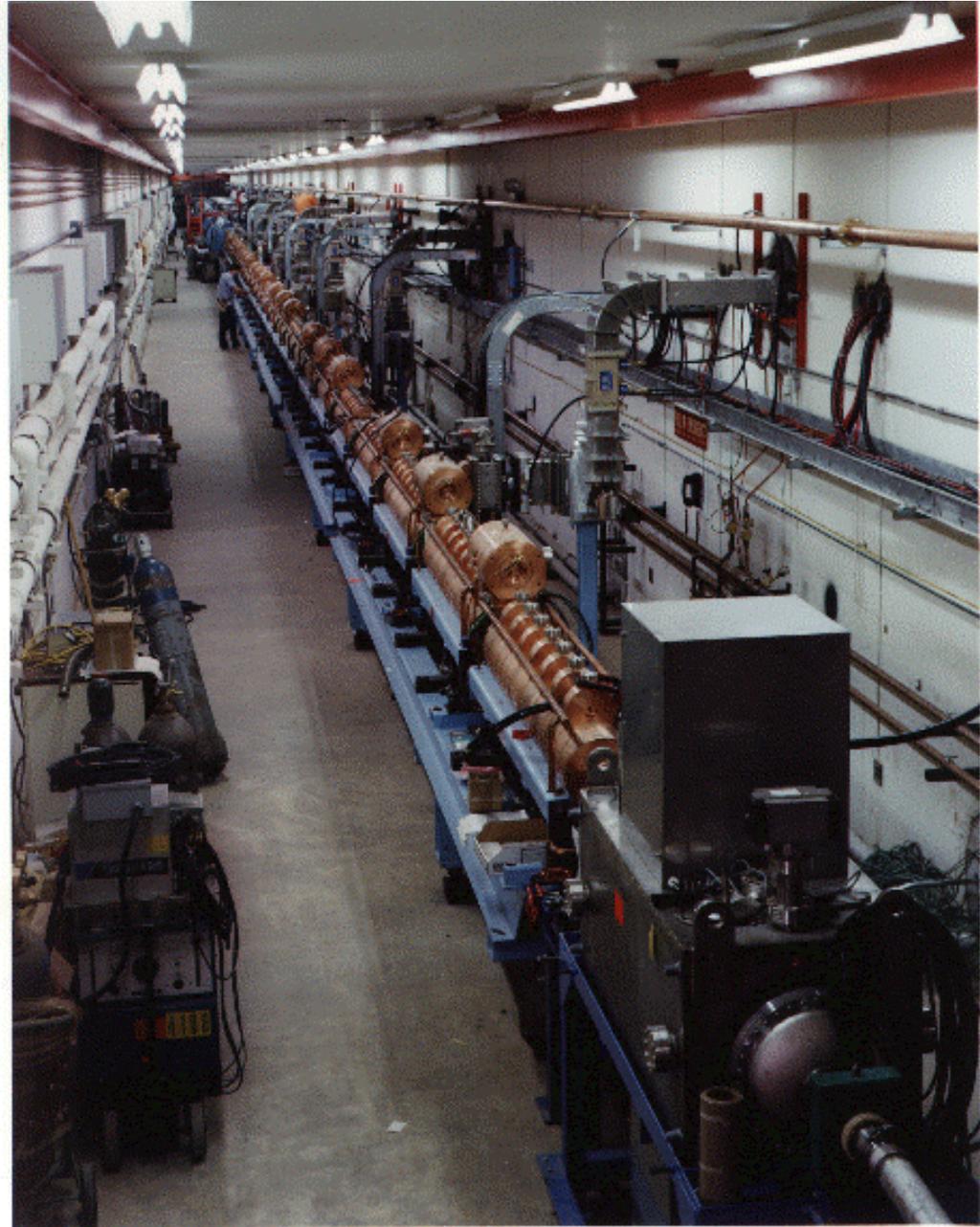
Elektrisches Feld muß zur
richtigen Zeit umgepolt werden



Linear-Beschleuniger

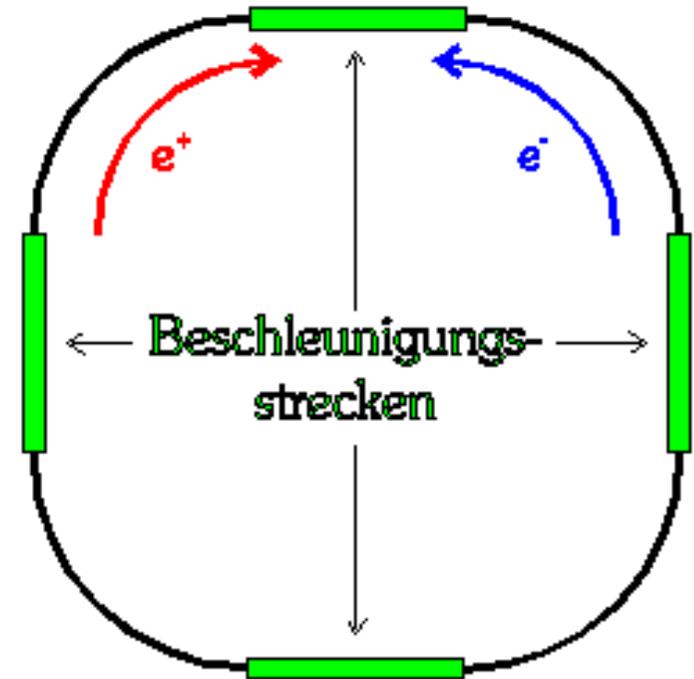


Linear-Beschleuniger



Ringbeschleuniger

- ◆ Magnetfeld zwingt Teilchen auf Kreisbahn
- ◆ Teilchen durchlaufen Beschleunigungsstrecken bei jedem Umlauf erneut
- ◆ Hohe Energien erfordern große Ringdurchmesser



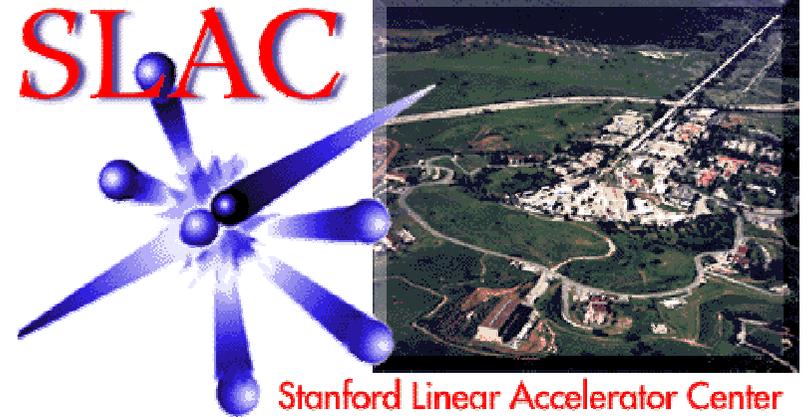
Beispiel: LEP-Beschleuniger am CERN
Umfang: 27 km
Elektron-Energie: ~ 100 GeV



Forschungseinrichtungen

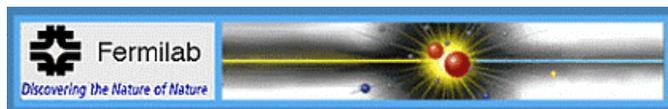


Deutsches-Elektronen-Synchrotron (DESY), Hamburg

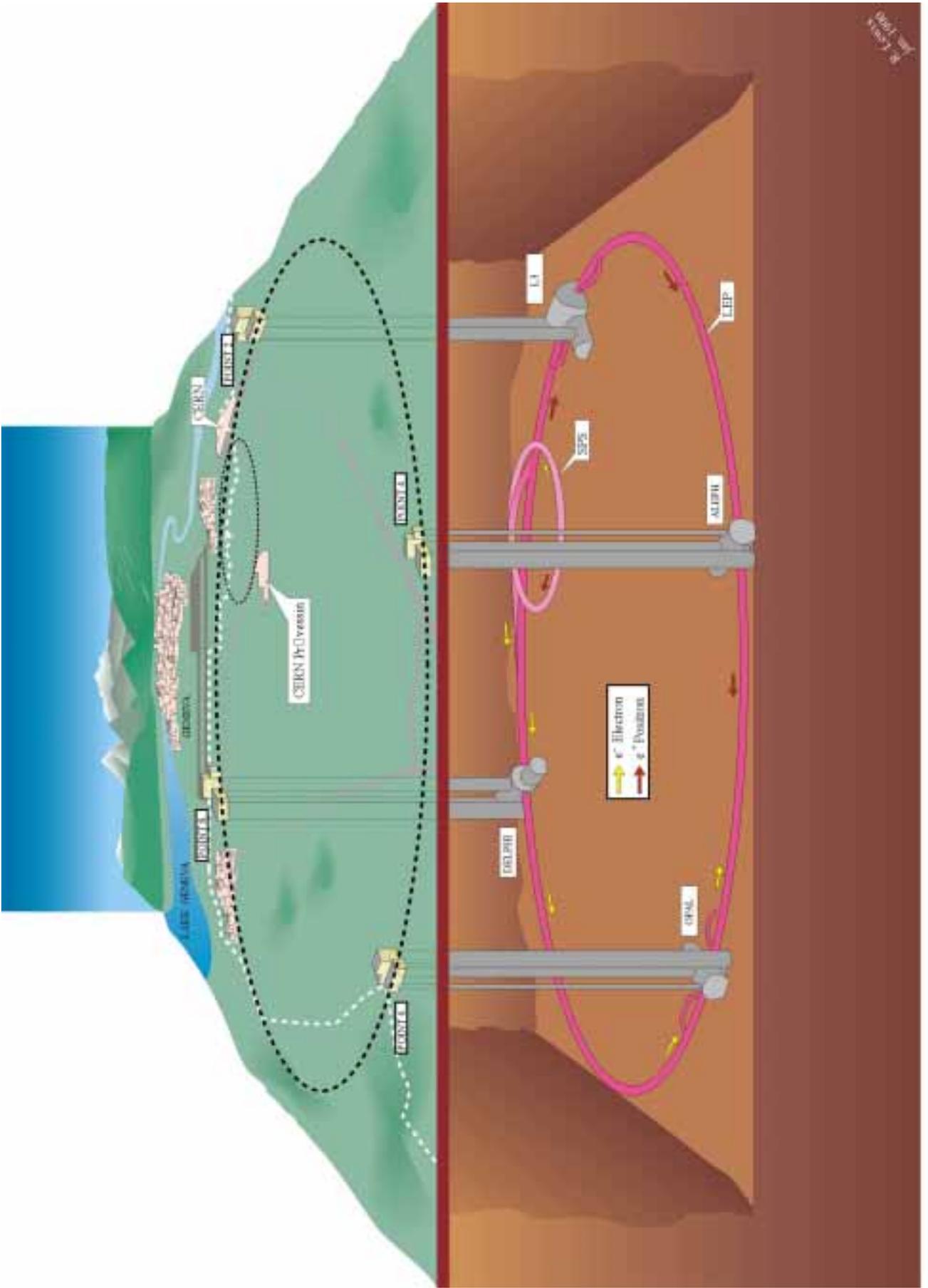


Stanford Linear Accelerator Center

Fermi-National-Accelerator-Laboratory (FNAL), USA



Conseil-Européenne-pour la-Recherche-Nucléaire (CERN), CH/F



Masse und Energie

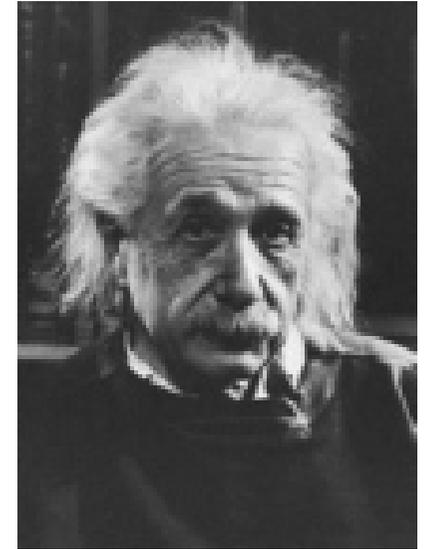
◆ Berühmte Formel von Einstein:

$$E = m \cdot c^2$$

bedeutet, daß Energie und Masse äquivalent sind



aus Energie können Teilchen entstehen
und
Teilchen können zu Energie zerstrahlen



Einheiten

Energie Einheit: eV Umrechnung: $1eV = 1,6 \cdot 10^{-19} J$

Impuls Einheit: eV/c

Masse Einheit: eV/c^2 Umrechnung: $1eV/c^2 = 1,8 \cdot 10^{-36} kg$

Anti-Materie

- ◆ Zu jedem Teilchen gibt es ein Anti-Teilchen, mit dem es als Partner aus "Energie" entstehen und in "Energie" vernichtet werden kann
- ◆ Eigenschaft des Anti-Teilchens
 - Gleiche Eigenschaften wie Teilchen (z.B. Masse)
 - Entgegengesetzt geladen

Beispiel:

Elektron	Ladung: $-1e$	}	Masse: $9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg} = 511\ 000 \text{ eV}/c^2$
Positron	Ladung: $+1e$		

Weitere Teilchen

- ◆ Alle Atome bestehen aus Quarks (Teilchen, die die Protonen und Neutronen bilden) und Elektronen (Atomhülle)

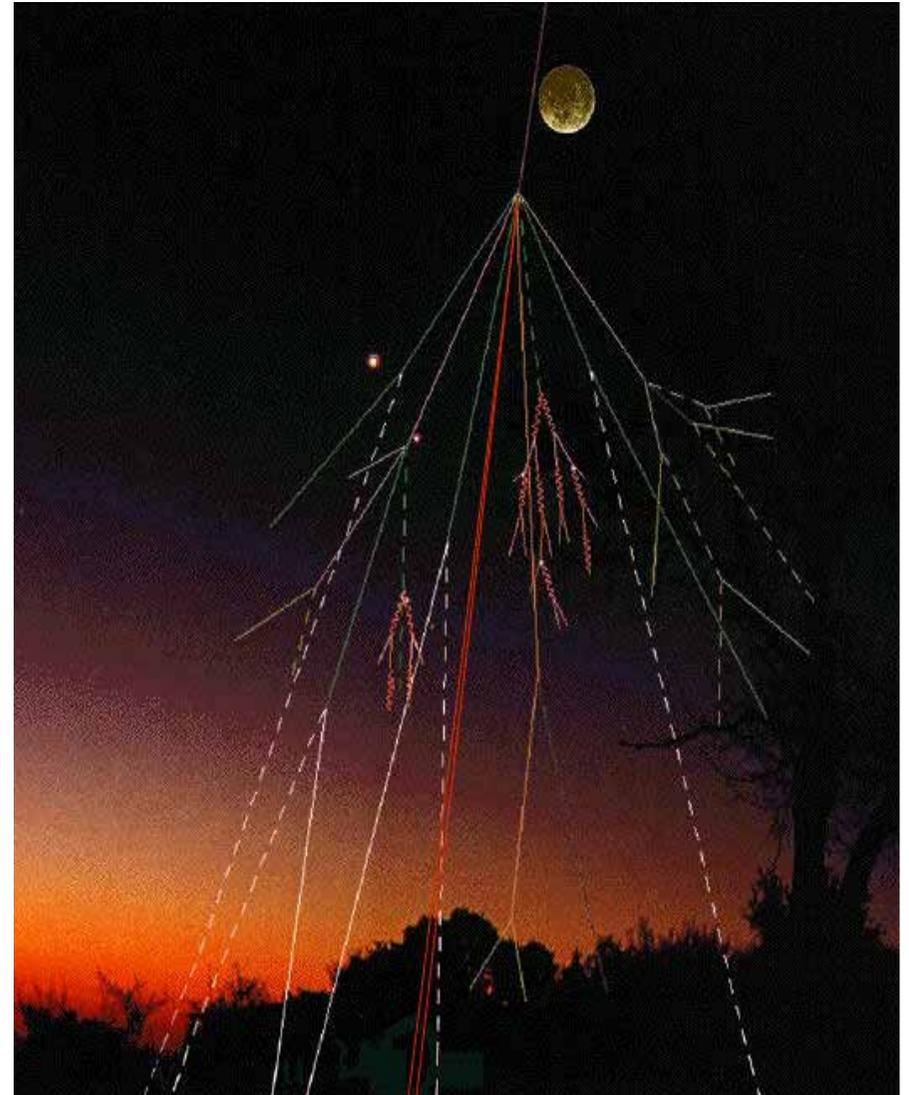
aber

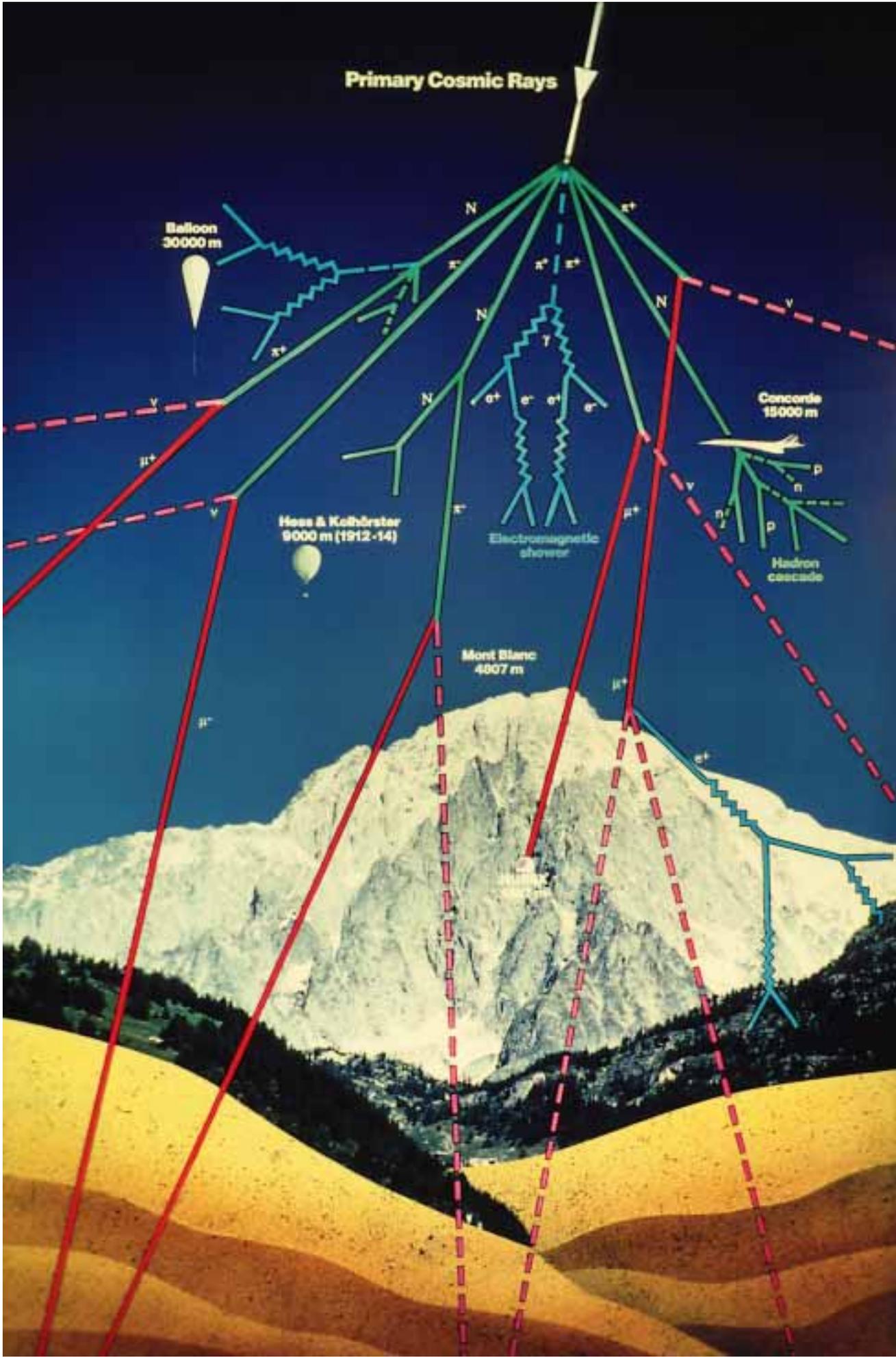
es gibt noch viel mehr Teilchen !

Weitere Teilchen finden sich in der kosmischen Strahlung
z.B.

Müon (μ), Pion (π) und Kaon (K)

Diese Teilchen sind nicht stabil !



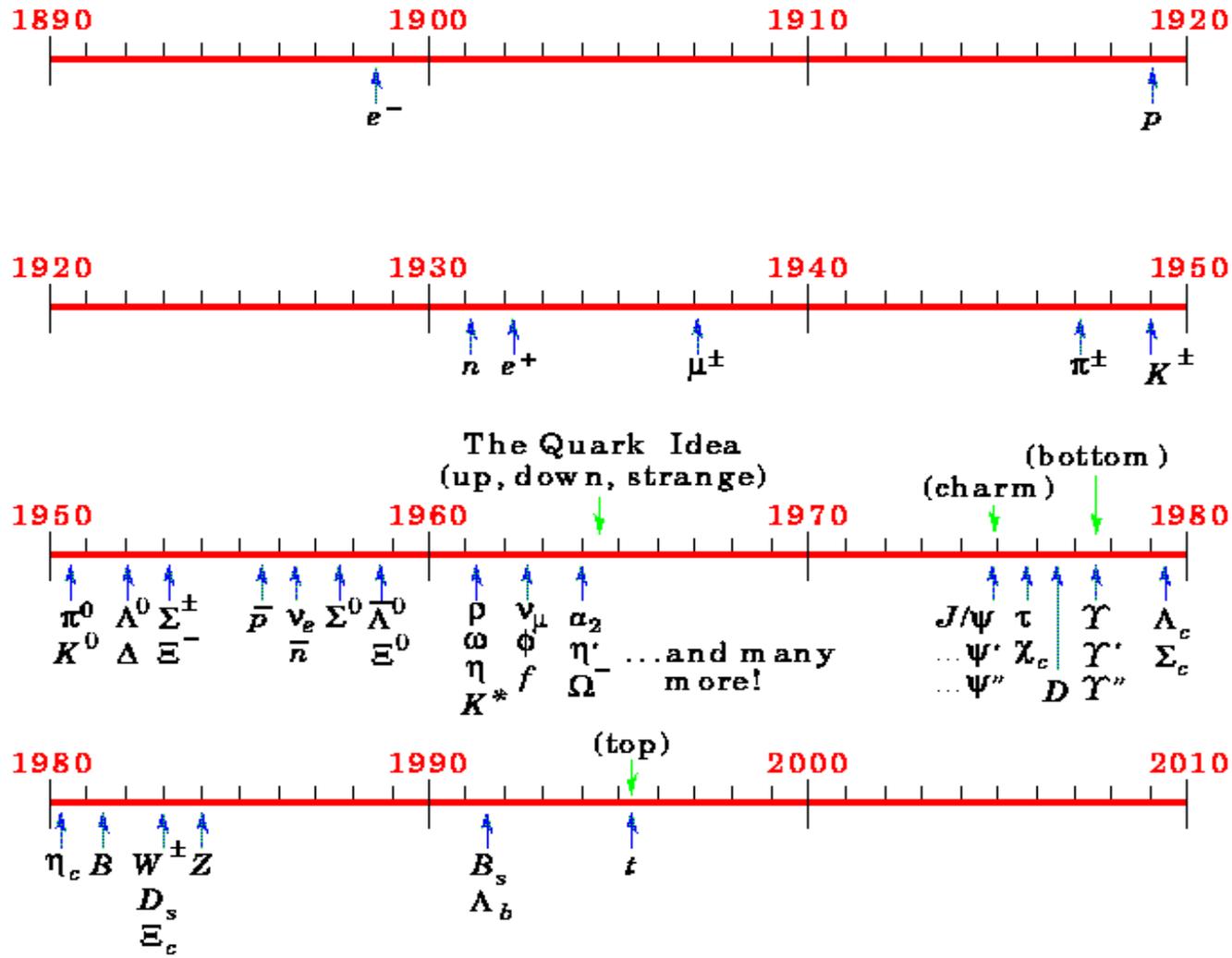


Das Leben der meisten Teilchen ist kurz

- ◆ Das geladene Pion π^- hat eine Lebenserwartung von $2,6 \cdot 10^{-8}$ Sekunden und zerfällt dann in ein Müon
- ◆ Das Müon zerfällt nach weiteren $2,2 \cdot 10^{-6}$ Sekunden in ein Elektron
- ◆ Das Elektron ist stabil !
- ◆ Das freie Neutron (nicht im Atomkern gebunden) zerfällt nach ~15 Minuten in ein Proton und ein Elektron
- ◆ Das Proton ist stabil !

Das Licht legt in 10^{-9} Sekunden gerade einmal 30cm zurück !

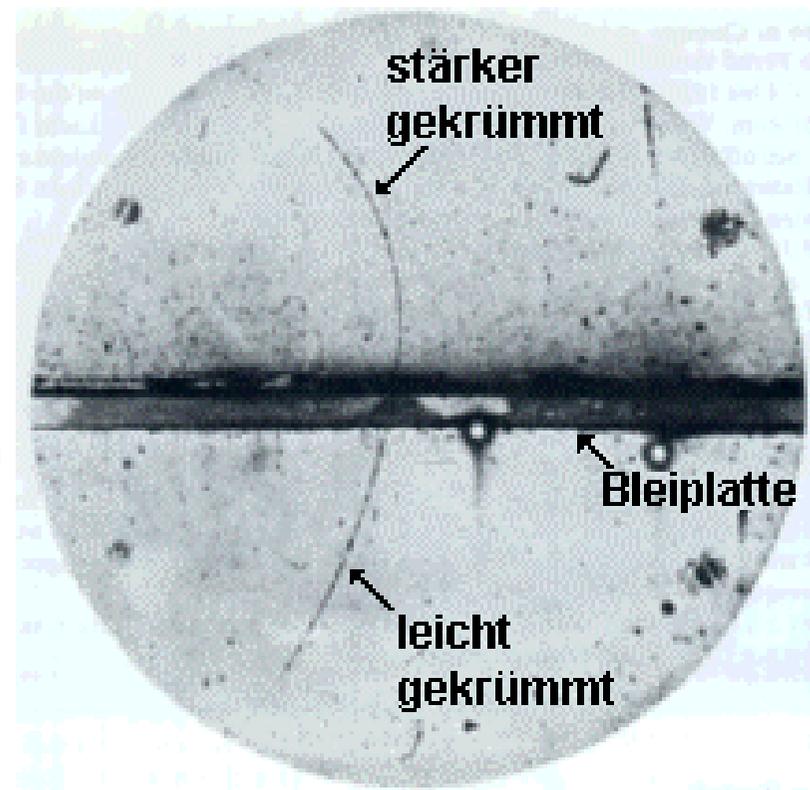
Entdeckte Teilchen



Wie können Teilchen nachgewiesen werden?

- ◆ Geladene Teilchen schwärzen Filme
Photoplatten, Emulsionen
- ◆ Geladene Teilchen können Gase und Flüssigkeiten ionisieren
z.B. Nebelkammer, Funkenkammer
- ◆ Geladene Teilchen werden im Magnetfeld abgelenkt (Lorentzkraft)
Bestimmung von Ladung und Impuls
- ◆ Die meisten Teilchen werden in einem dicken Eisen-/Blei-Block abgebremst
Bestimmung der Energie

Entdeckung des Positrons

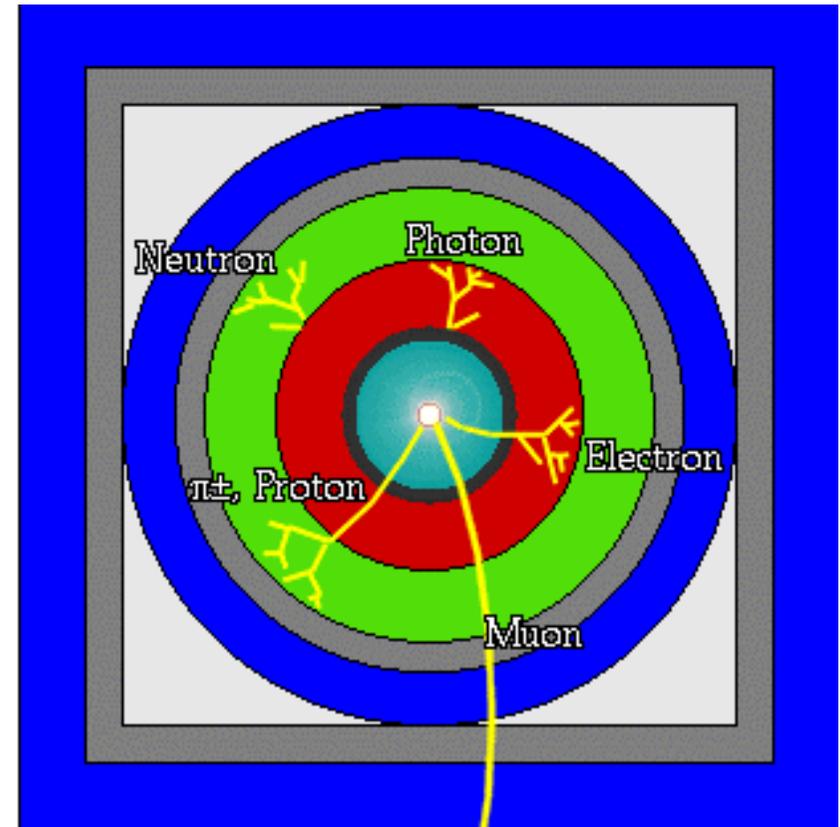
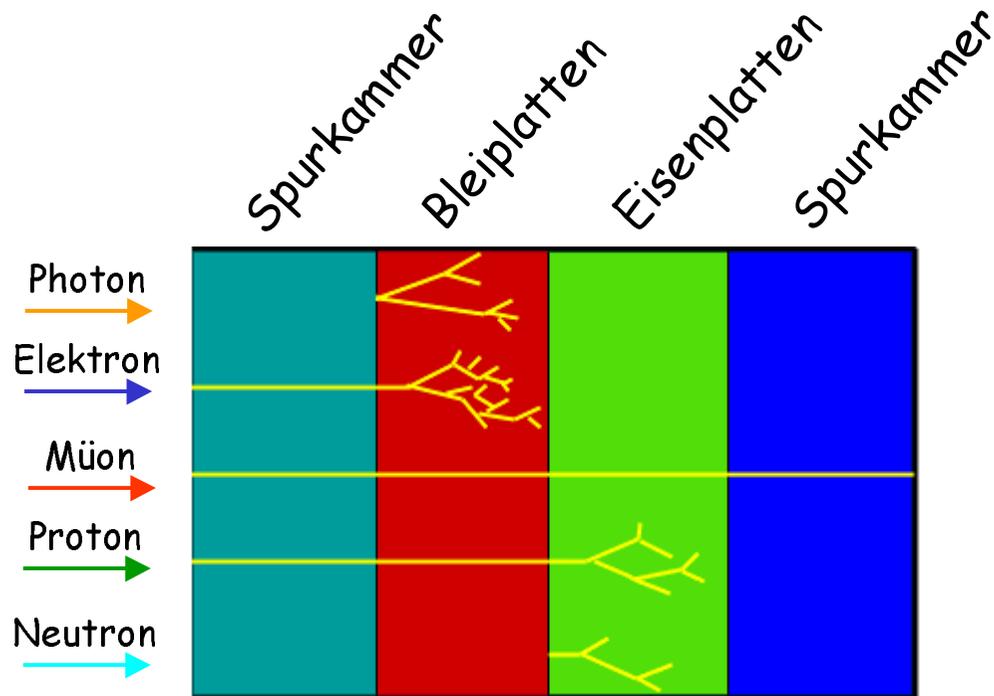


P.Anderson 1932

- ◆ Verschiedene Teilchen können unterschiedlich viel Material durchqueren



Unterscheidungsmerkmal der Teilchen

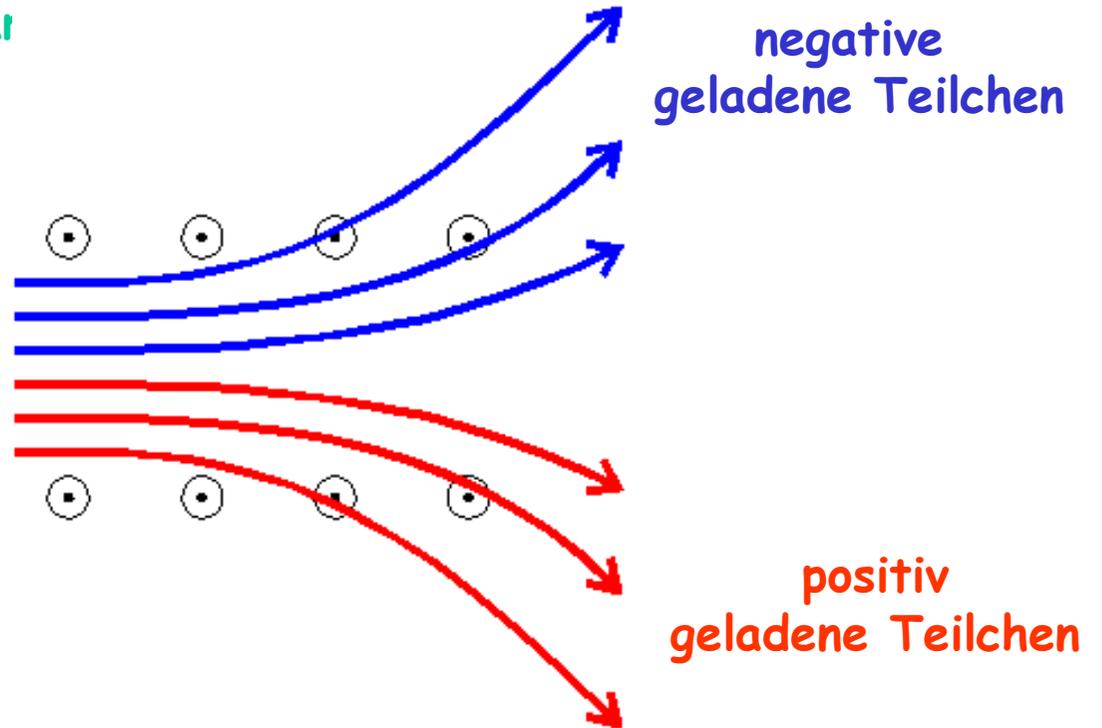


- ◆ Geladene Teilchen werden in einem Magnetfeld aufgrund der Lorentzkraft abgelenkt



Ladungsvorzeichen des Teilchen bestimmbar
Impuls bestimmbar

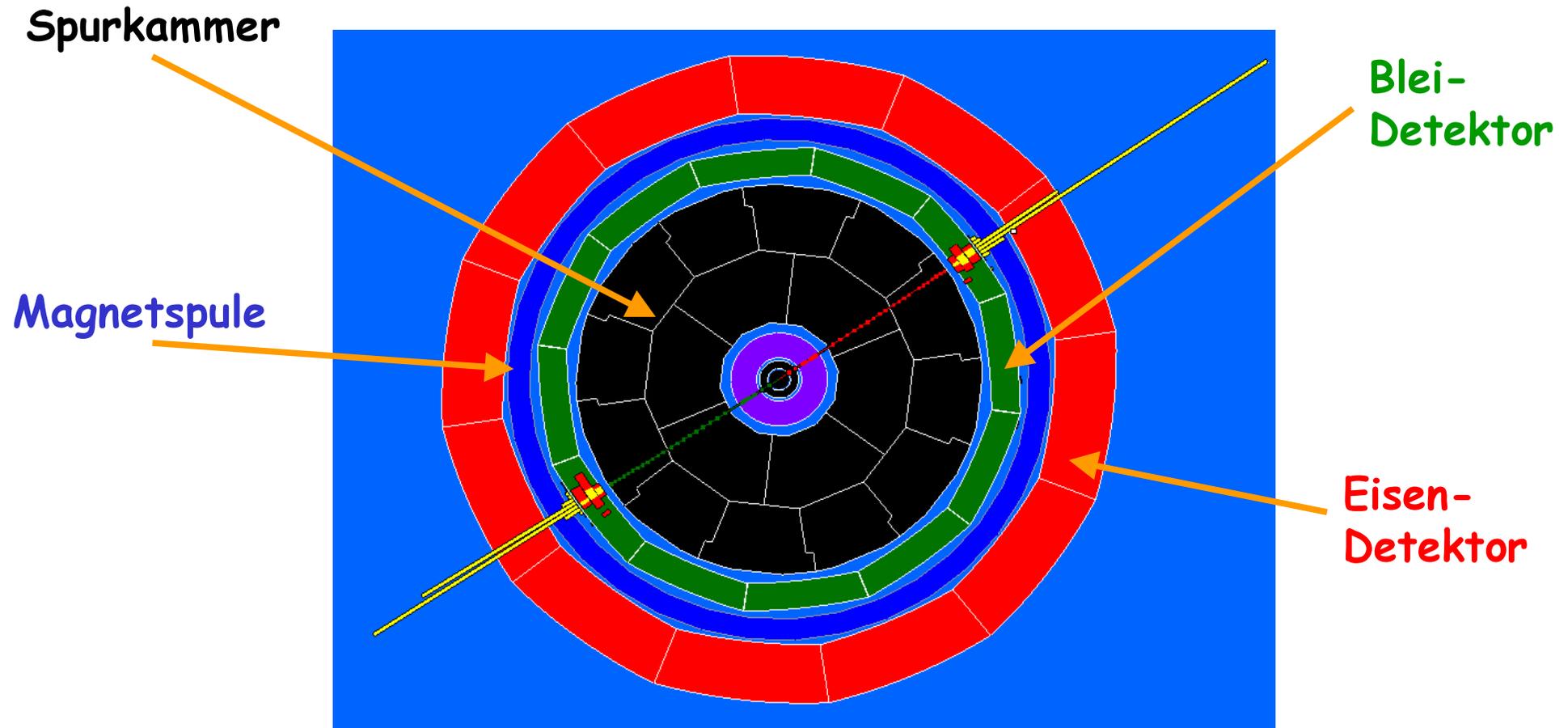
Krümmungsradius $R = \frac{p}{q \cdot B}$



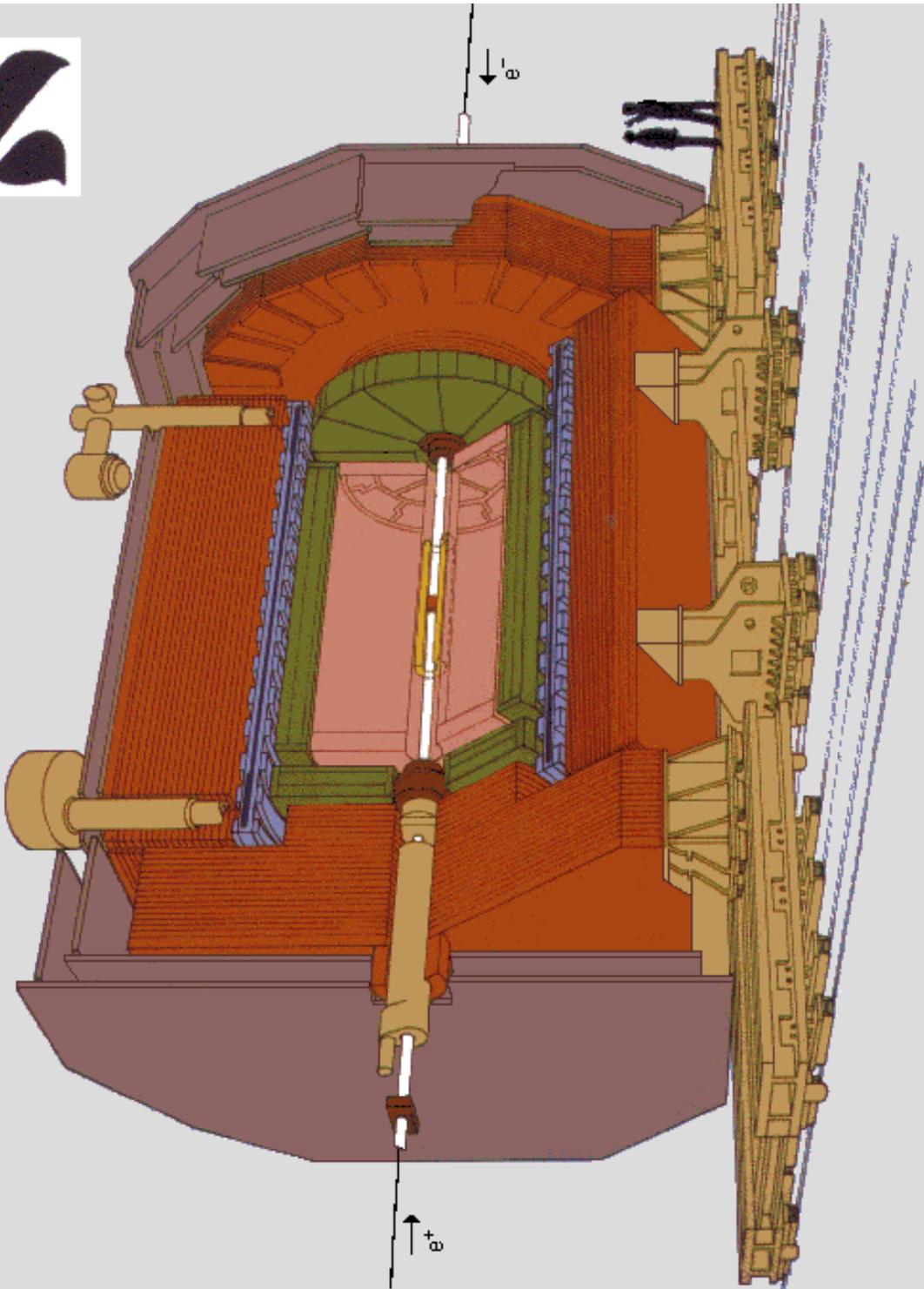
Magnetfeld zeigt aus der Ebene heraus

Zwiebelschalenstruktur eines Detektors

ALEPH-Detektor am CERN



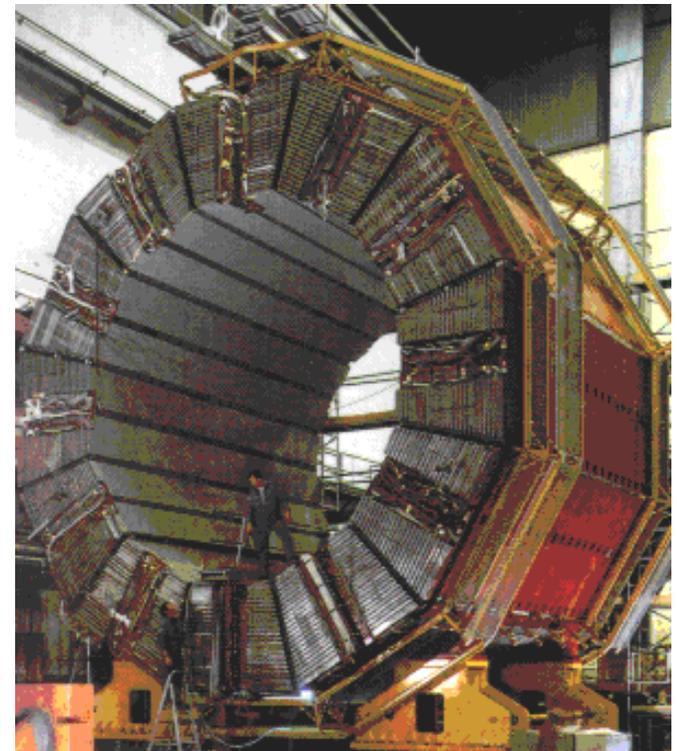
~12m im Durchmesser



Experimentierhalle in 140m Tiefe



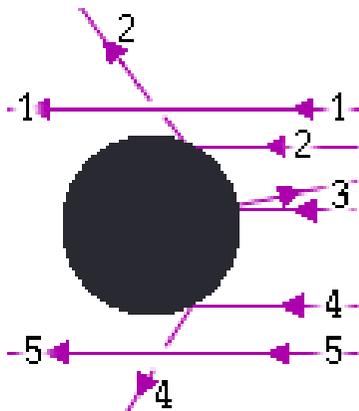
Eisen/Gas-Detektor



Experimente zur Untersuchung von Materie

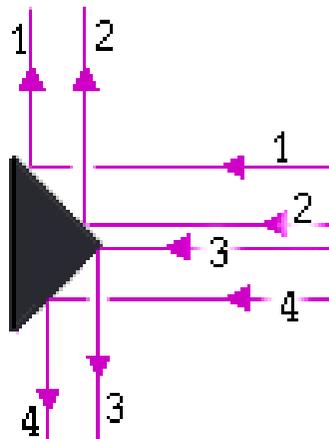
Streuung von Teilchen an einer Materialprobe

Zwei Beispiele für die Form der Streuzentren



Streuung an einer Kugel

Teilchen können unter großem Winkel gestreut werden



Streuung an einem Keil

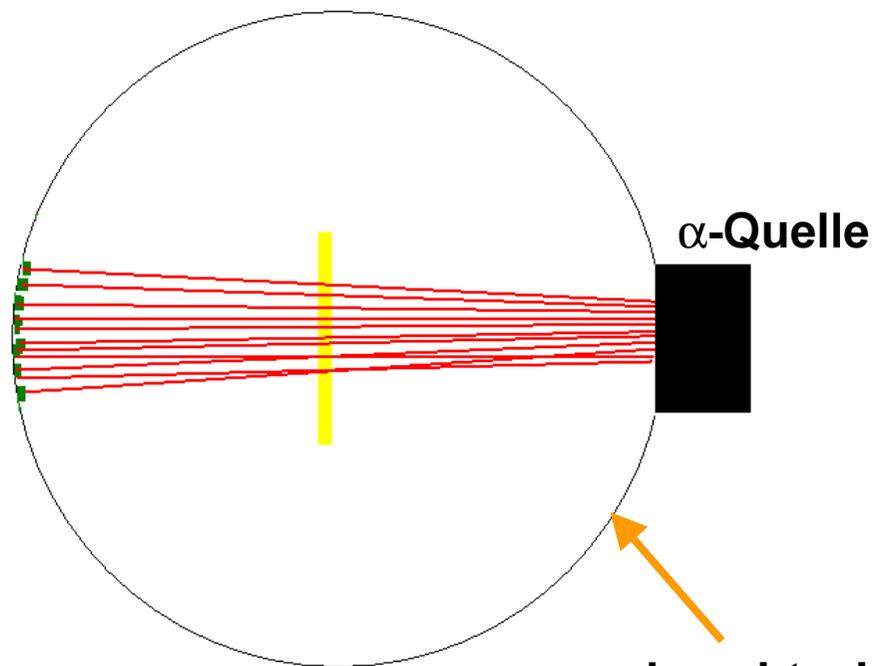
Teilchen werden unter einem Winkel von 90° gestreut

◆ Streuexperiment von E. Rutherford (1911)

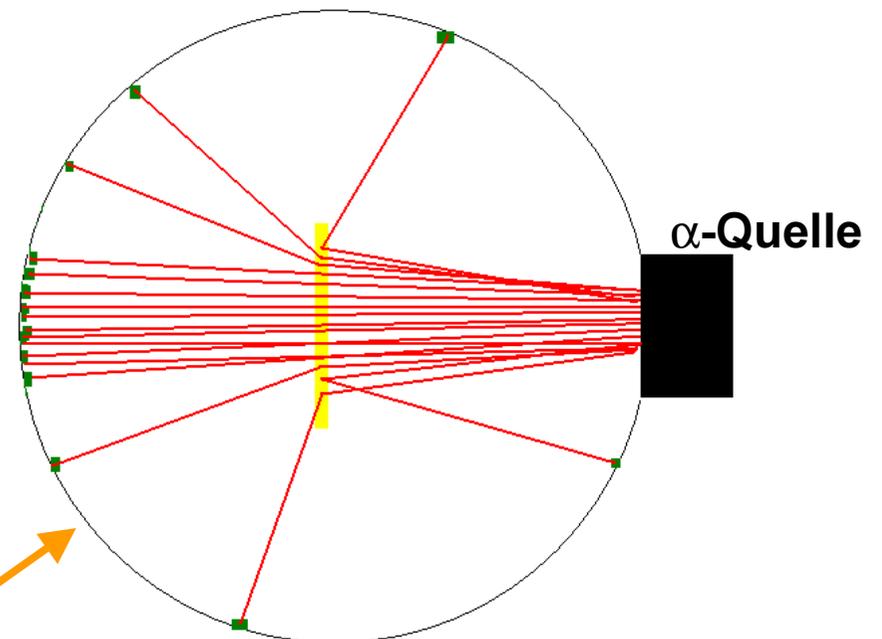
Streuung von α -Teilchen (Helium-Kern) an Goldfolie

5 MeV α -Teilchen \Rightarrow Auflösung $\sim 5 \cdot 10^{-14}$ m

Erwartung von Rutherford

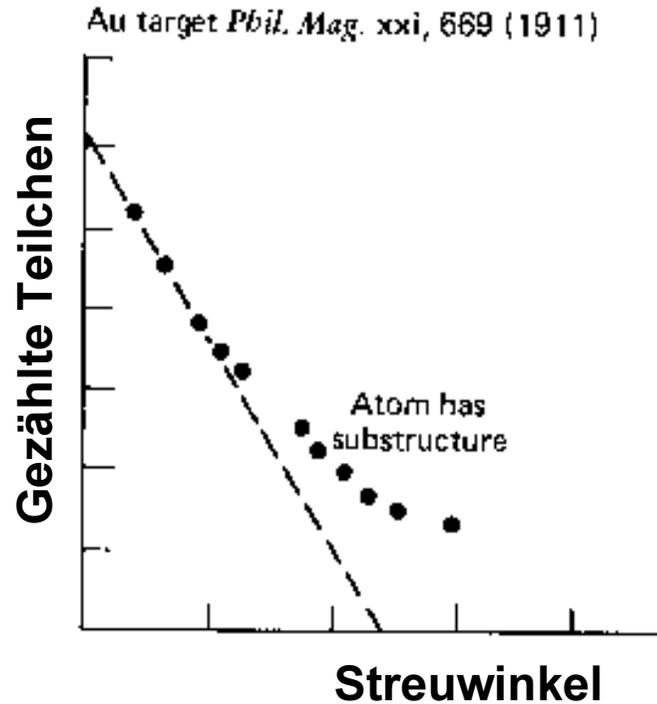


Ergebnis der Messung



Leuchtschirm

Ergebnis des Streuexperimentes



Rutherford-Experiment
5 MeV α -Teilchen auf Au

◆ Teilchen gehen nicht ungehindert durch Goldfolie hindurch



Im Atom befindet sich hartes Streuzentrum



Atomkern

◆ Proton-Proton Kollision (1973 am CERN)

beide Protonen haben Energie bis 30 GeV



Auflösung 10^{-16} - 10^{-17} m

Ergebnis der Messung

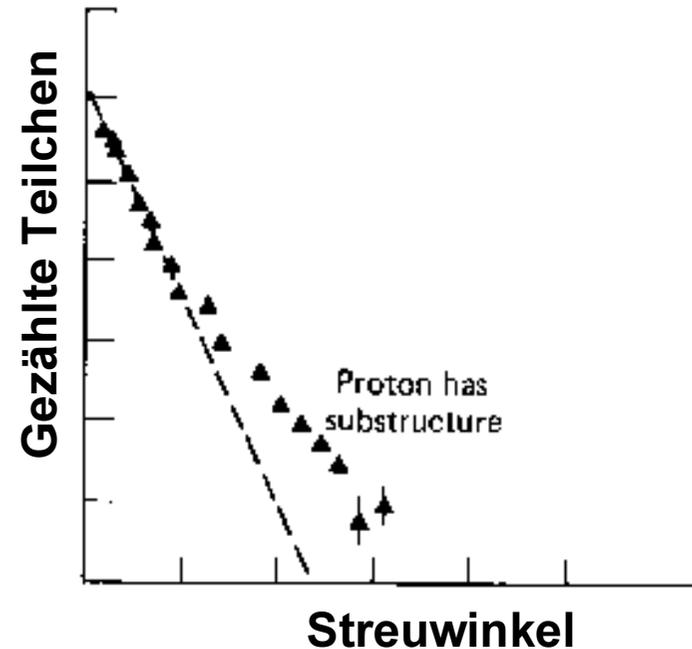
Es werden auch unter großen Winkeln
Teilchen gestreut



Proton hat harte Streuzentren

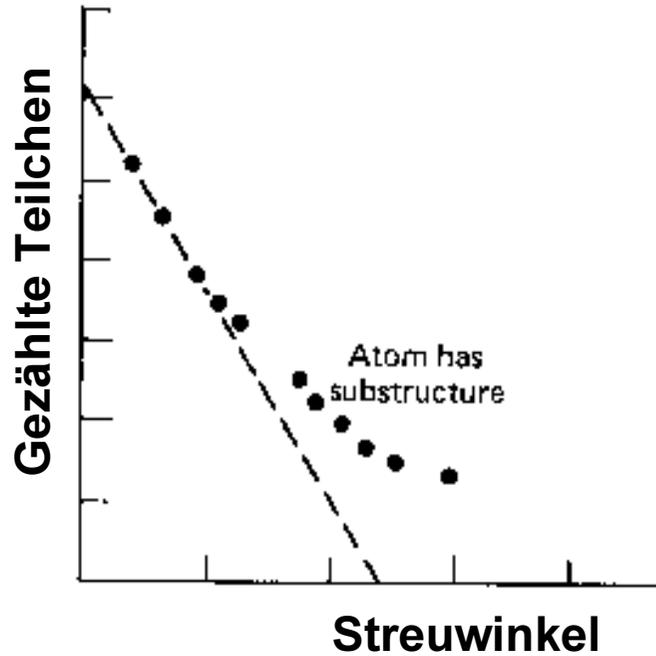
Proton auf Proton
am ISR (CERN)

Proton target *Phys. Lett.* 46B, 471 (1973)



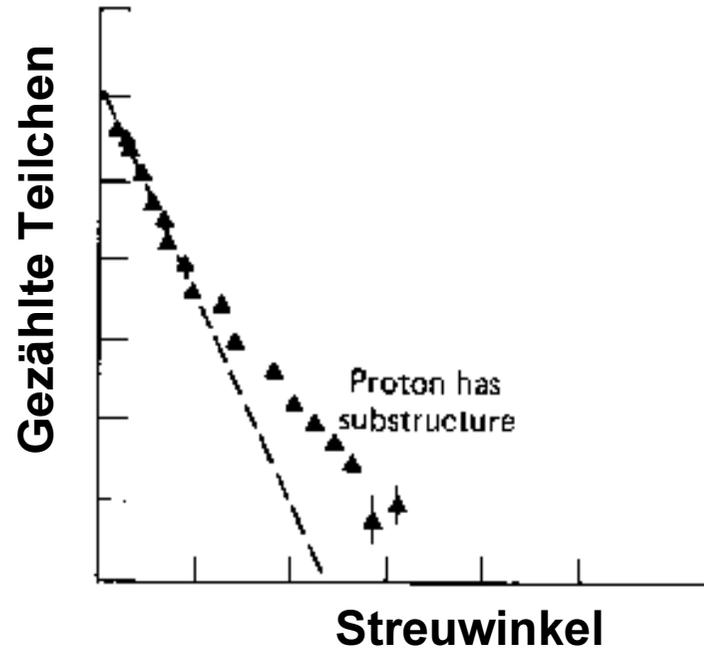
Rutherford-Experiment 5 MeV α -Teilchen auf Au

Au target *Phil. Mag.* xxi, 669 (1911)



Proton auf Proton am ISR (CERN)

Proton target *Phys. Lett.* 46B, 471 (1973)

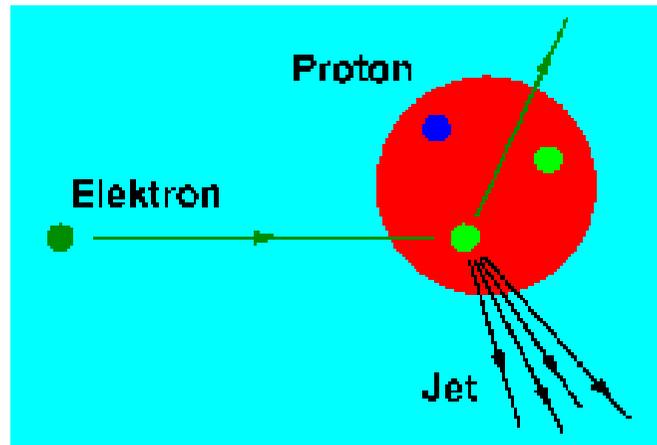


Atom besitzt hartes Streuzentrum (Atomkern)
Proton besitzt harte Streuzentren (Quarks)

Proton Untersuchung bis 10^{-18} m bei HERA am DESY, Hamburg



- ◆ Streuung von 30 GeV Elektronen
an 820 GeV Protonen
- ◆ Hadron-Elektron-Ring-Anlage
(HERA)
Umfang: 6,3 km

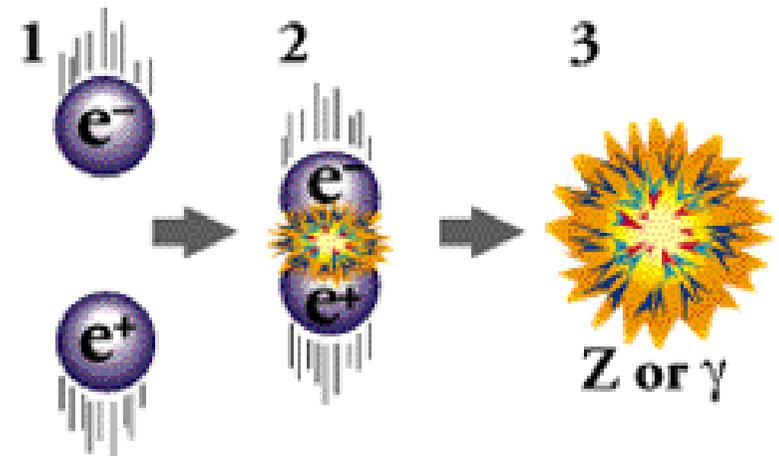
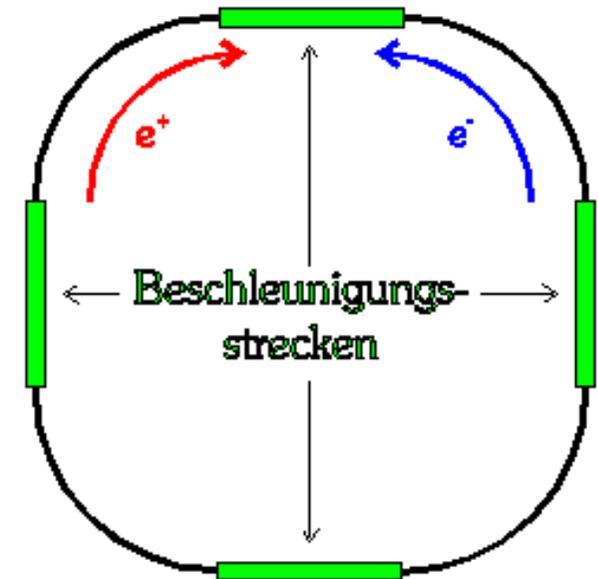


HERA-Teilchenbeschleuniger

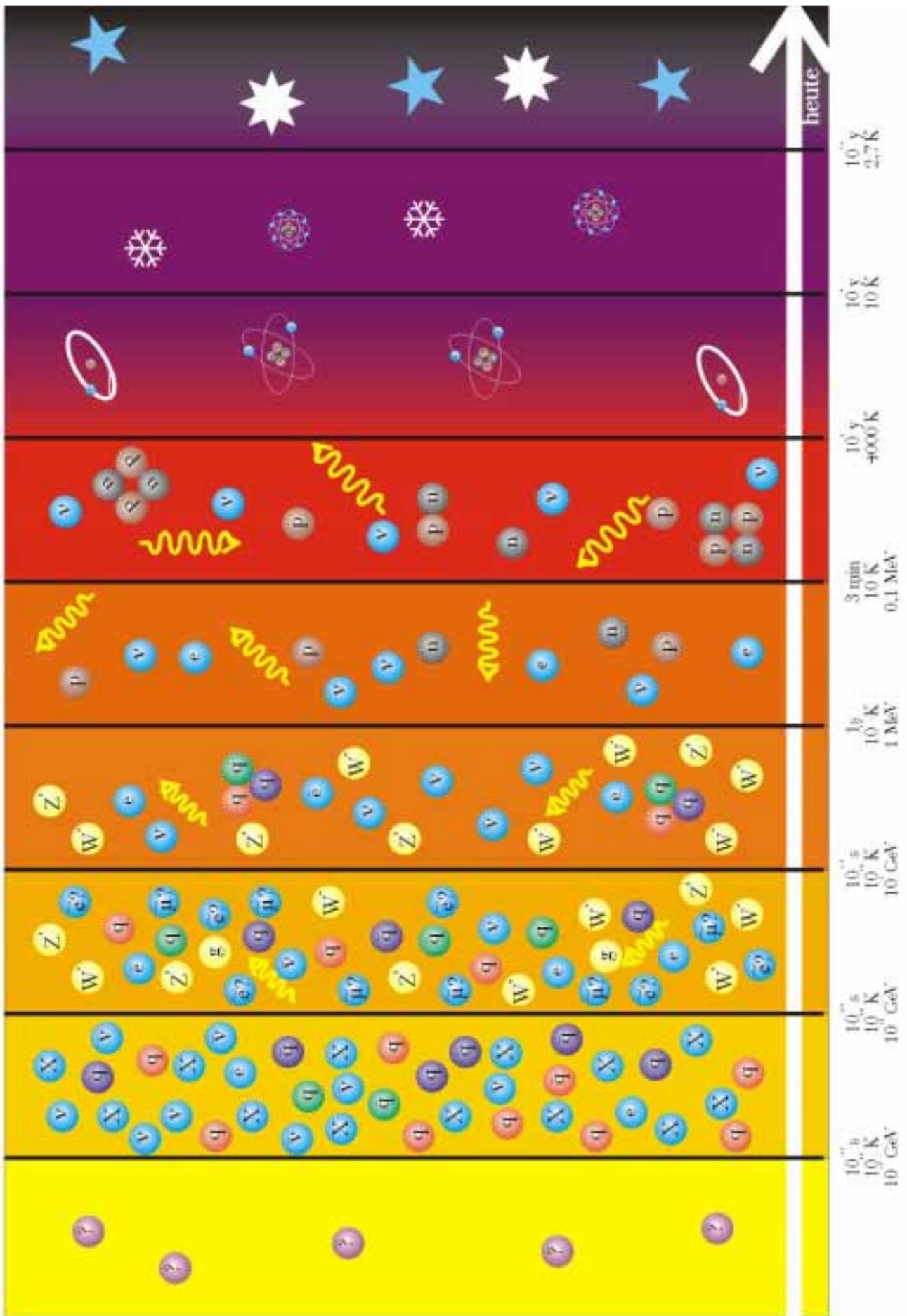


Urknall im Labor

- ◆ Erzeugung von neuen Teilchen im Labor
Elektron und Positron werden beschleunigt und zur Kollision gebracht
- ◆ Teilchen und Anti-Teilchen werden vernichtet und es entsteht Energie (Licht oder Photonen)
aus der Energie können neue Teilchen entstehen
- ◆ Neu erzeugten Teilchen werden in Detektoren nachgewiesen
- ◆ Am Large-Electron-Positron-ring LEP steht Energie zwischen 90 und 200 GeV für die Erzeugung von Teilchen zur Verfügung



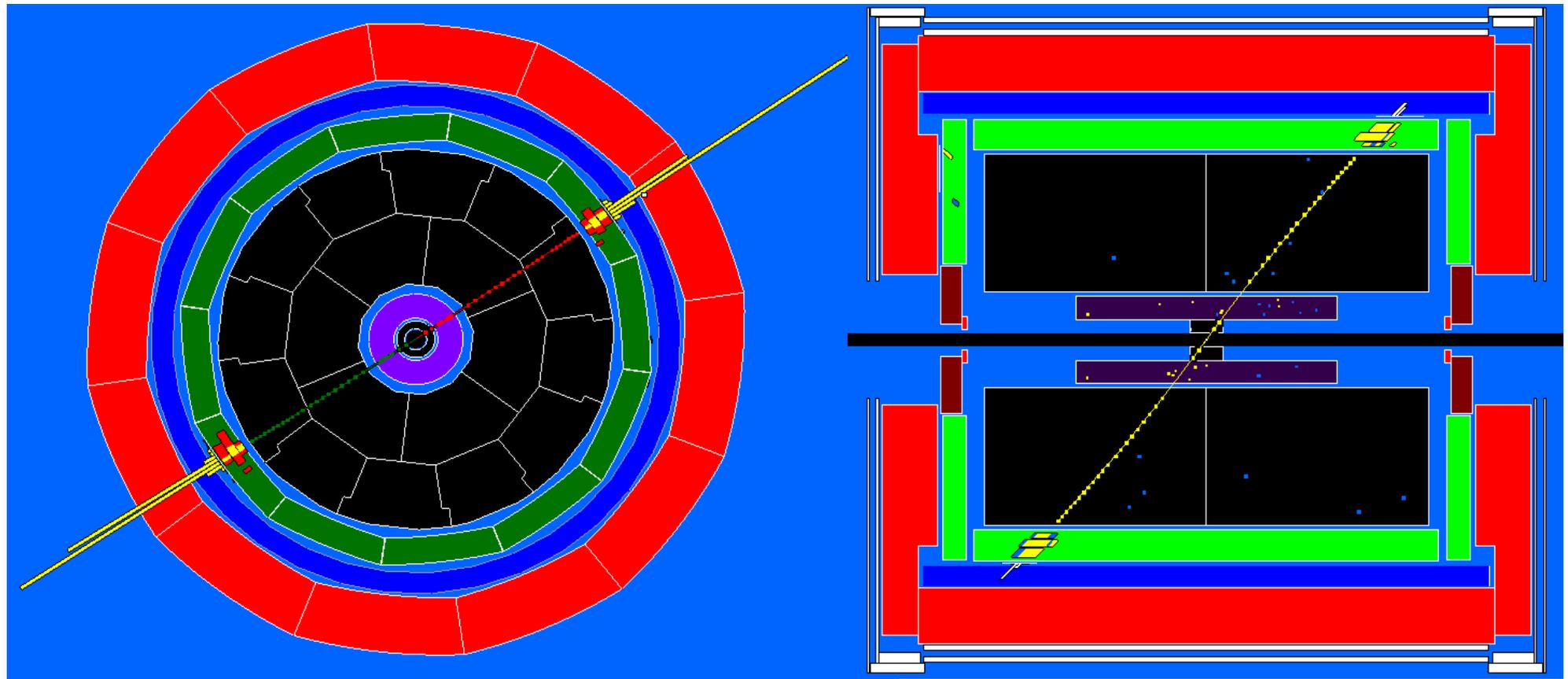
Die Geschichte des Universums



Erwartete und unerwartete Teilchen

Teilchen gesehen mit dem ALEPH-Detektor

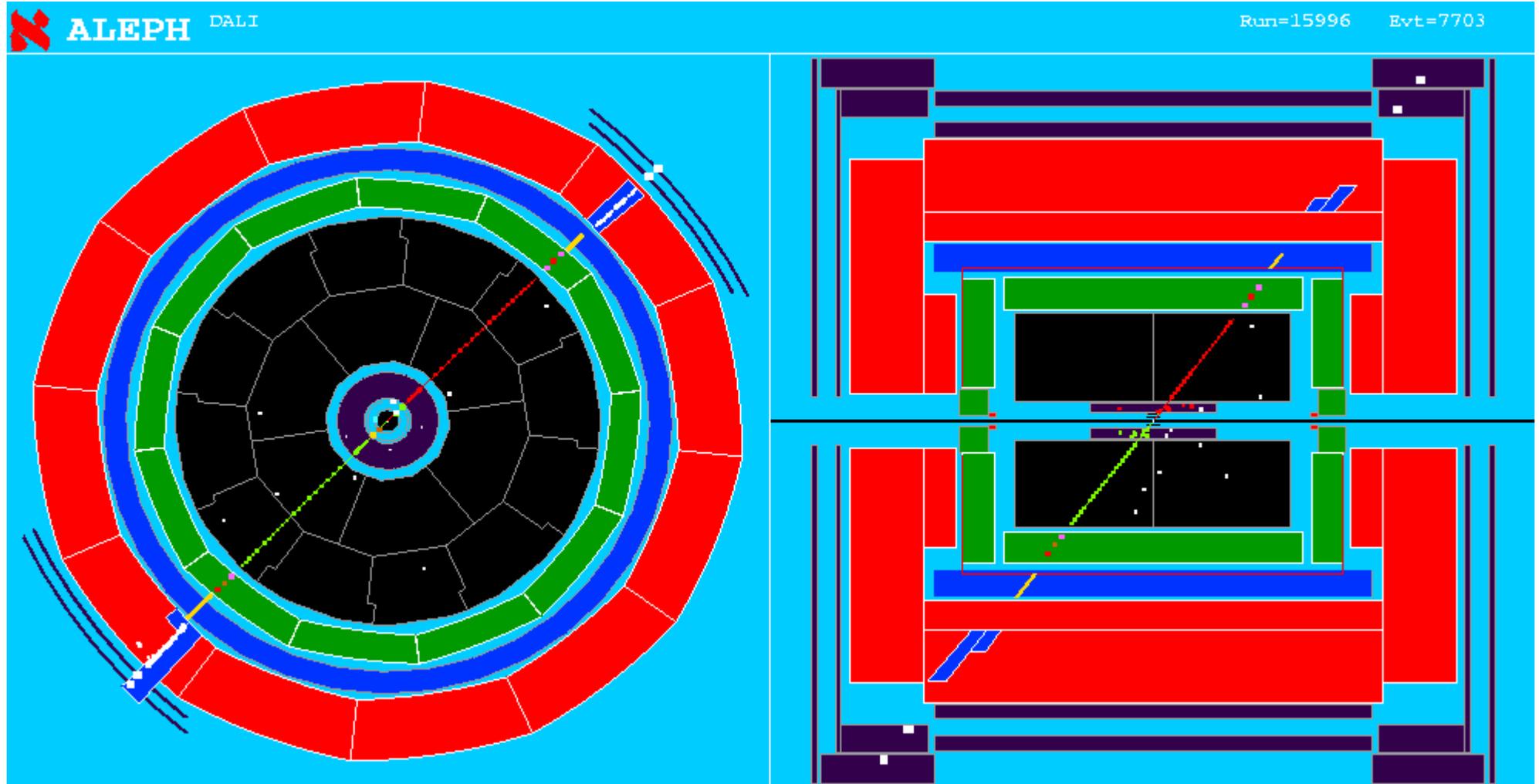
Aus der Energie ist ein Elektron e^- und ein Positron e^+ entstanden



Schnitt senkrecht zur Strahlachse

Schnitt entlang der Strahlachse

Aus der Energie ist ein Müon μ^- und ein Anti-Müon μ^+ entstanden



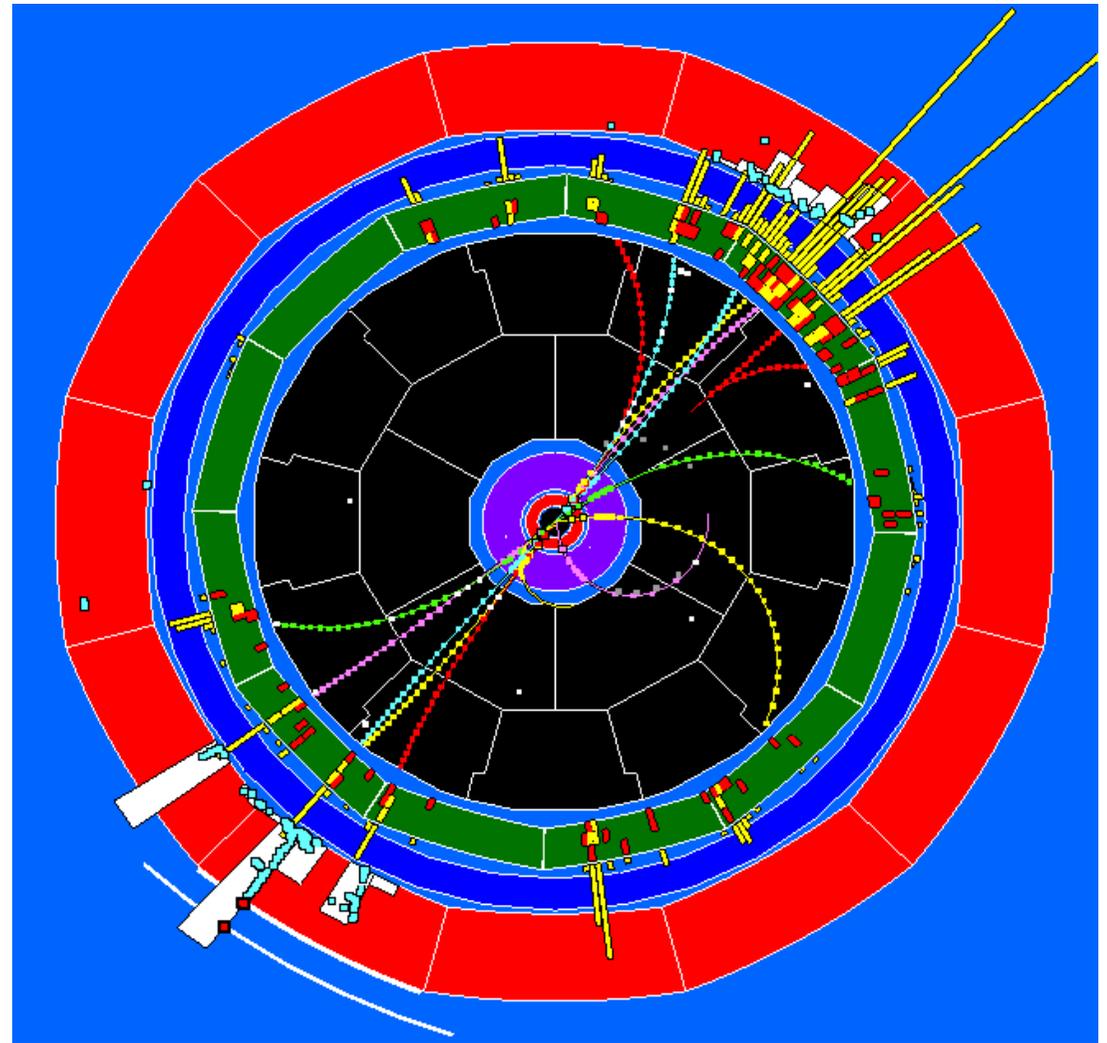
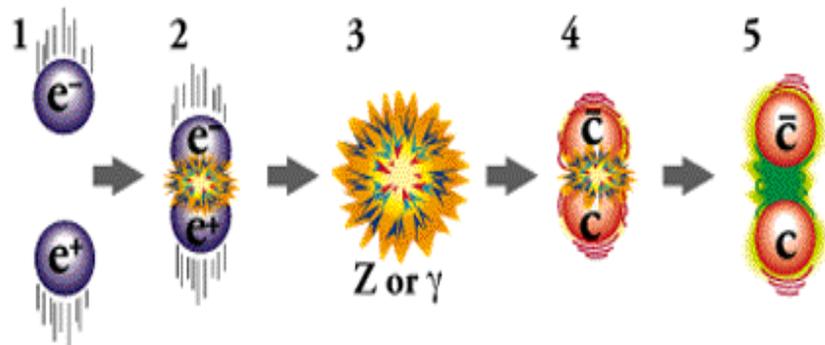
Wo kommen die vielen Teilchen her ??

- ◆ Zwei Teilchenbündel (Jets) sind entstanden



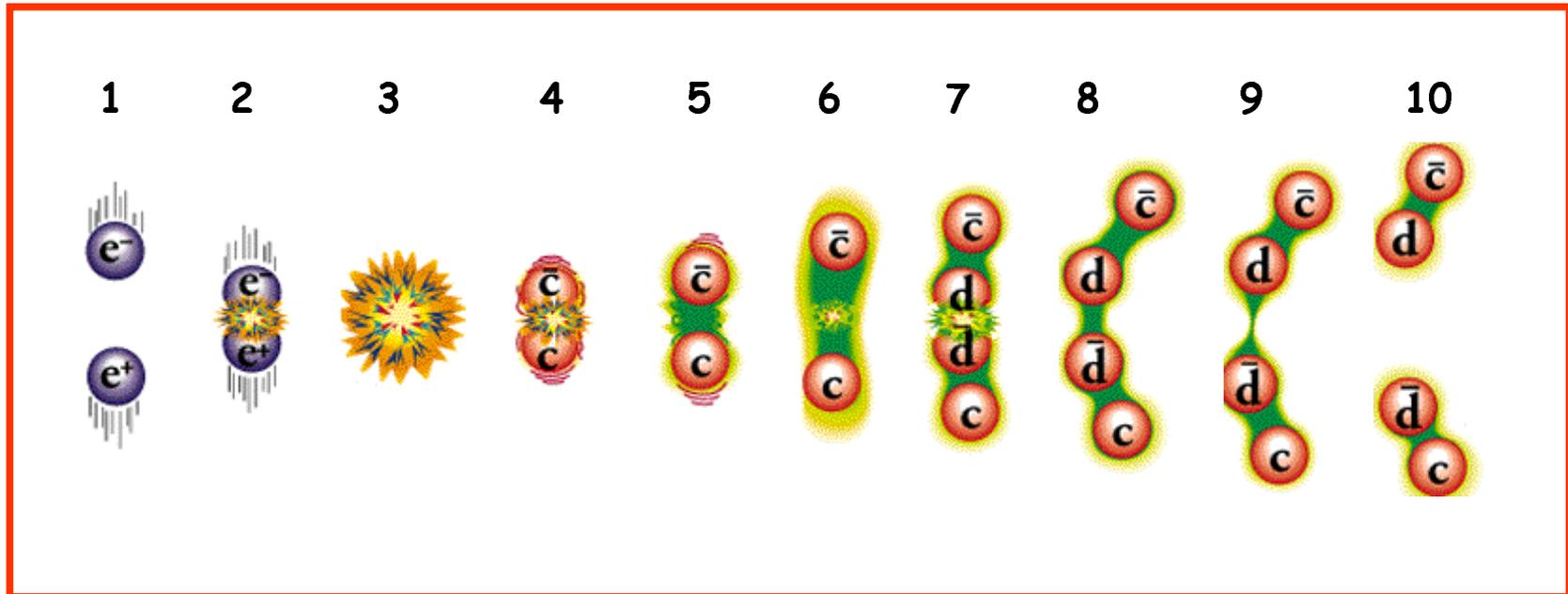
Ursache ist die

"Starke Wechselwirkung"



Aus der Energie sind Quarks entstanden

- ◆ Die "starke Wechselwirkung" führt dazu, daß nicht nur ein einzelnes Quark-Paar entsteht



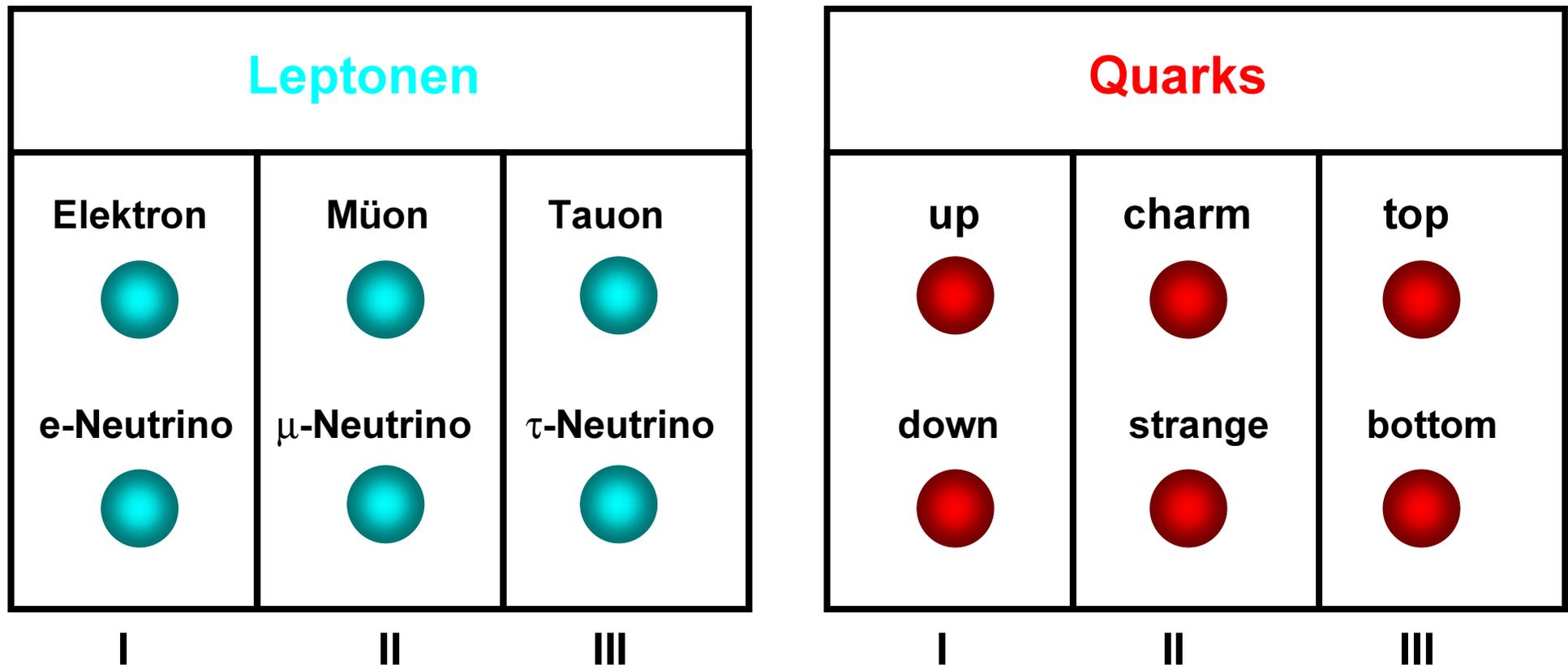
Wechselwirkungen zwischen Teilchen

Vier verschiedene Wechselwirkungen

- ◆ **Gravitation**
Anziehung von Massen
Stärke : 10^{-41}
Reichweite: unendlich
- ◆ **Schwache Wechselwirkung**
Bewirkt den radioaktiven Zerfall von Atomkernen (β -Zerfall)
Stärke : 1/10 000
Reichweite: sehr klein!
- ◆ **Elektromagnetische Wechselwirkung**
Gleiche Ladungen stoßen sich ab und ungleiche ziehen sich an
Stärke : 1
Reichweite: unendlich
- ◆ **Starke Wechselwirkung**
Bewirkt anziehende Wechselwirkung zwischen den Quarks und hält damit den Atomkern zusammen
Stärke : 100
Reichweite: $\sim 10^{-15}\text{m}$

Das Standardmodell der Teilchenphysik

Alle bisher gefundenen Teilchen (~200) können aus 12 Bausteinen zusammengesetzt werden



Zu jedem Teilchen existiert ein Anti-Teilchen!

Eigenschaften von Leptonen

Teilchen	Ladung	Masse
Elektron e-Neutrino	-1 0	0,511 MeV/c ² 0
Müon μ-Neutrino	-1 0	105,7 MeV/c ² 0
Tauon τ-Neutrino	-1 0	1777 MeV/c ² 0

Neutrinos nehmen NUR an der schwachen Wechselwirkung teil !

Eigenschaften von Quarks

Teilchen	Ladung	Masse
up down	+2/3 -1/3	5 MeV/c ² 8 MeV/c ²
charm strange	+2/3 -1/3	1300 MeV/c ² 170 MeV/c ²
top bottom	+2/3 -1/3	175000 MeV/c ² 4200 MeV/c ²

NUR die Quarks nehmen an der starken Wechselwirkung teil !

Das top-Quark wurde erst 1994 am Fermi-National-Laboratory (USA)
entdeckt !

Austauschteilchen der Wechselwirkungen

Teilchen	Ladung	Masse	Wechselwirkung
Photon	0	0	elektro-magnetisch
W^- W^+ Z^0	-1 +1 0	80,4 GeV/c ² 80,4 GeV/c ² 91,2 GeV/c ²	schwach schwach schwach
Gluon	0	0	stark

Die Austauschteilchen werden auch Bosonen genannt

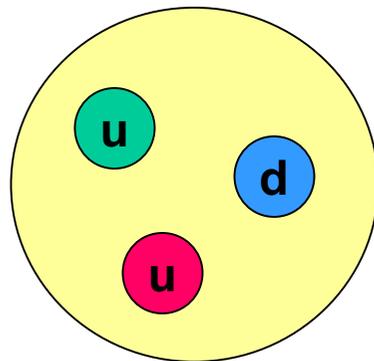
Die Vorschriften ...

- ◆ Nur ZWEI mögliche Kombinationen von Quarks sind möglich
 - 3 Quarks : Alle 3 Quarks sind Teilchen oder alle 3 Quarks sind Anti-Teilchen
 - 2 Quarks : ein Quark ist ein Teilchen und das andere ein Anti-Teilchen
- ◆ Sowohl Leptonen als auch Quarks werden nur in Paaren erzeugt und vernichtet
- ◆ Alle freien geladenen Teilchen haben eine Ladung die ein ganzzahliges Vielfaches der Elementarladung ist

Teilchen und Zerfälle im Bild des Standardmodells

Bausteine der Atomkerne

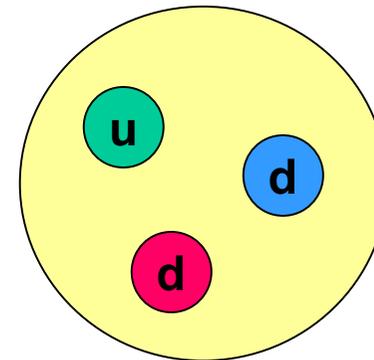
Proton



Quarks: up up down

$$\text{Ladung: } +\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = +1$$

Neutron



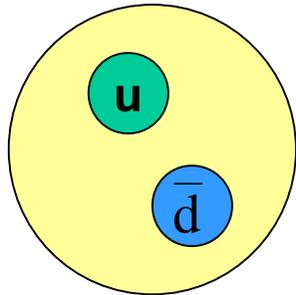
Quarks: up down down

$$\text{Ladung: } +\frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = 0$$

Teilchen, die aus drei Quarks aufgebaut sind heißen **BARYONEN**

Weitere Teilchen ...

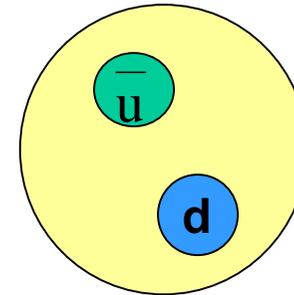
positiv geladenes Pion π^+



Quarks: **up** **Anti-down**

Ladung: $+\frac{2}{3} + \frac{1}{3} = +1$

negativ geladenes Pion π^-



Quarks: **Anti-up** **down**

Ladung: $-\frac{2}{3} - \frac{1}{3} = -1$

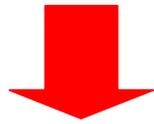
Die geladenen Pionen zerfallen aufgrund der schwachen Wechselwirkung:

$$\pi \rightarrow \text{Müon} + \mu\text{-Neutrino}$$

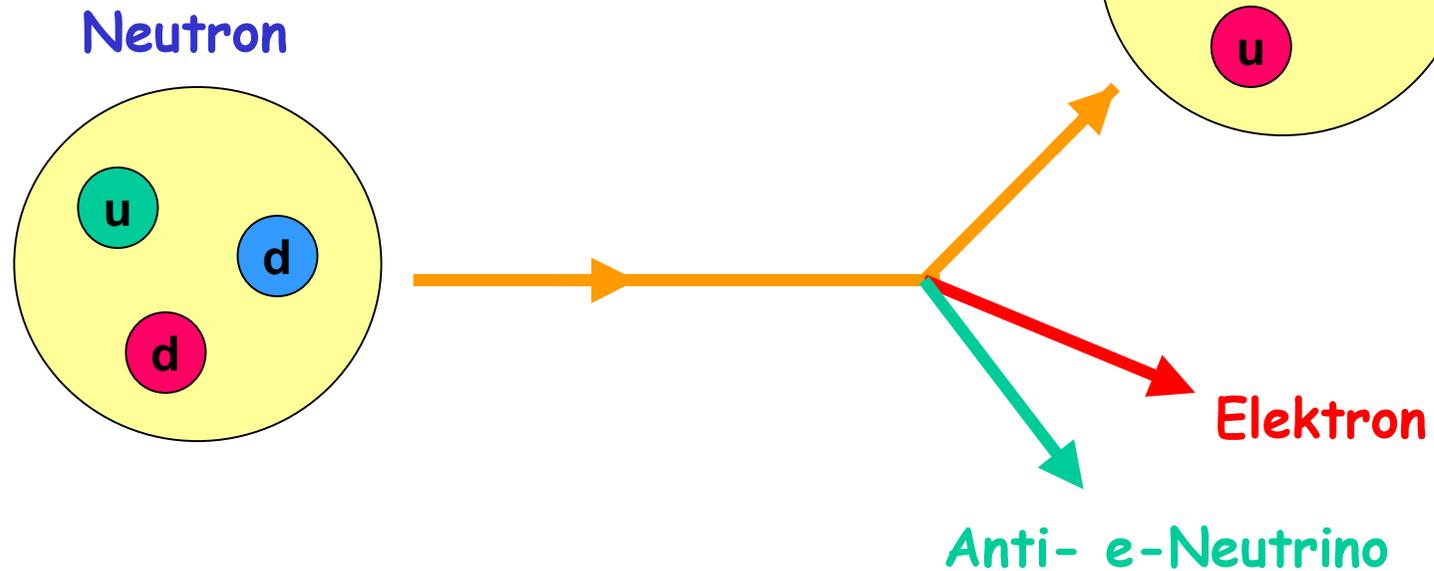
Teilchen, die aus Quark und Anti-Quark aufgebaut sind heißen **MESONEN**

Der β -Zerfall im Bild des Standardmodells

- ◆ Ein Neutron des Kerns wandelt sich in ein Proton um



Ein down-Quark ändert sich in ein up-Quark



Was bisher noch unklar ist ...

- ◆ Gravitation überhaupt noch nicht verstanden !
- ◆ Woher kommen die Massen der Teilchen ?
Das Standardmodell braucht hierfür das "Higgs-Teilchen"



Neuer Beschleuniger LHC und Experimente am CERN ab 2005

- ◆ Wieso sind die Teilchenmassen so extrem unterschiedlich ?
Leptonen: Tauon ~3500 mal schwerer als Elektron
Quarks: top-Quark ~35000 mal schwerer als up-Quark
- ◆ Sind die Neutrinos wirklich masselos ?
- ◆ Können alle Wechselwirkungen in einer Theorie beschrieben werden (sogenannte Grand-Unified-Theory GUT) ?
- ◆ Wo ist die Anti-Materie nach dem Urknall geblieben ?

**Teilchenphysik kann bereits viel erklären,
aber
es bleibt weiterhin spannend ...**