

# Auf den Spuren der Elementarteilchen

- ◇ Beschleuniger und Detektoren
- ◇ Z Produktion und Zerfall
- ◇ Teilchenidentifikation
- ◇ Zusammenhang mit Kosmologie



Internationaler Schülerforschungstag, Dresden, 20.3.2007  
Michael Kobel



# Wiederholung: nützliche Einheiten für Teilchen

- ◇ Größe:

1 fm = 1 Femtometer („Fermi“) =  $10^{-15}$  m

(1  $\mu$ m = 1.000.000.000 fm)

- ◇ Energie:

1 ElektronVolt = 1eV

1 KiloElektronVolt = 1 keV = 1000 eV

1 MegaElektronVolt = 1 MeV = 1.000.000 eV

1 GigaElektronVolt = 1 GeV = 1.000.000.000 eV

- ◇ 1 GeV: „viel“ für ein Teilchen, aber makroskopisch winzig:  
könnte Taschenlampe (1,6 Watt) für ganze  
0,000.000.0001 Sekunden zum Leuchten bringen



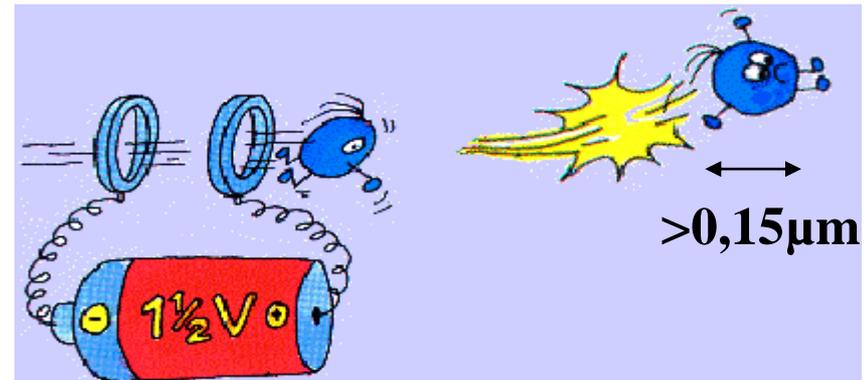
# Teilchenbeschleuniger als Mikroskope

- ◇ Sehen = Abbilden



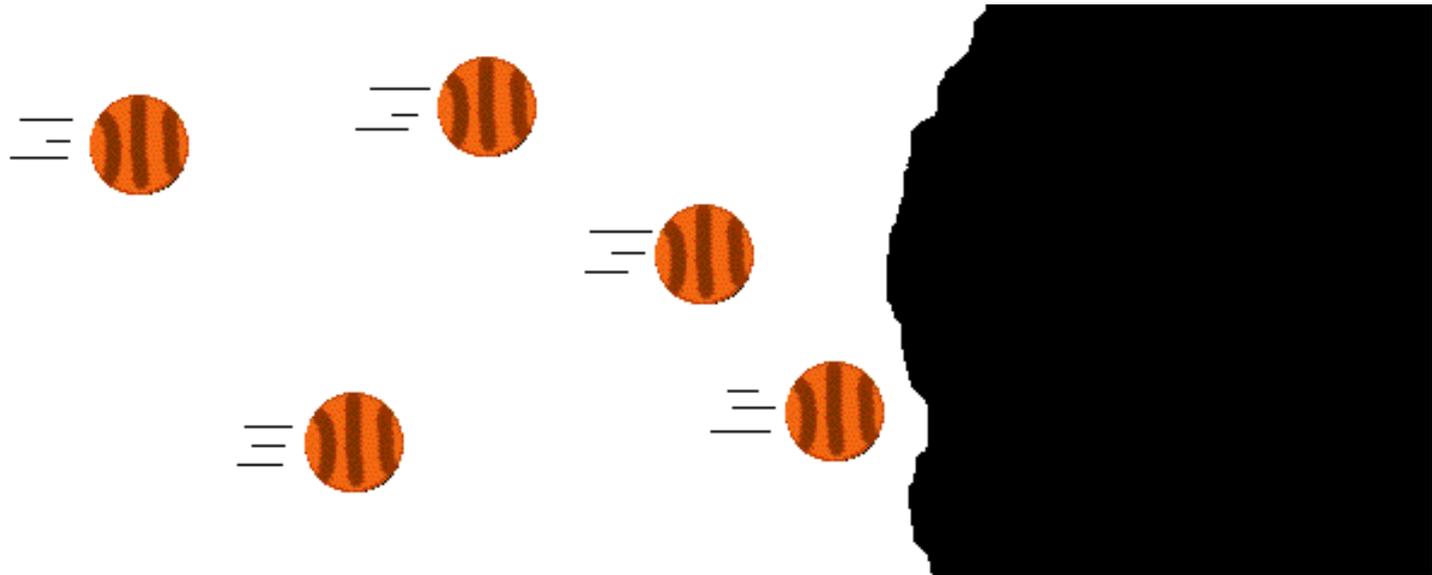
Wurfgeschoß (Projektil) → Zielobjekt → Nachweis (Detektor)

- ◇ „Auflösungsvermögen“:  
Treffgenauigkeit  $\ll$  Größe der Strukturen  
Projektilgröße  $\ll$  Größe der Strukturen
- ◇ Treffgenauigkeit =  $200 \text{ fm} / \text{Energie (in MeV)}$ , zum Beispiel:  
 $0,2 \text{ fm}$  bei  $E = 1 \text{ GeV} = 1000 \text{ MeV}$   
 $200 \text{ fm}$  bei  $E = 1 \text{ MeV} = 1000 \text{ keV}$   
 $0,2 \mu\text{m}$  bei  $E = 1 \text{ eV}$

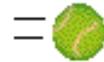
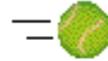
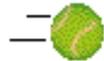
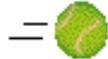
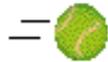
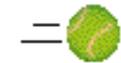


# Unbekanntes Objekt in einer Höhle

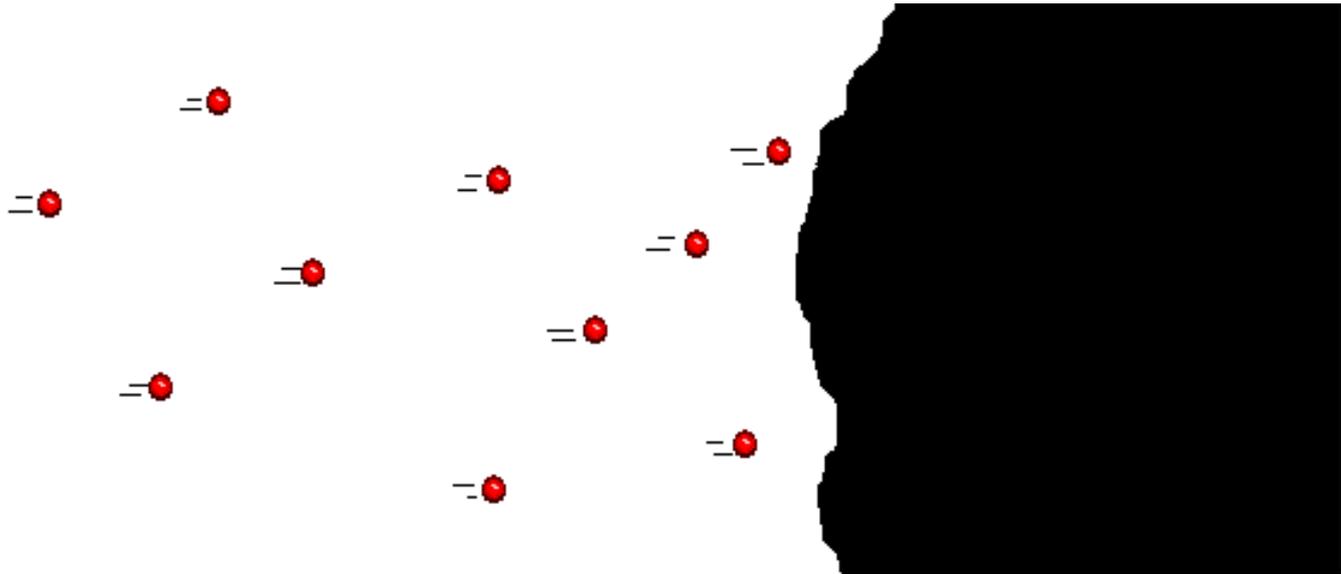
- ◇ Projektil: Basketbälle



◇ Projektil: Tennisbälle



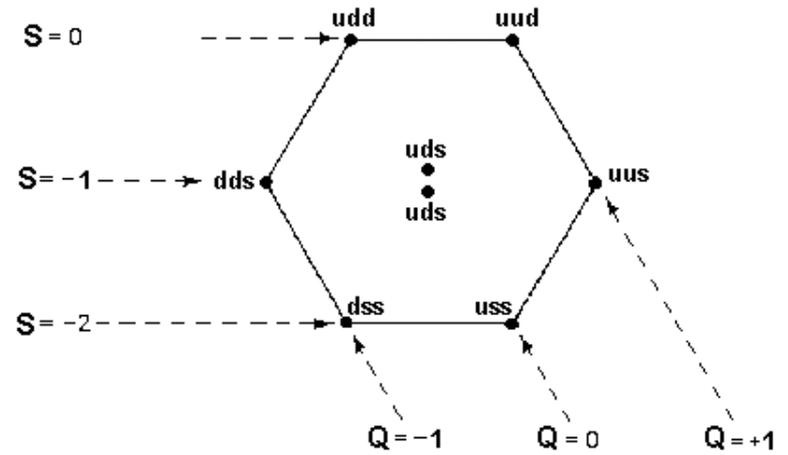
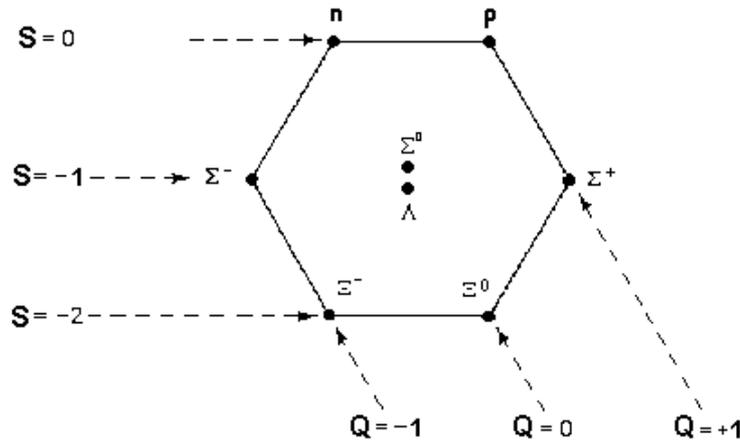
◇ Projektil: Murmeln



**...Nichts wie weg !**

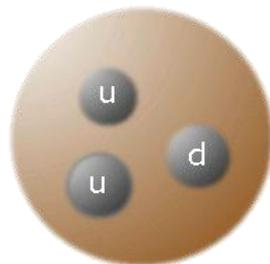
# Protonen und Neutronen sind nicht elementar!

- ◇ Indirekte Hinweise: z.B. Ordnungsschema (60er Jahre)

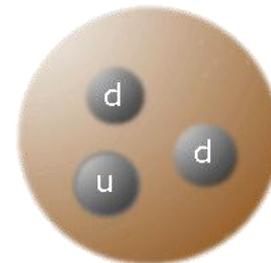


- ◇ Direkter Beweis: Beschuss mit Elektronen → Quarks  
1970: Stanford, Kalifornien; seit 1989: DESY, Hamburg
- ◇ Nötige Treffgenauigkeit: « 1 fm → Energie » 0,2 GeV
- ◇ Resultat:

## Proton



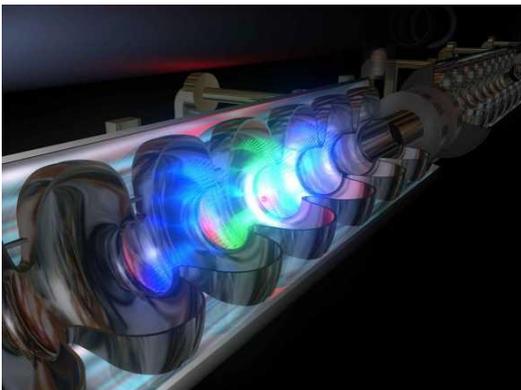
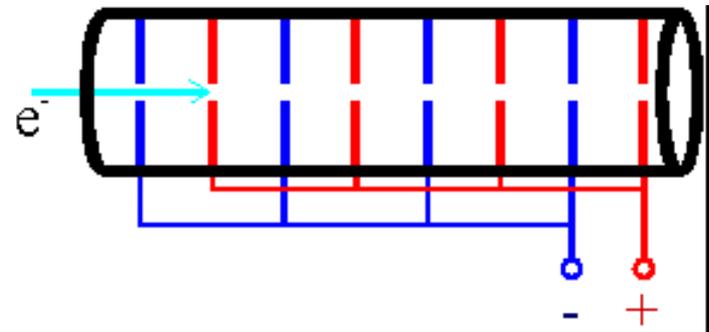
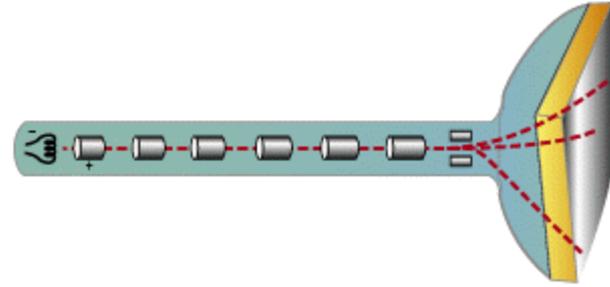
## Neutron



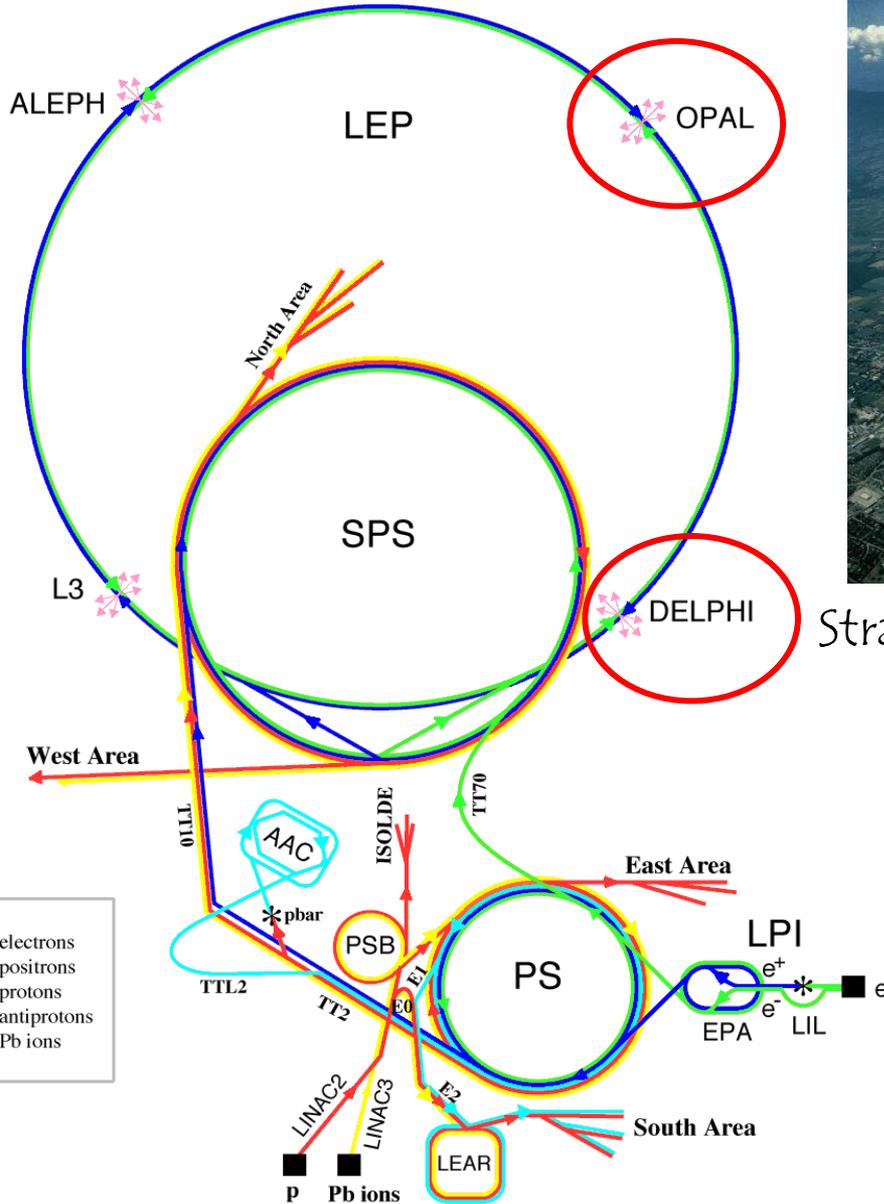
↑  
1 fm  
↓

# Die Mikroskope der Teilchenphysik: Beschleuniger

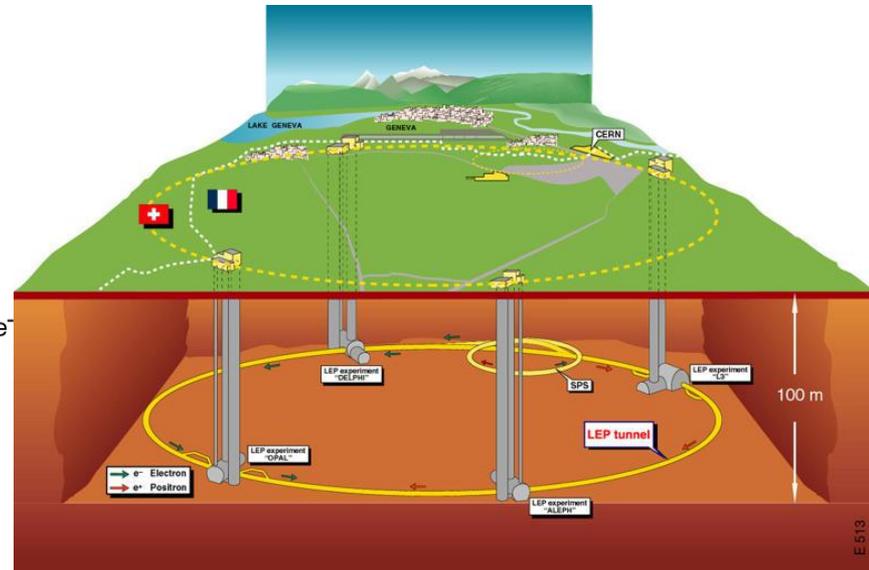
- ◇ Haben Sie auch daheim!
- ◇ Funktionsprinzip:  
[Simulation](#)
- ◇ Linearbeschleuniger:
  - ◇ Fermilab, Chicago (in Betrieb)
  - ◇ DESY, Hamburg (in Planung)



# Bis 2000: $e^-e^+$ Vernichtung bei CERN



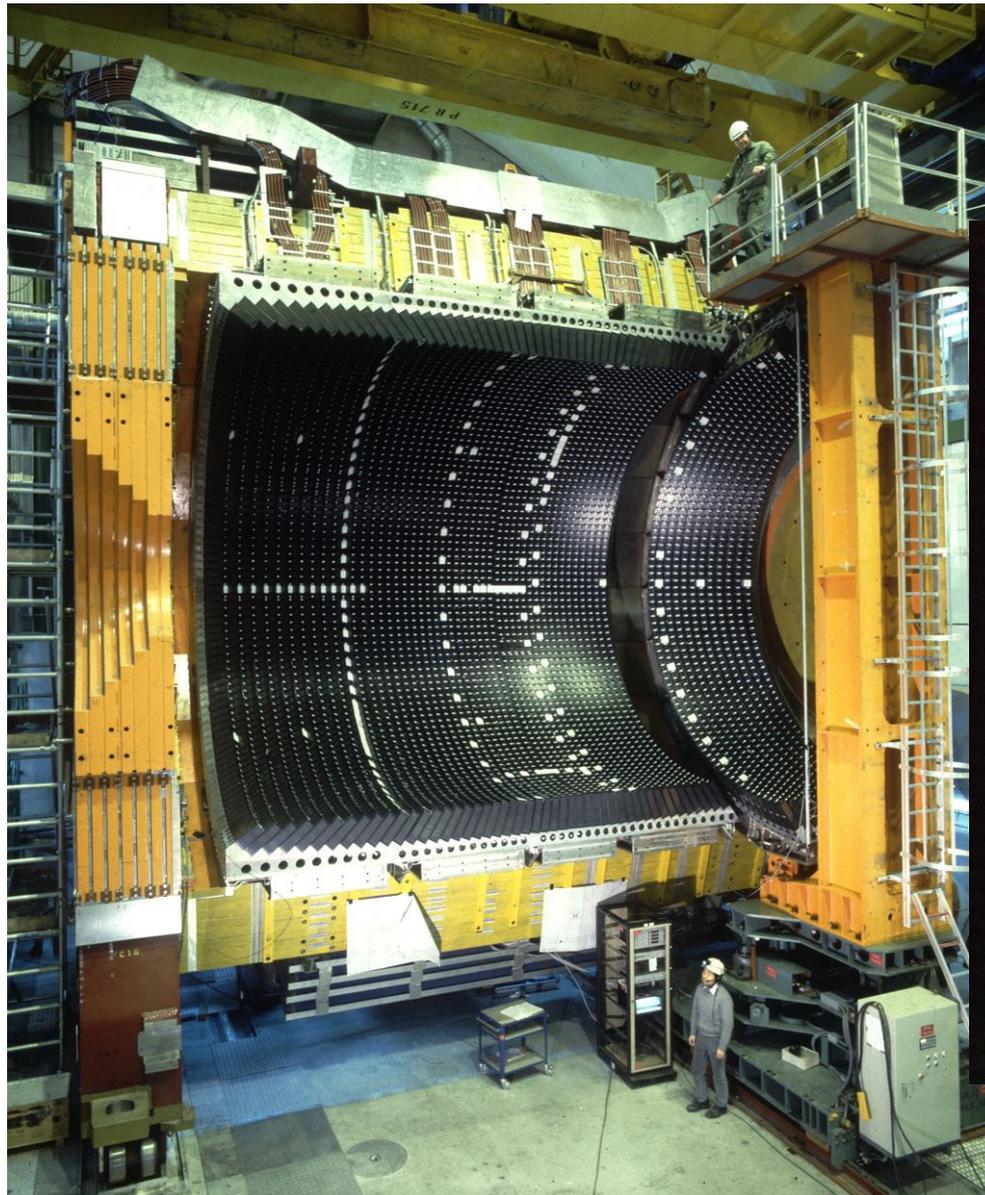
Strahlenergie  $E_e = 40-100$  GeV



# Die Augen der Teilchenphysik: Detektoren



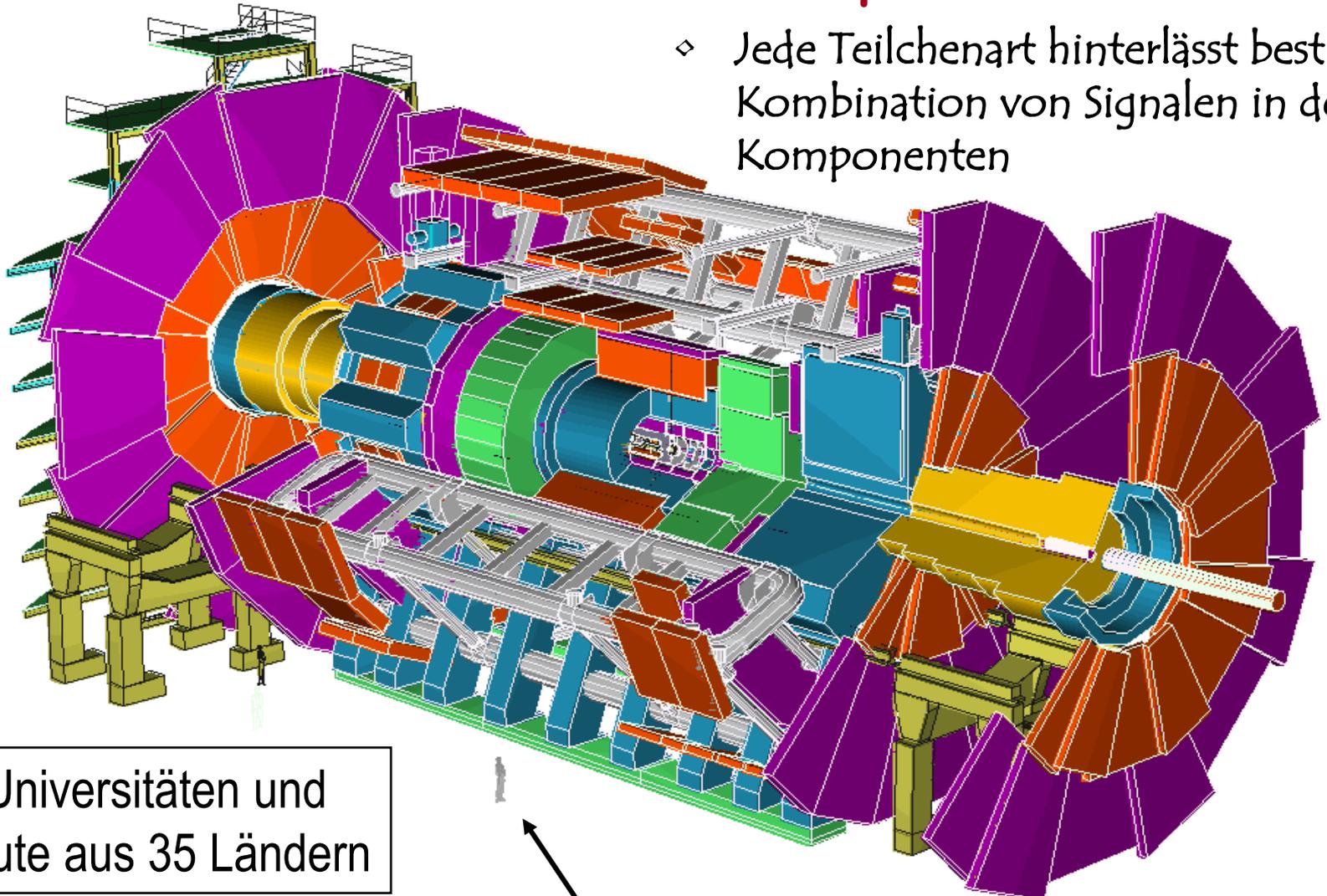
CERN, Genf,  
bis 2000



Elektronische Bilder

# Ab 2007: ATLAS und CMS Experiment, CERN

- ◇ Jede Teilchenart hinterlässt bestimmte Kombination von Signalen in den Komponenten



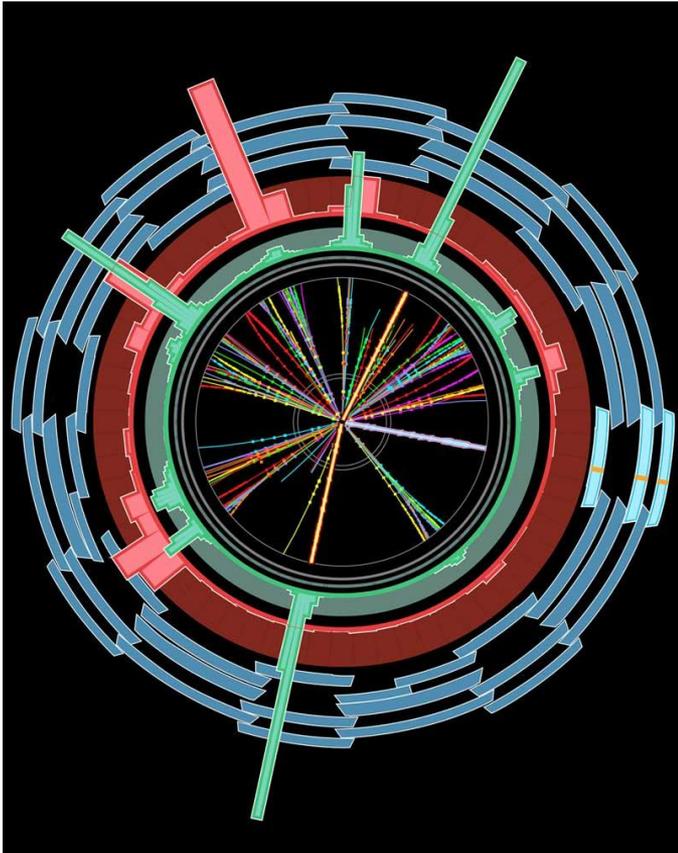
170 Universitäten und  
Institute aus 35 Ländern

Größenvergleich

- ◇ Zwiebelschalenartiger Aufbau verschiedener Komponenten

# Animationen

ATLAS (2,9 MB)



CMS

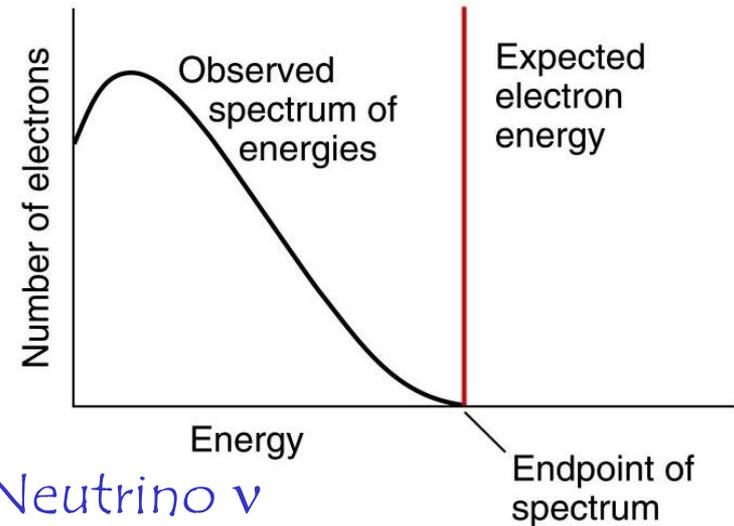
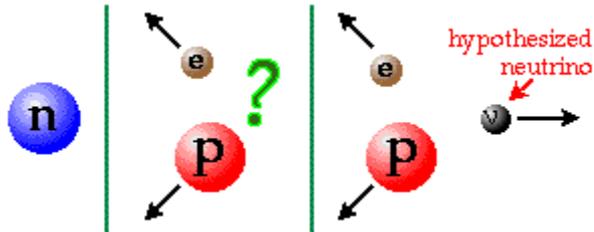


Ziele: Suche nach Neuem:

- ◇ Higgs Teilchen (was ist überhaupt Masse?)
- ◇ Supersymmetrie (→ Dunkle Materie?)
  - nur 4% des Weltalls ist „normale“ Materie
- ◇ zusätzliche Raumdimensionen

# Noch ein Elementarteilchen

1914 Chadwick  $\beta$ -Zerfall:  $n \rightarrow p + e^-$   
p Unerwartete Energieverteilung

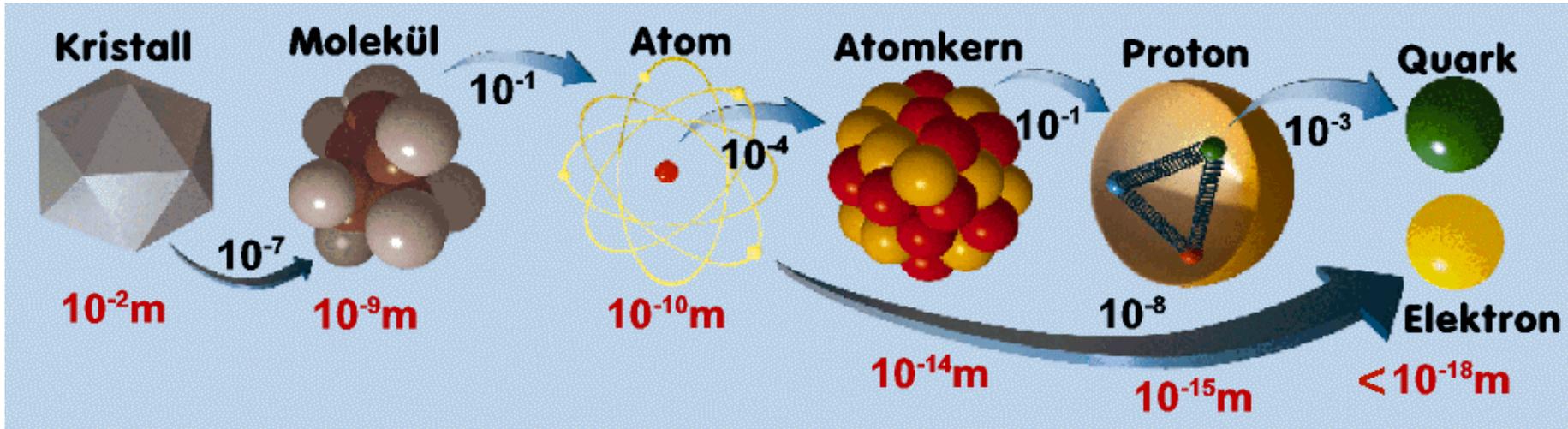


Pauli (1930) postuliert neues Teilchen: Neutrino  $\nu$   
Elektrisch neutraler Partner des Elektrons

- sehr leicht
- schwach wechselwirkend (Fermi):  
999.999.999 von 1.000.000.000  
schaffen Erddurchquerung
- ziemlich verbreitet im Universum  
366.000.000 Neutrinos /  $m^3$   
im Vergleich zu 0,2 Protonen /  $m^3$



# Zusammenfassung Bausteine



- ◇ Fundamentale Bausteine der Materie:
  - Elektron  $e$ , Up-Quark  $u$ , Down-Quark  $d$  zu Kernen oder Atomen gebunden
  - Neutrino  $\nu$ , ungebunden
  - Alle punktförmig ( $< 0.001 \text{ fm}$ )
- ◇ Welche Kräfte halten die Bausteine zusammen?
- ◇ Was ist überhaupt eine fundamentale Kraft?

# Konzept der Wechselwirkungen

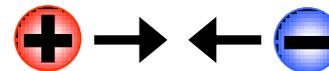
- ◇ Wechselwirkung:
  - Kraftwirkung zwischen Teilchen
  - Verantwortlich für Teilchen-Zerfälle und Produktion

- ◇ 4 fundamentale Wechselwirkungen

- Gravitation (Schwerkraft)



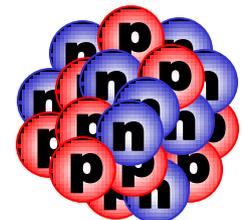
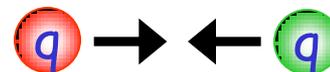
- Elektromagnetismus



- Schwache Wechselwirkung

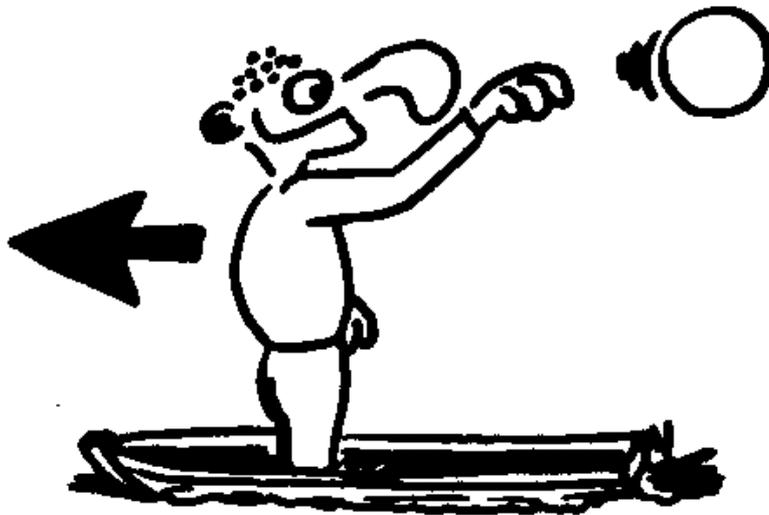


- Starke Wechselwirkung



# Prinzip von Kraftwirkungen

- ◇ Zu jeder **Wechselwirkung** gehört eine **Ladung**
- ◇ Nur Teilchen mit entsprechender Ladung spüren Wechselwirkung
- ◇ Wechselwirkung erfolgt über Austausch von **Botenteilchen**



Abstoßend



Anziehend

# Was ist eigentlich eine Ladung?

- ◇ Eine *Fundamentale Eigenschaft* eines Teilchens
- ◇ Ladungen sind *Additiv*:  
 $\text{Ladung}(A+B) = \text{Ladung}(A) + \text{Ladung}(B)$
- ◇ Ladungen kommen nur in Vielfachen einer *kleinsten Ladungsmenge* vor
- ◇ Ladung ist *erhalten*,  
d.h. sie entsteht weder neu, noch geht sie verloren



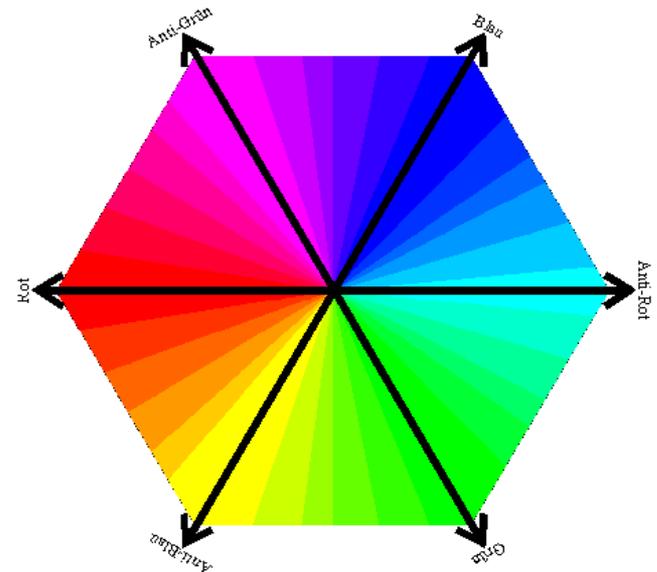
*Mehr wissen wir (noch) nicht*

# Die elektromagnetische Kraft

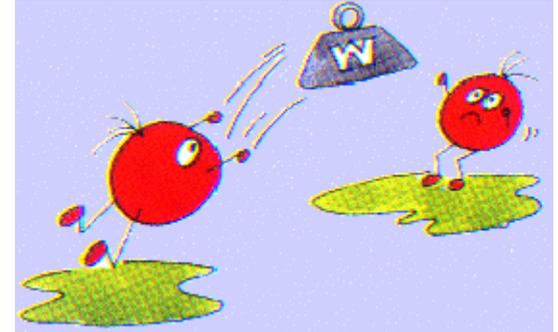
- ◇ *Ladung*: elektrische Ladung  $Q$
- ◇ *Arten*: 1 Ladungsart: „Zahl“, positiv oder negativ
- ◇ *Botenteilchen*: Photon
- ◇ *Eigenschaften*: elektrisch neutral:  $Q=0$   
masselos :  $m=0$
- ◇ Teilchen    Up    Down    Neutrino    Elektron  
Ladung    +2/3    -1/3    0    -1
- ◇ Besonderheiten:
  - Unendliche Reichweite
  - Makroskopisch beobachtbar
  - Magnetfelder lenken elektrisch geladene Teilchen ab,  
umso weniger je höher deren Energie ist  
(Fadenstrahlrohr)

# Die starke Kraft

- ◇ *Ladung*: starke Ladung
- ◇ *Arten*: 3 Ladungsarten: „Farbe“, plus jeweilige Antifarbe
- ◇ *Botenteilchen*: 8 Gluonen
- ◇ *Eigenschaften*: tragen selber je 1 Farbe und Antifarbe  
masselos :  $m=0$
- ◇ Teilchen    Up    Down    Neutrino    Elektron  
Ladung    r, b, g    r, b, g    -    -
- ◇ Besonderheiten:
  - Endliche Reichweite ca 1 fm
  - Hält p, n und Atomkern zusammen
  - Makroskopisch nicht beobachtbar, außer im radioaktiven  $\alpha$ -Zerfall  $\rightarrow$  Heliumkerne



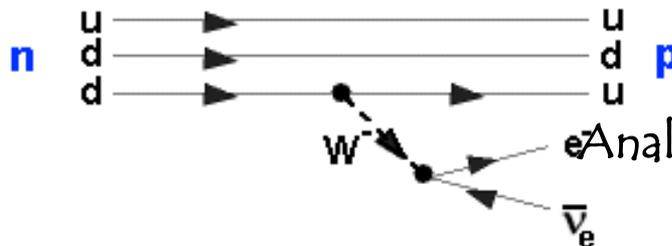
# Die schwache Kraft



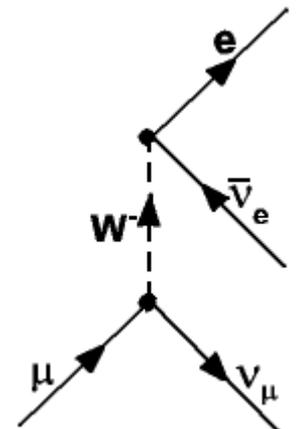
- ◇ *Ladung*: schwache Ladung ( $I_1, I_2, I_3$ )
- ◇ *Arten*: 1 Ladungsart: „Zahlentriplett“
- ◇ *Botenteilchen*:  $W^-, Z^0, W^+$
- ◇ *Eigenschaften*: tragen selber schwache Ladung:  $I_3 = -1, 0, 1$   
Masse :  $m = 80 - 90 \text{ GeV}$

◇ Teilchen	Up	Down	Neutrino	Elektron
$I_3$	+1/2	-1/2	+1/2	-1/2

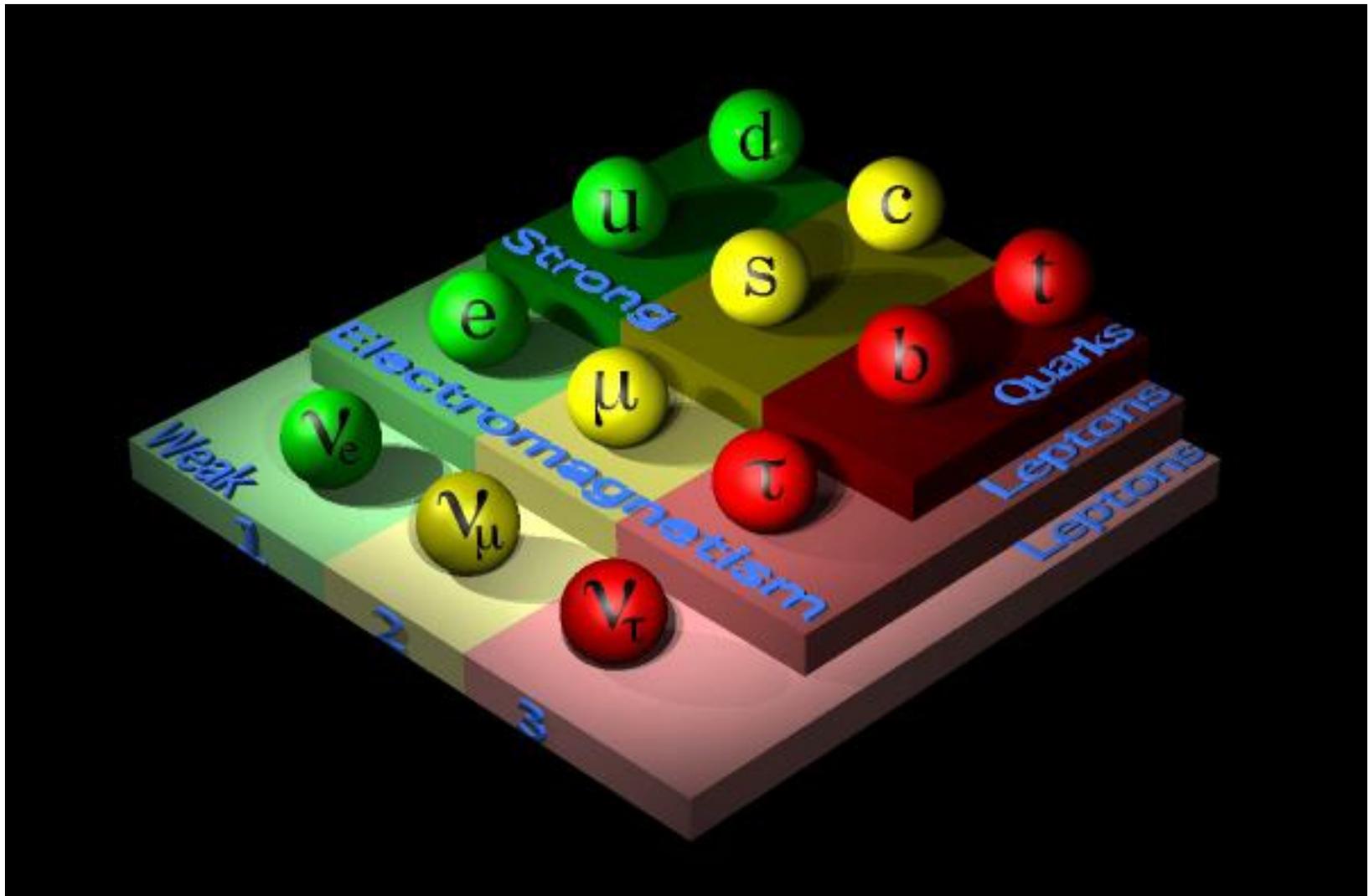
- ◇ Besonderheiten:
  - Endliche Reichweite ca 0.0025 fm
  - Makroskopisch nicht beobachtbar, außer
    - ◇ Brennen der Sonne
    - ◇ Radioaktive Umwandlung („Zerfall“) des Neutrons



Analog: „Zerfall“ des Myons  
 $\mu \rightarrow e \nu \bar{\nu}$



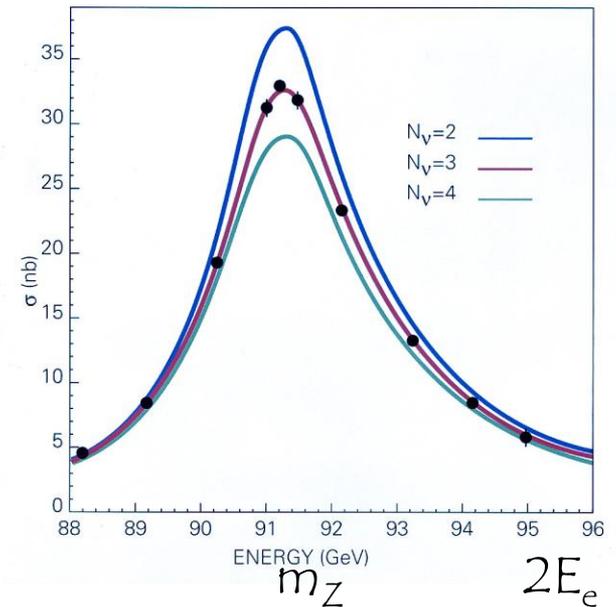
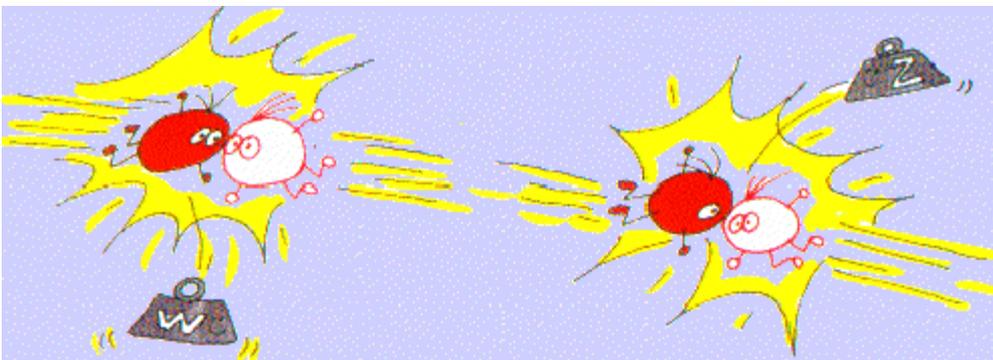
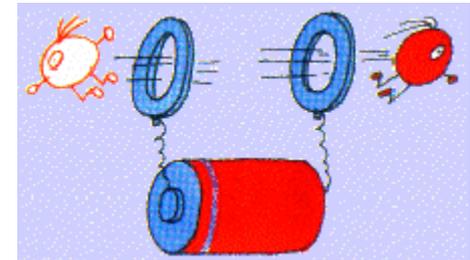
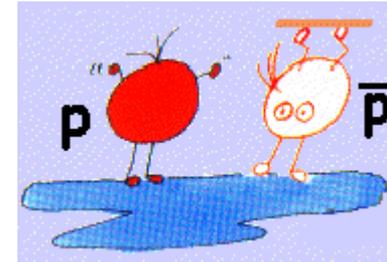
# Das vollständige Set der Bausteinteilchen



- ◇ Das 4er Set der „1. Baustein-Generation“ wiederholt sich genau 2 Mal
- ◇ Niemand weiss warum 

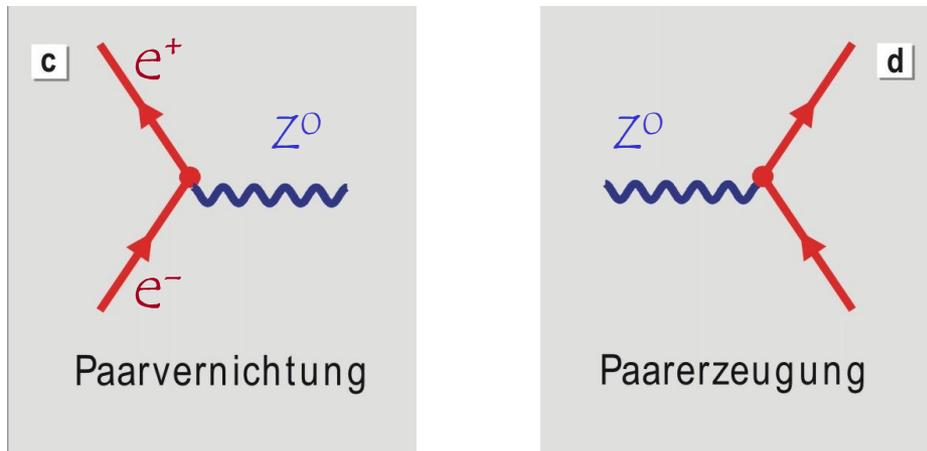
# Antimaterie

- ◇ Zu jedem Bausteinteilchen existiert ein Antiteilchen mit umgekehrten Ladungsvorzeichen
- ◇ Sonst sind alle Eigenschaften (Masse, Lebensdauer) gleich
- ◇ Aus Botenteilchen können paarweise Materie- und Antimaterieteilchen entstehen
- ◇ Umgekehrt können sich diese wieder zu Botenteilchen vernichten, z.B.  $e^+ + e^- \rightarrow Z^0$ , am besten wenn  $2E_e = m_Z c^2$



# Z "Zerfälle"

- ◇ Das Z Teilchen ist nicht stabil
- ◇ Wandelt sich nach  $3 \times 10^{-25} \text{s}$  (!) in andere Teilchen um



Zeit



# Zerfallskanäle

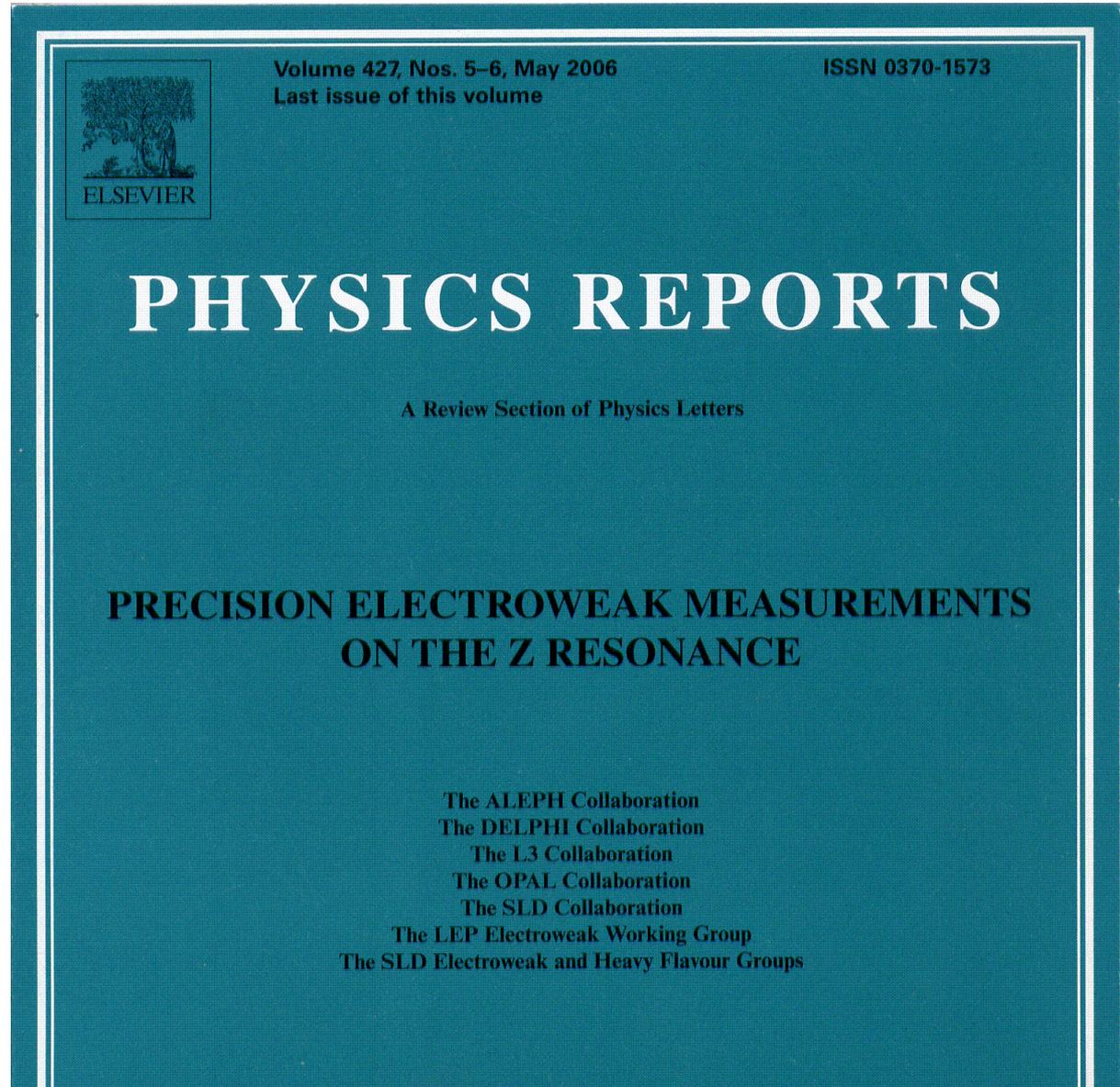
- ◇ Löcher entsprechen „Zerfallskanälen“
- ◇ Für einzelnes Wassermolekül Austrittsloch nicht vorhersagbar  
Für einzelnes  $Z$ -Teilchen Zerfallskanal nicht vorhersagbar
- ◇ Entleerungsdauer  $\rightarrow$  absolute Größe der Löcher  
Zerfallsdauer  $\rightarrow$  Stärke der „Kopplungen“ an Teilchenpaare  
*Ergebnis: „Schwache Wechselwirkung“ gar nicht so schwach!*
- ◇ Verhältnis der Austrittsmengen  
 $\rightarrow$  Größenvergleich der Löcher  
Verhältnis der Zerfallswahrscheinlichkeiten  
 $\rightarrow$  Größenvergleich der Kopplungen

Aufgabe für heute nachmittag!

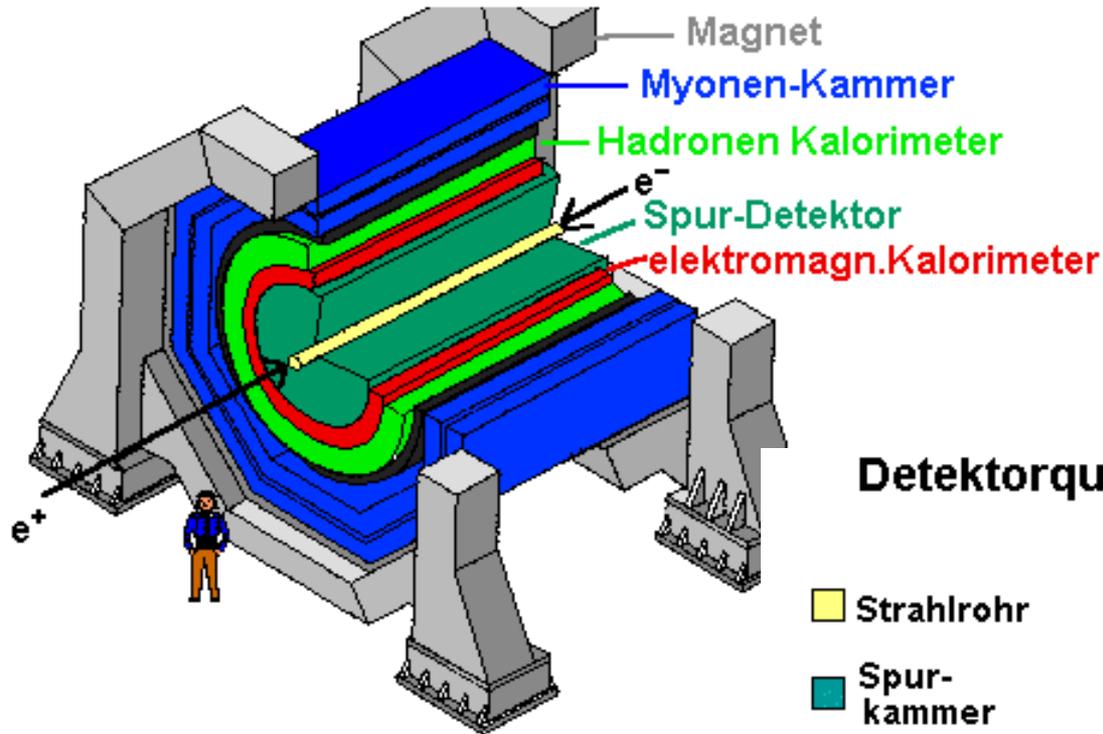


# Ergebnisse hochaktuell

- ◇ Veröffentlicht in  
Physics Reports,  
Mai 2006



# Teilchenidentifikation = Detektivarbeit

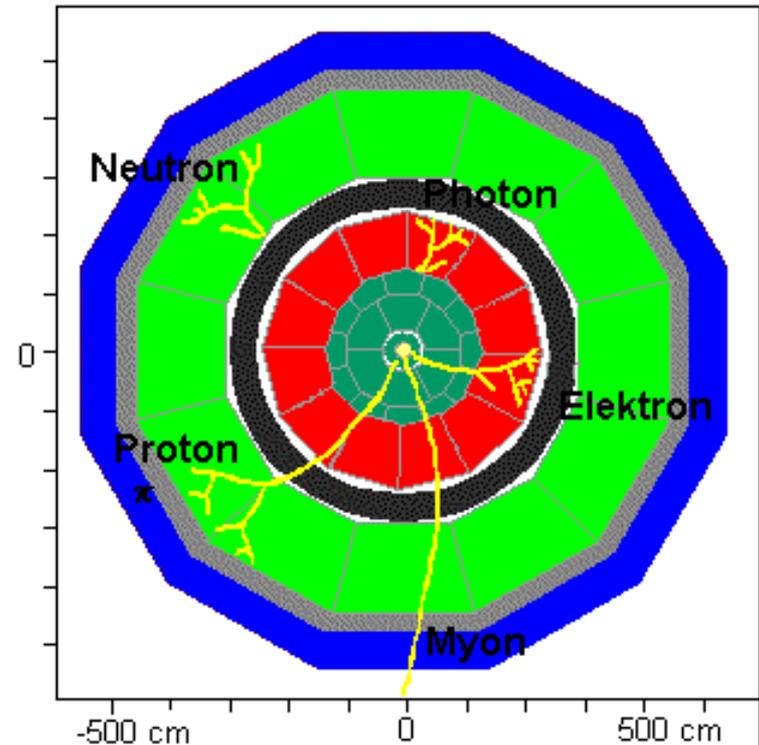


- ◇ Zwiebelschalenartiger Aufbau verschiedener Komponenten
- ◇ Jede Teilchenart hinterlässt bestimmte Kombination von Signalen in den Komponenten

## Detektorquerschnitt mit Teilchenspuren

- ◇ feststellbare Teilcheneigenschaften:
  - aus Quarks („Hadronen“)
  - elektr. geladen / ungeladen
  - leicht / schwer

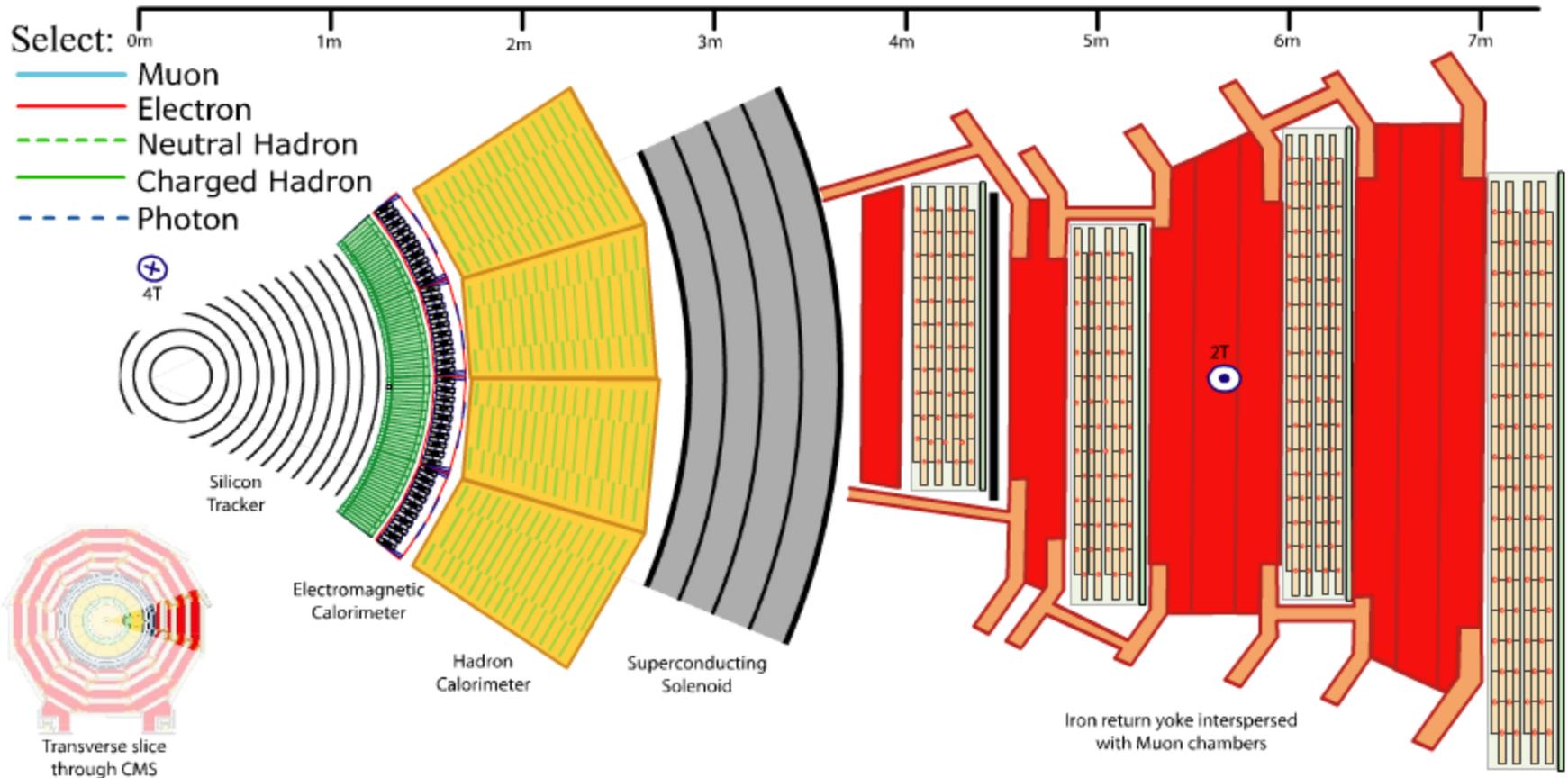
- Strahlrohr
- Spur-kammer
- mag. Spule
- elektr.mag. Kalorimeter
- hadron. Kalorimeter
- magnet. Eisen
- Myonen Kammer



# Schnitt durch einen Sektor des CMS Detektors

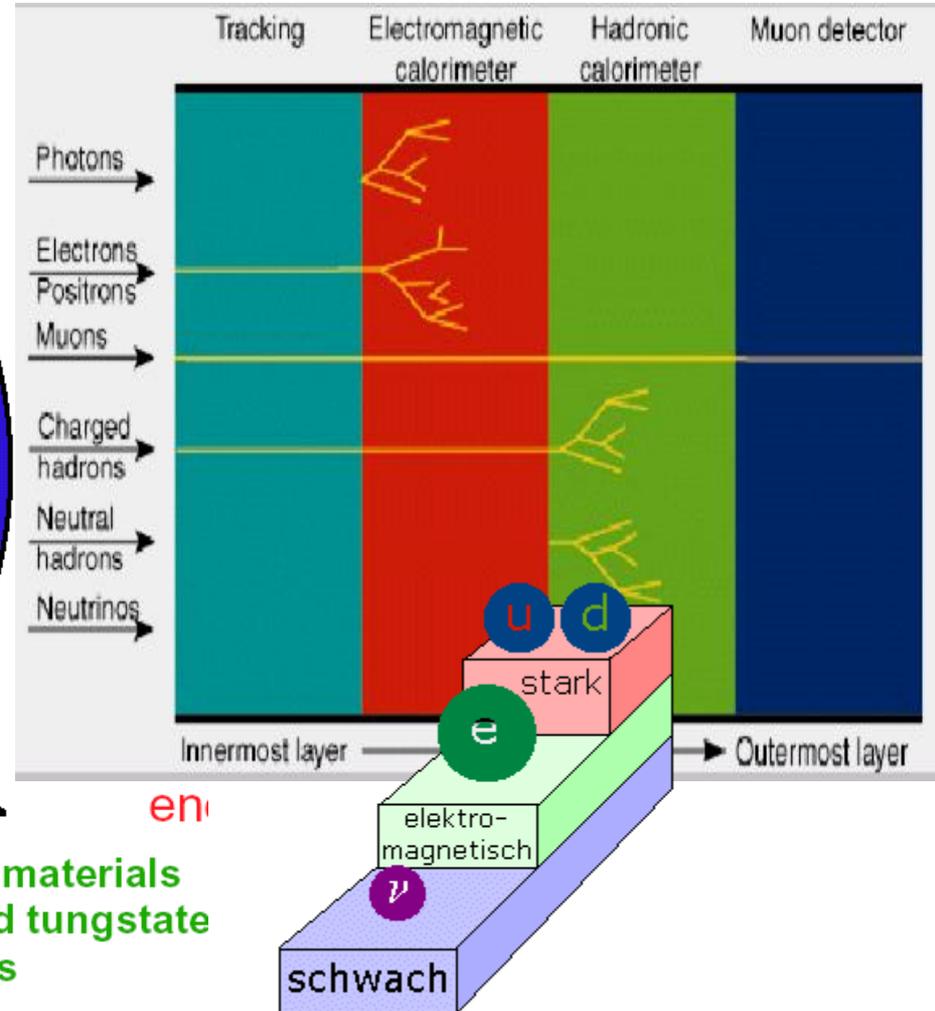
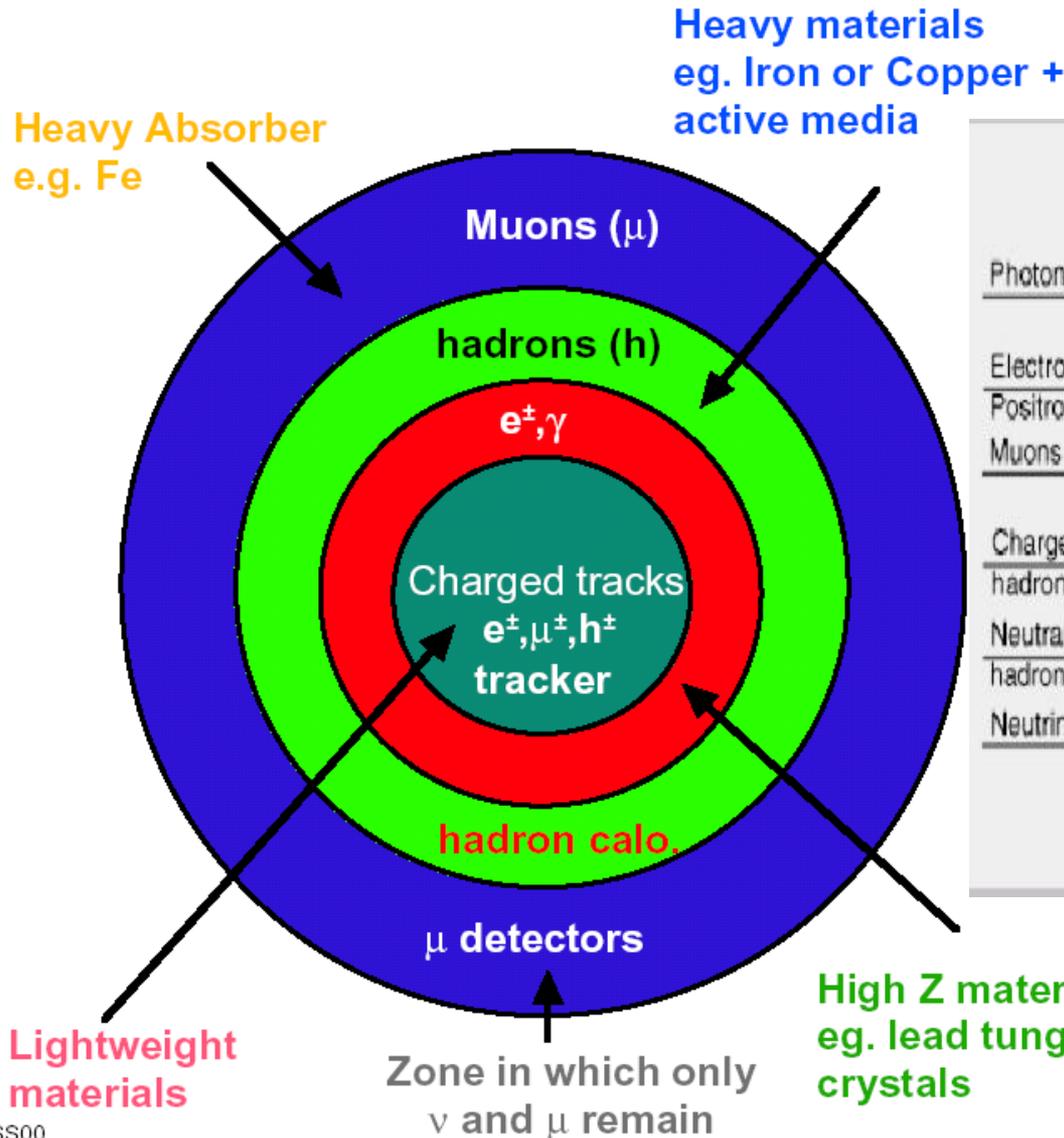
Teilchen anklicken, um seinen Weg durch CMS zu verfolgen

Press "escape" to exit



# Detektorverhalten

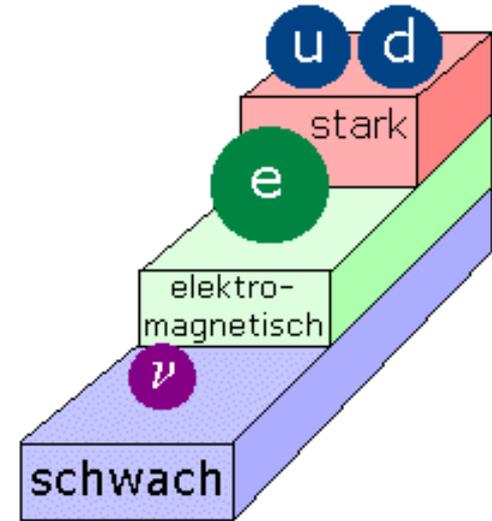
Mehr Durchschlagskraft für: - schwere Teilchen  
- schwächere Wechselwirkung



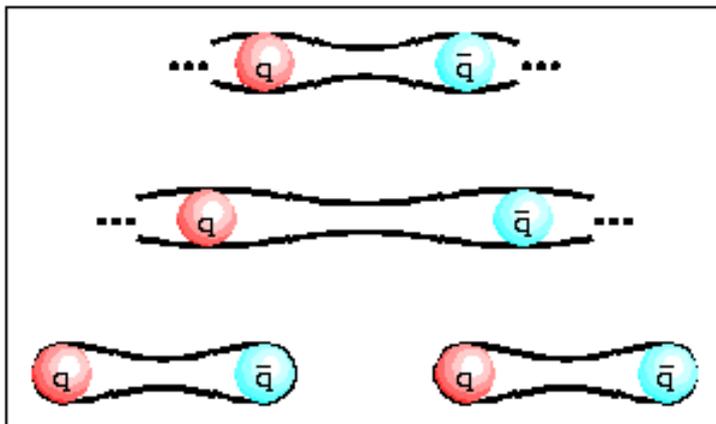
**High Z materials**  
eg. lead tungstate  
crystals

# Zusammenfassung

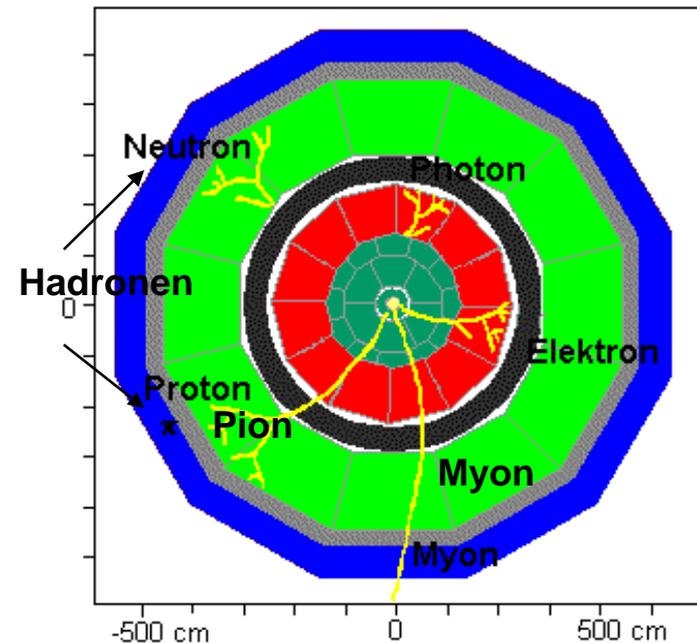
- ◊ Die unterschiedlichen Ladungen bewirken unterschiedliche Kräfte zwischen Teilchen
- ◊ Sie erklären auch das unterschiedliche Verhalten in den Detektoren
- ◊ Sowie die Bildung von Hadronjets aus Quarks



Detektorquerschnitt mit Teilchenspuren

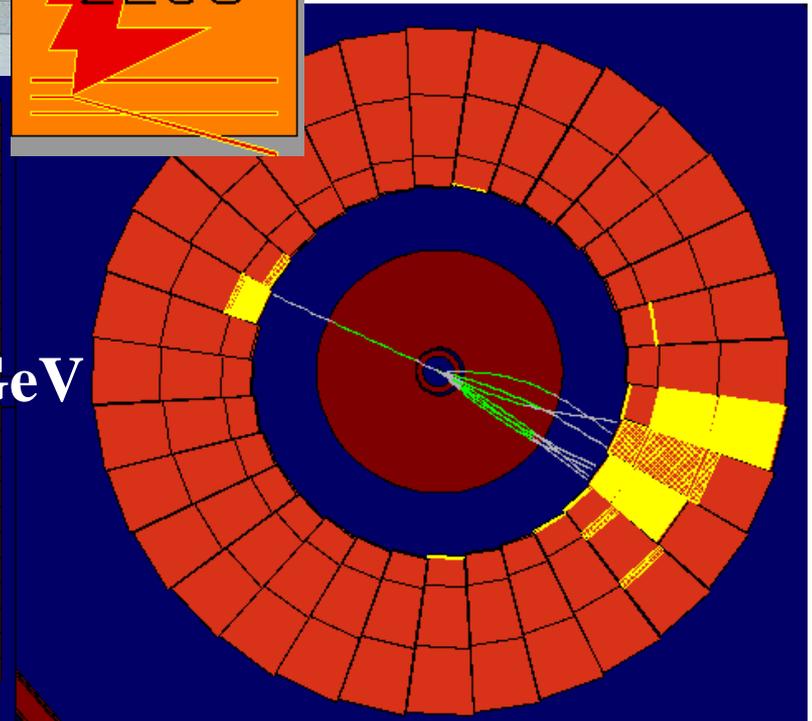
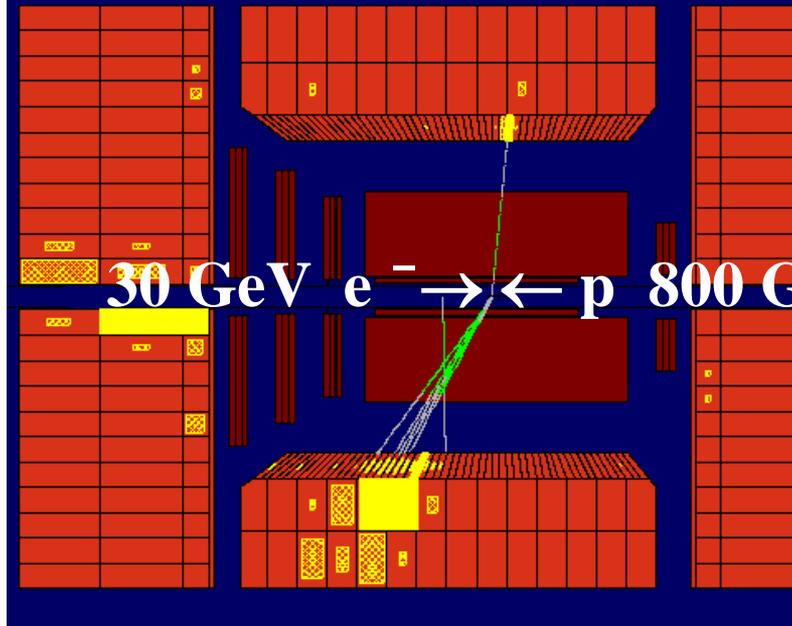
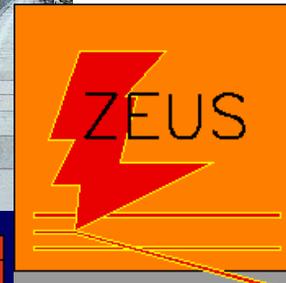
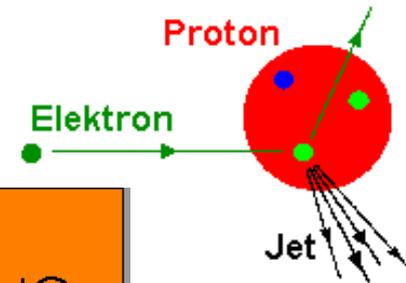


- Strahlrohr
- Spurkammer
- mag. Spule
- elektr. mag. Kalorimeter
- hadron. Kalorimeter
- magnet. Eisen
- Myonen Kammer



# Einzelne Quarks ergeben „Hadronen“ Jets

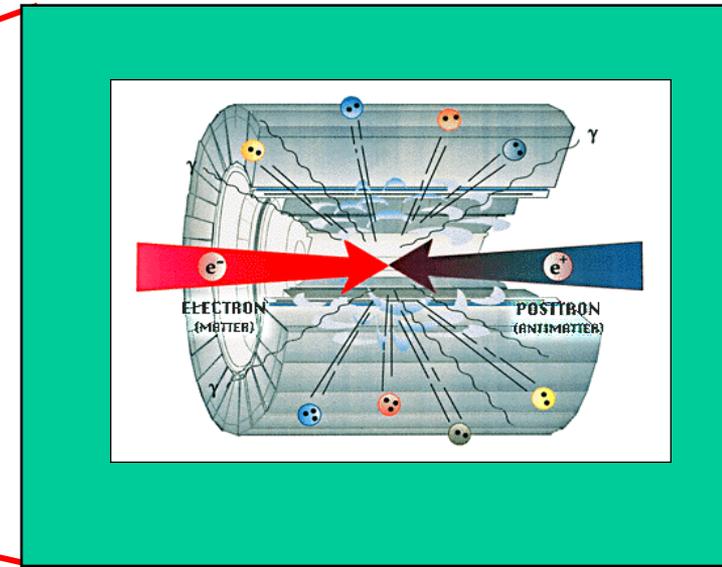
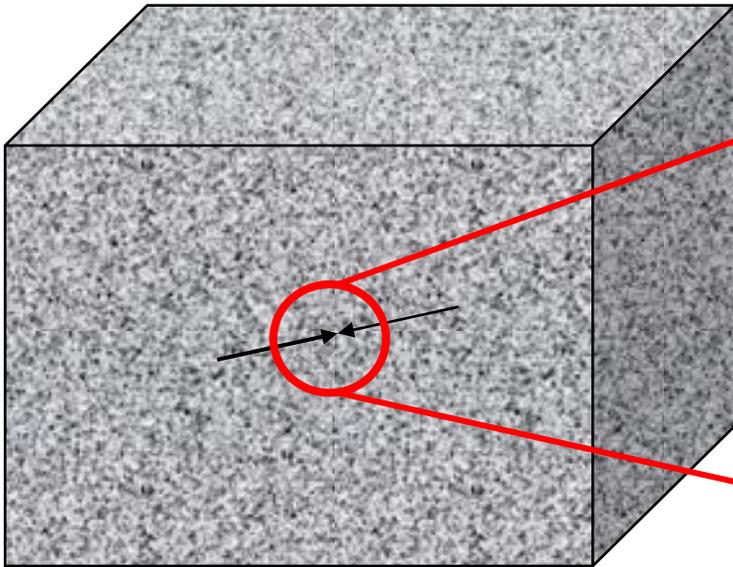
- ◇ e-p Kollisionen bei HERA am DESY



# Zusammenhang Kosmologie - Teilchenphysik

frühes Universum: Temperatur  $10^{15}$  K →  
Bewegungsenergie der Teilchen: 100 GeV

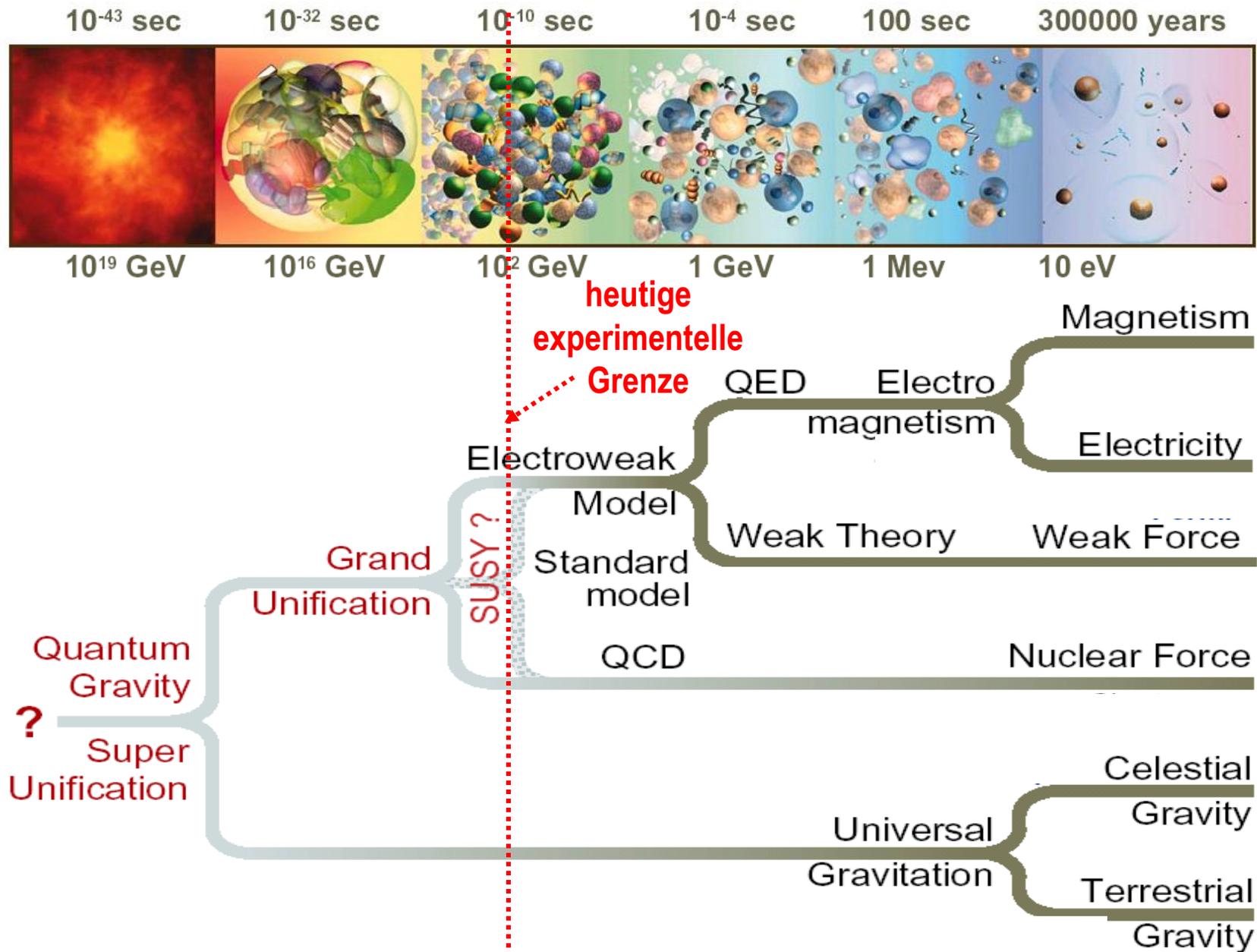
Teilchenbeschleuniger: →  
Bewegungsenergie der Teilchen: 100 GeV



alle Teilchen  
kollidieren unkontrolliert

gezielte, kontrollierte  
einzelne Kollisionen  
und deren Aufzeichnung

# Auf der Suche nach der „Weltformel“



# Schlussübersicht

