



***Reise ins Innerste der Materie –  
Eine Einführung in die Teilchenphysik***

**Christian Kiesling**

**Max-Planck-Institut für Physik  
und  
Ludwig-Maximilians-Universität**

# Max-Planck-Institut für Physik

(Werner-Heisenberg-Institut für Physik)

**Aufgabe:** Grundlagenforschung auf dem Gebiet der **Elementarteilchenphysik** und der **Astroteilchenphysik**

## Was ist Teilchenphysik?

- Suche nach den kleinsten Bausteinen der Materie und Erforschung ihrer Eigenschaften
- Verständnis der Kräfte („Wechselwirkungen“) zwischen diesen Teilchen
- Verständnis der Beziehung zwischen Mikro- und Makrokosmos

**Wissenschaftliche Struktur des Instituts:**

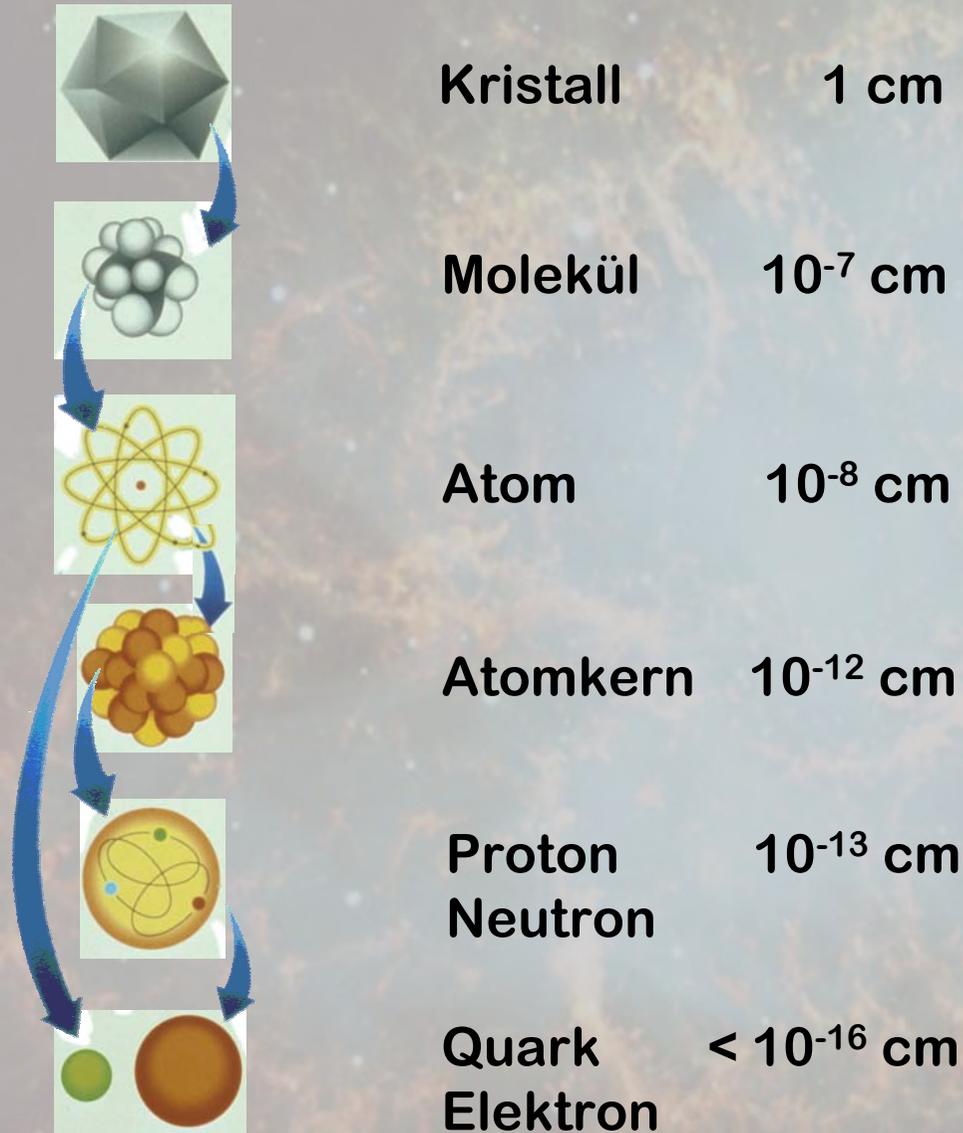
Experimente mit kosmischen Strahlen

Experimente zu kosmologischen Fragen

Beschleuniger-Experimente

Teilchentheorie

# Die Struktur der Materie im Überblick



Die Größe der Atome ist durch den mittleren Abstand der Elektronen vom Kern bestimmt

Größenvergleich :

Kern: Kirsche  
Atom: Fußballfeld

Die Masse des Atoms ist im Kern konzentriert

Massenverhältnis :

Elektron 1 ( 0.5 MeV)  
Proton 2000 (938 MeV)

**Astrophysik**

Wie beobachten wir Objekte verschiedener Größe ?

Große Objekte

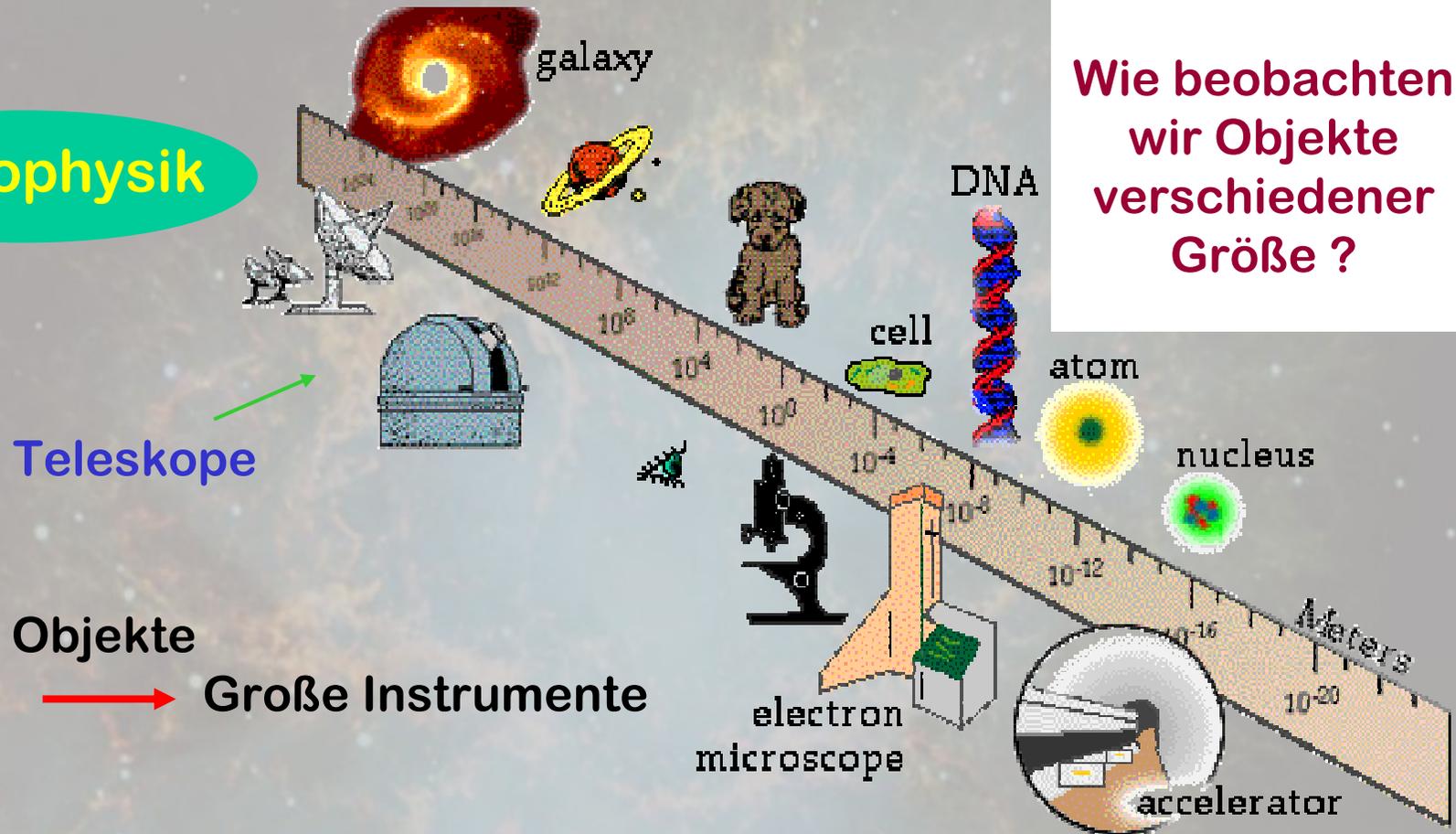
→ Große Instrumente

Kleine Objekte → Große Instrumente !

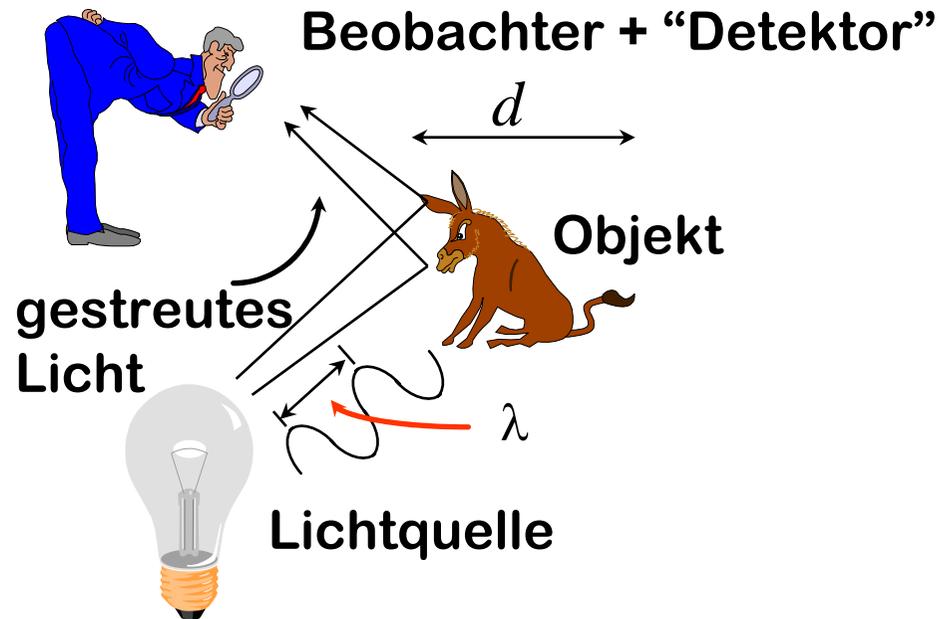
Beschleuniger und Detektoren

**Teilchenphysik**

„Beobachtung“ =  
Streuexperiment



# Beispiel: Das Sehen als Streuprozess



Streuung (= "Sehen")  
nur, wenn  $\lambda < d$

(Wellenlänge des Lichts  
muss kleiner als das zu  
untersuchende Objekt sein)

→ kleine  $d$  - kleine  $\lambda$

$\lambda$  = Wellenlänge des (sichtbaren) Lichts ( $\sim 1 / 100\,000$  cm)

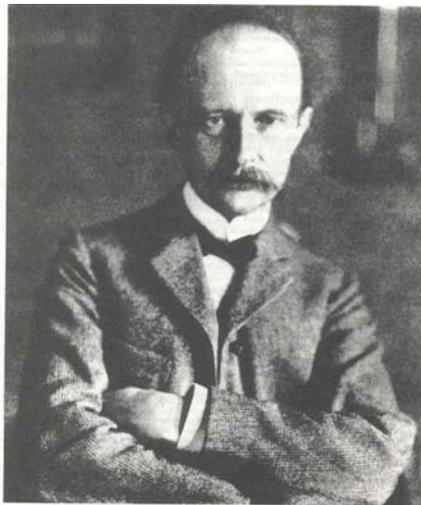
Mit optischen Methoden: Moleküle, Atome nicht mehr „sichtbar“,  
(erst recht nicht Atomkerne und deren Bausteine)

Frage: Lässt sich die Wellenlänge des „Lichts“ verkürzen ?

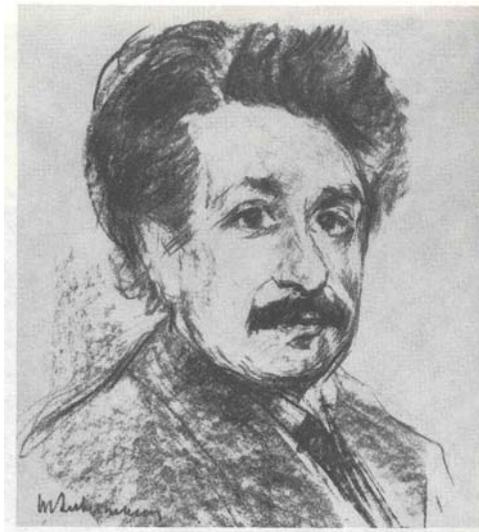
# Eigenschaften des Lichts

Das Licht ist eine Welle ! ???

$\lambda$  = Wellenlänge des Lichts



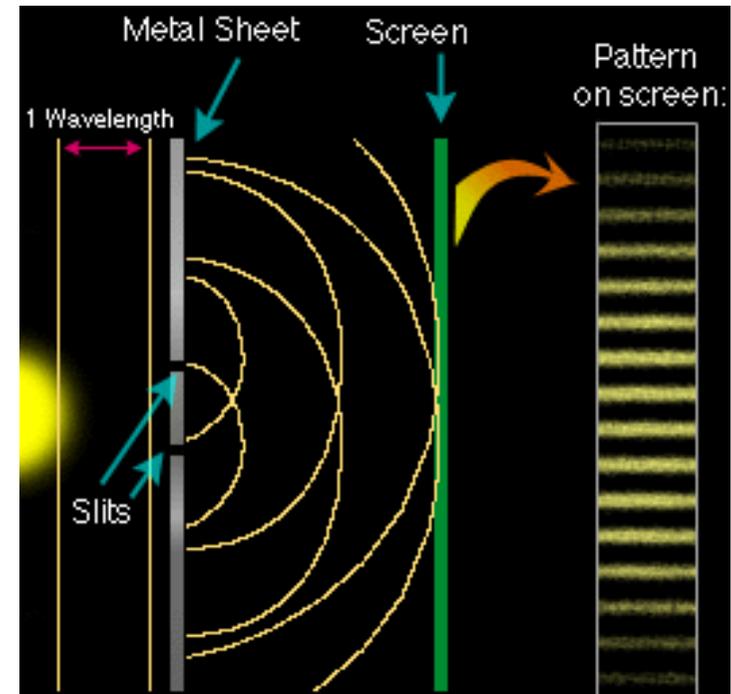
Max Planck  
(Schwarzkörper-  
Strahlung)



Albert Einstein  
(Photo-Effekt)

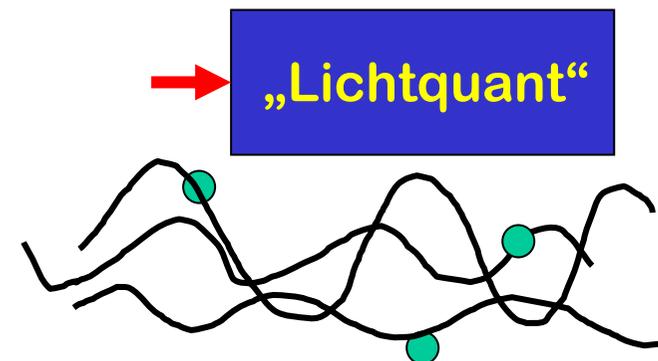
Teilchen-Natur der Welle

Sichtbares Licht: Energie  $E = 1 \text{ eV}$

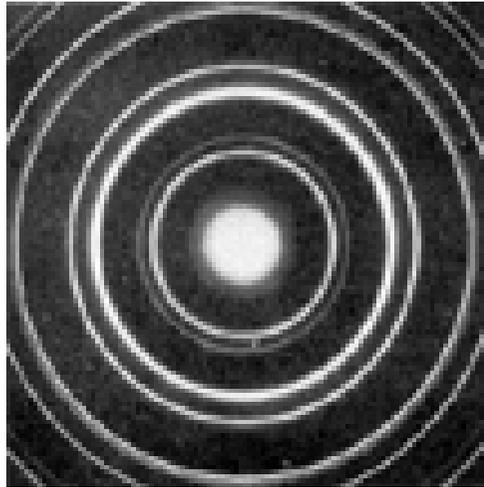


Beugungsmuster eines  
Lichtstrahls an einem Gitter

Das Licht ist ein Teilchen !



# Teilchen und Wellen



Das Teilchen ist eine Welle !

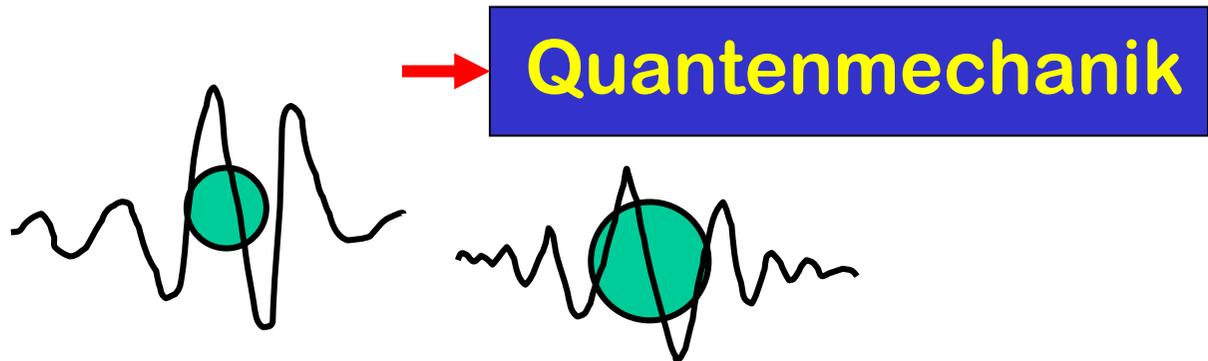
→ „Materiewelle“

Wellen-Natur des Teilchens

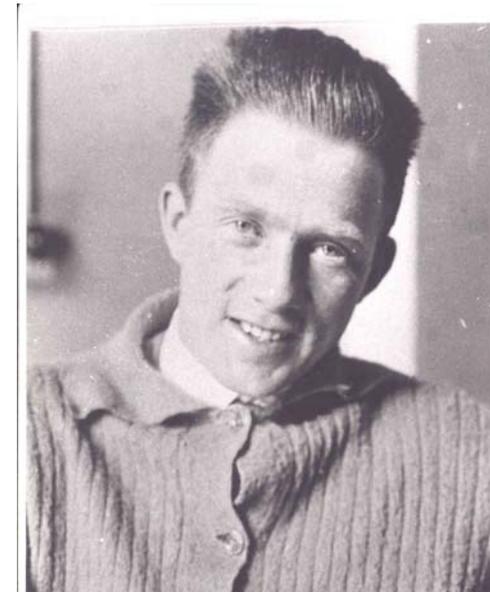
Beugungsbild eines Elektronenstrahls an einem Kristall

$$\lambda = 1 / \text{Energie } E$$

Welle-Teilchen-Dualismus



Louis de Broglie



Werner Heisenberg

# Streu-Experimente zur Strukturanalyse der Materie

---

Quantenmechanik:

$$E = 1 / \lambda$$



kleine Strukturen - große Energien  $E$

Geladene, hochenergetische Teilchen  
als "Lichtquelle"

Elektronen,  
Protonen,  
Kerne

Vorteil:

geladene Teilchen können in elektrischen Feldern  
beschleunigt werden → hohe Energien

Beispiel: Elektronenmikroskop (bis einige keV)  
(Elektronen als Strahlenquelle)

„Riesen-  
Mikroskope“

heute: 920 GeV (Protonen)  
(Elektronen bis 104 GeV)

Beschleuniger

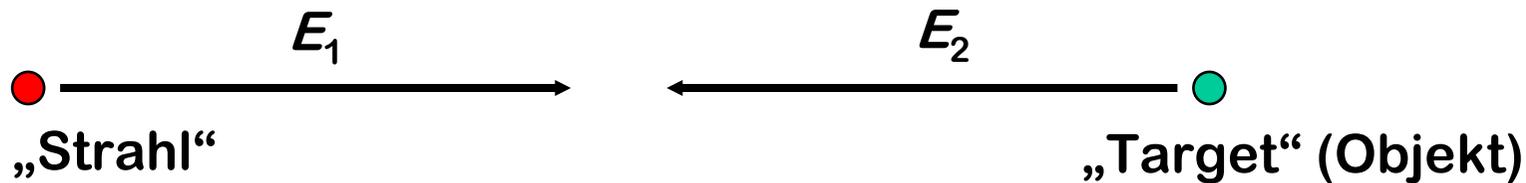


# Materie aus Energie

---

Stoßprozesse hochenergetischer Teilchen : 3 Phasen

## I) Anfangszustand

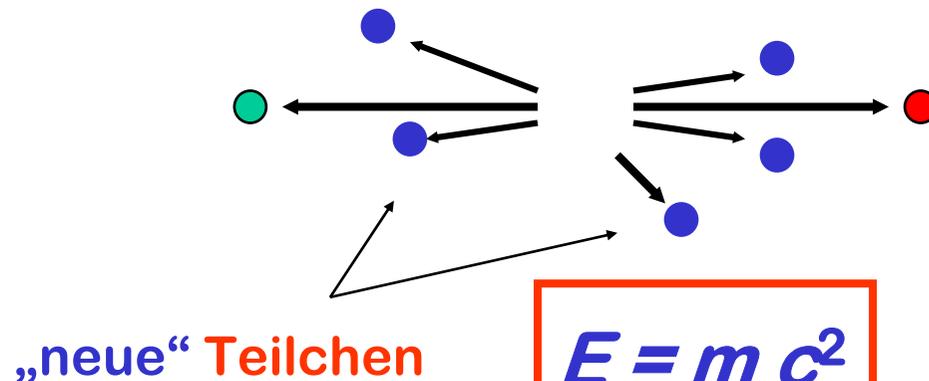


## II) Kollision



Gesamtenergie in  
der Kollision:  $E_1 + E_2$

## III) Endzustand

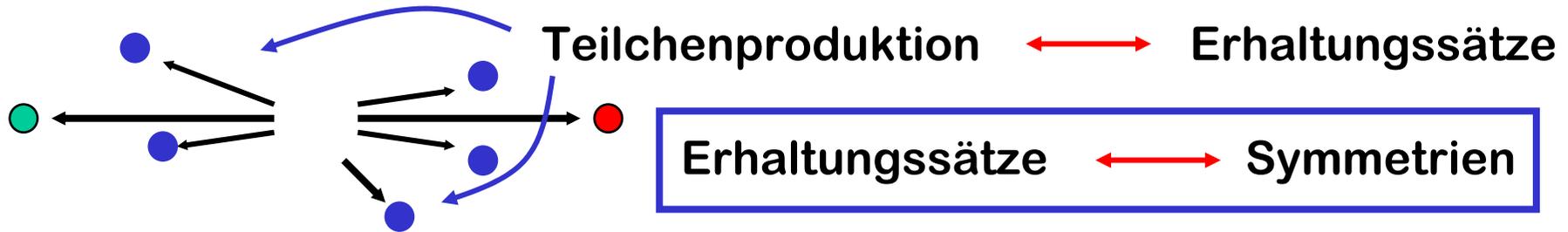


$$E = m c^2$$

Neue (massive) Teilchen und deren **Antiteilchen** werden aus der kinetischen Energie der Stoßpartner im Anfangszustand erzeugt

Die Einstein'sche Formel:  
**Äquivalenz von  
Masse und Energie**

# Antimaterie



Einige **Erhaltungssätze** und deren Konsequenz für die Teilchenproduktion:

Erhaltung der elektrischen Ladung :

→ **Gesamtladung  $Q$  bleibt erhalten** :  
für jedes Teilchen mit Ladung +1  
muss ein Teilchen mit Ladung -1  
dazu erzeugt werden

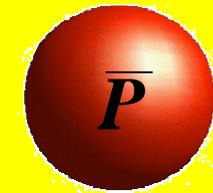
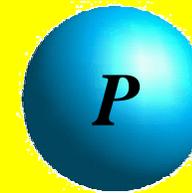
Erhaltung der Nukleonenzahl :

→ **Gesamtnukleonenzahl  $N$  bleibt erhalten** :  
für jedes Teilchen mit Nukleonenzahl +1  
muss ein Teilchen mit Nukleonenzahl -1  
(„Anti-Nukleon“) dazu erzeugt werden

Nukleon = Proton,  
Neutron

Proton

Antiproton



$$N = +1$$

$$N = -1$$

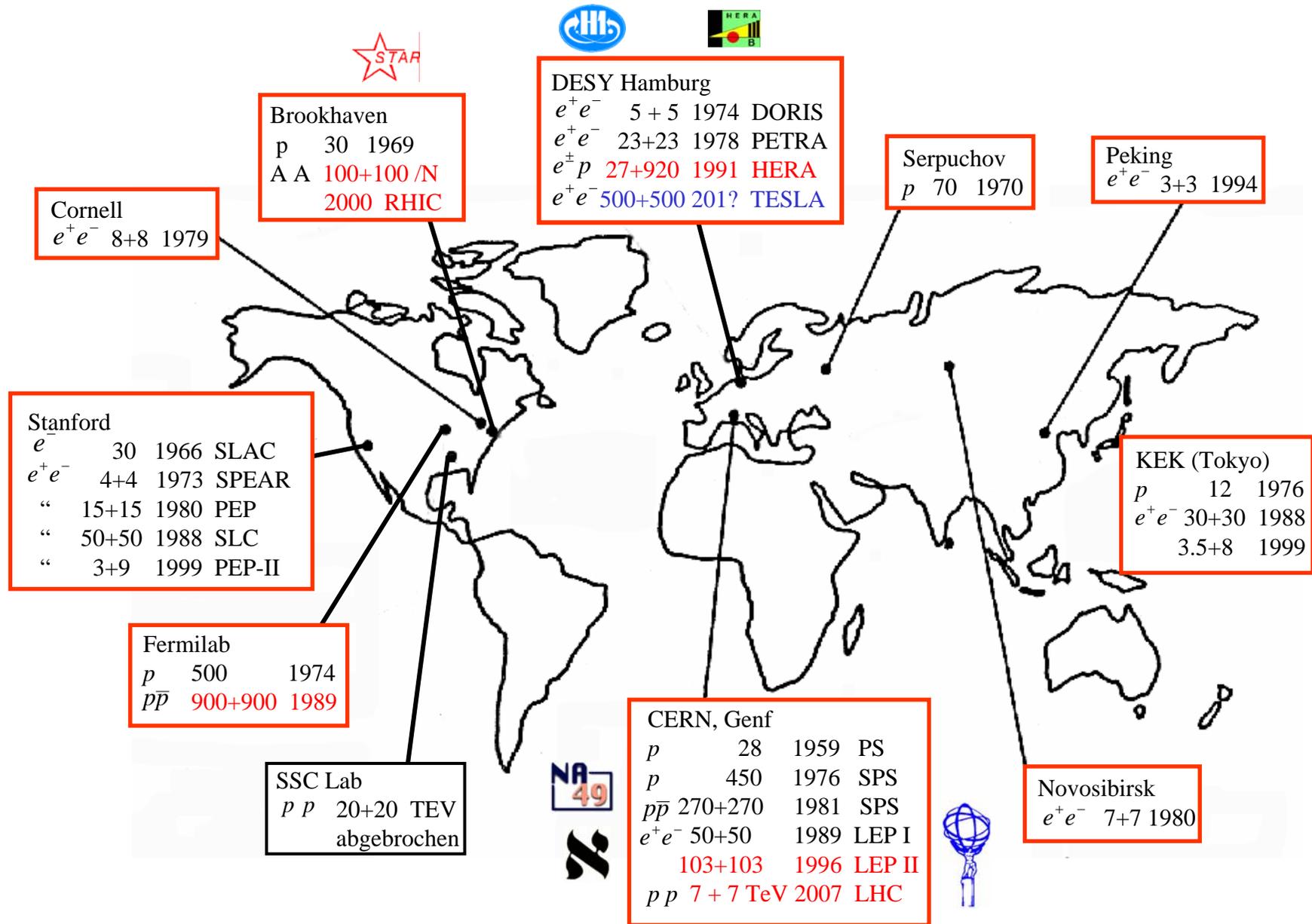
$$Q = +1$$

$$Q = -1$$

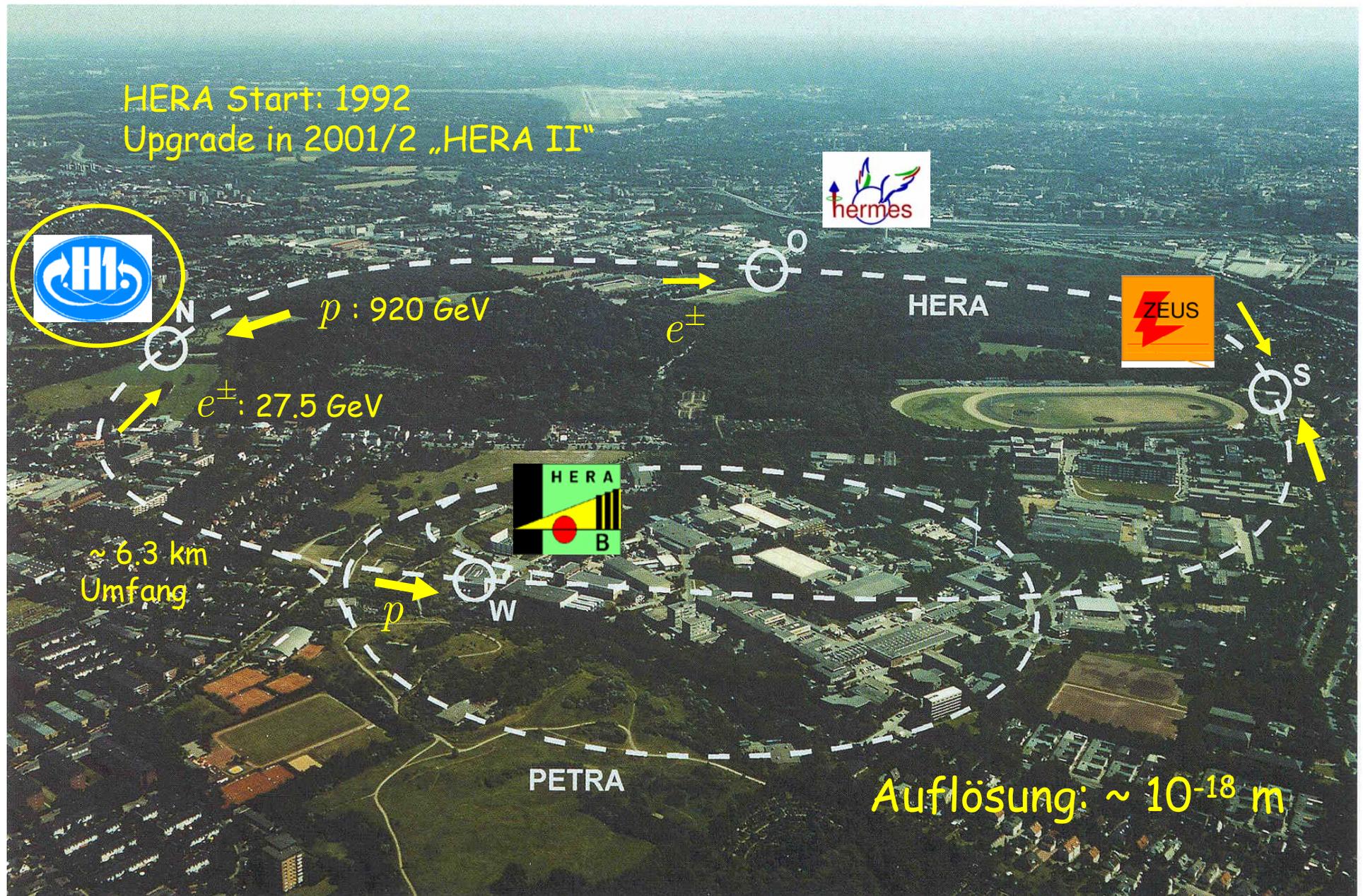
$$M_P = 938 \text{ MeV}$$

$$M_{\bar{P}} = 938 \text{ MeV}$$

# Die Welt der Beschleuniger



# HERA - das größte Elektronen-Mikroskop der Welt (Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY, Hamburg)



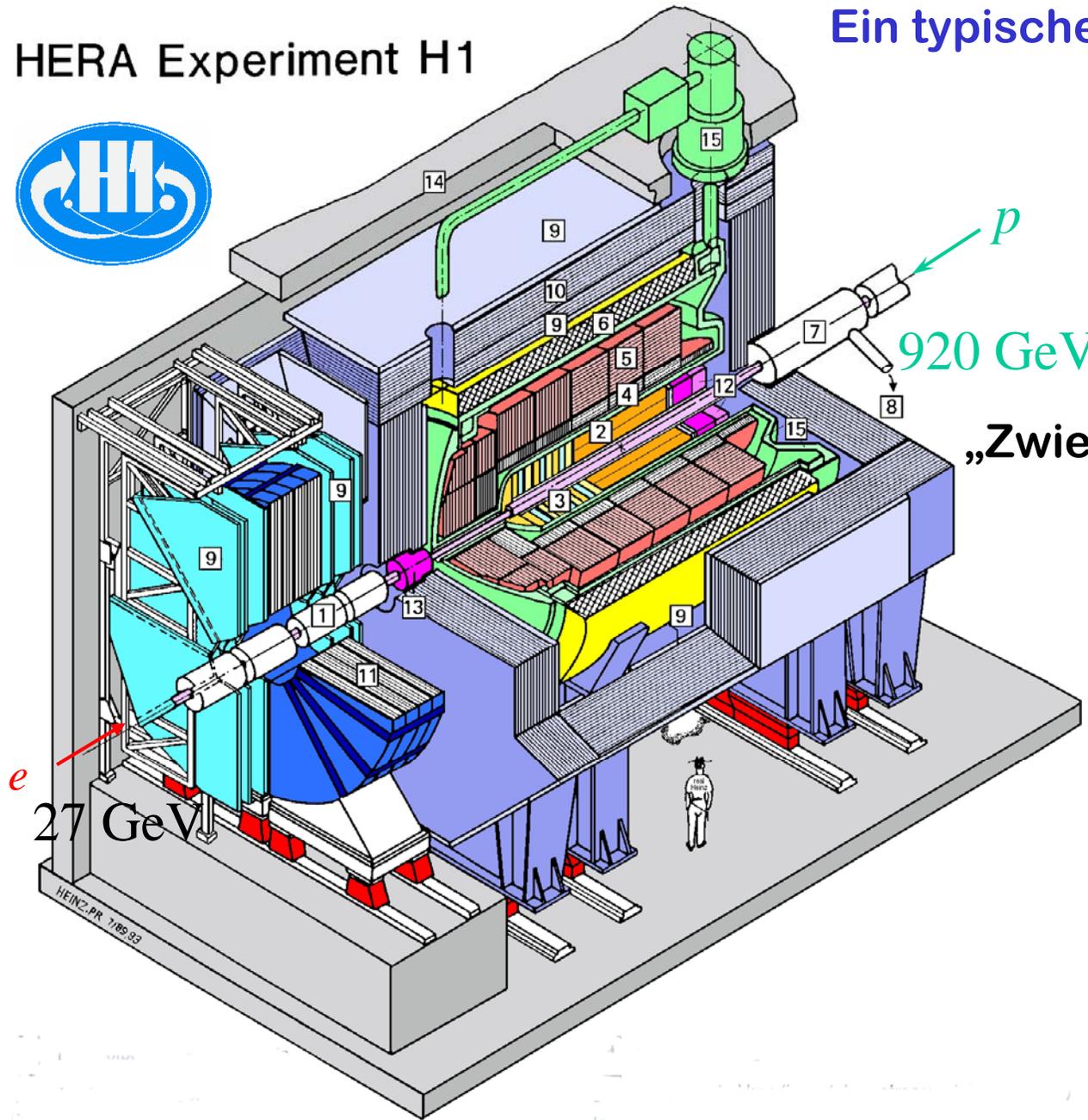
Im HERA-Tunnel: Oben die Proton-Maschine (supraleitende Magnete),  
darunter die Elektron-Maschine



# HERA Experiment H1



## Ein typischer Teilchendetektor ...



„Zwiebelschalen“-Bauweise  
um das Strahlrohr von  
innen nach außen:

Spurkammern [2,3]

Kalorimeter (LAr) [4,5]

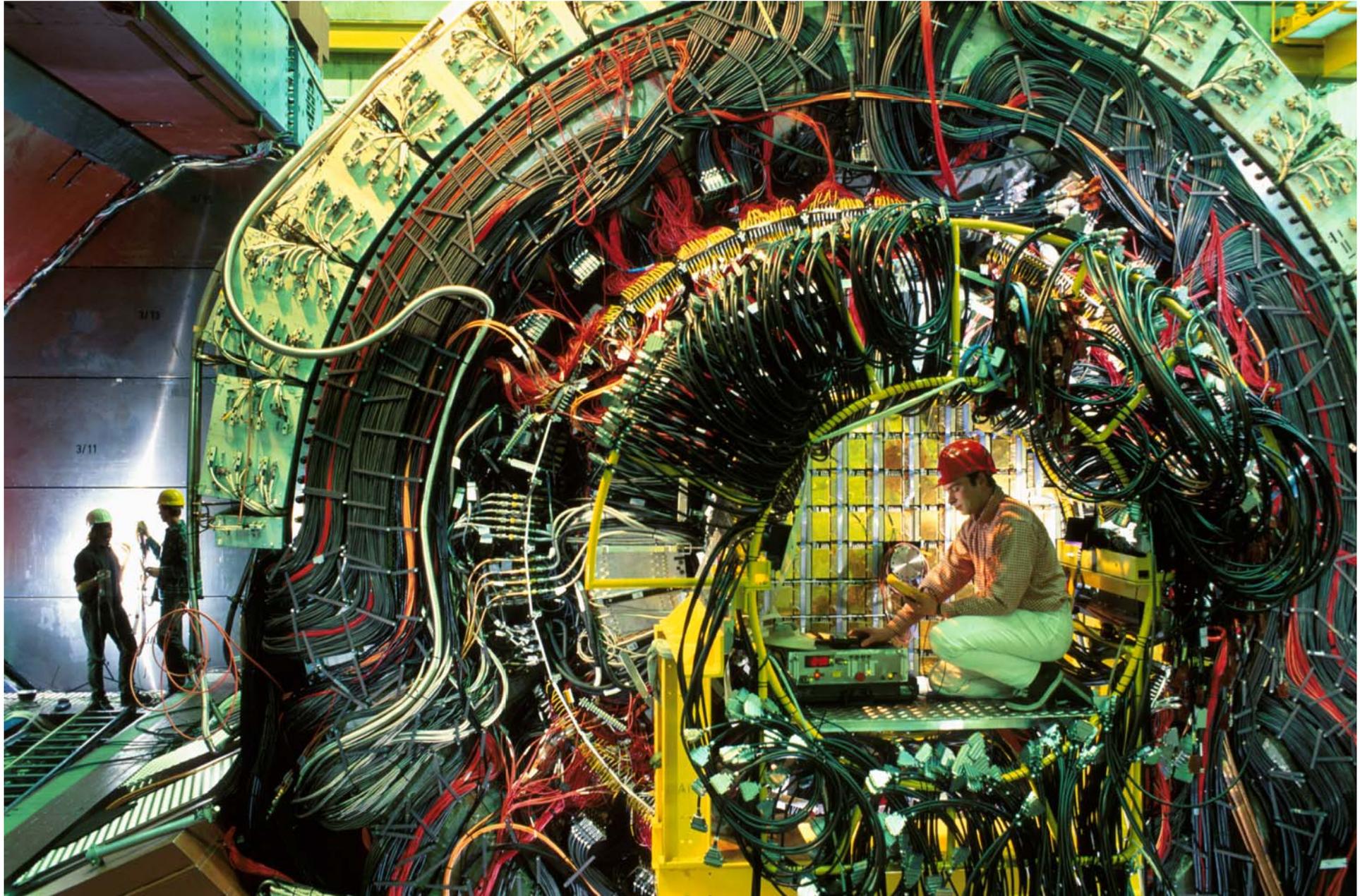
Supraleitende  
Magnetspule [6]

Eisenjoch [10]

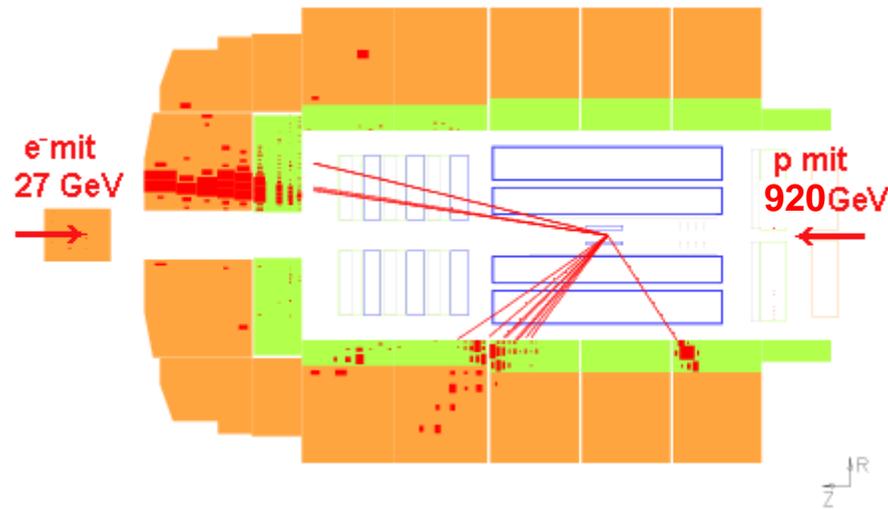
Muon-Kammern [9]

## Der „offene“ H1-Detektor

(... jeder Draht will „verstanden“ sein)



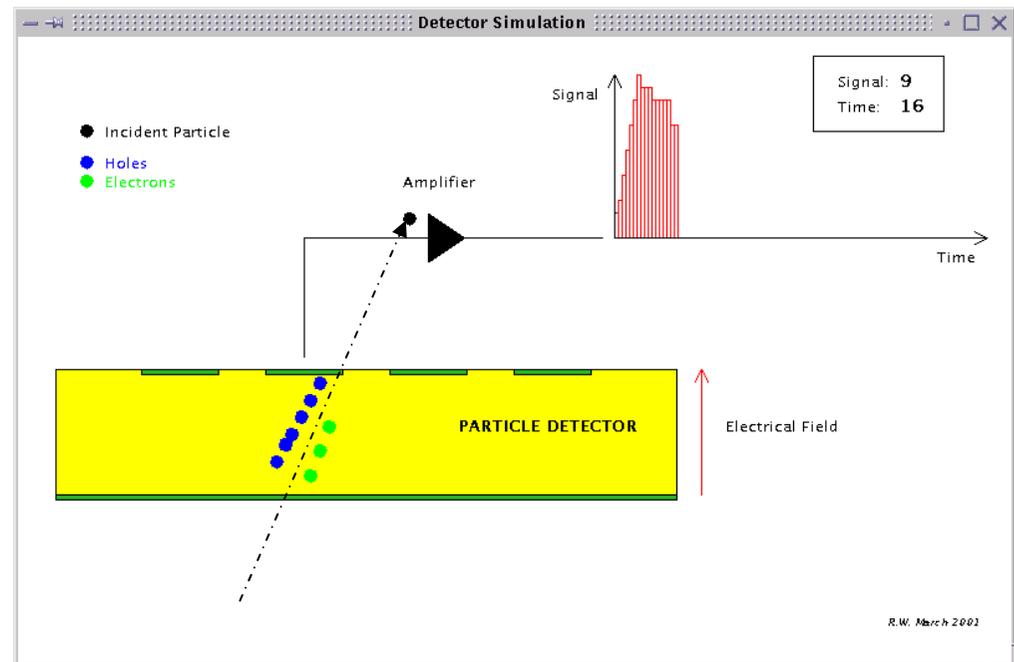
# Eine Elektron-Proton Kollision im H1 Detektor ...



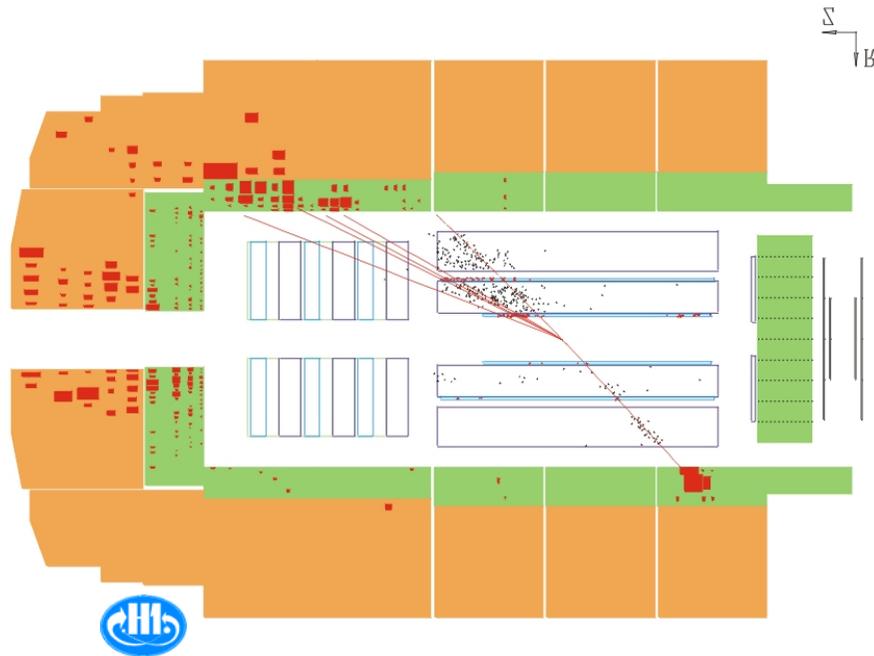
Elektron und Proton kollidieren in der Wechselwirkungszone und produzieren "neue" Teilchen

## und wie sie gemessen wird

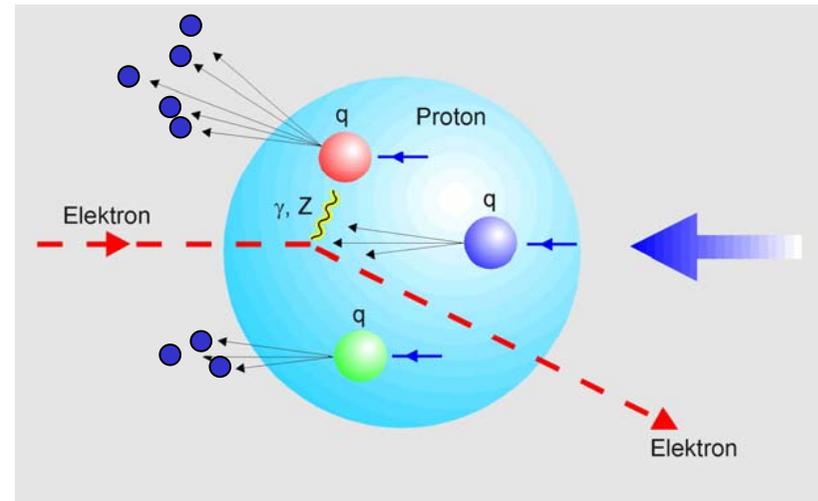
Die Teilchen werden nicht direkt beobachtet, sondern durch elektrische Ladungen "sichtbar" gemacht, die in der Detektormaterie von den Teilchen freigesetzt werden.



# Elektron trifft Proton: ein „Ereignis“ ...



Wirklichkeit



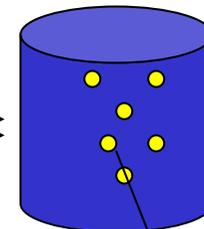
Modell, Theorie

**Experiment:** Registrieren vieler Ereignisse,  
Messung der gestreuten Elektronen

**Befund:** Es werden zu viele Elektronen stark  
abgelenkt (qualitativ ähnlich den  
Experimenten von Rutherford, 1911)

**Erklärung:** das Proton hat „harte“ Bestandteile, die

Sandsack

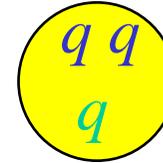


**QUARKS**

# Experimente zur Natur der Quarks

- Wieviele Quarks sind im Proton ?
- Sind diese Quarks alle identisch?
- Welche Eigenschaften haben sie?
- Können Quarks frei existieren ?
- Was bindet die Quarks aneinander ?

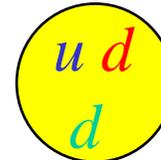
Drei



Nein, im Proton (und Neutron)  
zwei Sorten ( $u$ ,  $d$ )

Drittelzahlige Ladung ( $+2/3$ ,  $-1/3$ )  
Farbladung (rot, blau, grün)

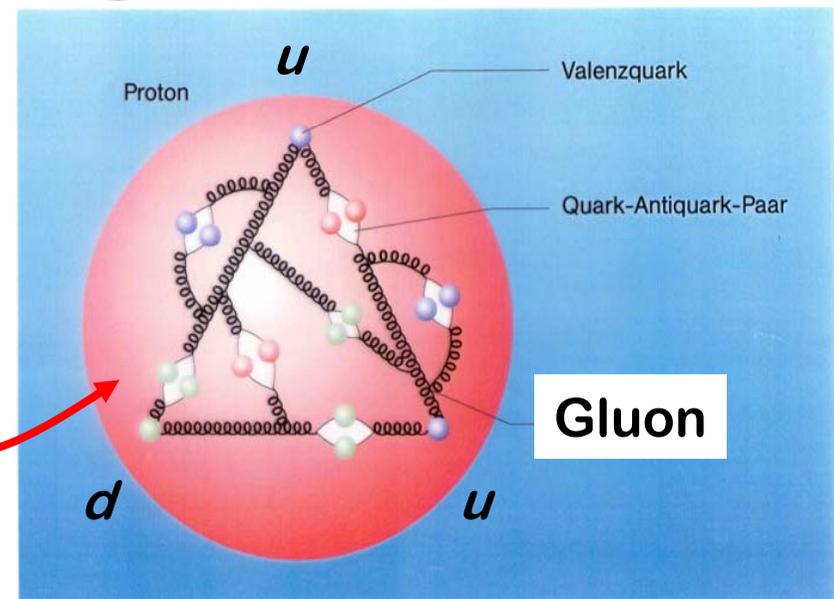
Noch **nie** beobachtet, nur als:



... , oder  ...

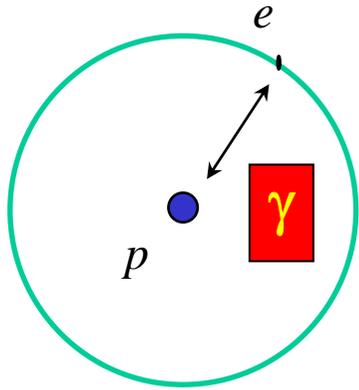
Eine „eigenartige“ Kraft, die  
mit dem Abstand der Quarks  
zunimmt

Gegenstand aktueller Forschung,  
insbesondere bei DESY



# Die Kräfte zwischen den Teilchen

Beispiel: Bindung der Elektronen an den Atomkern



- elektrische Anziehung ( $e$  negativ,  $p$  positiv geladen)
- elektromagnetische Kraft (bewegte Ladungen erzeugen Magnetfeld)
- elektromagnetisches Feld (J. C. Maxwell, 1865)



Maxwell

**Quantentheorie** (Heisenberg und andere):

Energieübertrag in Portionen ("Quanten")

Quanten des el.-mag. Feldes = "**Photonen**" ( $\gamma$ )

Photonen = Träger der elektromagnetischen Kraft

**Elektromagnetische Kraft = Austausch von Photonen**

# Vom Modell zur physikalischen Theorie

Zugrunde liegendes Bild: Kräfte durch Austausch von Photonen

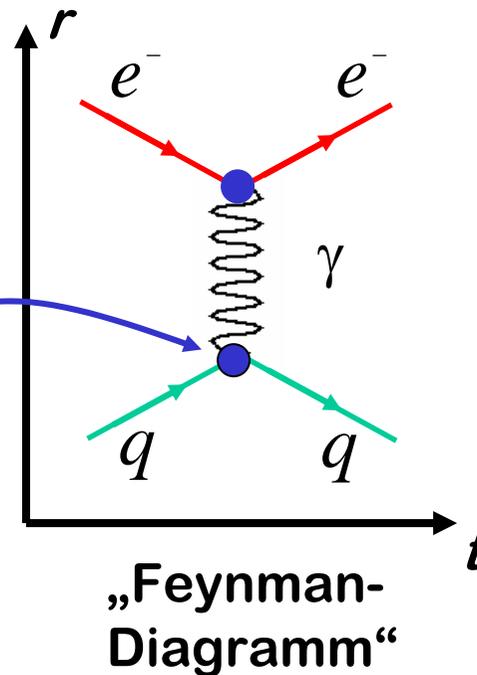


R. P. Feynman

mathematische  
Beschreibung

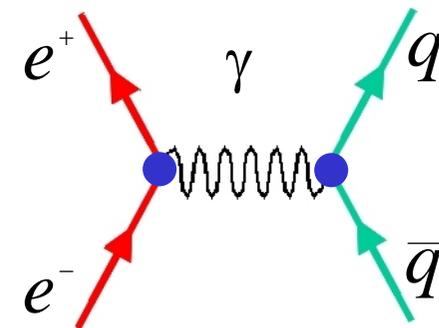


Kopplungs-  
stärke  $\alpha$



„Feynman-  
Diagramm“

Teilchen-Antiteilchen-  
Annihilation



→ **Quanten-Elektrodynamik:**  
experimentell bestens bestätigt

→ Nahe liegender, allgemeiner Ansatz: P. Dirac

**Kräfte (“Wechselwirkungen”) = Austausch von Feldquanten**

# Die elementaren Wechselwirkungen

|  | Gravitation | Schwache W.W.  | Elektromag. W.W. | Starke W.W.   |
|--|-------------|--|------------------|---------------|
| Effekte  | Schwerkraft | Radioaktivität   | Elektrizität     | Kernkraft     |
| $\alpha$   | $10^{-38}$  | $10^{-5}$  | $10^{-2}$        | 1             |
| Reichweite   | $\infty$    | $10^{-15}$ cm  | $\infty$         | $10^{-13}$ cm |
| Feldquant  | “Graviton”  | $W^+, W^-$   | Photon $\gamma$  | Gluon $g$     |
|  |             | Elektroschw. Wechselwirkung, Vorhersage des Feldquants $Z^0$                           |                  |               |
|  |             | Große Vereinheitlichte Theorien ? “Grand Unified Theories”, Vorhersage von Leptoquarks |                  |               |
|  <p><b>Theory Of Everything ? (Superstrings ?)</b></p> |             |  |                  |               |

# Nobelpreis für Physik 2004: Starke Wechselwirkung



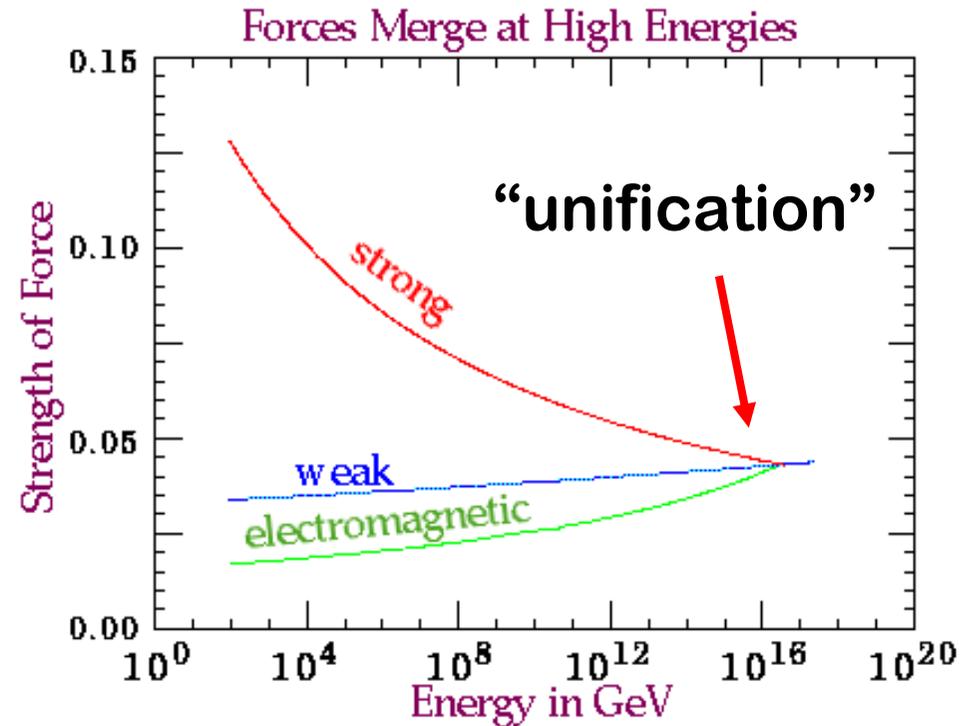
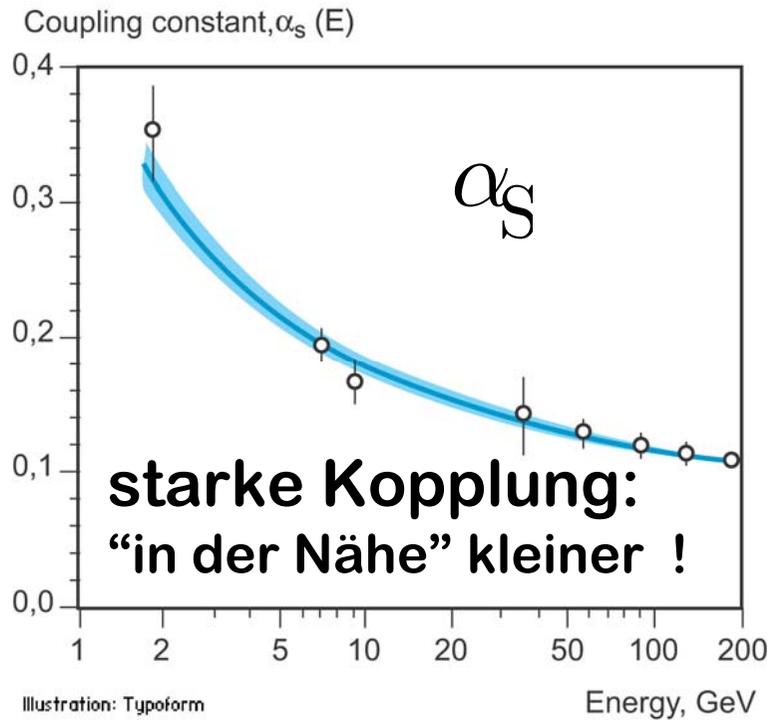
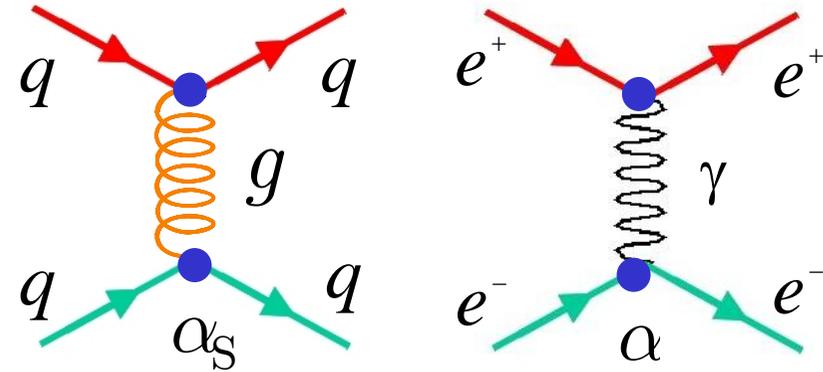
D. Gross



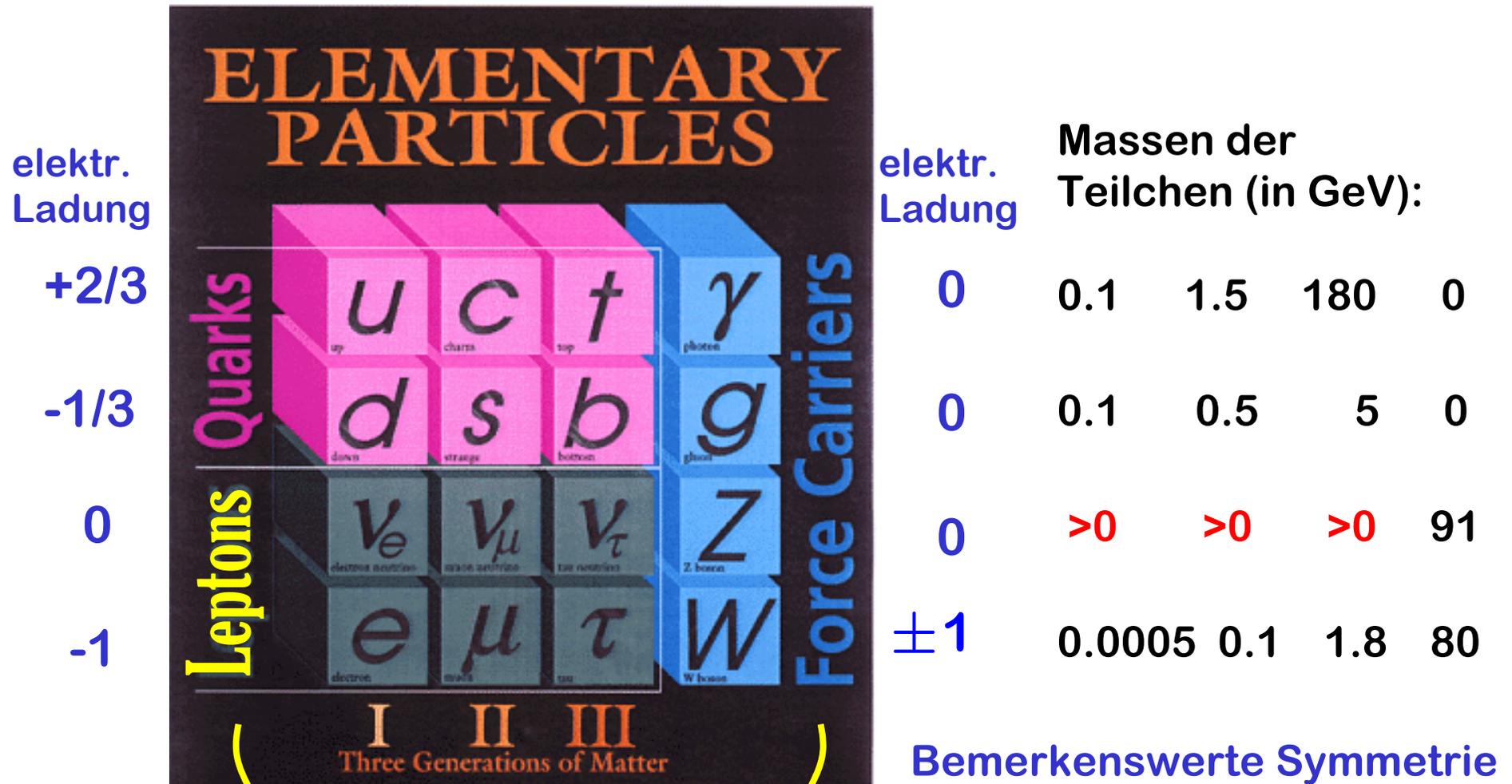
F. Wilczek



H. Politzer



# Das Periodensystem der Elementarteilchen



„Teilchen“:  
Spin  $\frac{1}{2}$   
(Fermionen)

„Felder“:  
Spin 1  
(Bosonen)

Bemerkenswerte Symmetrie

„Standardtheorie“ der  
Elementarteilchen

# Fehlende Teilchen im Standardmodell !



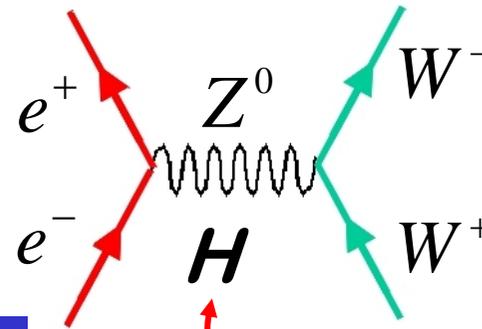
S. Glashow



A. Salam

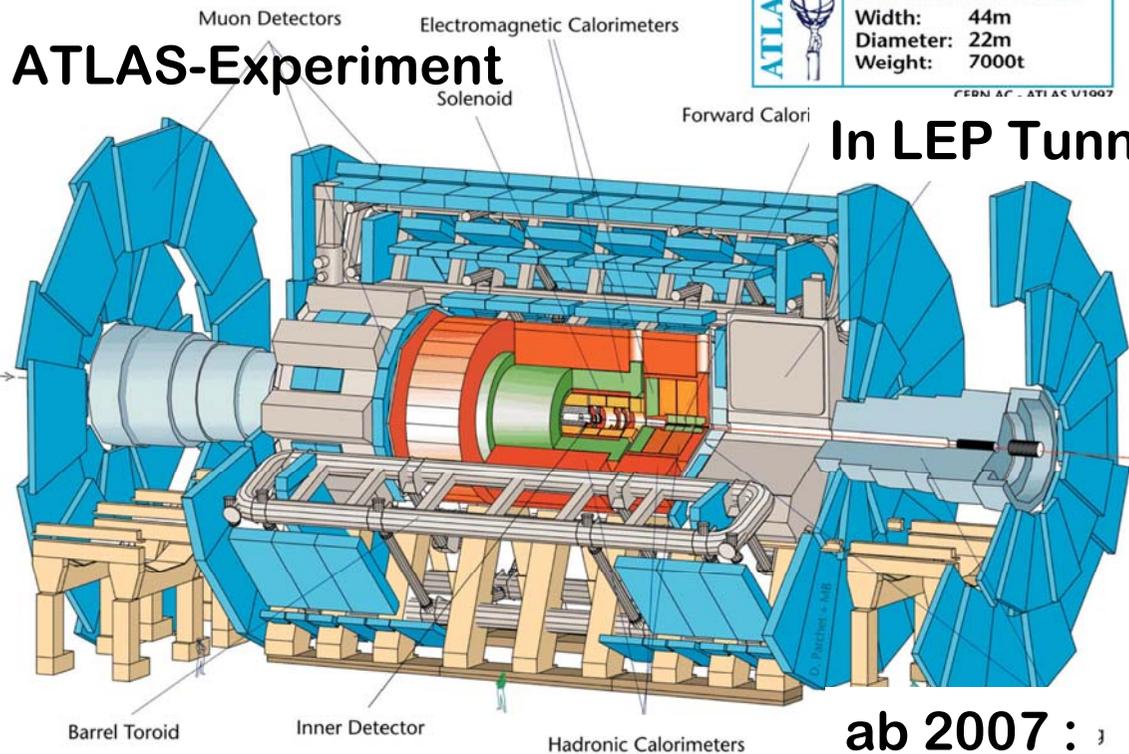


S. Weinberg



Massen der Teilchen durch Higgs „erklärbar“

Higgs-Teilchen  
 $110 < M_H < 1200 \text{ GeV}$



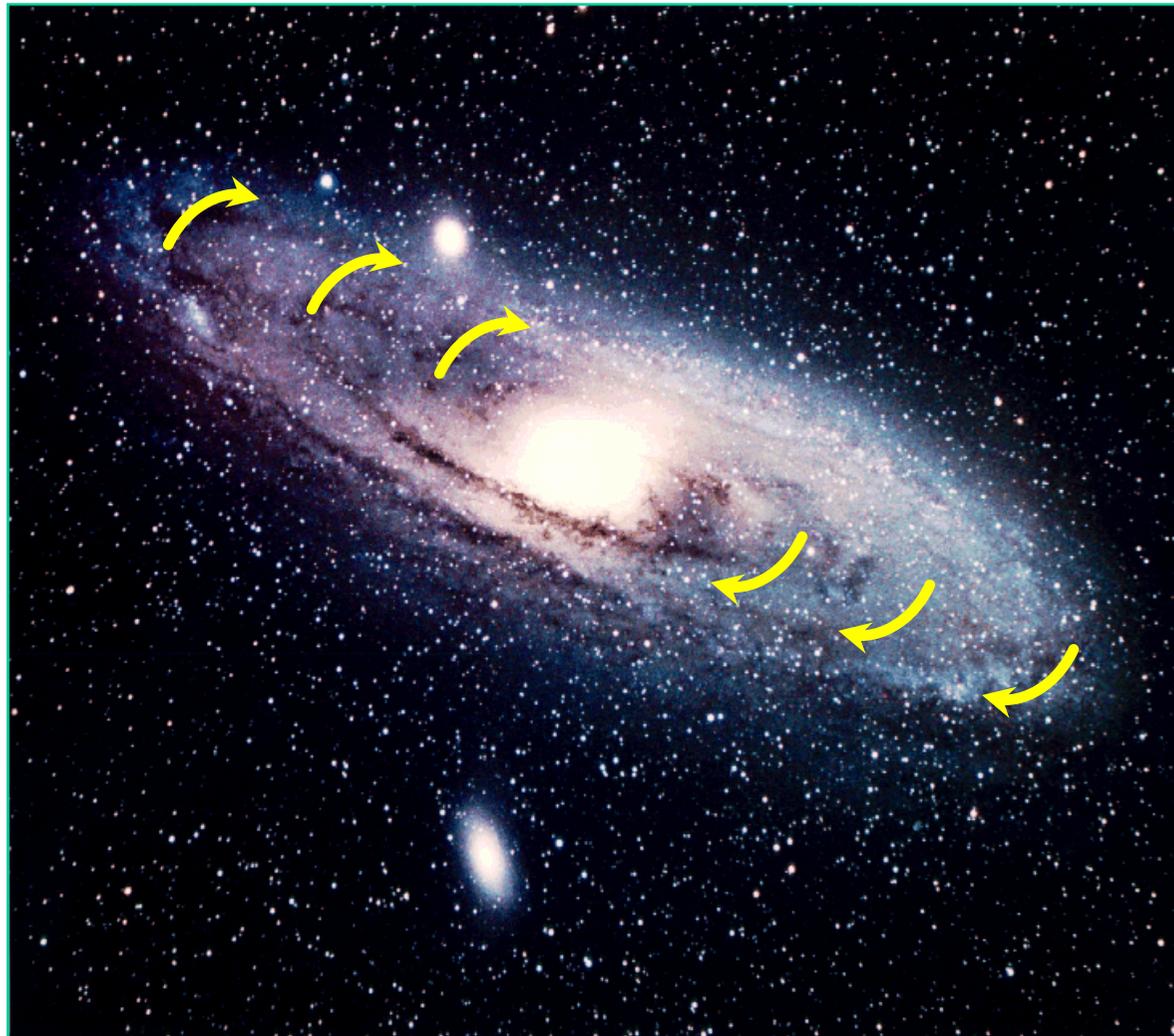
In LEP Tunnel: **L**arge **H**adron **C**ollider



Supral. Magnet

pp Kollisionen bei 14 TeV

# Dunkle Materie in den Galaxien



Andromeda-Nebel,  
etwa 2 Mio Lichtjahre entfernt

Rotationsgeschwindigkeit ca. 200 km/sec,  
unabhängig vom Radius



Galaktische Scheibe  
ist in einen "Halo" nicht  
leuchtender („dunkler“)  
Materie eingebettet



CRESST

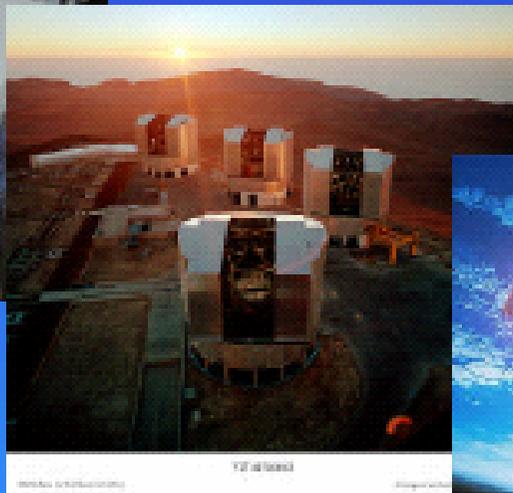


Neue Form  
der Materie ?

# Multi-wavelength astronomical observations of galactic objects



Radio

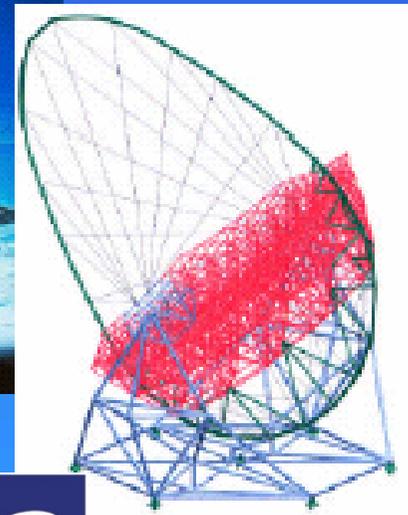


optisch

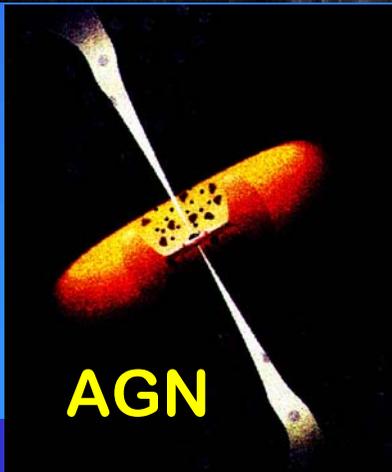


HLL

Röntgen

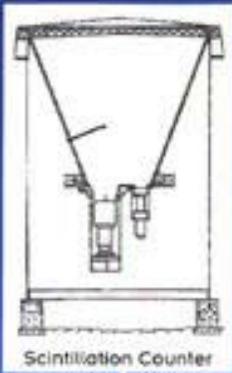


Gamma

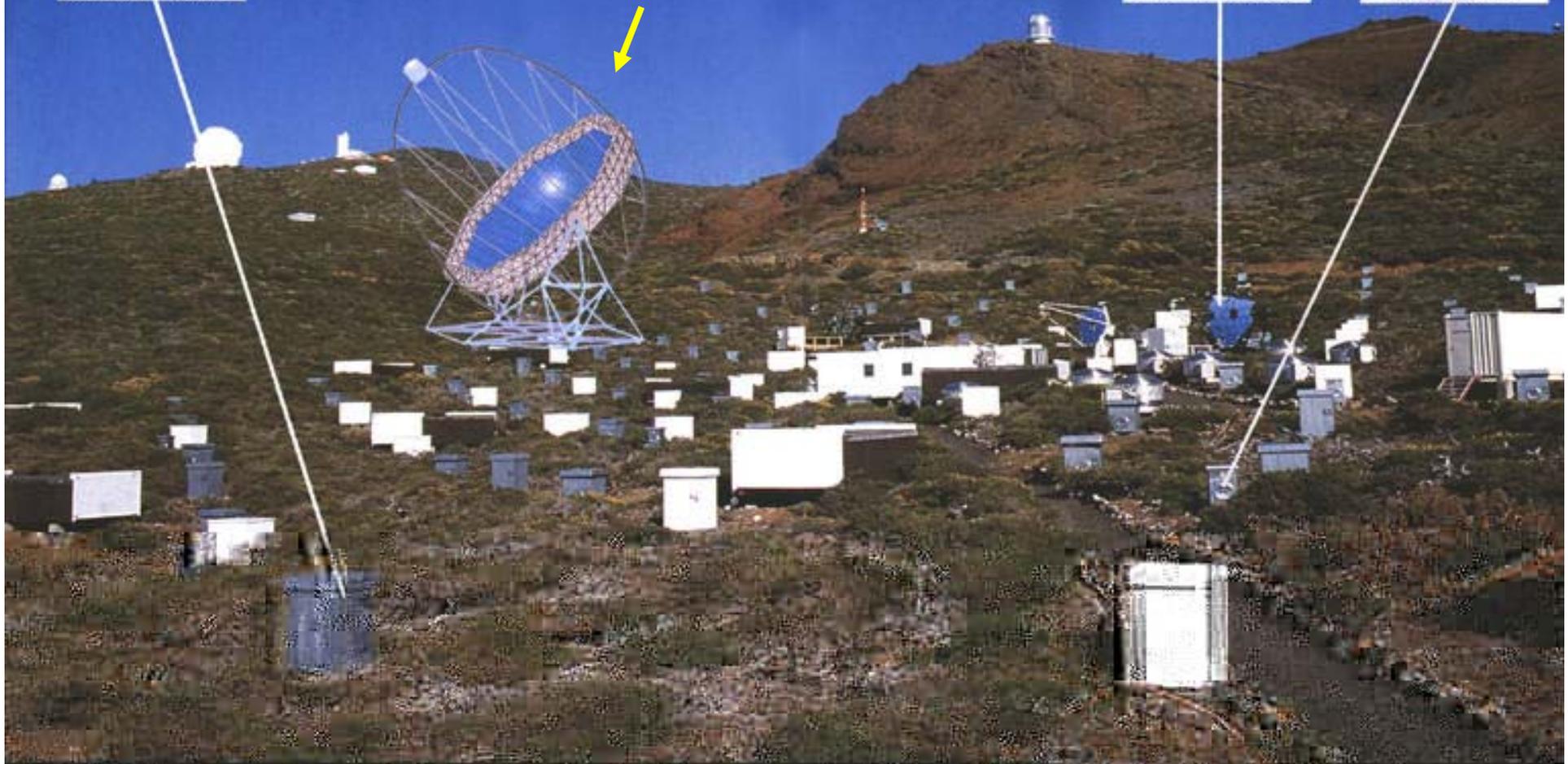
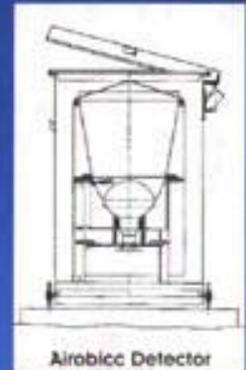
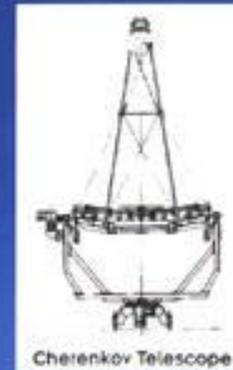


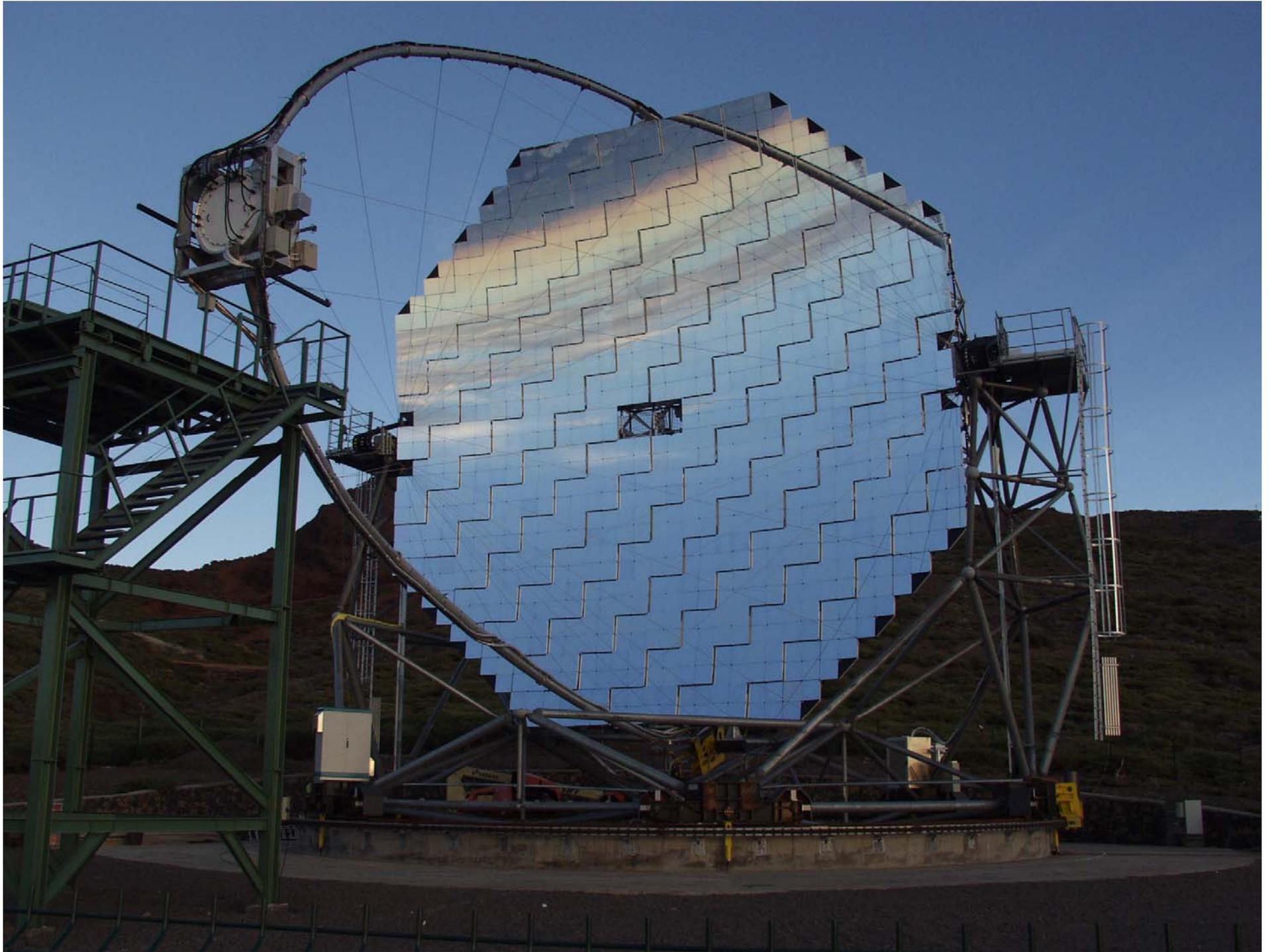
AGN



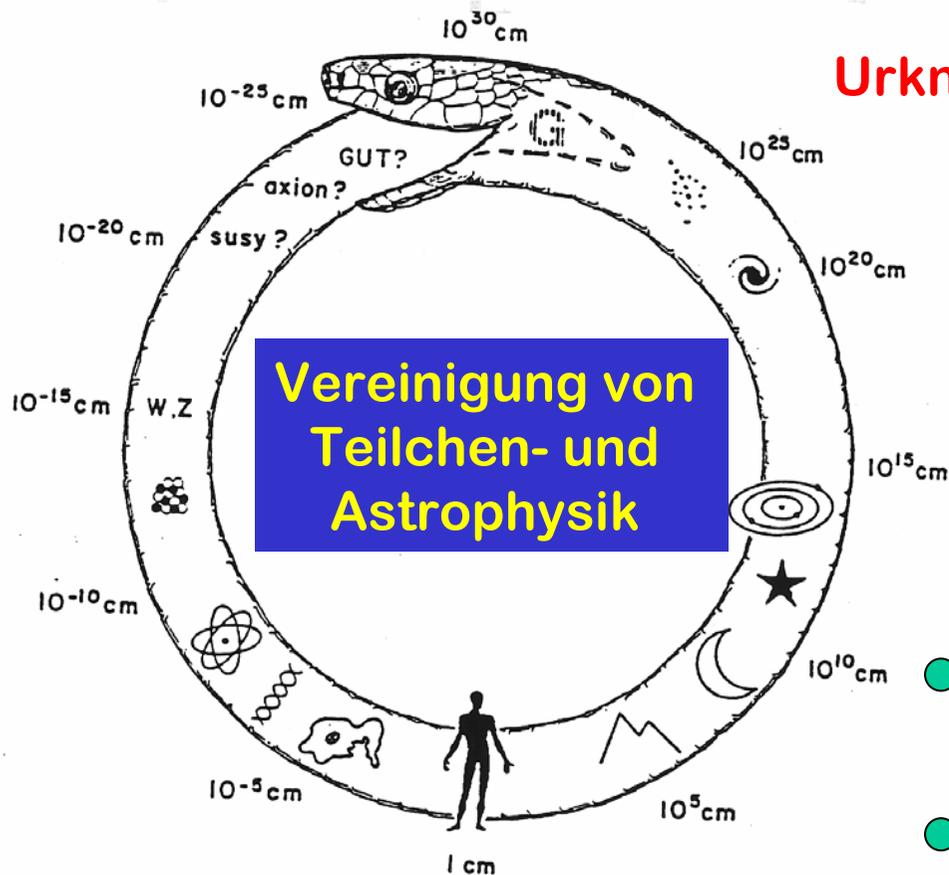


**MAGIC**





# Astro-Teilchenphysik



Urknall

Entwicklung des frühen Universums (**Kosmologie**) nur zu verstehen mit Hilfe der „Anfangsbedingungen“

**Teilchentheorie**

**viele offene Fragen**

- **„Fehlende“ Teilchen:**  
Higgs, SUSY,  
Dunkle Materie ...

- Leptonen und Quarks **strukturlos**, also elementar? „Strings“ ?
- **Vereinheitlichung** aller Kräfte ?

weitere Feldquanten („**Leptoquarks**“)  
→ Proton instabil ( $> 10^{32}$  Jahre)

mögliche Erklärung für das „Fehlen“ von Antimaterie im beobachtbaren Universum

# Astro-Teilchenphysik



- **“Fehlende” Teilchen:**  
Higgs, SUSY,  
Dunkle Materie ...

**Urknall**

Entwicklung des frühen Universums (**Kosmologie**)  
nur zu verstehen mit Hilfe  
der „Anfangsbedingungen“

**Teilchentheorie**

## viele offene Fragen

- Leptonen und Quarks **strukturlos, also elementar? „Strings“ ?**
- **Vereinheitlichung** aller Kräfte ?

weitere Feldquanten (**“Leptoquarks“**)  
→ Proton instabil ( $> 10^{32}$  Jahre)

mögliche Erklärung für das “Fehlen“ von Antimaterie im beobachtbaren Universum