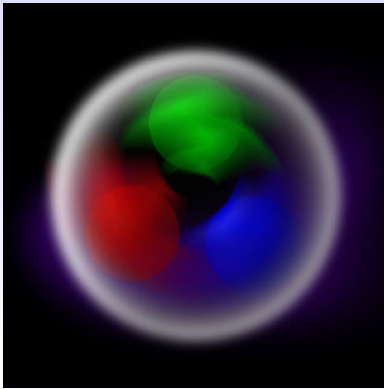


Vom Elektron zu den Quarks

■ Die kleinsten Bausteine der Materie ■



Vortrag am „Tag der Offenen Tür 2004“

Prof. Dr. Karl Jakobs

**Physikalisches Institut
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg**

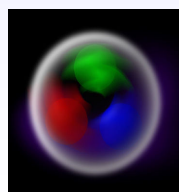
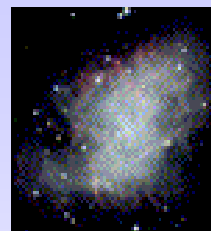
Motivation und Zielsetzung der Teilchenphysik

Grundlegende Fragen:

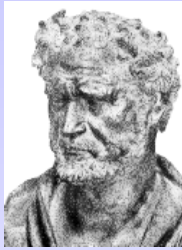
- Woraus besteht die Materie die uns umgibt ?
- Ist sie teilbar ? Wenn ja, wie weit ?
- Welche Kräfte wirken zwischen den Bausteinen?

Zielsetzung:

Einheitliche und umfassende Beschreibung der Materie und ihrer Wechselwirkungen
von kleinsten Abständen (10^{-18} m)
bis zu kosmischen Dimensionen (10^{25} m)



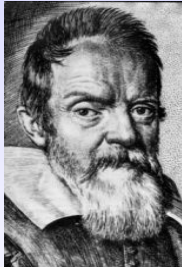
Historischer Überblick



Demokrit (ca. 470 - 380 v.Chr):

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

Atom (gr. unteilbar)



Renaissance: intellektuelle Erneuerung Europas,
Begründung der Physik als Naturwissenschaft

Galileo Galilei
Isaac Newton



19. Jahrhundert:

1811: **Avogadro**

1868: **Mendeleev**

1896: **Becquerel,**
M. u. P. Curie

Molekültheorie der Gasgesetze

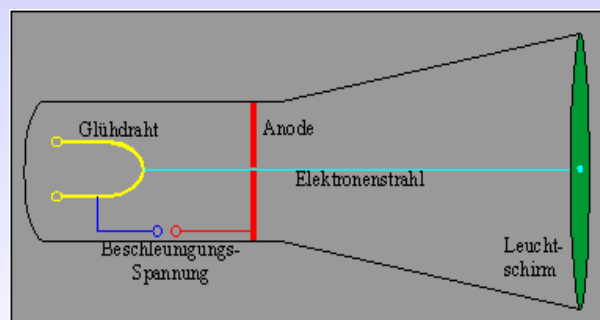
Periodensystem der Elemente

Entdeckung der Radioaktivität
 α , β , γ -Strahlung

Die Entdeckung der Elektrons **- das erste Elementarteilchen-**

1869: Hittorf

Erhitzte Kathoden in Vakuumröhren senden Strahlen aus, die sich geradlinig ausbreiten und **magnetisch ablenkbar** sind



1897: J.J. Thomson

Bestimmt das Verhältnis von Ladung zu Masse (e/m) mit Hilfe von gekreuzten elektrischen und magnetischen Feldern

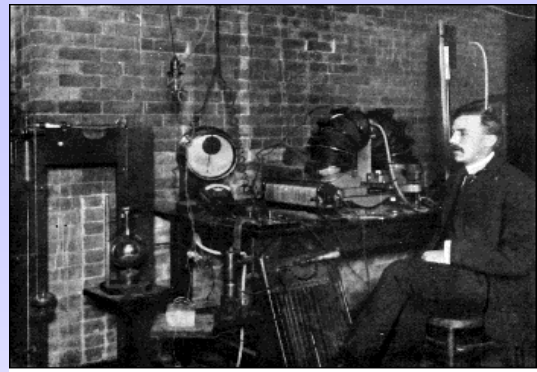
„These particles are a constituent of all matter. They are lighter than the lightest known atom (hydrogen) by a factor of more than 1000.“

ein weiterer wichtiger Meilenstein.....

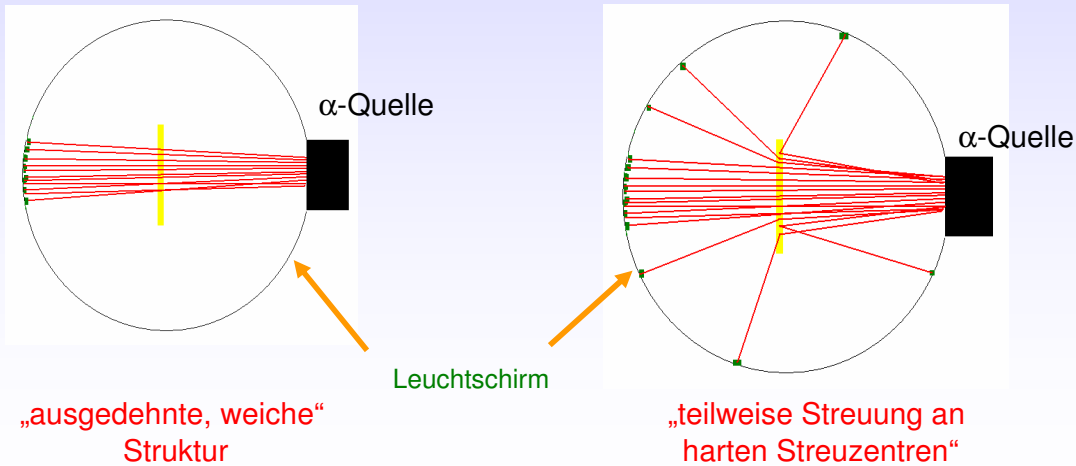
1911: E. Rutherford

Streuexperiment:

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



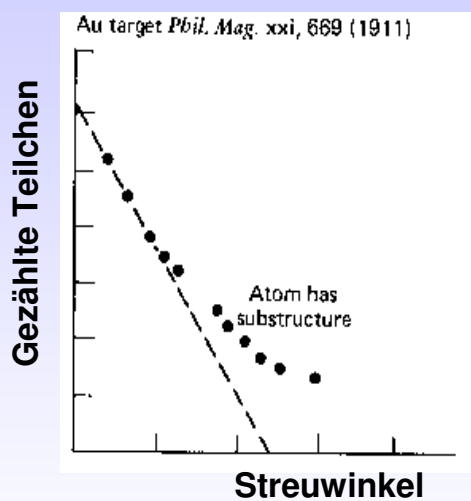
Ernest Rutherford with Gold Foil Experiment



K. Jakobs

Tag der Offenen Tür, Universität Freiburg, Nov. 2004

Ergebnis des Streuexperiments:



Rutherford-Experiment
5 MeV α -Teilchen auf Au

Teilchen gehen nicht ungehindert
durch Goldfolie hindurch



Im Atom befindet sich ein hartes
Streuzentrum



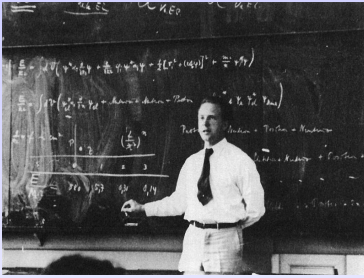
Detaillierte Untersuchungen: **Atomkern**

Größe: 10^{-14} m
Ladung positiv, enthält fast die gesamte
Masse des Atoms

K. Jakobs

Tag der Offenen Tür, Universität Freiburg, Nov. 2004

Wichtige Entwicklungen in der theoretischen Physik



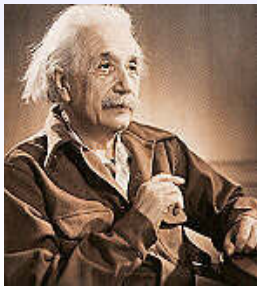
Quantentheorie:

- „Teilchen“ wird Wellencharakter zugeordnet (De Broglie Wellenlänge)
- Ort und Impuls eines „Teilchens“ können nicht gleichzeitig beliebig genau gemessen werden: Heisenberg'sche Unschärferelation:

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

$$\Delta x \Delta p \sim \hbar$$

$$(\Delta E \Delta t \sim \hbar)$$



Einsteins spezielle Relativitätstheorie:

- Lichtgeschwindigkeit ist max. Geschwindigkeit
- Äquivalenz von Energie und Masse

$$E = \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}$$

K. Jakobs

Tag der Offenen Tür, Universität Freiburg, Nov. 2004



Relativistische Quantentheorie:

P.A. M. Dirac (1929)

Die Verknüpfung der Quantentheorie mit der Relativitätstheorie führt zur Dirac-Gleichung

- Als Lösung der Dirac-Gleichung treten negative Energiezustände auf !! ??
- Diese werden schließlich als Energiezustände von **Antiteilchen** interpretiert

K. Jakobs

Tag der Offenen Tür, Universität Freiburg, Nov. 2004

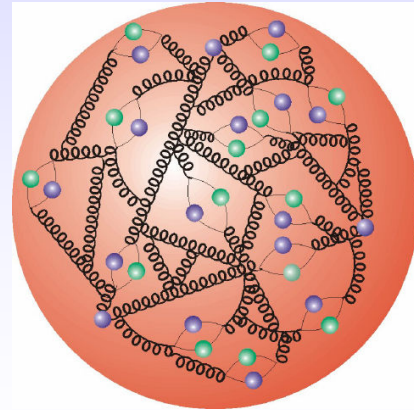
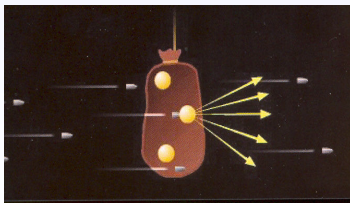
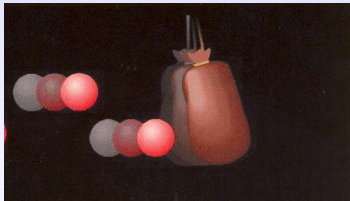
Die Aufgaben der modernen Teilchenphysik

1. Strukturuntersuchungen

Hohe Teilchenimpulse (Energien) sind notwendig, um das Innere des Atomkerns und kleinere Strukturen untersuchen zu können

Die räumliche Auflösung wird bei hohen Impulsen besser

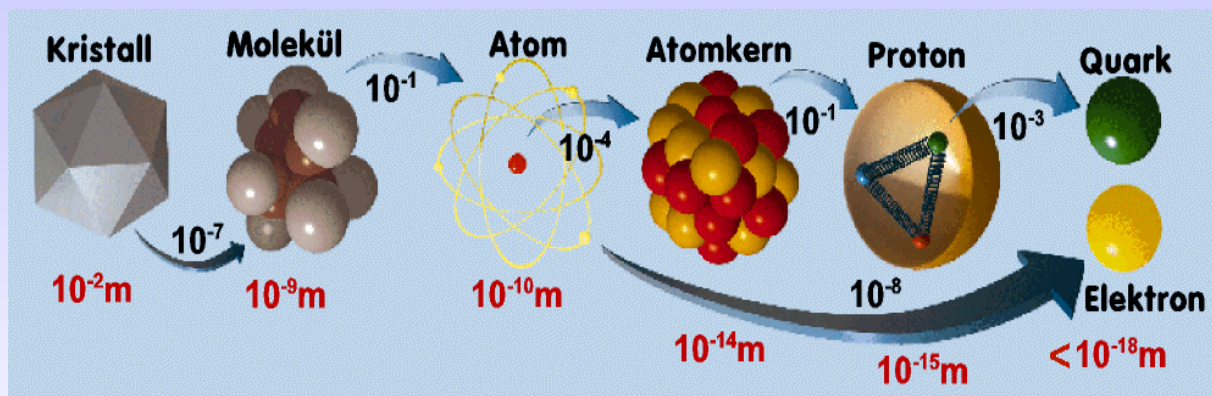
$$\Delta x = \frac{\hbar}{p}$$



K. Jakobs

Tag der Offenen Tür, Universität Freiburg, Nov. 2004

Vom Kristall zum Quark



Auge,
Mikroskop

Elektronenmikroskop

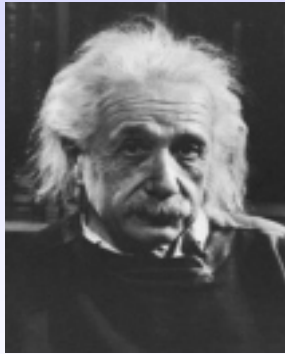
Hochenergetische
Teilchenstrahlen

K. Jakobs

Tag der Offenen Tür, Universität Freiburg, Nov. 2004

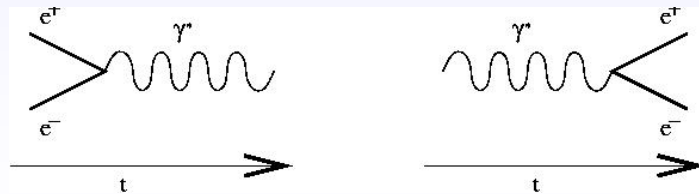
2. Suche nach “Neuen Teilchen“ (neuen Materiezuständen)

Hohe Energien sind notwendig, um neue, schwere Teilchen zu produzieren



$$E = \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}$$

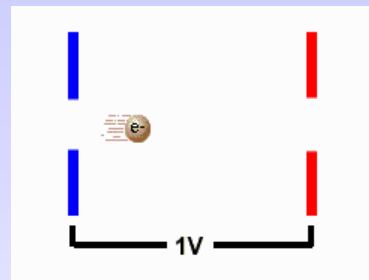
d.h, aus Energie können Teilchen entstehen
und
Teilchen können zu Energie zerstrahlen



Beschleunigung geladener Teilchen

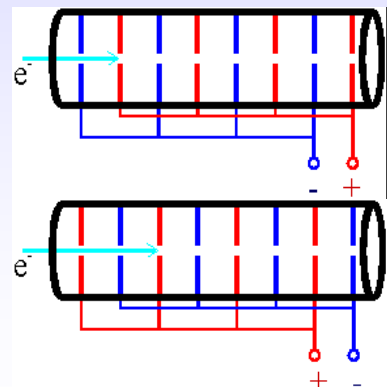
- Wenn ein Elektron eine Spannungsdifferenz durchläuft, gewinnt es kinetische Energie

Spannungsdifferenz 1V $\Rightarrow$ 1 eV



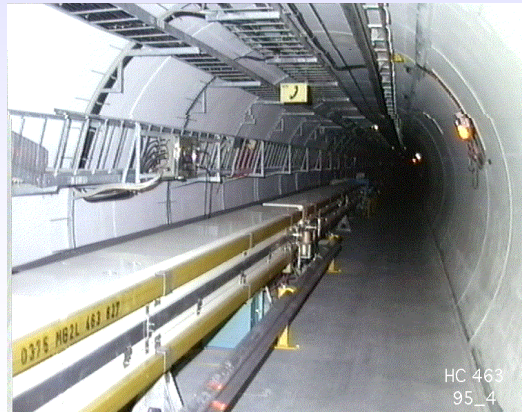
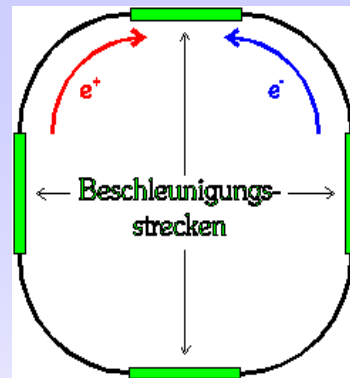
- Hintereinanderschalten vieler Beschleunigungsstrecken

Elektrisches Feld muß zur richtigen Zeit umgepolt werden



Ringbeschleuniger

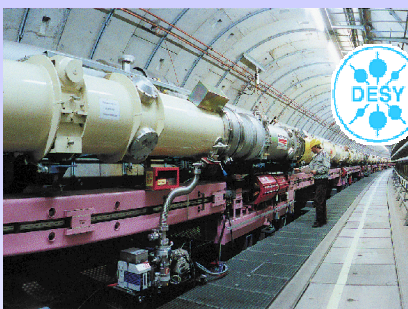
- Magnetfeld zwingt Teilchen auf eine Kreisbahn
- Teilchen durchlaufen Beschleunigungsstrecken bei jedem Umlauf erneut
- Hohe Energien erfordern große Ringdurchmesser



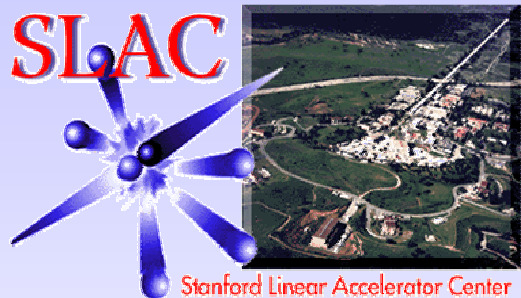
K. Jakobs

Tag der Offenen Tür, Universität Freiburg, Nov. 2004

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

K. Jakobs

Tag der Offenen Tür, Universität Freiburg, Nov. 2004

An aerial photograph of a landscape. In the foreground, a large, irregularly shaped green field is visible, with a red ellipse overlaid on it. The ellipse is centered on the field and has several small red circles at its major and minor axes. In the background, there is a blue body of water, followed by a range of mountains with snow-capped peaks under a clear blue sky.

Tag der Offenen Tür, Universität Freiburg, Nov. 2004

1890 1900 1910 1920

e^- p

1920 1930 1940 1950

n e^+ $\mu^\pm$ $\pi^\pm$ $K^\pm$

The Quark Idea
(up, down, strange)

(bottom)

(charm)

1950 1960 1970 1980

π^0 Λ^0 $\Sigma^\pm$ $\bar{p}$ ν_e Σ^0 $\bar{\Lambda}^0$ ρ ν_μ a_2 J/ψ τ Υ Λ_c
 K^0 Δ Ξ^- $\bar{n}$ Ξ^0 ω ϕ η' ...and many more! Ψ' χ_c Υ' Σ_c
 K^* f Ω^- Ψ'' D Υ''

(top)

1980 1990 2000 2010

η_c B $W^\pm$ Z B_s t
 D_s Ξ_c Λ_b

Tag der Offenen Tür, Universität Freiburg, Nov. 2004

Können alle diese Teilchen elementar sein ??

1964: **Quark-Hypothese**



vorgeschlagen von **M. Gell-Mann** und **G. Zweig** (unabhängig voneinander)
(Theoretisches Konzept, drittel-zahlige elektrische Ladungen)

Hauptmotivation: Teilchenvielfalt $\Rightarrow$ **neue Substruktur**

zum Aufbau aller bekannten Teilchen waren
3 Quarks notwendig
(up-Quark, down-Quark und strange-Quark)

Experimentelle Bestätigung: Ende der 60er / Beginn der 70er Jahre
des letzten Jahrhunderts

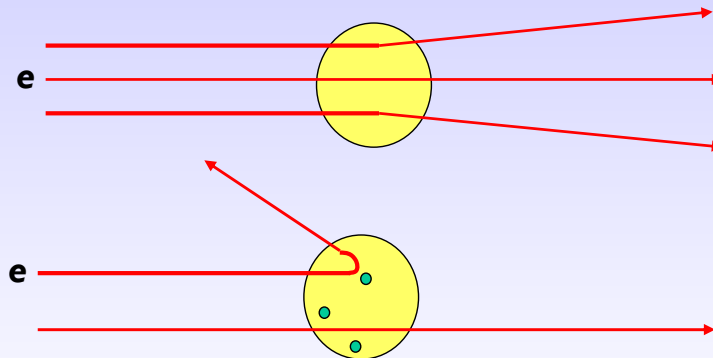
*„- **THREE QUARKS FOR MUSTER MARK !**
SURE HE HASN 'T GOT MUCH OF A BARK
AND SURE ANY HE HAS IT 'S ALL BESIDE THE
MARK.
BUT O WRENEAGLE ALMIGHTY WOULDN 'T UN
BE A SKY OF A LARK
TO SEE THAT OLD BUZZARD ABOUT FOR UNS
SHIRT IN THE DARK
AND HE HUNTING ROUND FOR UNS SPECKLED
TROUSERS AROUND BY PALMERSTOWN PARK?“*

aus *Finnegans Wake*, von James Joyce

Das Rutherford Experiment der 2. Generation

1968: Stanford University, Kalifornien

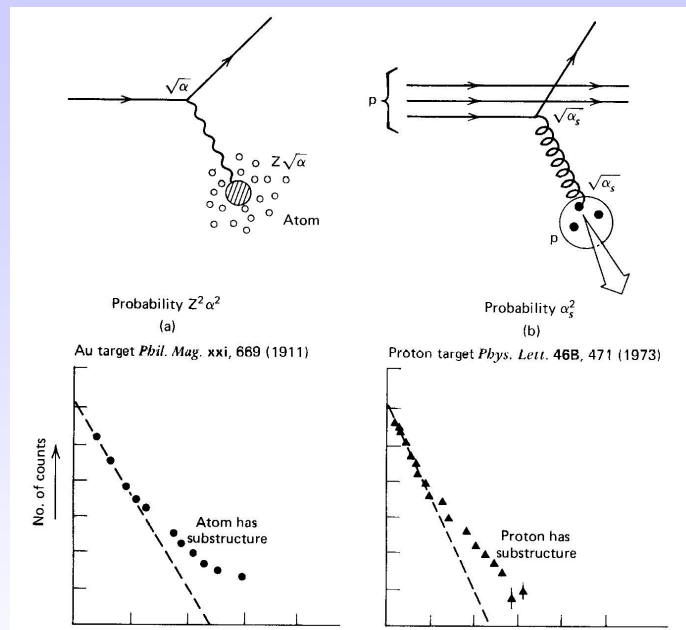
Bau eines 20 GeV Elektronenbeschleunigers zur Untersuchung der Struktur des Protons



Möglichkeiten:

1. Elektrische Ladung im Proton ist kontinuierlich verteilt, d.h. Elektronen werden nur wenig abgelenkt, oder
2. Elektrische Ladung ist in wenigen Punkten (Quarks) konzentriert

Ergebnisse

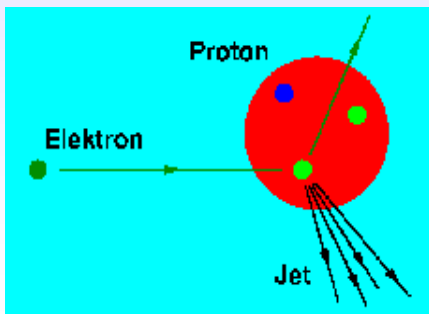


- **Protonen haben eine Substruktur (harte Streuzentren)**
- **Die Zahl der Streuzentren ist 3, mit Ladungen $2/3e$, $2/3e$ und $-1/3e$**
- **Neben den Quarks gibt es weitere Konstituenten im Proton, die Gluonen**

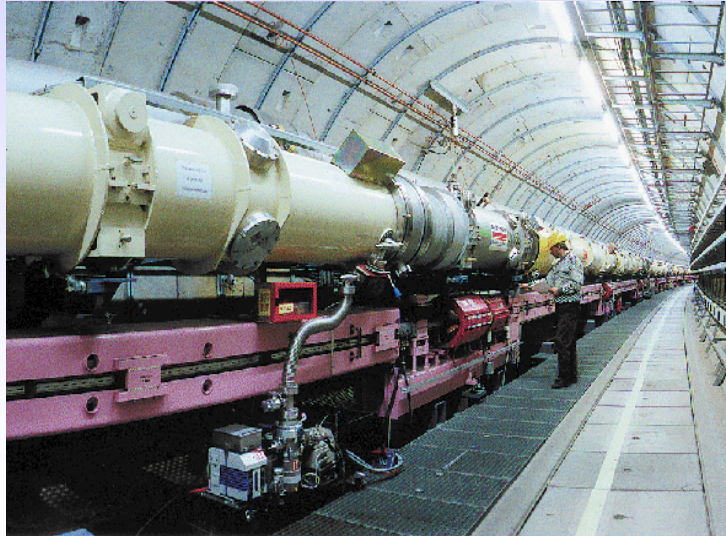
Proton Untersuchungen heute: bei HERA am DESY in Hamburg, bis 10^{-18} m



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



HERA-Teilchenbeschleuniger



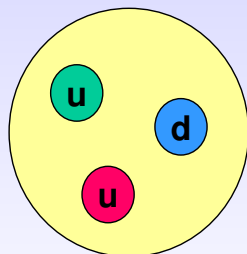
K. Jakobs

Tag der Offenen Tür, Universität Freiburg, Nov. 2004

Teilchen und Zerfälle im Quark-Modell

Bausteine der Atomkerne

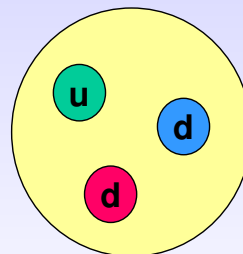
Proton



Quarks: **up up down**

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

Neutron



Quarks: **up down down**

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

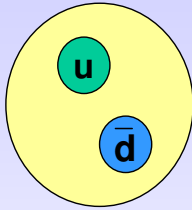
Teilchen, die aus drei Quarks aufgebaut sind, heißen BARYONEN

K. Jakobs

Tag der Offenen Tür, Universität Freiburg, Nov. 2004

Weitere Teilchen (Mesonen)

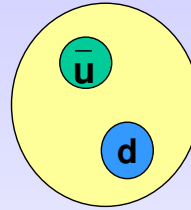
positiv geladenes Pion



Quarks: up Anti-down

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

negativ geladenes Pion



Quarks: Anti-up down

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

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

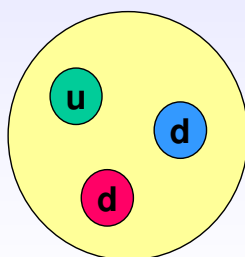
Der β -Zerfall im Quark-Modell

Ein Neutron des Kerns wandelt sich in ein Proton um

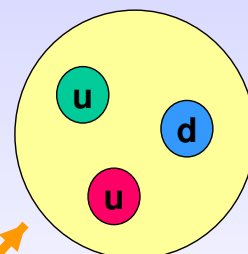


Ein down-Quark wandelt sich in ein up-Quark um

Neutron



Proton



Elektron

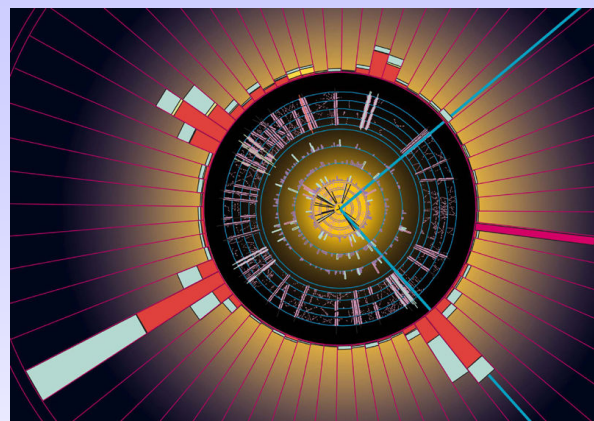
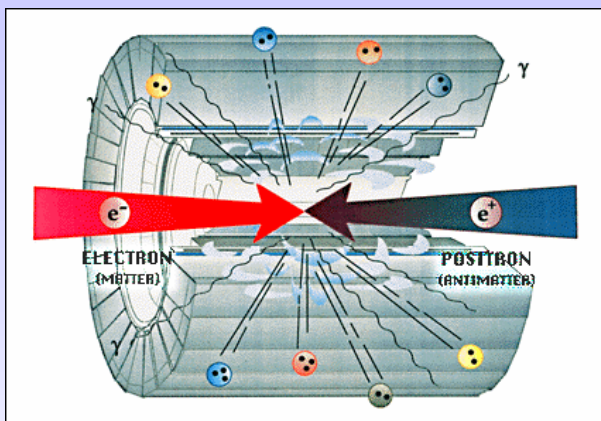
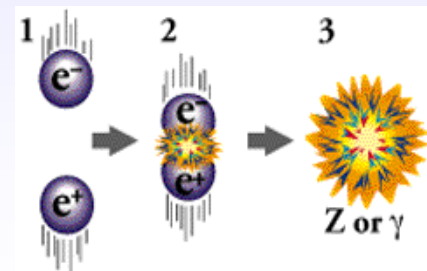
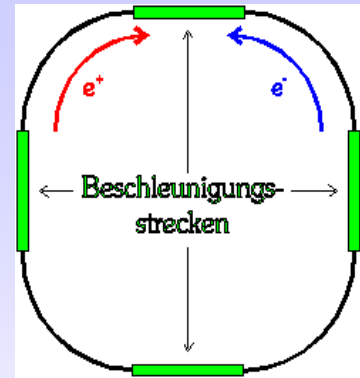
Anti- e-Neutrino

Urknall im Labor

- Erzeugung von neuen Teilchen im Labor
- Teilchen und Anti-Teilchen werden vernichtet und es entsteht Energie (Licht oder Photonen)

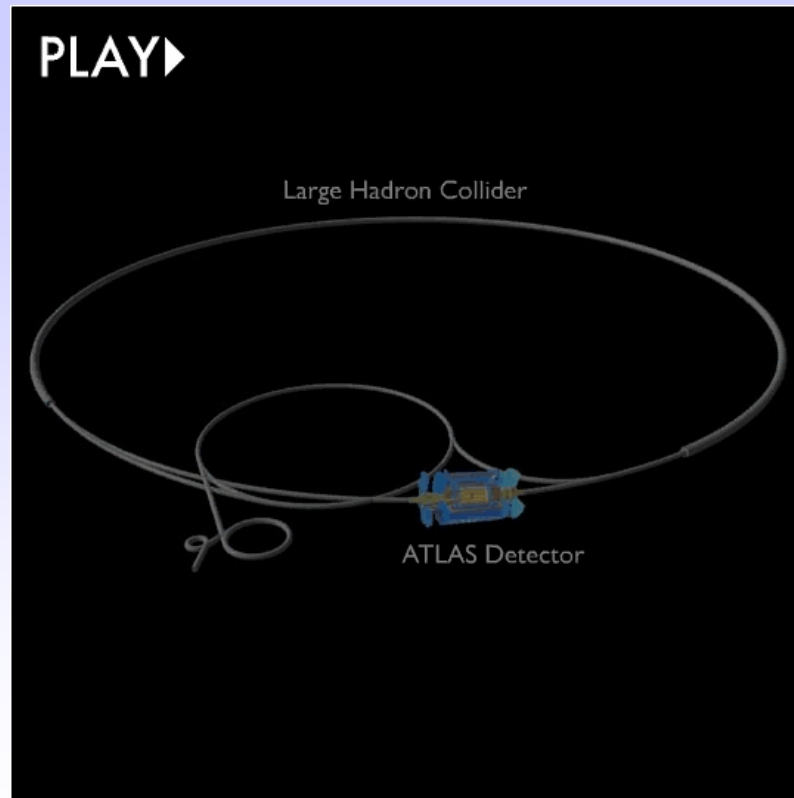
aus der Energie können neue Teilchen entstehen

- Neu erzeugten Teilchen werden in Detektoren nachgewiesen
- 1989 – 2000: Am **Large-Electron-Positron-Ring** LEP am CERN stand eine Energie zwischen 90 und 208 GeV für die Erzeugung von Teilchen zur Verfügung
- Die leistungsfähigste Maschine steht heute am US-Forschungslabor Fermilab/Chicago Proton – Antiproton Beschleuniger



Nachweisgeräte (Detektoren) messen:
Energie, Flugrichtung und Typ der entstandenen Teilchen

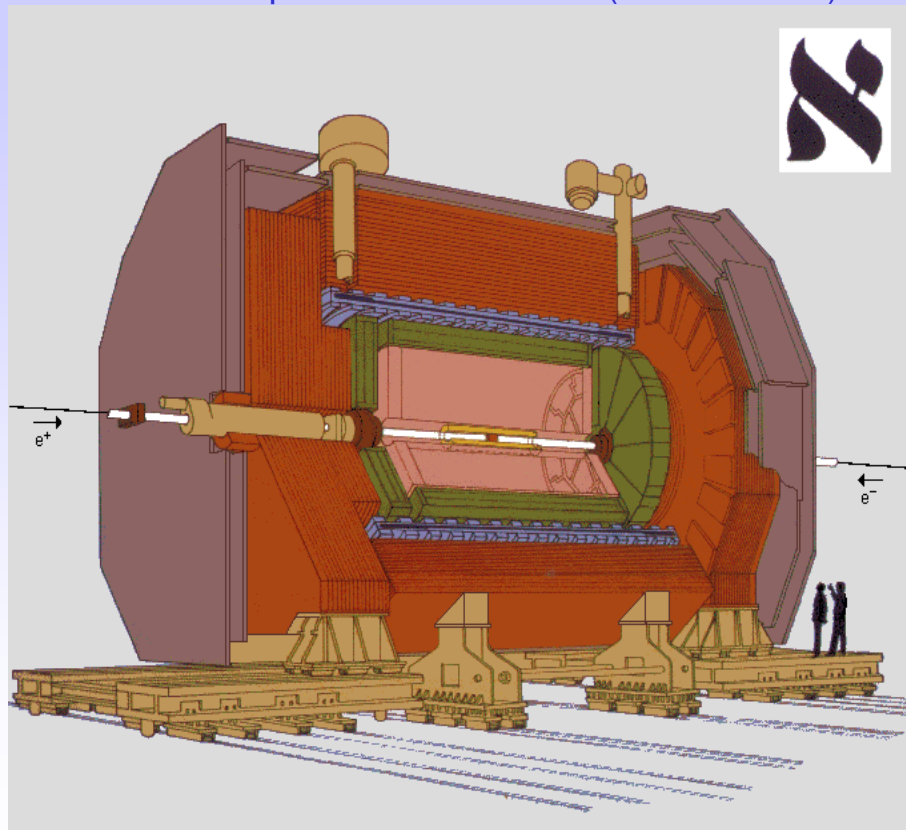
Mit diesen Messwerten können die physikalischen Theorien der Teilchenphysik überprüft werden und nach „*Neuen Teilchen*“ gesucht werden



K. Jakobs

Tag der Offenen Tür, Universität Freiburg, Nov. 2004

Das ALEPH-Experiment am CERN (1989 – 2000)



K. Jakobs

Tag der Offenen Tür, Universität Freiburg, Nov. 2004

***Das DØ - Experiment am
Fermi National
Accelerator Laboratory
in Chicago***



K. Jakobs

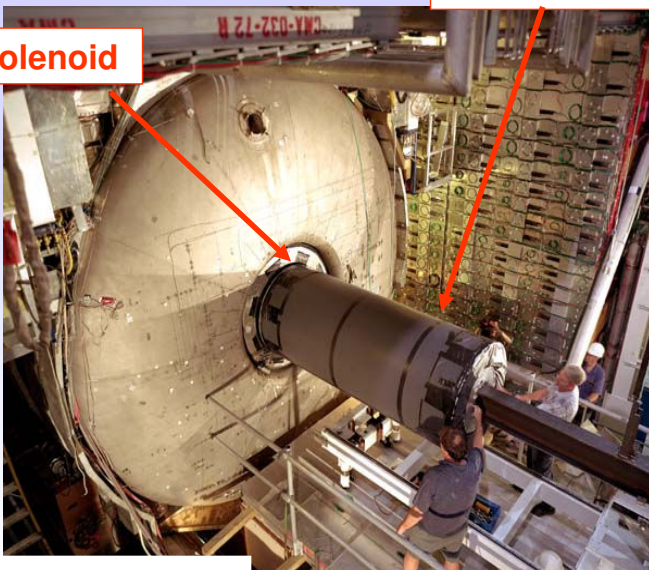
Tag der Offenen Tür, Universität Freiburg, Nov. 2004

DØ Experiment

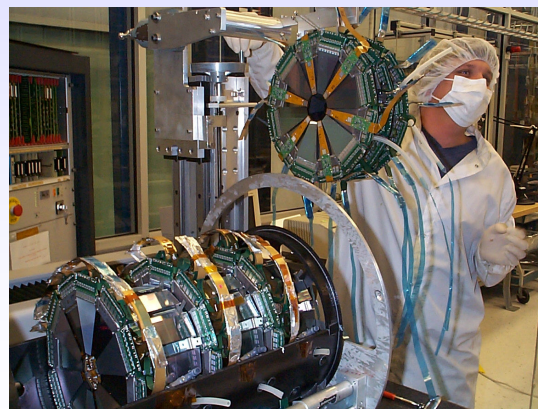


Solenoid

Fiber Tracker



Silicon Detector



K. Jakobs

Tag der Offenen Tür, Universität Freiburg, Nov. 2004

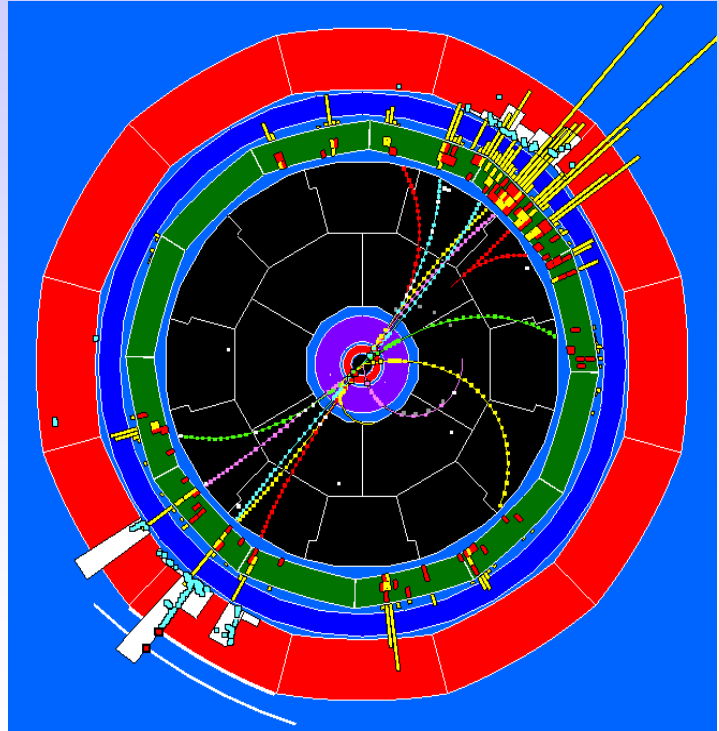
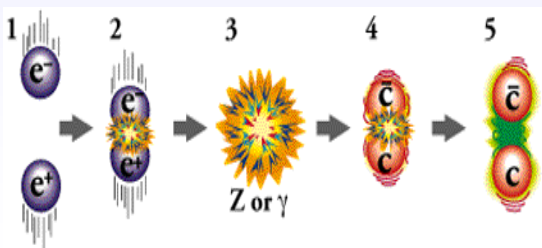
Aus Energie ist ein Quark-Antiquark-Paar entstanden

Zwei Teilchenbündel
(Jets) sind entstanden



Ursache ist die
„starke Wechselwirkung“
zwischen den Quarks

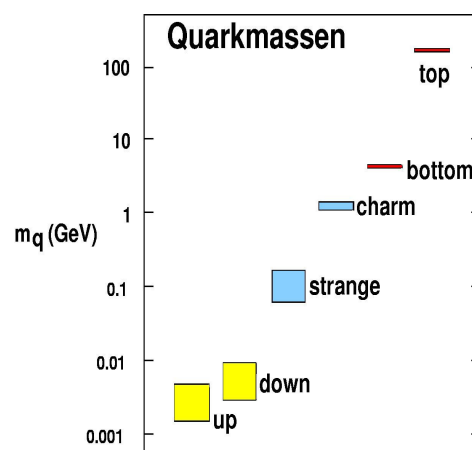
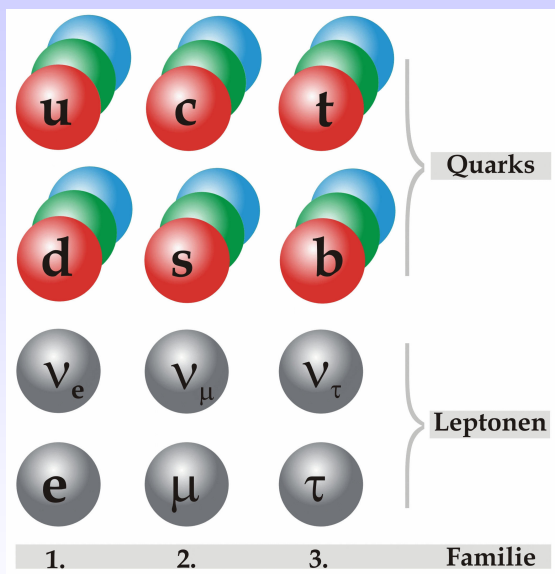
Quarks sind als „freie Teilchen“
nicht beobachtbar !!



K. Jakobs

Tag der Offenen Tür, Universität Freiburg, Nov. 2004

Die Bausteine der Materie: Quarks und Leptonen



$$m(e) = 0,000511 \text{ GeV}/c^2$$

$$m(\tau) = 1,8 \text{ GeV}/c^2$$

$$m(u) = 0,005 \text{ GeV}/c^2$$

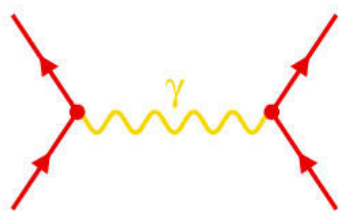
$$m(t) = 175 \text{ GeV}/c^2$$

Zum Vergleich: $m(p) = 0,938 \text{ GeV}/c^2$

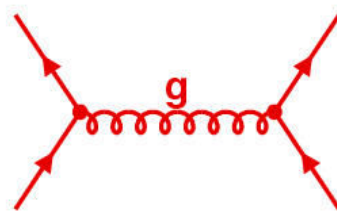
K. Jakobs

Tag der Offenen Tür, Universität Freiburg, Nov. 2004

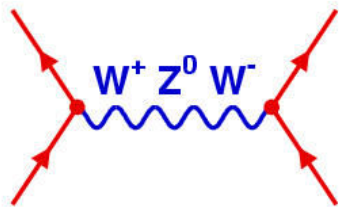
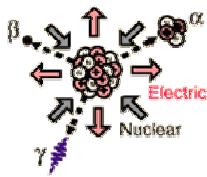
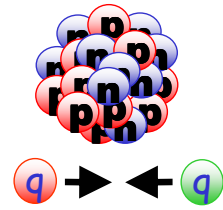
Kräfte und Austauschteilchen



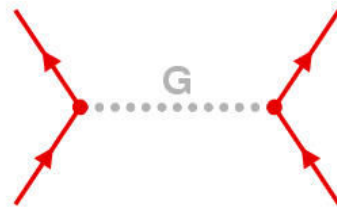
elektromagn. Kraft



starke Kraft



schwache Kraft



Gravitation

Schwächste 'Kraft',
im Mikrokosmos
unbedeutend



K. Jakobs

Tag der Offenen Tür, Universität Freiburg, Nov. 2004

Nobelpreis für Physik 2004



05. Oktober 2004:

Als „wichtige theoretische Entdeckung“ würdigte die Königlich-Schwedische Akademie in Stockholm am Dienstag die Arbeit der neu ernannten Preisträger. Gross, Politzer und Wilczek haben die besondere Eigenschaft der sogenannten „Starken Wechselwirkung“ entdeckt. Diese Kraft wirkt auf der Ebene des absolut Kleinsten, der Welt der Quarks, die sich innerhalb atomarer Kerne befindet. Sie bestimmt den Zusammenhalt dieser kleinsten uns bekannten Materieteilchen und bestimmt damit doch die Eigenschaften aller Dinge, die uns im Alltag umgeben. Denn alle Materie besteht letztlich aus kleinsten Teilchen. Die „Starke Wechselwirkung“ ist damit eine der vier fundamentalen Naturkräfte.

Beitrag zur Weltformel

Die Entdeckung der drei Forscher stammt aus dem Jahr 1973 und bildete die mathematische Grundlage für eine gänzliche neue Theorie, die ein wichtiger Zusatz zum physikalischen Standardmodell darstellt.

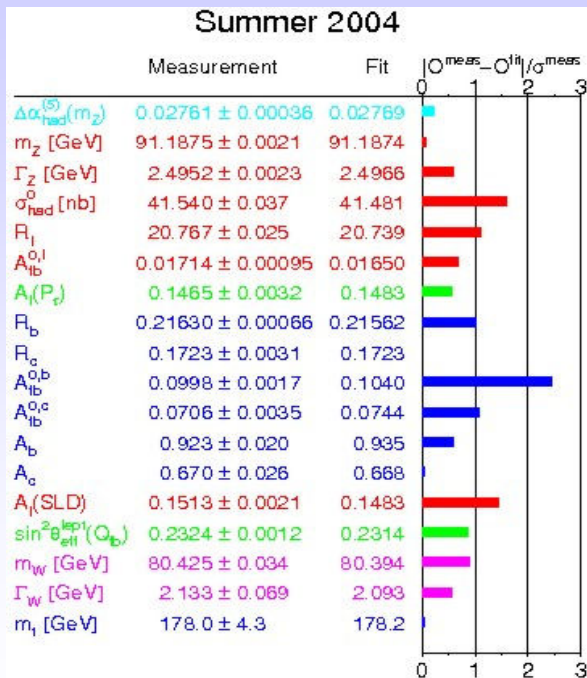
Damit hat sie unser Verständnis von der Welt vervollständigt, die neben der von den Preisträgern enträtselten Starken Wechselwirkung (zwischen kleinsten Teilchen, den Quarks) auch von der Schwachen Wechselwirkung und der elektromagnetischen Kraft zusammengehalten wird. „Dank der Entdeckung von David Gross, David Politzer und Frank Wilczek“ ist die Physik der Erfüllung ihres großen Traums einen Schritt näher gekommen: eine einheitliche Theorie zu formulieren - eine Weltformel!“, würdigt die Jury die herausragende Leistung des Forschertrios. An dieser „großen vereinheitlichten Theorie“, die die Wechselwirkungen aller Fundamentalkräfte miteinander erklären würde, beißen sich die klügsten Köpfe der Physik bisher die Zähne aus.

Die drei Wissenschaftler erhalten den Preis zu gleichen Teilen. Der 63jährige Gross arbeitet am Kavli Institut für theoretische Physik der Universität von Kalifornien in Santa Barbara. Politzer ist am California Institute of Technology aktiv, und der 53 Jahre alte Wilczek arbeitet am renommierten MIT, dem Massachusetts Institute of Technology in Cambridge vor den Toren Bostons.

K. Jakobs

Tag der Offenen Tür, Universität Freiburg, Nov. 2004

Überprüfung der Standardtheorie



Unterschiedlichste Messungen mit verschiedenen Beschleunigern und Experimenten bestätigen die Vorhersagen der Standardtheorie der Teilchenphysik sehr gut.

Die Standardtheorie ist ein bedeutender Erfolg für unser Verständnis der Natur.

K. Jakobs

Tag der Offenen Tür, Universität Freiburg, Nov. 2004

Die offenen Fragen

1. Masse: Was ist der Ursprung der Masse?

- Existiert das Higgs-Boson? Im Rahmen der Standardtheorie postuliert

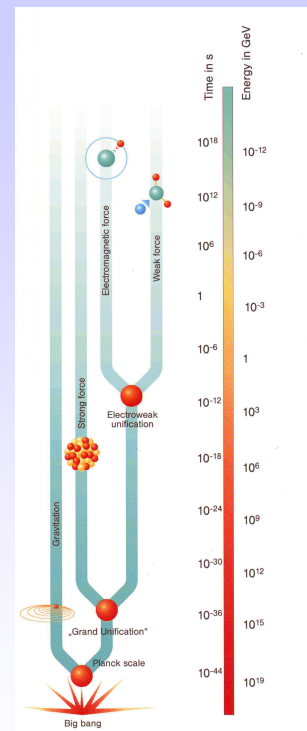
2. Vereinigung: Lassen sich die Wechselwirkungen vereinigen ?

- Gibt es eine Universalkraft als gemeinsame Urkraft der verschiedenen Wechselwirkungen?

Motivation: Gravitation ist nicht eingebunden,
zu viele freie Parameter im Standardmodell

3. Generationenproblem

- Warum gibt es drei Materiefamilien?
- Was ist der Ursprung der CP-Verletzung?
oder woher stammt die Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie ??



K. Jakobs

Tag der Offenen Tür, Universität Freiburg, Nov. 2004

Vereinheitlichte Theorien ?

**Wunschvorstellung: „Vereinheitlichte Theorie aller Wechselwirkungen“
„Theory of everything, Weltformel“**



**Musterbeispiel: J.C.Maxwell (1864)
Vereinigung von Elektrizität und Magnetismus**



1962-1973: Glashow, Salam und Weinberg

**Vereinigung der elektromagnetischen und der
schwachen Wechselwirkung**

⇒ **elektroschwache Wechselwirkung
(Vorhersage der W- und Z-Teilchen)**

Die heutige Weltformel

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & -\frac{1}{2} \text{Sp}(\mathbf{G}_{\lambda\rho} \mathbf{G}^{\lambda\rho}) - \frac{1}{2} \text{Sp}(\mathbf{W}_{\lambda\rho} \mathbf{W}^{\lambda\rho}) - \frac{1}{4} \mathbf{B}_{\lambda\rho} \mathbf{B}^{\lambda\rho} \\ & + \mathbf{W}_\lambda^+ \mathbf{W}^{-\lambda} m_W^2 \left(1 + \frac{\rho'}{\rho_0}\right)^2 + \frac{1}{2} \mathbf{Z}_\lambda \mathbf{Z}^\lambda m_Z^2 \left(1 + \frac{\rho'}{\rho_0}\right)^2 \\ & + \sum_{\ell} \left\{ \bar{\nu}_{\ell L} i \gamma^\lambda \partial_\lambda \nu_{\ell L} + \bar{\ell} \left[i \gamma^\lambda \partial_\lambda - m_\ell \left(1 + \frac{\rho'}{\rho_0}\right) \right] \ell \right\} \\ & + \sum_{\mathbf{q}} \bar{\mathbf{q}} \left[i \gamma^\lambda \left(\partial_\lambda + i g_s \mathbf{G}_\lambda^a \frac{\lambda_a}{2} \right) - m_{\mathbf{q}} \left(1 + \frac{\rho'}{\rho_0}\right) \right] \mathbf{q} \\ & + \mathcal{L}_{\text{Int}} + \frac{1}{2} \partial_\lambda \rho' \partial^\lambda \rho' - \frac{1}{2} m_{\rho'}^2 \rho'^2 \left[1 + \frac{\rho'}{\rho_0} + \frac{1}{4} \left(\frac{\rho'}{\rho_0} \right)^2 \right]. \end{aligned}$$

**Elektroschwache
Wechselwirkung**

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{\text{QCD}}(x) = & -\frac{1}{2} \text{Sp}(\mathbf{G}_{\lambda\rho}(x) \mathbf{G}^{\lambda\rho}(x)) + \sum_{j=1}^f \bar{\mathbf{q}}^j(x) (i \gamma^\lambda \mathbf{D}_\lambda - m_j) \mathbf{q}^j(x) \\ = & -\frac{1}{4} G_{\lambda\rho}^a(x) G^{\lambda\rho a}(x) \\ & + \sum_{j=1}^f \bar{\mathbf{q}}^j(x) \left[i \gamma^\lambda \left(\partial_\lambda + i g_s G_\lambda^a(x) \frac{\lambda_a}{2} \right) - m_j \right] \mathbf{q}^j(x). \end{aligned}$$

Starke Wechselwirkung

Die offenen Fragen

1. Masse: Was ist der Ursprung der Masse?

- Existiert das Higgs-Boson? Im Rahmen der Standardtheorie postuliert

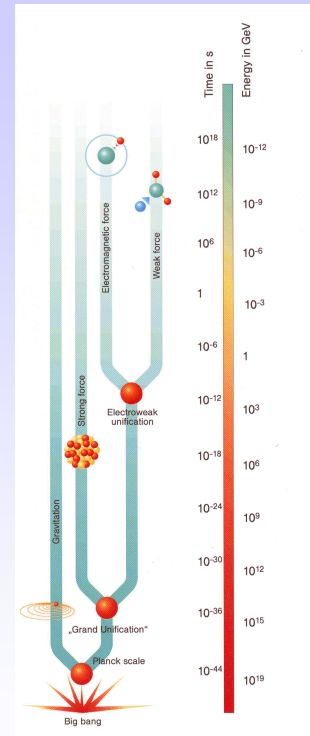
2. Vereinigung: Lassen sich die Wechselwirkungen vereinigen?

- Gibt es eine Universalkraft als gemeinsame Urkraft der verschiedenen Wechselwirkungen?

Motivation: Gravitation ist nicht eingebunden,
zu viele freie Parameter im Standardmodell

3. Generationenproblem

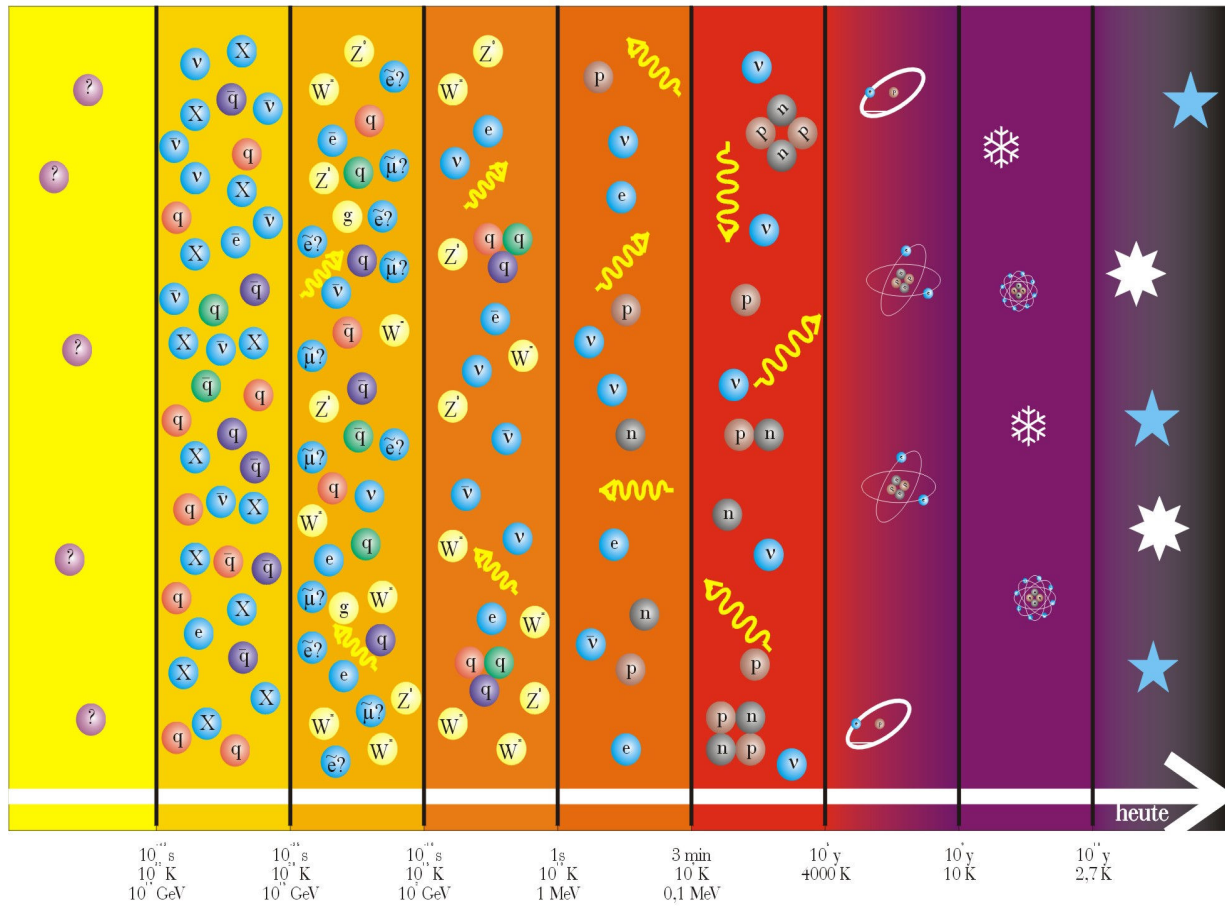
- Warum gibt es drei Materiefamilien?
- Was ist der Ursprung der CP-Verletzung?
oder woher stammt die Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie ??



K. Jakobs

Tag der Offenen Tür, Universität Freiburg, Nov. 2004

Die Geschichte des Universums



Die offenen Fragen

1. Masse: Was ist der Ursprung der Masse?

- Existiert das Higgs-Boson? Im Rahmen der Standardtheorie postuliert

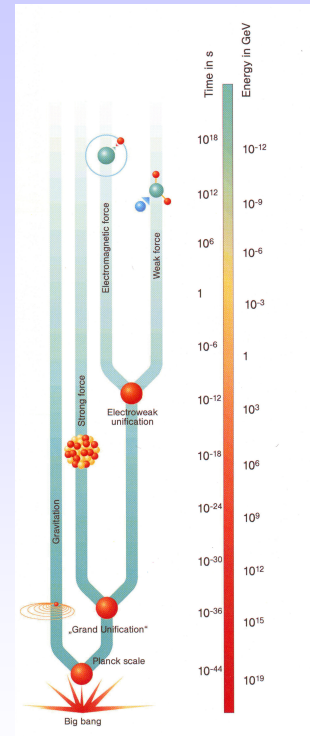
2. Vereinigung: Lassen sich die Wechselwirkungen vereinigen ?

- Gibt es eine Universalkraft als gemeinsame Urkraft der verschiedenen Wechselwirkungen?

Motivation: Gravitation ist nicht eingebunden,
zu viele freie Parameter im Standardmodell

3. Generationenproblem

- Warum gibt es drei Materiefamilien?
- Was ist der Ursprung der CP-Verletzung?
oder woher stammt die Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie ??



Antworten auf einige dieser Fragen werden auf der Energieskala bis 1 TeV erwartet !

K. Jakobs

Tag der Offenen Tür, Universität Freiburg, Nov. 2004

Neue Experimente

Am CERN in Genf wird z.Zt. ein neuer Beschleuniger gebaut

Large Hadron Collider (LHC)
(Proton-Proton Kollisionen bei hoher Energie (14 TeV))

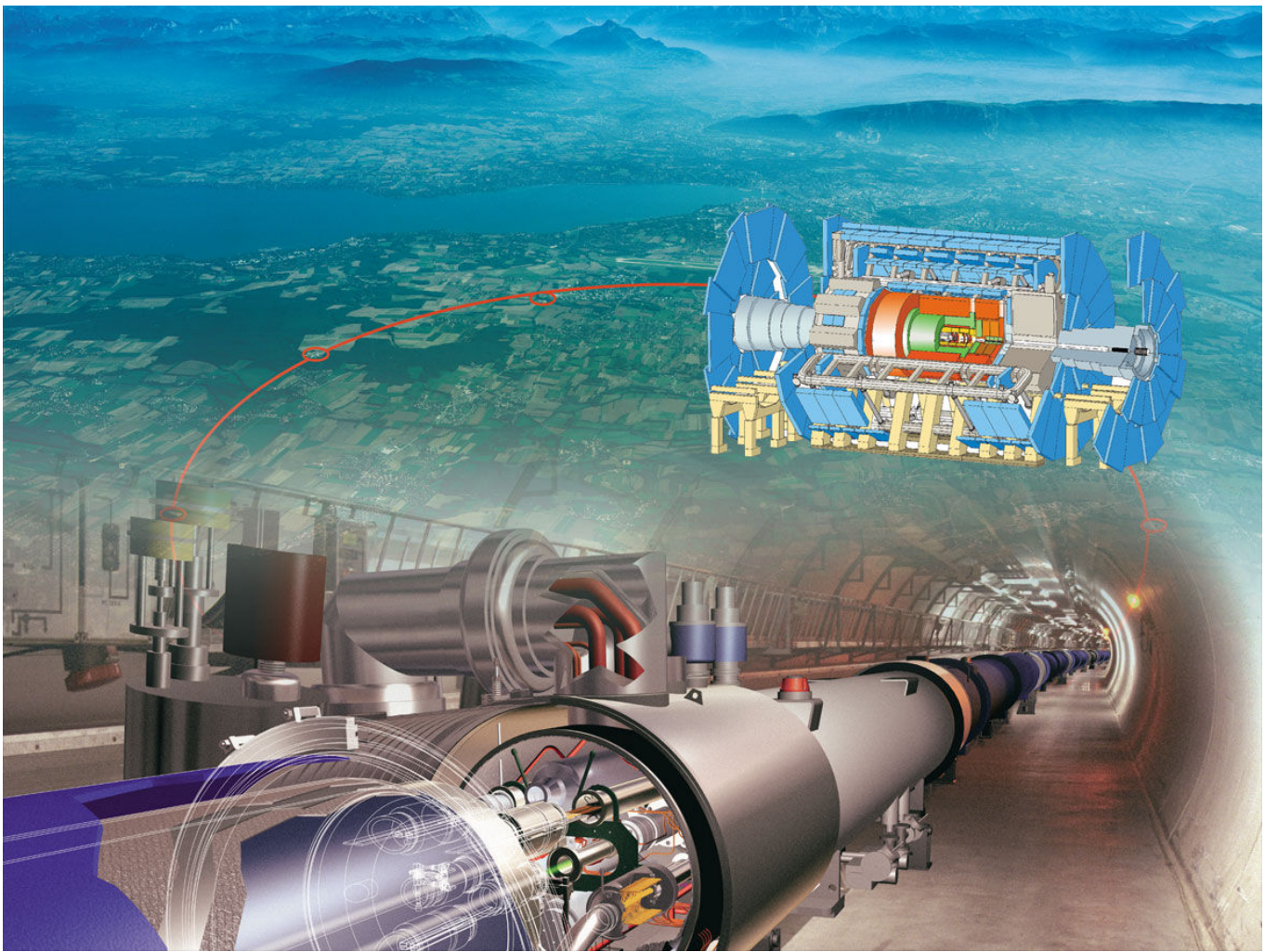
Betriebsbeginn: 2007

Wichtige Fragestellungen: Existenz des Higgs Teilchens
Existenz der supersymmetrischen Welt

⇒ **Teilchenphysik ist und bleibt ein
faszinierendes Forschungsgebiet
der modernen Physik**

K. Jakobs

Tag der Offenen Tür, Universität Freiburg, Nov. 2004



**heute: Systematische Untersuchungen
in Beschleunigerlabors**



Elementarteilchen- oder Hochenergiephysik

1. Hohe Teilchenimpulse (Energien) sind notwendig, um das Innere des Atomkerns und kleinere Strukturen untersuchen zu können

die räumliche Auflösung wird
bei hohen Impulsen besser

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

2. Hohe Energien sind notwendig, um neue, schwere Teilchen zu produzieren

Eigenschaften der Quarks

Teilchen	Ladung	Masse
up down	+2/3 -1/3	5 MeV/c² 8 MeV/c²
charm strange	+2/3 -1/3	1300 MeV/c² 170 MeV/c²
top bottom	+2/3 -1/3	175000 MeV/c² 4200 MeV/c²

Quarks tragen **elektrische Ladung**, **schwache Ladung** und **Farbladung**
(es gibt „**rote**, **grüne** oder **blaue** Quarks“)
(unterliegen der el.magn., schwachen und starken Wechselwirkung)