

ELEKTROMAGNETISMUS RELATIVITÄT **und** QUANTEN

Der Weg zur modernen Physik

J. H. KÜHN

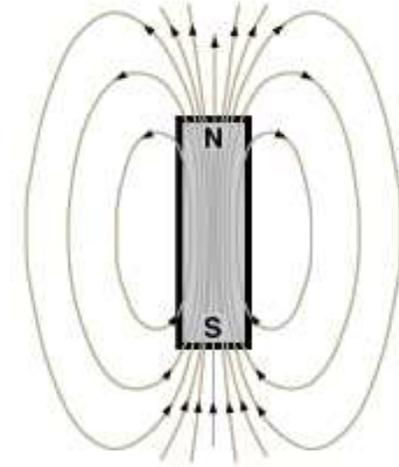
Elektrizität



ηλεκτρον
elektron

Bernstein ist „elektrisch“

Magnetismus



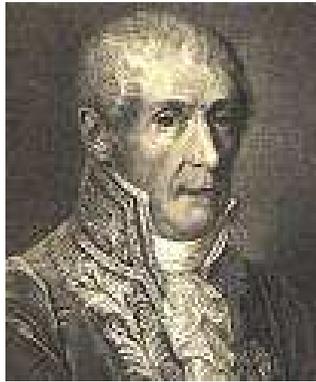
λιθος μαγνης
lithos magnes

Stein aus Magnesia

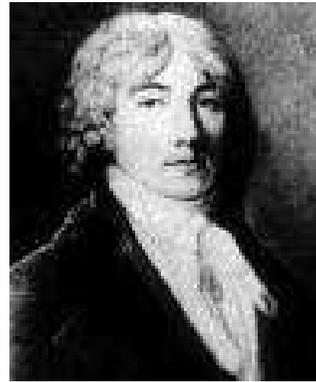
Heldengalerie des 18. & 19. Jahrhunderts



Coulomb
(*1736, †1806)



Volta
(*1745, †1827)



Biot
(*1774, †1862)



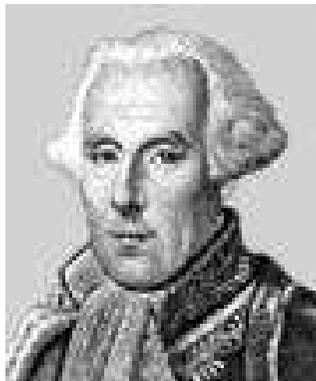
Ampère
(*1775, †1836)



Gauß
(*1777, †1855)



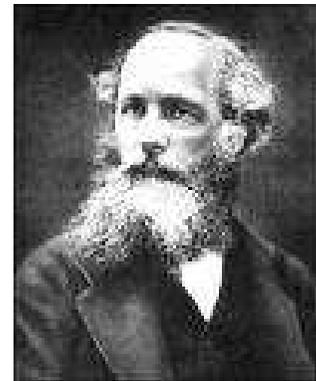
Ohm
(*1789, †1854)



Savart
(*1791, †1841)



Faraday
(*1791, †1867)



Maxwell
(*1831, †1879)

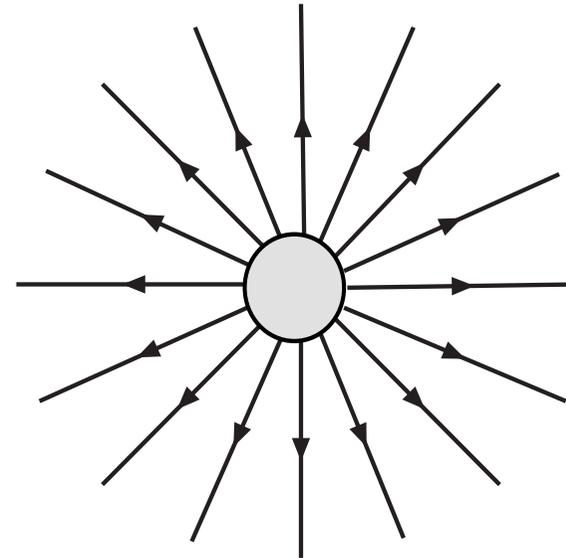


Heinrich Hertz
(*1857, †1894)

Die fundamentalen Gesetze

Ladung ist Quelle des elektrischen Feldes

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{1}{\epsilon_0} \rho$$



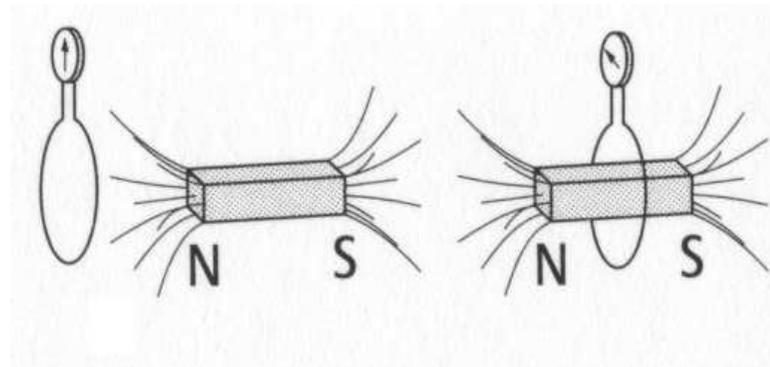
es gibt keine Quellen des Magnetfeldes (nur geschlossene Feldlinien)

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$

Änderung des magnetischen Flusses führt zu einer Ringspannung (Faraday)

$$\text{rot } \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0$$

Wirbel im elektrischen Feld

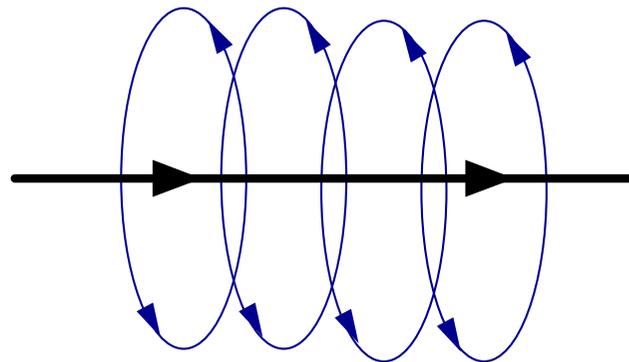


Anwendung: Starkstromtechnik, Generator, Transformator

ein elektrischer Strom ruft ein Magnetfeld hervor (Ampère)

$$\text{rot } \vec{B} = \mu_0 \vec{J}$$

Wirbel im magnetischen Feld



Anwendung: Elektromagnet, ...

zusammen:

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{1}{\epsilon_0} \rho$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0$$

$$\operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \vec{J}$$

} Quellen des elektrischen
und magnetischen Feldes

} Wirbel des elektrischen
und magnetischen Feldes

zusammen:

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{1}{\epsilon_0} \rho$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$

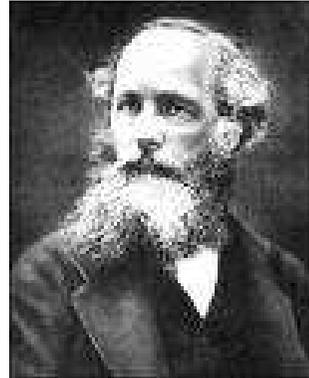
$$\operatorname{rot} \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0$$

$$\operatorname{rot} \vec{B} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \mu_0 \vec{J}$$

} Quellen des elektrischen
und magnetischen Feldes

} Wirbel des elektrischen
und magnetischen Feldes

Maxwell:

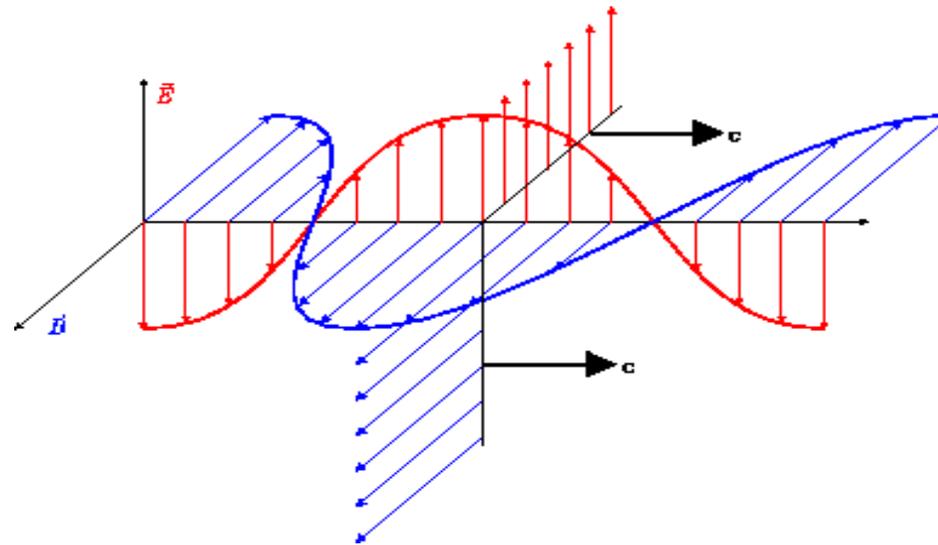


Änderung des elektrischen Feldes führt zu Wirbeln im magnetischen Feld

empirisch $\mu_0 \epsilon_0 = 1/c^2$, $c =$ Lichtgeschwindigkeit

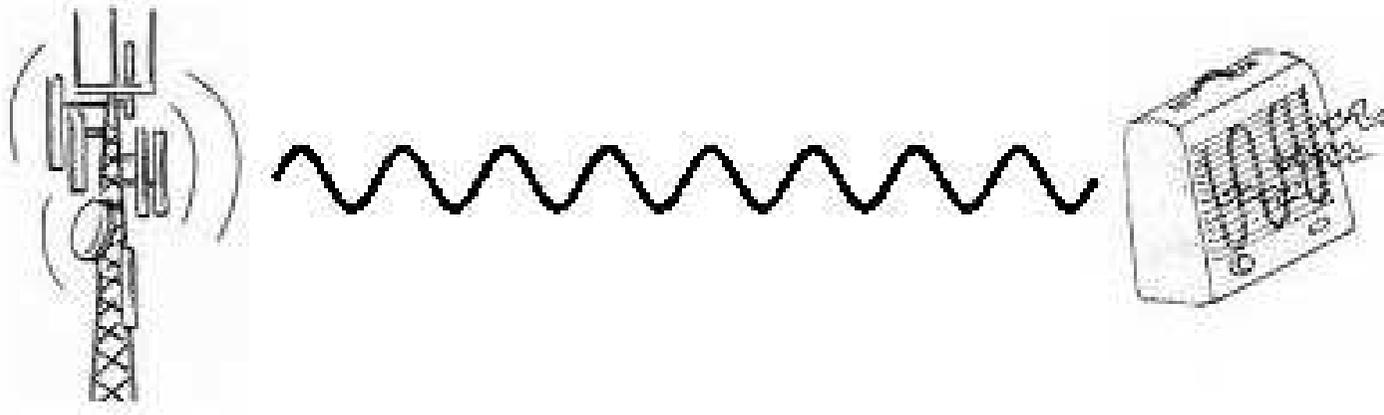
Änderung im elektrischen Feld \implies Änderung im magnetischen Feld \implies Änderung im elektrischen Feld $\implies \dots$

\implies **Welle**; Ausbreitung mit Lichtgeschwindigkeit



Licht \equiv elektromagnetische Welle

Heinrich Hertz:



Sender:
Ladungen + Ströme

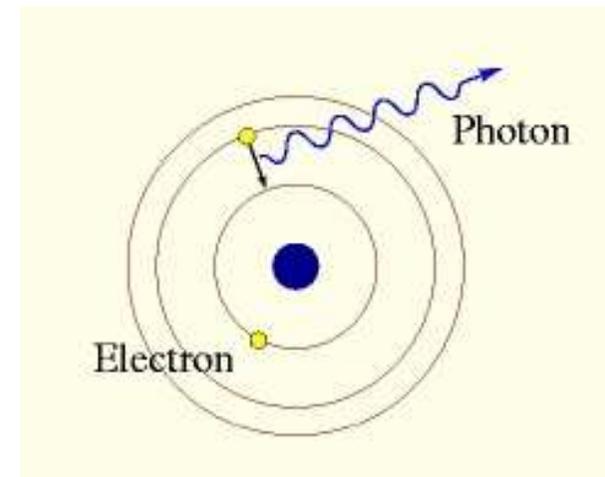
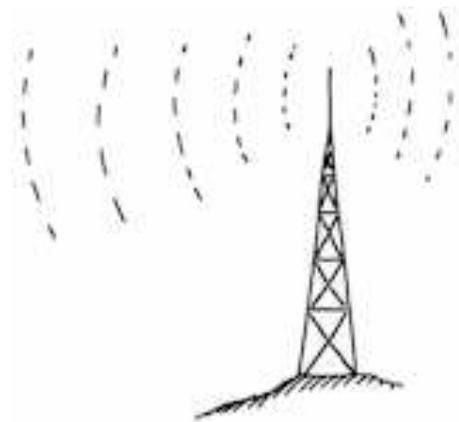
Empfänger:
Ladungen + Ströme

Strategie:

mathematische Konsistenz, Eleganz und Symmetrie

Experiment

Gültigkeit über weite Bereiche



NEUE KONZEPTE



weit entfernt von der Anschauung !



tiefere Einsichten !
experimentell verifizierbar !

Relativität

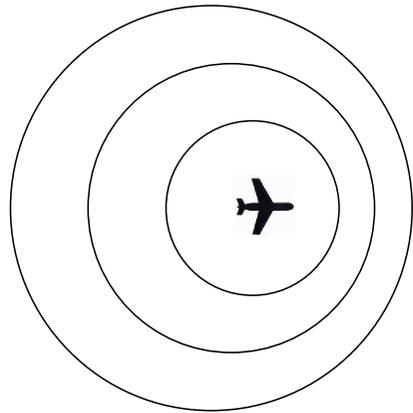
Quanten

Elementarteilchenphysik heute

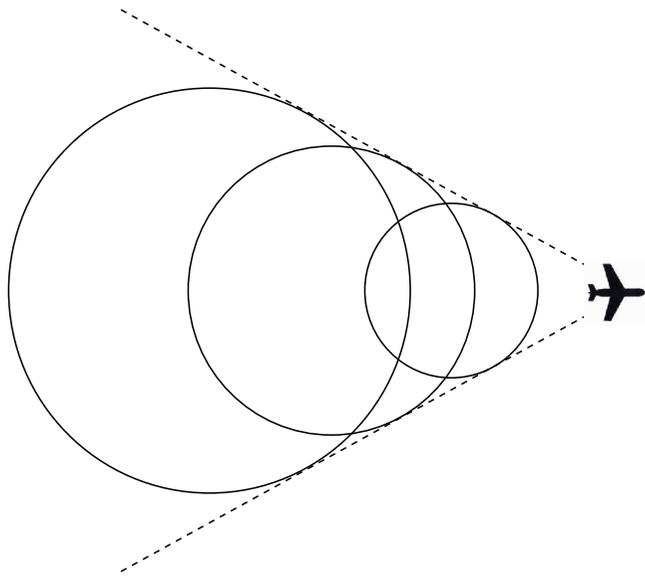
Offene Fragen

Relativitätstheorie

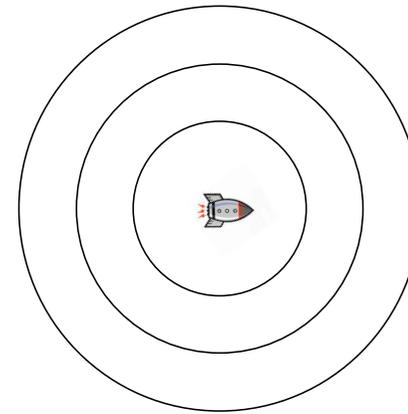
Maxwell-Gleichungen \implies Ausbreitung von Licht gleich in jedem Bezugssystem



$$v = v_{Schall} / 2$$



$$v = 2 v_{Schall}$$

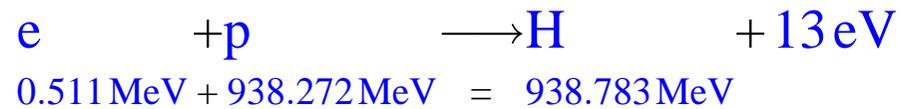


elektromagnetische Welle

Spezielle Relativitätstheorie (Einstein 1905)

$$E = mc^2$$

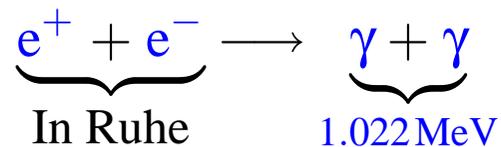
Massendefekt:



$$E_{\text{Bind}}/mc^2 \approx 1/100\,000\,000$$



$$E_{\text{Bind}}/mc^2 \approx 1\%$$



$$\text{Massendefekt} = 100\%$$

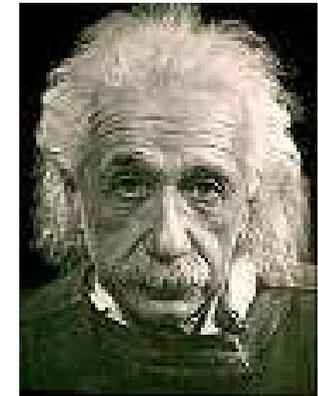
Allgemeine Relativitätstheorie (Einstein 1913)

$$R_{\mu\nu} - \frac{R}{2} g_{\mu\nu} = -\frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

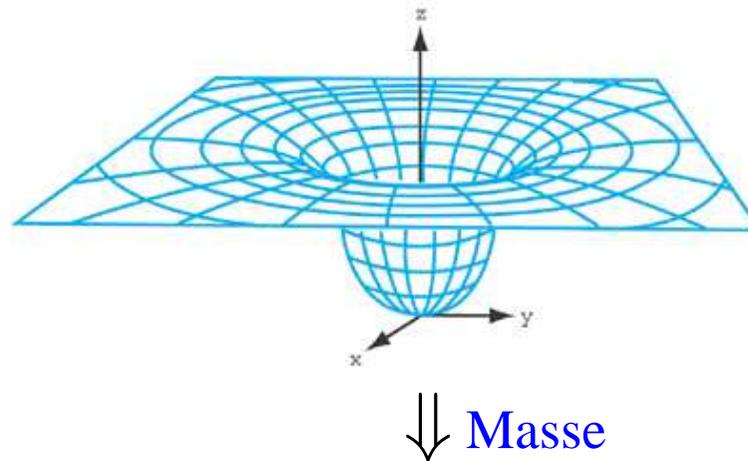
Krümmung des Raumes

Natur-
konstanten

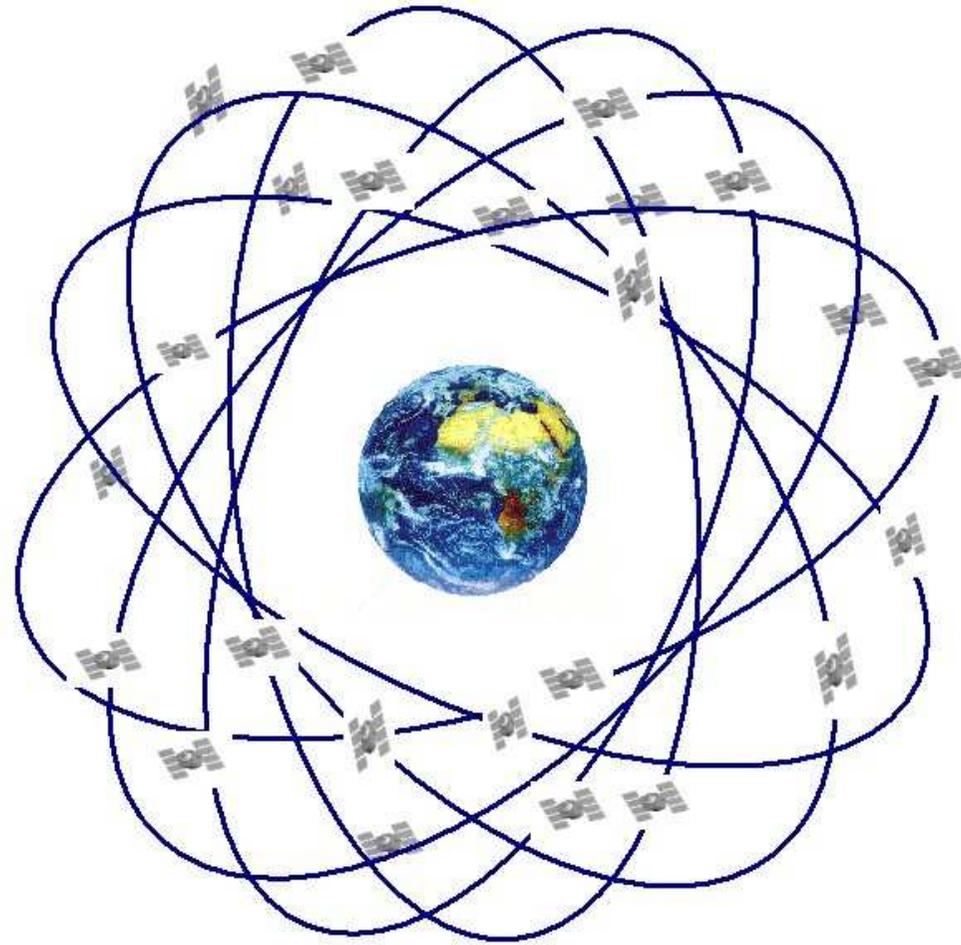
Materie
(Dichte, Druck,...)

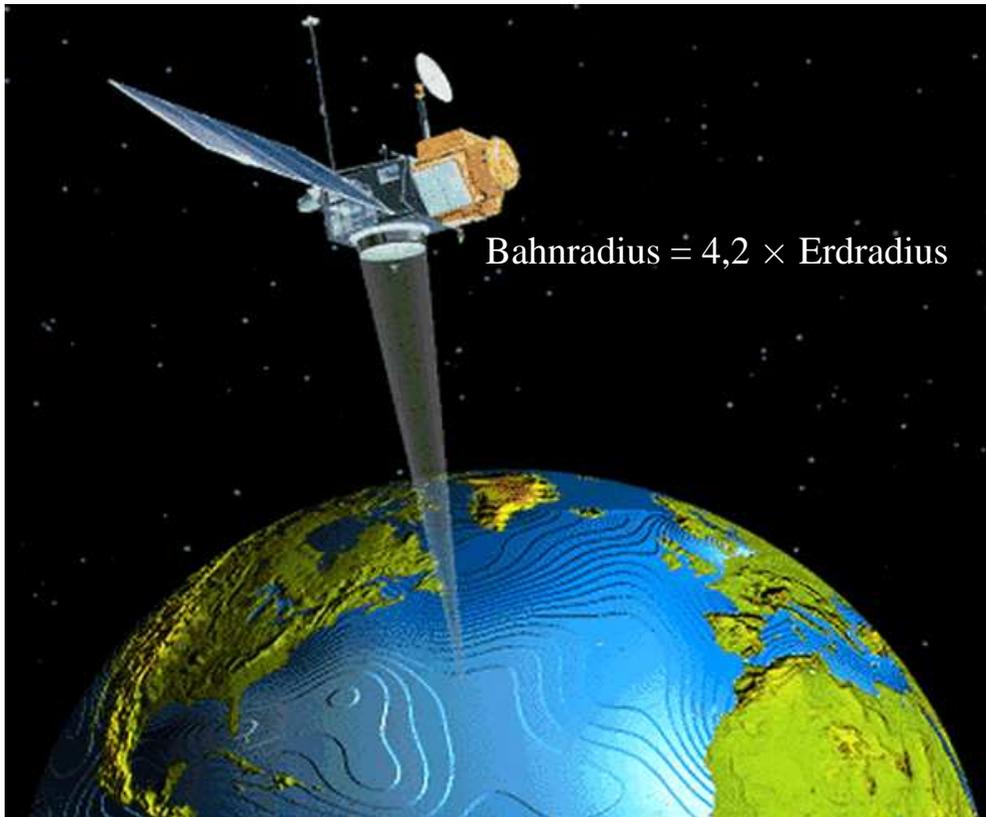


Einstein



GPS und Relativitätstheorie





Geschwindigkeit = $3,8 \text{ km/s}$

\Rightarrow Zeitdilatation

(Spezielle Relativitätstheorie)

$-7 \mu\text{s/Tag}$

Blauverschiebung im Gravitationsfeld

(Allgemeine Relativitätstheorie)

$+45 \mu\text{s/Tag}$

$1 \mu\text{s} \hat{=} 300\text{m}$

Quanten

Strahlungsformel (1900)

Energie der Oszillatoren „gequantelt“

$$E = h\nu = \hbar\omega$$

ν : Frequenz

ω : Kreisfrequenz

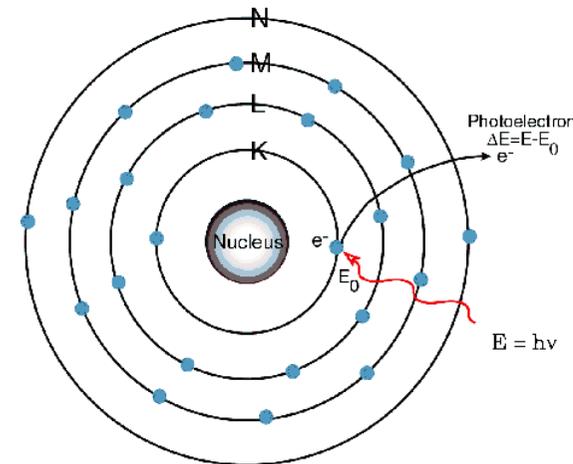


Planck

Photoelektrischer Effekt (1905) Einstein

„Photon“ bei Stoß wie Teilchen

aber Ausbreitung wie Welle



Quantisierungsbedingung (1913)

nur diskrete Energieniveaus

$$E_n = -\frac{E_0}{n^2}; \quad E_0 = 13.6 \text{ eV}$$

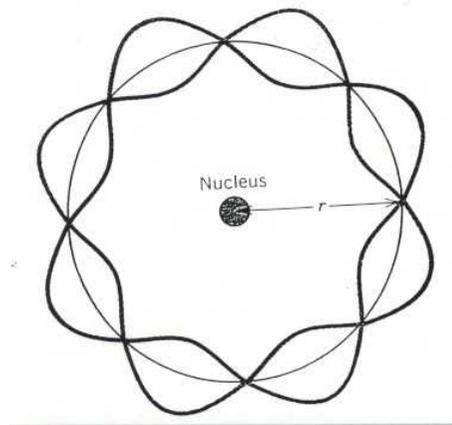
Photonen: $E_\gamma = E_n - E_m$

nur diskrete Energien

Atome sind stabil; Spektren immer gleich

Elektronen breiten sich aus wie Wellen (1924)

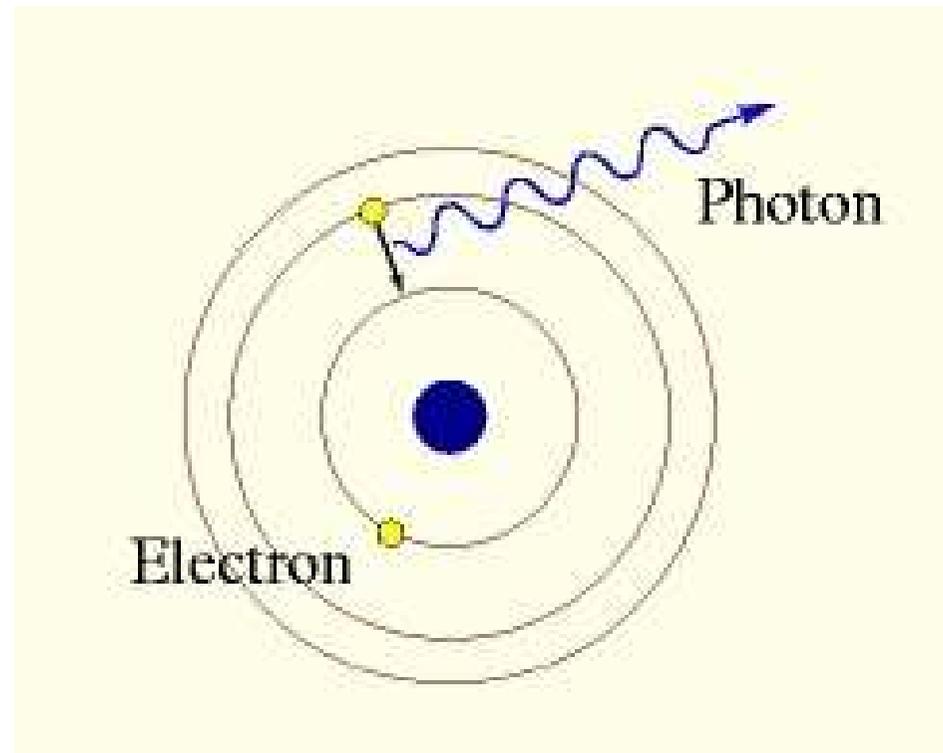
(Teilchen \Leftrightarrow Welle)



Bohr



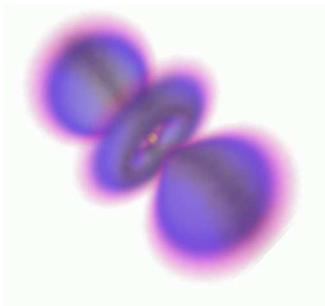
de Broglie



Maxwell: Elektronen auf Kreisbahnen können nicht stabil sein (Strahlung!)

Schrödingergleichung (1925-1927)

Energieniveaus $\hat{=}$ Schwingungszustände



Schrödinger



Heisenberg

Heisenbergsche Unschärferelation (1927)

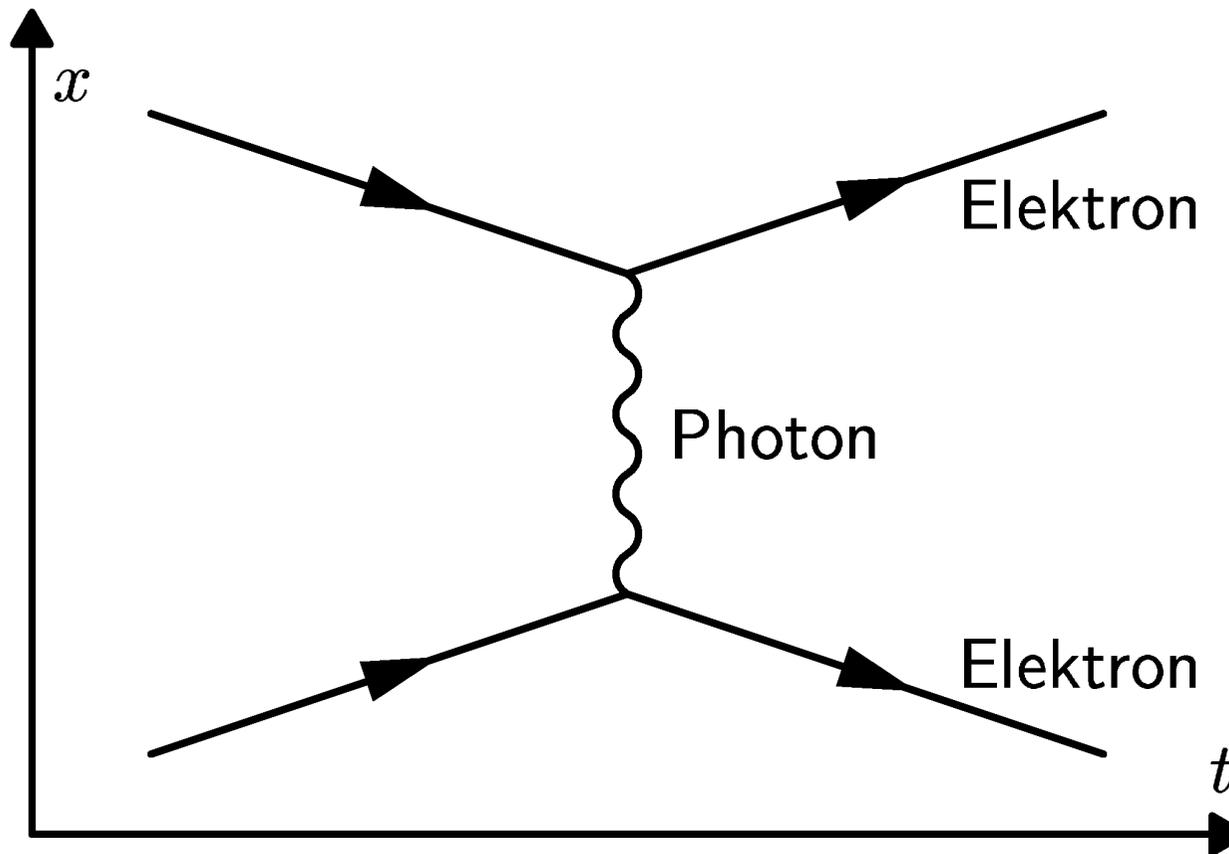
$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

gute Ortsauflösung $\hat{=}$ kleines $\Delta x \hat{=}$ kleine Wellenlänge $\hat{=}$ großer Impuls

gute Zeitauflösung (Δt) $\hat{=}$ große Frequenz $\hat{=}$ hohe Energie

1930 – Heute
Elementarteilchenphysik

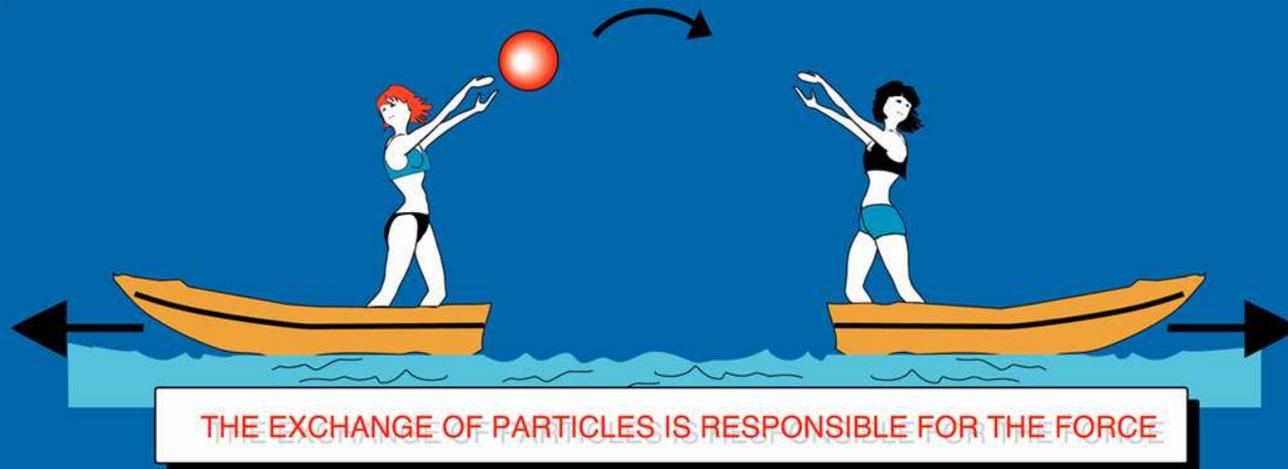
Quanten-Elektrodynamik



Streuprozess: $e^- + e^- \rightarrow e^- + e^-$
Austausch eines „virtuellen“ Photons

The forces in Nature

TYPE	INTENSITY OF FORCES (DECREASING ORDER)	BINDING PARTICLE (FIELD QUANTUM)	OCCURS IN :
STRONG NUCLEAR FORCE	~ 1	GLUONS (NO MASS)	ATOMIC NUCLEUS
ELECTRO -MAGNETIC FORCE	$\sim 10^{-3}$	PHOTONS (NO MASS)	ATOMIC SHELL ELECTROTECHNIQUE
WEAK NUCLEAR FORCE	$\sim 10^{-5}$	BOSONS Z^0, W^+, W^- (HEAVY)	RADIOACTIVE BETA DESINTEGRATION
GRAVITATION	$\sim 10^{-38}$	GRAVITONS (?)	HEAVENLY BODIES

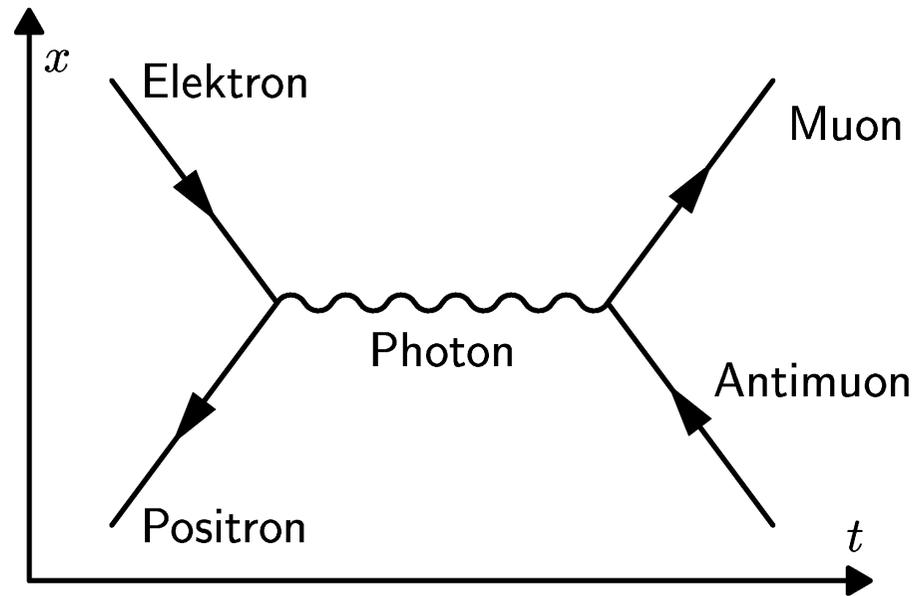


$$E = \pm \sqrt{(mc^2)^2 + p^2 c^2} = \pm mc^2 \text{ (für } p = 0)$$

Dirac: Positron !

Teilchen \Leftrightarrow Antiteilchen (gleiche Masse)

Beliebige Teilchen und Antiteilchen können im Labor erzeugt werden, wenn die Energie groß genug ist.



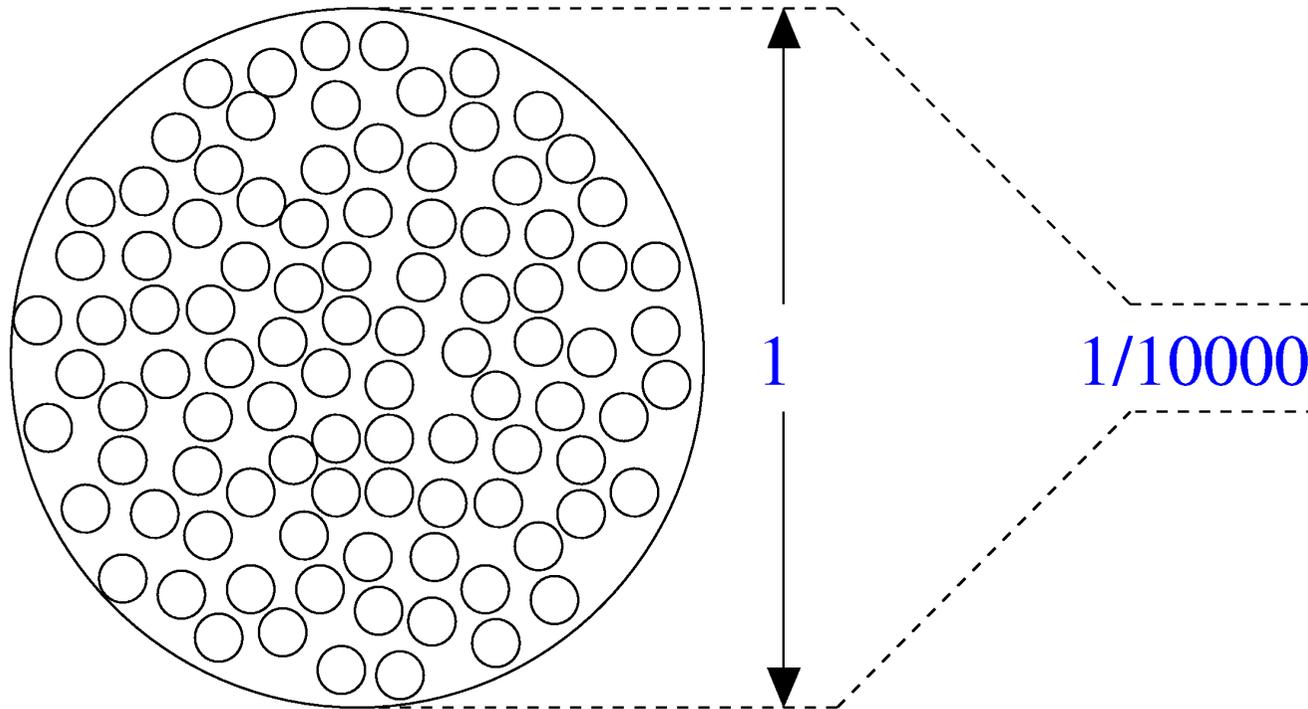
$e^+ e^- \longrightarrow$ „virtuelles“ Photon $\longrightarrow \mu^+ \mu^-$
reine Feldenergie

Muon = schwerer Partner des Elektrons, $m_\mu \approx 200 m_e$

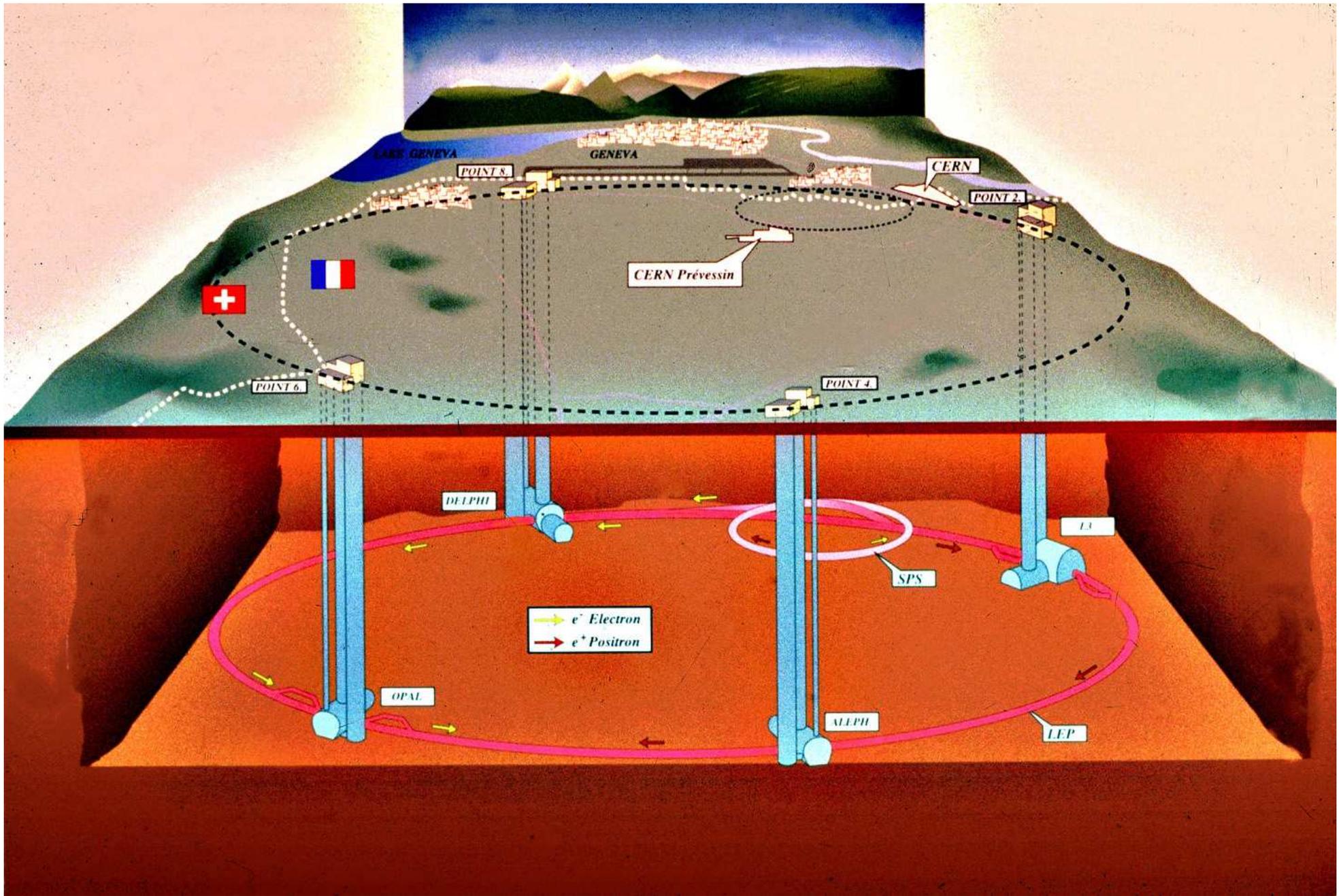
LEP: Large Electron Positron Collider: $E \approx 200 \text{ GeV}$

(Elektronen durchlaufen Potentialdifferenzen von $2 \times 100\,000\,000\,000$ Volt)

Energie-Äquivalent eines Bleikerns



reine Feld-Energie, konzentriert in 10^{-3} fm

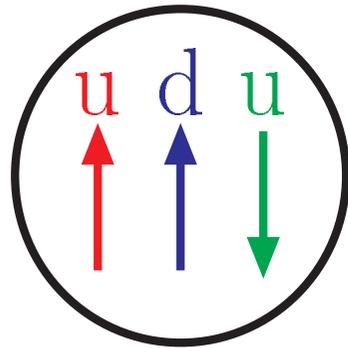




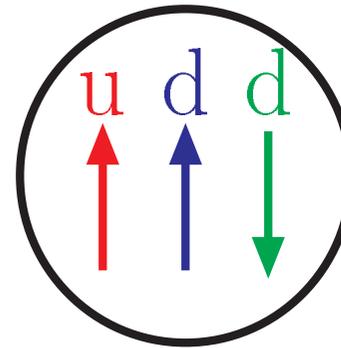
Fundamentale Bausteine der Materie

Leptonen (Elektron, Muon, Tau; Neutrinos)

Quarks

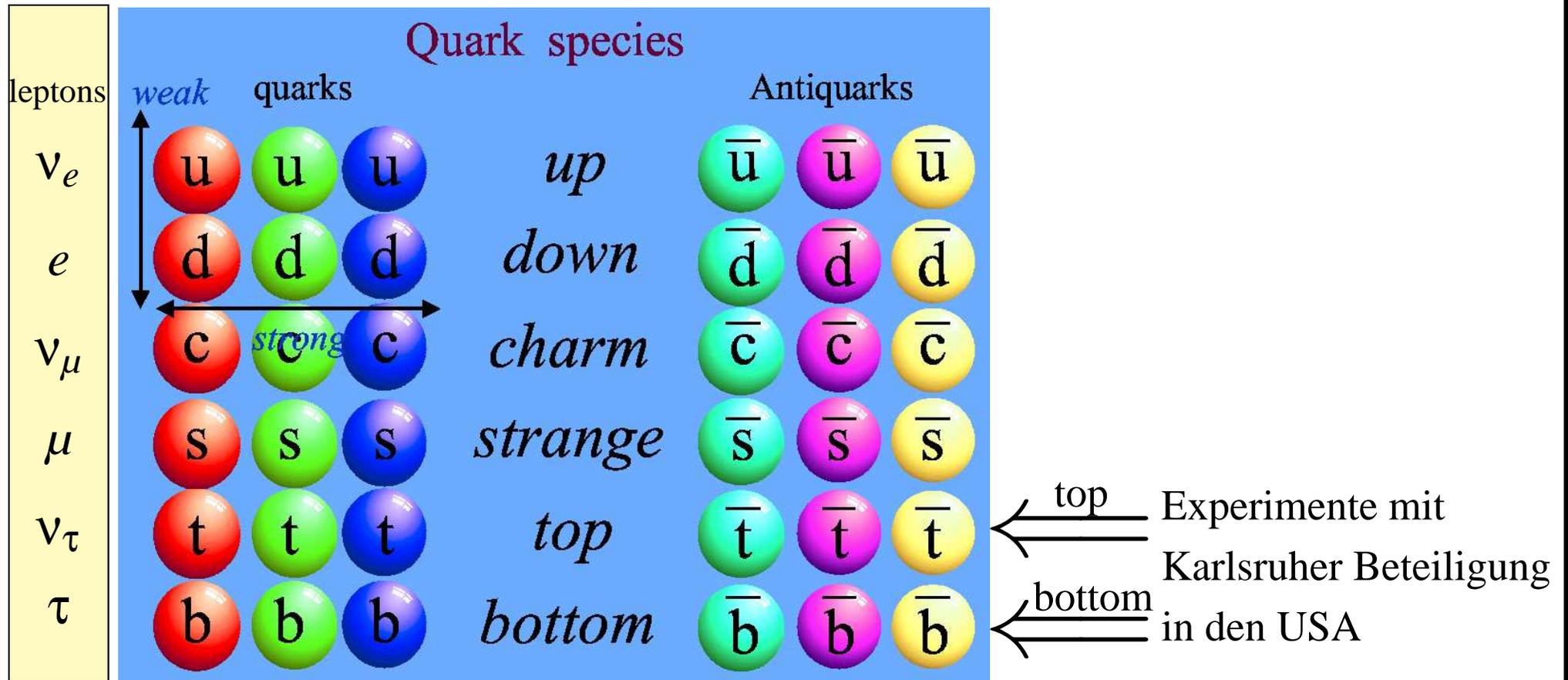


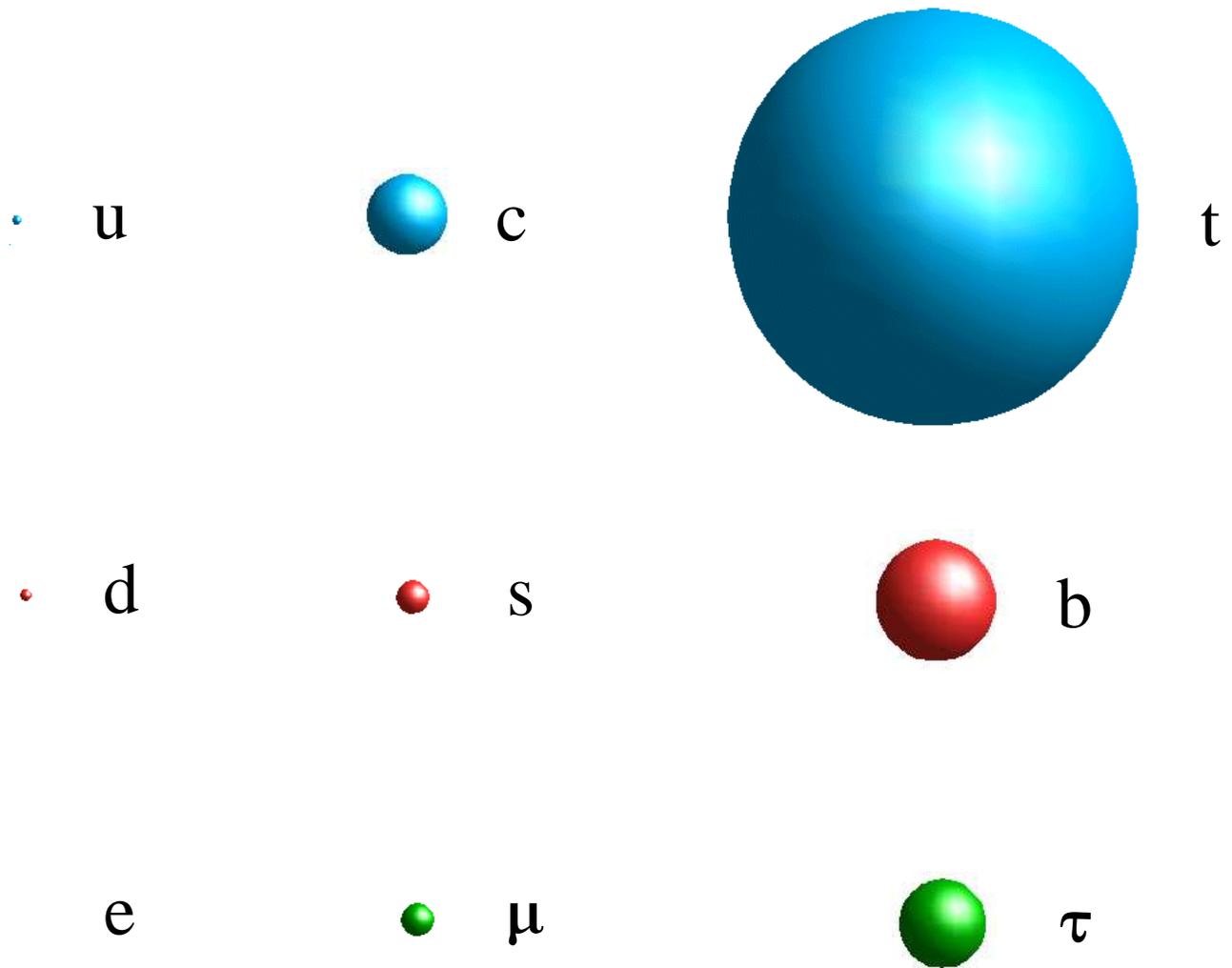
: Proton



: Neutron

Periodensystem der Teilchenphysik





Einheitliche Theorie der Wechselwirkung

Kräfte \implies Austausch von Photonen, (W^\pm -, Z - Bosonen), Gluonen

gleiches Konzept für

elektromagnetische

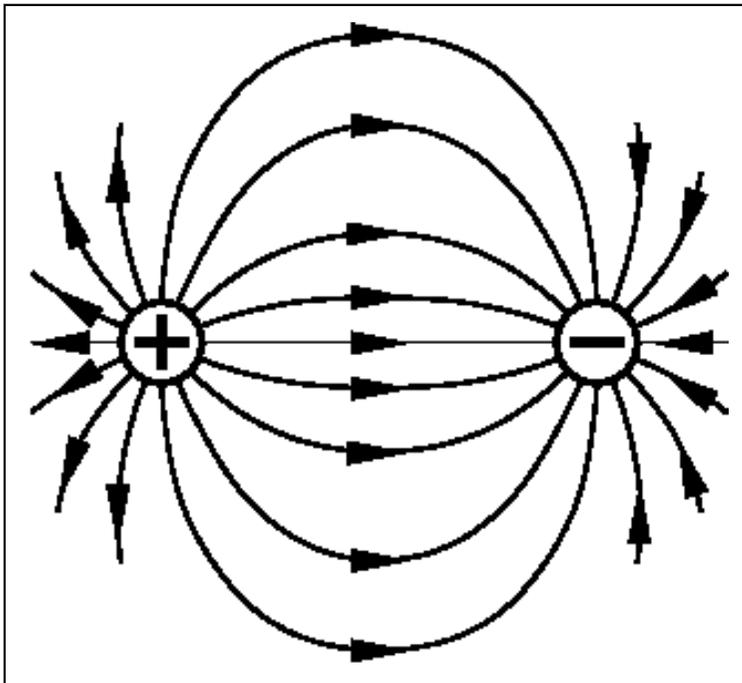
schwache

starke

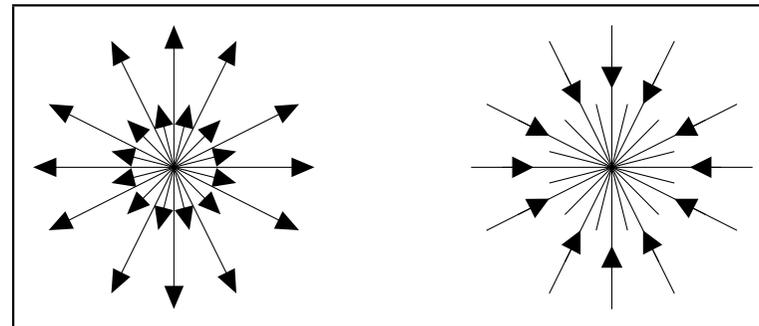
} Wechselwirkung

Das Photon hat 11 „Geschwister“ bekommen

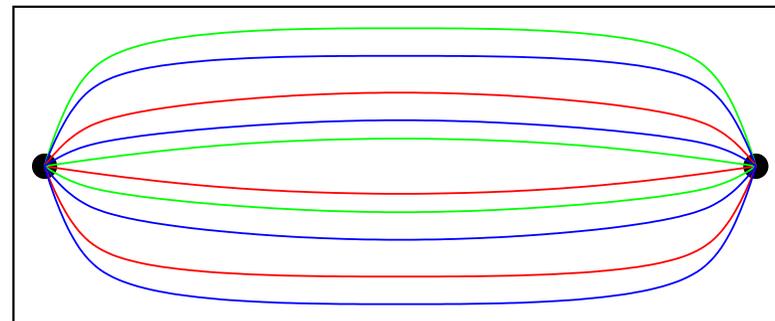
Feldkonfigurationen



elektromagnetische WW



schwache
WW



starke
WW

Zusammenfassung

QUANTENMECHANIK + RELATIVITÄTSTHEORIE + SYMMETRIE



KONSISTENTE THEORIE

der elektromagnetischen, schwachen und starken Wechselwirkung

offene Fragen

Quarks und Leptonen in einem Multiplett ?

(Große Vereinheitlichte Theorie, GUT, nur eine Art der Wechselwirkung)

⇒ Übergänge zwischen Quarks und Leptonen

⇒ Proton-Zerfall:



(weniger als 1 aus 10^{33} Protonen ($\hat{=}$ 1000 Tonnen) pro Jahr)

Mechanismus der Massenerzeugung „Higgs“



Mechanismus der Massenerzeugung „Higgs“



dunkle Materie

Rotation Curves of Spiral Galaxies



NGC 253

(David Malin, AAO)

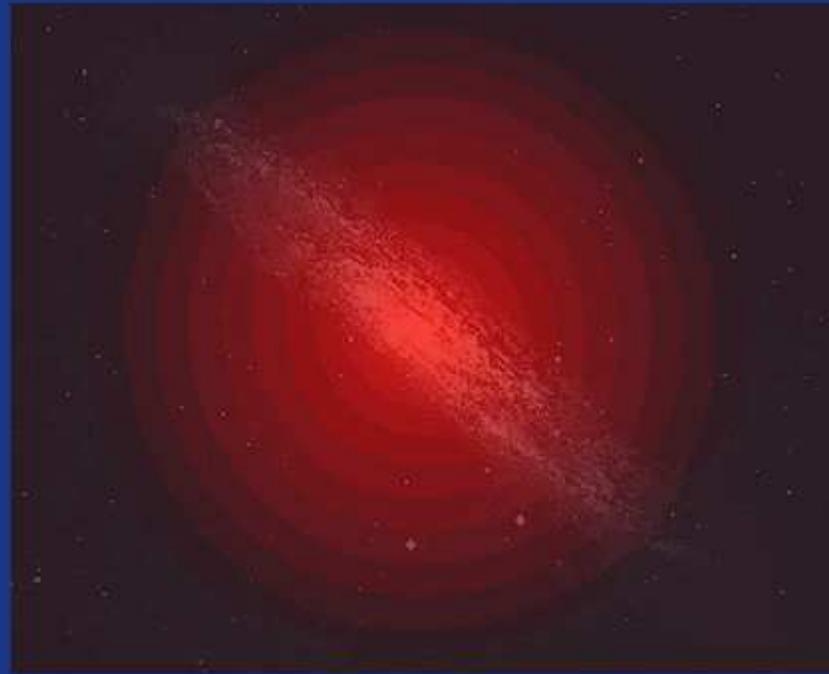
Spiral galaxies like our own Milky Way are rotating.

The rate of rotation can be measured, and used to determine the *mass* of the galaxy.

The stars in a typical galaxy comprise at most 10% of its mass!

dunkle Materie

With our Dark Matter glasses on:



⇒ neue hypothetische Teilchen, vorhergesagt in **Supersymmetrischen Theorien**

Nuclear Physics B70 (1974) 39-50. North-Holland Publishing Company

Volume 49B, number 1

PHYSICS LETTERS

18 March 1974

SUPERGAUGE TRANSFORMATIONS IN FOUR DIMENSIONS

J. WESS
Karlsruhe University

B. ZUMINO
CERN, Geneva

Received 5 October 1973

Abstract: Supergauge transformations are defined in four space-time dimensions. Their commutators are shown to generate γ_5 transformations and conformal transformations. Various kinds of multiplets are described and examples of their combinations to new representations are given. The relevance of supergauge transformations for Lagrangian field theory is explained. Finally, the abstract group theoretic structure is discussed.

1300 Zitate

**A LAGRANGIAN MODEL INVARIANT UNDER
SUPERGAUGE TRANSFORMATIONS**

J. WESS
Karlsruhe University, Germany

and

B. ZUMINO
CERN, Geneva, Switzerland

Received 4 January 1974

We study, in the one-loop approximation, a Lagrangian model invariant under supergauge transformations. The model involves a scalar, a pseudoscalar and a spinor field. Supergauge invariance gives rise to relations among the masses and the coupling of these fields and implies the existence of a conserved current. The renormalization procedure is discussed and the relations among masses and couplings are shown to be preserved by renormalization.

700 Zitate

There are difficulties; there are certainly difficulties

Have you any alternative theory which will meet the facts?

Sherlock Homes: The Sign of Four – A.C. Doyle



Experiment

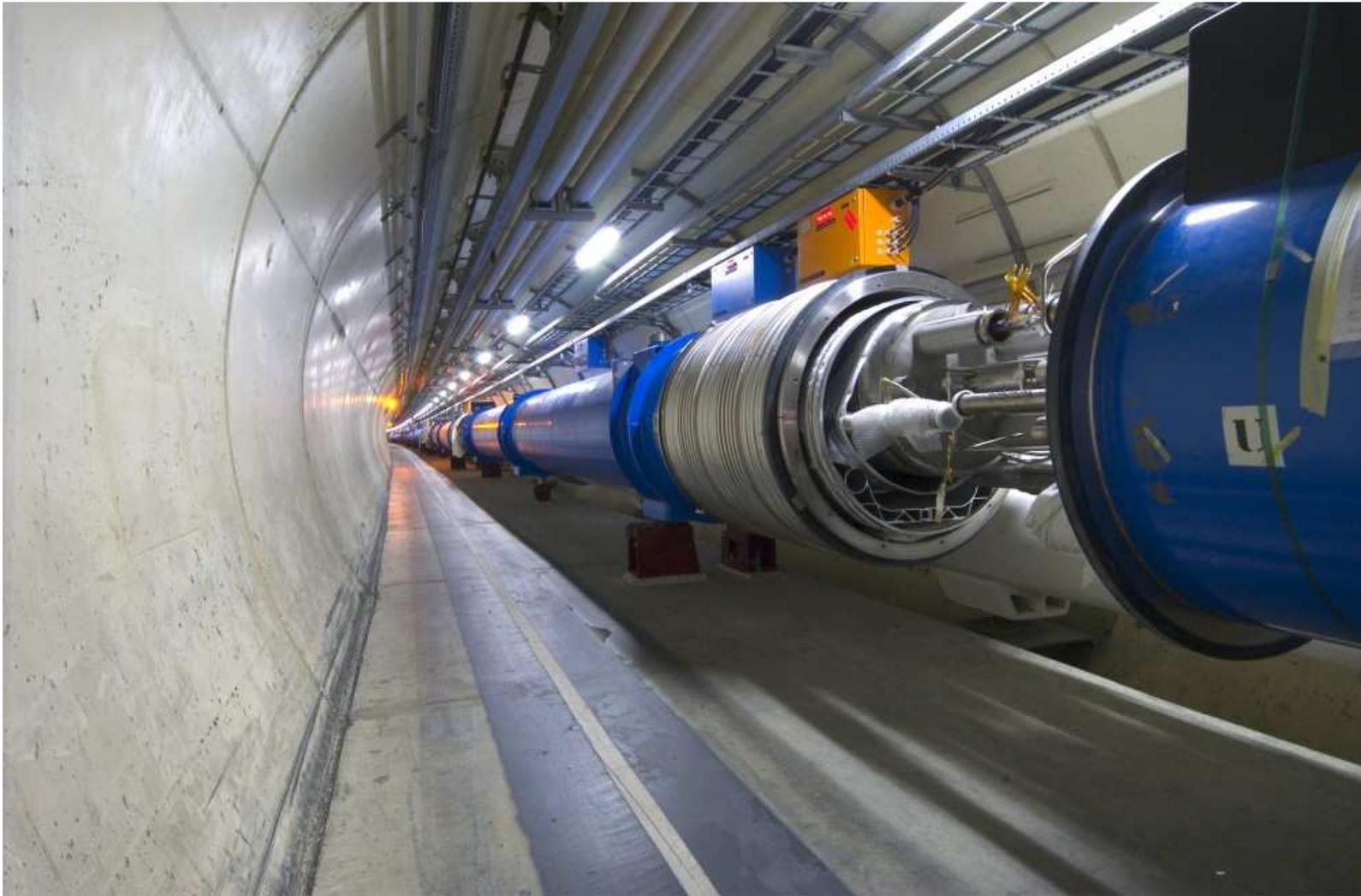
Large Hadron Collider (LHC)

Start: Dezember 2007

$$p \quad \rightleftarrows \quad p$$

14 TeV



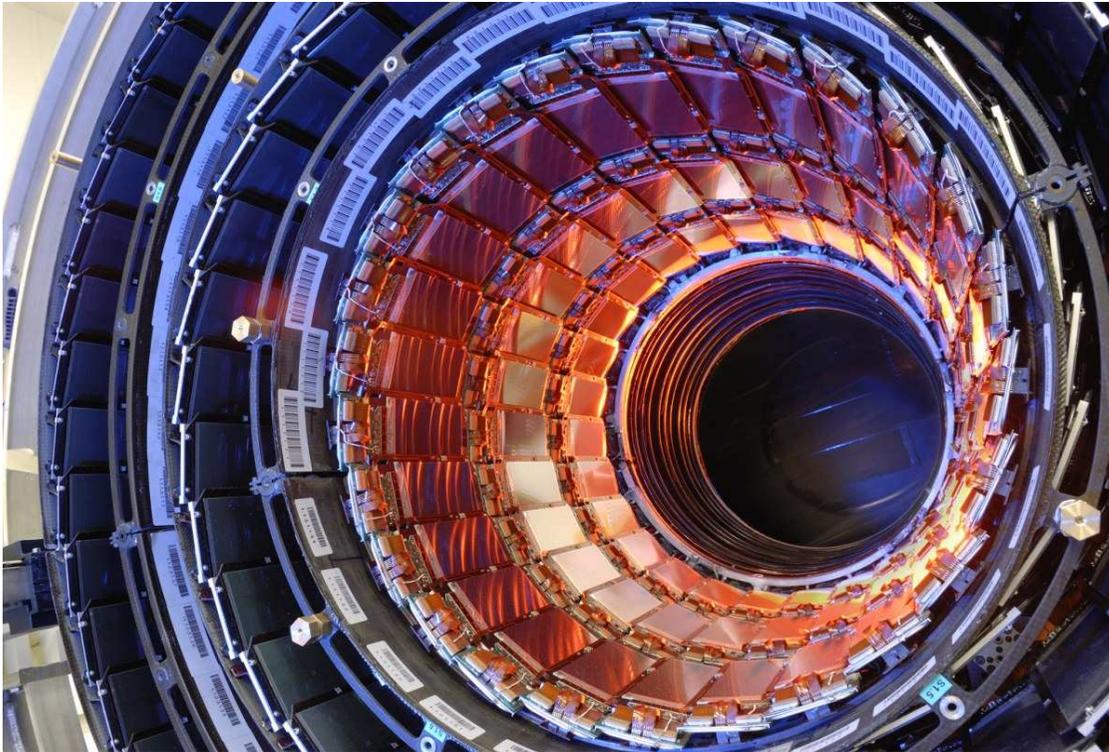


Experiment mit starker Karlsruher Beteiligung

Compact Muon Solenoid \Rightarrow CMS



BMBF-Förderschwerpunkt CMS



Spur-Detektor: Silizium-Chips

Auflösung ca $\frac{1}{100}$ mm

Fläche ca. 20 m²

Durchmesser ca. 2,4 m

mit starker Karlsruher Beteiligung

Vorbereitung der Analysen

Theoretische Untersuchungen

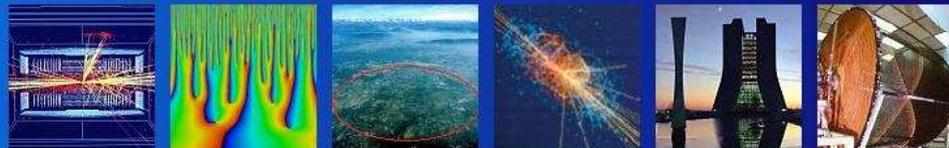
- BMBF-Förderschwerpunkt CMS
- Astroteilchenphysik gemeinsam mit FZK
- Sonderforschungsbereich **TR-9** „Computational Particle Physics“
- Graduiertenkolleg „Teilchen- und Astroteilchenphysik“

gemeinsam im

Centrum für Elementarteilchen und Astroteilchenphysik

mit ca. 70 Doktoranden, 70 promovierten Mitarbeitern

CETA: Interdisziplinäre Forschung in der Elementarteilchenphysik, Astroteilchenphysik, Informatik und im vernetzten Computing



Zur Rolle akademischer Forschung

Henrik Casimir, Theoretischer Physiker (*1909, †2000), Forschungsdirektor von Phillips

I have heard statements that the role of academic research in innovation is slight. It is about the most blatant piece of nonsense it has been my fortune to stumble upon.

Certainly, one might speculate idly whether transistors might have been discovered by people who had not been trained in and had not contributed to wave mechanics or the quantum theory of solids. It so happened that the inventors of transistors were versed in and contributed to the quantum theory of solids. (Shokley, Bardeen, Brattain, 1956)

Ich habe Behauptungen über den unbedeutenden Beitrag akademischer Forschung zur Innovation gehört. Dies ist der wohl größte Unsinn, der mir je untergekommen ist.

Natürlich, man könnte nutzlos spekulieren, ob Transistoren von Leuten entdeckt werden hätten können ohne Ausbildung in und Beiträge zur Quantenmechanik und zur Quantentheorie der Festkörper. Tatsächlich waren die Erfinder des Transistors auf diesem Gebiet Experten mit eigenen wissenschaftlichen Beiträgen. (Shokley, Bardeen, Brattain, 1956)

Basic circuits in computers

⋮

nuclear power

⋮

Or whether, in an urge to provide better communication, one might have found electromagnetic waves. They weren't found that way. They were found by Hertz who emphasised the beauty of physics and who based his work on the theoretical considerations of Maxwell.

I think there is hardly any example of twentieth century innovation which is not indebted in this way to basic scientific thought.

Schaltkreise in Computern

⋮

Kernenergie

⋮

Oder ob man, mit dem Ziel besserer Telekommunikation, elektromagnetische Wellen entdeckt hätte. Sie wurden nicht auf diesem Weg entdeckt. Sie wurden von Hertz entdeckt, der die Schönheit der Physik betonte und der seine Arbeiten auf den theoretischen Überlegungen Maxwells aufbaute. Ich glaube, es gibt kaum ein Beispiel einer Innovation des zwanzigsten Jahrhunderts, die wir nicht in dieser Weise grundlegenden wissenschaftlichen Überlegungen verdanken.

Folgerungen für unser Weltbild,
die Rolle von Raum, Zeit und Materie

