

RELATIVITÄT, QUANTEN und FELDER

Konzepte der Teilchenphysik

J. H. Kühn

Neue Konzepte

weit entfernt von der Anschauung

aber

tieferer Einsichten,
experimentell verifizierbar

Relativität

Quanten

Felder

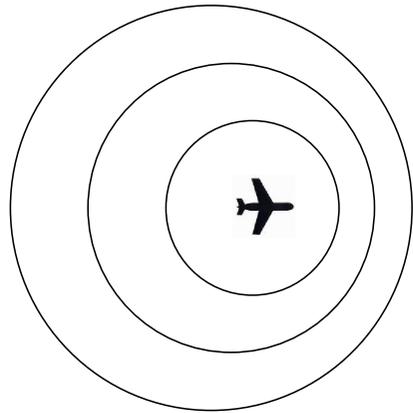
Quantenfeldtheorie

Fundamentale Bausteine der Materie

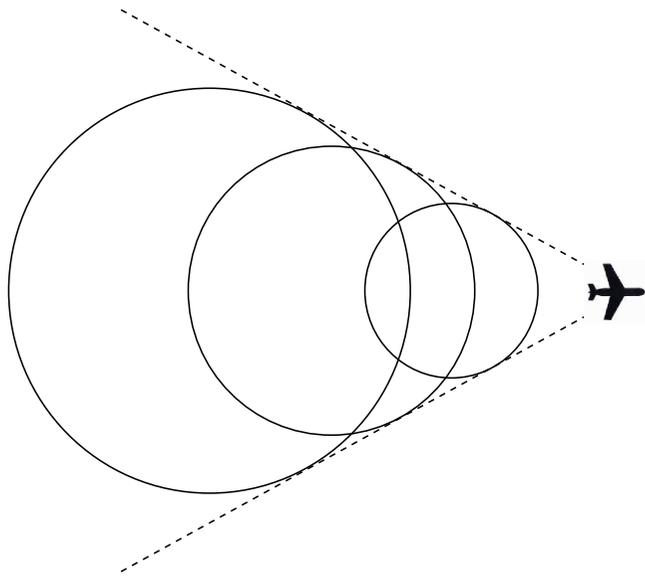
Offene Fragen

Relativitätstheorie

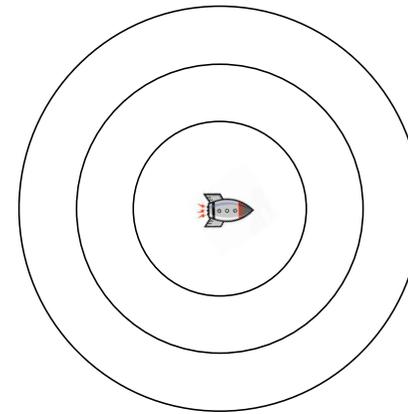
Maxwell-Gleichungen \implies Ausbreitung von Licht gleich in jedem Bezugssystem



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



$$v = 2 v_{Schall}$$



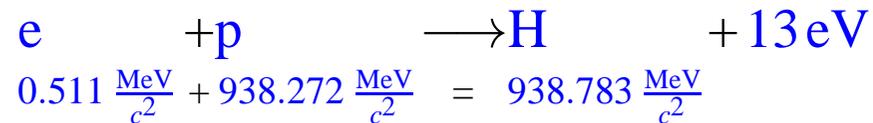
elektromagnetische Welle

Spezielle Relativitätstheorie (Einstein 1905)

$$E = mc^2$$

Massendefekt:

Atomphysik (Chemie)



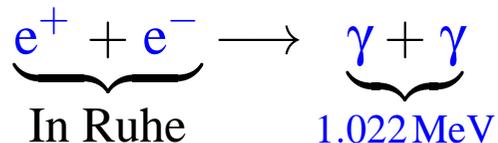
$$E_{\text{Bind}}/mc^2 \approx 1/100000000$$

Kernphysik (Energieerzeugung in der Sonne)



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

Teilchenphysik



Massendefekt = 100%

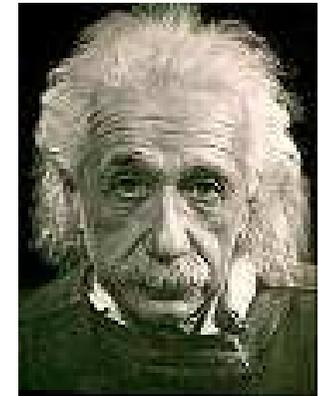
Allgemeine Relativitätstheorie (Einstein 1913)

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

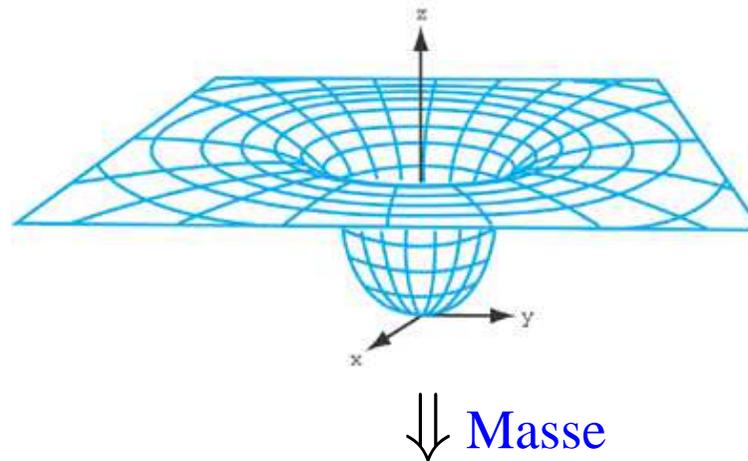
Krümmung des Raumes

Natur-
konstanten

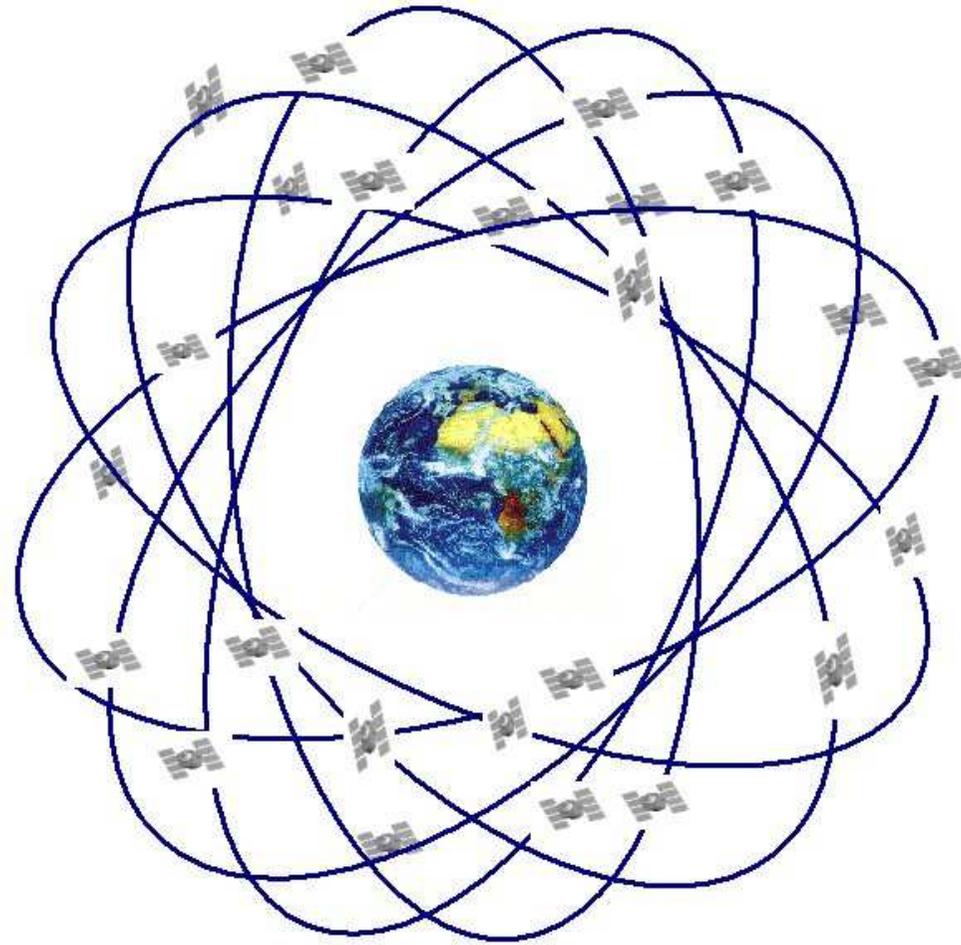
Materie
(Dichte, Druck,...)

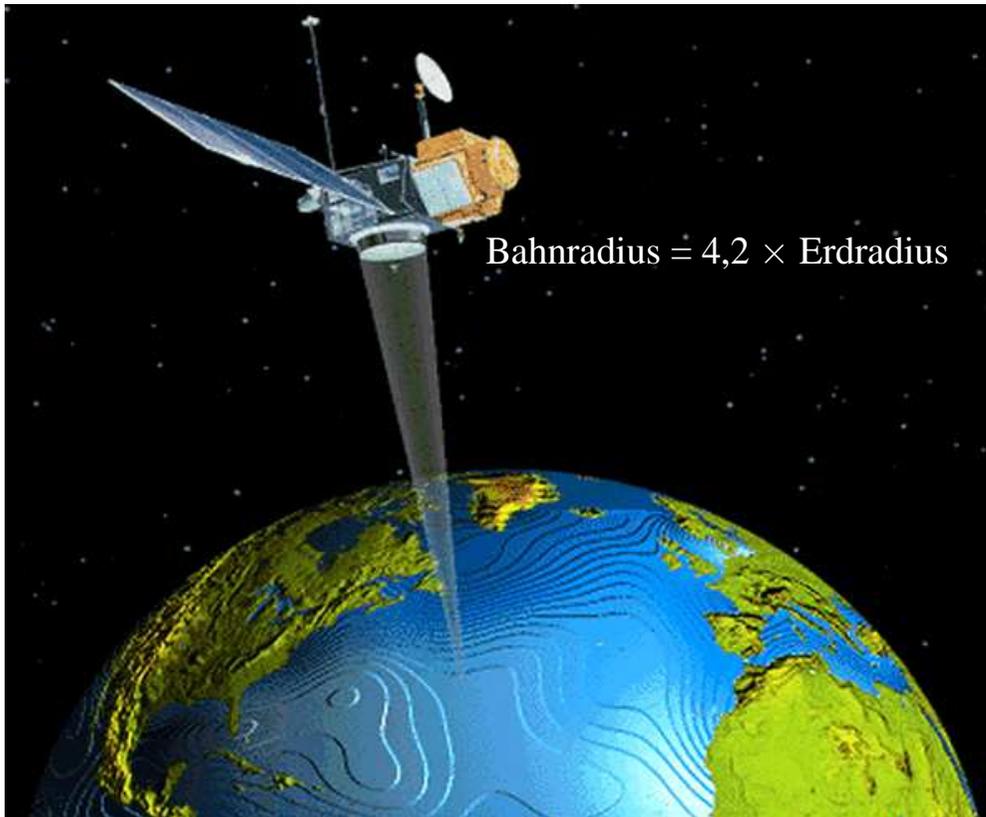


Einstein



GPS und Relativitätstheorie





Geschwindigkeit = 3,8 km/s

⇒ Zeitdilatation

(Spezielle Relativitätstheorie)

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

Blauverschiebung im Gravitationsfeld

(Allgemeine Relativitätstheorie)

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

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

Quanten

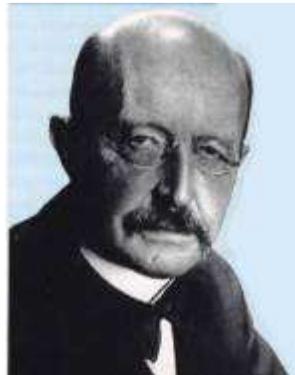
Strahlungsformel (1900)

Energie der Oszillatoren „gequantelt“

$$E = h\nu$$

ν : Frequenz

Atome emittieren Energie in Paketen \equiv Photonen



Planck

Quantisierungsbedingung (1913)

nur diskrete Energieniveaus

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

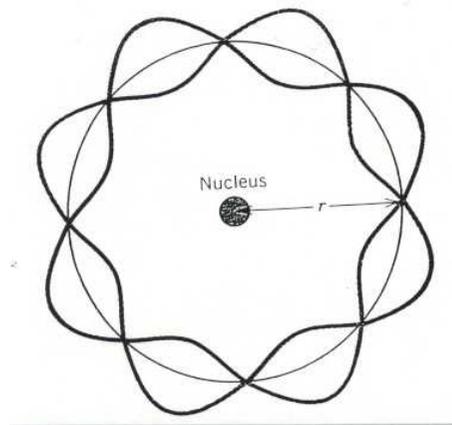
Photonen: $E_\gamma = E_n - E_m$

nur diskrete Energien

Atome sind stabil; Spektren immer gleich

Elektronen breiten sich aus wie Wellen (1924)

(Teilchen \Leftrightarrow Welle)



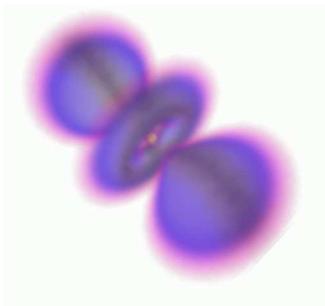
Bohr



de Broglie

Schrödingergleichung (1925-1927)

Energieniveaus $\hat{=}$ Schwingungszustände



Schrödinger



Heisenberg

Heisenbergsche Unschärferelation (1927)

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

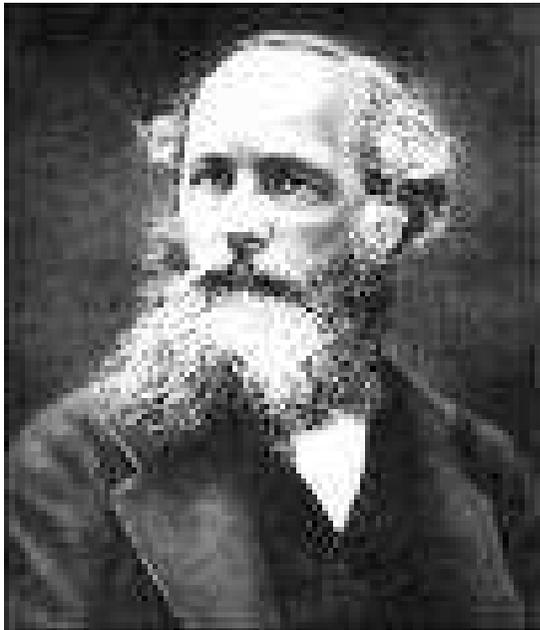
gute Ortsauflösung $\hat{=}$ kleines $\Delta x \hat{=}$ kleine Wellenlänge $\hat{=}$ großer Impuls

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

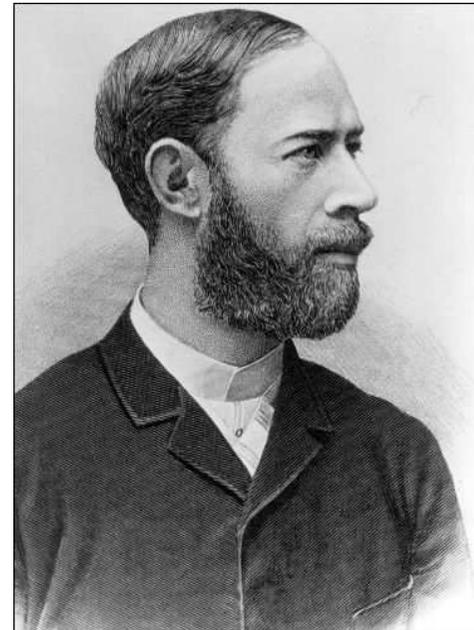
Felder

ELEKTROMAGNETISCHES FELD

⇒ ELEKTROMAGNETISCHE WELLE



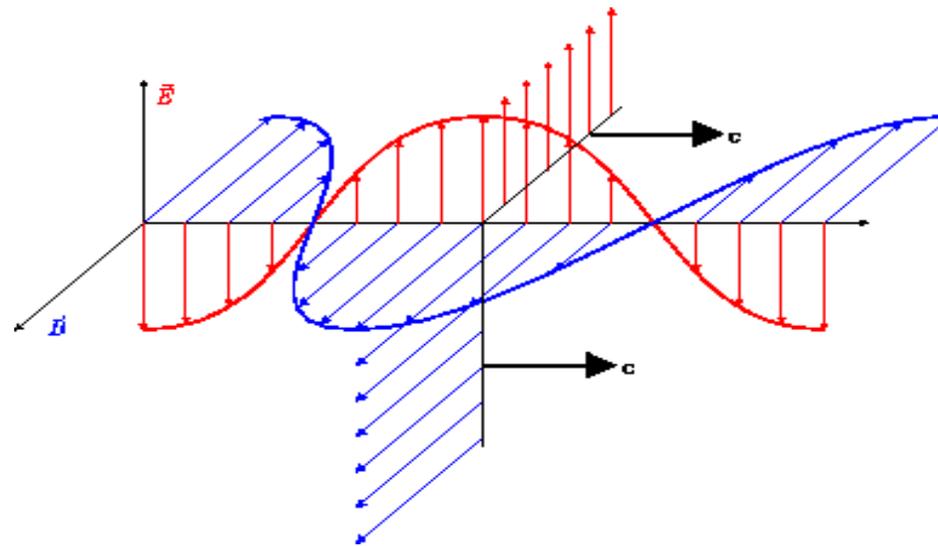
Maxwell



Hertz

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

\Rightarrow **Welle**; Ausbreitung mit Lichtgeschwindigkeit

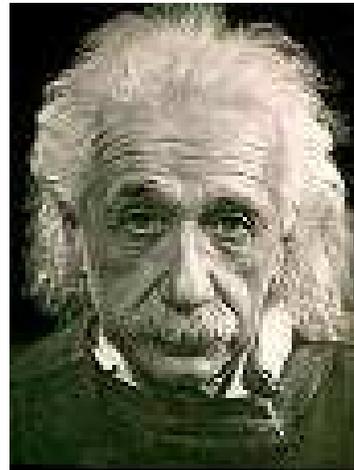


Licht \equiv elektromagnetische Welle

Quantenfeld

Dualität

Welle \longleftrightarrow Teilchen (Photon)



Einstein

alle Photonen gleicher Energie sind identisch (Laser)

Quantenfeldtheorie

Elektronen sind quantisierte Schwingungen des Elektron-Feldes



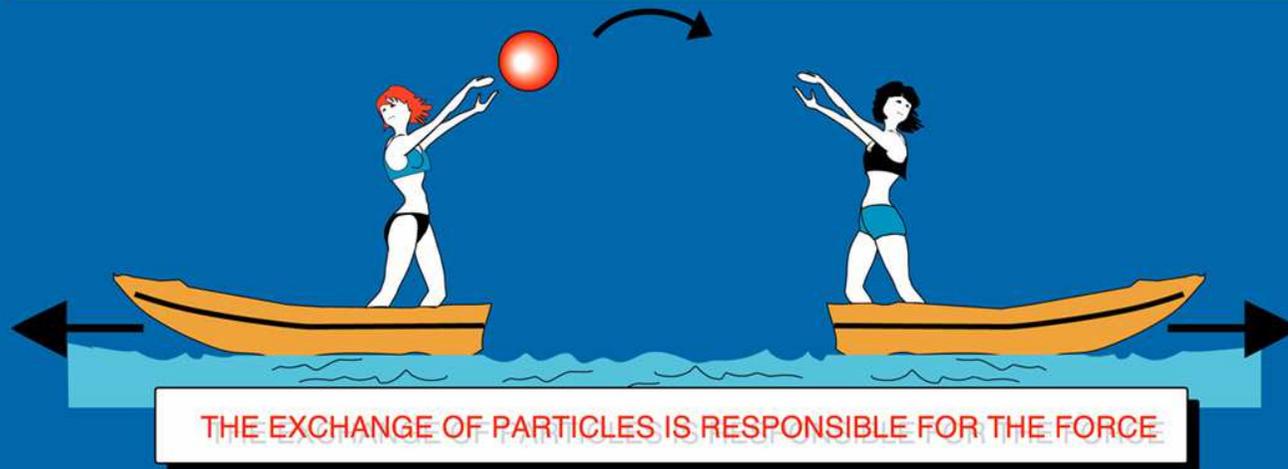
⇒ alle Elektronen sind identisch!

etwa 1 00.000.000.000.000.000.000.000 Elektronen in 1 Liter Wasser
23 Nullen sind identisch

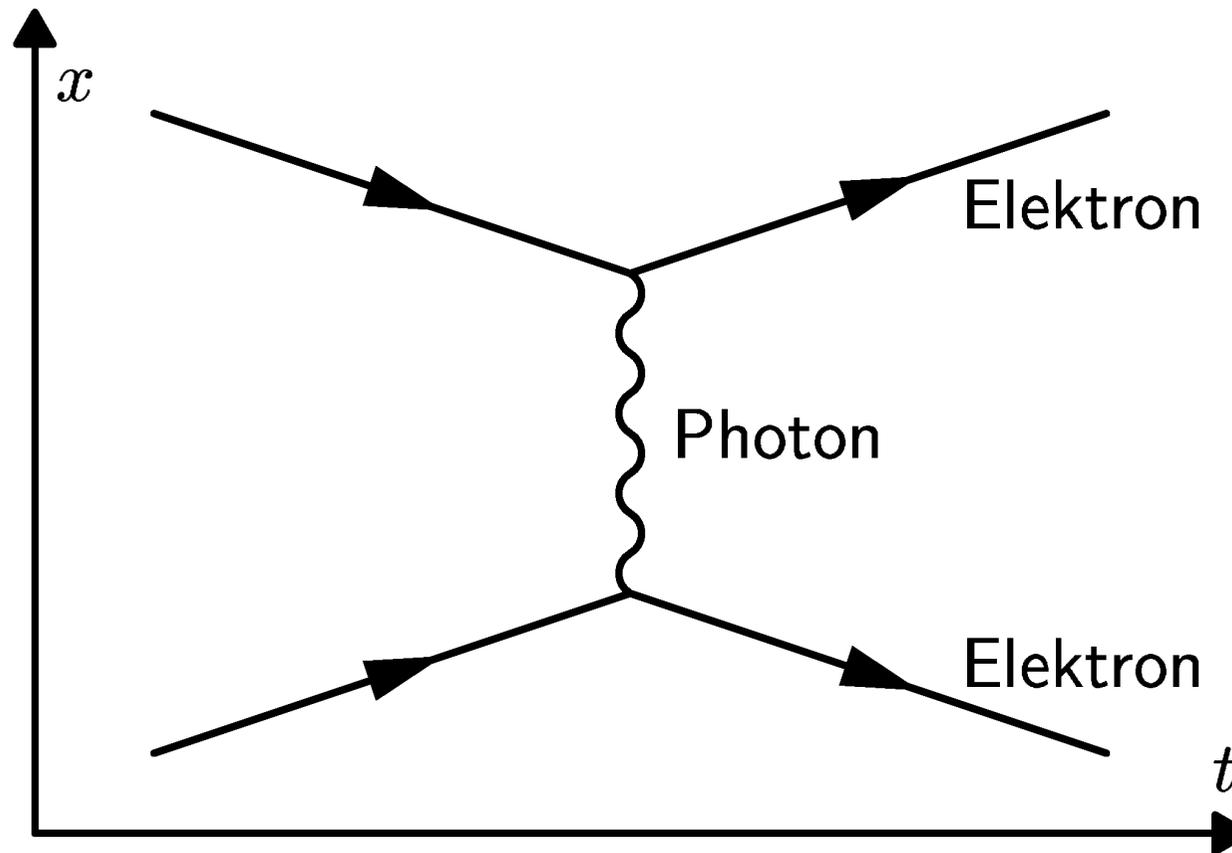
7.200.000.000 Menschen sind verschieden

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



Quanten-Elektrodynamik



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

Relativitätstheorie + Quantenfeldtheorie

⇒ Existenz von Antimaterie

Elektron \leftrightarrow Positron

Proton \leftrightarrow Antiproton

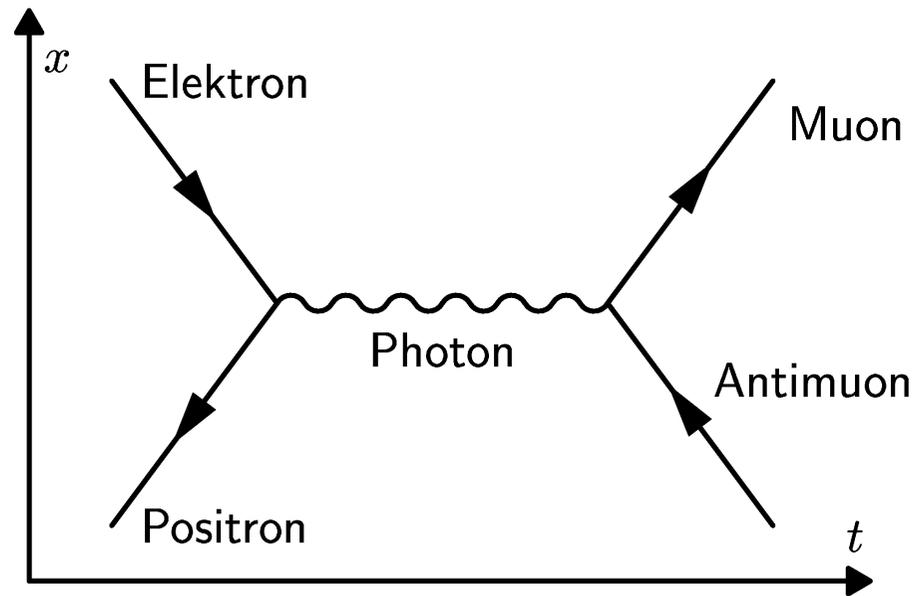
⋮

Teilchen \leftrightarrow Antiteilchen (gleiche Masse)



Dirac

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



$$e^+ e^- \longrightarrow \text{„virtuelles“ Photon} \longrightarrow \mu^+ \mu^-$$

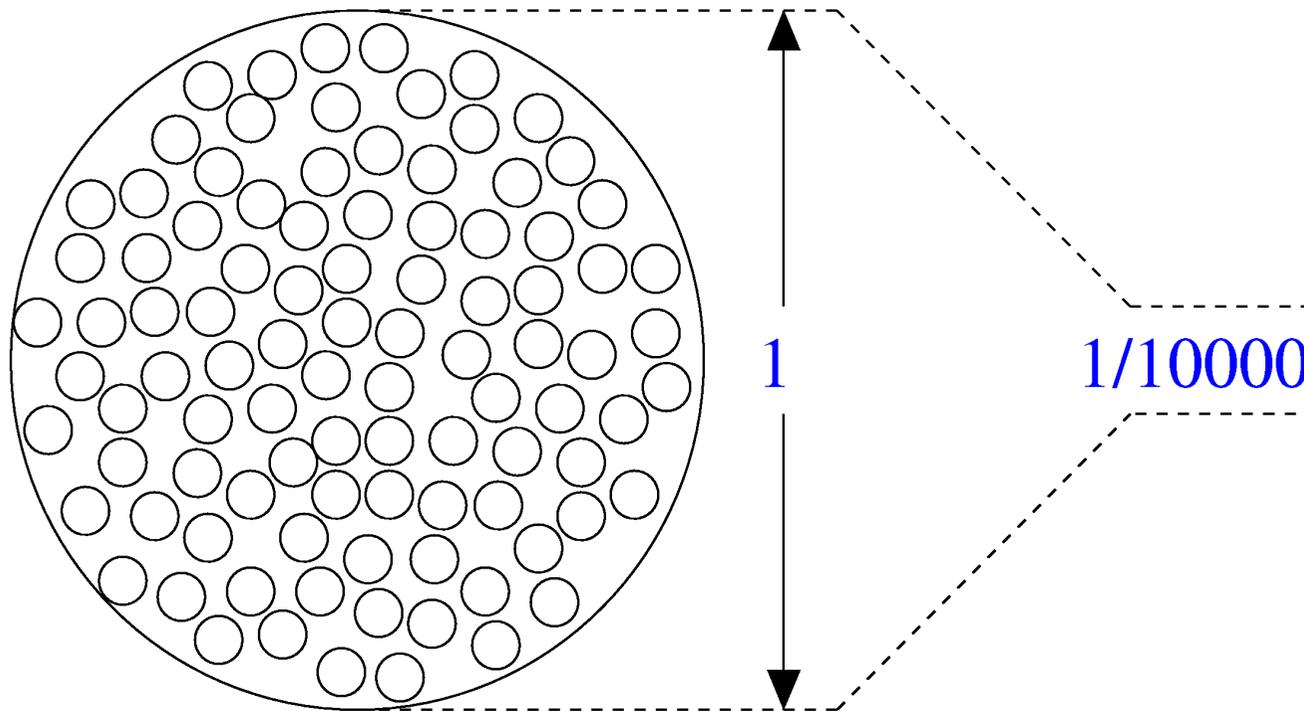
reine Feldenergie

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

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

(Elektronen und Positronen durchlaufen Potentialdifferenzen von 100 000 000 000 Volt)

Energie-Äquivalent eines Bleikerns



reine Feld-Energie, konzentriert in 10^{-3} fm 10^{-18} m

LHC: Large Hadron Collider (ab 2010)

Energie = 7 000 GeV (zunächst)

Energie = 13 000 GeV (ab 2015)

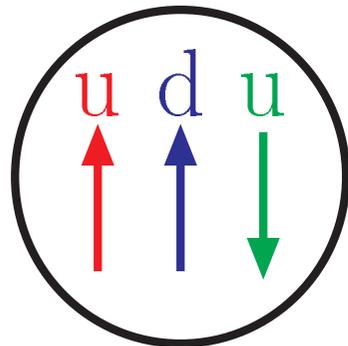
(Energie-Äquivalent von 65 Bleikernen in winzigem Volumen)

→ Vortrag Müller

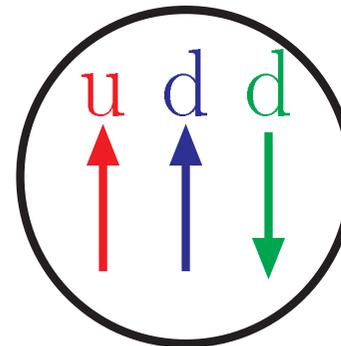
Fundamentale Bausteine der Materie

Leptonen (Elektron, Muon, Tau; Neutrinos)

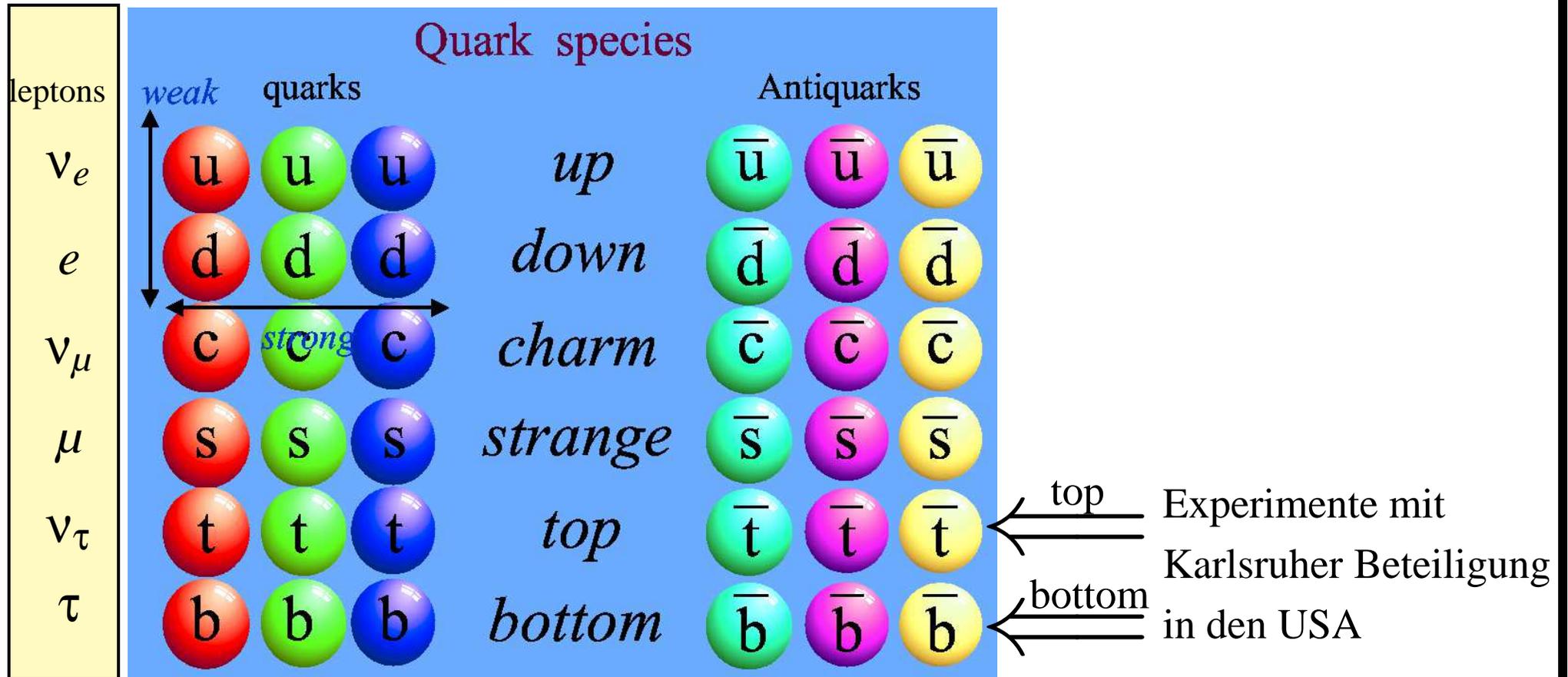
Quarks

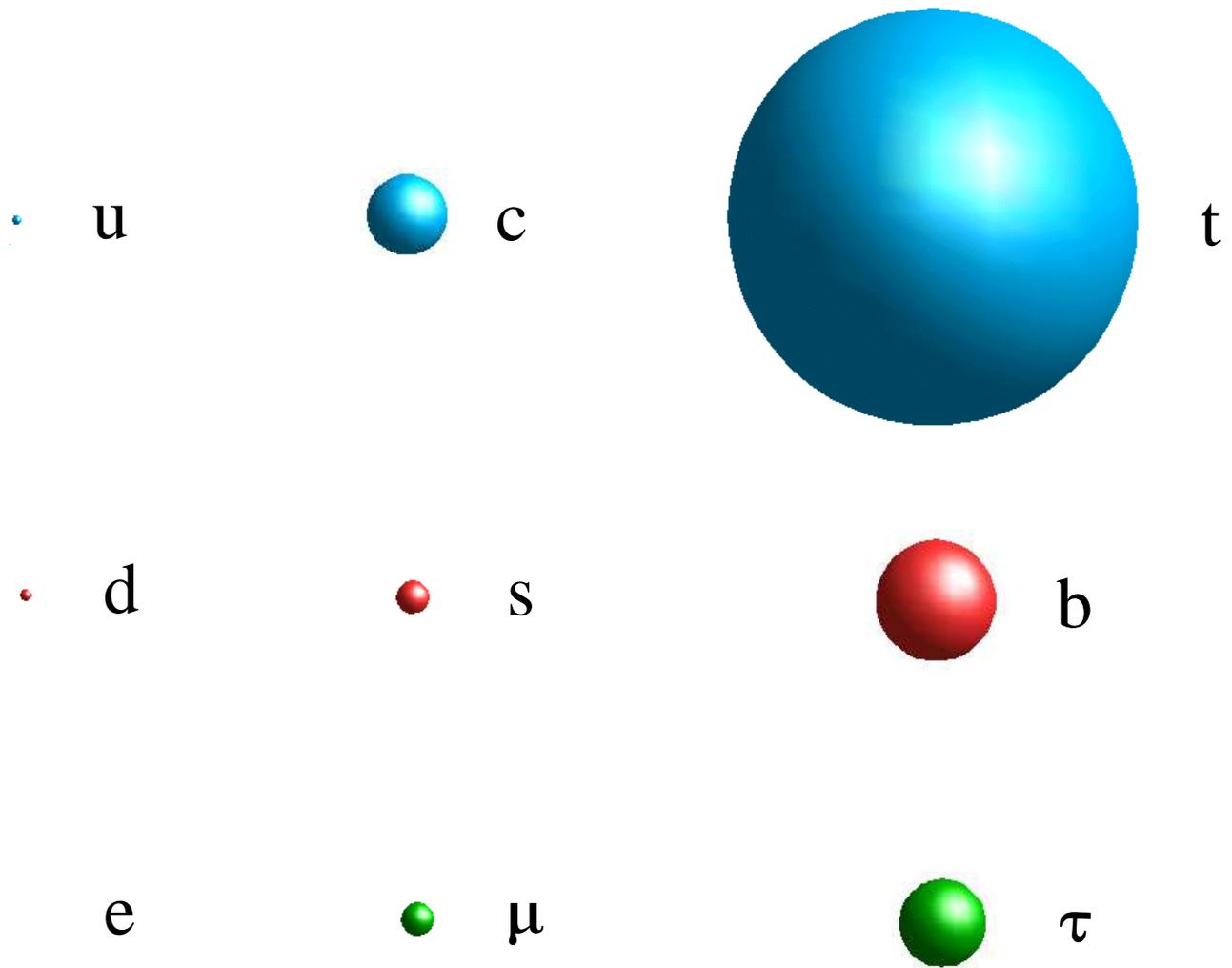


: Proton



: Neutron





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

Zusammenfassung

RELATIVITÄTSTHEORIE + QUANTENMECHANIK + FELDER
+ LEPTONEN + QUARKS

⇒ KONSISTENTE THEORIE

Offene Fragen

Vereinheitlichung der Kräfte

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)

Offene Fragen

Higgs Boson

Higgs Boson

Wie erhalten Teilchen ihre Masse?

⇒ Bewegung durch ein universelles Feld
bezeichnet nach dem Theoretiker Higgs

Schwingungen des Higgs-Feldes

⇒ **Higgs-Teilchen**

Gleichungen eigentlich nur gültig für masselose Teilchen:

Photon, Gluon: Masse Null

W-Bosonen, Z-Bosonen, Quarks:
massiv!

⇒ Bewegung in einem Hintergrundfeld

“Higgs-Feld”

Mechanismus der Massenerzeugung „Higgs“



Quantisierte Schwingungen des Higgs-Feldes

→ Teilchen

⇒ Higgs-Boson

Mechanismus der Massenerzeugung „Higgs“



Erwartungen der Theoretiker

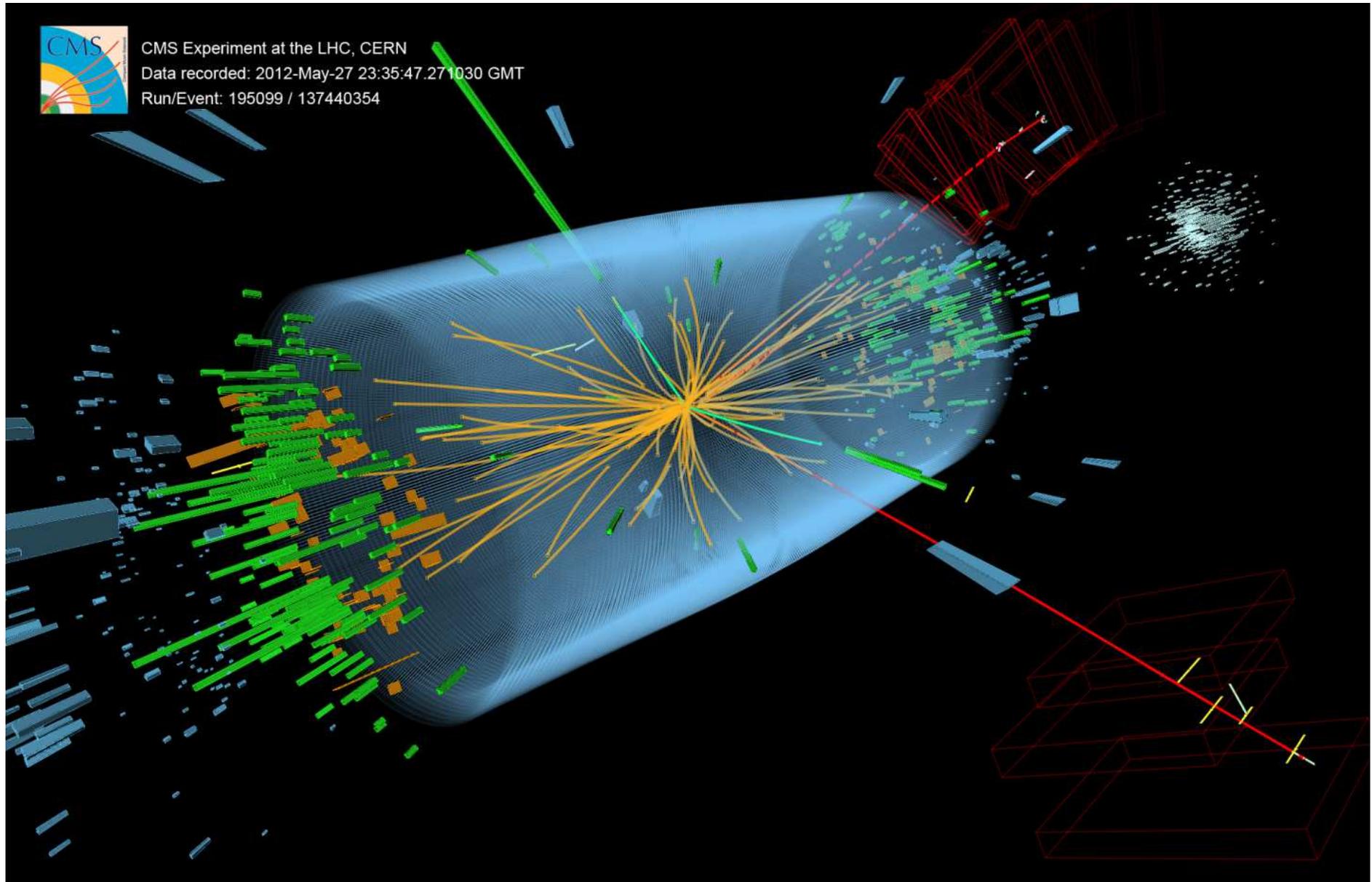
Masse des Higgs-Bosons

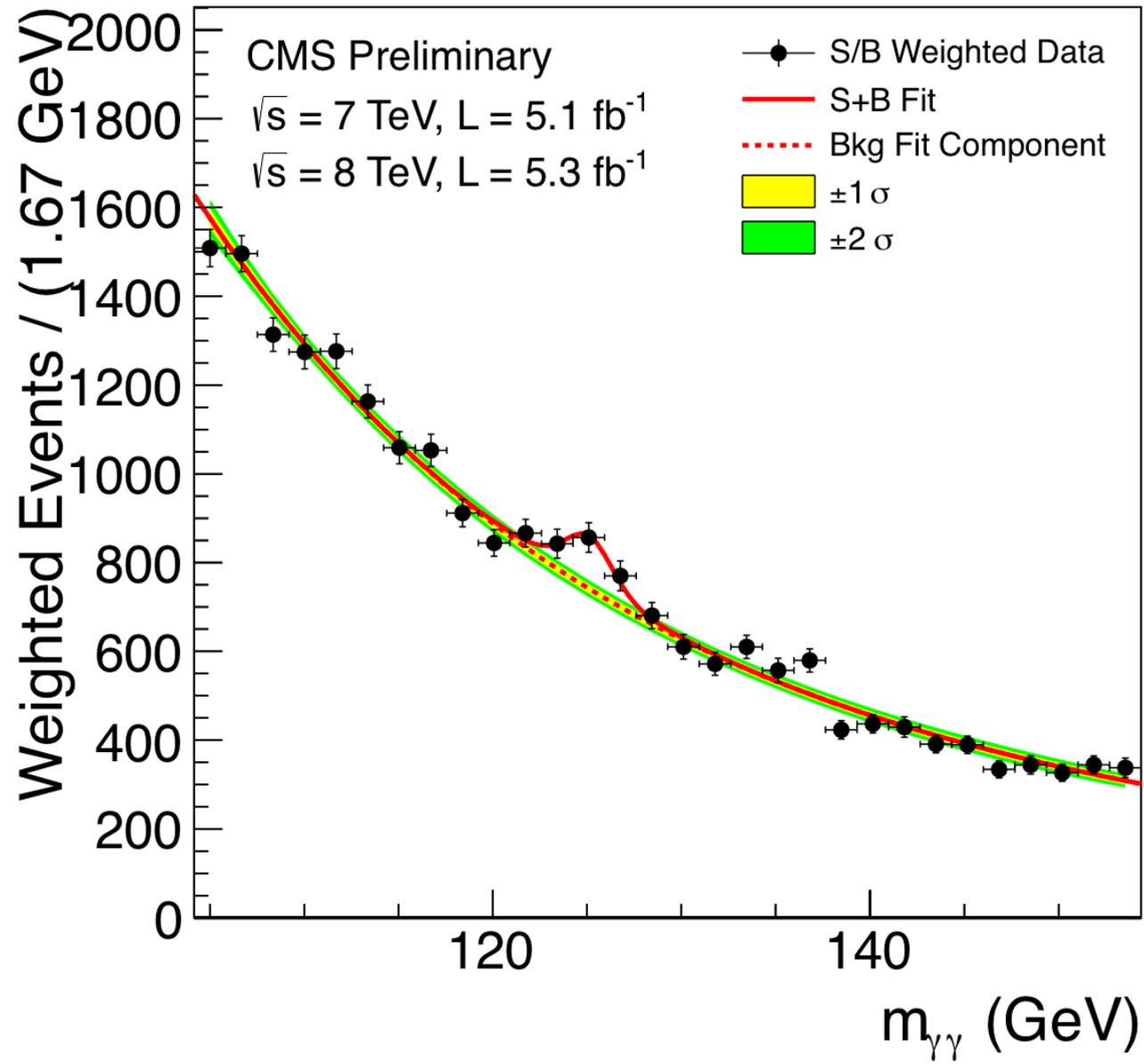
zwischen $100 \frac{\text{GeV}}{c^2}$ und $200 \frac{\text{GeV}}{c^2}$

Experiment: etwa $126 \frac{\text{GeV}}{c^2}$



CMS Experiment at the LHC, CERN
Data recorded: 2012-May-27 23:35:47.271030 GMT
Run/Event: 195099 / 137440354





Offene Fragen

Dunkle Materie

Dunkle Materie

Rotation Curves of Spiral Galaxies



NGC 253

(David Malin, AAO)

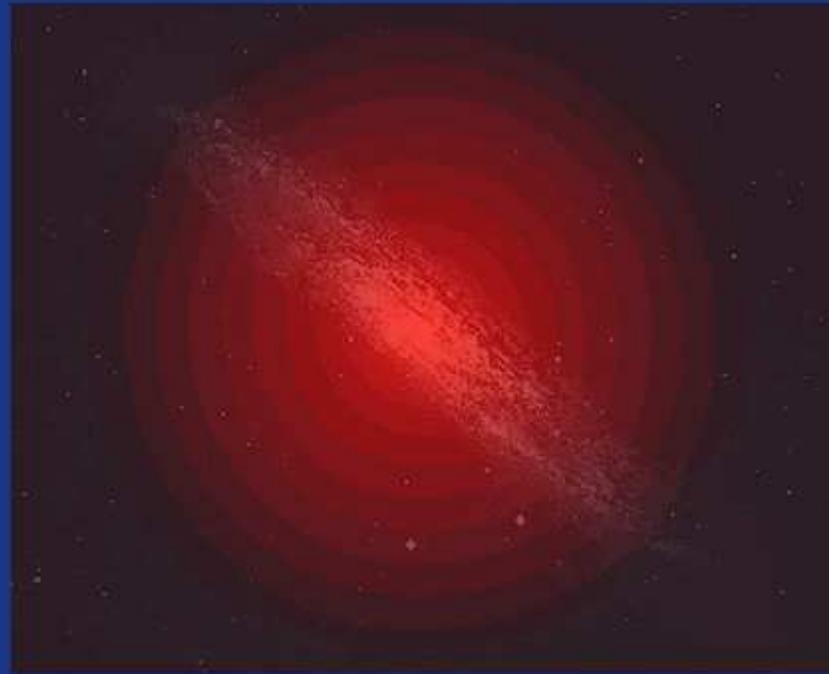
Spiral galaxies like our own Milky Way are rotating.

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:



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 were found by Hertz who emphasised the beauty of physics and who based his work on the theoretical considerations of Maxwell.

Schaltkreise in Computern

⋮

Kernenergie

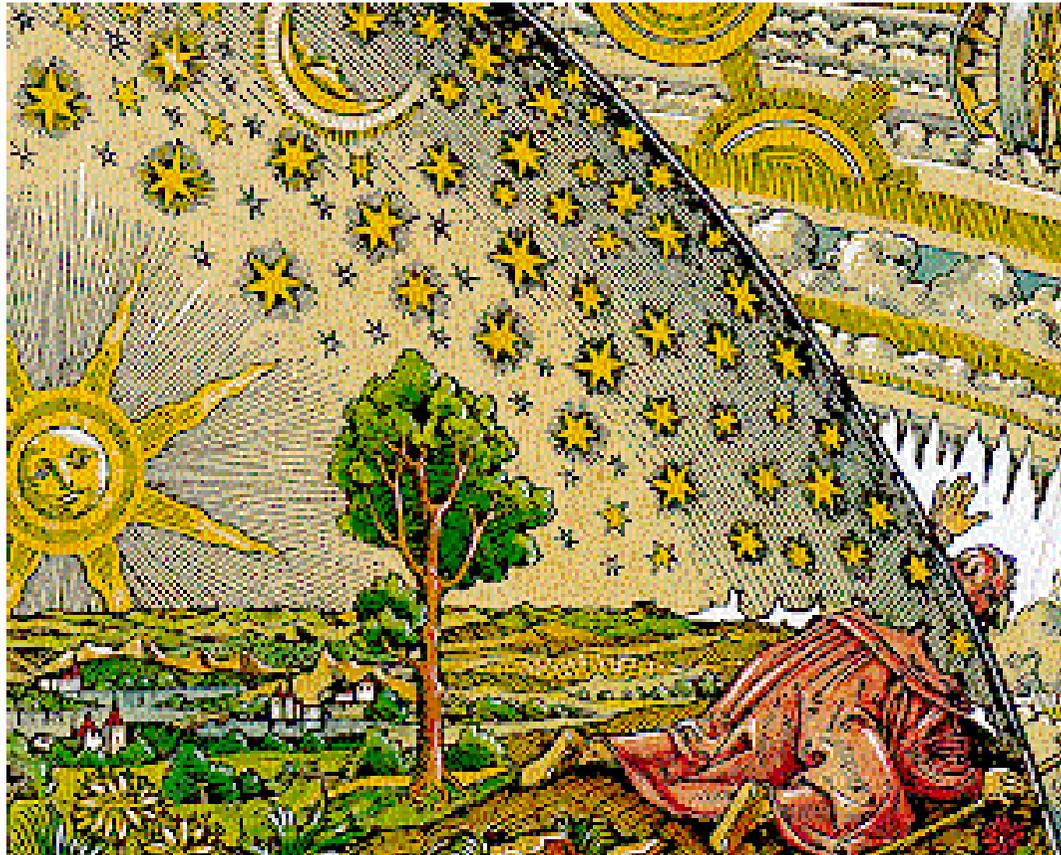
⋮

Oder ob man, mit dem Ziel besserer Telekommunikation, elektromagnetische Wellen entdeckt hätte.

⋮

Sie wurden von Hertz entdeckt, der die Schönheit der Physik betonte und der seine Arbeiten auf den theoretischen Überlegungen Maxwells aufbaute.

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



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

