

TEILCHENPHYSIK UND KOSMOLOGIE

im 20. Jahrhundert

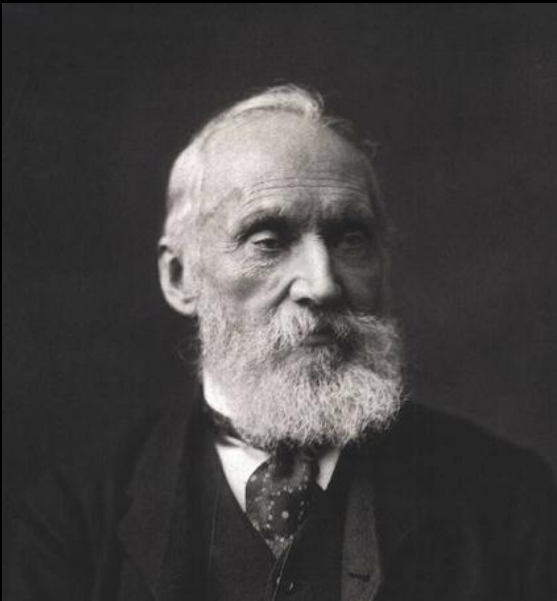
Rolf Landua
CERN

**In drei Vorträgen werden etwa 100 Jahre an Ideen,
Theorien und Experimenten an Ihnen vorbeiziehen.**

Über 50 Physik - Nobelpreise

**Breiter Überblick über die wichtigsten
Entdeckungen und die Zusammenhänge**

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts glaubten die meisten Physiker, dass die gesamte Physik erforscht ist und durch die Mechanik, Thermodynamik, und die Maxwell-Theorie des Elektromagnetismus vollständig beschrieben wird.



William Thomson
(Lord Kelvin)

‘British Association for the Advancement of Science’

Da es nun nichts mehr Neues in der Physik zu entdecken gibt, verbleibt uns nur die Aufgabe, alles noch präziser zu messen

(Lord Kelvin, 1900)

Die “Wolken” am Horizont der Physik:

- 1) Atomistik der Materie?
- 2) Spektrum der Hohlraumstrahlung?
- 3) Michelson-Morley Experiment?

1900: Was ist Universum - was ist Materie ?

Universum = Sonnensystem und die Milchstrasse

Niemand wusste wie unsere Sonne ihre Energie produziert

Nichts war über Atome, ihre Struktur, und Atomkerne bekannt

Man kannte zwei 'Felder' : Elektromagnetismus und Gravitation

Niemand hatte die geringste Vorstellung von den unglaublichen Entdeckungen der nächsten 100 Jahre.

Kinetische Gastheorie

Boltzmann

Maxwell

Elektromagnetismus

Newton

Teilchen

Felder

Universum

Technologien

1895

1900

1905

1910

1920

1930

1940

1950

1960

1970

1975

1980

1990

2000

2010

e^-

Atom

Kern

p^+

n

μ^-

e^+

τ^-

p^-

ν_e

ν_μ

τ^-

ν_τ

ν Masse

Brownsche Bewegung

Spezielle Relativität

Quantenmechanik
Welle-Teilchen Dualismus
Spin/Fermion-Boson

Antimaterie

Fermi Theorie

Yukawa
 π Austausch

QED

P, C, CP
Verletzung

Higgs

W Bosons

GUT

SUSY

Superstrings

EW Vereinigung

QCD
Farbladung

3 Teilchenfamilien

Elektro-
magnetismus

Schwache
WW

Starke
WW

Photon

Radio-
aktivität

1

Höhen-
strahlung

Galaxien;
Ausdehnung des
Universums

Dunkle Materie

Kernfusion

Big Bang
Nukleosynthese

Kosmische
Hintergrundstrahlung

Inflation

Inhomogenität der
Hintergrundstrahlung(C
OBE, WMAP)

Dunkle Energie

Detektor

Beschleuniger

Geiger

Wolken

Zyklotron

Synchrotron

Blasen-
kammer

e^+e^- Ring

Vieldraht-
kammer

Strahl-
kühlung

Prozess-
rechner

p^+p^- Ring

Moderne
Detektoren

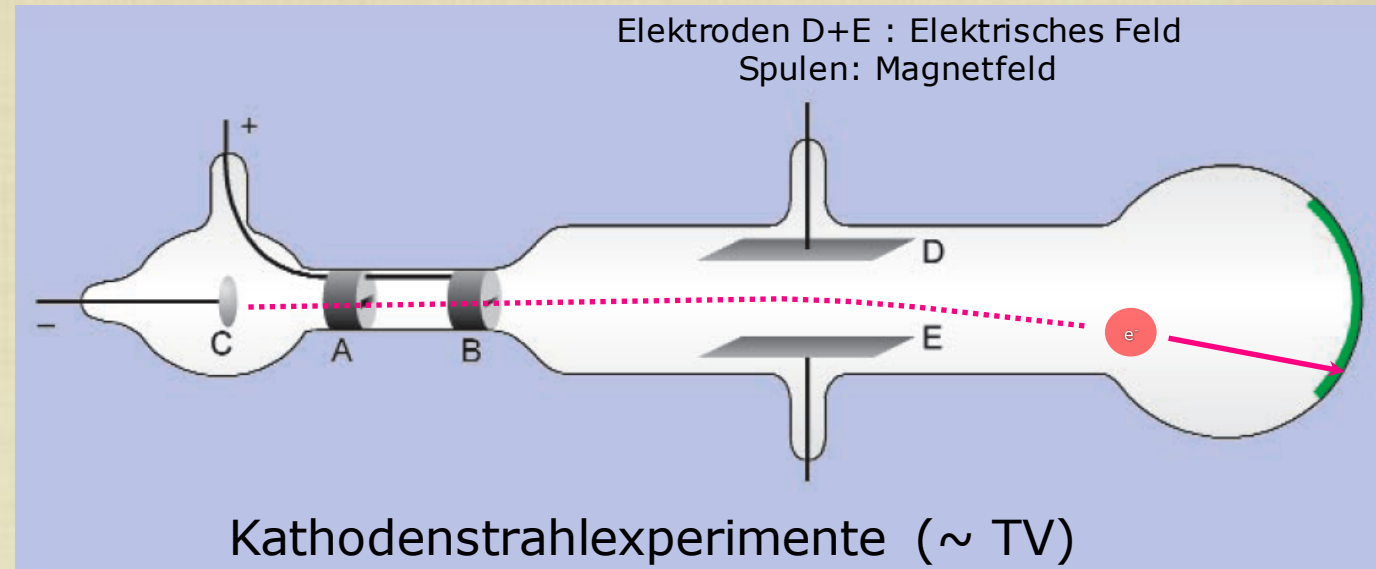
WWW

GRID



J.J. Thomson

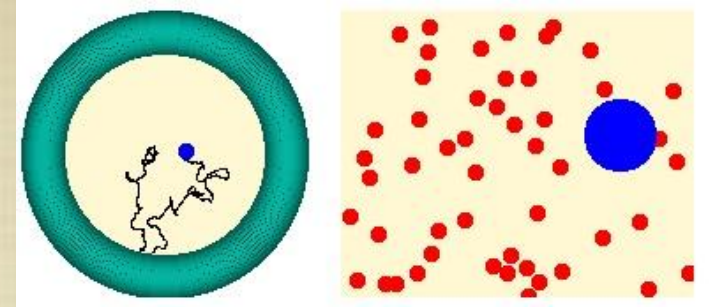
Die Geburtsstunde der Teilchenphysik Entdeckung des Elektrons



**Kathodenstrahlen* sind Teilchen
mit spezifischem Ladungs-Massen-Verhältnis**

***später 'Elektronen' genannt**

Robert Brown (1827) beobachtet die Zitterbewegung von kleinen Russpartikeln in wässriger Lösung



Albert Einstein (1905) erklärt die Zitterbewegung mit Hilfe der kinetischen Atomtheorie

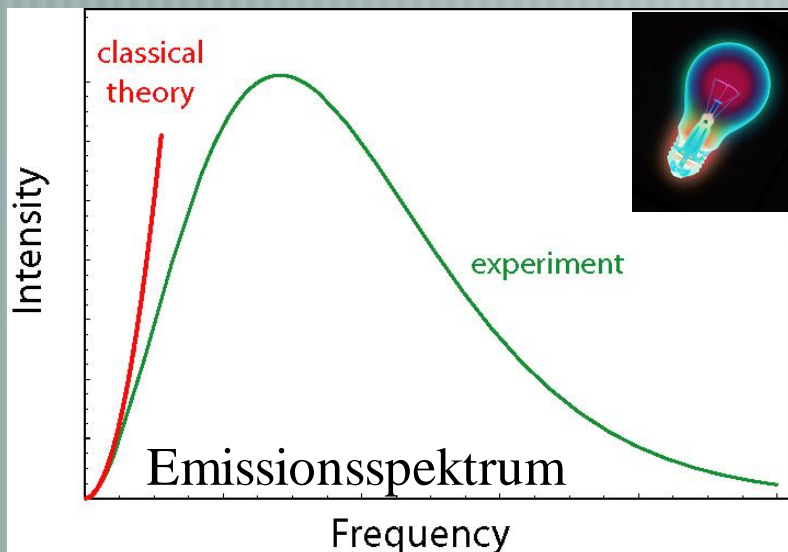
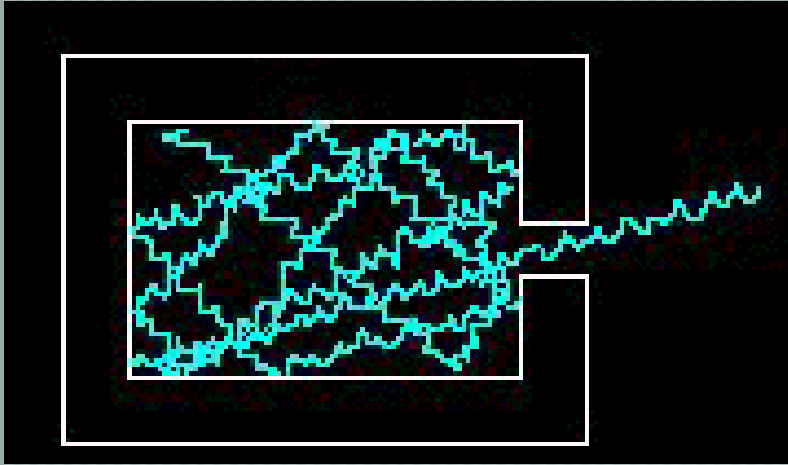
$$\langle x^2 \rangle = \frac{2kTt}{\alpha} = \frac{kTt}{3\pi\eta a}$$

Francois Perrin (1907) bestätigt Einstein's Formel mittels präziser Messungen

Die Existenz von Atomen als physikalische Realität war bewiesen

Felder

Hohlraumstrahlung



Ein “Hohlraum” absorbiert die einfallende Strahlung völlig und sendet diese Energie als thermische Strahlung wieder aus:

“Hohlraumspektrum” = $f(\nu, T)$

$$I(n) \sim n^2 \langle E \rangle$$

durchschnittliche Energie der Oszillatoren (proportional zur Temperatur?)

Ok für ‘kleine’ Frequenzen (Jeans law)

Felder

14 Dezember 1900



Max Planck

Ein “Akt der Verzweiflung”

Die Oszillatoren (in der Wand des Hohlraums) können nur ‘Energiepakete’ aussenden $\epsilon = h \nu$
Höhere Frequenzen entsprechen grösseren Energiepaketen die bei ‘niedrigen’ Temperaturen nicht wahrscheinlich sind

Durchschnittsenergie der Oszillatoren

$$I(n) \sim n^2 \frac{hn}{e^{\frac{hn}{kT}} - 1}$$

h = neue fundamentale Konstante

Felder

1902

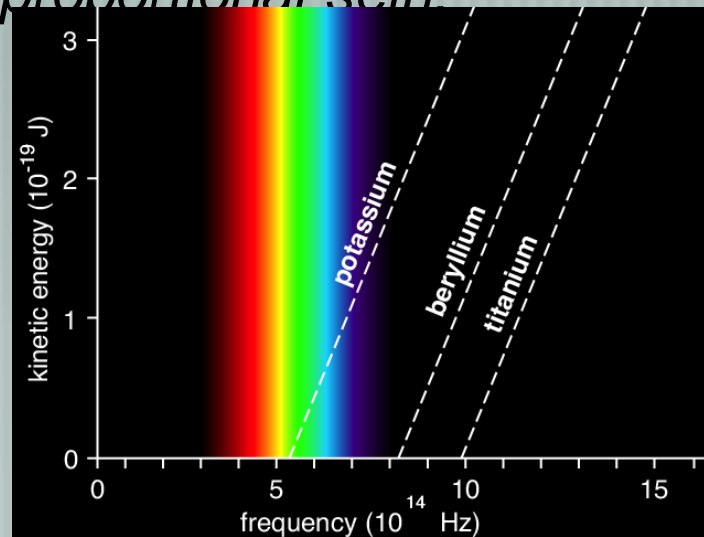
Der photoelektrische Effekt

Kathodenstrahlen (= Elektronen) werden durch Einstrahlung von Licht auf Metalloberflächen erzeugt.

Klassische Erwartung: Da die Energie des Lichts proportional zum Quadrat der Amplitude ist, sollte die Energie der Elektronen der Intensität des Lichts proportional sein.



Philipp von Lenard



Aber:

Die Energie der Elektronen ist proportional der **Frequenz** des Lichts (Gradient = "h")

“Die Energie der Elektronen zeigt nicht die geringste

Abhängigkeit von der Lichtintensität”

Felder

“Mein einziger revolutionärer Beitrag zur Physik”

17 März 1905

Licht wird quantenweise emittiert und absorbiert



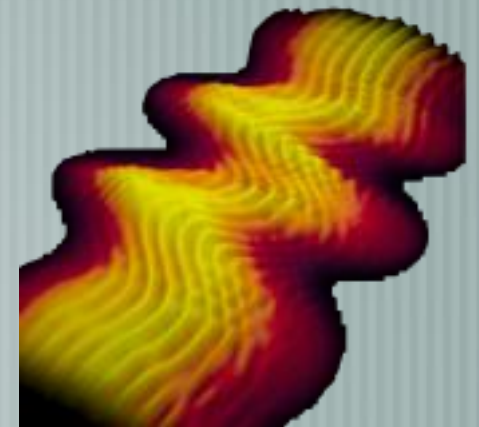
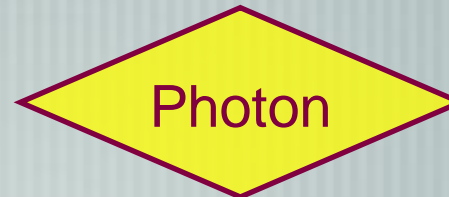
Albert Einstein

$$E_{\max} = h\nu - W$$

“Ein Lichtquant gibt alle seine Energie an ein einzelnes Elektron ab”

(Erst im Jahr 1917 durch Compton bewiesen)

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



Felder

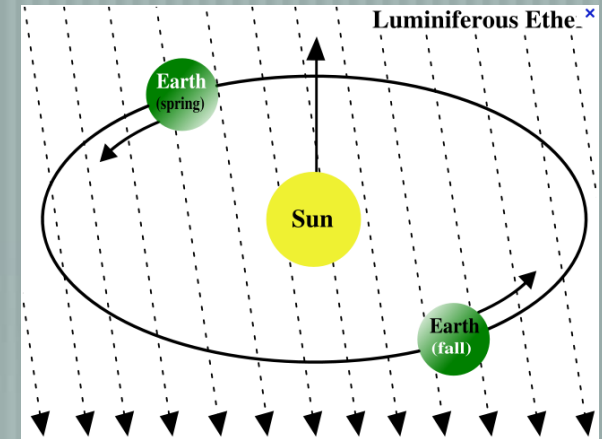
1905

Spezielle Relativitätstheorie

Maxwell - Gleichungen: $c = \text{konstant}$

Michelson - Morley : $c = \text{konstant}$

Einstein : es gibt keinen Äther



Postulat 1: alle unbeschleunigten Bezugssysteme sind äquivalent

Postulat 2: Lichtgeschwindigkeit $c = \text{konstant}$ (in Vakuum)

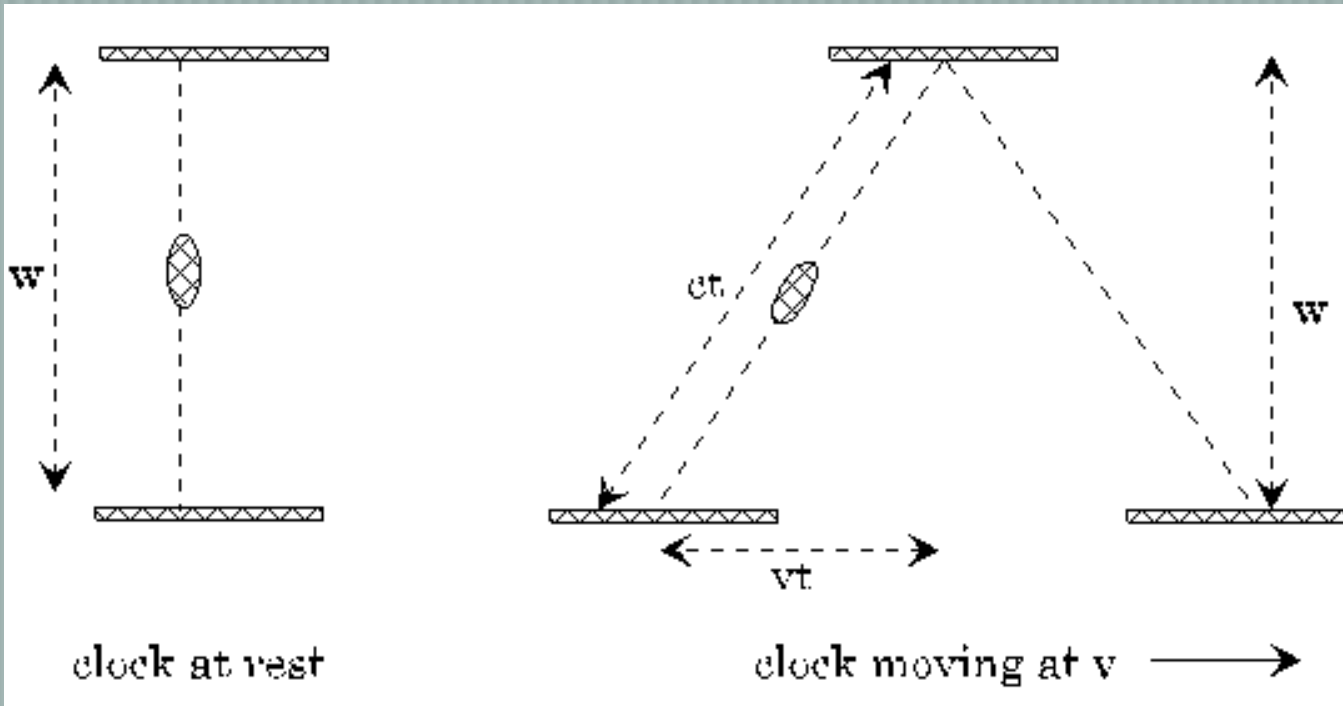
Aber wie können zwei relativ zueinander bewegte Beobachter jeweils die gleiche Lichtgeschwindigkeit messen?

Da $c = \text{const}$; und:

Geschwindigkeit = (Raumintervall/Zeitintervall) -->

Raum und Zeit können keine absolute Bedeutung haben

Spezielle Relativität



$$c^2 t'^2 = v^2 t'^2 + w^2$$

$$t'^2 (c^2 - v^2) = w^2$$

$$t' = \frac{w/c}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma \times t$$

1) Verlangsamung der Zeit, Verkürzung des Raums

2) Modifizierung von Newton's Bewegungsgesetzen
'Relativistische' Masse - "Ruheenergie"

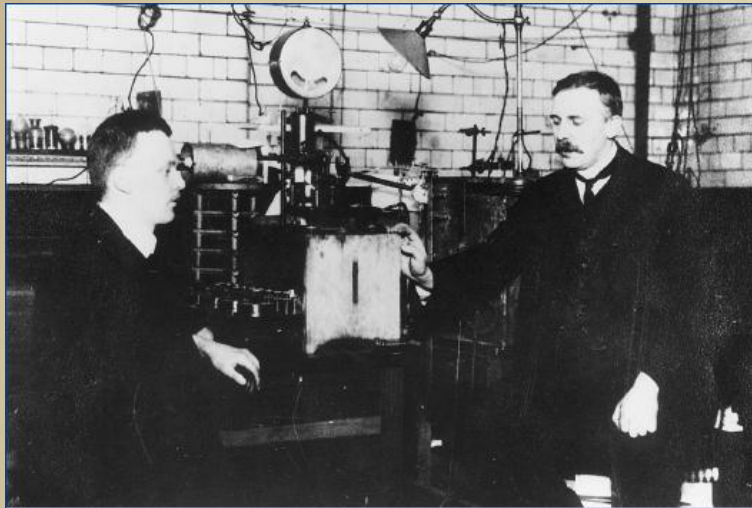
$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$$

$$E = mc^2$$

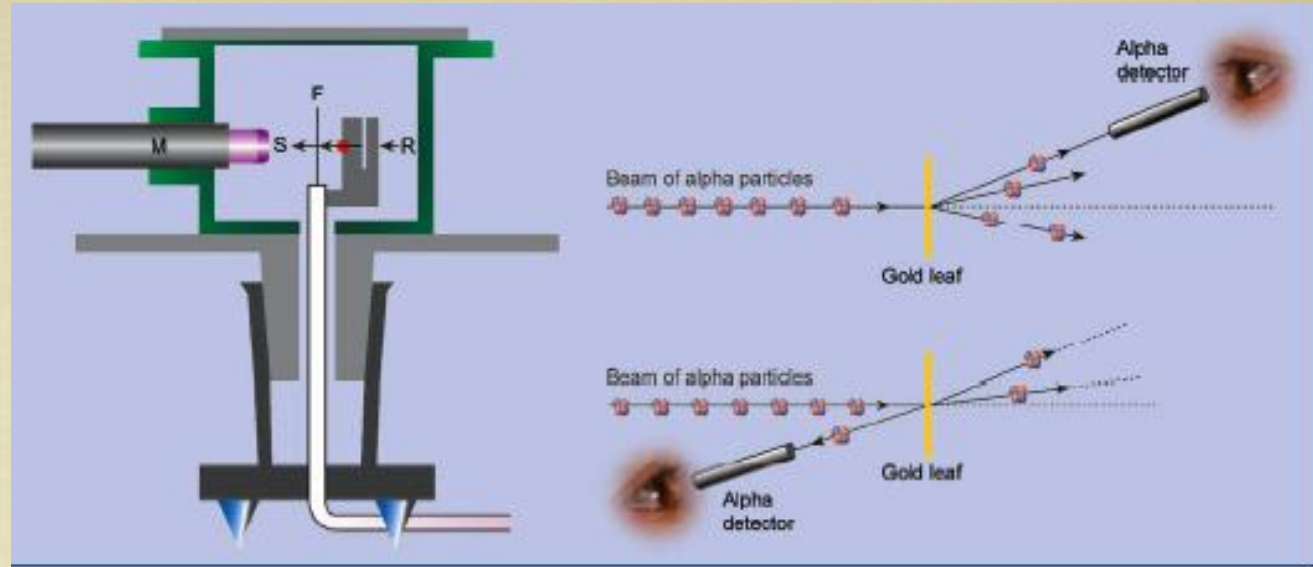
Naturgesetze müssen Raum- und Zeit-Koordinaten gleich behandeln

TEILCHEN

1911



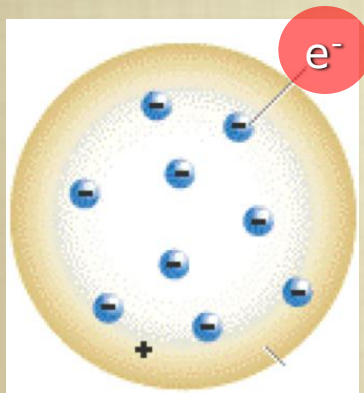
Ernest Rutherford (r) und Hans Geiger (l)
in Manchester



Geiger und Marsden schiessen “Alpha”-Teilchen auf Goldfolien

1 von 8000 Alpha-Teilchen wird rückwärts gestreut ($> 90^\circ$)

Dies konnte nicht durch das “Rosinenkuchen”-Modell erklärt werden

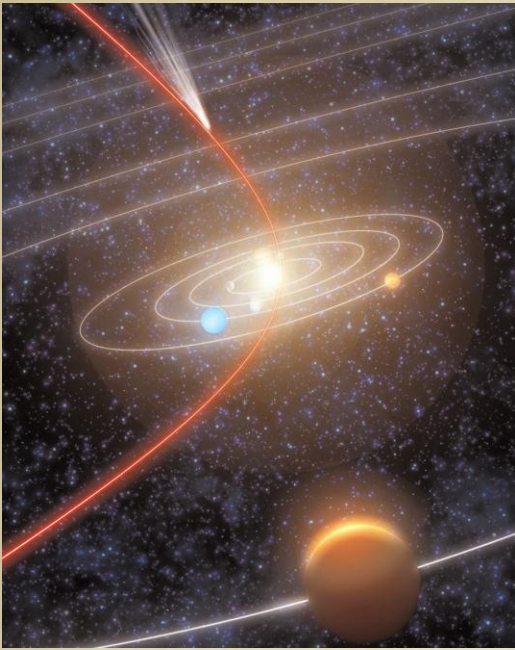


Rutherford: Die gesamte Masse des Atoms ist in einem winzigen Atomkern konzentriert

Grösse: Coulomb-Potential = kinetische Energie: $< 27 \times 10^{-15} \text{ m}$ (korrekter Wert: 7.3)

‘Rosinenkuchen’ Modell
des Atoms
(1904)

Entdeckung des Atomkerns

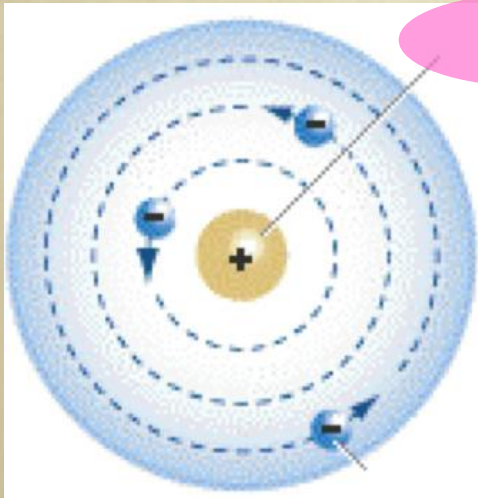


Eine Analogie mit dem Sonnensystem:

Wenn der Atomkern die Grösse der Sonne hätte, wäre die Entfernung der Elektronen ca.

1000 x grösser als die Entfernung Erde - Sonne

Atome sind extrem 'leer'



Kern

NEUE PROBLEME:

? Wie können Elektronen den Kern umkreisen ohne Strahlung auszusenden?

? Woraus besteht der Atomkern?

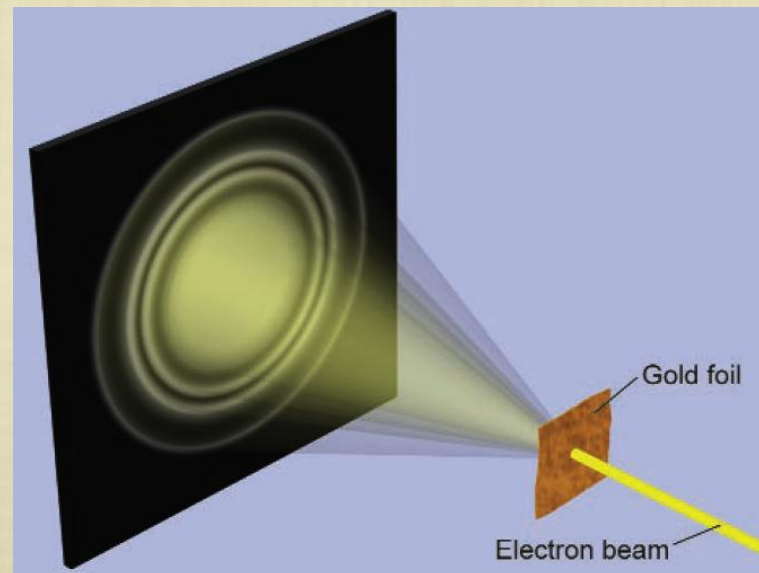
Es brauchte noch weitere 10 Jahre bevor man anfing, die mysteriösen Regeln der atomaren Welt zu verstehen.



Teilchen haben Welleneigenschaften

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

Louis de Broglie (1924)



*Diese Hypothese wurde 1927 durch die Beobachtung von Elektronenbeugung bestätigt (Davisson/Germer)



Heisenberg (1925)

Unschärferelation

Wenn Teilchen auch Welleneigenschaften haben, dann können Ort und Impuls nicht gleichzeitig präzise messbar sein.

Ort-Impuls-Unschärfe:

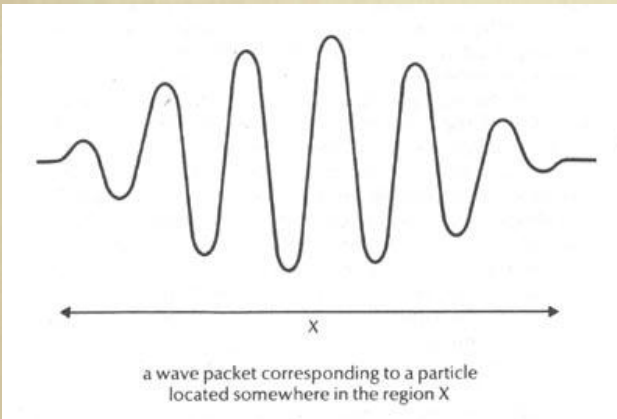
$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

Analogie:

Ein 'reiner' Ton der Frequenz f bekommt eine 'Unschärfe' Δf wenn er nur über das Zeitintervall Δt erklingt (Fourier-Transformation):

$$\Delta f \Delta t \sim 1$$

$$h \Delta f \Delta t = \Delta E \Delta t \sim h$$



Energie-Zeit-Unschärfe:

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar$$



Schrödinger
1926

SCHRÖDINGER: WELLENGLEICHUNG

WELLENVERHALTEN VON TEILCHEN ->

BESCHREIBUNG DURCH WELLENFUNKTION ψ

Interferenz (mathematisch) am einfachsten durch komplexe Funktionen beschrieben (Phase)

Wie hat Schrödinger seine Gleichung erraten?

Von der klassischen zur Quanten- Mechanik

Energie E eines Teilchens mit Masse m ,
Impuls p , in einem Potential $V(r)$

$$E = \frac{p^2}{2m} + V(r)$$

Gesamtenergie = kinetische + potentielle Energie

Übersetzung von Teilchen- in Wellensprache:

Eine Welle wird beschrieben durch eine Funktion im Raum $\psi(\mathbf{x})$ mit Kreisfrequenz $\omega = 2\pi\nu$ und Wellenvektor $\vec{k} = 2\pi / \lambda$

$$\psi(\vec{x}) = Ae^{i(\vec{k}\vec{x} - \omega t)}$$

De Broglie Impuls einer "Teilchenwelle":

$$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{h}{2\pi} \cdot \frac{2\pi}{\lambda} = \hbar k$$

Energie einer "Teilchenwelle":

$$E = h\nu = \frac{h}{2\pi} 2\pi\nu = \hbar\omega$$

$$\vec{p} = \hbar \vec{k}$$

$$\psi(\vec{x}) = A e^{i(\vec{k}\vec{x} - \omega t)}$$

“Frage” die Wellenfunktion nach ihrem Impuls:

$$-i\hbar \nabla \psi = -i\hbar (i\vec{k}\psi) = \hbar \vec{k}\psi$$

$$\vec{p} \rightarrow -i\hbar \vec{\nabla}$$

$$E = \hbar\omega$$

$$\psi(\vec{x}) = Ae^{i(\vec{k}\vec{x} - \omega t)}$$

Genauso: die Energie ...

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi = i\hbar(-i\omega\psi) = \hbar\omega\psi$$

$$E = i\hbar \frac{\partial}{\partial t}$$

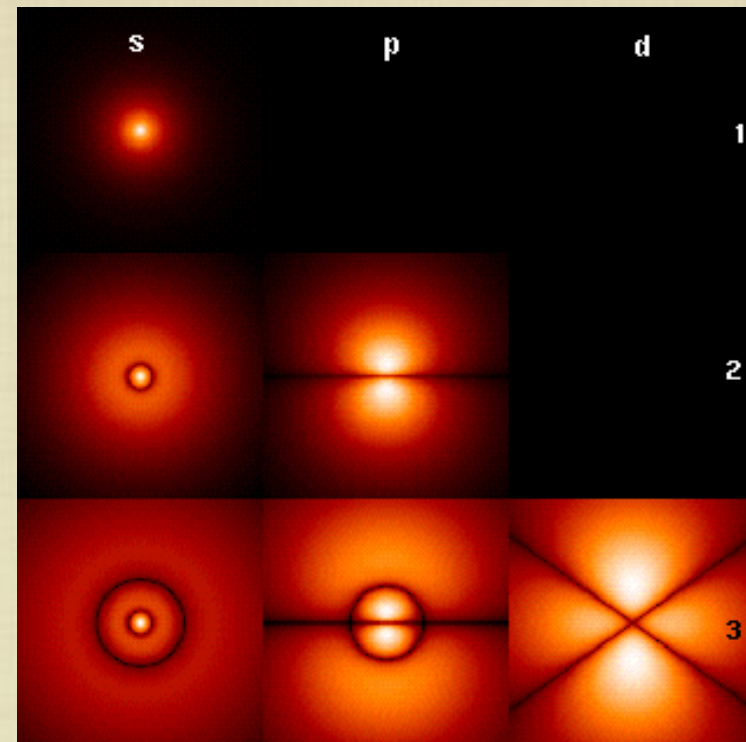
$$E = \frac{p^2}{2m} + V(r) \quad E \rightarrow i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \quad \vec{p} \rightarrow -i\hbar \vec{\nabla}$$

Schrödinger Gleichung:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi = -\frac{\hbar^2 \nabla^2}{2m} \psi + V(r)\psi$$



Elektronen bilden 'stehende Wellen'



Interpretation (Born, 1927):

ψ = Wahrscheinlichkeitsamplitude

$|\psi|^2$ = Wahrscheinlichkeit

Stimmt sehr gut wenn

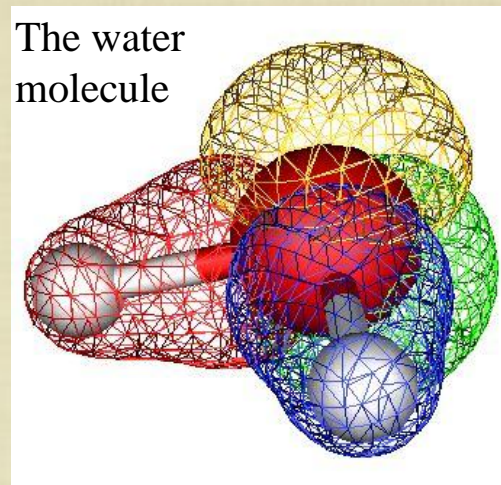
... $v \ll c$

Quantenphysik erklärt die Existenz von 'Struktur' in der Natur

Chemische Bindungen reflektieren die Struktur der Orbitale



Linus Pauling (1928)



1928: Atome, Moleküle, und der Grund für makroskopische Formen waren verstanden.

Quantentheorie + Spezielle Relativitätstheorie = ??

Naturgesetze müssen Raum- und Zeit Koordinaten gleich behandeln

Die 'Wurzel' aus der relativistischen Energie-Impuls-Beziehung

$$E^2 = p^2 + m^2 \rightarrow$$

$$E = \pm(\alpha \cdot p) + \beta m$$

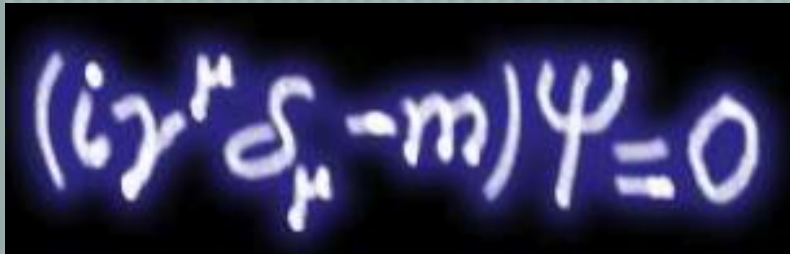


Paul A.M. Dirac
(1928)

Zum Vergleich: die nicht-relativistische Schrödinger-Gleichung

$$E = \frac{p^2}{2m} \rightarrow i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi$$

Quantentheorie + Sp. Rel.theorie = Dirac-Gleichung


$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi = 0$$

$\psi =$

Elektron - Spin up

Elektron - Spin down

Positron - Spin up

Positron - Spin down

- 1) **ANTITEILCHEN (neu !)**
- 2) **SPIN 1/2 (Erklärung)**
- 3) **SPIN 1/2 --> PAULI PRINZIP (1940)**

Zwei wichtige **Voraussagen** von Dirac

Die Wellenfunktion hat 4 Komponenten (zwei Spin 1/2 Teilchen)

Die 'kleinen' Komponenten beschreiben 'Anti-Teilchen'

Jedes Teilchen besitzt ein Anti-Teilchen



e^+

Felder

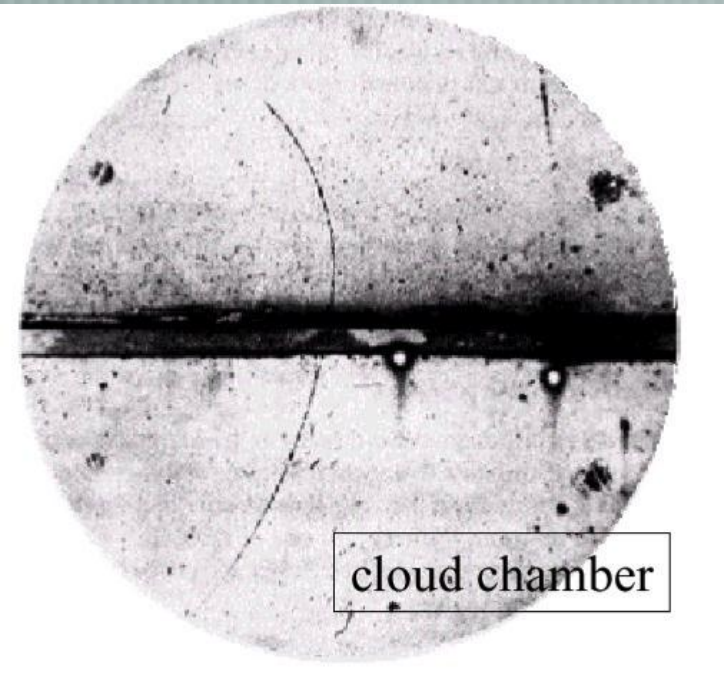
Spezielle Relativität



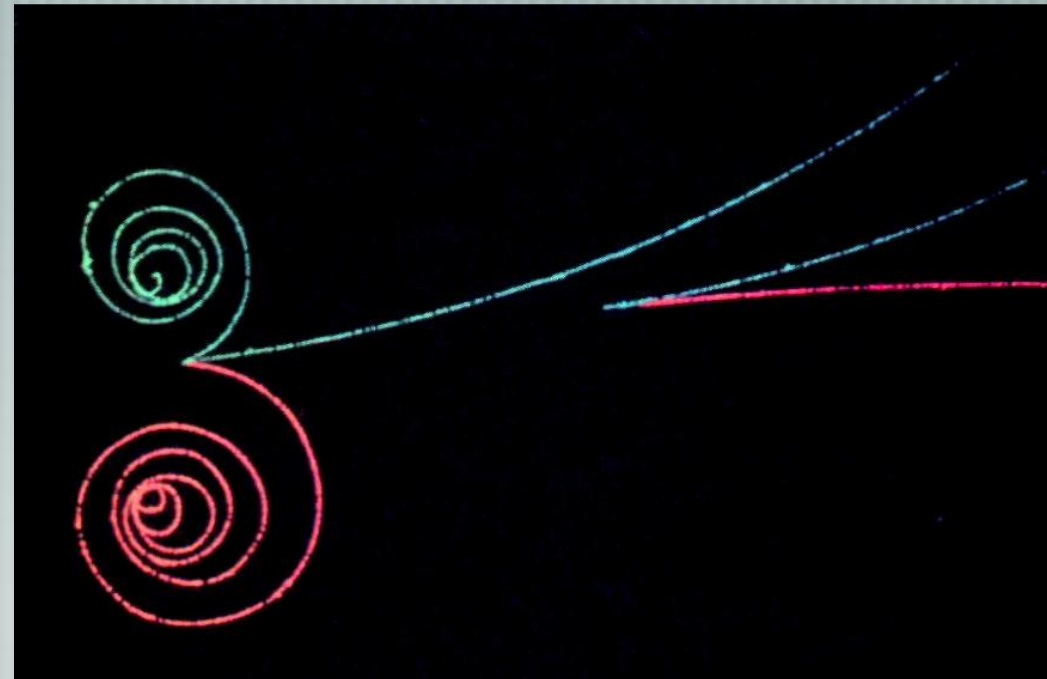
Anderson (1932)

Entdeckung des Positrons

Dirac hatte recht!



Elektron-Positron-Paarerzeugung

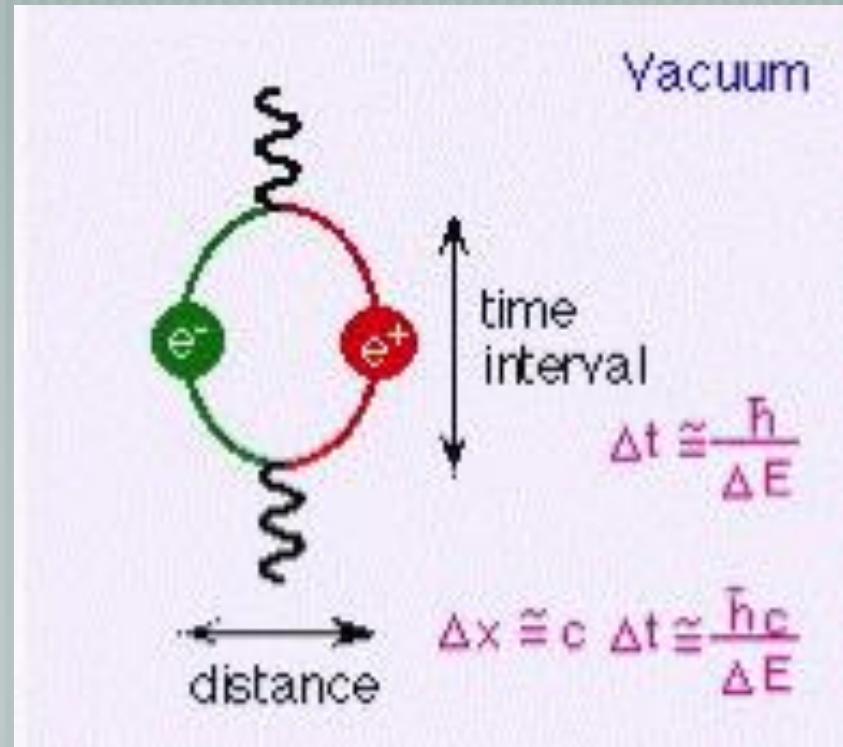


Felder

DAS VAKUUM WAR PLÖTZLICH SEHR KOMPLIZIERT GEWORDEN

Quantenphysik (Unschärferelation!):
physikalische Systeme (z.B. Felder) kennen keine absolute Ruhe

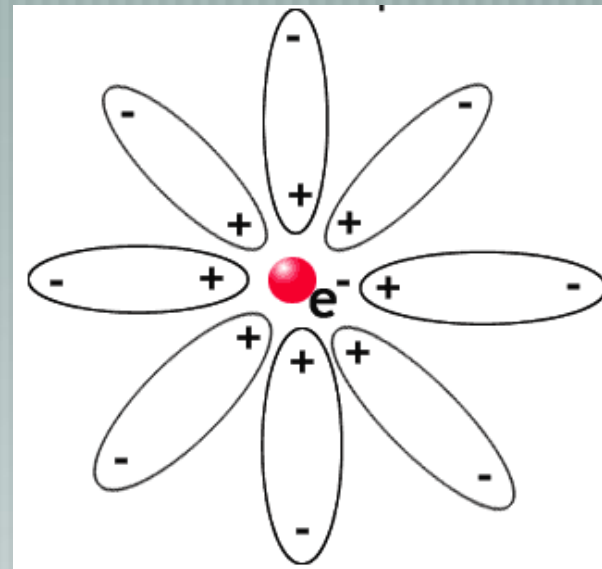
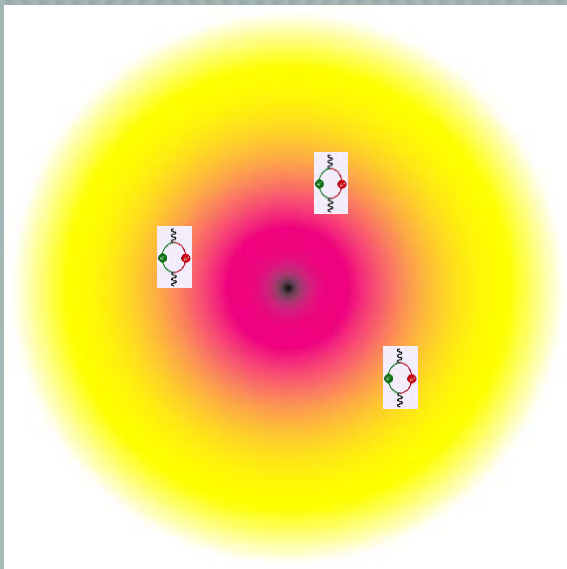
**Selbst im Grundzustand verschwinden die elektromagnetischen Felder nicht völlig:
Fluktuationen des Vakuums produzieren (für kurze Zeit) Elektron-Positron Paare.**



Felder

Wie konnte man die Wechselwirkung zwischen Elektronen und Photonen berechnen?

‘Zweite Quantisierung’ :
Felder werden durch Erzeugungs- und Vernichtungsoperatoren beschrieben



Die ‘nackte’ Ladung des Elektrons polarisiert die Vakuumfluktuationen
(‘Debye shielding’)

Die gemessene Elektronenladung ist die Summe der “nackten” Ladung
und der Polarisation des Vakuums

Felder

1934 - 1948



R. P. Feynman

+ Tomonoga
+ Schwinger

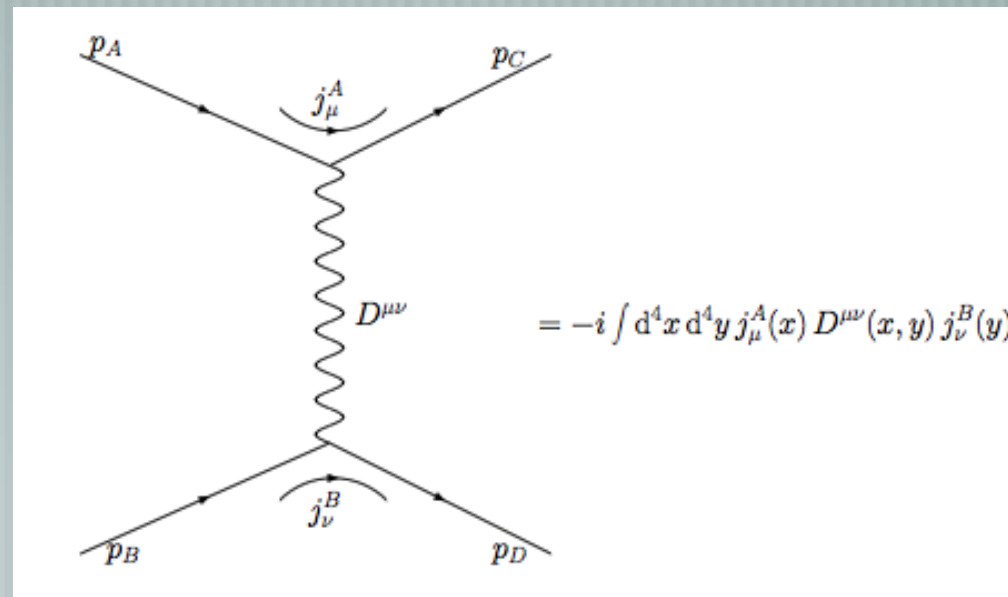
Quanten-Elektrodynamik

“Renormalisation”

Nacktes Elektron + Vakuum-Fluktuationen = beobachtbares Elektron
 (“unendlich” - “unendlich” = “endlich”)

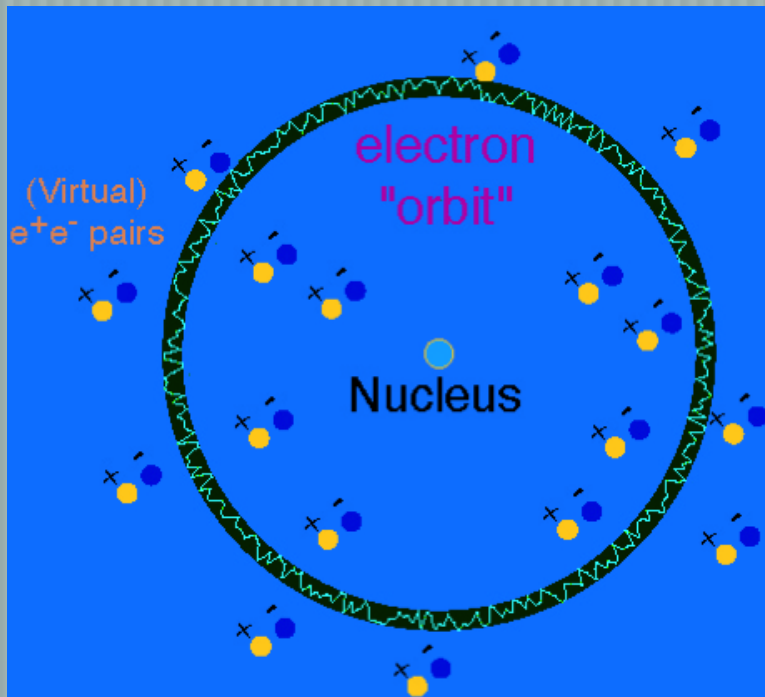
Feynman Diagramme

Präzise Berechnungsvorschriften in graphischer Form



*Solche Graphen werden seitdem auch benutzt,
um andere Teilchen-Wechselwirkungen zu beschreiben.*

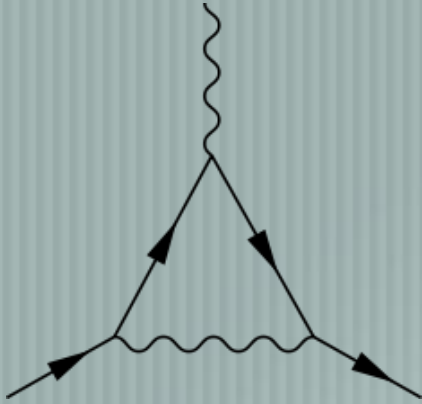
Riesenerfolg der QED: Korrekte Berechnung der Vakuumfluktuationen



Lamb Shift

(Verschiebung atomarer Energieniveaus)

Riesenerfolg der QED: Korrekte Berechnung der Vakuumfluktuationen



Anomalie des magnetischen Moments des Elektron

$$\frac{1}{2}(g - 2) = \frac{1}{2} \frac{\alpha}{\pi} - 0.32848 \left(\frac{\alpha}{\pi} \right)^2 + (1.183 \pm 0.011) \left(\frac{\alpha}{\pi} \right)^3 .$$

Messung:

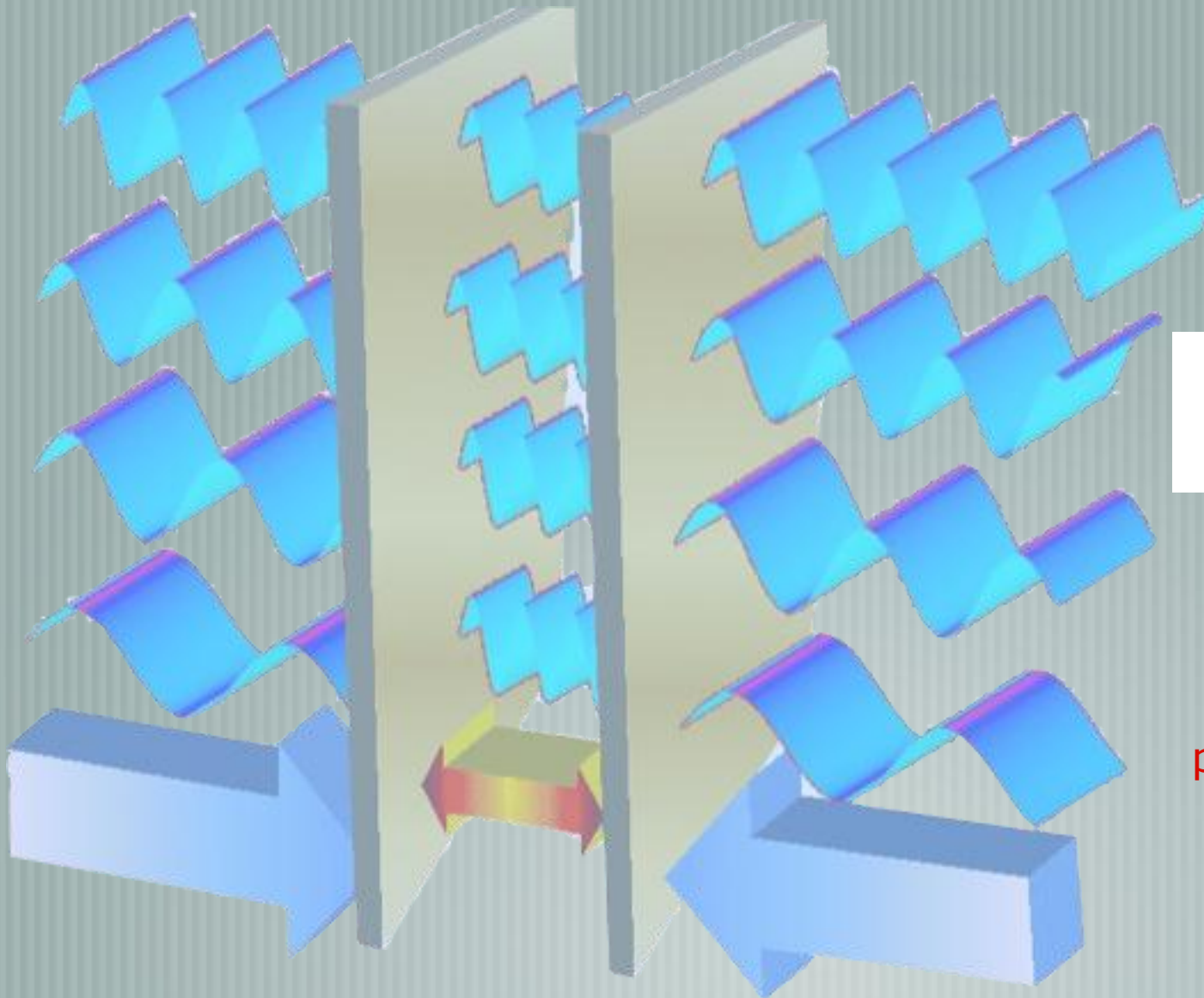
$$a = 0.00115965218073(28)$$

stimmt auf 10 Stellen mit der theoretischen Vorhersage überein

Casimir-Effekt

1948

(Kraft zwischen zwei ungeladenen Metallplatten)



$$p_c = \frac{F_c}{A} = \frac{\hbar c \pi^2}{240 \cdot d^4}$$

$p = 100 \text{ kPa}$ ($d=11 \text{ nm}$)

Felder

Zwei fundamentale Kräfte mit gleichem Entfernungsgesetz:

$$F_G = G m_1 m_2 \times \frac{1}{r^2}$$

$$F_C = Q_1 Q_2 \times \frac{1}{r^2}$$



Gravitation



Elektromagnetismus

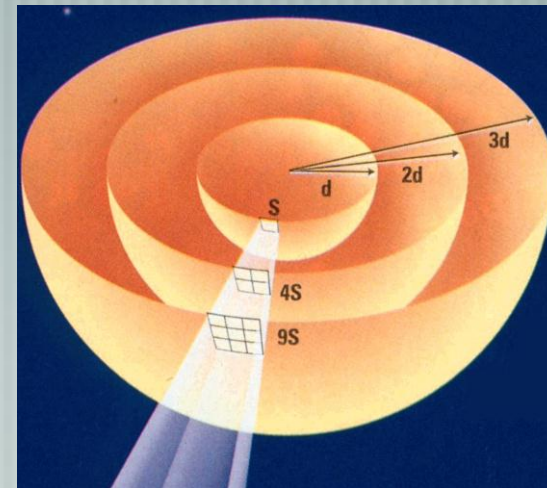
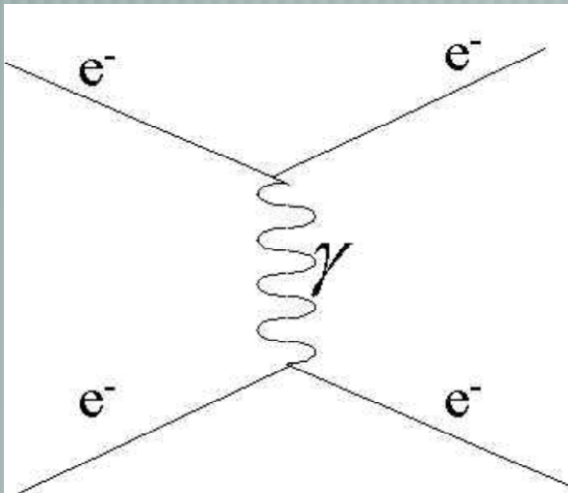
Gemeinsamkeit: $1/r^2$ Gesetz

Unterschied: die Wechselwirkungskonstanten sind extrem verschieden
(36 Größenordnungen für zwei Protonen)

Felder

QED: Elektrisch geladene Teilchen wechselwirken durch den Austausch von Photonen

- 1) Elektrische Ladungen senden virtuelle Photonen aus
- 2) Das **$1/r^2$ Gesetz** resultiert aus der Wahrscheinlichkeit, ein anderes Teilchen im Abstand r zu treffen (Korrelation mit der 3-Dimensionalität des Raums!)



$1/r^2$ Gesetz

Ein Modell für die Beschreibung der anderen Wechselwirkungen?