

TEILCHENPHYSIK UND KOSMOLOGIE

im 20. Jahrhundert

Rolf Landua
CERN

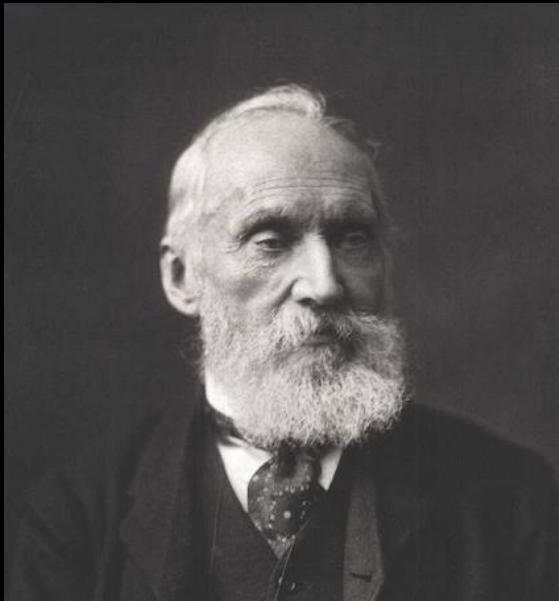
**In drei Vorträgen werden etwa 100 Jahre an Ideen,
Theorien und Experimenten an Ihnen vorbeiziehen.**

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.

‘British Association for the Advancement of Science’



William Thomson
(Lord Kelvin)

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^-

ν_e

ν_μ

u

d

s

c

τ^-

b

ν_τ

ν Masse

t

Elektromagnetismus

Schwache WW

Starke WW

Brownsche Bewegung

Photon

Radioaktivität

Spezielle Relativität

Quantenmechanik
Welle-Teilchen Dualismus
Spin/Fermion-Boson

Antimaterie

Fermi Theorie

Yukawa
 π
Austausch

QED

P, C, CP Verletzung

Higgs

W Bosons

GUT

EW Vereinigung

SUSY

QCD
Farbladung

Superstrings

W

Z

g

3 Teilchenfamilien

Höhenstrahlung

Allgemeine Relativität

Galaxien; Ausdehnung des Universums

Dunkle Materie

Kernfusion

Big Bang Nukleosynthese

Kosmische Hintergrundstrahlung

Inflation

Inhomogenität der Hintergrundstrahlung (COBE, WMAP)

Dunkle Energie

Detektor

Beschleuniger

Geiger

Wolken

Zyklotron

Synchrotron

Blasenkammer

e^+e^- Ring

Vieldrahtkammer

Strahlkühlung

Prozessrechner

p^+p^- Ring

Moderne Detektoren

WWW

GRID

Teilchen-zoo

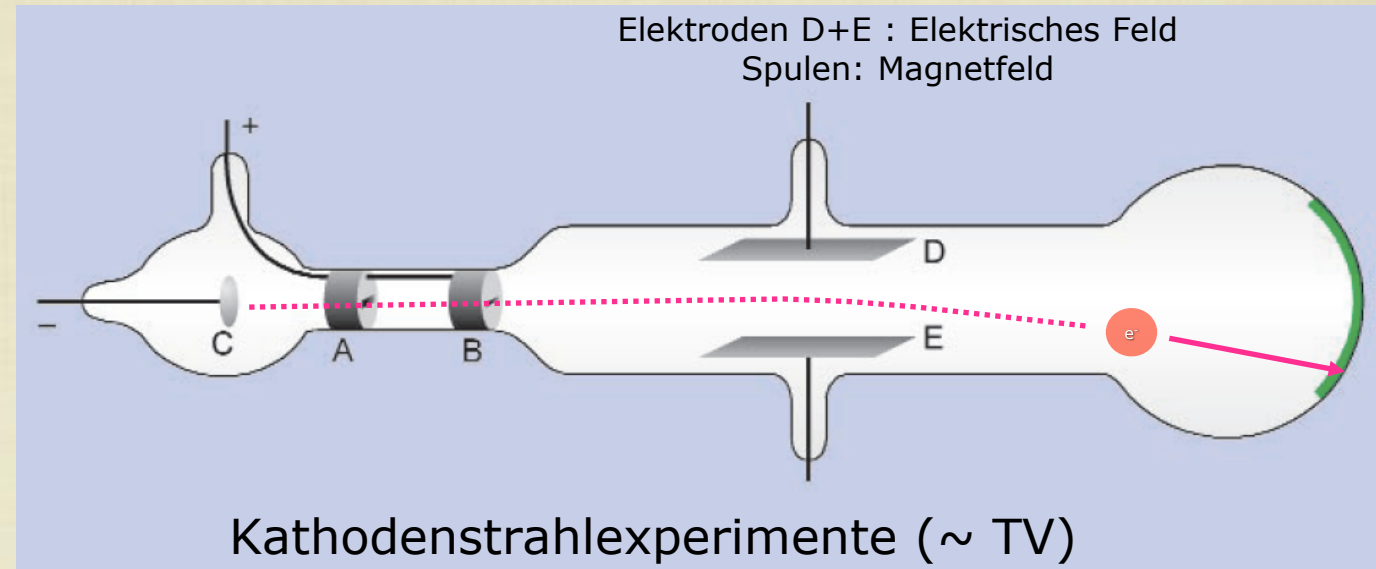
STANDARD MODEL

1



J.J. Thomson

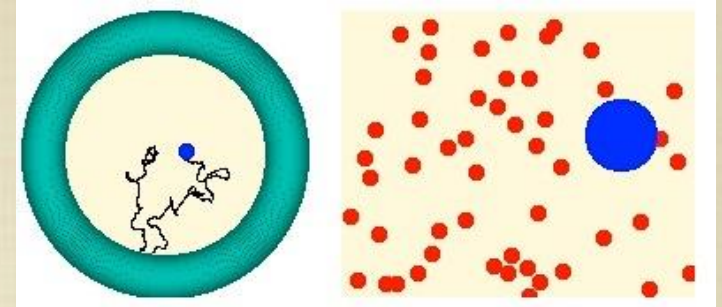
Die Geburtsstunde der Teilchenphysik Entdeckung des Elektrons



**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

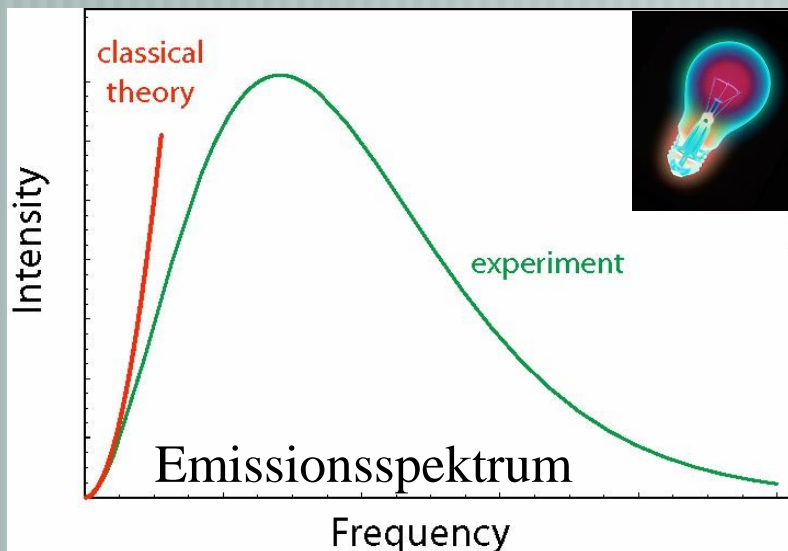
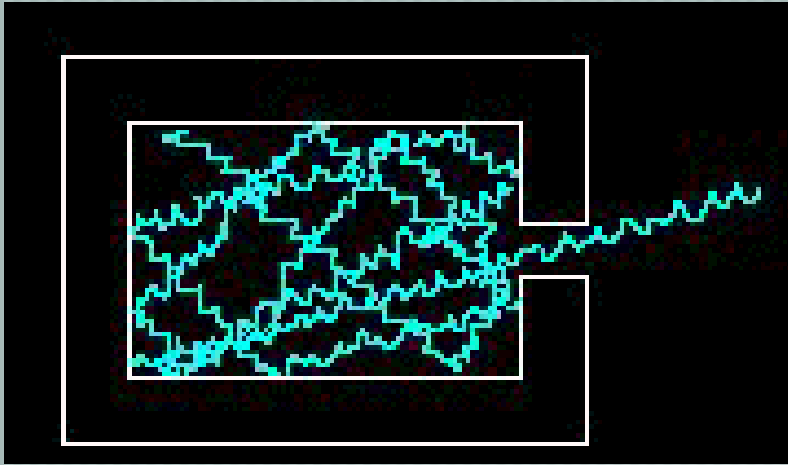
$$\langle x^2 \rangle = \frac{2kTt}{\alpha} = \frac{kTt}{3\pi\eta a}$$

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" = $f(\nu, T)$

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

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

$$I(\nu) \sim \nu^2 \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

h = neue fundamentale Konstante

Felder

1902

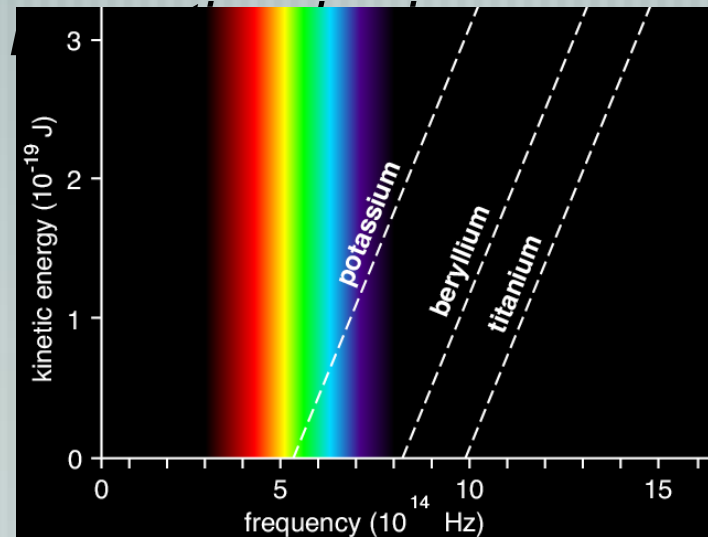


Philipp von Lenard

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



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



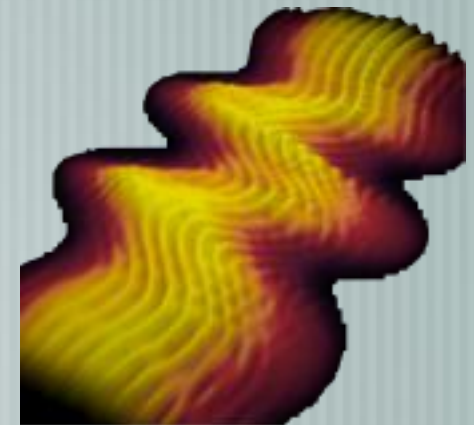
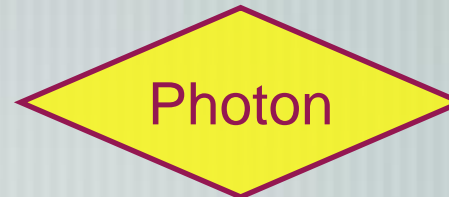
Albert Einstein

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

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

(Erst im Jahr 1917 durch Compton bewiesen)

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



Felder

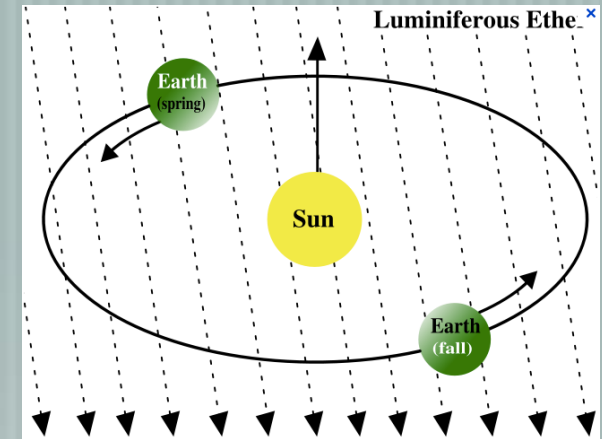
1905

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:

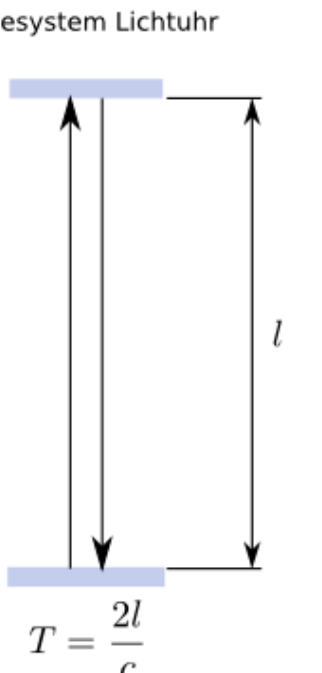
Geschwindigkeit = (Raumintervall/Zeitintervall) -->

Raum und Zeit können keine absolute Bedeutung haben

Spezielle Relativität

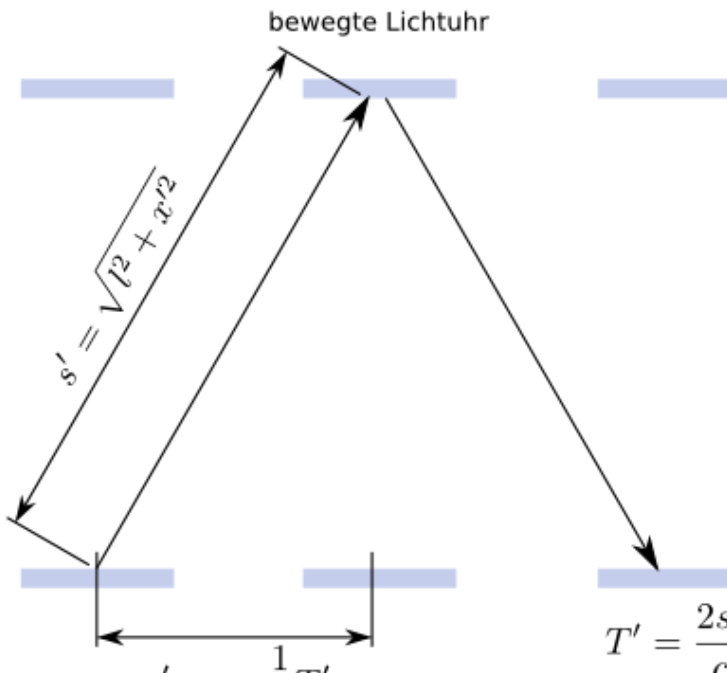
Naturgesetze müssen Raum- und Zeit-Koordinaten gleich behandeln

Ruhesystem Lichtuhr



$T = \frac{2l}{c}$

bewegte Lichtuhr



$s' = \sqrt{l^2 + x'^2}$

$x' = v \cdot \frac{1}{2} T'$

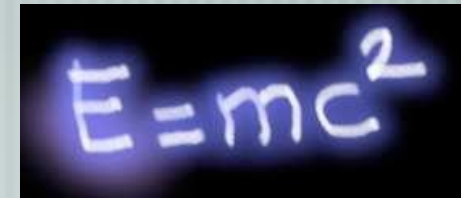
$T' = \frac{2s'}{c}$

$$T' = \frac{2\sqrt{l^2 + \frac{1}{4}v^2 T'^2}}{c}$$
$$T'^2 = 4\frac{l^2}{c^2} + \frac{v^2}{c^2} T'^2$$
$$\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) \cdot T'^2 = 4\frac{l^2}{c^2}$$
$$T' = 2\frac{l}{c} \cdot \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma \cdot T$$

- 1) Verlangsamung der Zeit,
- 2) Verkürzung des Raums
- 3) Modifizierung von Newton

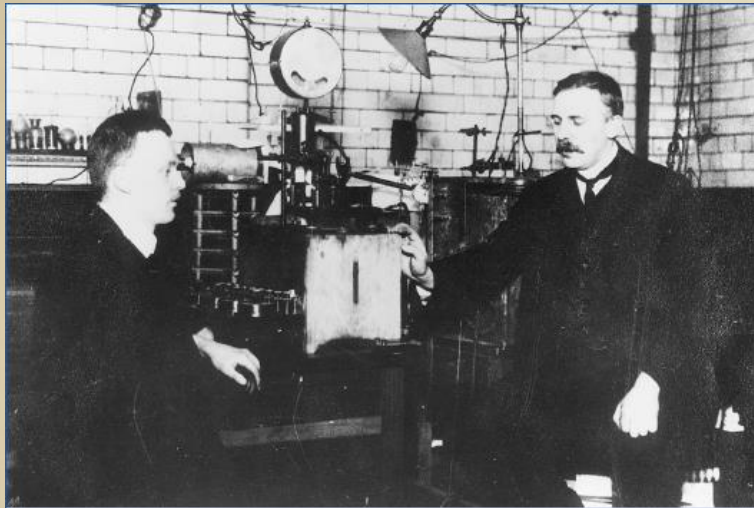
$$E = p^2/2m \rightarrow$$

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

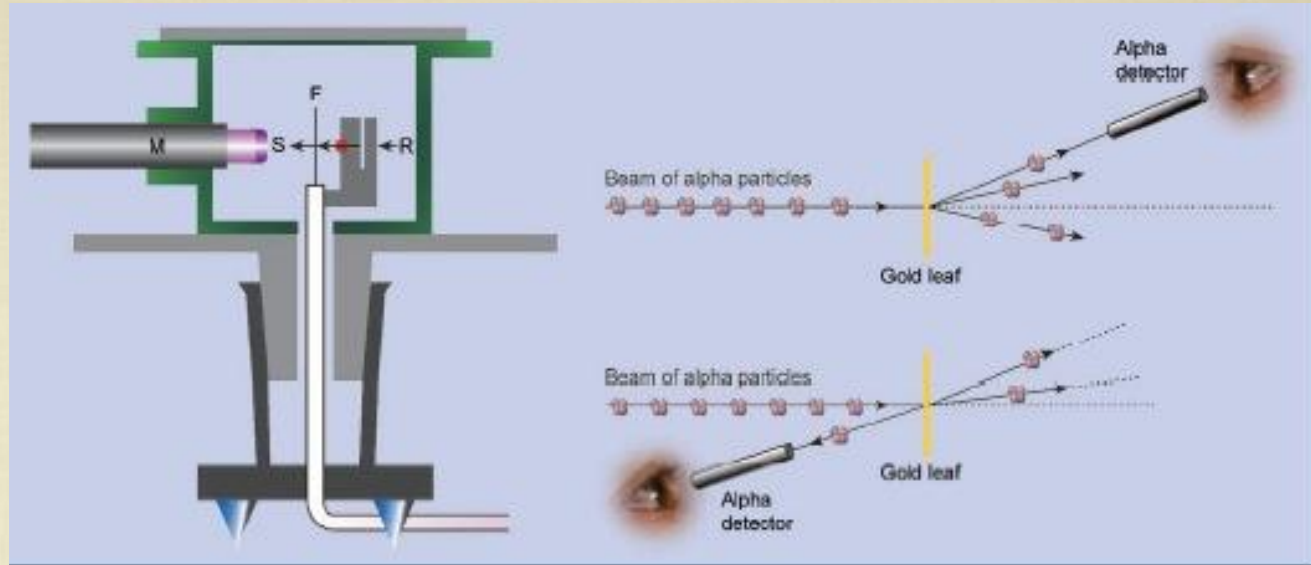

$$E = mc^2$$

TEILCHEN

1911



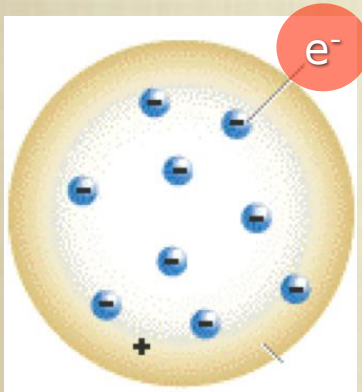
Ernest Rutherford (r) und Hans Geiger (l) in Manchester



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



'Rosinenkuchen' Modell des Atoms (1904)

Gesamte Masse des Atoms in winzigem Atomkern konzentriert

Grösse: $< 27 \times 10^{-15}$ m (korrekter Wert: 7.3)

Entdeckung des Atomkerns

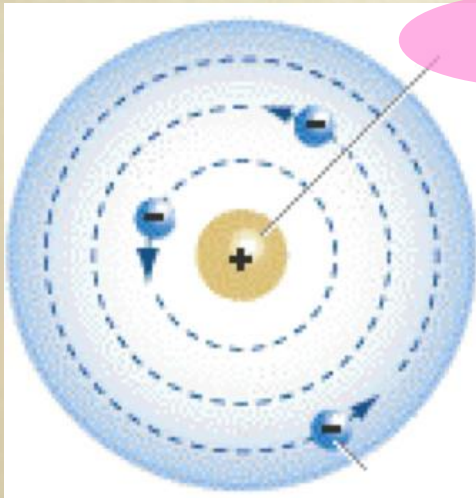


Eine Analogie mit dem Sonnensystem:

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?

Rutherford-Modell
des "leeren" Atoms

J. J. Balmer (1885) analysiert das Emissionsspektrum von Wasserstoff

656.210 nm

486.074 nm

434.010 nm

410.12 nm



Balmer's empirische Formel:

$$\lambda = \frac{hm^2}{(m^2 - n^2)}$$

Niels Bohr besucht Rutherford im Jahr 1913

Anwendung der Planck'schen Quantenhypothese im Atom !

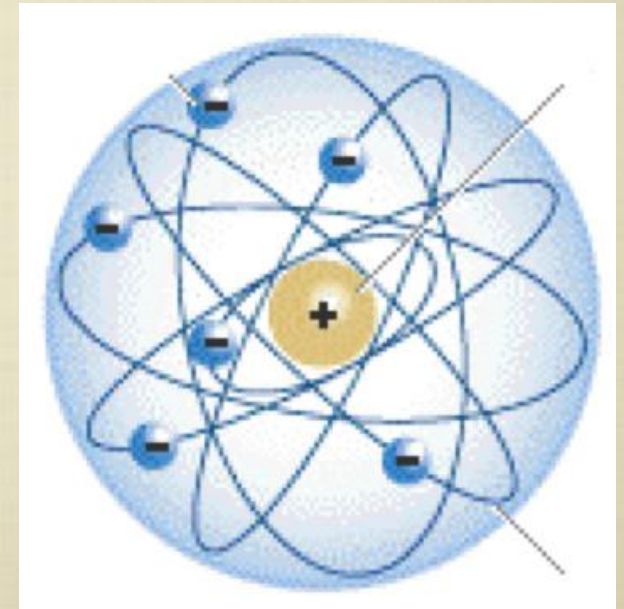
- Wenn der Drehimpuls quantisiert ist:

$$\mathbf{L} = n \cdot \hbar = n \cdot \frac{h}{2\pi}$$

dann

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

- Elektronen 'strahlen' nur bei Übergängen
- Photonen-Energie = Energiedifferenz zwischen n-Niveaus



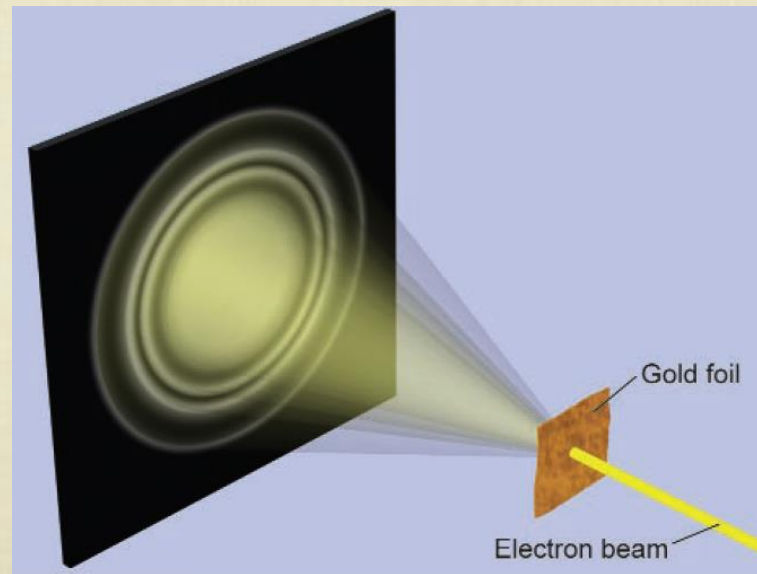
Es brauchte noch weitere 10 Jahre bevor man anfing, die mysteriösen Regeln der atomaren Welt zu verstehen.

Teilchen haben Welleneigenschaften



Louis de Broglie (1924)

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



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



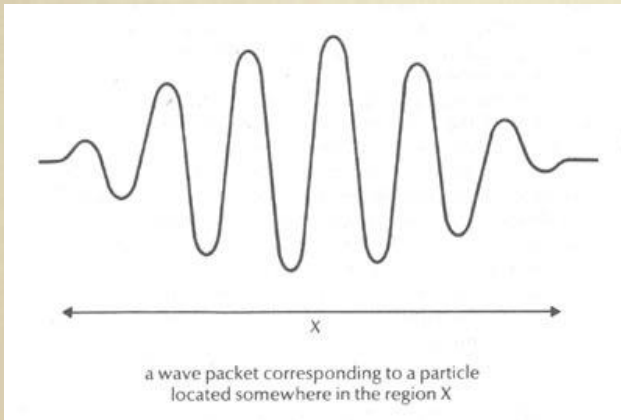
Heisenberg (1925)

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":

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

$$p = \hbar k$$

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

“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 ...

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

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

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

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

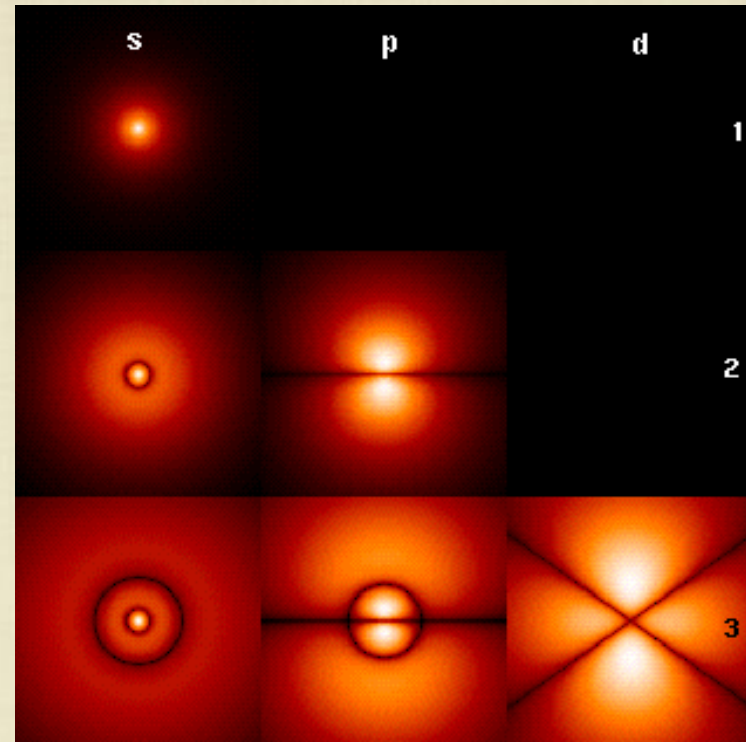
$$\vec{p} \rightarrow -i\hbar \vec{\nabla}$$

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

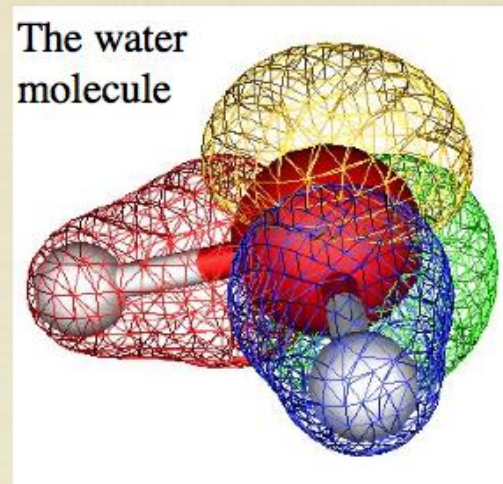
... $v \ll c$

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

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

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

$\alpha, \beta = (4 \times 4)$ matrices

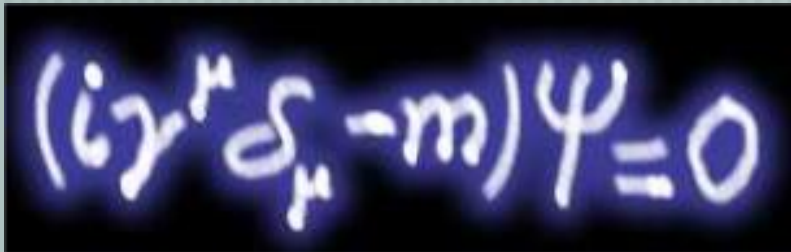


Paul A.M. Dirac
(1928)

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

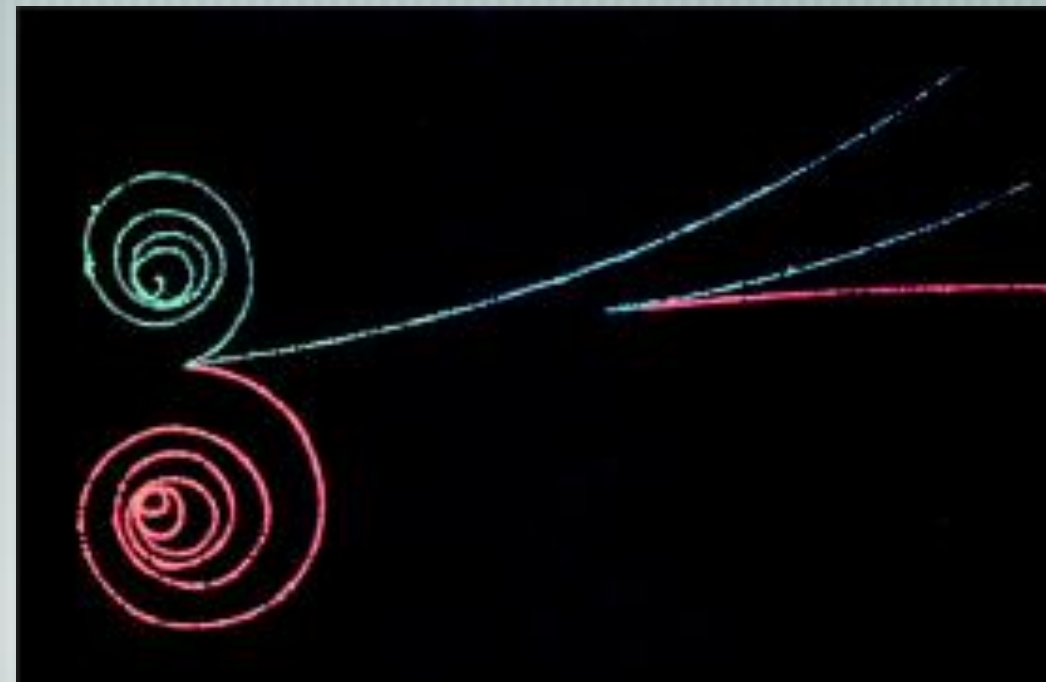
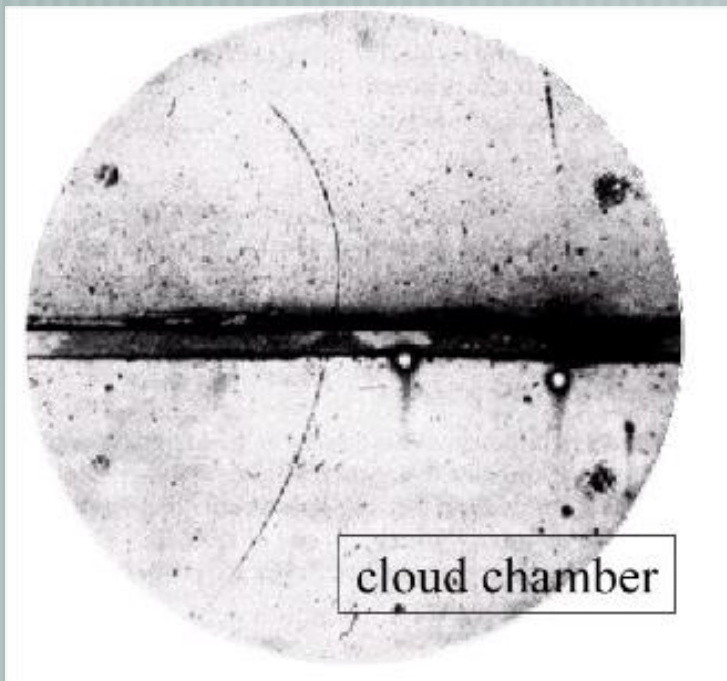


Anderson (1932)

Entdeckung des Positrons

Dirac hatte recht!

Elektron-Positron-Paarerzeugung

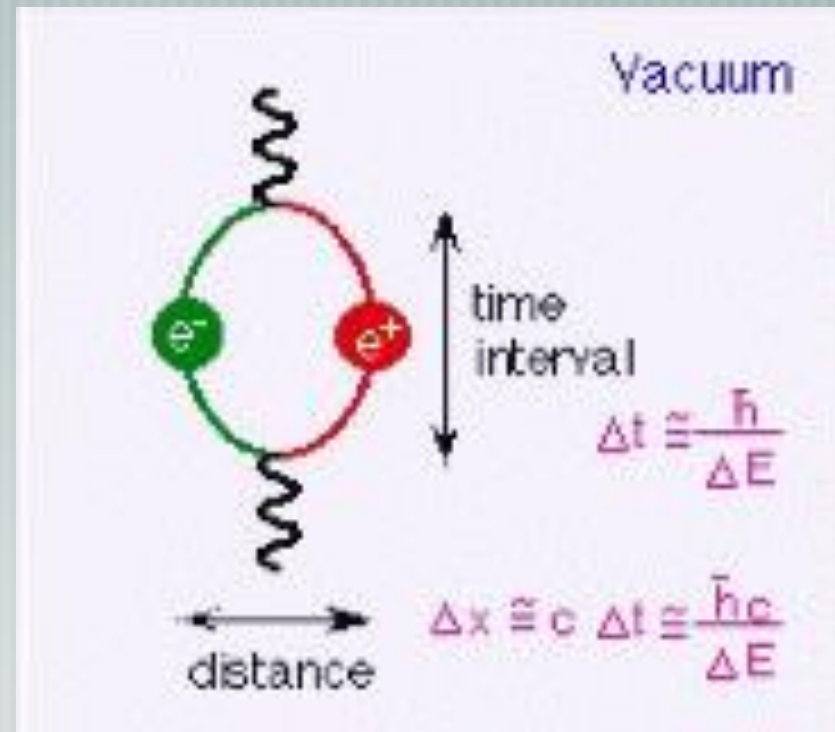
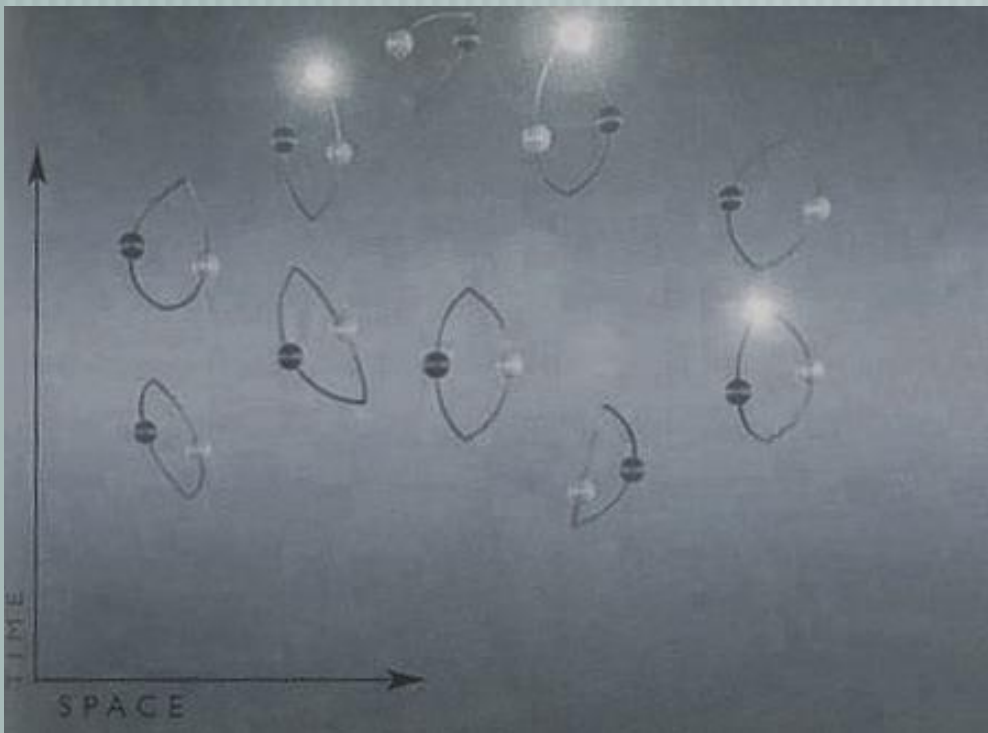


Die Quantisierung der Felder

DAS VAKUUM WAR PLÖTZLICH SEHR KOMPLIZIERT GEWORDEN

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

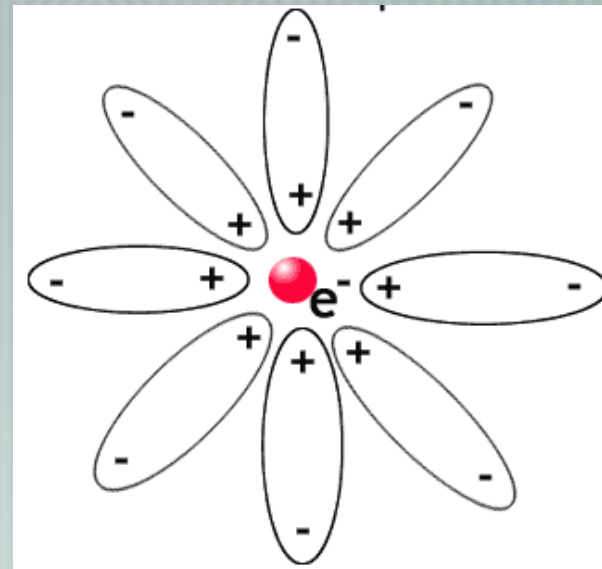
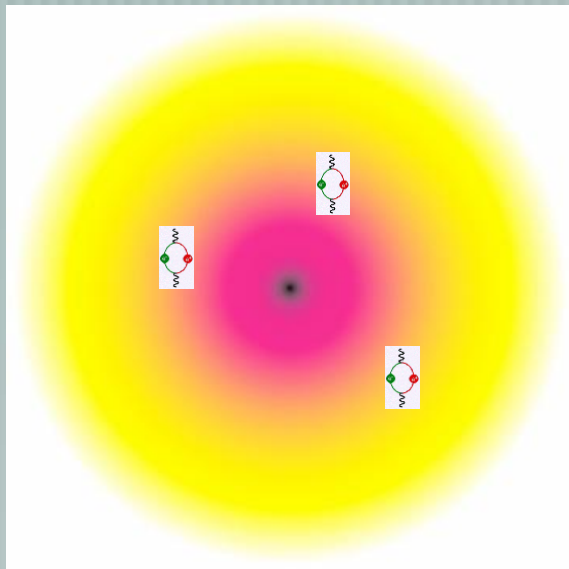
**Selbst im Grundzustand verschwinden die elektromagnetischen Felder nicht völlig:
Fluktuationen des Vakuums produzieren (für kurze Zeit) Elektron-Positron Paare.**



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 Vakuumperturbationen ('Debye shielding')

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

Felder

1934 - 1948



R. P. Feynman

Schwinger
Tomonaga
Dyson

Quanten-Elektrodynamik

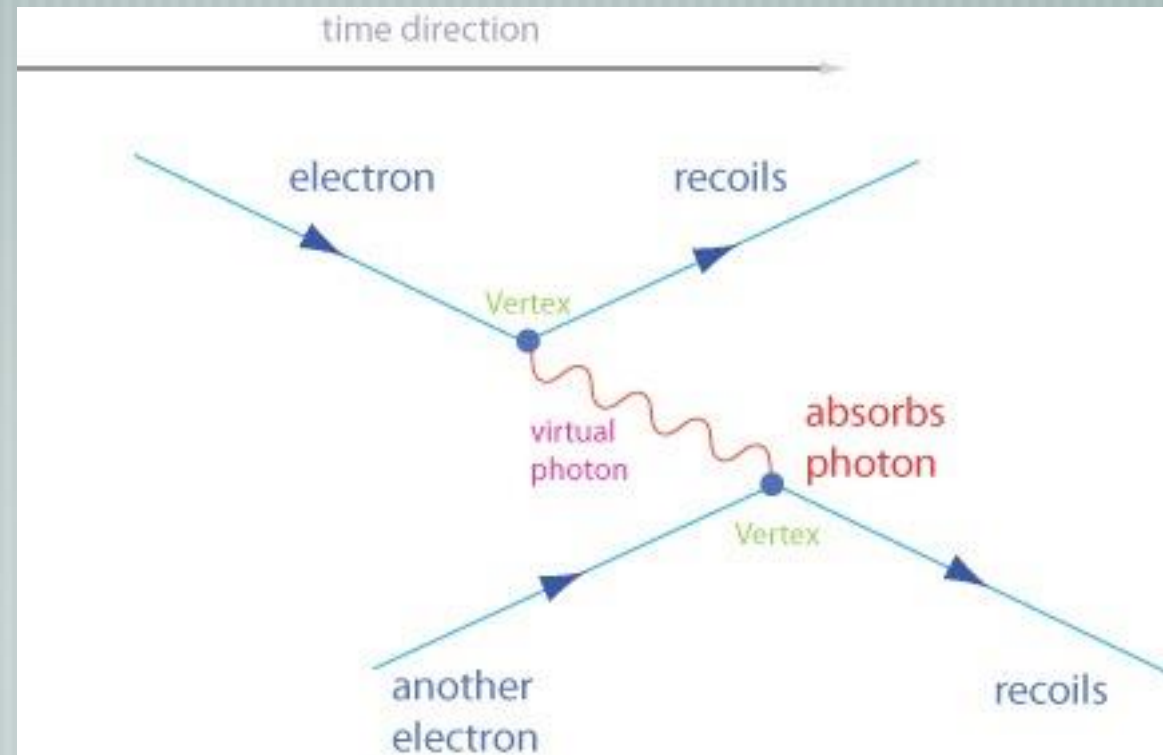
“Renormalisation”

Nacktes Elektron + Vakuum-Fluktuationen = beobachtbares Elektron

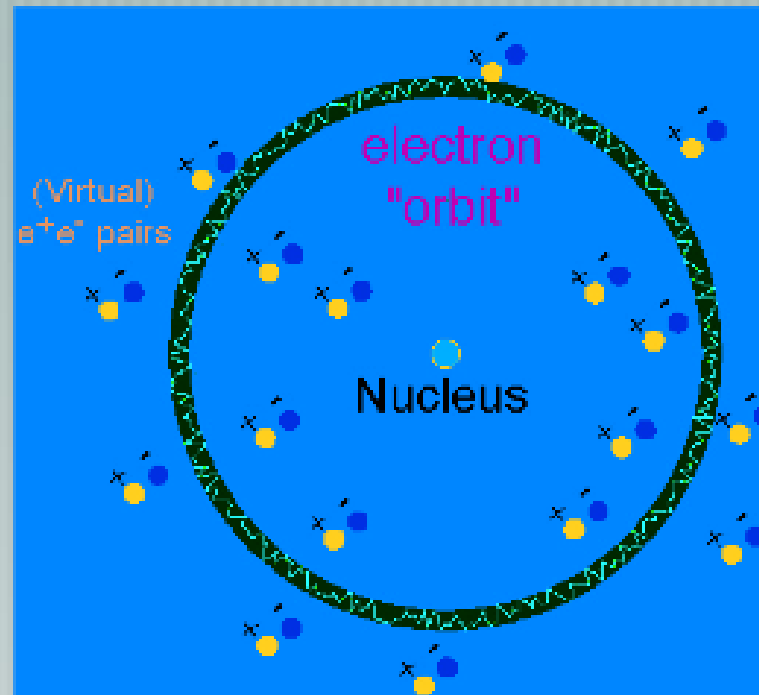
(“unendlich” - “unendlich” = “endlich”)

Feynman Diagramme

Präzise Berechnungsvorschriften in graphischer Form



Riesenerfolg der QED: Korrekte Berechnung der Vakuumfluktuationen



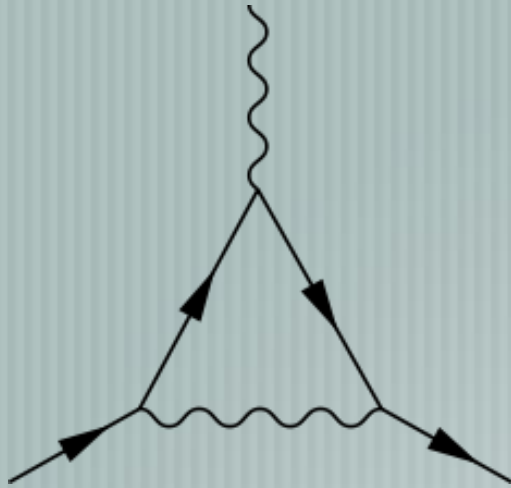
Lamb Shift

(Verschiebung atomarer Energieniveaus (2s, 2p))

Felder

1948

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:

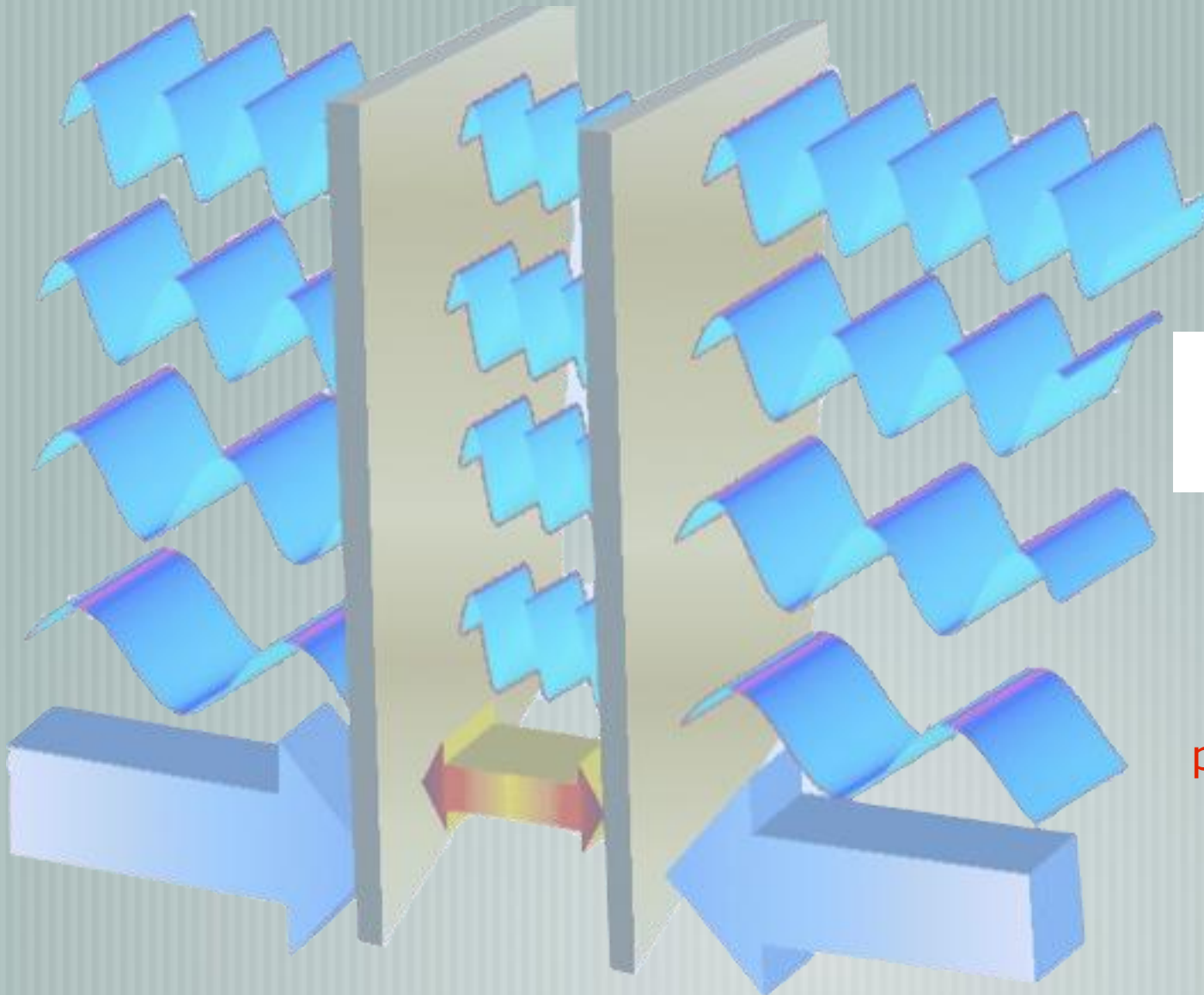
$$a = 0.00115965218073(28)$$

stimmt auf 10 Stellen mit der theoretischen Vorhersage überein

Casimir-Effekt

1948

(Kraft zwischen zwei ungeladenen Metallplatten)



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

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