

# **TEILCHENPHYSIK UND KOSMOLOGIE**

im 20. Jahrhundert

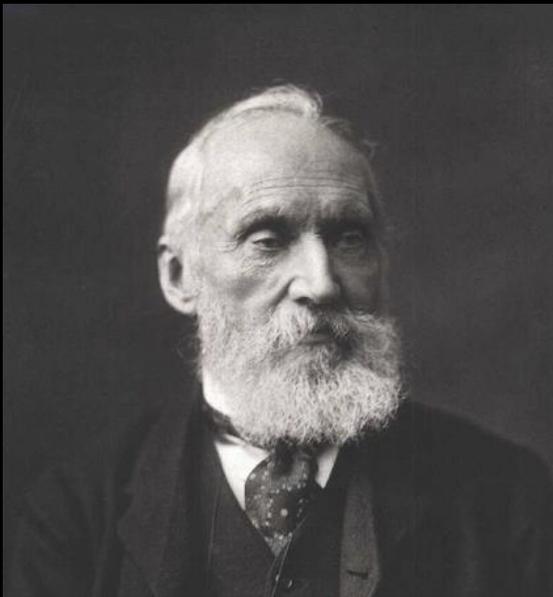
Rolf Landua  
CERN

**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)

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

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

$e^-$

$e^+$

$\mu^-$

$\tau^-$

$\nu_e$

$\nu_\mu$

$\tau^-$

$\nu_\tau$

$\nu$  Masse

Atom

Kern

$p^+$

$n$

$\pi^+$

$\pi^-$

$p^-$

$\nu_e$

$\nu_\mu$

$u$

$d$

$s$

$c$

$b$

$t$

$t$

$t$

$t$

$t$

$t$

Brownsche Bewegung

Spezielle Relativität

Quantenmechanik  
Welle-Teilchen Dualismus  
Spin/Fermion-Boson

Antimaterie

QED

Higgs

GUT

SUSY

Superstrings

3 Teilchenfamilien

Elektromagnetismus

Schwache WW

1  
Starke WW

Photon

Radioaktivität

P, C, CP Verletzung

W Bosons

EW Vereinigung

GUT

SUSY

Superstrings

QCD Farbladung

W

Z

g

Höhenstrahlung

Galaxien; Ausdehnung des Universums

Dunkle Materie

Kosmische Hintergrundstrahlung

Inhomogenität der Hintergrundstrahlung (COBE, WMAP)

Dunkle Energie

Allgemeine Relativität

Kernfusion

Big Bang Nukleosynthese

Inflation

Detektor

Beschleuniger

Geiger

Wolken

Blasenkammer

Vieldrahtkammer

Prozessrechner

Moderne Detektoren

GRID

Zyklotron

Synchrotron

$e^+e^-$  Ring

Strahlkühlung

$p^+p^-$  Ring

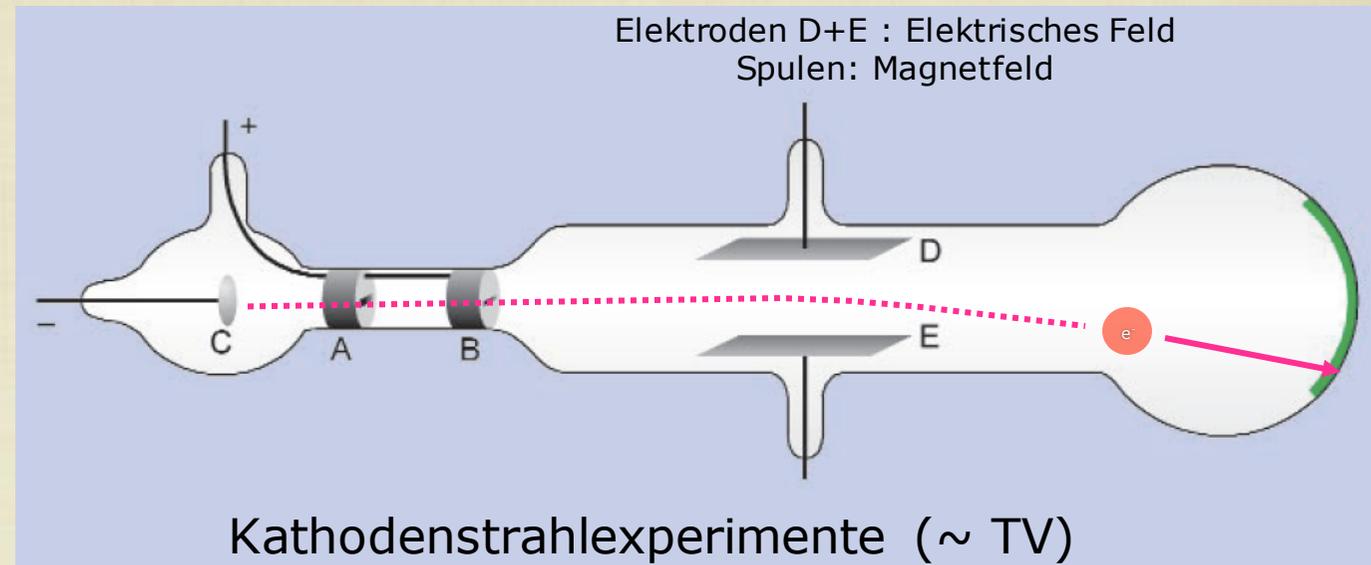
WWW

GRID



J.J. Thomson

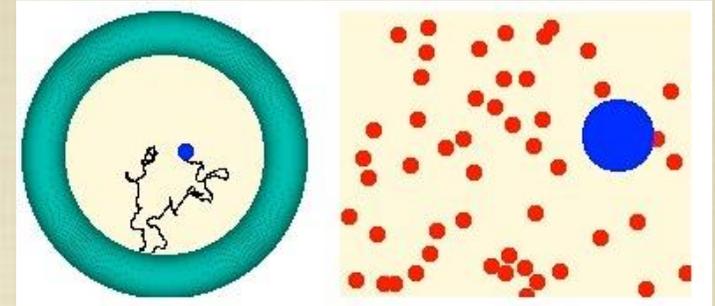
## Die Geburtsstunde der Teilchenphysik Entdeckung des Elektrons



**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

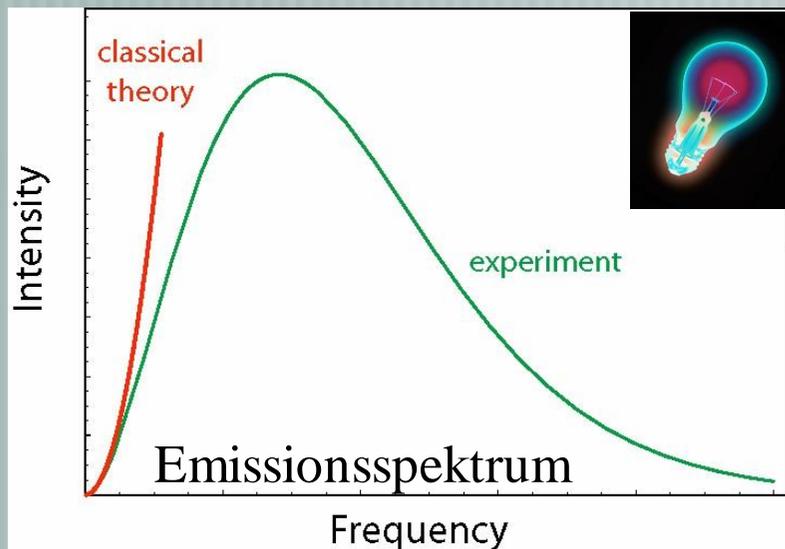
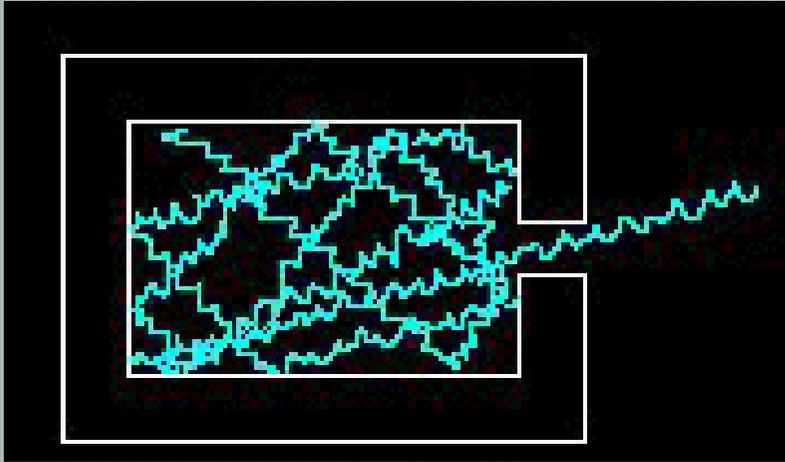
$$\langle x^2 \rangle = \frac{2kTt}{\alpha} = \frac{kTt}{3\pi\eta a}$$

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" =  $f(\nu, T)$

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

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

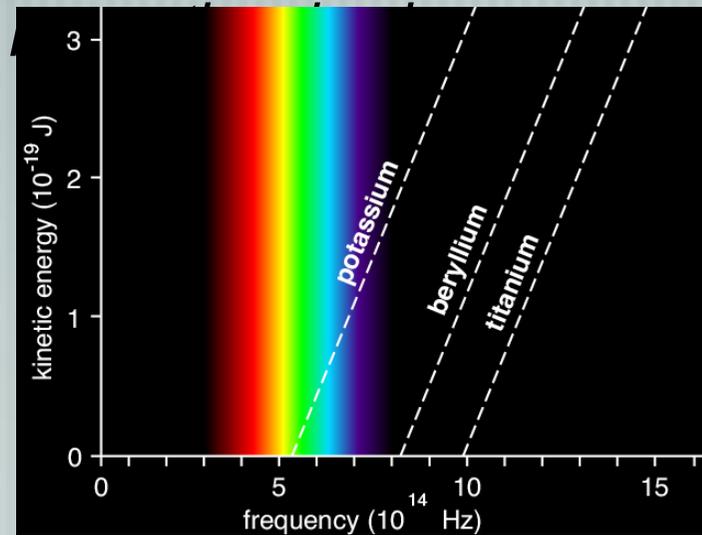


Philipp von Lenard

## 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



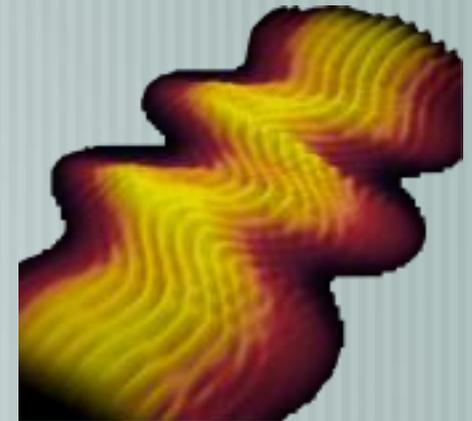
Albert Einstein

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

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

(Erst im Jahr 1917 durch Compton bewiesen)

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



# Felder

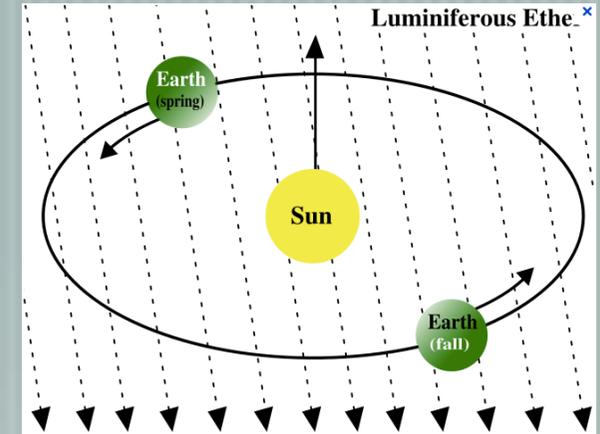
1905

## 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:

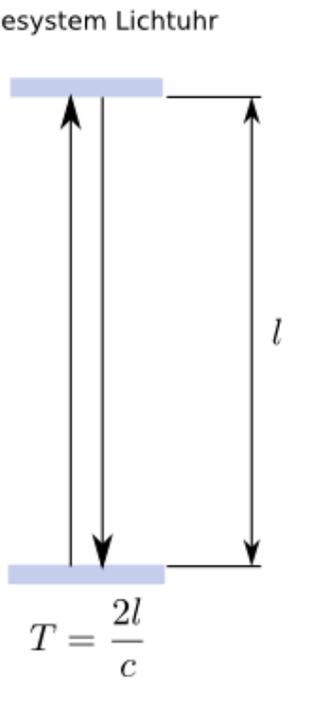
Geschwindigkeit = (Raumintervall/Zeitintervall) -->

**Raum und Zeit können keine absolute Bedeutung haben**

# Spezielle Relativität

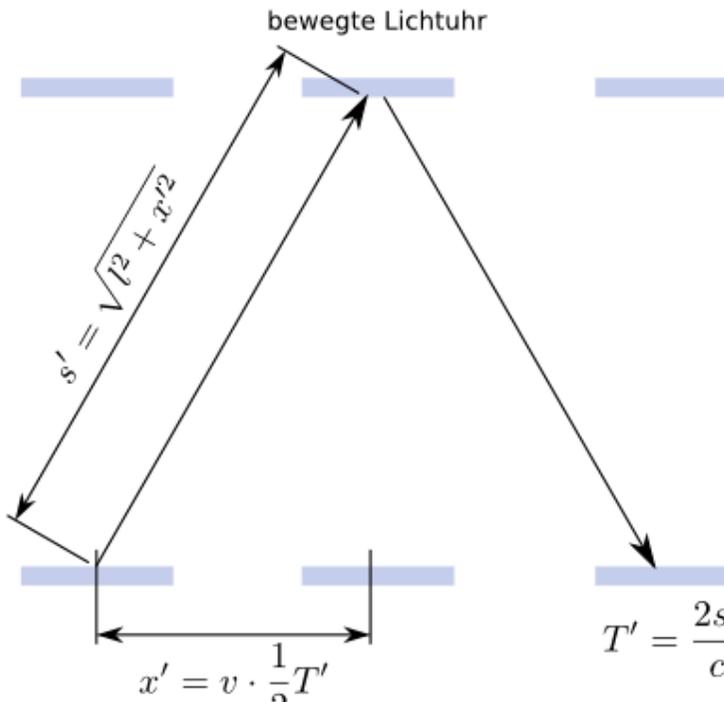
*Naturgesetze müssen Raum- und Zeit-Koordinaten gleich behandeln*

Ruhesystem Lichtuhr



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

bewegte Lichtuhr



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

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

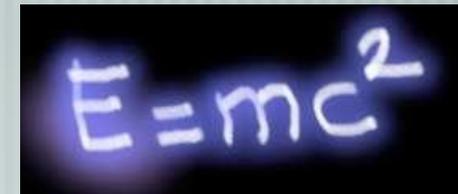
$T' = \frac{2s'}{c}$

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

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

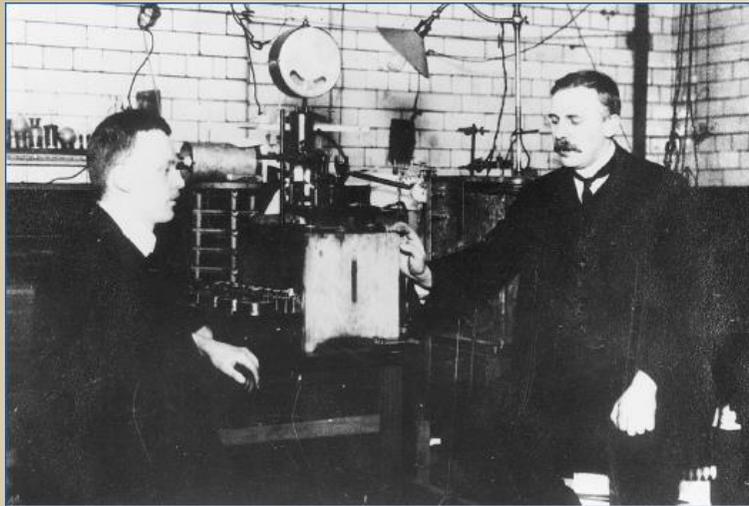
$$E = p^2/2m \rightarrow$$

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

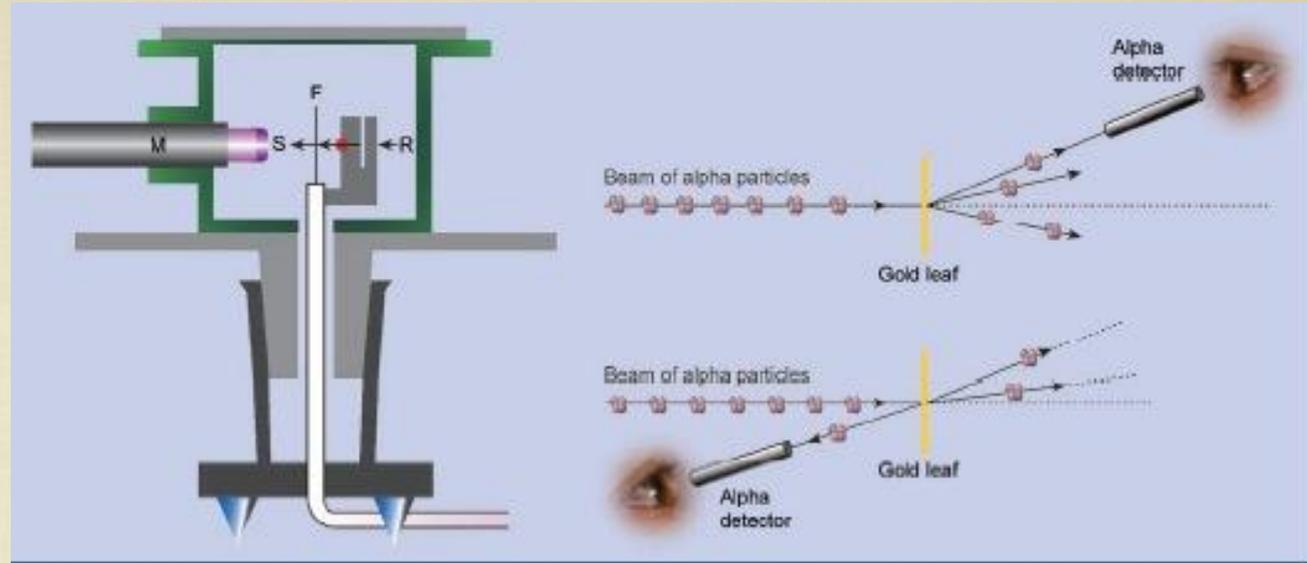

$$E = mc^2$$

# TEILCHEN

1911



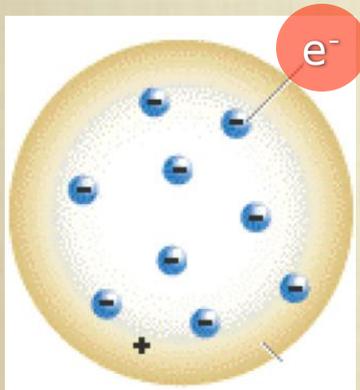
Ernest Rutherford (r) und Hans Geiger (l) in Manchester



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**

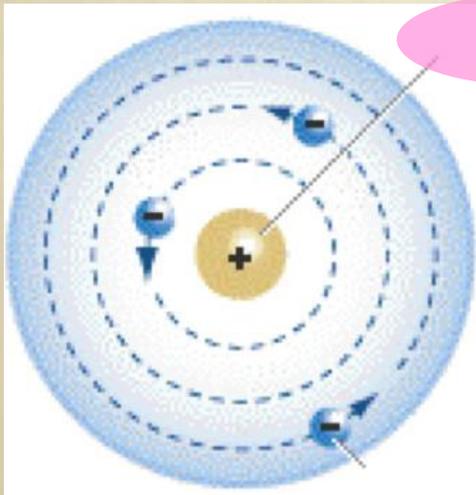


Eine Analogie mit dem Sonnensystem:

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?**



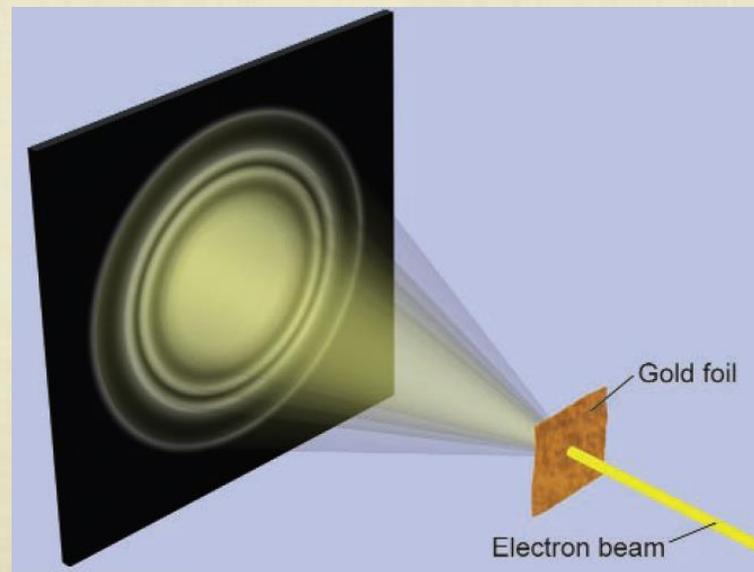
**Es brauchte noch weitere 10 Jahre bevor man anfing, die mysteriösen Regeln der atomaren Welt zu verstehen.**



Louis de Broglie (1924)

**Teilchen haben Welleneigenschaften**

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



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



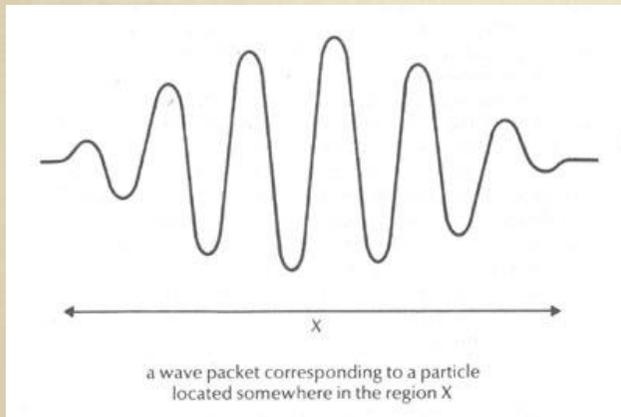
Heisenberg (1925)

## 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'  $\Delta f$  wenn er nur über das Zeitintervall  $\Delta t$  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 $\psi$**

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 ...

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

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

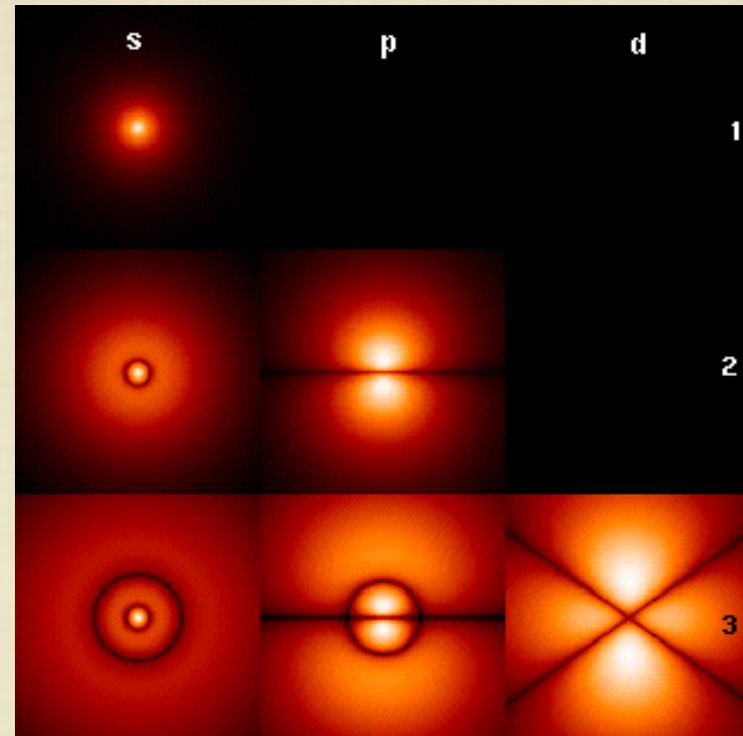
$$E = \frac{p^2}{2m} + V(r) \quad E \rightarrow i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \quad \vec{p} \rightarrow -i\hbar \vec{\nabla}$$

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):

$\psi$  = Wahrscheinlichkeitsamplitude

$|\psi|^2$  = Wahrscheinlichkeit

Stimmt sehr gut wenn

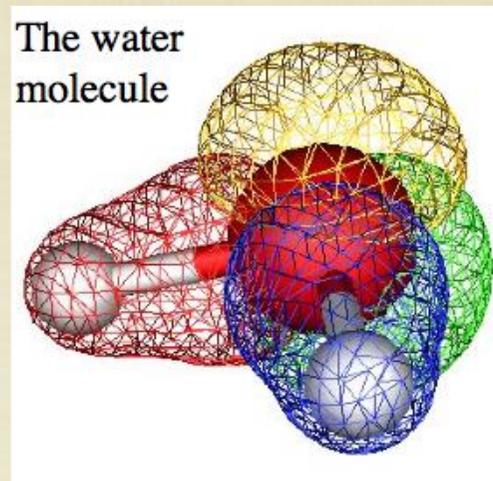
...  $v \ll c$

**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

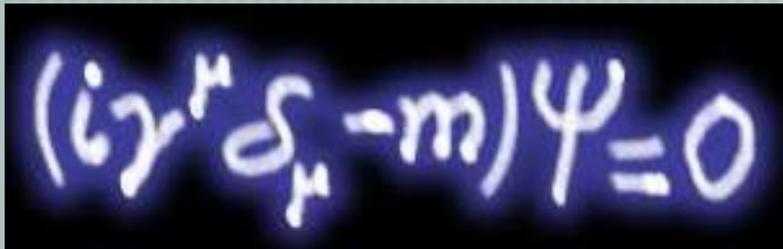


Paul A.M. Dirac  
(1928)

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



A photograph of a hand-drawn Dirac equation on a blackboard. The equation is  $(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi = 0$ , written in white chalk on a dark background.

$$\Psi =$$

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

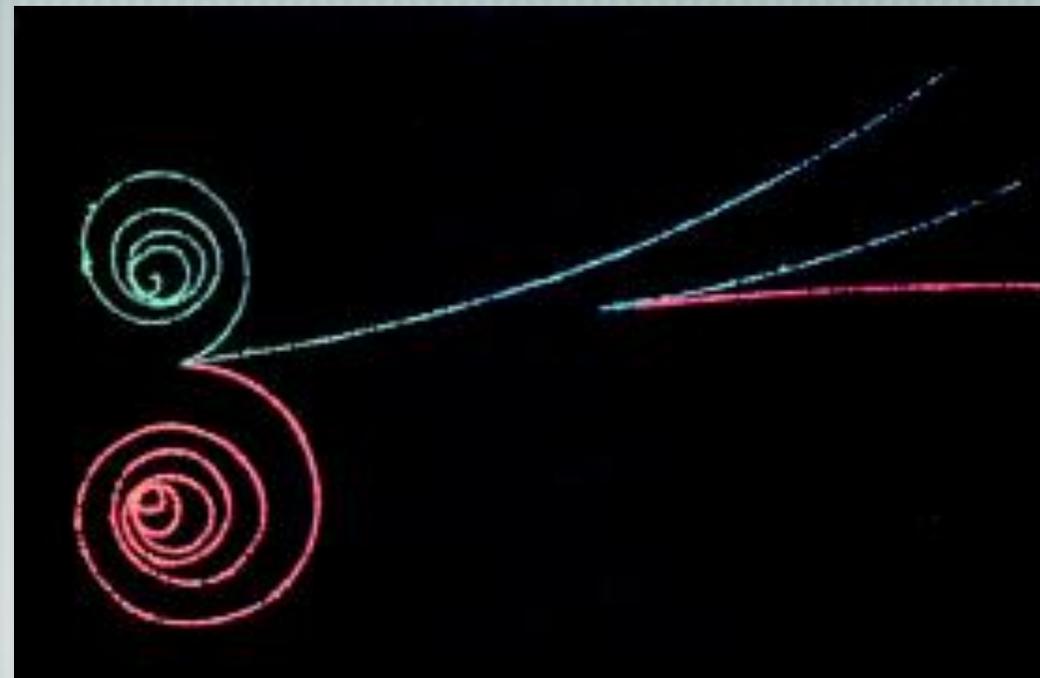
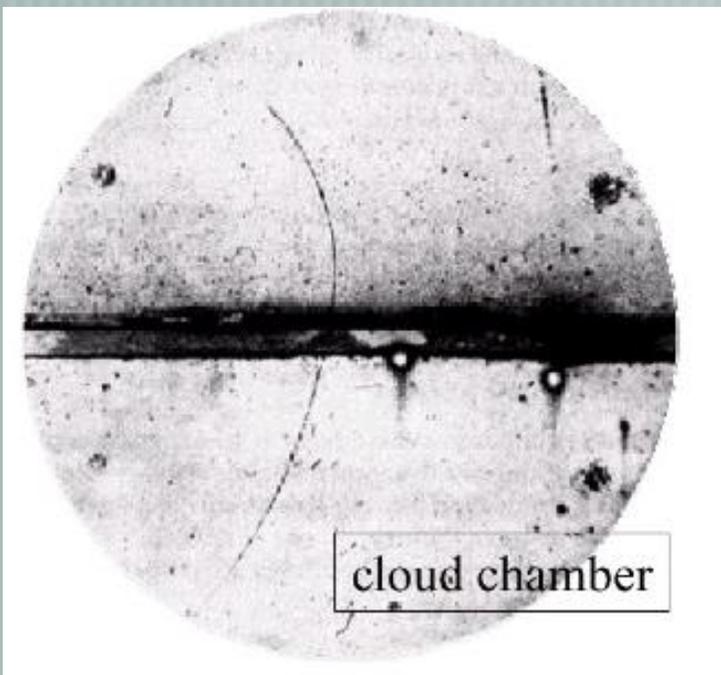


Anderson (1932)

## Entdeckung des Positrons

*Dirac hatte recht!*

Elektron-Positron-Paarerzeugung

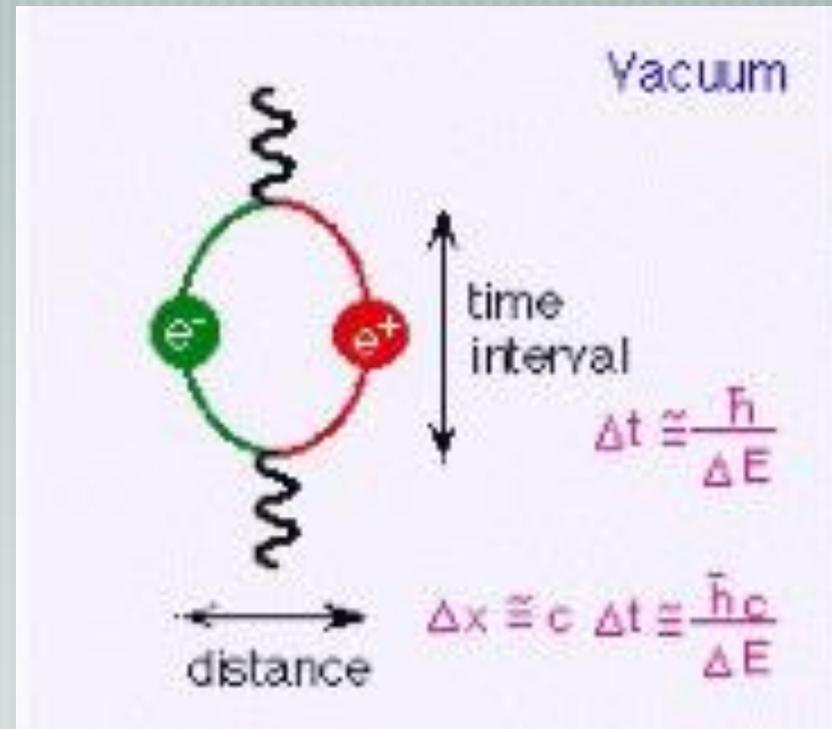
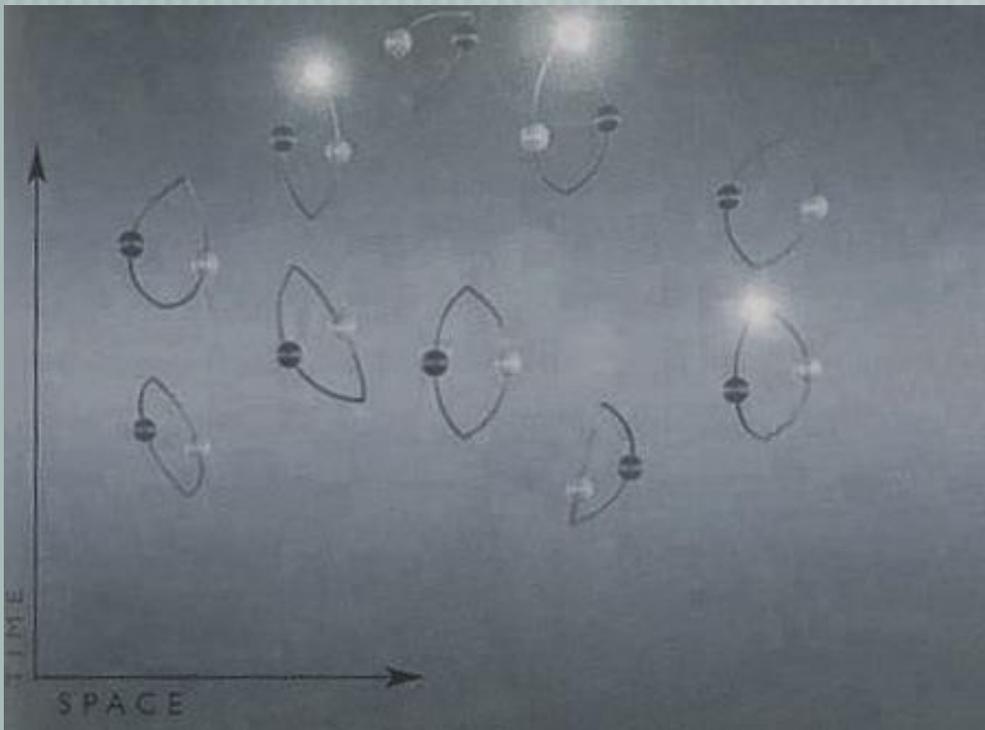


# Die Quantisierung der Felder

## DAS VAKUUM WAR PLÖTZLICH SEHR KOMPLIZIERT GEWORDEN

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

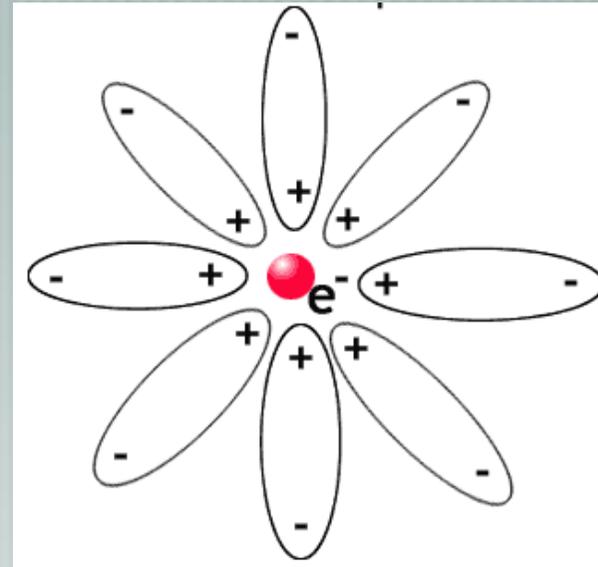
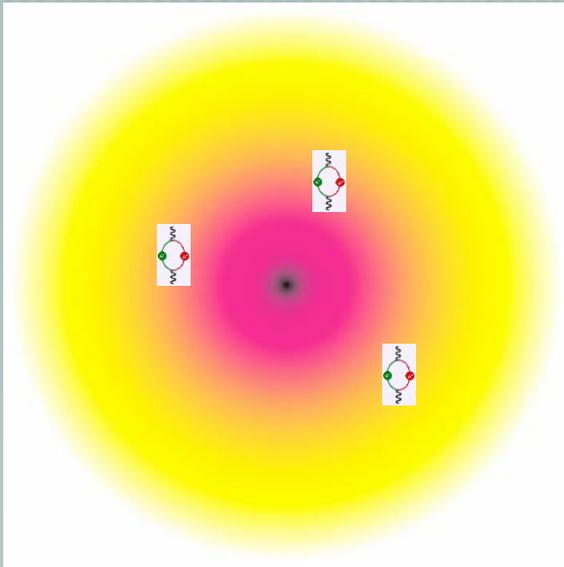
**Selbst im Grundzustand verschwinden die elektromagnetischen Felder nicht völlig:  
Fluktuationen des Vakuums produzieren (für kurze Zeit) Teilchen-Antiteilchen  
Paare.**



# 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

Schwinger  
Tomonaga  
Dyson

## Quanten-Elektrodynamik

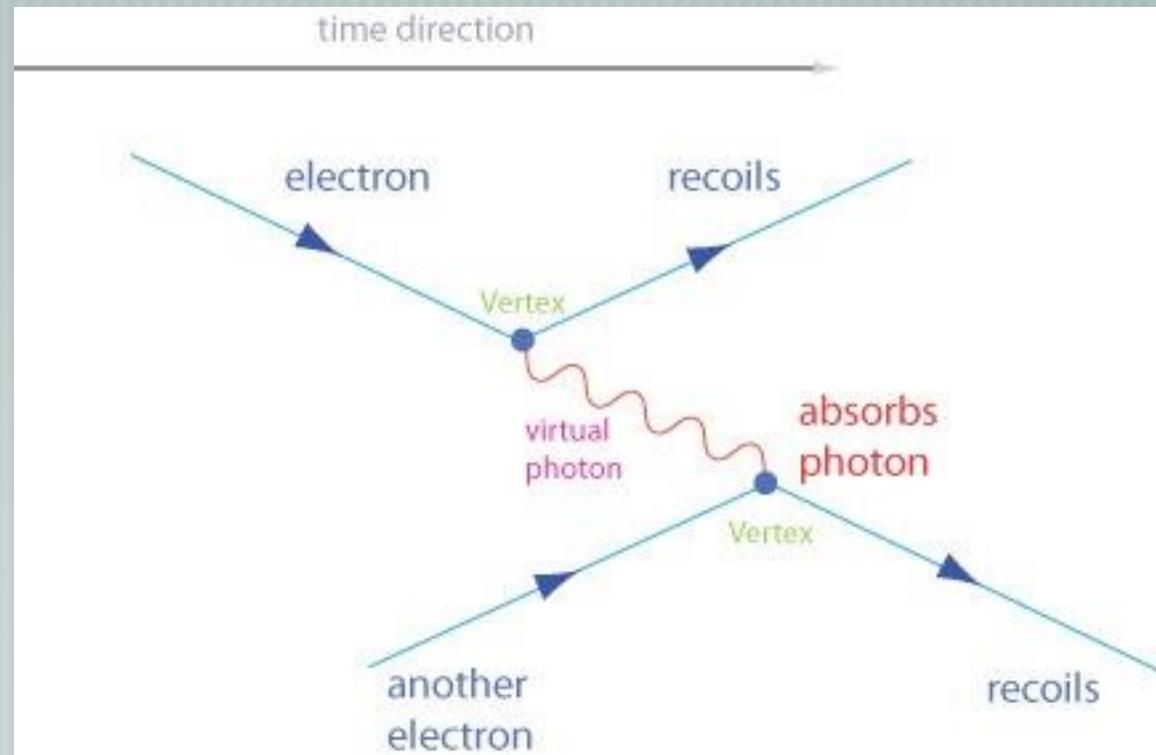
### “Renormalisation”

Nacktes Elektron + Vakuum-Fluktuationen = beobachtbares Elektron

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

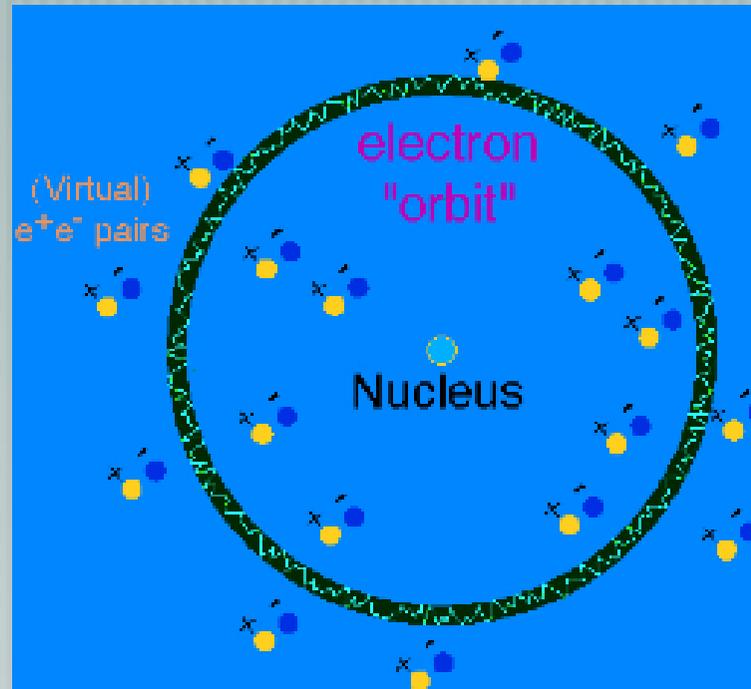
### Feynman Diagramme

Präzise Berechnungsvorschriften in graphischer Form



# Felder

**Riesenerfolg der QED: Korrekte Berechnung der Vakuumfluktuationen**



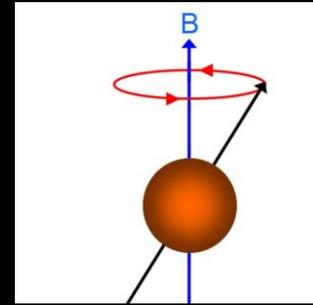
**Lamb Shift  
(1948)**

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

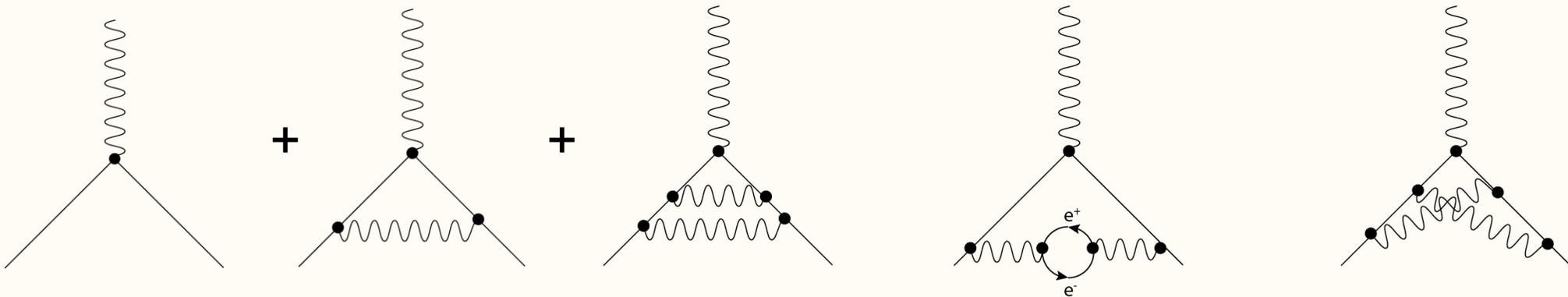
# Vakuum-Fluktuationen haben beobachtbare Konsequenzen

Guinness-Book: Die präziseste + bestätigte Voraussage der QED

Das anomale magnetische Moment des Elektrons "g"



$$\mu = g \frac{e}{2m} S$$



Hauptgraph

Zweite Ordnung

Vierte Ordnung

$$g = 2$$

$$a = (g-2)/2 = 1/2\pi * 1/137$$
$$\sim 0.0011614$$

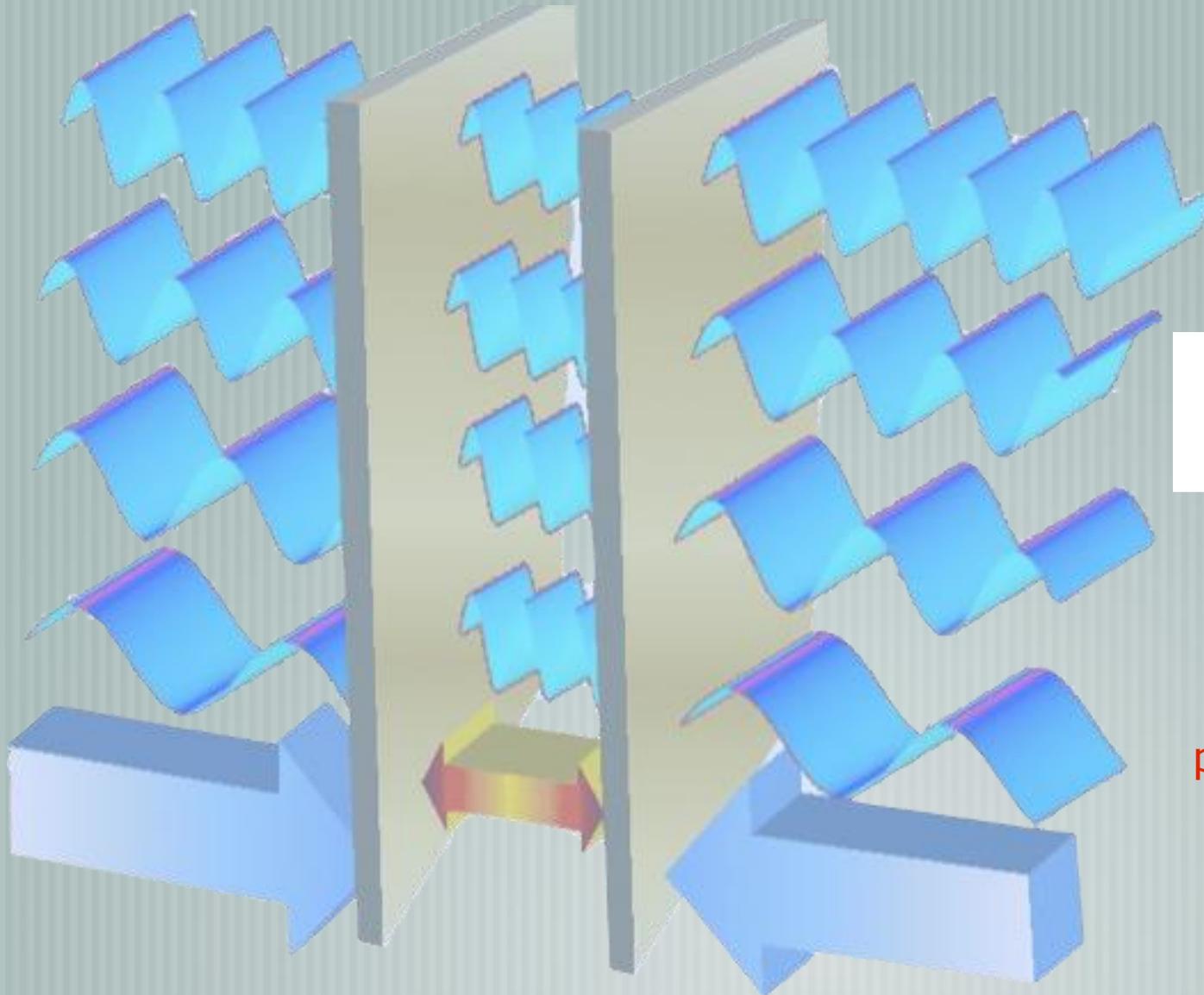
Präzision (übereinstimmende Theorie und Experiment)

$$a = 0.00115965218073(28)$$

# Casimir-Effekt

1948

(Kraft zwischen zwei ungeladenen Metallplatten)



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

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