

# **TEILCHENPHYSIK UND KOSMOLOGIE**

im 20. Jahrhundert

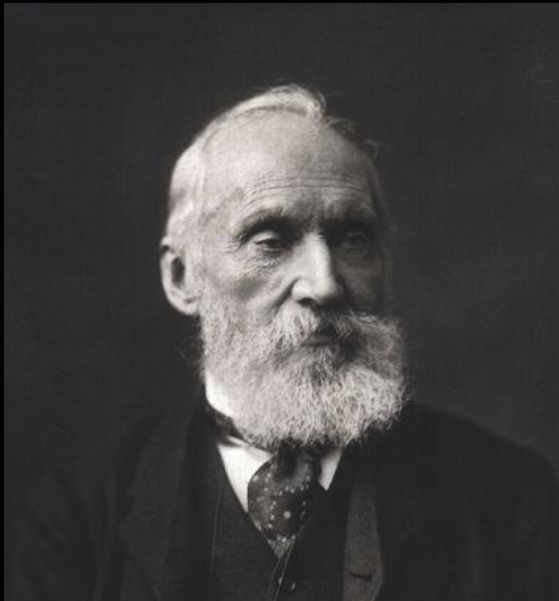
Rolf Landua  
CERN

**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

$p^+$

$n$

$\mu^-$

$\tau^-$

$\nu_e$

$\nu_\mu$

$\tau^-$

$\nu_\tau$

$\nu$  Masse

Brownsche Bewegung

Spezielle Relativität

Quantenmechanik  
Welle-Teilchen Dualismus  
Spin/Fermion-Boson

Antimaterie

Fermi Theorie

Yukawa  
 $\pi$  Austausch

QED

P, C, CP  
Verletzung

W Bosons

GUT

EW Vereinigung

QCD  
Farbladung

SUSY

Superstrings

W

Z

g

3 Teilchenfamilien

Elektro-  
magnetismus

Schwache  
WW

1  
Starke  
WW

Photon

Radio-  
aktivität

Höhen-  
strahlung

Allgemeine  
Relativität

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

Blasenkammer

$e^+e^-$  Ring

Vieldrahtkammer

Strahlkühlung

Prozessrechner

$p^+p^-$  Ring

Moderne  
Detektoren

WWW

GRID

Teilchen-  
zoo

u d s

c

b

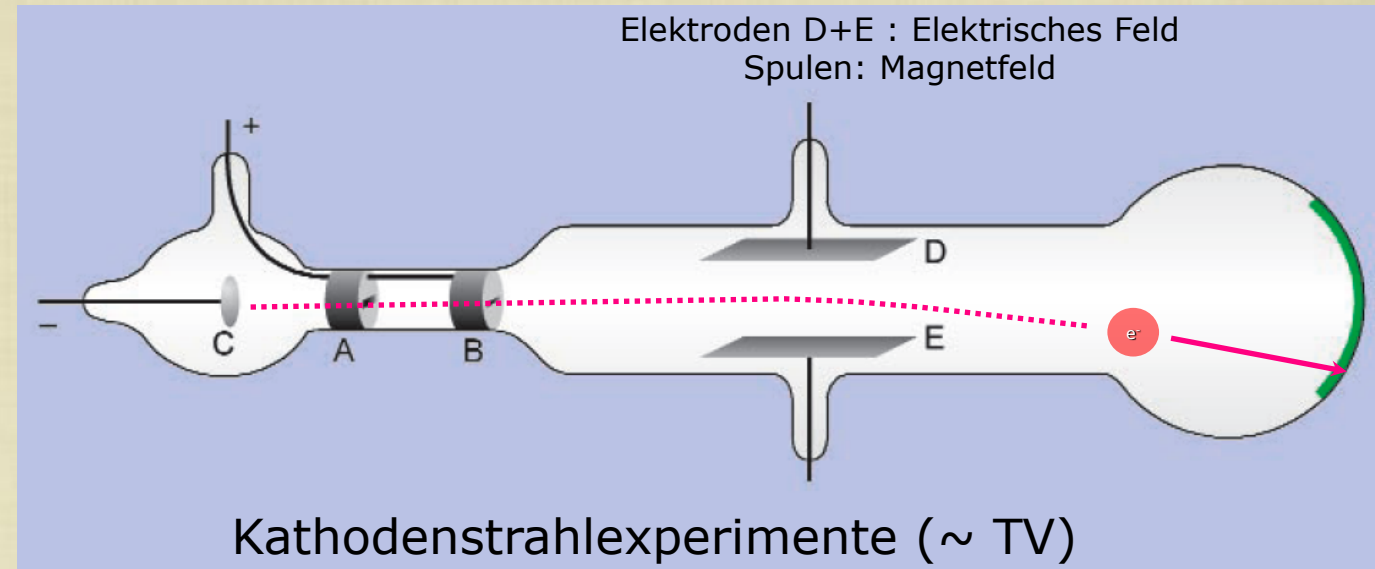
t

STANDARD MODEL



J.J. Thomson

## Die Geburtsstunde der Teilchenphysik Entdeckung des Elektrons

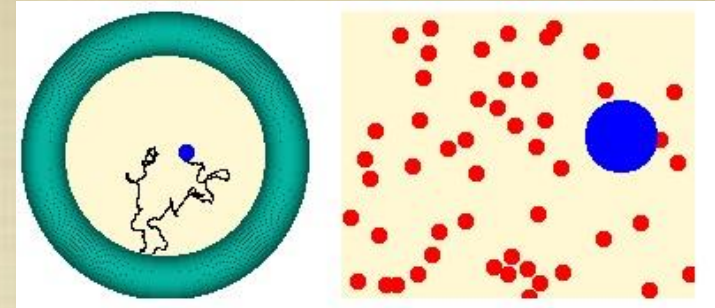


**Kathodenstrahlen\* sind Teilchen  
mit spezifischem Ladungs-Massen-Verhältnis**

**\*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

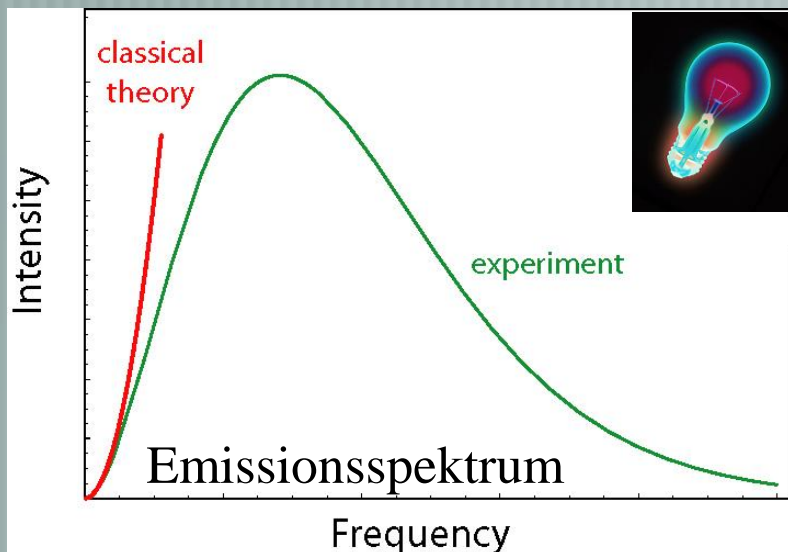
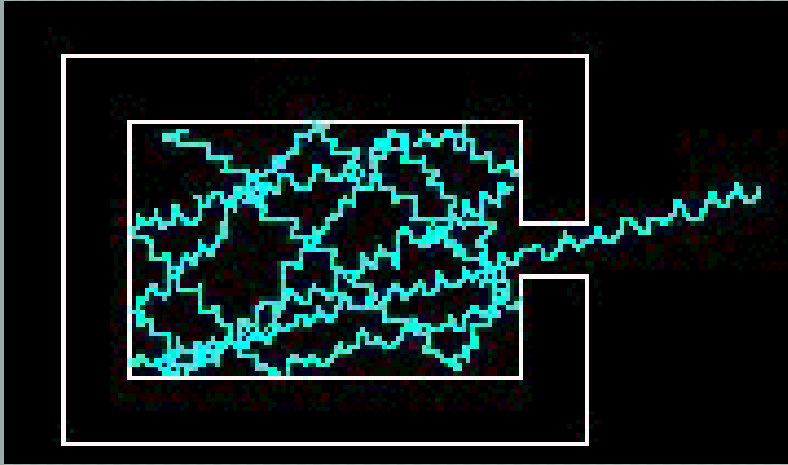
$$\langle x^2 \rangle = \frac{2kTt}{\alpha} = \frac{kTt}{3\pi\eta a}$$

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

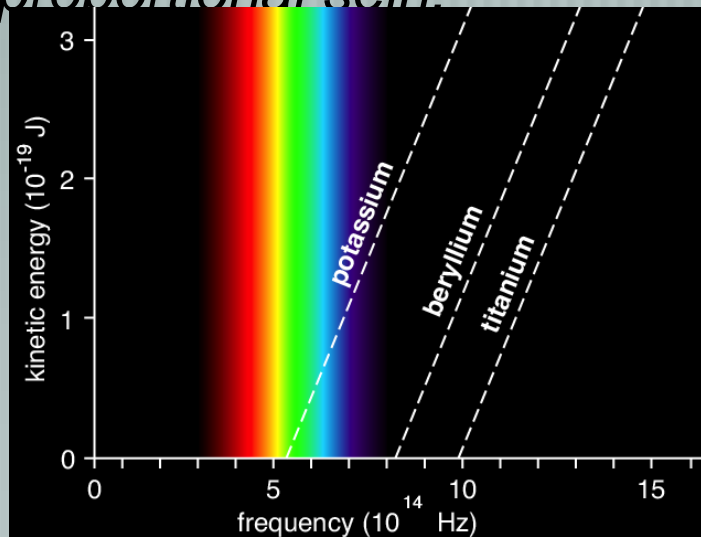
## Der photoelektrische Effekt

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**



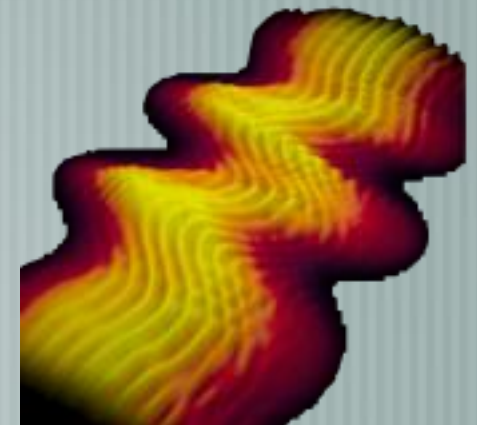
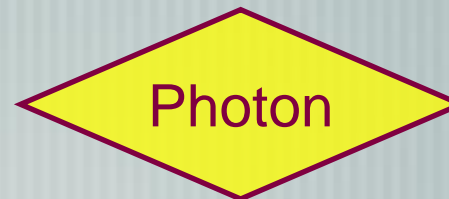
Albert Einstein

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

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

(Erst im Jahr 1917 durch Compton bewiesen)

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



# Felder

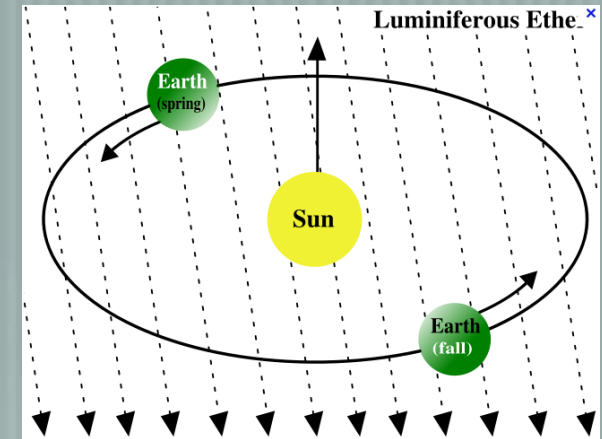
1905

## 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)**

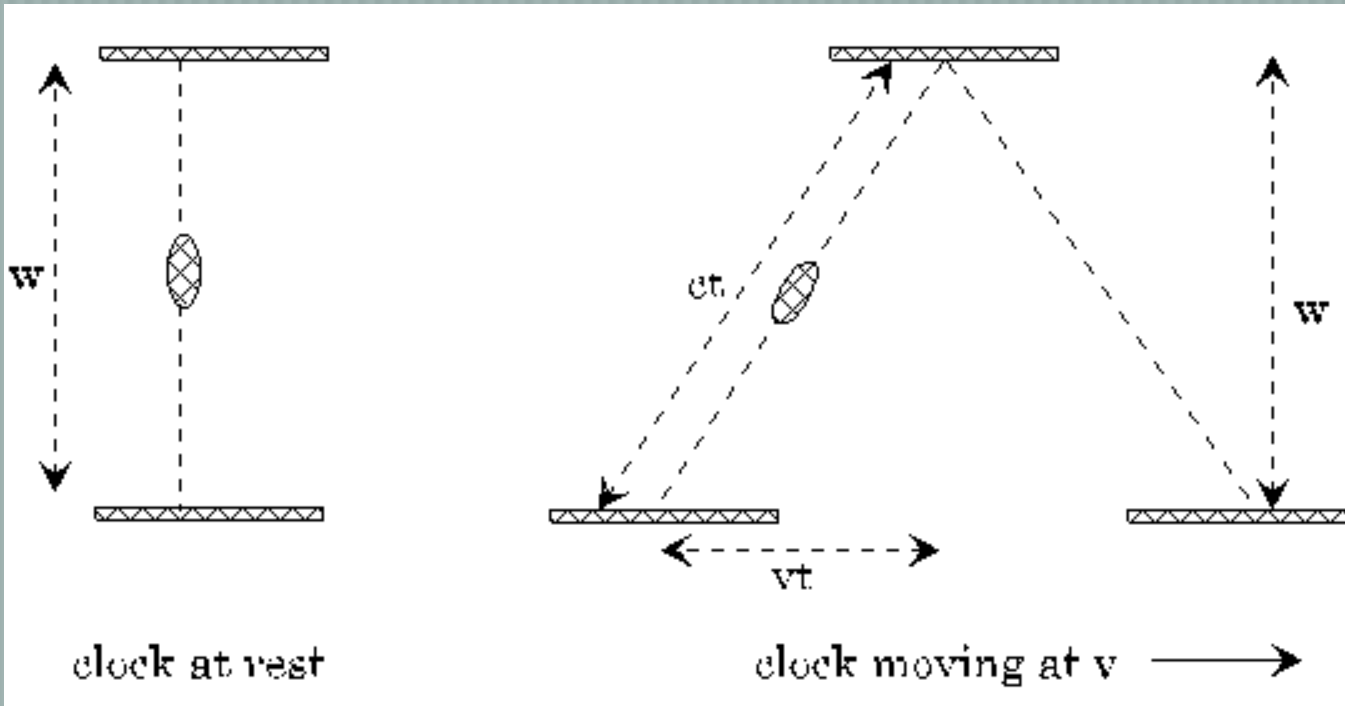
***Aber wie können zwei relativ zueinander bewegte Beobachter jeweils die gleiche Lichtgeschwindigkeit messen?***

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"

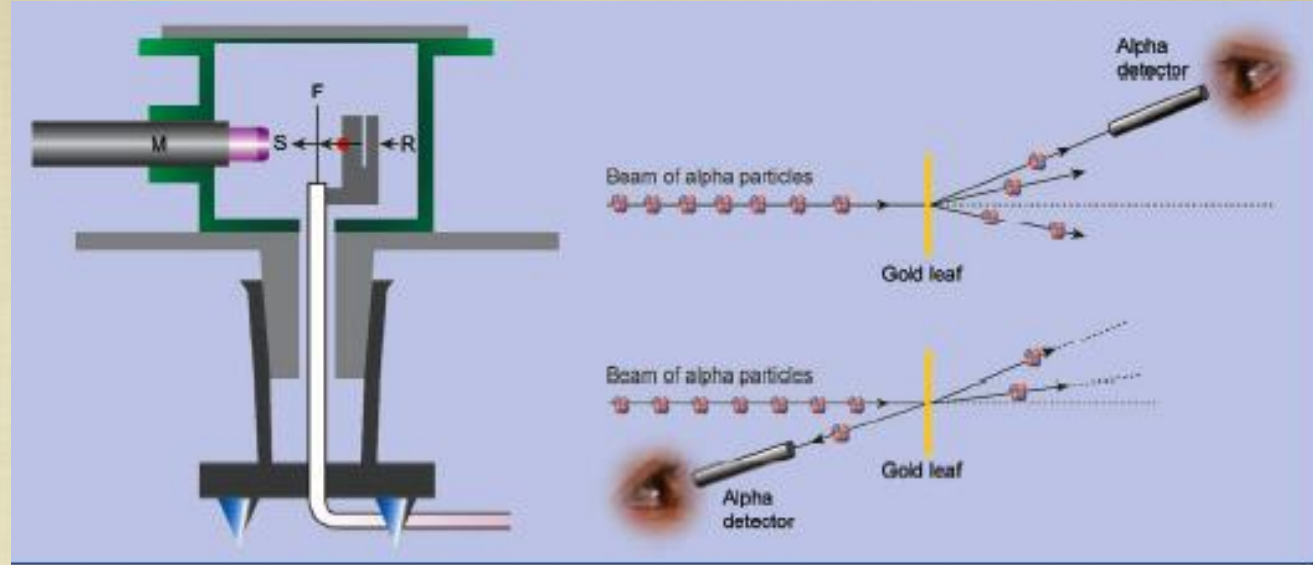
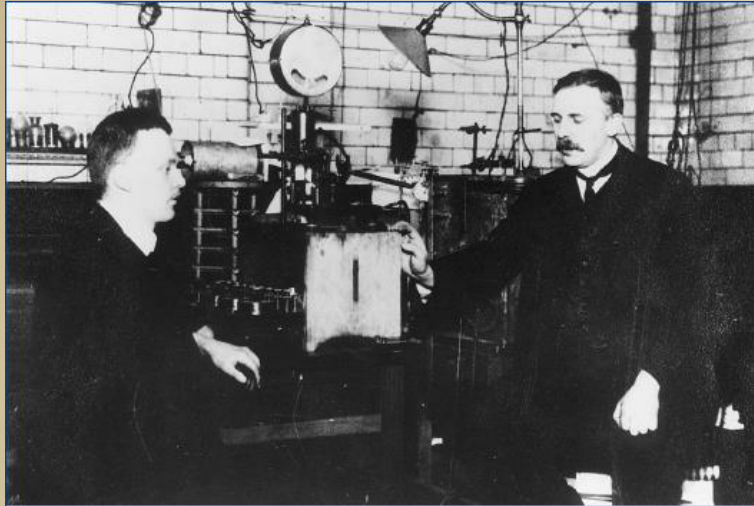
$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$$

$$E = mc^2$$

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

# TEILCHEN

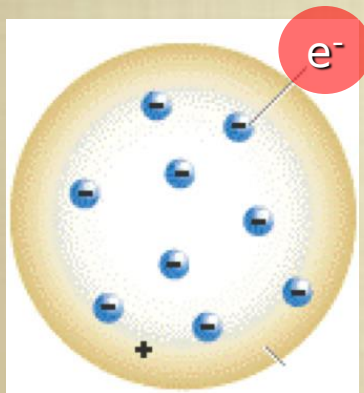
1911



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**



## Kern

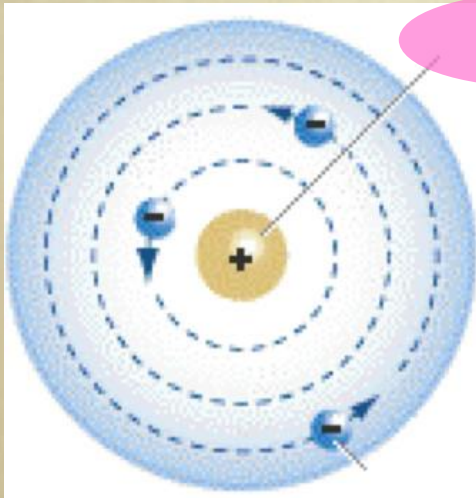


Eine Analogie mit dem Sonnensystem:

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?**

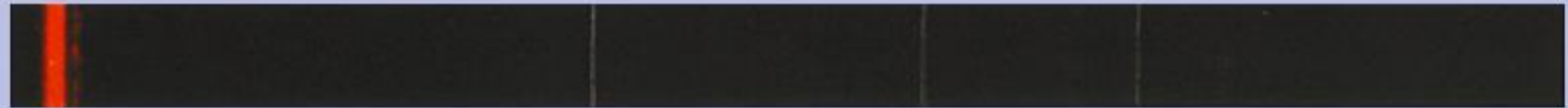
Rutherford-Modell  
des "leeren" Atoms

# TEILCHEN

1913

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!*

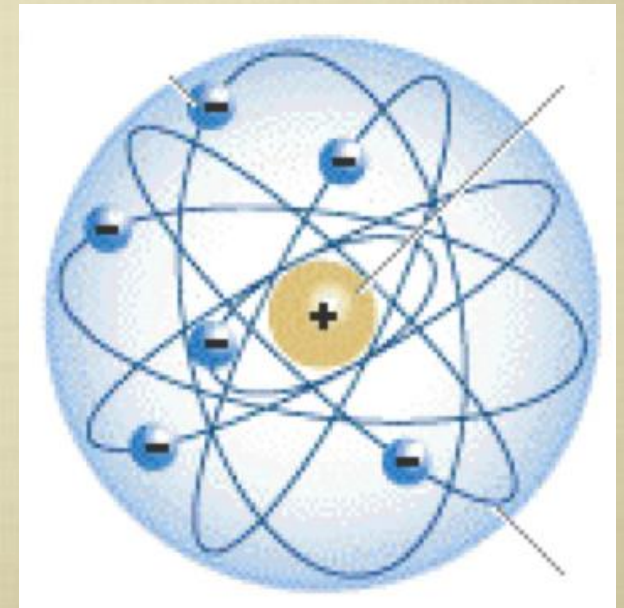
- Wenn der Drehimpuls quantisiert ist:

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

dann

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

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



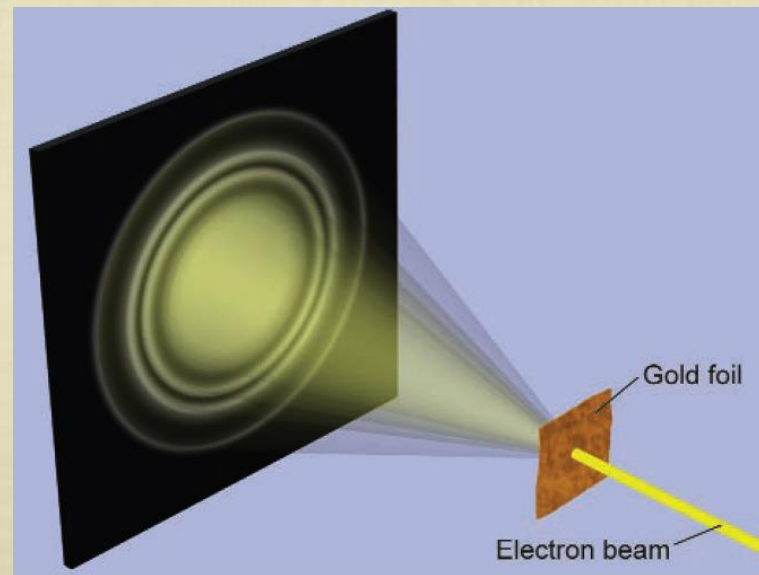
**Es brauchte noch weitere 10 Jahre bevor man anfing, die mysteriösen Regeln der atomaren Welt zu verstehen.**

**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.

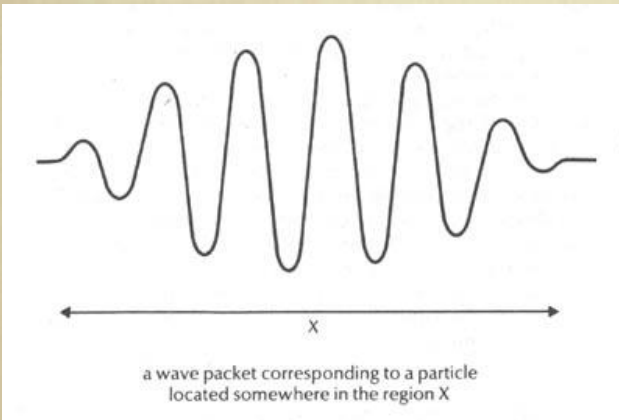
Ort-Impuls-Unschärfe:

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

Analogie:

Ein 'reiner' Ton der Frequenz  $f$  bekommt eine 'Unschärfe'  $\Delta f$  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":

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

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

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

“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 ...

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

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

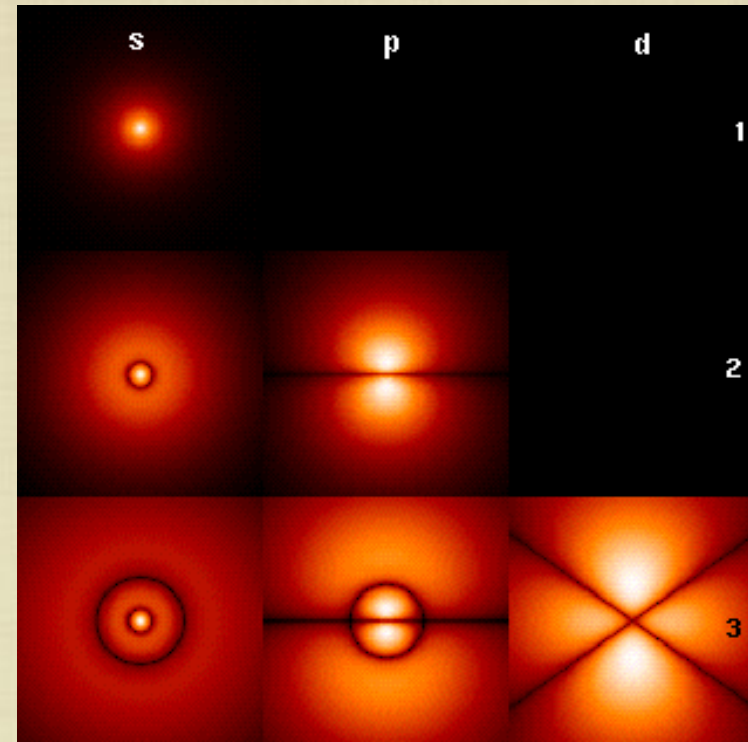
$$E = \frac{p^2}{2m} + V(r) \quad E \rightarrow i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \quad \vec{p} \rightarrow -i\hbar \vec{\nabla}$$

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):

$\psi$  = Wahrscheinlichkeitsamplitude

$|\psi|^2$  = Wahrscheinlichkeit

Stimmt sehr gut wenn

...  $v \ll c$

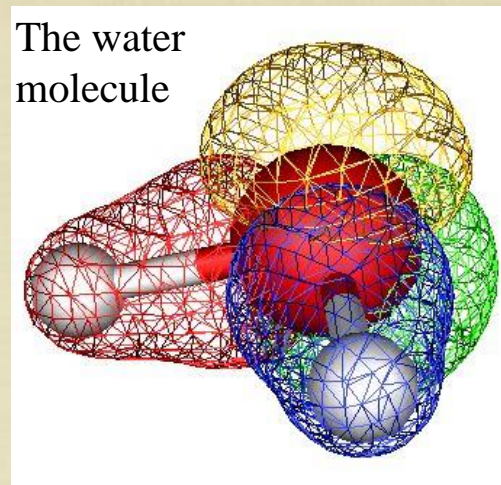


Quantenphysik erklärt die Existenz von 'Struktur' in der Natur

**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

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

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

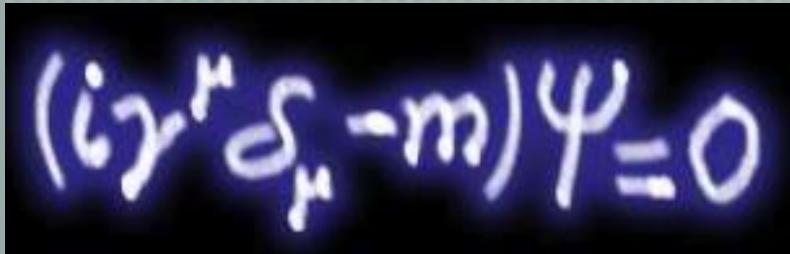


Paul A.M. Dirac  
(1928)

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

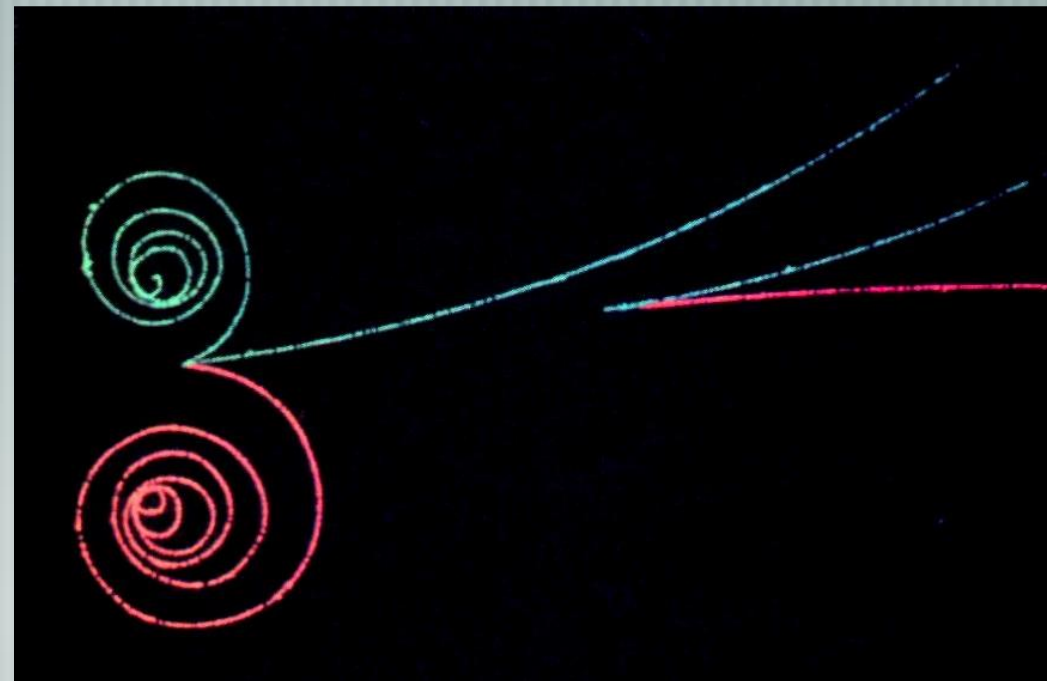
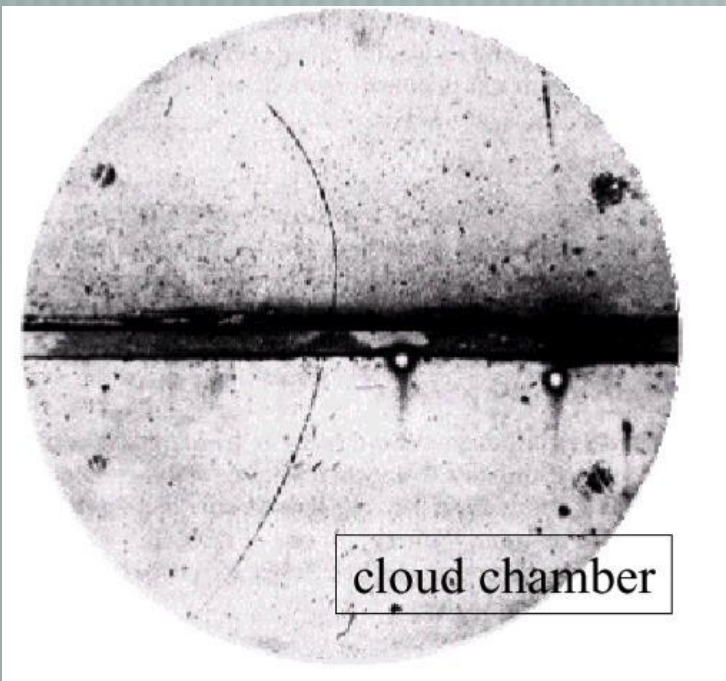


Anderson (1932)

## Entdeckung des Positrons

*Dirac hatte recht!*

Elektron-Positron-Paarerzeugung



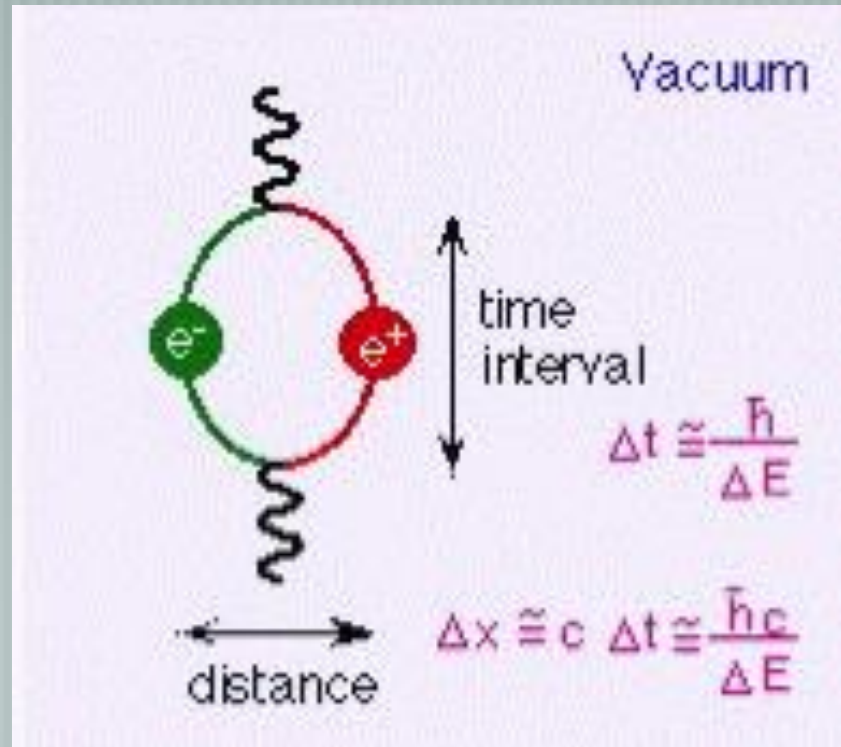


# Felder

## 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.**

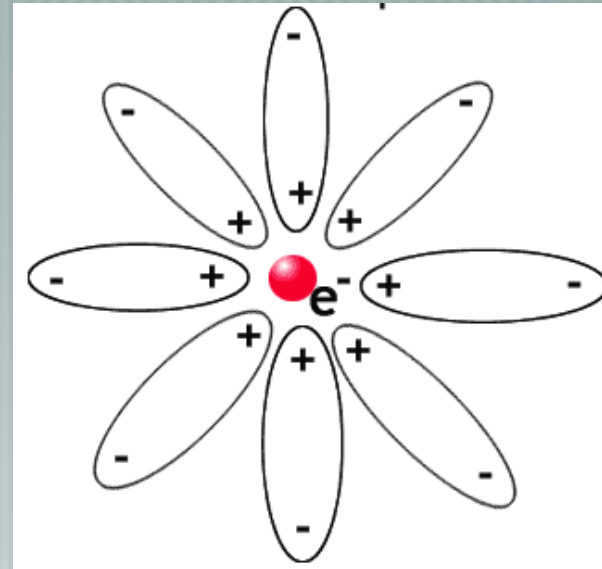
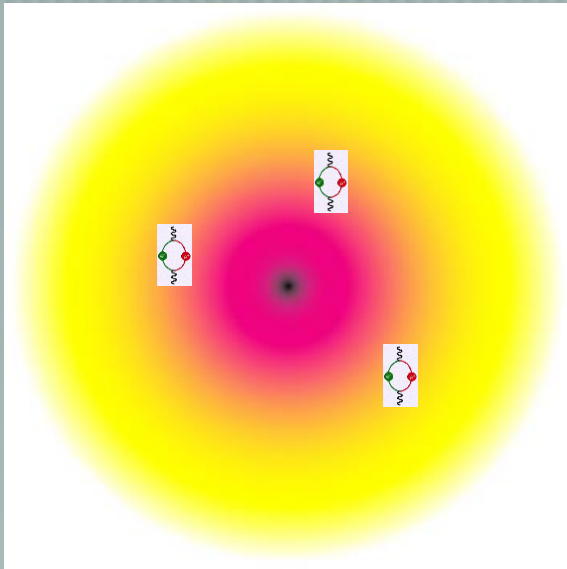




# Felder

**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

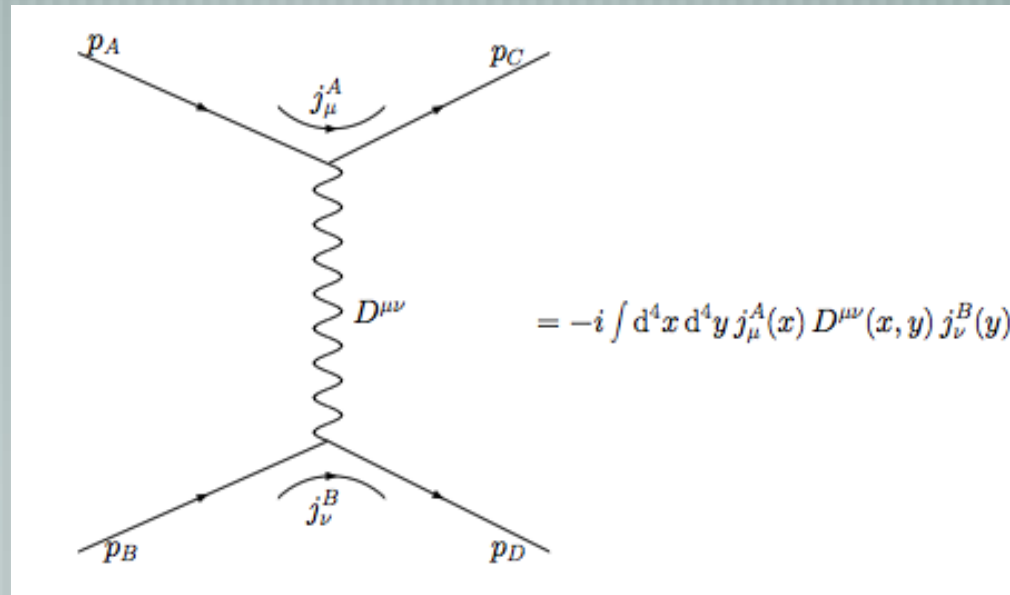
## Quanten-Elektrodynamik

### “Renormalisation”

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

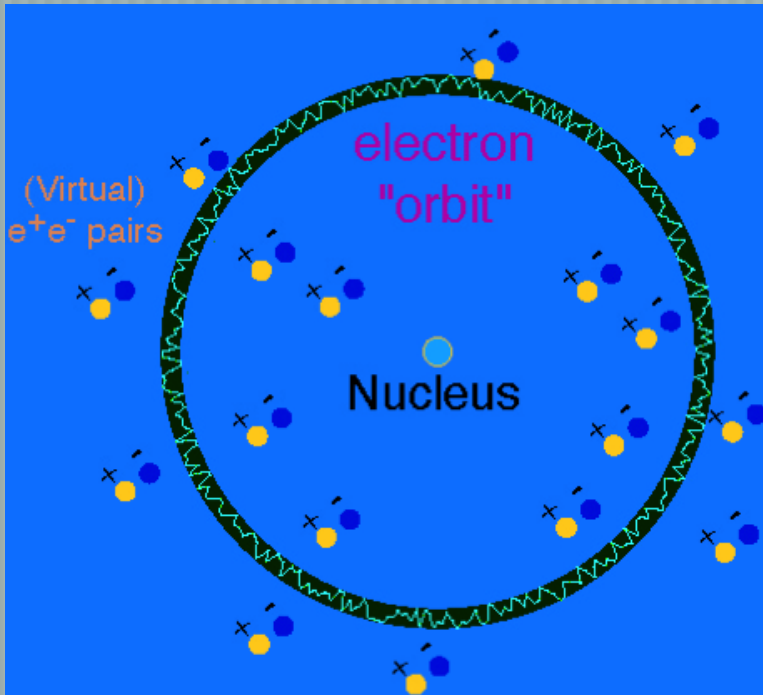
### Feynman Diagramme

Präzise Berechnungsvorschriften in graphischer Form



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

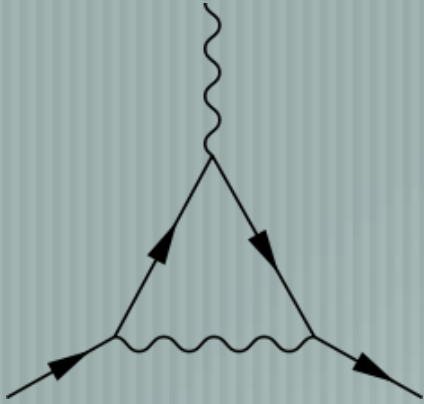
## Riesenerfolg der QED: Korrekte Berechnung der Vakuumfluktuationen



### 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:

$$a = 0.00115965218073(28)$$

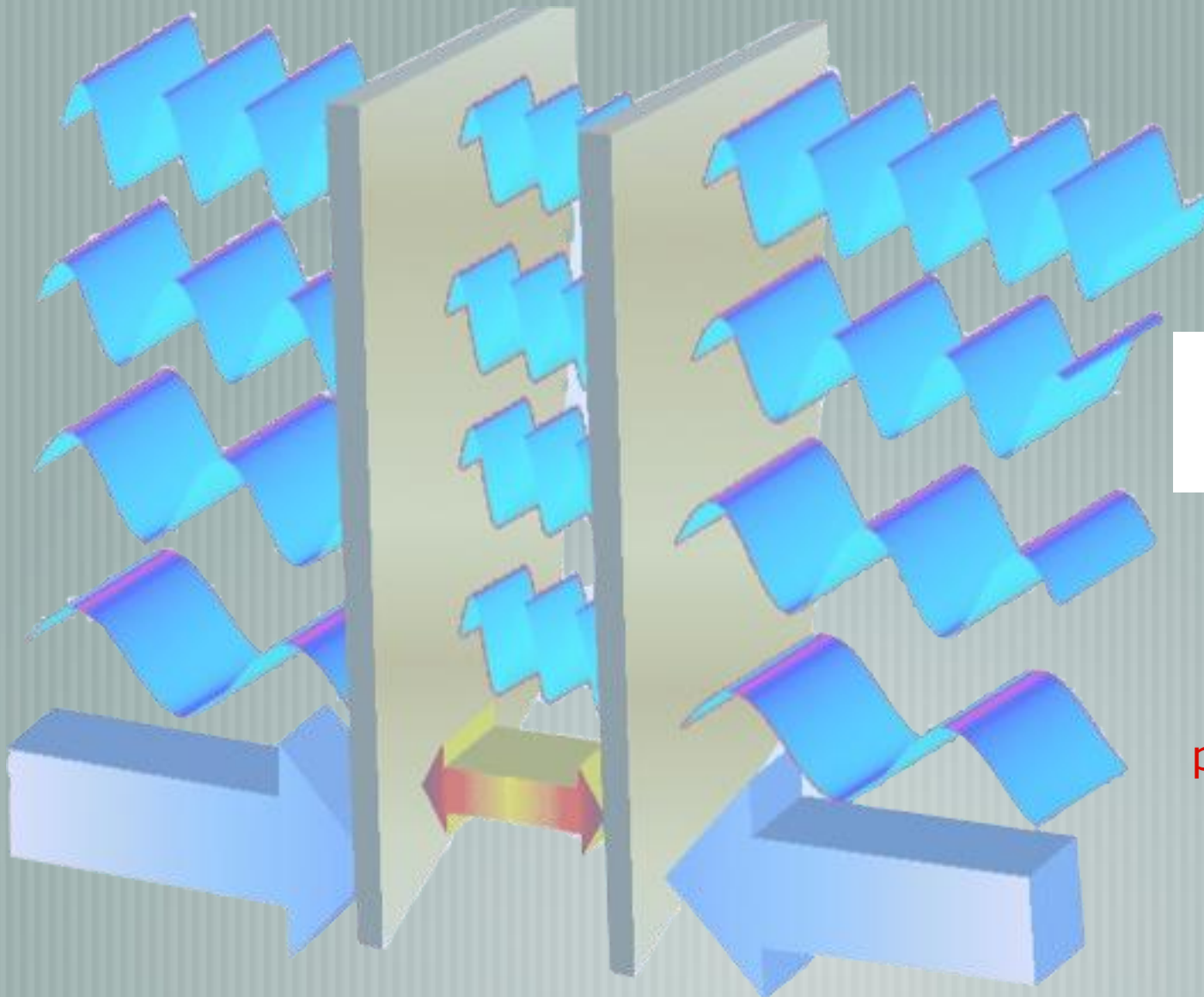
stimmt auf 10 Stellen mit der theoretischen Vorhersage überein



# 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

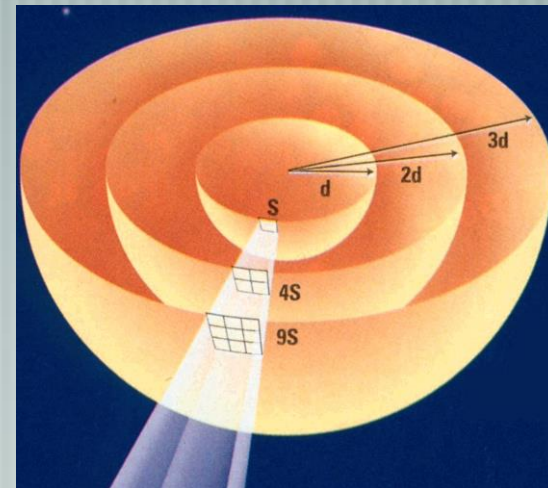
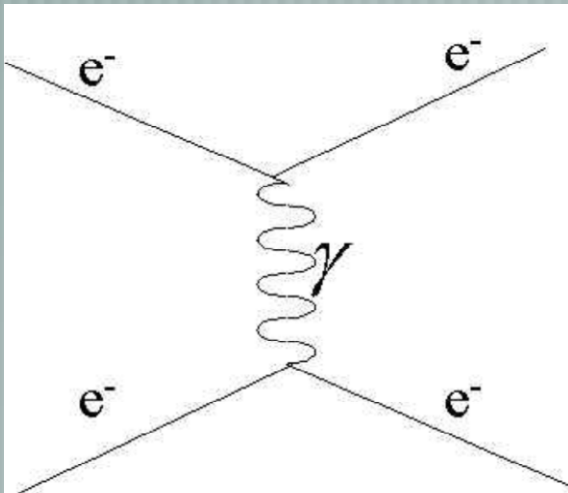
**Gemeinsamkeit:  $1/r^2$  Gesetz**

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?