

# TEILCHENPHYSIK UND KOSMOLOGIE

im 20. Jahrhundert

Rolf Landua  
CERN

# EINLEITUNG

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

Über 50 Physik - Nobelpreise

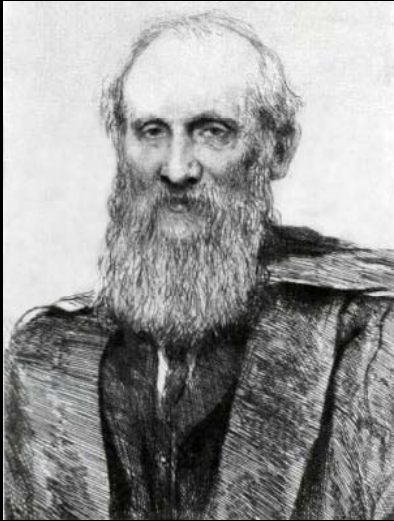
Eine detaillierte, allumfassende, tiefgehende Behandlung in diesem Zeitraum ist etwas schwierig

**Deshalb: ein breiter Überblick über die wichtigsten Entdeckungen und die Zusammenhänge**

Alles was in der Physik zu tun bleibt,  
ist die sechste Stelle hinter dem Komma zu messen.

(Albert Michelson, 1894)

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)

Ansprache an die 'British Association for the Advancement of Science', 1900

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)

Aber - Lord Kelvin erwähnte auch zwei 'kleine Wolken' am Horizont der Physik:

- 1) Spektrum der Hohlraumstrahlung
- 2) Michelson-Morley Experiment

1900

Universum = Sonnensystem und die Milchstrasse

Niemand wusste wie unsere Sonne ihre Energie produziert

Nichts war über Atome, ihre Struktur, und Atomkerne bekannt

Es gab nur 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

Elektromagnetismus    Schwache WW    Starke WW

Detektor    Beschleuniger

1895

$e^-$

Brownsche Bewegung

Photon

Radioaktivität

1900

1905

Atom

Spezielle Relativität

1910

Kern

Quantenmechanik  
Welle-Teilchen Dualismus  
Spin/Fermion-Boson

Höhenstrahlung

Allgemeine Relativität

Geiger

Wolken

1920

$p^+$

1930

$e^+$

$n$

Antimaterie

Fermi Theorie

Yukawa  
 $\pi$  Austausch

Galaxien;  
Ausdehnung des Universums

Zyklotron

1940

$\mu^-$

Dunkle Materie

Kernfusion

1950

$\tau^-$

$\pi$   
Teilchenzoo

QED

P, C, CP Verletzung

Big Bang  
Nukleosynthese

Blasenkammer

Synchrotron

1960

$\nu_e$

$\nu_\mu$

Higgs

W Bosons

Kosmische Hintergrundstrahlung

Vieldrahtkammer

$e^+e^-$  Ring

1970

$u$   $d$   $s$

EW Vereinigung

Prozessorrechner

Strahlkühlung

1975

$c$

STANDARD MODEL

GUT

SUSY

QCD  
Farbladung

1980

$b$

Superstrings

W

Z

g

Inflation

$p^+p^-$  Ring

1990

$t$

3 Teilchenfamilien

Inhomogenität der  
Hintergrundstrahlung (COBE, WMAP)

Moderne Detektoren

WWW

2000

$\nu_\tau$

$\nu$  Masse

Dunkle Energie

GRID

2010



Kinetische Gastheorie

Boltzmann

Maxwell

Elektromagnetismus

Newton

### Teilchen

### Felder

### Universum

### Technologien

1895

1900

1905

1910

1920

1930

1940

1950

1960

1970

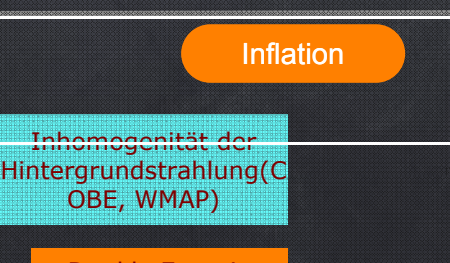
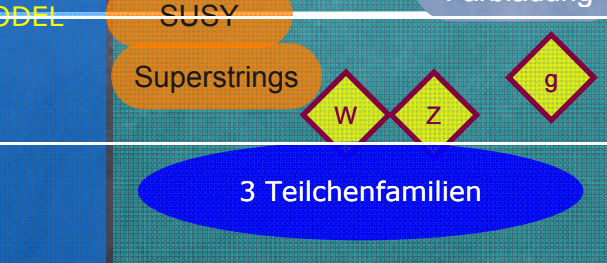
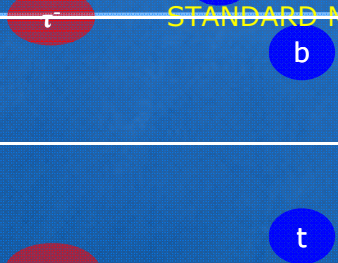
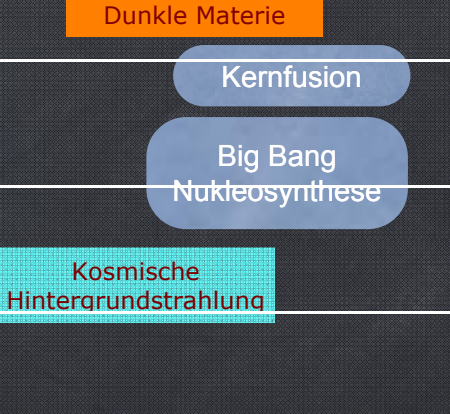
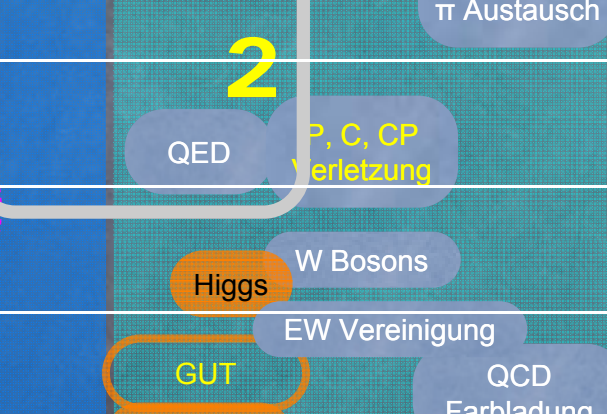
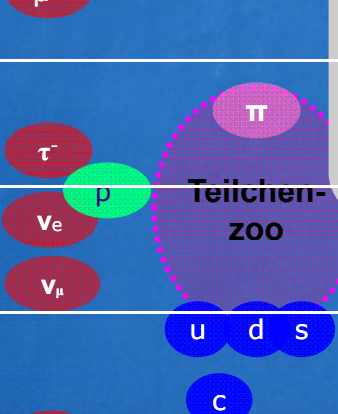
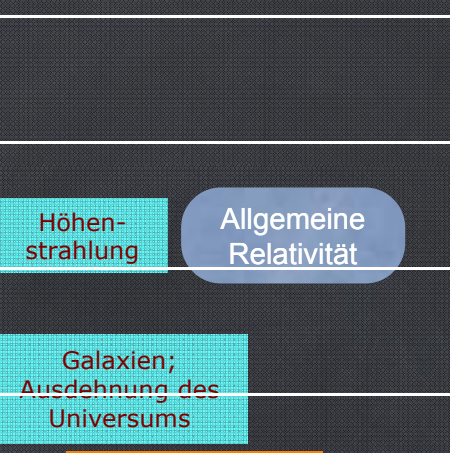
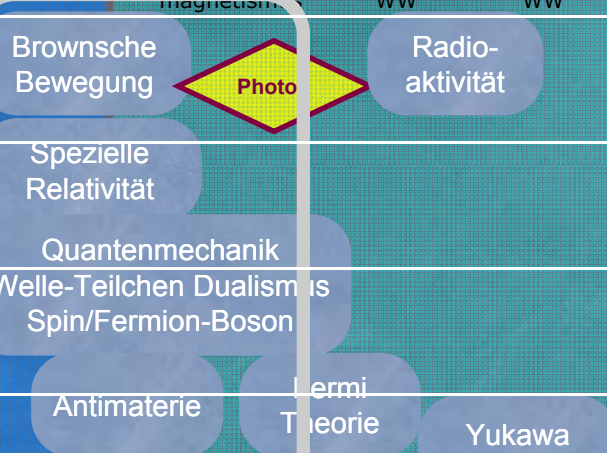
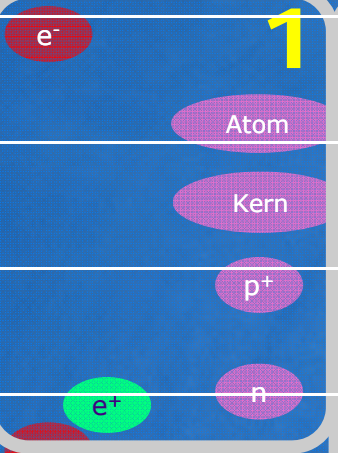
1975

1980

1990

2000

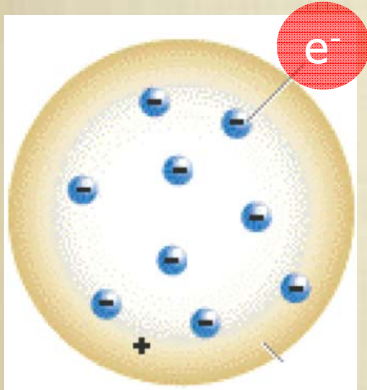
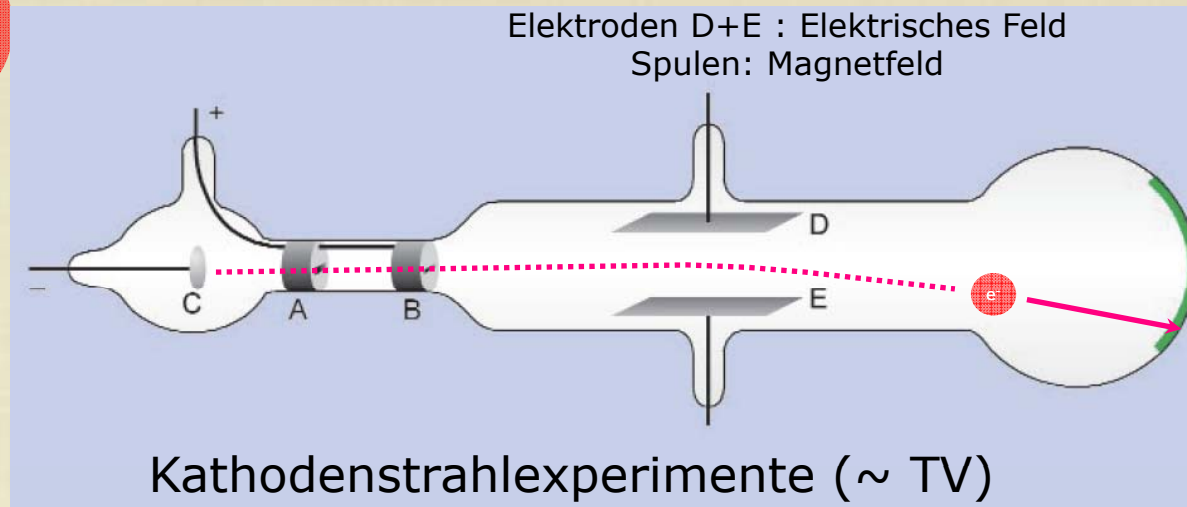
2010







J.J. Thomson

 $e^-$ 

Sein 'Rosinenkuchen'  
Modell des Atoms  
(1904)

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

**\*später 'Elektronen' genannt**

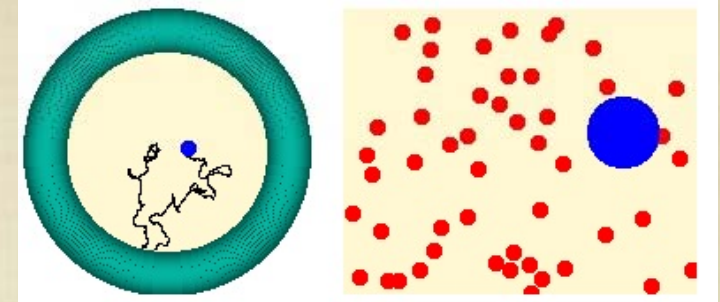
**Elektronen sind Teil von "Atomen"**



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



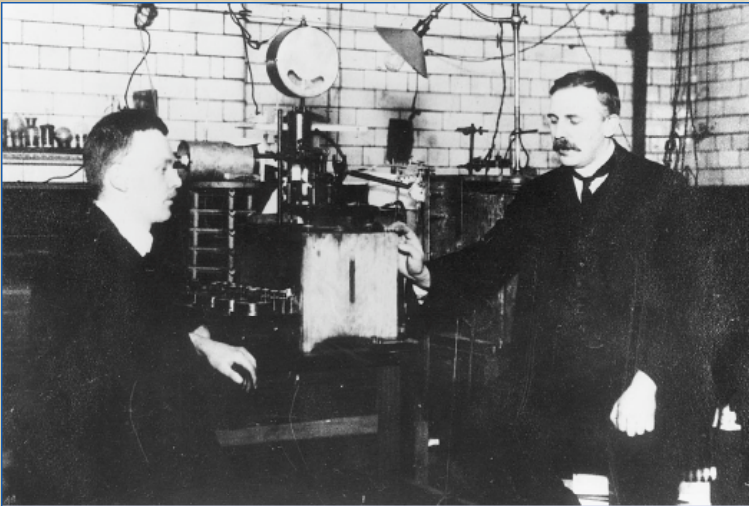
Albert Einstein (1905) erklärt die Zitterbewegung mit Hilfe der kinetischen Atomtheorie



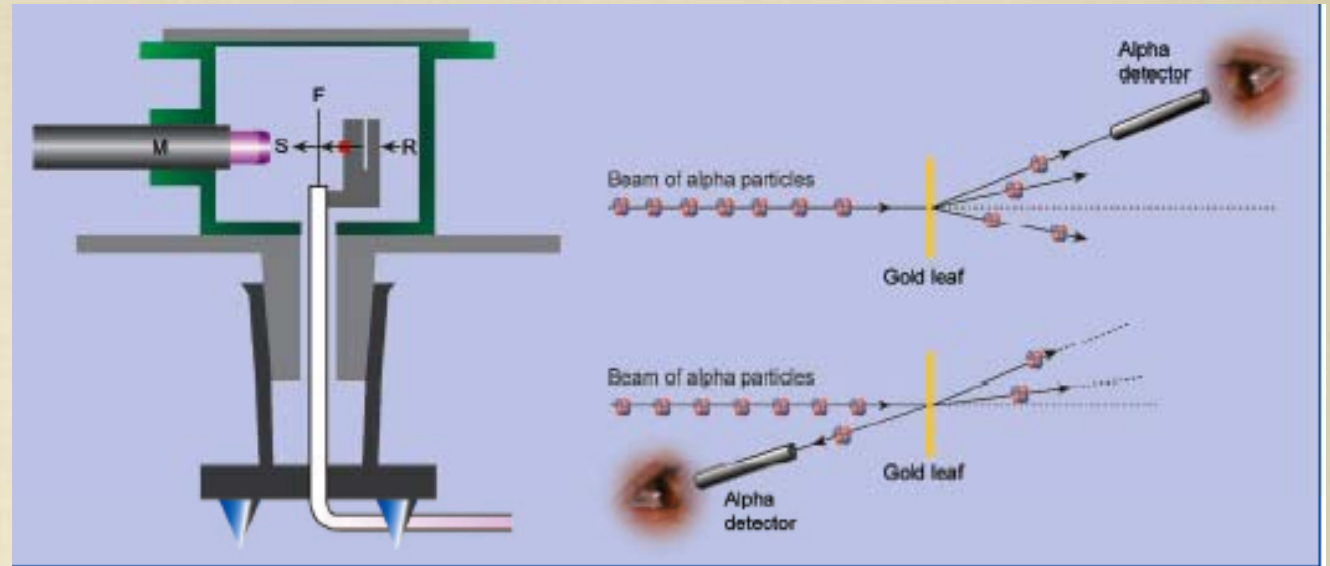
$$\langle x^2 \rangle = \frac{2kTt}{\alpha} = \frac{kTt}{3\pi\eta a}$$

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

**Die Existenz von Atomen als physikalische Realität war bewiesen**



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)

**Entdeckung des Atomkerns**

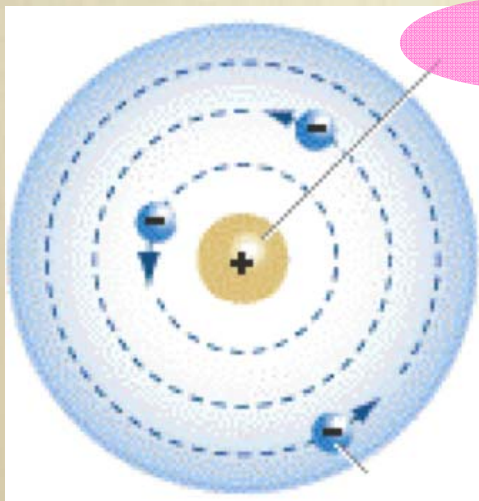


Eine Analogie mit dem Sonnensystem:

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'**



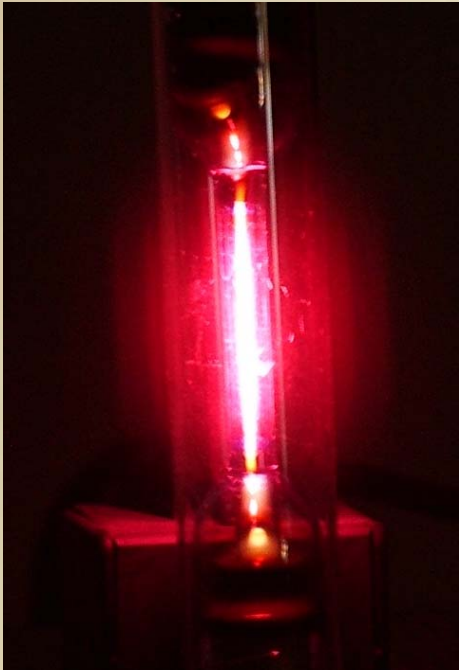
Kern

**NEUE PROBLEME:**

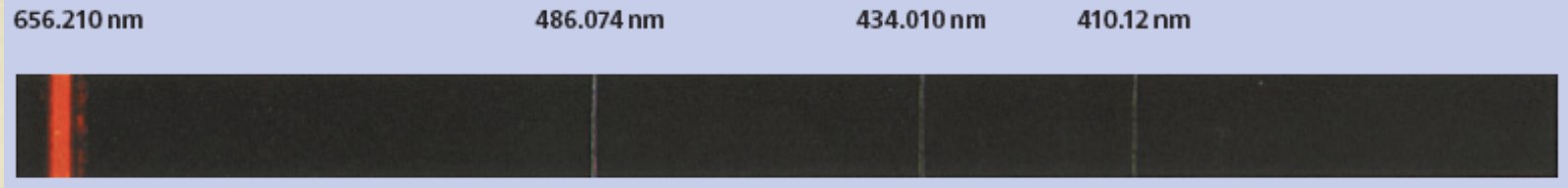
**? Wie können Elektronen den Kern umkreisen ohne Strahlung auszusenden?**

**? Woraus besteht der Atomkern?**

Rutherford-Modell  
des "leeren" Atoms



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



Balmer's empirische Formel:

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

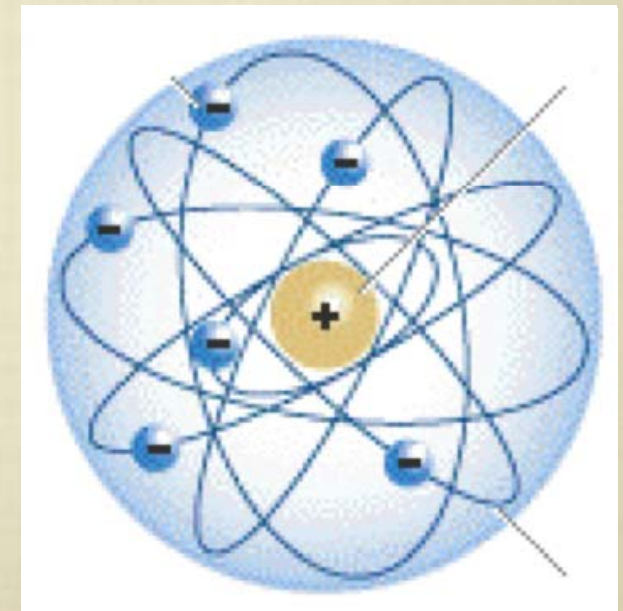
Niels Bohr besucht Rutherford im Jahr 1913

*Anwendung der Planck'schen Quantenhypothese im Atom !*

- Wenn der Drehimpuls quantisiert ist:

$$\mathbf{L} = n \cdot \hbar = n \cdot \frac{h}{2\pi} \quad \text{dann} \quad E_n = \frac{-13.6 \text{ eV}}{n^2}$$

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





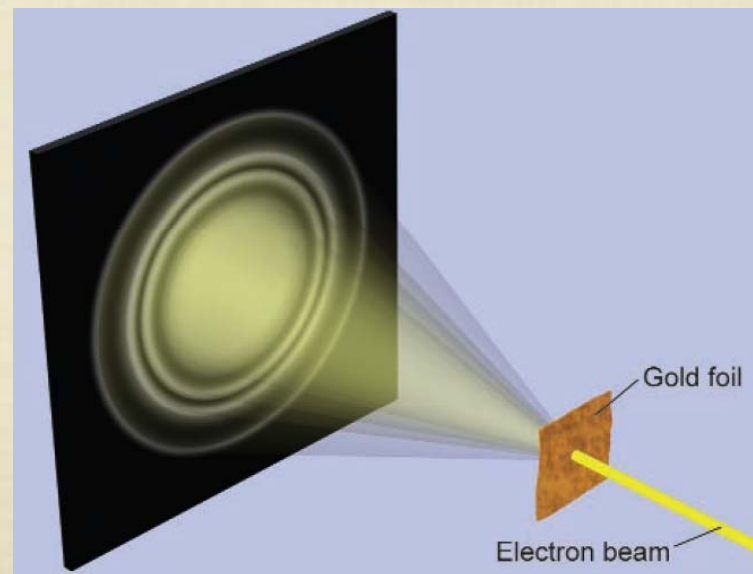
**Es brauchte noch weitere 10 Jahre bevor man anfang, die mysteriösen Regeln der atomaren Welt zu verstehen.**



Louis de Broglie (1924)

Teilchen haben Welleneigenschaften

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



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



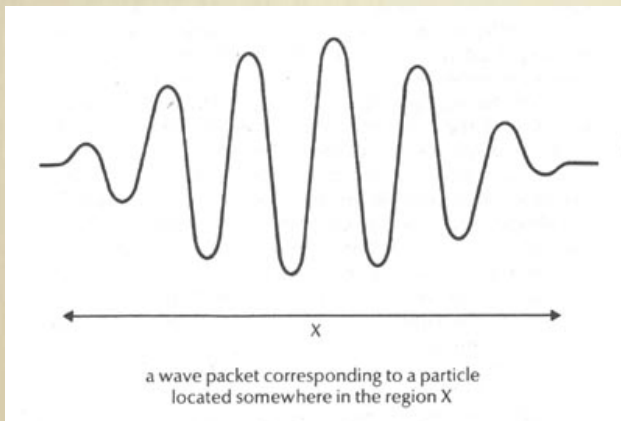
Heisenberg (1925)

## 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):

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

Energie-Zeit-Unschärfe:

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





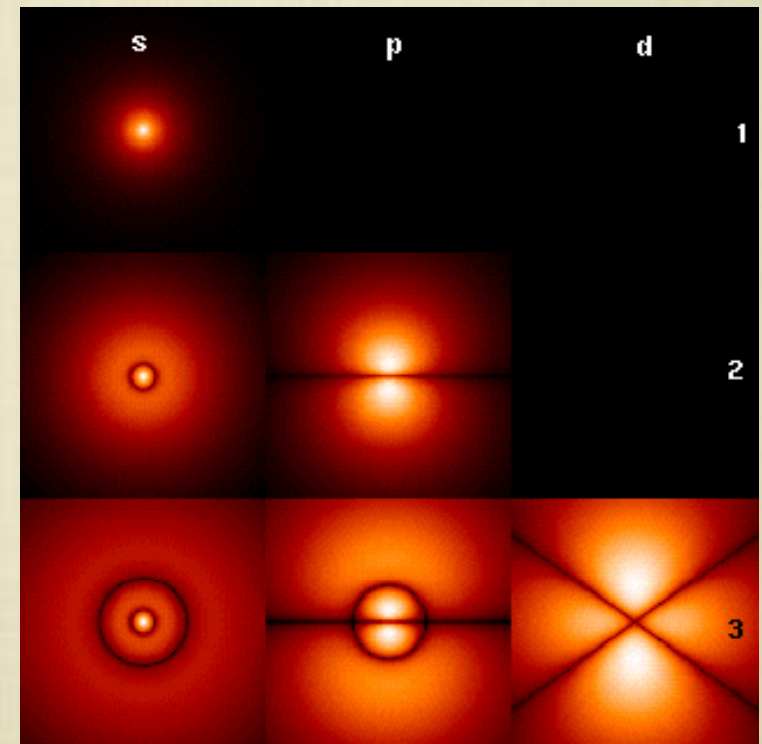
Schrödinger  
1926

## Wahrscheinlichsamplitude

Wenn Teilchen auch Wellen sind -> Wellengleichung

$$H\psi(\mathbf{r}, t) = (T + V)\psi(\mathbf{r}, t) = \left[ -\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + V(\mathbf{r}) \right] \psi(\mathbf{r}, t) = i\hbar\frac{\partial\psi}{\partial t}(\mathbf{r}, t)$$

Funktioniert prima wenn  
 $v \ll c$



Elektron-Wellenfunktionen im Wasserstoff  
('3-dim stehende Wellen')

Welleninterferenz:  $\psi$  = komplexe Funktion

**Interpretation** (Born, 1927):

$\psi$  = Wahrscheinlichkeits**amplitude**

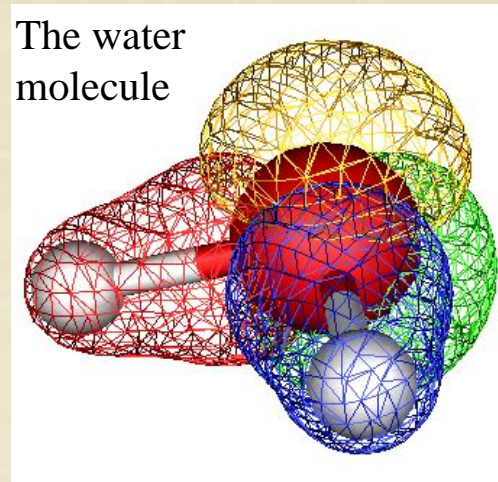
$|\psi|^2$  = Wahrscheinlichkeit (das Teilchen  
an diesem Ort anzutreffen)

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.

**Aber was geschah im Atomkern?  
Zwischen 1911- 1932 gab es keinen grossen Fortschritt.**



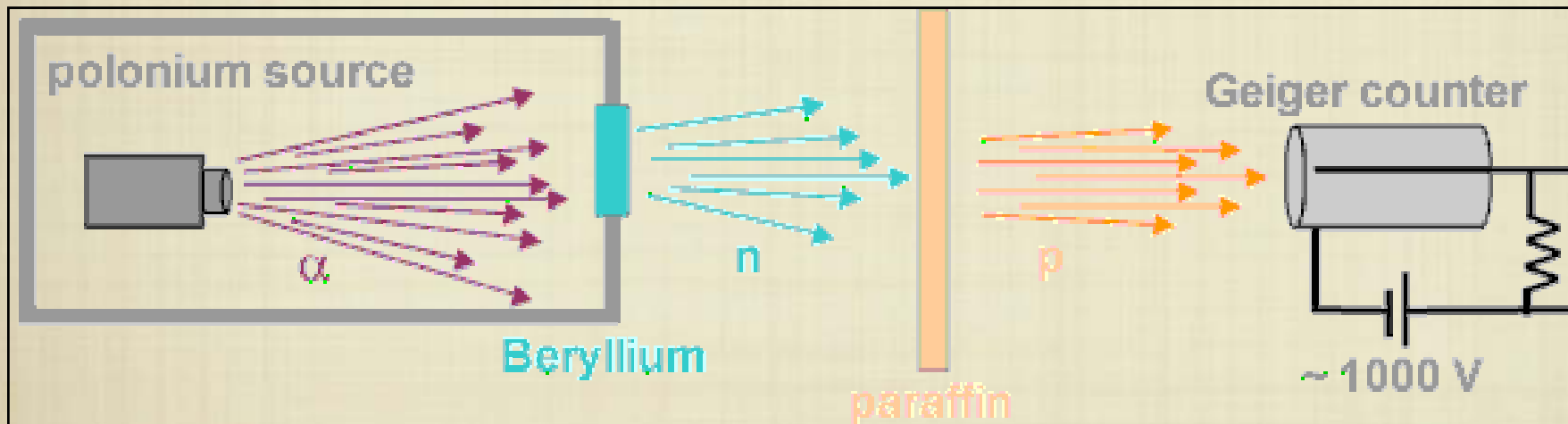
## Woraus besteht der Atomkern?

Beispiel: He-4 hat Kernladungszahl  $Z=2$ ; wie kann man  $A=4$  erklären?

**Heisenberg: Protonen und Elektronen im Kern ( $4 p + 2 e^-$ ) ?**

Funktioniert nicht! Das würde der Unschärferelation widersprechen.

## Chadwick (1932): Entdeckung des Neutrons

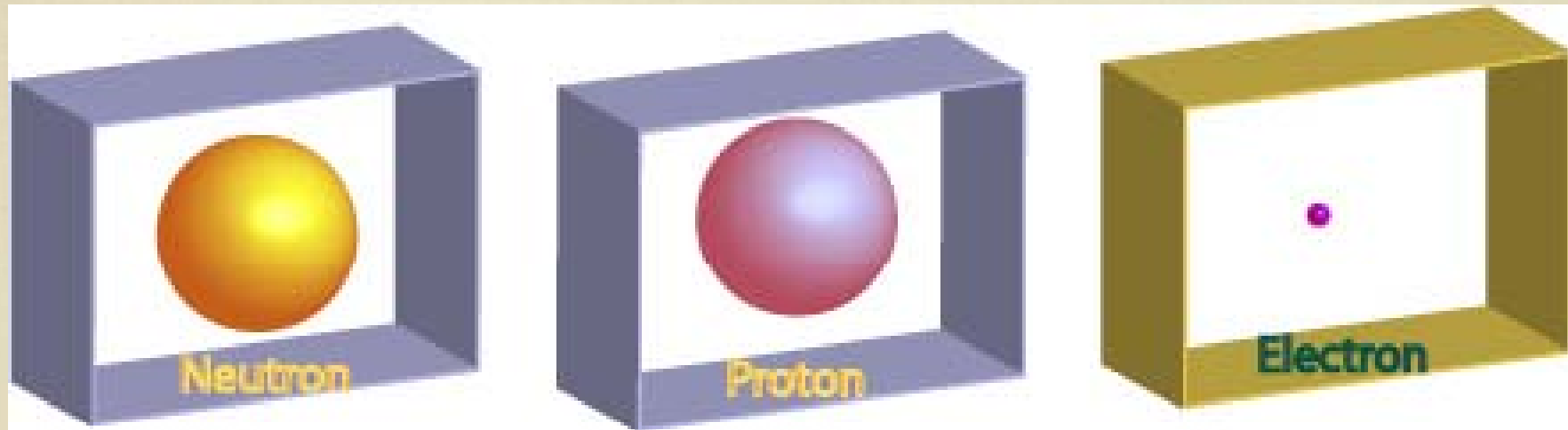


Kinematik: Masse des Neutrons  $\sim$  Masse des Protons

**Was hält den Kern zusammen (gegen die Coulomb-Abstossung?) - "Starke Wechselwirkung mit kurzer Reichweite" ?**

# TEILCHEN

## Das Standard-Modell (1932)



**Einfach und leicht zu merken  
Taucht oft in Schulbüchern auf  
(meist im Chemie-Unterricht)**



Was hält Atome und Kerne zusammen?

1900: zwei fundamentale Kräfte waren bekannt ...

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

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



Gravitation

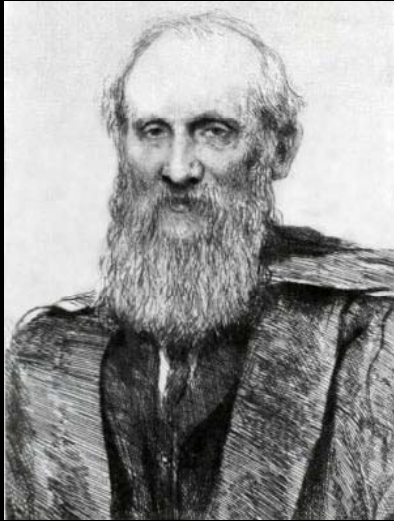


Elektromagnetismus

Gemeinsamkeit:  $1/r^2$  Gesetz

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

**Zur Erinnerung:  
zwei Wolken am Horizont der Physik im Jahr 1900:**



**William Thomson  
(Lord Kelvin)**

**Wolke Nr. 1) Hohlraumstrahlung  
Wolke Nr. 2) Michelson-Morley Experiment**

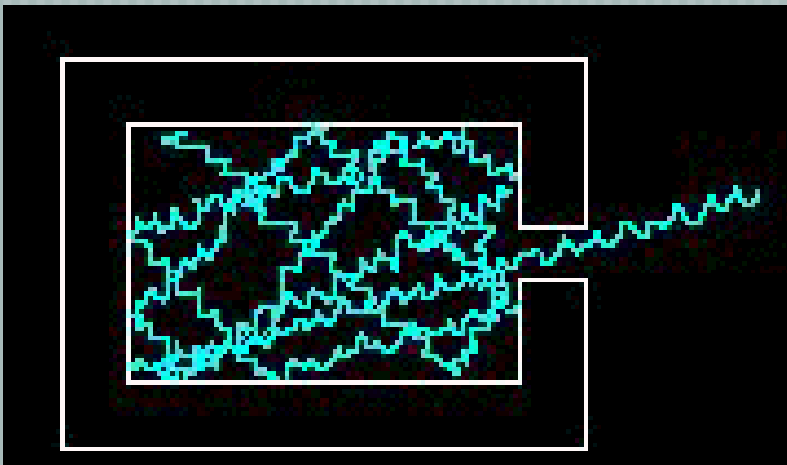
**Die Lösung dieser Rätsel führte zur**

- Quantentheorie**
- Relativitätstheorie**



Photon

### Hohlraumstrahlung

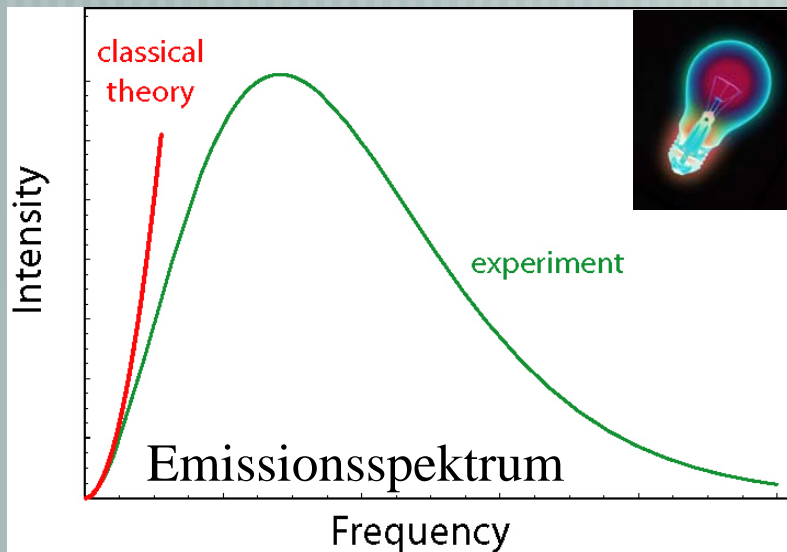


Ein "Hohlraum" absorbiert die einfallende Strahlung völlig und sendet diese Energie als thermische Strahlung wieder aus:

"Hohlraumspektrum" =  $f(\nu, T)$

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

durchschnittliche Energie der Oszillatoren (proportional zur Temperatur?)

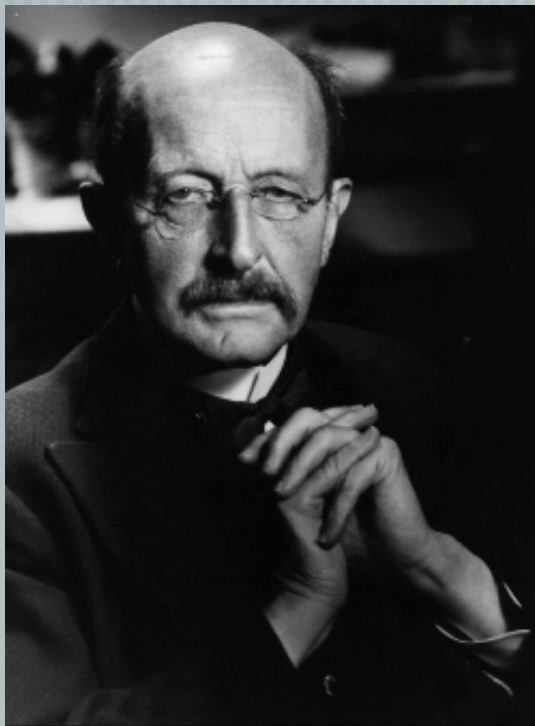


Ok für 'kleine' Frequenzen (Jeans law)

Photon

## Ein "Akt der Verzweiflung"

14 Dezember 1900



Max Planck

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*

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

Durchschnittsenergie  
der Oszillatoren

$h$  = neue fundamentale Konstante



Photon

1902

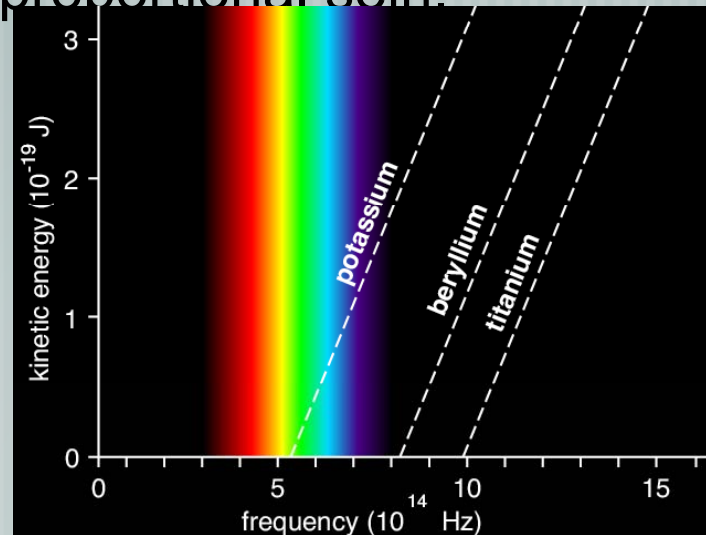


Philipp von Lenard

## Der photoelektrische Effekt

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

Klassisch: Da die Energie des Lichts proportional zum Quadrat der Amplitude ist, muss auch die Energie der Elektronen der Intensität des Lichts proportional sein.



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

*"Die Energie der Elektronen zeigt nicht die geringste*

*Abhängigkeit von der Lichtintensität"*

Photon

“Mein einziger revolutionärer Beitrag zur Physik”

17 März 1905



**Albert Einstein**

**Licht wird quantenweise emittiert und absorbiert**

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

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

*(Erst im Jahr 1917 durch Compton bewiesen)*



### Spezielle Relativitätstheorie

Einstein war zu dem Schluss gekommen, dass sich elektromagnetische Wellen ohne Medium ("Äther") ausbreiten. Die Lichtgeschwindigkeit musste deshalb in allen Inertialsystemen gleich sein.

#### Seine zwei Postulate:

- 1) Lichtgeschwindigkeit  $c = \text{konstant}$  (in Vakuum)
- 2) alle unbeschleunigten Bezugssysteme sind äquivalent ("Relativitätsprinzip")

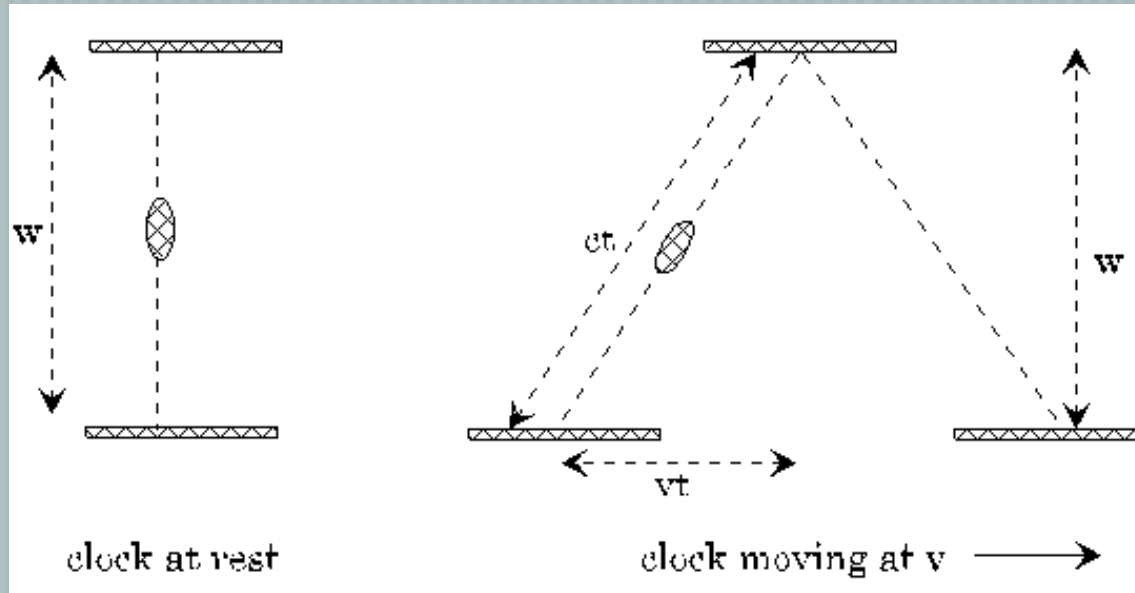
*Aber wie konnten zwei relativ zueinander bewegte Beobachter jeweils die gleiche Lichtgeschwindigkeit messen?*

#### Seine Schlussfolgerung:

Da  $c = \text{const}$ , und Geschwindigkeit = (Raumintervall/Zeitintervall) -->  
Raum und Zeit können keine absolute Bedeutung haben

# Felder

## Spezielle Relativität



$$c^2 t^2 = v^2 t^2 + w^2$$

$$t^2 (c^2 - v^2) = w^2$$

$$t = \frac{w/c}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma \cdot \tau$$

- 1) Verlangsamung der Zeit, Verkürzung des Raums
- 2) Modifizierung von Newton's Bewegungsgesetzen  
'Relativistische' Masse - "Ruheenergie"

$$E = mc^2$$

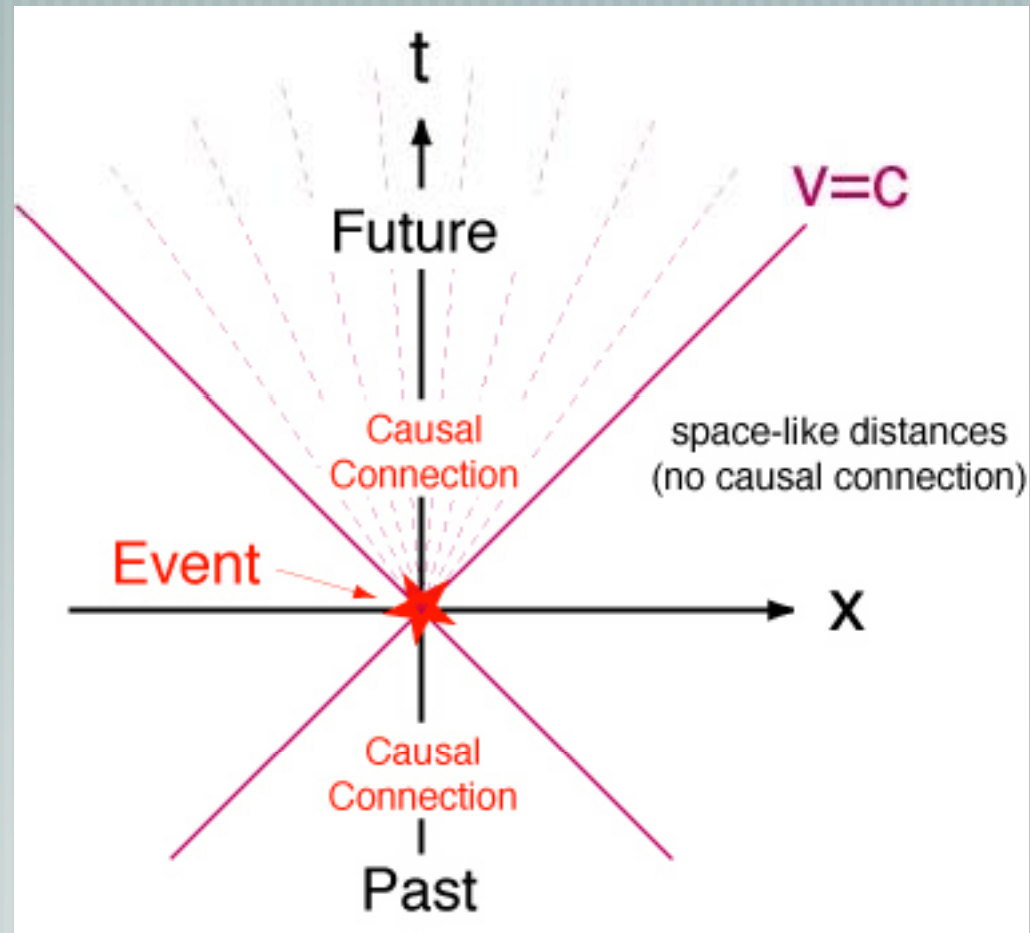


**Die Relativitätstheorie erlaubte es,  
"KAUSALITÄT" konsistent zu definieren:**

**Nichts kann sich  
schneller als das Licht  
bewegen**



**Nur Ereignisse  
innerhalb des  
Lichtkegels können  
einen Einfluss  
aufeinander ausüben**



Quantentheorie + Spezielle Relativitätstheorie = ??

Dirac hat die richtige Formel 'erraten':



Paul A.M. Dirac  
(1928)

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

$$\psi = \begin{pmatrix} \text{Elektron - Spin up} \\ \text{Elektron - Spin down} \\ \text{Positron - Spin up} \\ \text{Positron - Spin down} \end{pmatrix}$$

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

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

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

Zum Vergleich: die nicht-relativistische Schrödinger-Gleichung

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

**1) ANTITEILCHEN**

**2) SPIN**

**3) SPIN + STATISTIK (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

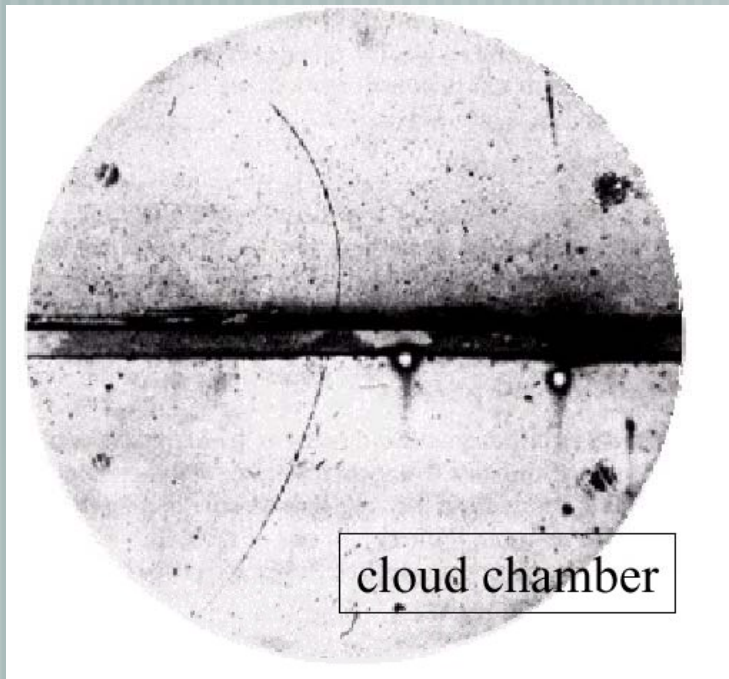
Spezielle Relativität



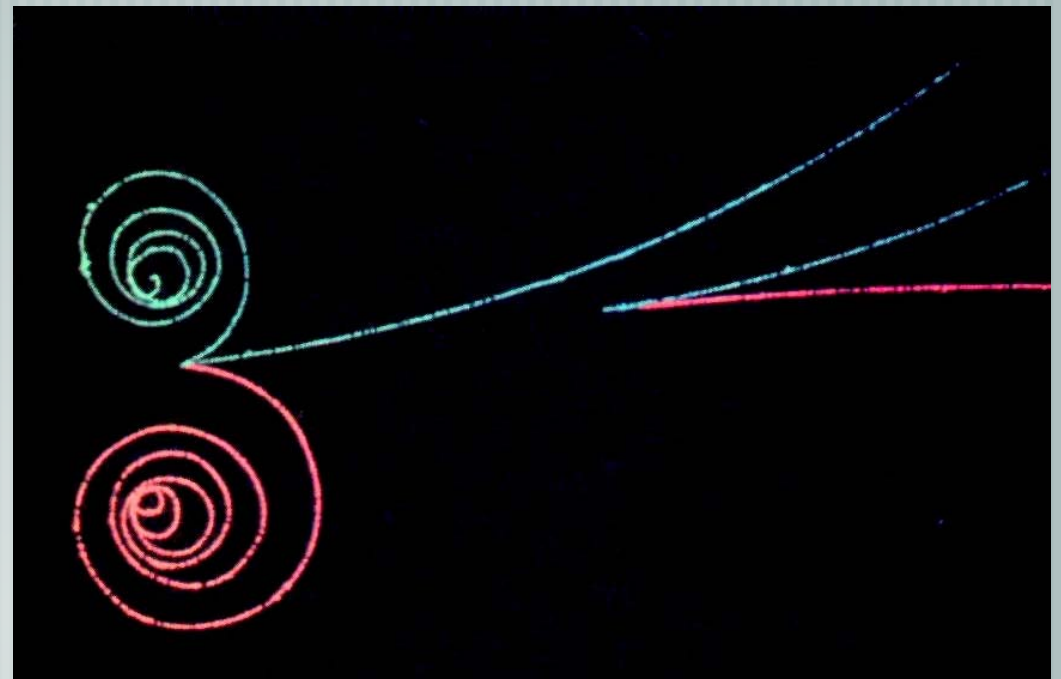
Anderson (1932)

## Entdeckung des Positrons

*Dirac hatte recht!*



## Elektron-Positron-Paarerzeugung



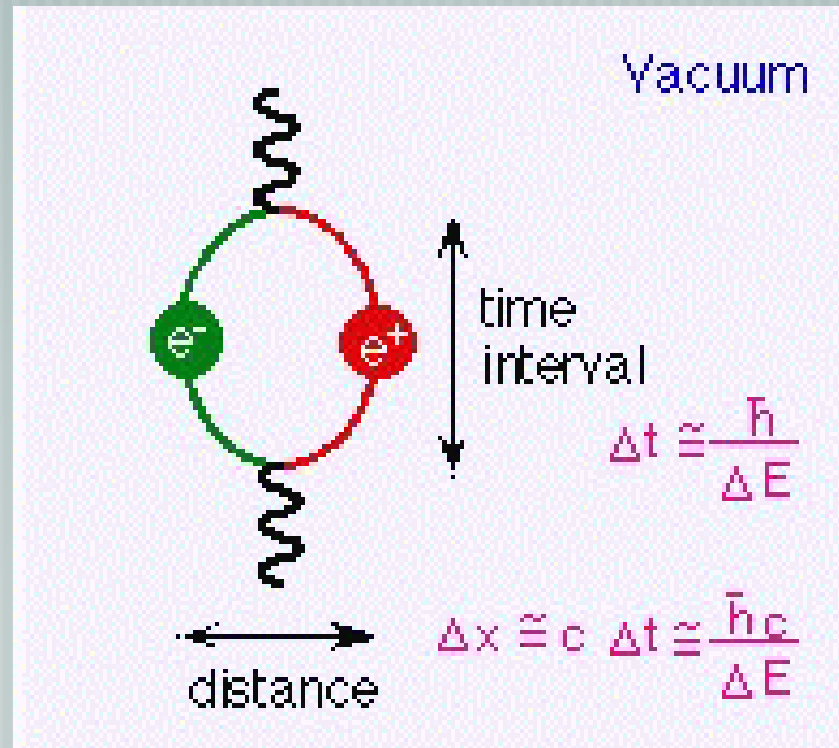


# Felder

## DAS VAKUUM WAR PLÖTZLICH SEHR KOMPLIZIERT GEWORDEN

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

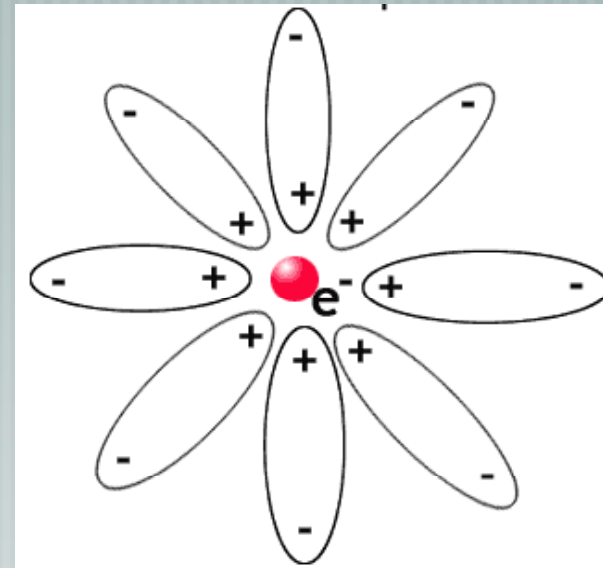
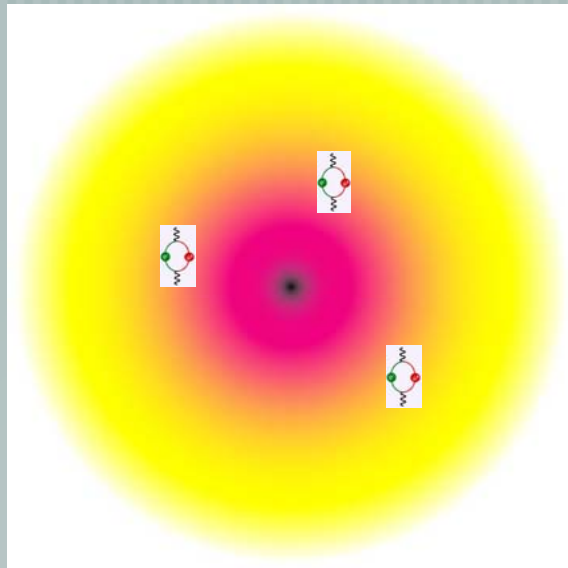
Selbst im Grundzustand verschwinden die elektromagnetischen Felder nicht völlig:  
Fluktuationen des Vakuums produzieren (für kurze Zeit) Elektron-Positron Paare.



# Felder

**Wie konnte man die Wechselwirkung zwischen Elektronen und Photonen berechnen?**

'Zweite Quantisierung' :  
Felder werden durch Erzeugungs- und Vernichtoperatoren 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

# Fields

1934 - 1948



R. P. Feynman

## Quanten-Elektrodynamik

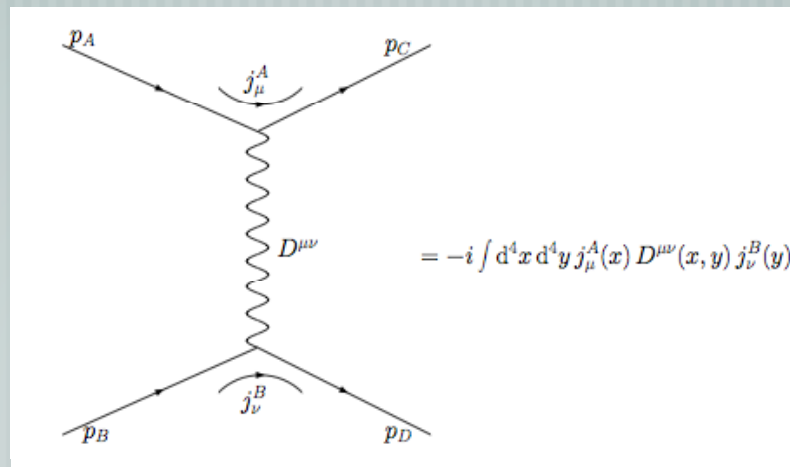
Feynman, Tomonaga, Schwinger

### “Renormalisation”

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

### Feynman Diagramme

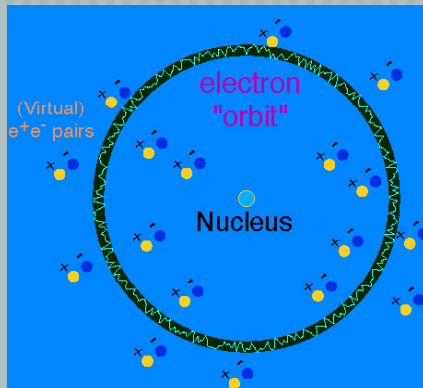
Präzise Berechnungsvorschriften in graphischer Form



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

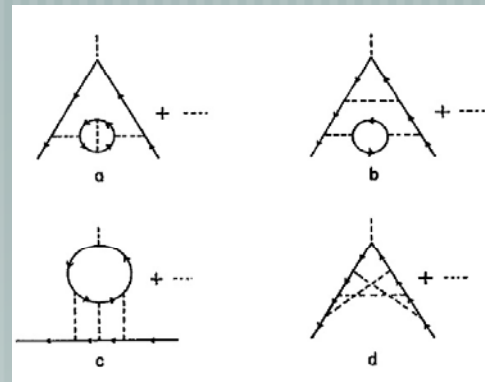


Vakuumfluktuationen haben beobachtbare Auswirkungen ...  
die mit der QED präzise berechnet werden können.



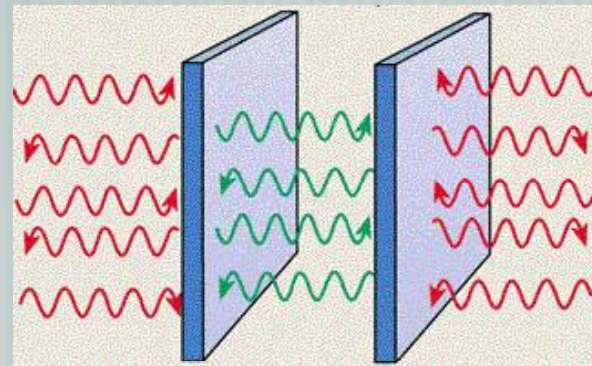
## Lamb Shift

(Verschiebung atomarer  
Energieniveaus)



## Anomalie des magnetischen Moments des Elektrons

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



## Casimir-Effekt

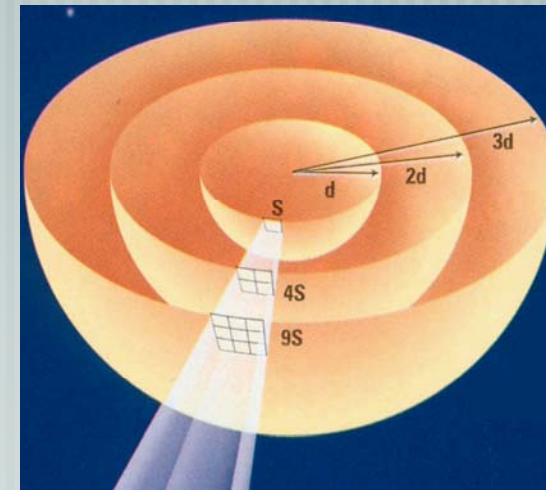
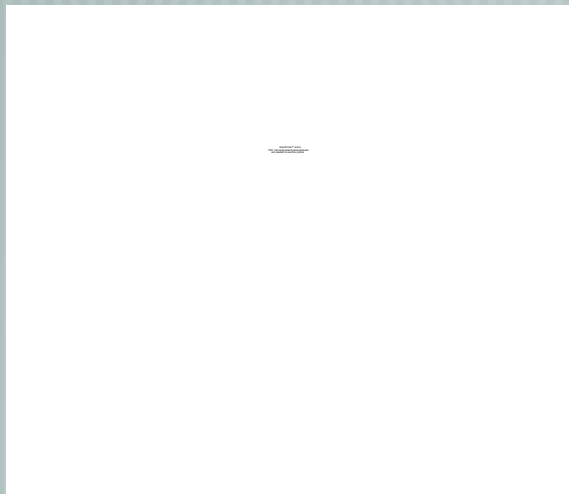
(Kraft zwischen zwei ungeladenen Metallplatten)

# Felder

## Elektromagnetische Wechselwirkung

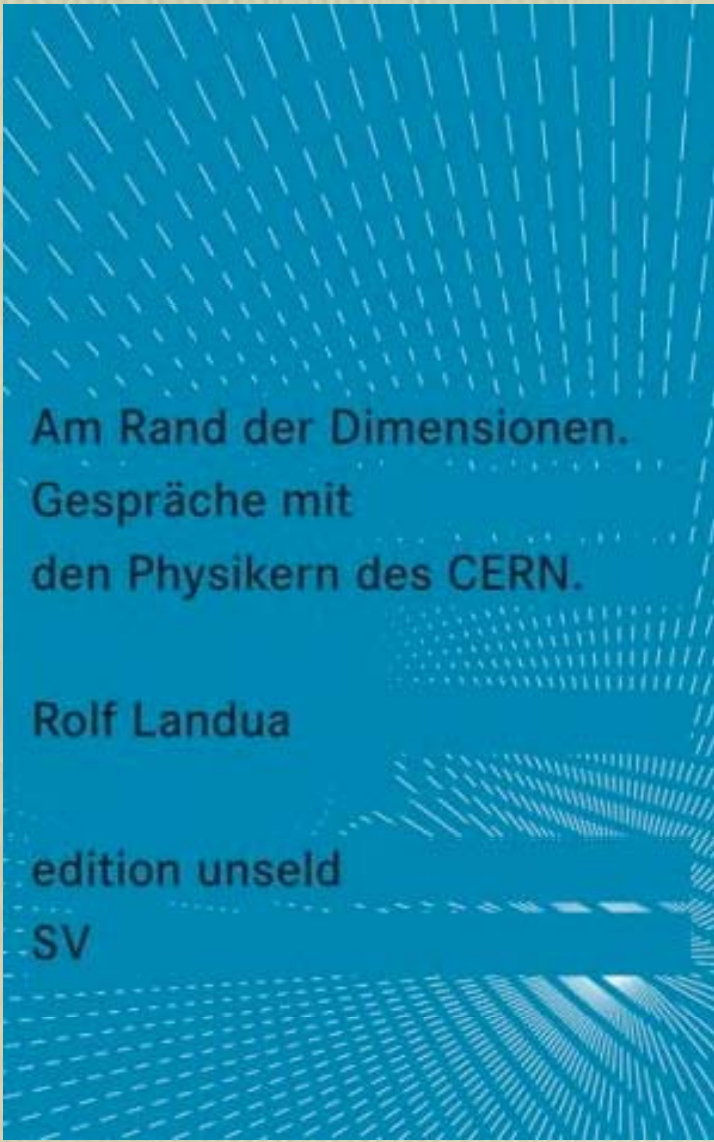
**QED: Elektrisch geladene Teilchen wechselwirken durch den Austausch von Photonen**

- 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?**



Am Rand der Dimensionen.  
Gespräche mit  
den Physikern des CERN.

Rolf Landua

edition unseld  
SV