

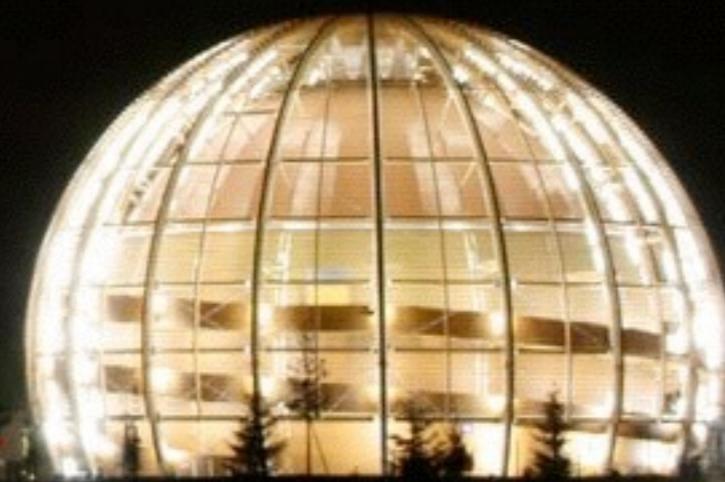


# Teilchenphysik

Lehrerprogramm - Oktober 2016

European Organisation for Nuclear Research

*„Magic is not happening at CERN, magic is explained at CERN“ - Tom Hanks*



**Kristof Schmieden**  
EP Department

[kristof.schmieden@cern.ch](mailto:kristof.schmieden@cern.ch)

## Verständnis der Bausteine unseres Universums

- 120 Jahre Forschung im Bereich Teilchenphysik
  - in 3 Stunden ....
- Fokus auf:
  - Wichtigen Konzepte / Ideen
  - Hinarbeiten auf den aktuellen Stand der Forschung
  - In etwa in historischer Abfolge

Fragen!  
Immer & jederzeit

Fragen!  
Immer & jederzeit

Fragen!  
Immer & jederzeit

Wünsche für folgende Stunden

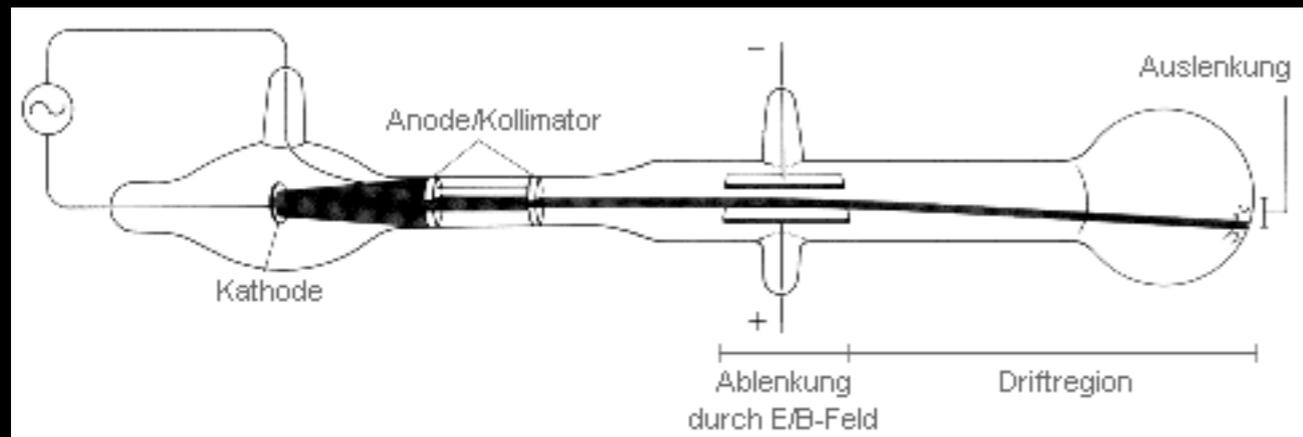
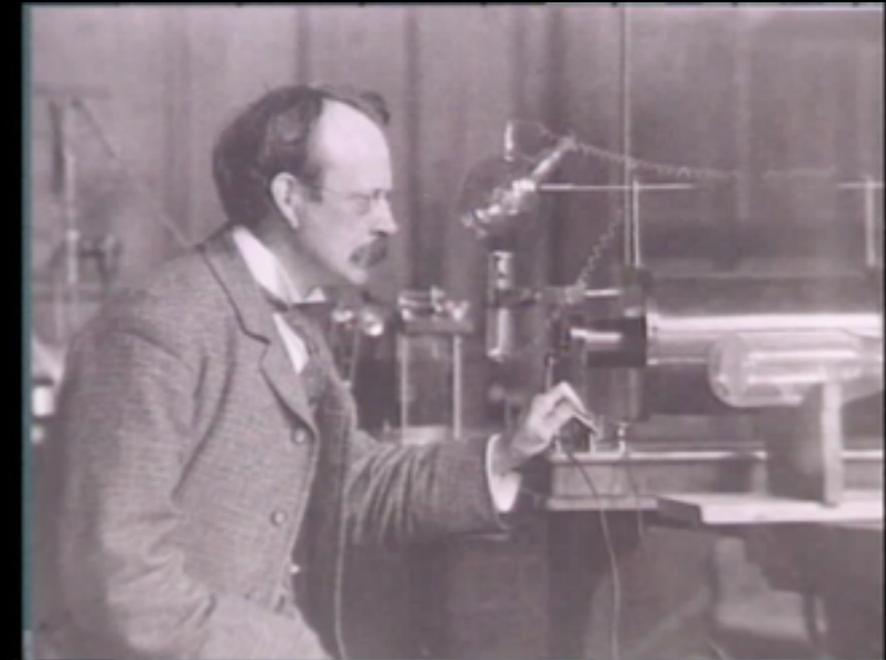
**Feedback!**  
Direkt: interessant / langweilig  
& Am Ende

Was ist elementar?

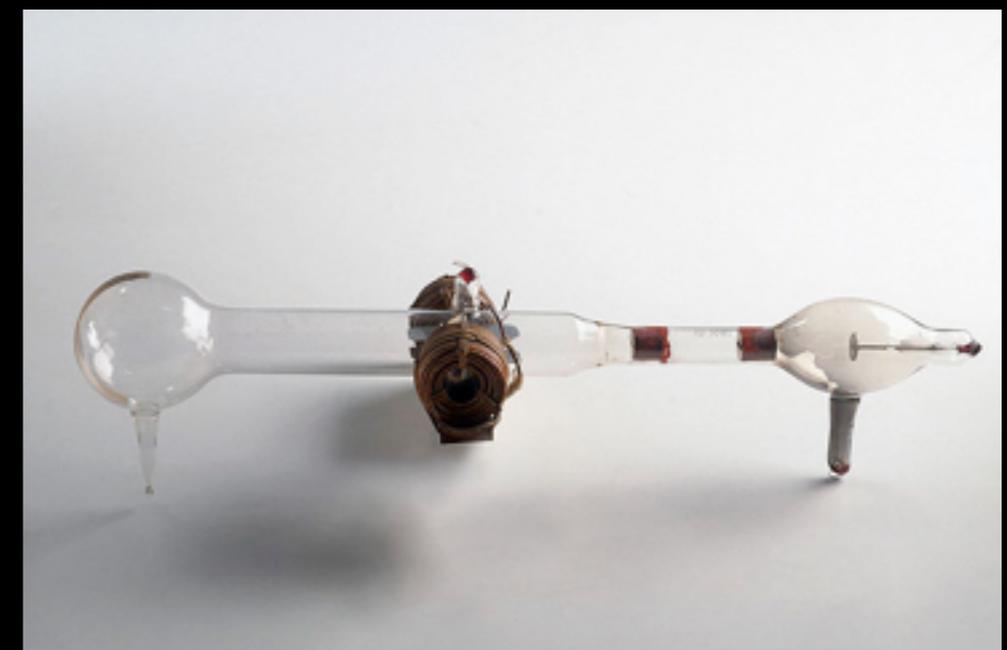
- Die Entdeckung des **Elektrons**

- Kathodenstrahlen: Bestimmung von  $e/m$
- Unabhängig von Kathodenmaterial / Restgas
- Elektrisch negativ geladen

1897: Thompson / Wiechert

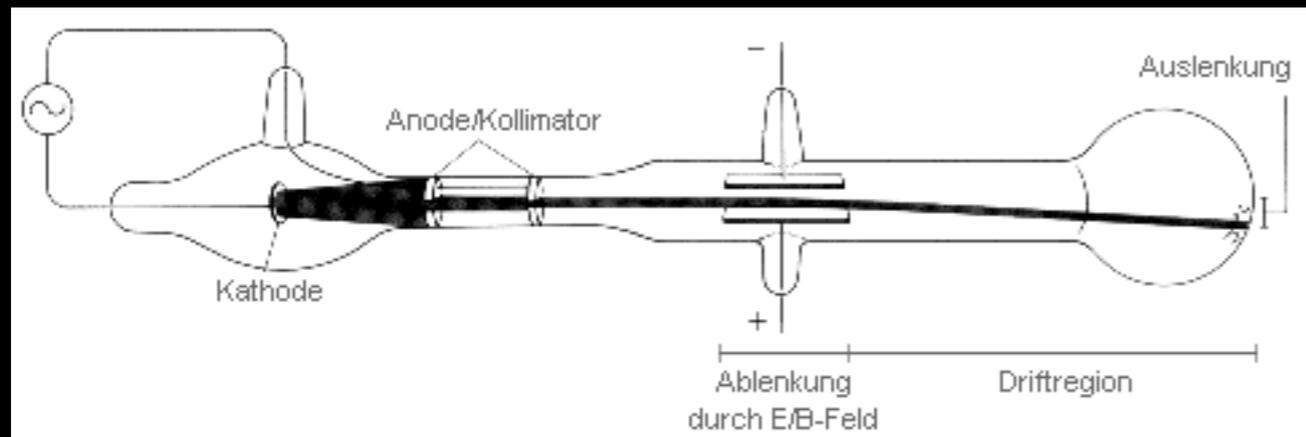


Historische Kathodenstrahlröhre

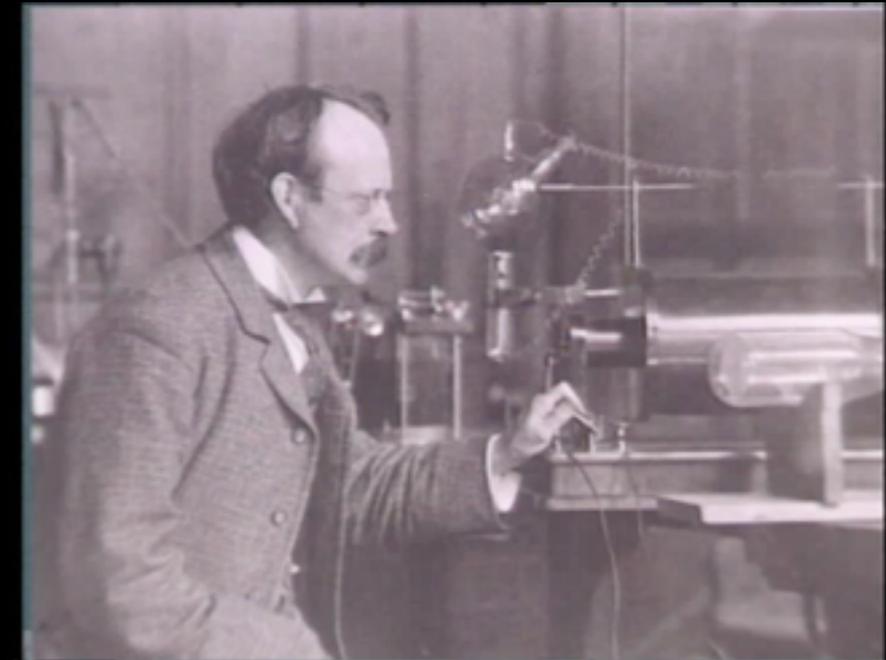


- Die Entdeckung des **Elektrons**

- Kathodenstrahlen: Bestimmung von  $e/m$
- Unabhängig von Kathodenmaterial / Restgas
- Elektrisch negativ geladen



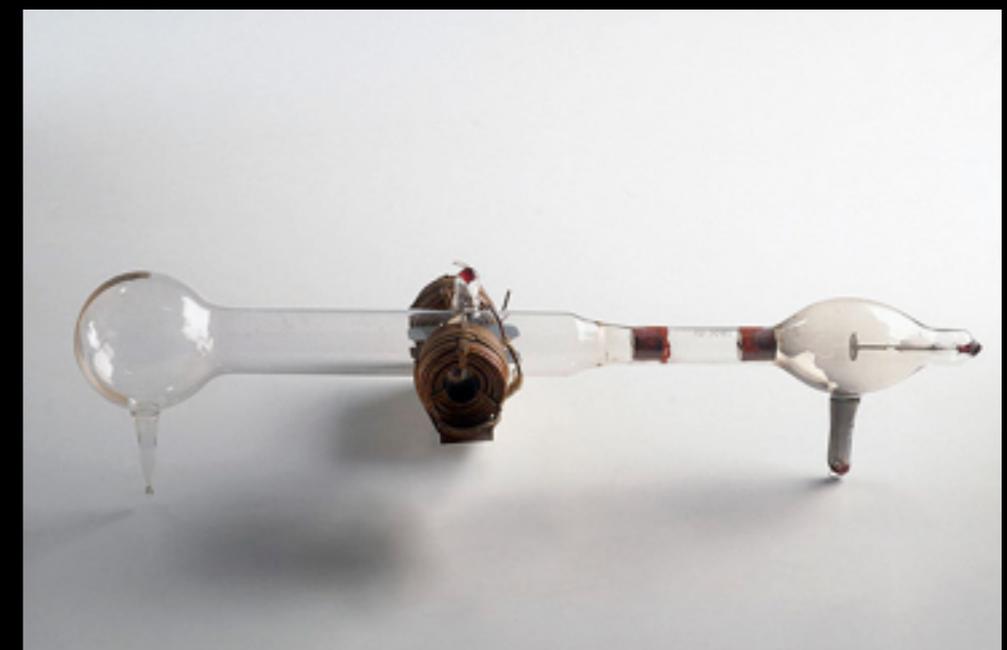
1897: Thompson / Wiechert



Historische Kathodenstrahlröhre

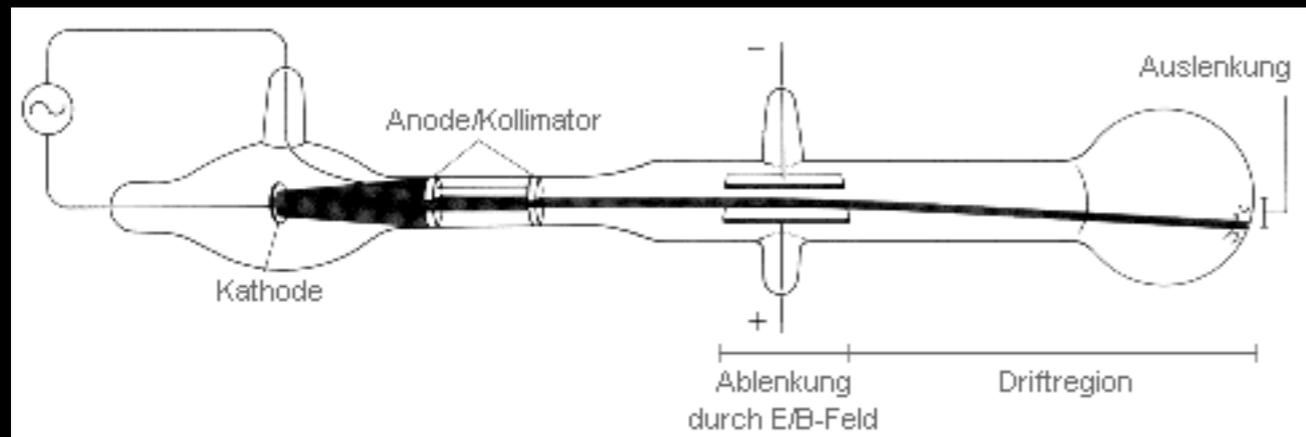
- **Zeeman Effekt:**

- Aufspaltung von Spektrallinien im Magnetfeld
- Erklärung mittels Elektronen
  - (**Spin** erst viel später eingeführt)

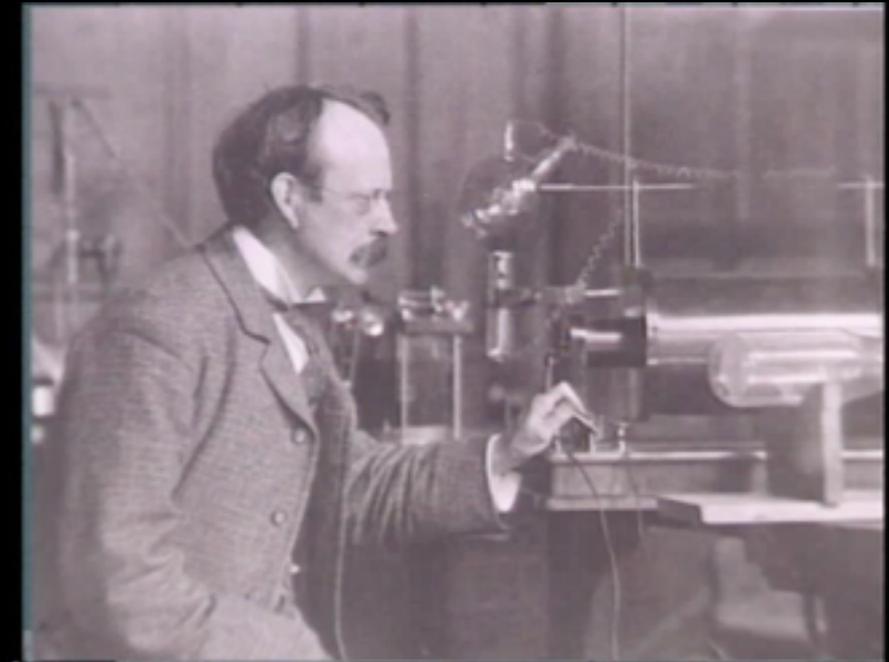


- Die Entdeckung des **Elektrons**

- Kathodenstrahlen: Bestimmung von  $e/m$
- Unabhängig von Kathodenmaterial / Restgas
- Elektrisch negativ geladen



1897: Thompson / Wiechert



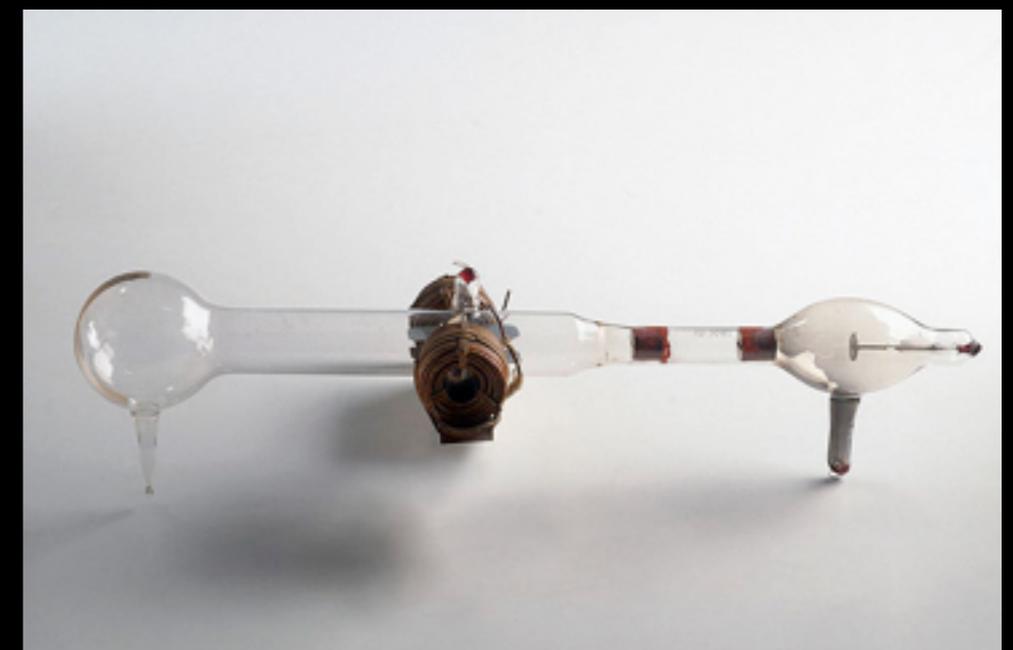
Historische Kathodenstrahlröhre

- **Zeeman Effekt:**

- Aufspaltung von Spektrallinien im Magnetfeld
- Erklärung mittels Elektronen
  - (**Spin** erst viel später eingeführt)

1896: Zeeman (Beobachtung)

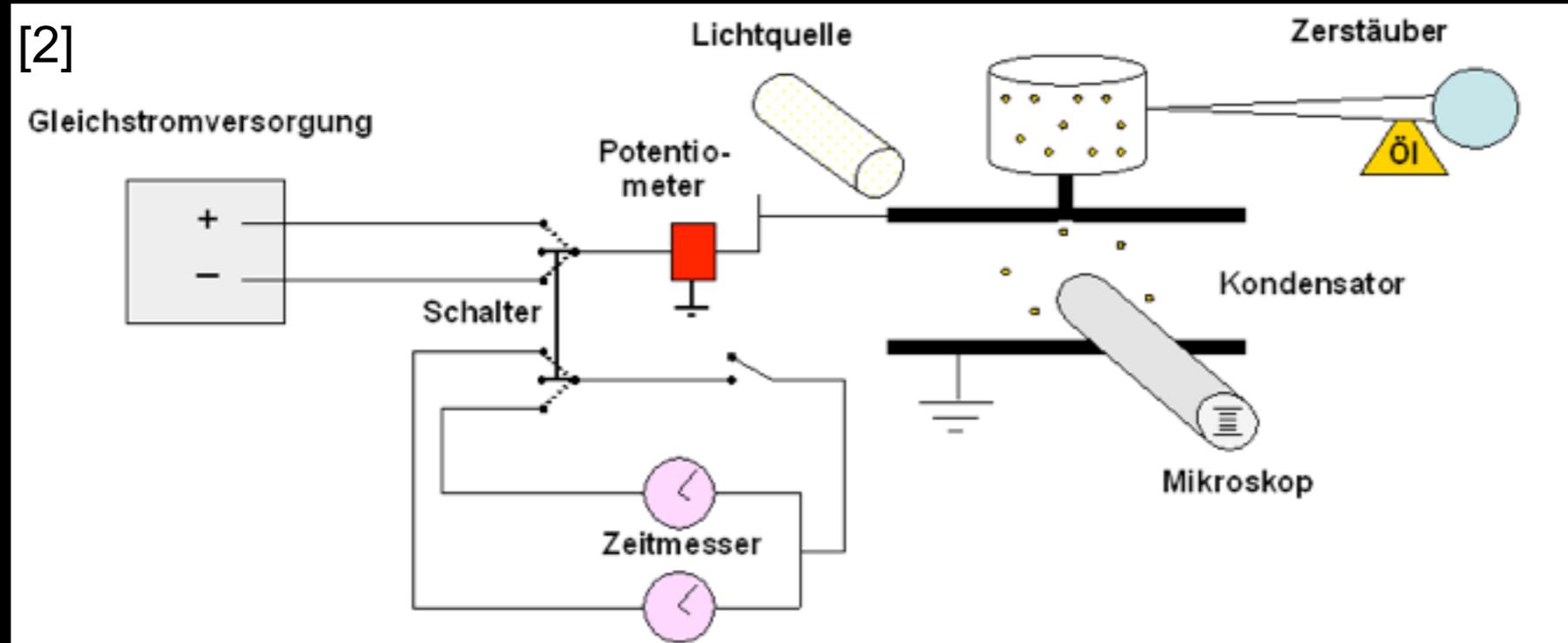
1899: Lorentz (Erklärung)



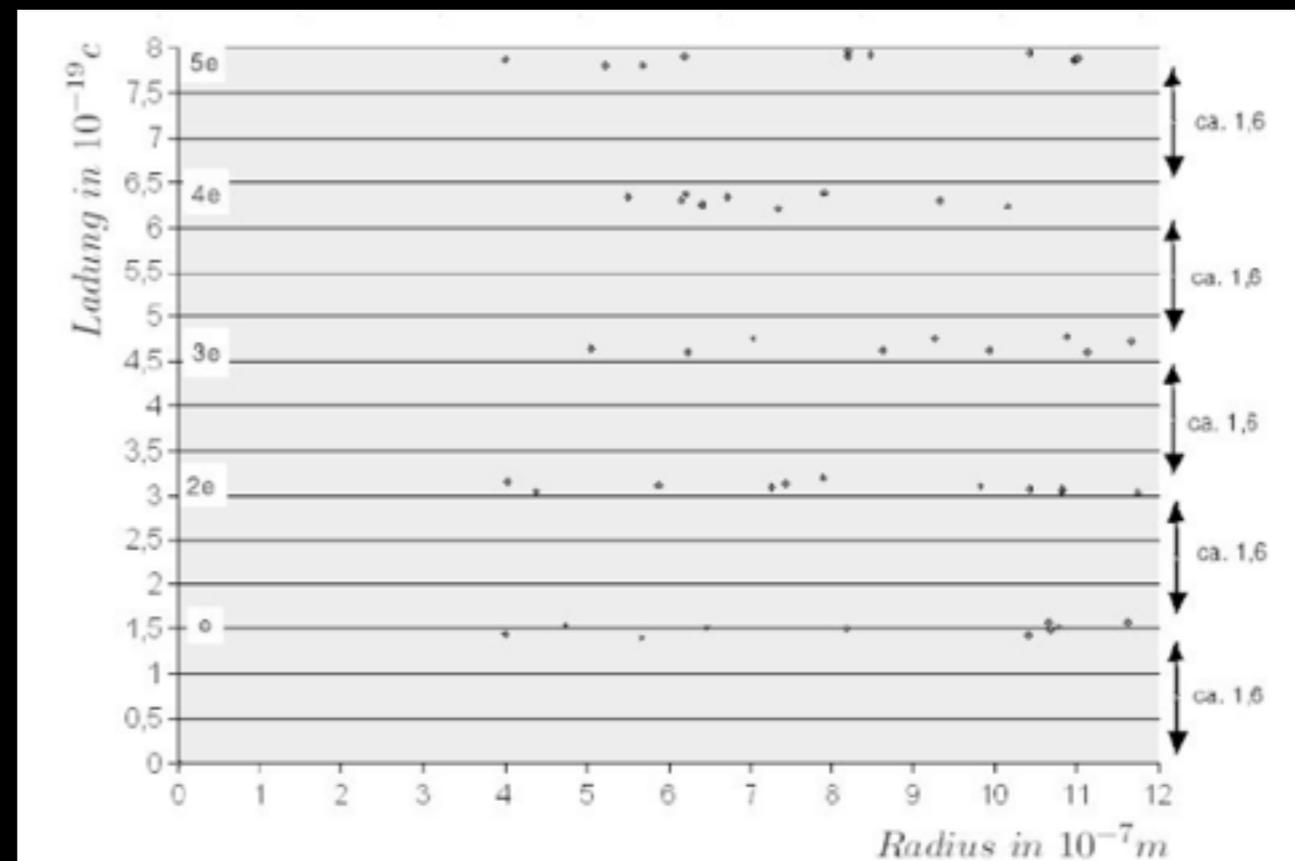
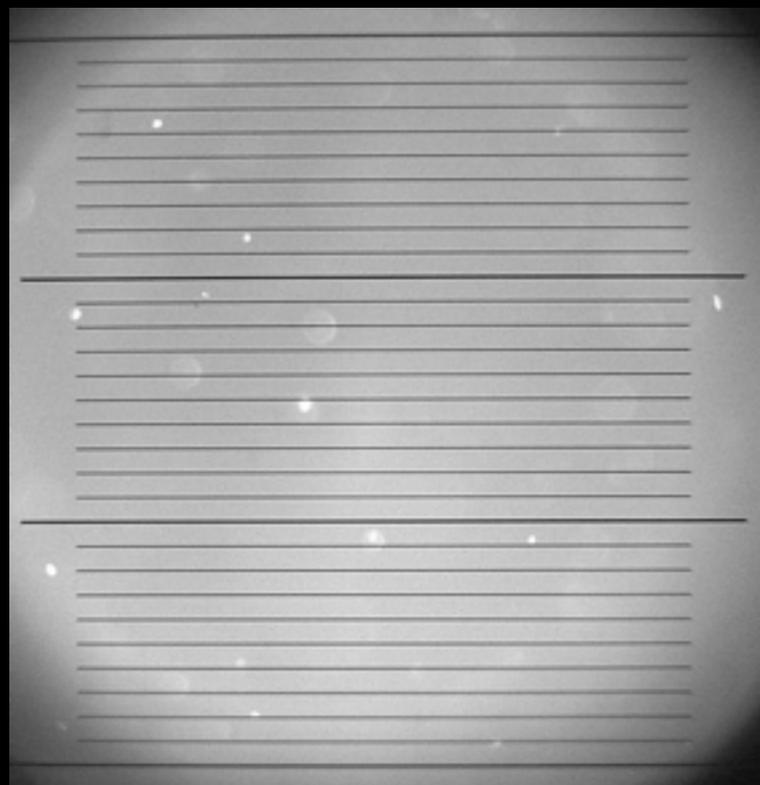
# Bestimmung der Elementarladung

- Millikan Versuch

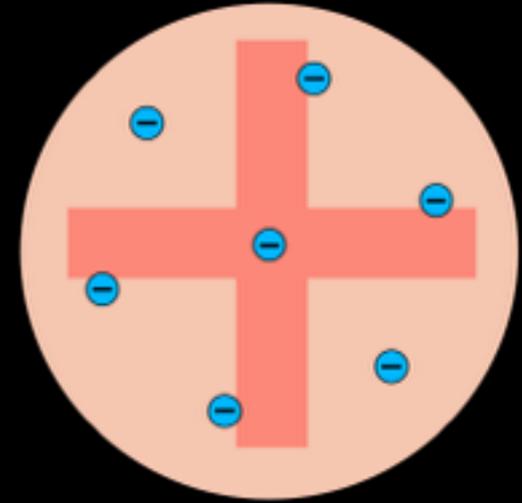
1910: Millikan / Fletcher



$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$



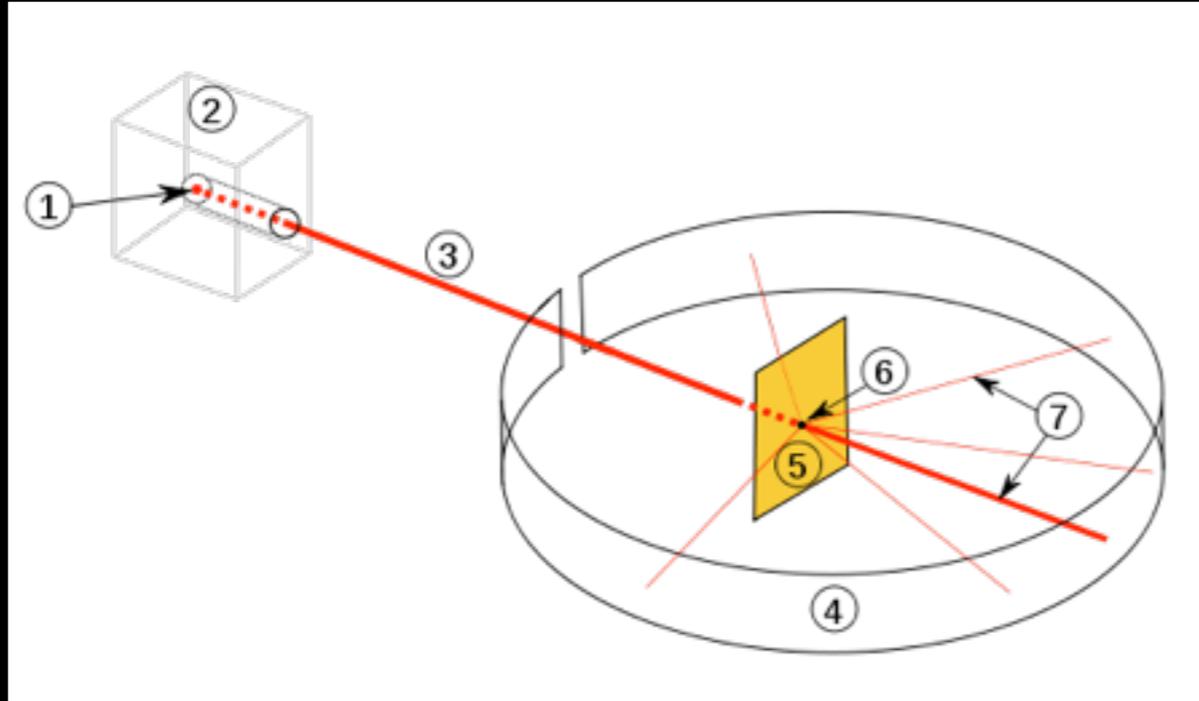
- Thomson: „*Rosinenkuchen*“-Modell
  - Elektronen in homogene, el. pos. geladene Masse eingebettet



# Rutherford Experiment

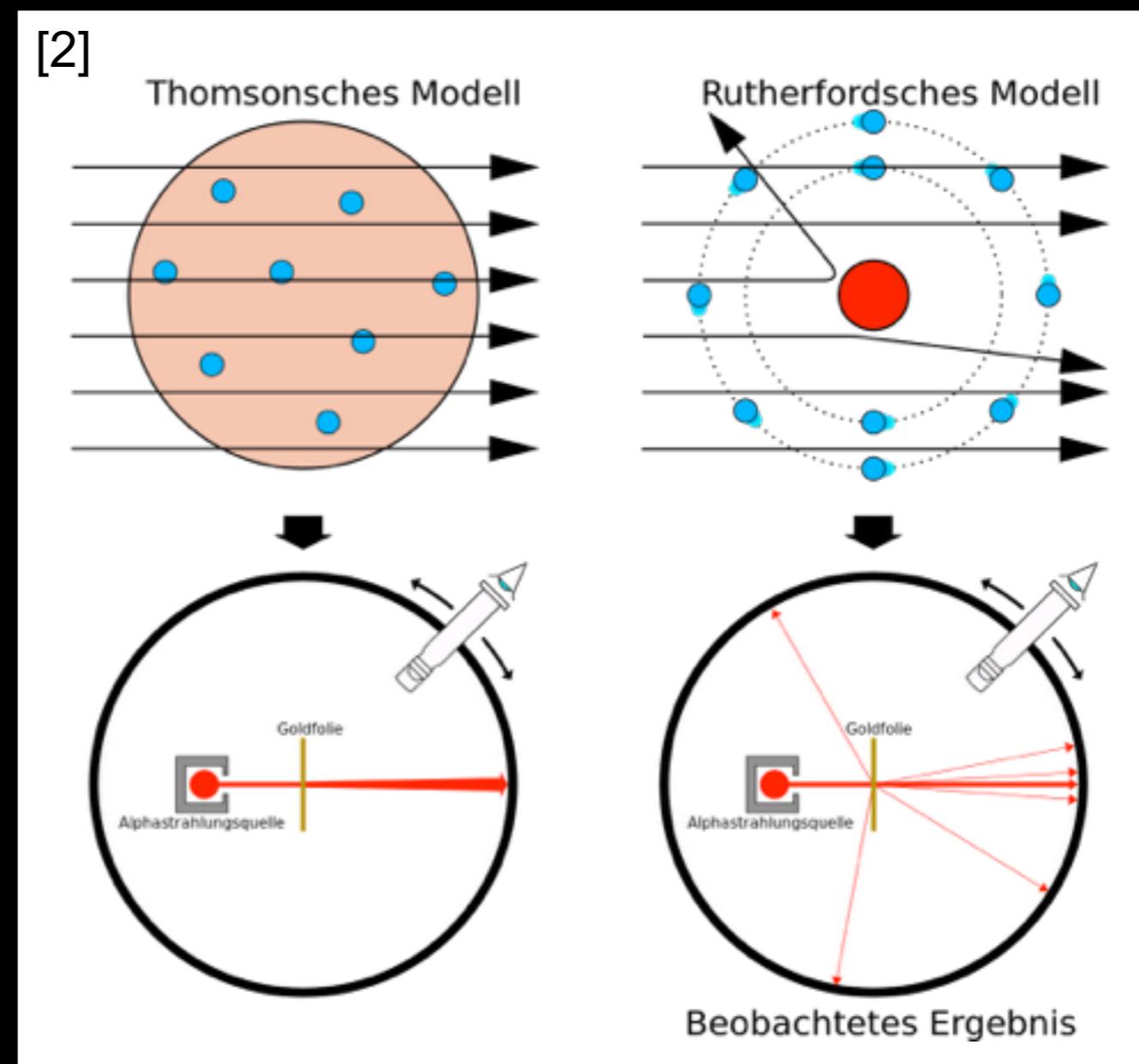
1909: Geiger / Marsden / Rutherford

- Atom hauptsächlich leer!
  - Fast alle Masse & elektrische Ladung in kleinem Bereich konzentriert

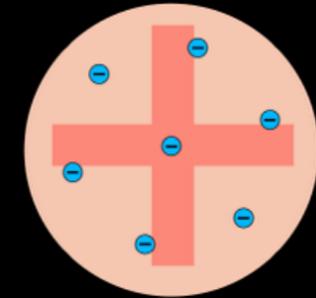


$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left( \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4E_0} \right)^2 \frac{1}{\sin^4\left(\frac{\vartheta}{2}\right)}$$

- Abschätzung Größe des Atomkerns:  
 $\sim 10^{-3} \cdot \text{Atomdurchmesser} = \sim 10^{-14} \text{m}$

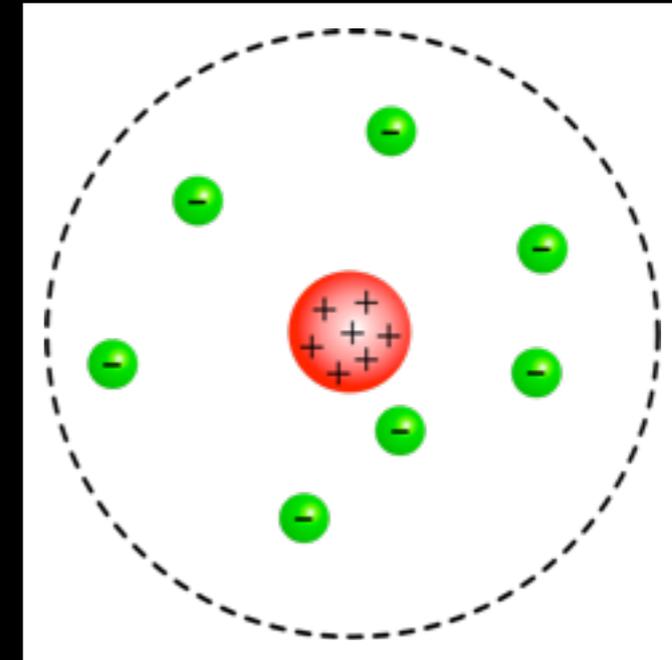


- Thomson: „*Rosinenkuchen*“-Modell
  - Elektronen in homogene, el. pos. geladene Masse eingebettet



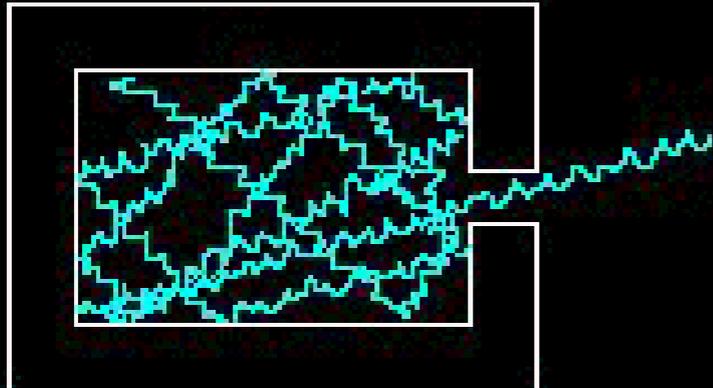
1900

- Rutherford: Masse und positive el. Ladung im Kern konzentriert, Elektronenwolke



1911

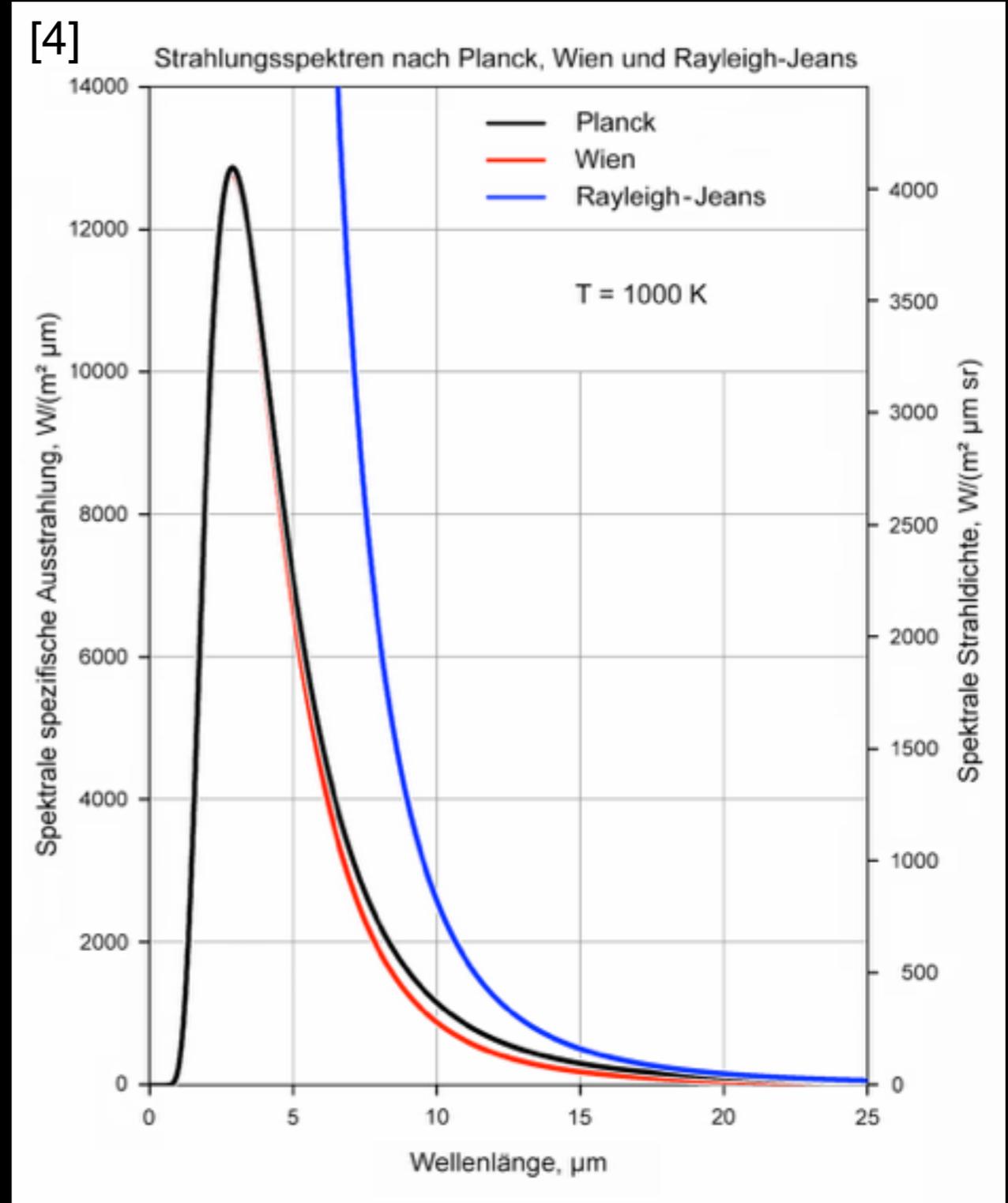
Max Planck: 1900



- Schwarzkörperstrahlung erst erklärbar durch Einführung von Energie-Quanten
  - Oszillatoren in den Wänden können nur Energiepakete  $\varepsilon=h\nu$
- Plancksche Strahlungsgesetz:

$$E(\nu, T) = \frac{h\nu}{e^{(h\nu/kT)} - 1}$$

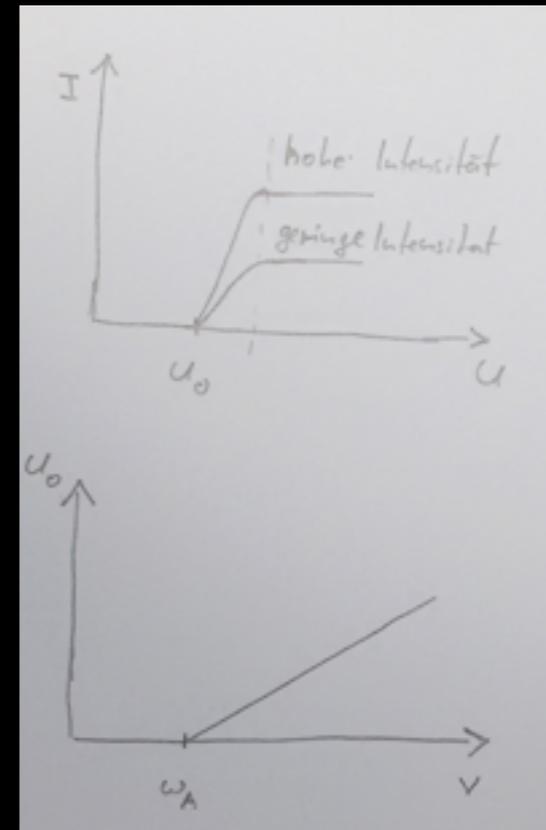
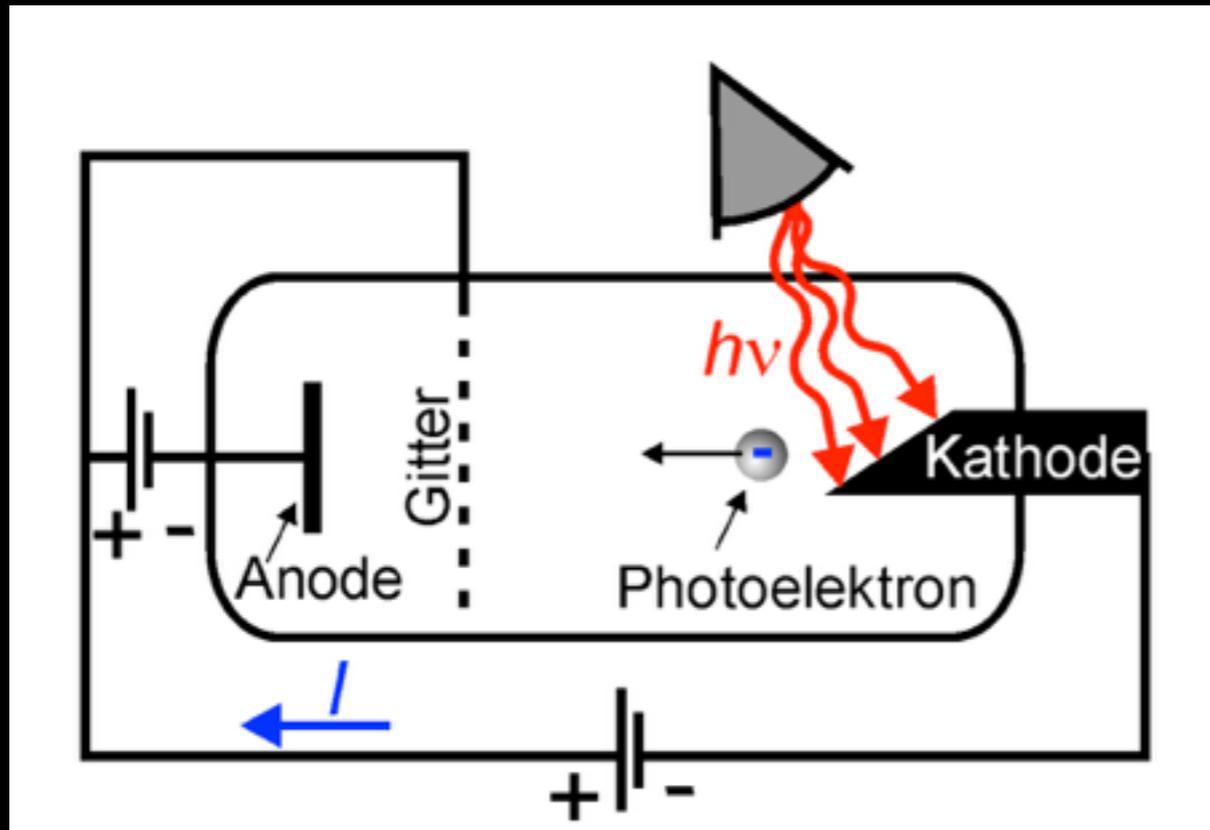
- neue fundamentale Konstante: **h**



# Quanten - Photoelektrischer Effekt

- Auslösung von Elektronen aus Metalloberflächen bei Lichteinfall:

Einstein: 1905



- Energie der Elektronen unabhängig von Lichtintensität!
- Nicht erklärbar mit dem klassischen Bild einer elektromagnetischen Welle!
- Erklärung durch Interaktion von Lichtquanten mit Elektronen:
  - „Ein Lichtquant gibt alle seine Energie an ein Elektron ab“

$$E_{\max}^{e^-} = h\nu - W_A$$

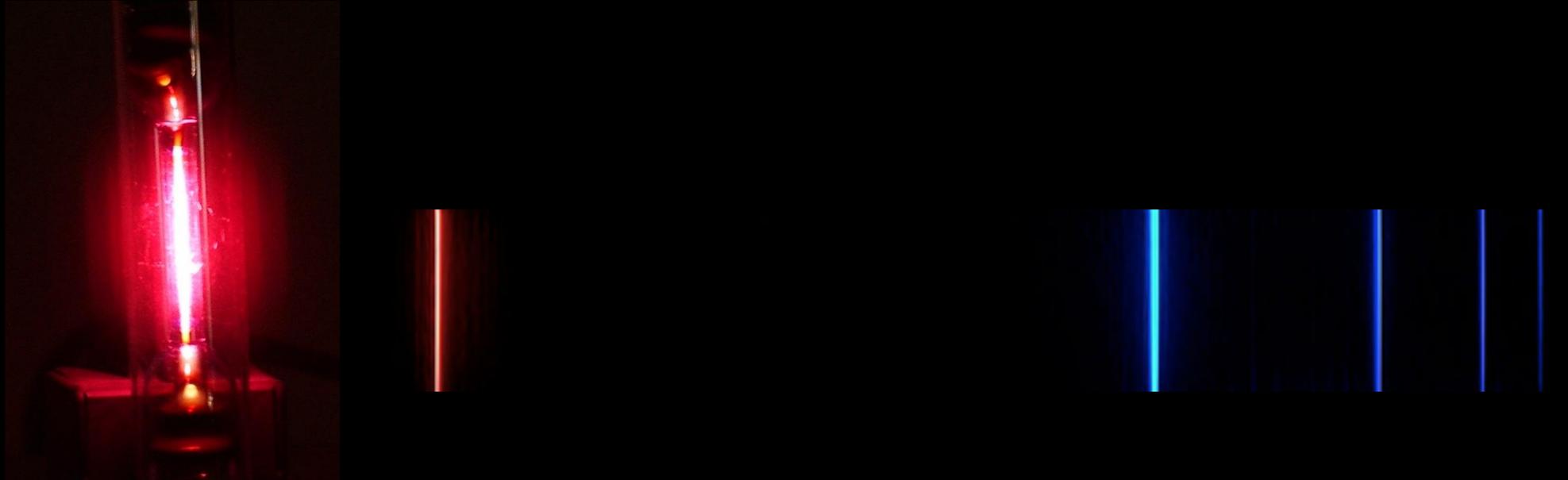
- Elektron
- Licht-Quant

Balmer: 1885



- Spektrallinien von Wasserstoff bekannt, jedoch nicht verstanden
- Problem mit Rutherfords Atommodell:
  - Elektronen umkreisen Kern
    - bewegte el. Ladung → Abstrahlung elektromagnetischer Wellen
  - **Wieso ist Atom stabil?**

Balmer: 1885



- Spektrallinien von Wasserstoff bekannt, jedoch nicht verstanden
- Problem mit Rutherfords Atommodell:
  - Elektronen umkreisen Kern  
→ bewegte el. Ladung → Abstrahlung elektromagnetischer Wellen
  - **Wieso ist Atom stabil?**

Bohr: 1913

- **Lösung:**

Elektronen auf bestimmten, stabilen Bahnen

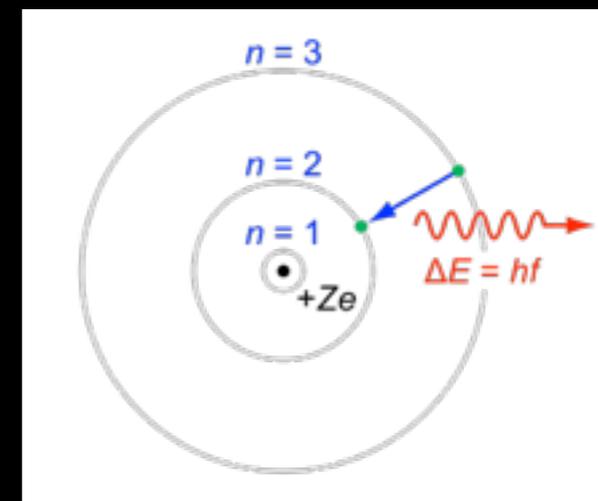
Energieänderung bei Bahnwechsel:

$$\Delta E = f \cdot h$$

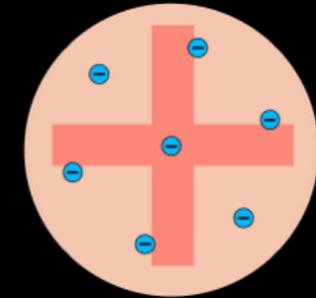
Drehimpuls der Elektronen quantisiert:

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

$$\Rightarrow E_n = \frac{13,6 \text{ eV}}{n^2}$$

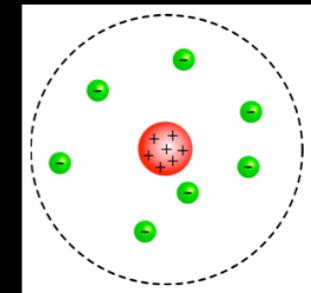


- Thomson: „Rosinenkuchen“-Modell
  - Elektronen in homogene, el. pos. geladene Masse eingebettet



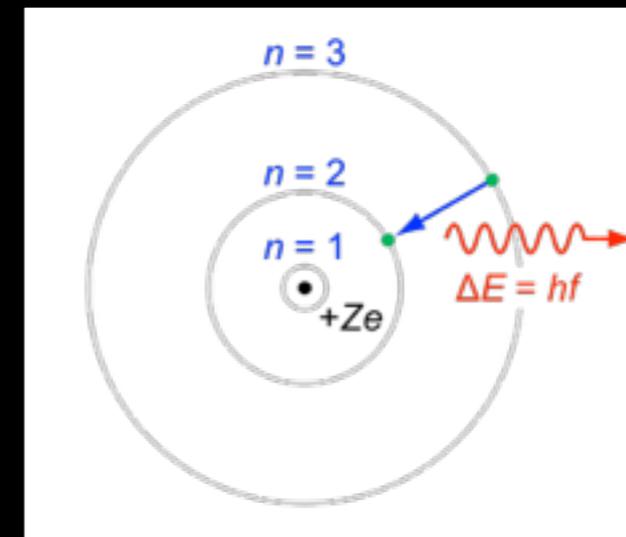
1900

- Rutherford: Masse und positive el. Ladung im Kern konzentriert, Elektronenwolke



1911

- Bohr:
  - Elektronen umkreisen Kern auf Bahnen
  - Quantisierter Drehimpuls der Elektronen!



1913

- Seit Erklärung des Photoeffekts:
  - Licht-Quanten (Teilchen) bekannt. Licht kann **Teilchen** als auch **Welle** sein!
  - Impuls:  $p = h/\lambda$
  - Experimentell gezeigt durch Compton 1917

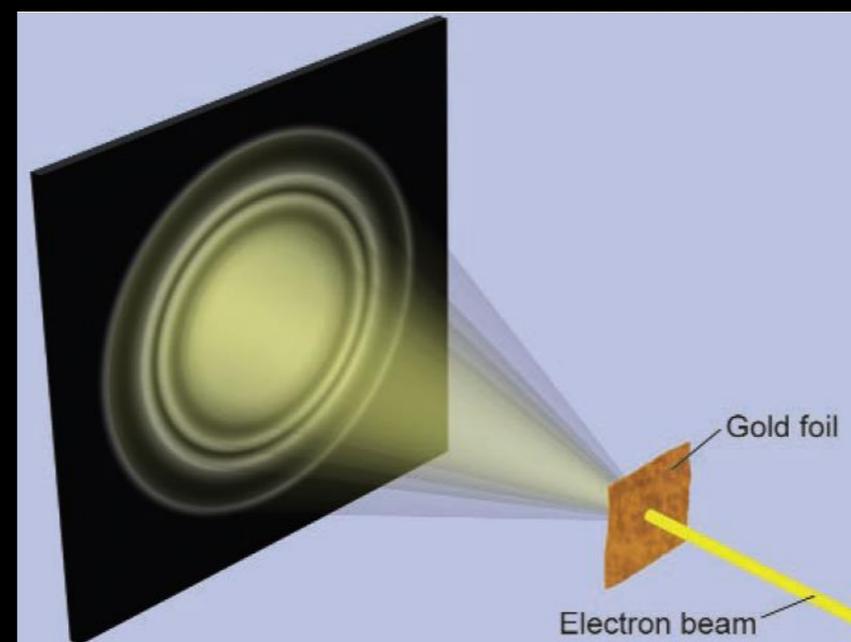
- Postulat: **Teilchen verhalten sich wie Wellen mit Wellenlänge:**  
 $\lambda = h/p$

- Experimentell betätigt: Beugung von Elektronen an Goldfolie

de Broglie: 1924

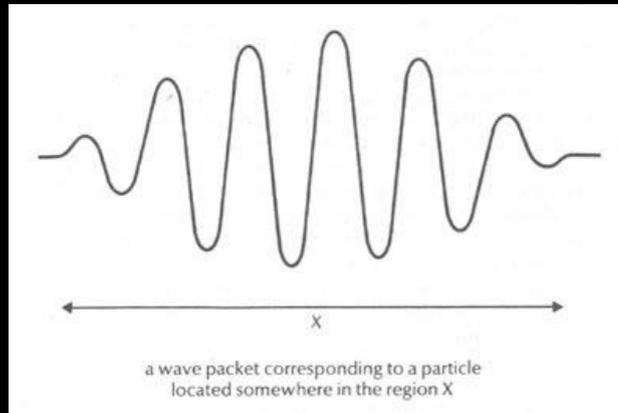


Davisson & Germer: 1927



- Wenn Teilchen Welleneigenschaften haben:
  - Ort & Impuls können nicht gleichzeitig messbar sein!

Heisenberg: 1925



$$\Delta x \cdot \Delta p \geq h$$



- Analogie:

„Reiner“ Ton  $f$  bekommt „Unschärfe“  $\Delta f$  wenn er nur über Zeit  $\Delta t$  erklingt  
(Fourier - Transformation)

$$\Delta \omega \cdot \Delta t \geq \frac{1}{2} \quad \text{mit} \quad E = \hbar \omega \quad \Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

Energie - Zeit unschärfe

- Verhalten von **Teilchen** kann durch **Wellen** beschrieben werden! **Schrödinger: 1926**

- mathematisch: **komplexe** Funktion des Ortes und der Zeit:

- **Interferenz** möglich!

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

- Klassisch:

- **Energie** und **Impuls** eines Teilchens im Potential  $V$

$$E = \frac{\vec{p}^2}{2m} + V(\vec{x}, t)$$

- Verhalten von **Teilchen** kann durch **Wellen** beschrieben werden! **Schrödinger: 1926**

- mathematisch: **komplexe** Funktion des Ortes und der Zeit:

- **Interferenz** möglich!

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

- Klassisch:

- **Energie** und **Impuls** eines Teilchens im Potential  $V$

$$E = \frac{\vec{p}^2}{2m} + V(\vec{x}, t)$$

- Operatoren in der Quantenmechanik (erraten per Korrespondenzprinzip):

Impuls einer Welle:  $p = h/\lambda = \hbar k$        $E \rightarrow i\hbar \frac{\partial}{\partial t}$

Energie einer Welle:  $E = \hbar\omega$        $p \rightarrow i\hbar \nabla$

**Schrödingergleichung:** 
$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi = -\frac{\hbar^2 \nabla^2}{2m} \Psi + V \Psi$$

# Und was bedeutet das?



- Wahrscheinlichkeitsinterpretations:

$$|\Psi(\vec{x}, t)|^2$$

**Wahrscheinlichkeit** ein Teilchen am Ort  $x$  zur Zeit  $t$  anzutreffen.

**Max Born: 1926**

N.b.:  
Kopenhagener  
Interpretation: Bohr /  
Heisenberg 1927

# Und was bedeutet das?

- Wahrscheinlichkeitsinterpretations:

$$|\Psi(\vec{x}, t)|^2$$

**Wahrscheinlichkeit** ein Teilchen am Ort  $x$  zur Zeit  $t$  anzutreffen.

Max Born: 1926

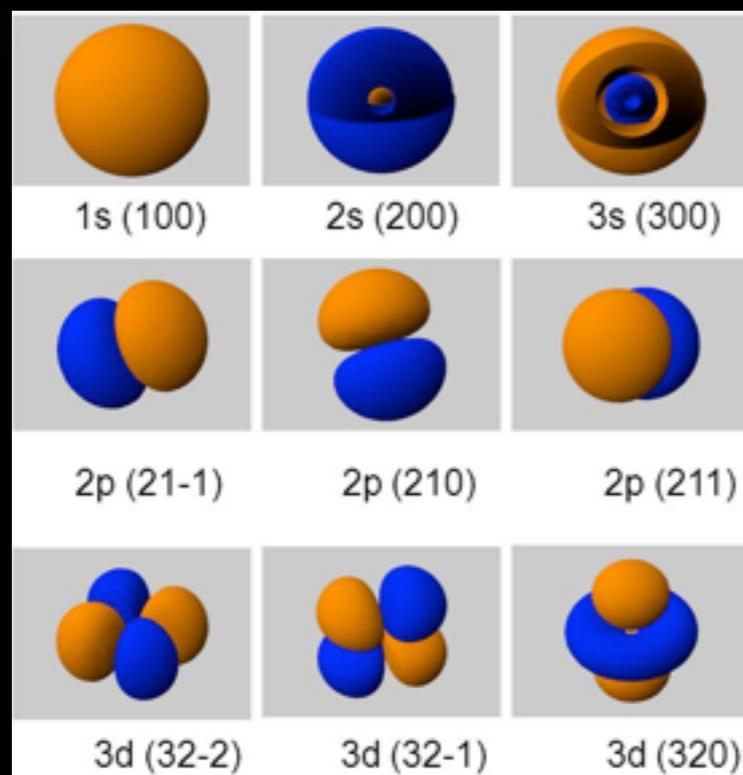
N.b.:  
Kopenhagener  
Interpretation: Bohr /  
Heisenberg 1927

- Beispiel **Atom**:

- Elektronenschale → **stehende Wellen** im Atom, die die Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Elektronen beschreiben
- Gut für  $v \ll c$

## Orbitale des Wasserstoffs

[7]



# Und was bedeutet das?

- Wahrscheinlichkeitsinterpretations:

$$|\Psi(\vec{x}, t)|^2$$

**Wahrscheinlichkeit** ein Teilchen am Ort  $x$  zur Zeit  $t$  anzutreffen.

Max Born: 1926

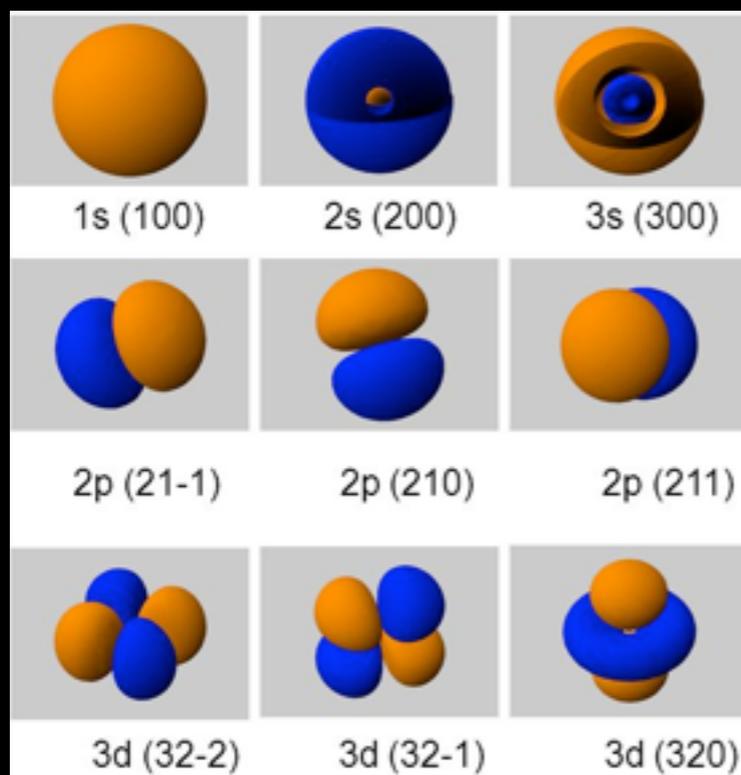
N.b.:  
Kopenhagener Interpretation: Bohr / Heisenberg 1927

- Beispiel **Atom**:

- Elektronenschale  $\rightarrow$  **stehende Wellen** im Atom, die die Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Elektronen beschreiben
- Gut für  $v \ll c$

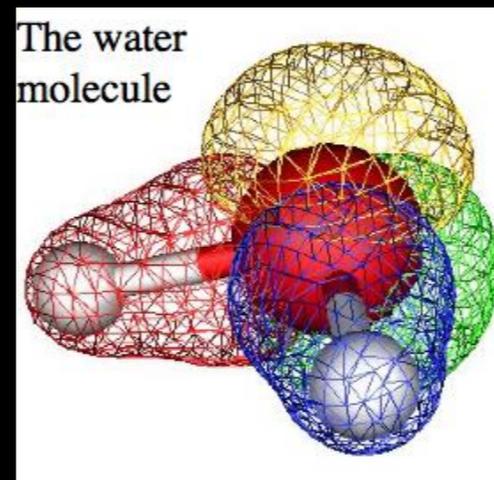
## Orbitale des Wasserstoffs

[7]



Pauling: 1928

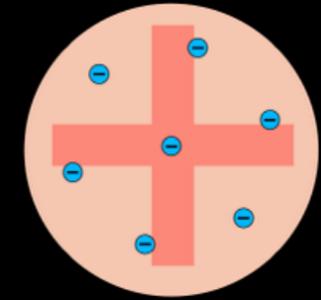
**Chemische Bindungen** reflektieren **Struktur** der Orbitale



**Verständnis der Makroskopischen Strukturen!**

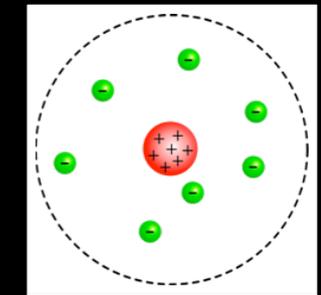
# Atommodelle - 1928

- Thomson: „Rosinenkuchen“-Modell
  - Elektronen in homogene, el. pos. geladene Masse eingebettet



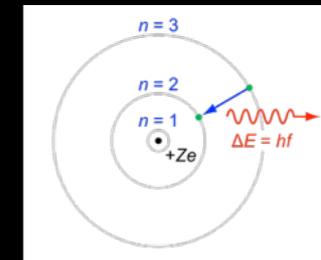
1900

- Rutherford: Masse und positive el. Ladung im Kern konzentriert, Elektronenwolke



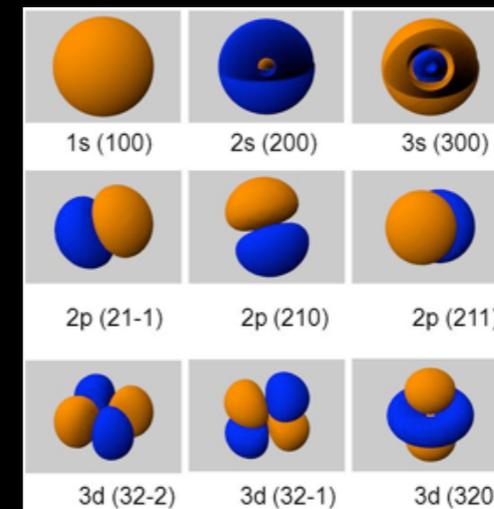
1911

- Bohr:
  - Elektronen umkreisen Kern auf Bahnen
    - Quantisierter Drehimpuls der Elektronen!

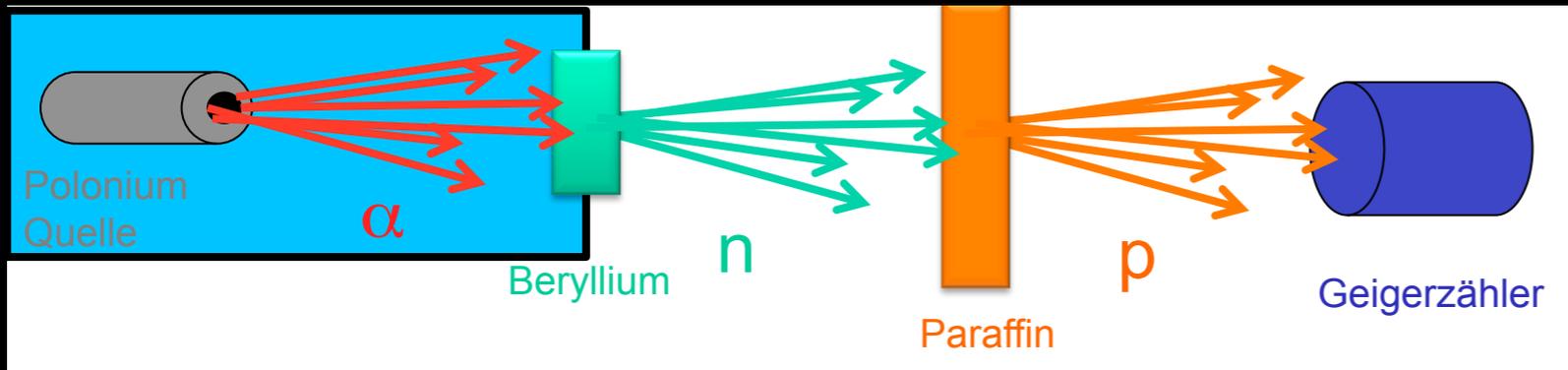


1913

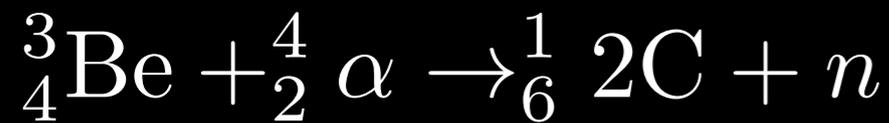
- Orbital-Modell (Born, Pauling):
  - Quantenmechanische Beschreibung der Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Elektronen



1928



Bothe & Becker: 1930  
Joliot-Curie: 1931  
**Chadwick: 1932**



- Bereits Rutherford Postulierte Neutrale Teilchen im Atomkern
- Experiment zur Untersuchung von Gamma Strahlung
  - Beobachtung von neutraler Strahlung
  - $E_\gamma \sim 50 \text{ MeV}$  nötig um Proton mit beobachteter Energie auszulösen!
  - **Chadwick: neutrale Teilchen mit etwa Masse des Protons**

**Bild des Atoms vollständig!**

- Relativistische Energie - Impuls Beziehung
  - mehr als 1 Lösung: +m, -m, +p, -p
- **Bedeutung von neg. Ruheenergie?**

$$E = \sqrt{m_0^2 c^2 + p^2 c^2}$$

- Relativistische Energie - Impuls Beziehung

$$E = \sqrt{m_0^2 c^2 + p^2 c^2}$$

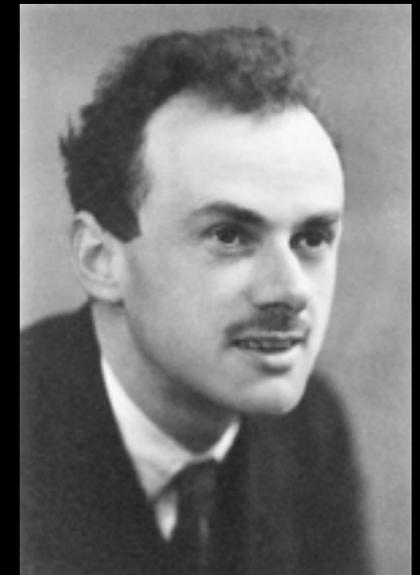
- mehr als 1 Lösung: +m, -m, +p, -p

- **Bedeutung von neg. Ruheenergie?**

- Kombination von nicht-relativistischer **Wellengleichung** mit **Relativitätstheorie**:

Dirac Gleichung:  $(i\gamma^\mu \partial_\mu - m) \Psi = 0$

Dirac: 1928



$$\Psi = \begin{bmatrix} e^- \uparrow \\ e^- \downarrow \\ e^+ \uparrow \\ e^+ \downarrow \end{bmatrix}$$

**Erklärung des Spin 1/2**

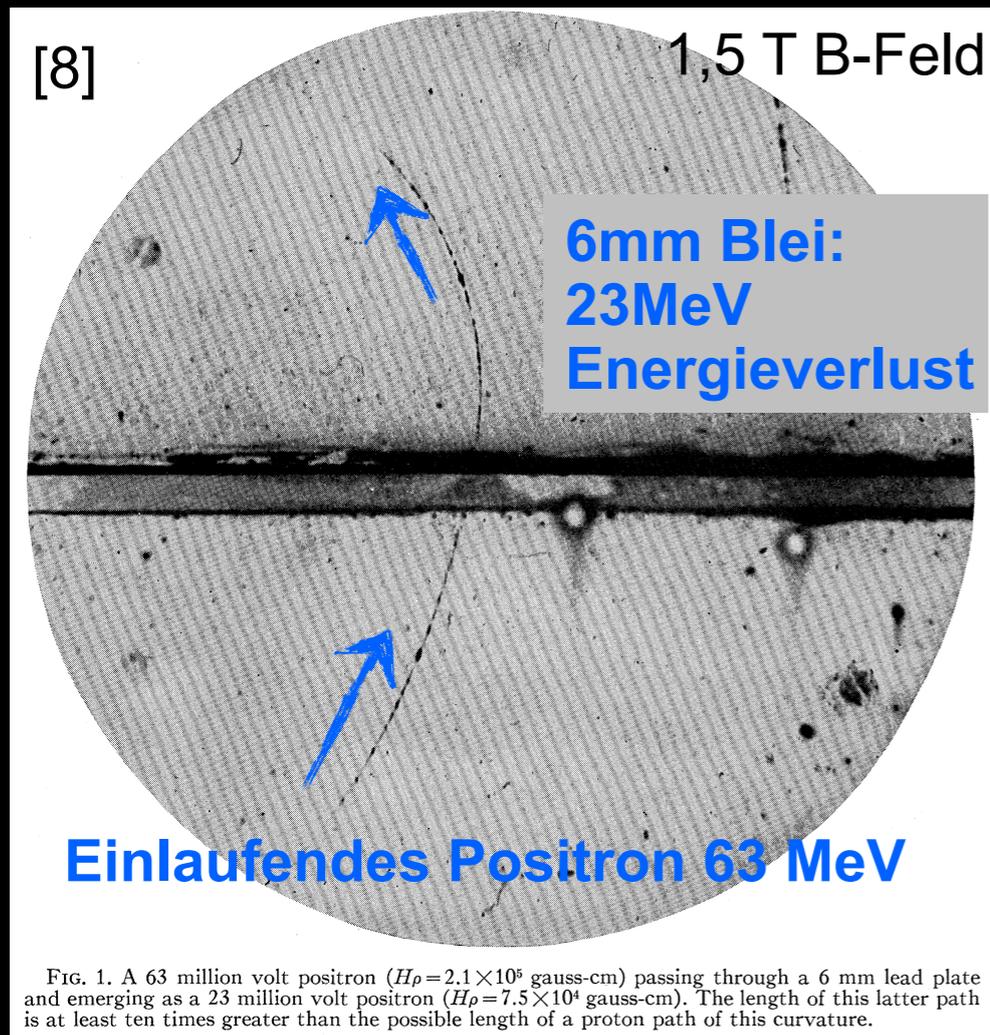
→ Pauli Prinzip 1940

**Vorhersage von Anti-Teilchen**

## Entdeckung des Positrons

Anderson: 1932

- Nachweis von Positronen aus Höhenstrahlung in Nebelkammer



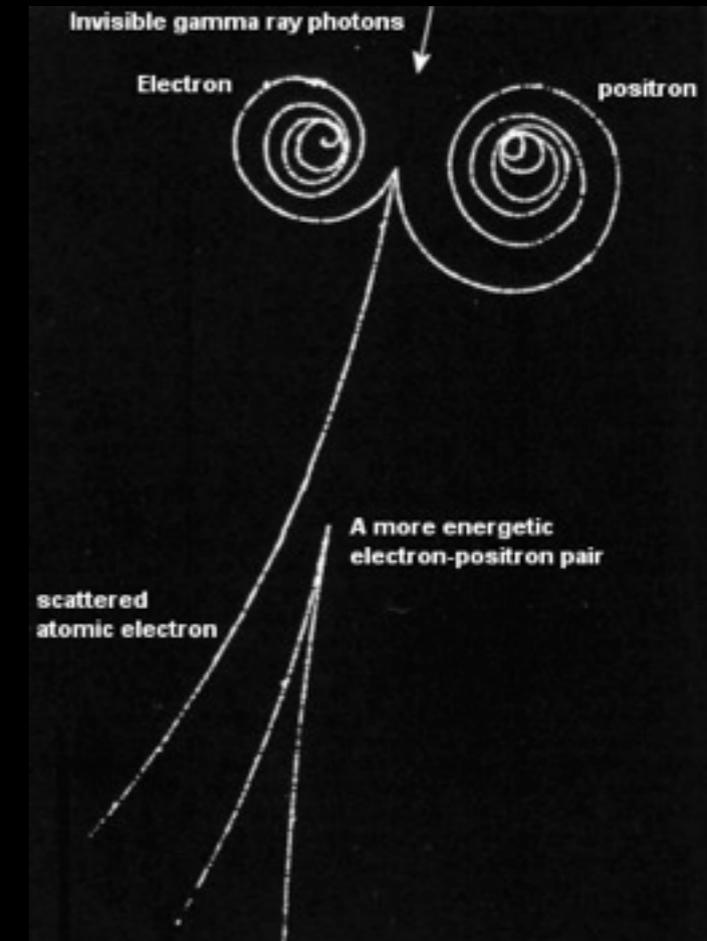
- Flugrichtung durch E-Verlust Bestimmt
- Masse & E durch Krümmung / E-Verlust
- Entdeckung des **Myons** 1936
  - „Who ordered that?“
  - Erstes Teilchen der „2. Familie“

- Verhalten sich wie Teilchen, jedoch mit entgegengesetzter el. Ladung
  - gleiche Masse, Spin, Parität ...

- Erzeugung:

$$E = mc^2$$

- nur gepaart mit ‚normalen‘ Teilchen:
- **Teilchen - Antiteilchen Paarerzeugung**

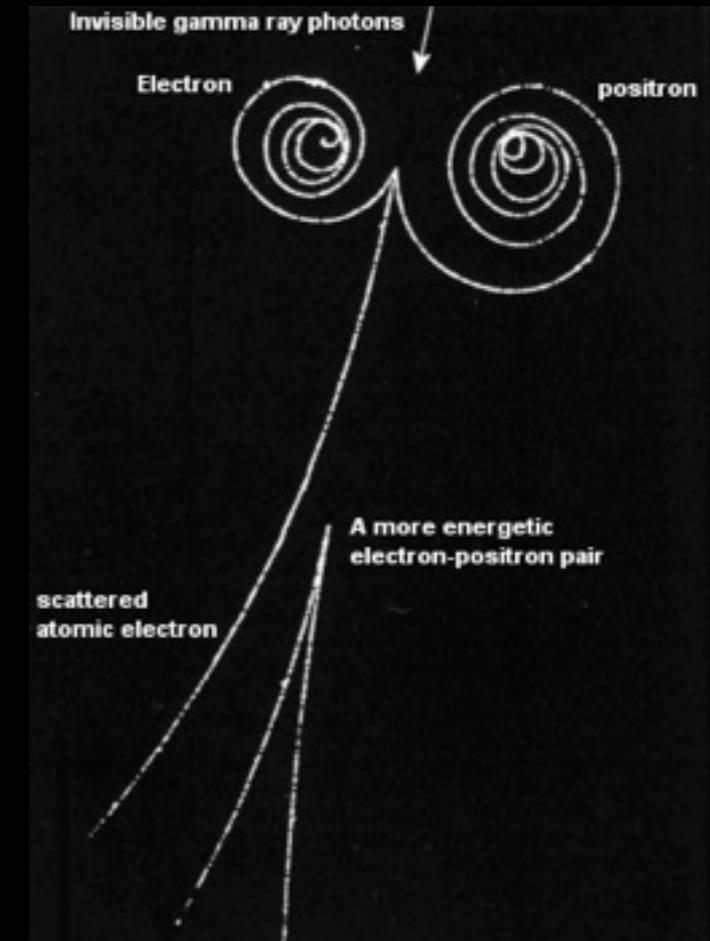


- Verhalten sich wie Teilchen, jedoch mit entgegengesetzter el. Ladung
  - gleiche Masse, Spin, Parität ...

- **Erzeugung:**

$$E = mc^2$$

- nur gepaart mit ‚normalen‘ Teilchen:
- **Teilchen - Antiteilchen Paarerzeugung**



- **Erhaltungsgrößen:**

- Leptonzahl → **Neutrinoloser doppel-Beta Zerfall**
- Baryonzahl (Proton, Neutron, ...) → **Baryogenese / Protonzerfall**
- B-L (In allen Theorien erhalten)

# Antiteilchen und das Vakuum

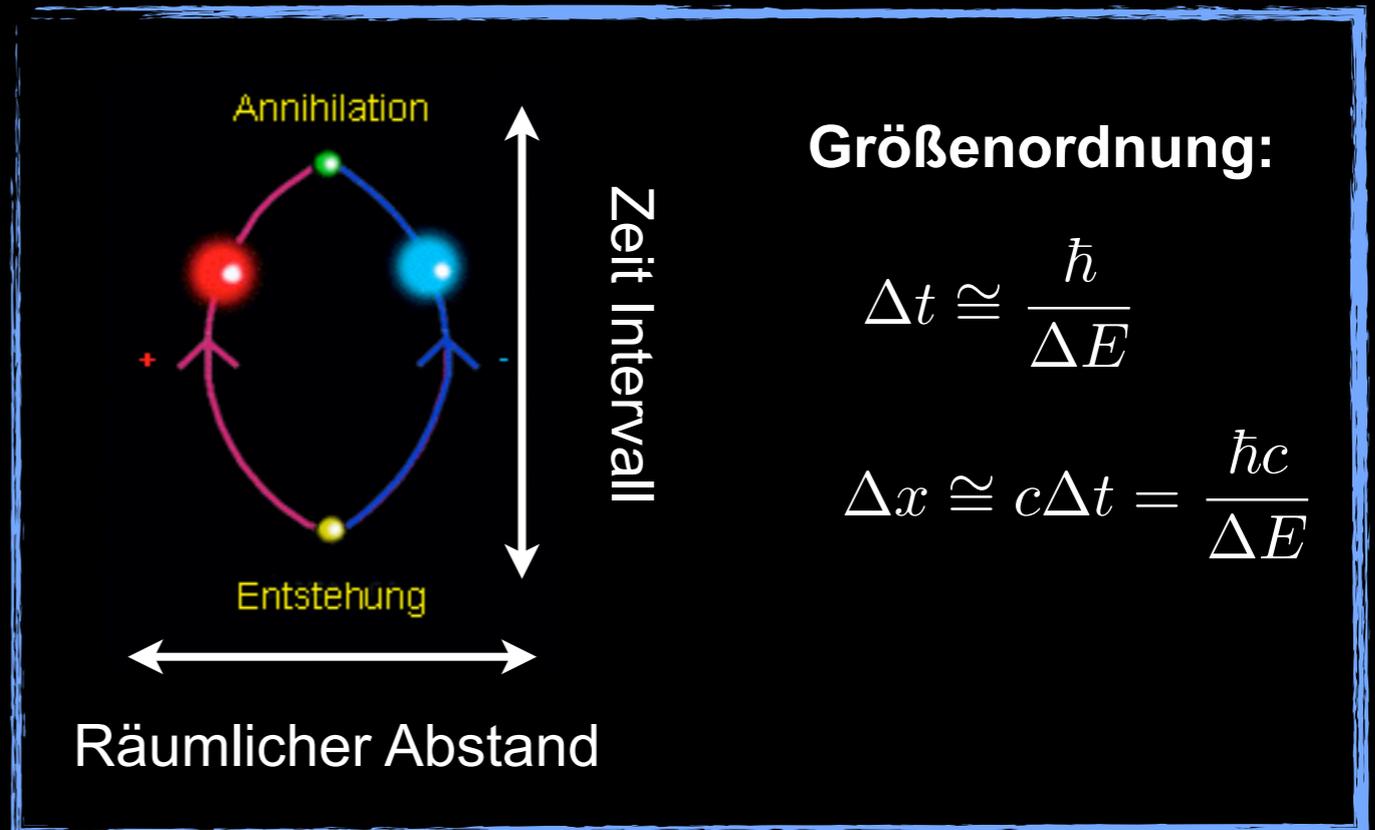
- Paarerzeugung:  $E = mc^2$
- Heißenbergsche Unschärferelation:  $\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$

# Antiteilchen und das Vakuum

- Paarerzeugung:  $E = mc^2$
- Heißenbergsche Unschärferelation:  $\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$

• Für **kurze Zeit** kann **genug Energie** „geborgt“ werden um Teilchen - Antiteilchen Paare zu erzeugen:

- **Vakuumfluktuation**

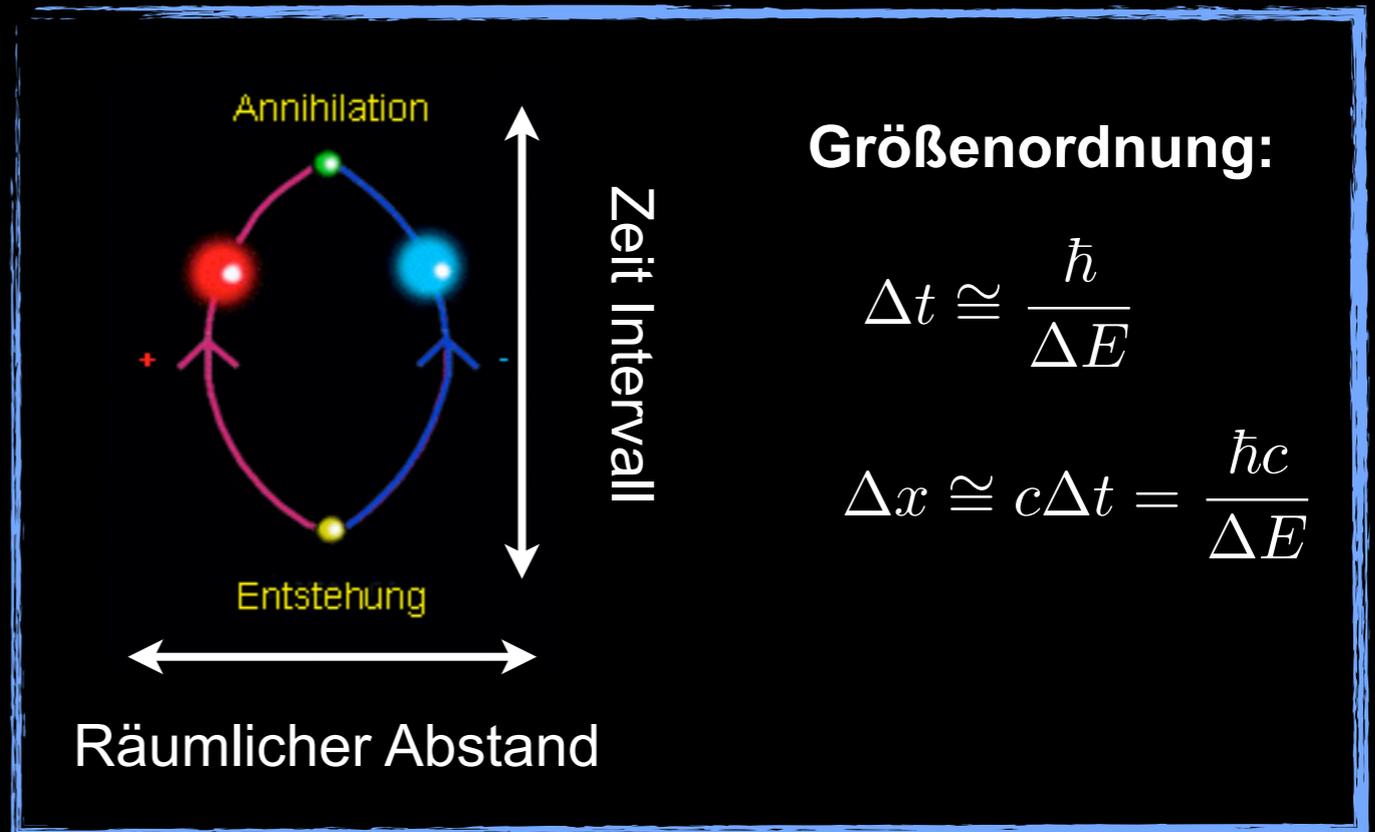


# Antiteilchen und das Vakuum

- Paarerzeugung:  $E = mc^2$
- Heißenbergsche Unschärferelation:  $\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$

• Für **kurze Zeit** kann **genug Energie** „geborgt“ werden um Teilchen - Antiteilchen Paare zu erzeugen:

- **Vakuumfluktuation**
- Keine absolute Ruhe in physikalischen Systemen!
  - Nullpunktsenergie

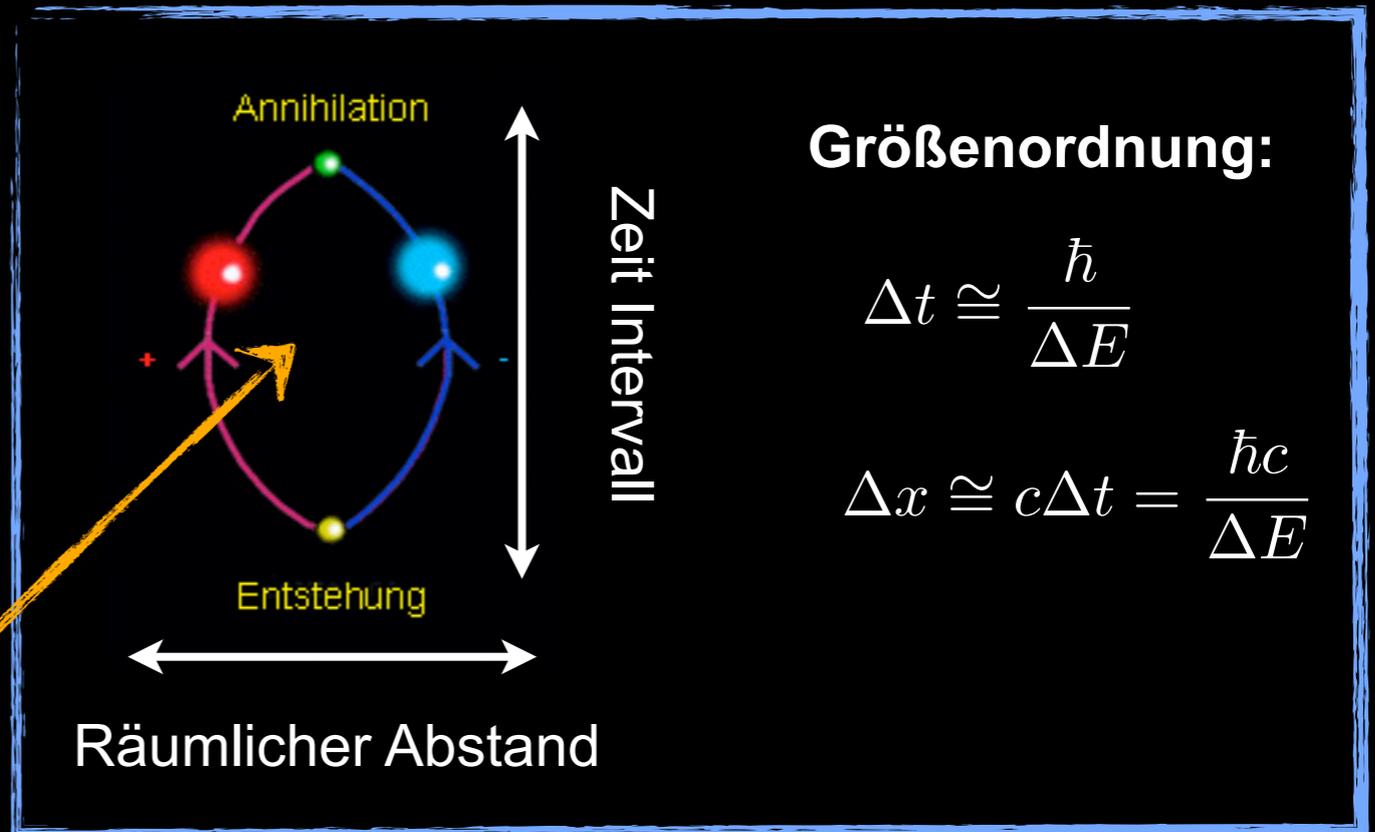


# Antiteilchen und das Vakuum

- Paarerzeugung:  $E = mc^2$
- Heißenbergsche Unschärferelation:  $\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$

• Für **kurze Zeit** kann **genug Energie** „geborgt“ werden um Teilchen - Antiteilchen Paare zu erzeugen:

- **Vakuumfluktuation**
- Keine absolute Ruhe in physikalischen Systemen!
- Nullpunktsenergie



**Virtuelle Teilchen**



- Casimir Effekt:

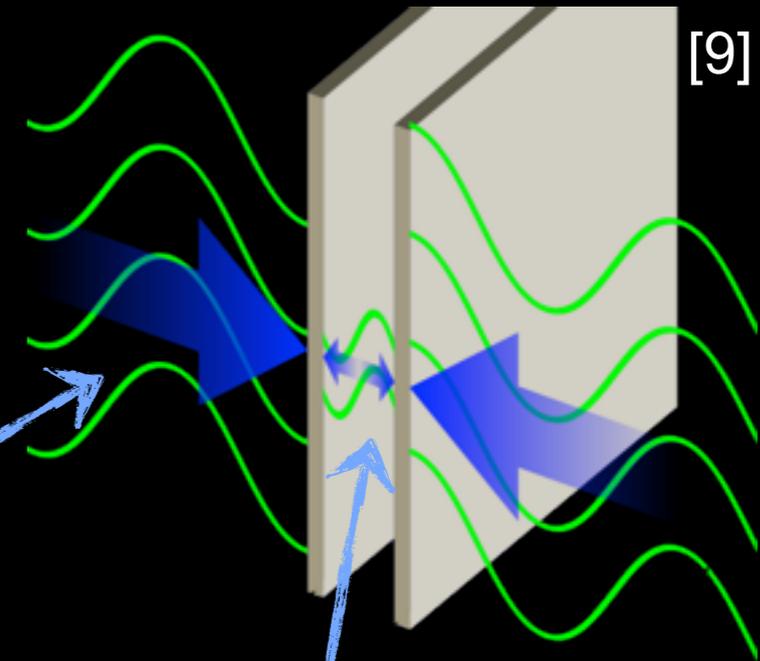
- Messbarer äußerer Druck auf Metall platten

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

- ~1 bar @ d = 11nm

Alle Wellenlängen  
(Energien) möglich

Nur passende  
Wellenlängen möglich



- Casimir Effekt:

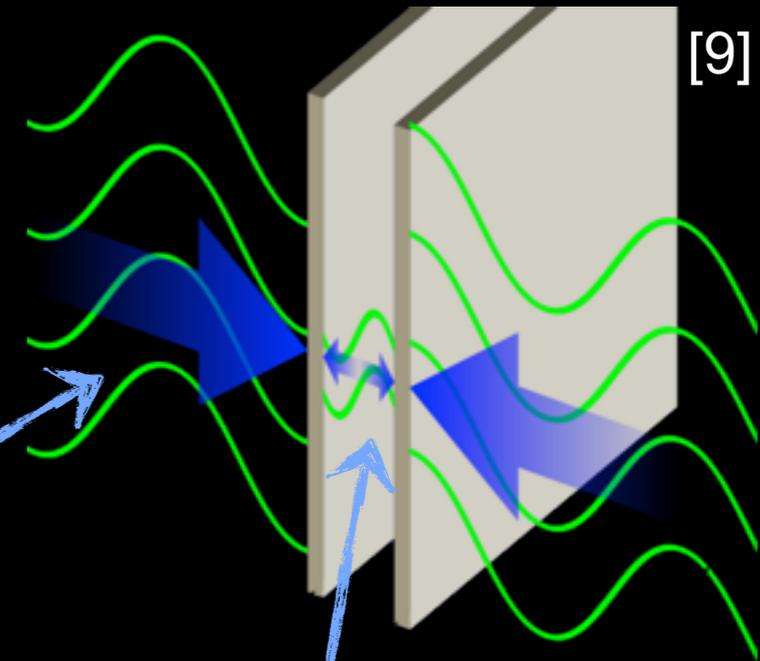
- Messbarer äußerer Druck auf Metall platten

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

- ~1 bar @ d = 11nm

Alle Wellenlängen  
(Energien) möglich

Nur passende  
Wellenlängen möglich



- Elektron polarisiert Vakuumfluktuationen!

- Gemessene el. Ladung = ‚nackte‘ Ladung + Polarisation

- ▶ Scheinbare el. Ladung abhängig vom Abstand!
- ▶ „laufende“ elektromagnetische Kopplungsstärke

- Casimir Effekt:

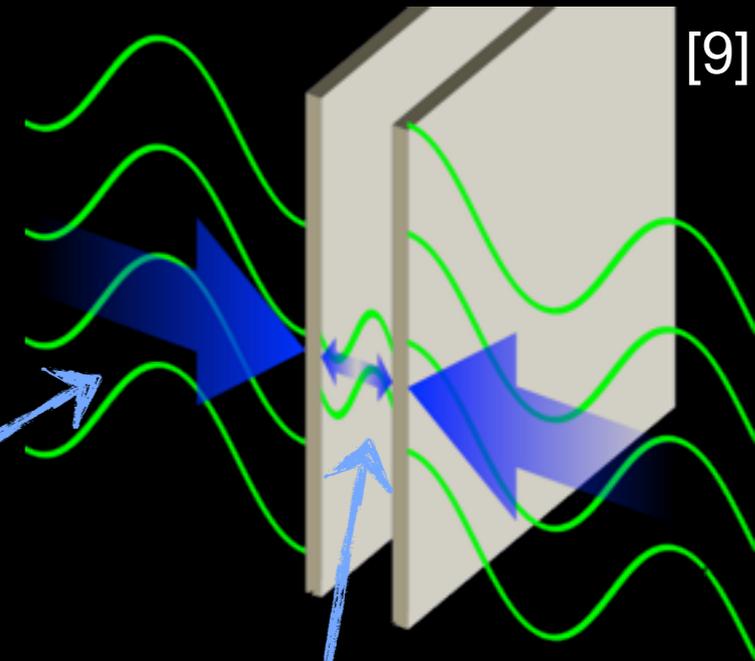
- Messbarer äußerer Druck auf Metall platten

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

- ~1 bar @ d = 11nm

Alle Wellenlängen  
(Energien) möglich

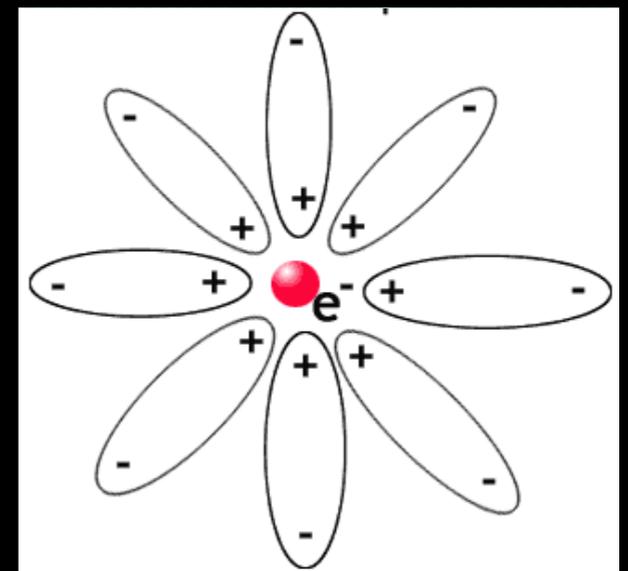
Nur passende  
Wellenlängen möglich



- Elektron polarisiert Vakuumfluktuationen!

- Gemessene el. Ladung = ‚nackte‘ Ladung + Polarisation

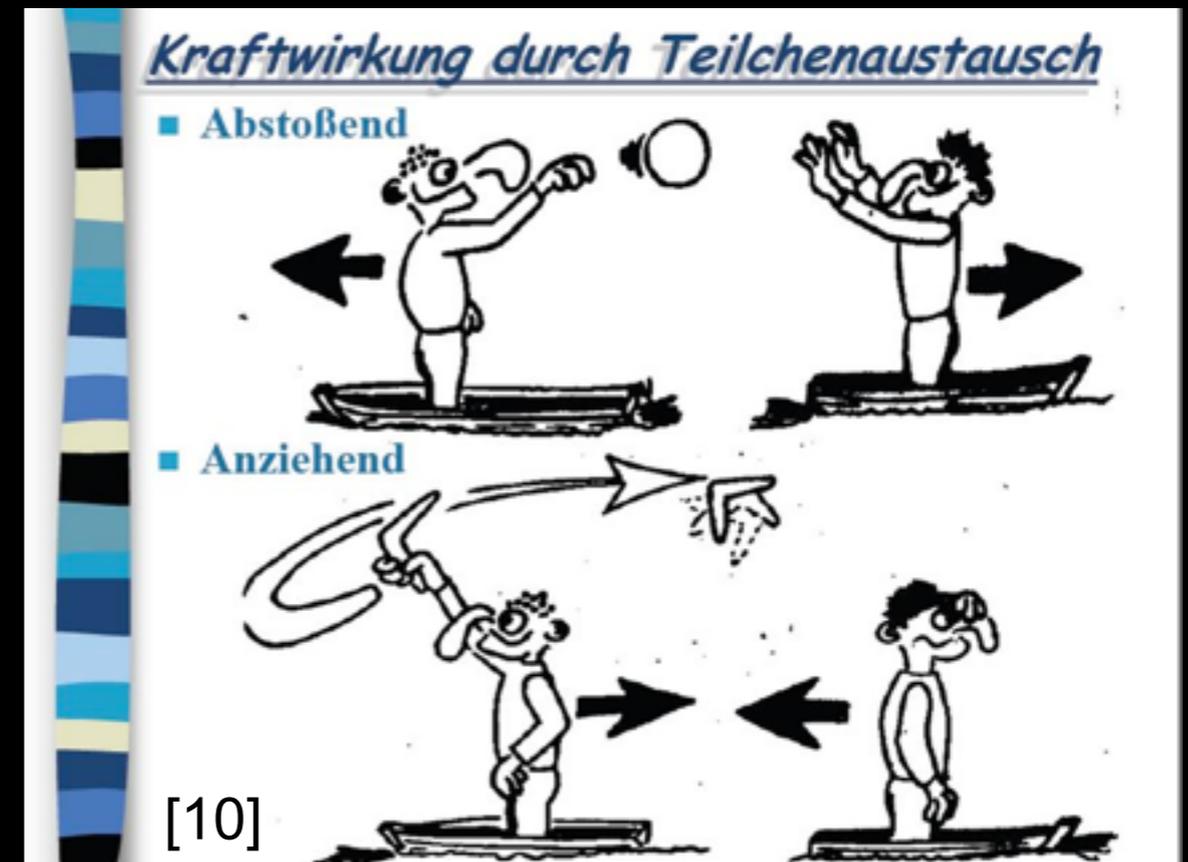
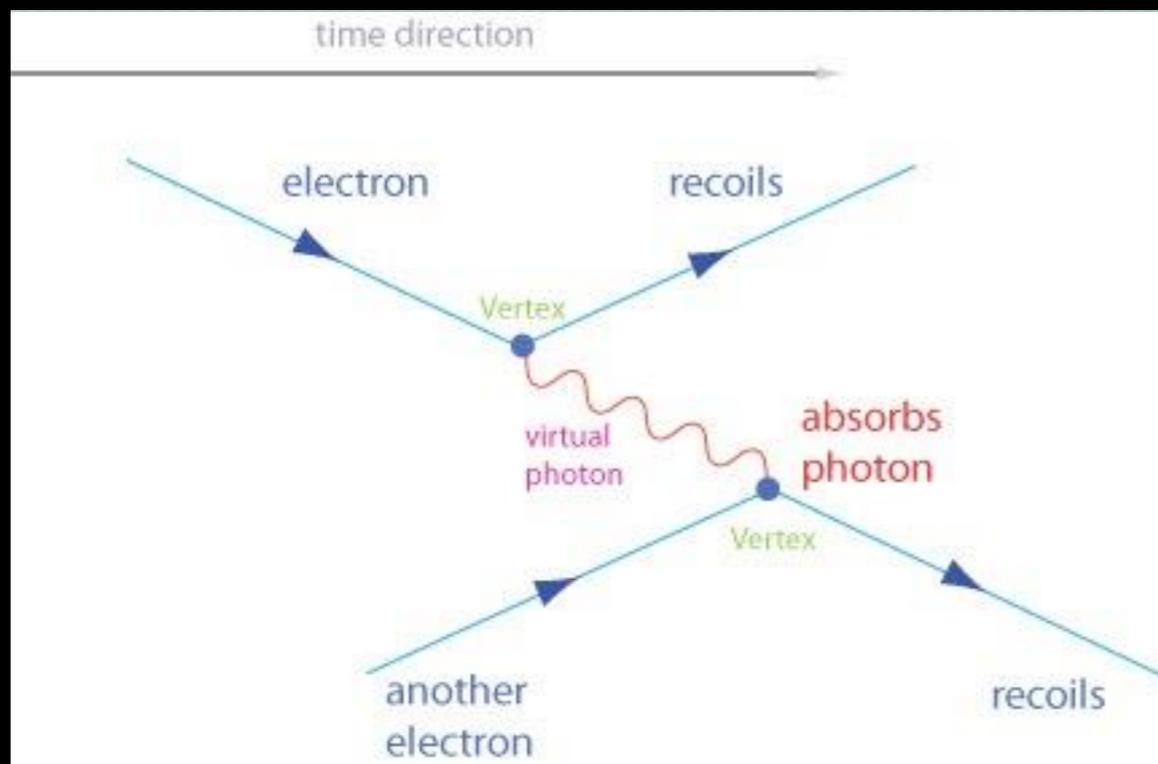
- ▶ Scheinbare el. Ladung abhängig vom Abstand!
- ▶ „laufende“ elektromagnetische Kopplungsstärke



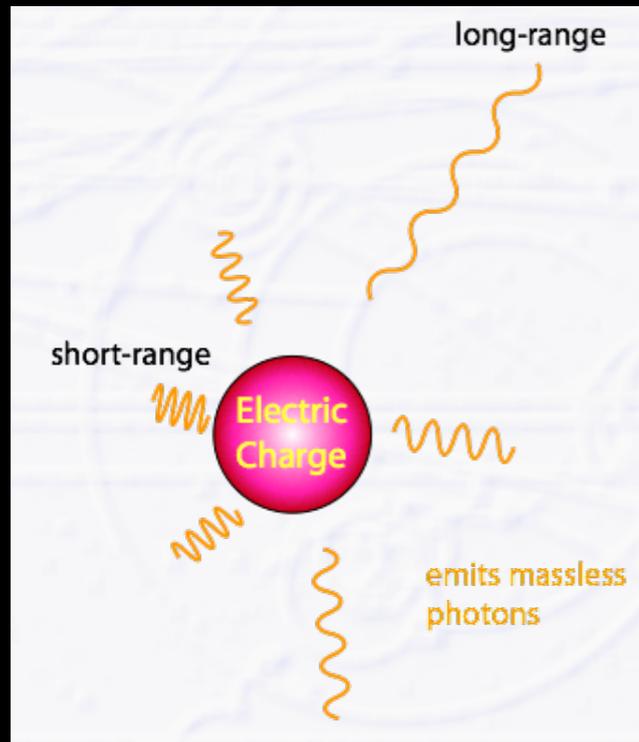
# Vakuumfluktuationen - Berechnung?

Feynman, Schwinger,  
Tomonoga, Dyson:  
1934-1948

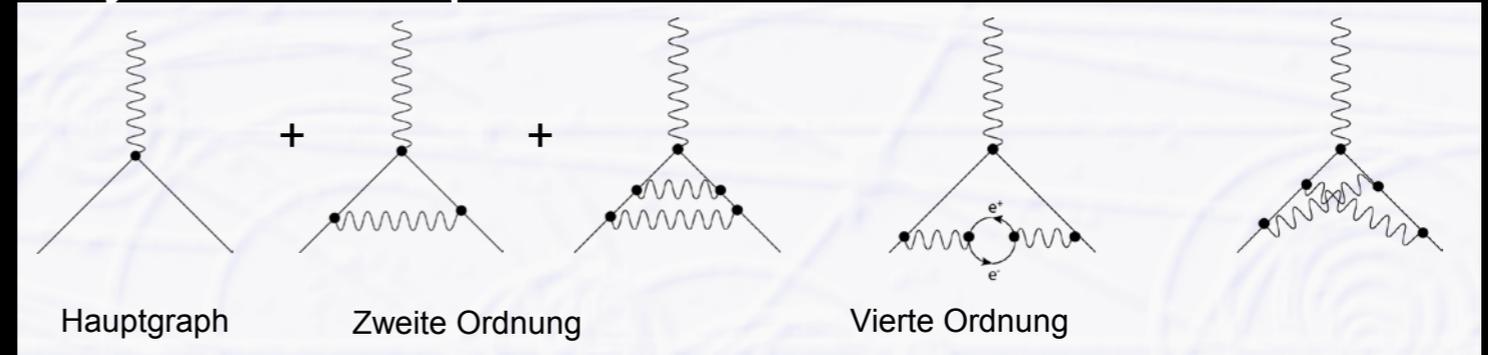
- Wie berechnet man die Interaktion zweier Elektronen?
  - Lösung: **Quantisierung des Elektromagnetischen Feldes** (2. Quantisierung)
    - **Photonen** entsprechen den **Feld-Quanten**
    - Feld-Quanten übertragen Kraft - **Botenteilchen** (oder: **Austauschteilchen**)
    - **Virtuelle Teilchen**: Nicht beobachtbar (zu kurzlebig)



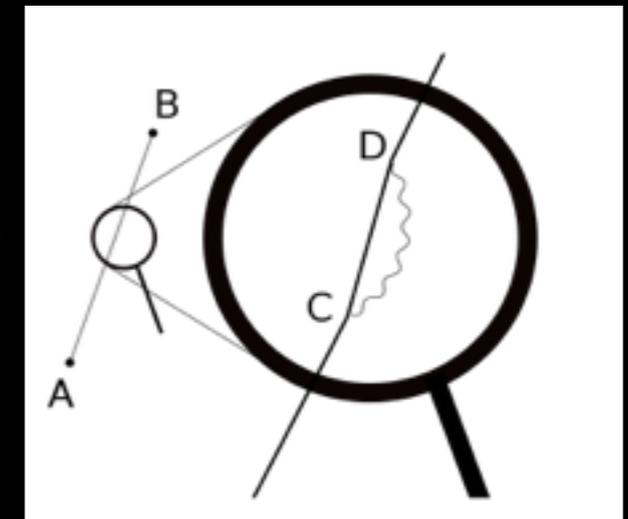
- Virtuelle Teilchen
  - Aber wie viele?



- Feynman Graphen für QED Korrekturen



- Elektron Selbstenergie
  - Wird  $\infty$



- Unendlich Viele  $\rightarrow$  Rechenergebnisse = **Unendlich**
- Betrachte nur Teilchen bis zu einer gewissen Energie („Renormierung“)
  - Ergebnisse werden endlich  $\rightarrow$  **physikalisch Bedeutsam!**
  - ALLE **Ergebnisse** der Quantenfeldtheorie sind **Näherungen**

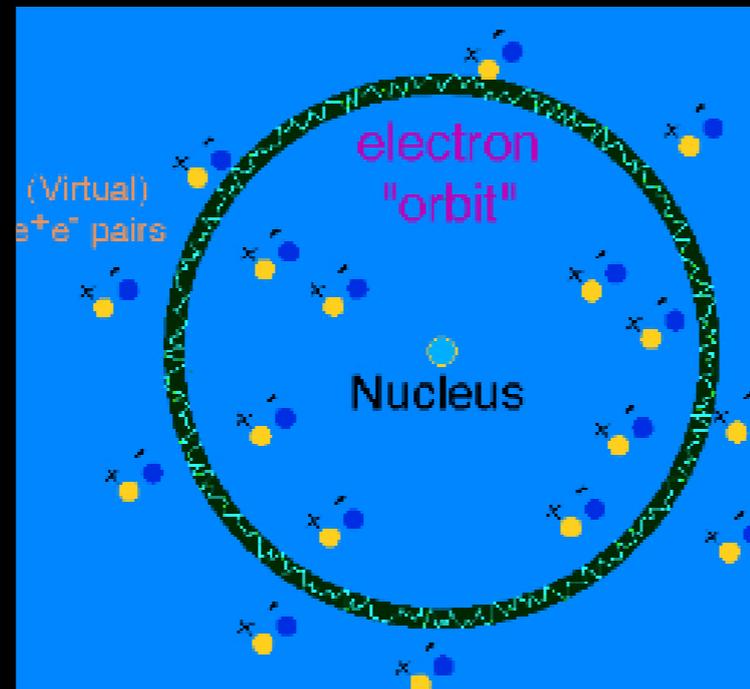
- **Anomales magnetisches Moment** des Elektrons:
  - Experimentell: 1,1‰ Abweichung von Dirac-Theorie
  - Beschrieben durch QED
    - Heute: **Übereinstimmung von  $10^{-12}$  zwischen Experiment & Theorie!**

1946

- **Anomales magnetisches Moment** des Elektrons: 1946
  - Experimentell: 1,1‰ Abweichung von Dirac-Theorie
  - Beschrieben durch QED
    - Heute: **Übereinstimmung von  $10^{-12}$  zwischen Experiment & Theorie!**

- **Lamb Shift** 1948

Aufspaltung des (entarteten) 2s / 2p Niveaus im H-Atom  
Erklärt durch QED



QED bleibt präziseste  
physikalische Theorie

Gibt es noch andere  
Kräfte?

# Was hält Protonen und Neutronen zusammen?



- Kraft die
  - Stärker als Coulomb Abstoßung ist
  - Kurzreichweitig (Bestimmt Atomkerngröße)

Yukawa: 1935

- Austausch von schweren Teilchen: **Pion**
  - Vorhergesagt von Yukawa:

$$V_{\text{Coulomb}} = -g^2 \frac{1}{r}$$

$$V_{\text{Yukawa}} = -g^2 \frac{e^{-mr}}{r}$$

# Was hält Protonen und Neutronen zusammen?

- Kraft die
  - Stärker als Coulomb Abstoßung ist
  - Kurzreichweitig (Bestimmt Atomkerngröße)

Yukawa: 1935

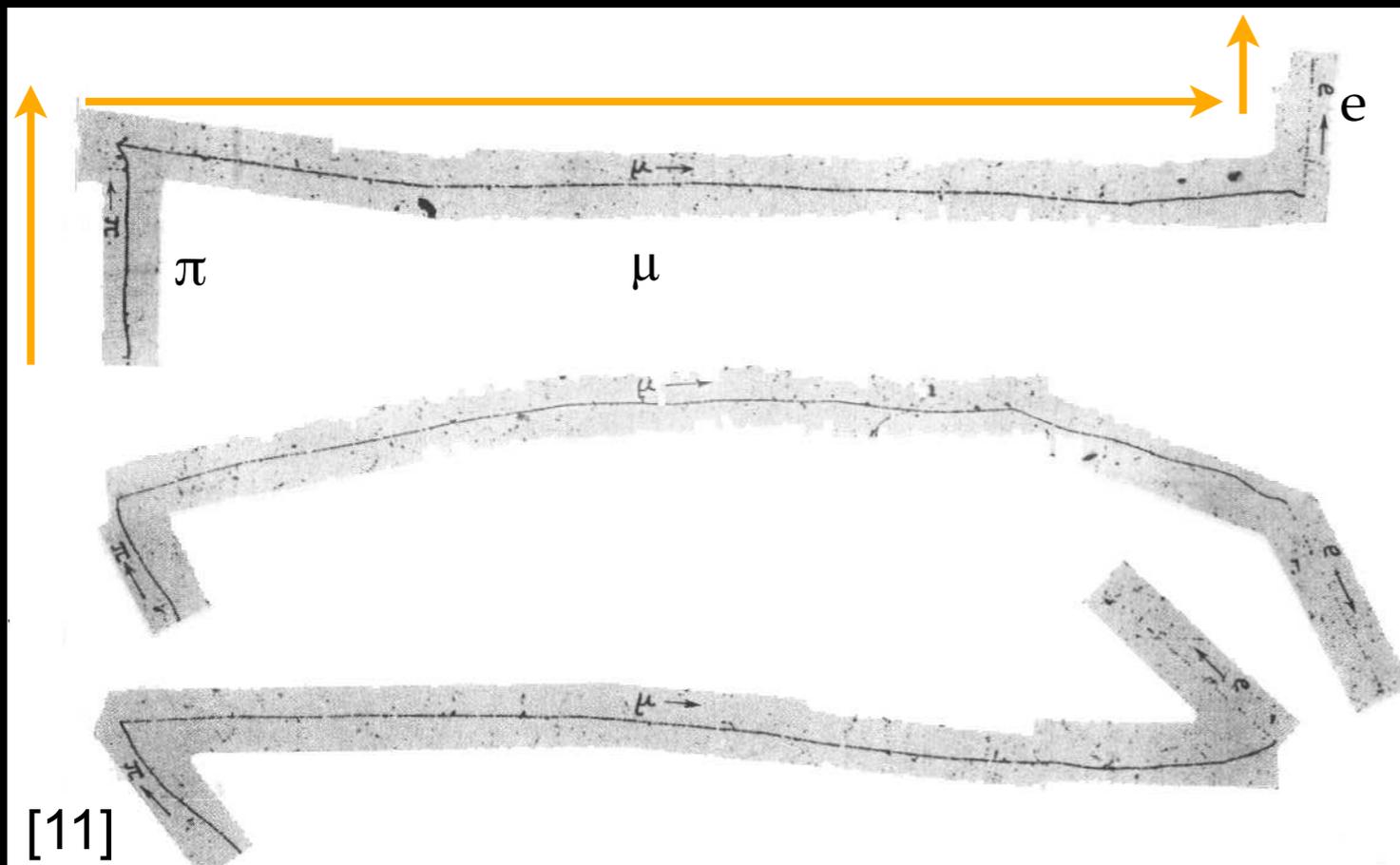
- Austausch von schweren Teilchen: **Pion**
  - Vorhergesagt von Yukawa:

$$V_{\text{Coulomb}} = -g^2 \frac{1}{r}$$

$$V_{\text{Yukawa}} = -g^2 \frac{e^{-mr}}{r}$$

- Entdeckung in Höhenstrahlung:

Powell / Perkins: 1947



$$M_{\text{Pion}} = 140 \text{ MeV}$$

Reichweite:  $\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$

$$\sim 10^{-15} \text{ m}$$

- Klein im Vergleich zum Atomkern

- Erklärt konst. Bindungsenergie pro Nukleon!

- Elementare Teilchen: Elektron, Myon, Proton, Neutron, Photon, Pion
  - (Neutrino Vorhergesagt zur Erklärung des Beta-Zerfalls)
  - Konzept von Anti-Teilchen
- Wechselwirkungen: Elektromagnetismus, starke Kernkraft
  - Kraftwirkung durch Botenteilchen
- Quantenmechanik & Quantenfeldtheorie entwickelt  $\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$
- Vollständig Beschrieben: Elektromagnetismus durch QED

- [2] Rainer Müller - Eigene Grafik, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=8742784>
- [3] Von Kurzon - Eigenes Werk, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=32422326>
- [4] By Sch (Own work) [CC BY-SA 3.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0>) or GFDL (<http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html>)], via Wikimedia Commons
- [5] Economist: <http://www.economist.com/blogs/graphicdetail/2012/07/daily-chart-1>
- [6] CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=75046>
- [7] <http://www.orbitals.com/orb/>
- [8] C. Anderson, PhysRev.43.491, <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.43.491>
- [9] Own work by uploader Emokderivative work: WikiMichi (talk) - Casimir plates.svg, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=8900709>
- [10] <http://www.cosmiq.de/qa/show/934946/wie-funktionieren-austauschteilchen/>
- [11] Determination of the energy measurement accuracy for charged particles by their range in nuclear photoemulsion A.S. Barabash (Moscow, ITEP) et al.. Nov 2012. 8 pp. Phys.Inst. 39 (2012) 300-304 <http://arxiv.org/abs/1211.1471v2>
- [12] ATLAS-CONF-2013-041, <https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/CONFNOTES/ATLAS-CONF-2013-041/>
- [13] M. Breidenbach, J. I. Friedman, H. W. Kendall, et. al. Phys. Rev. Lett. 23, 935
- [14] Von MissMJderivative work: Polluks (talk) - Standard\_Model\_of\_Elementary\_Particles.svg, CC BY 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11307906>