



Teilchenphysik

Lehrerprogramm - Mai 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

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!

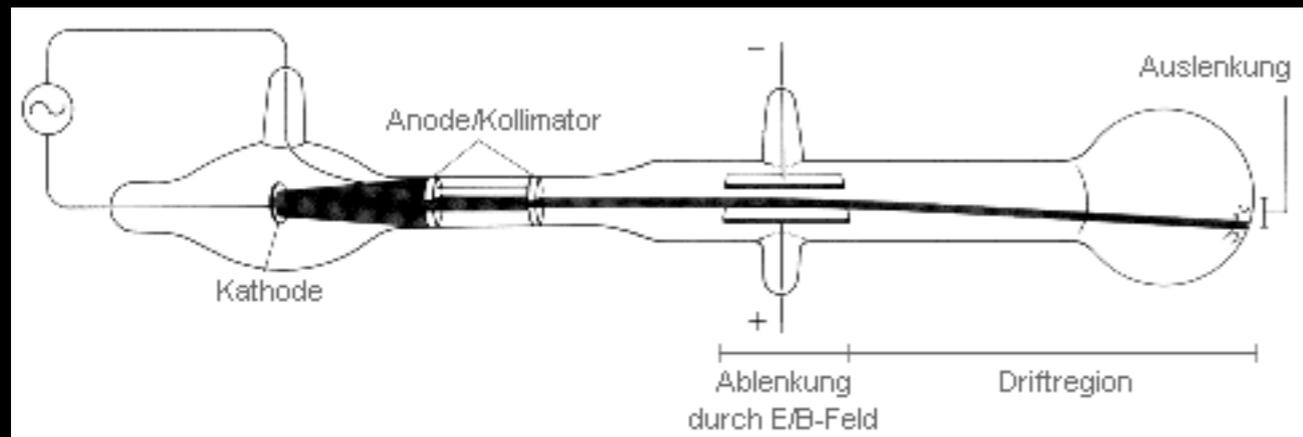
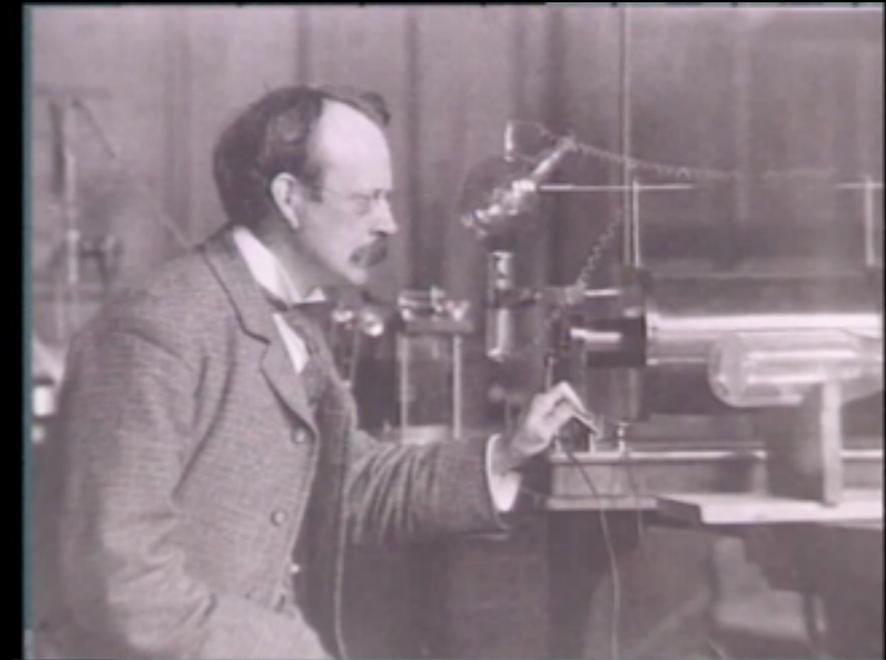
Direkt: interessant / langweilig
& Am Ende

Was ist elementar?

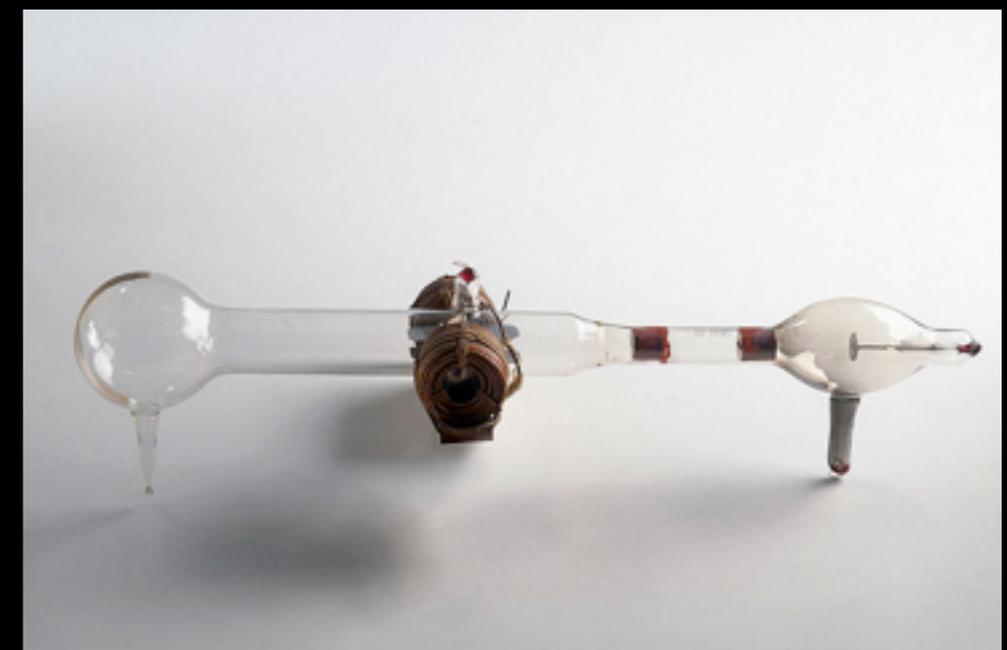
- Die Entdeckung des **Elektrons**

- Kathodenstrahlen: Bestimmung von e/m
- Unabhängig von Kathodenmaterial / Restgas
- Negativ geladen

1897: Thompson / Wiechert

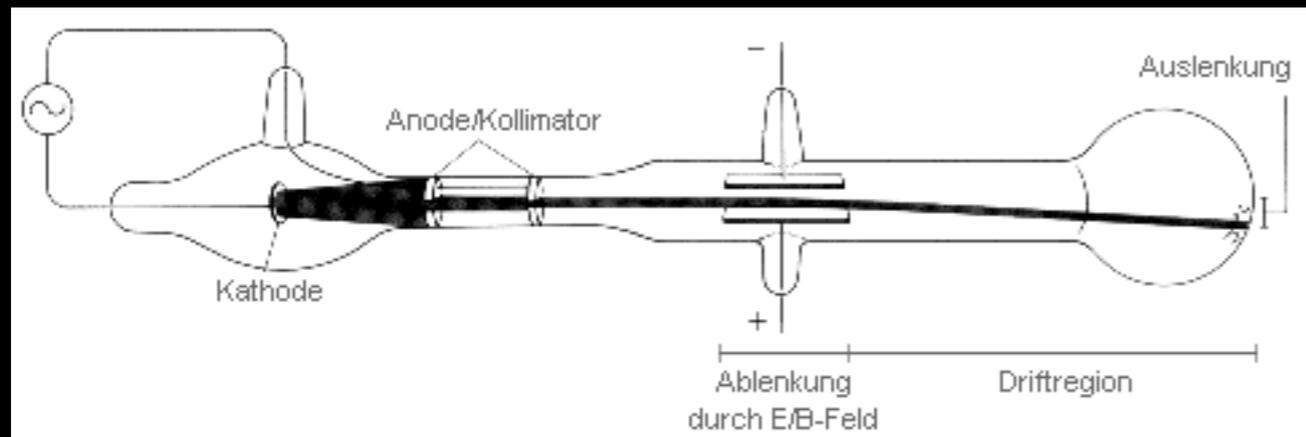


Historische Kathodenstrahlröhre

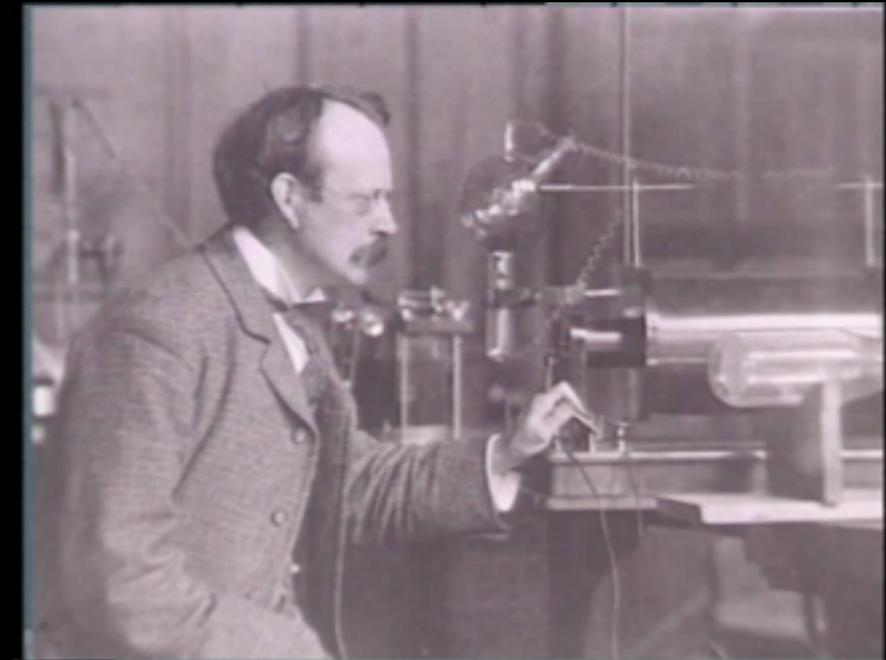


- Die Entdeckung des **Elektrons**

- Kathodenstrahlen: Bestimmung von e/m
- Unabhängig von Kathodenmaterial / Restgas
- Negativ geladen



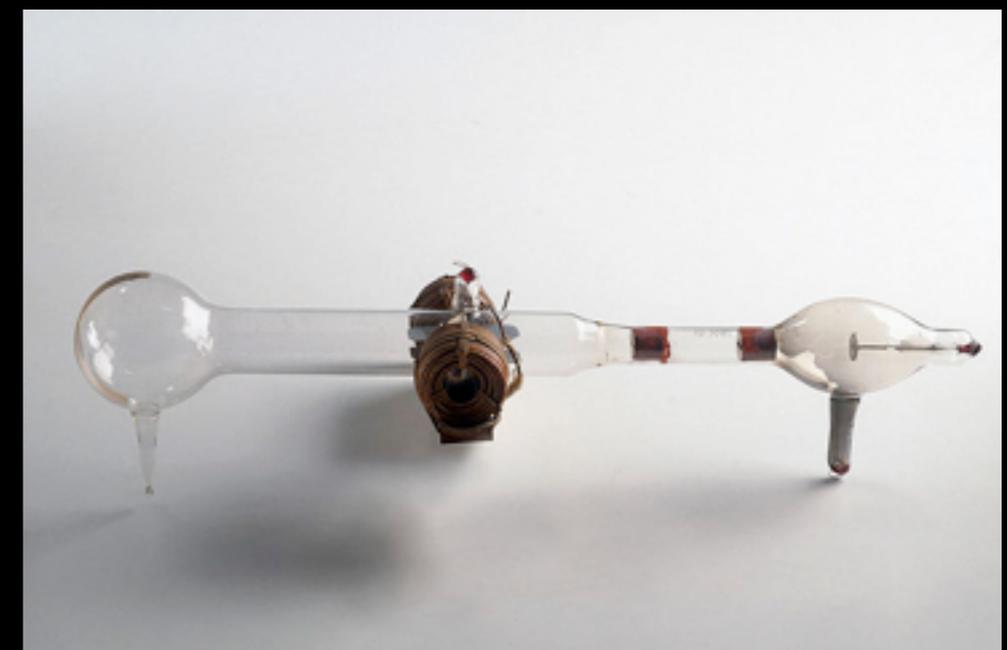
1897: Thompson / Wiechert



Historische Kathodenstrahlröhre

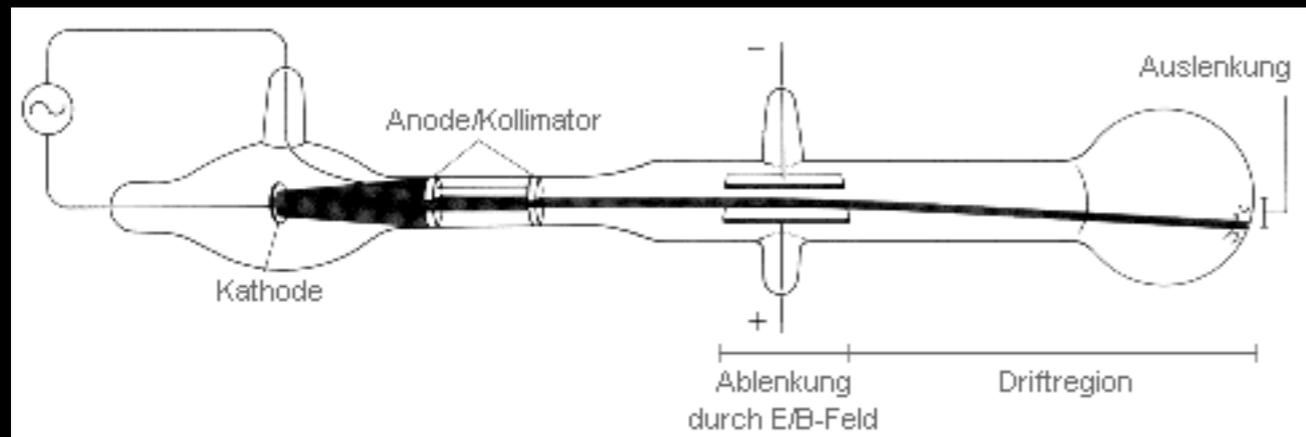
- **Zeeman Effekt:**

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

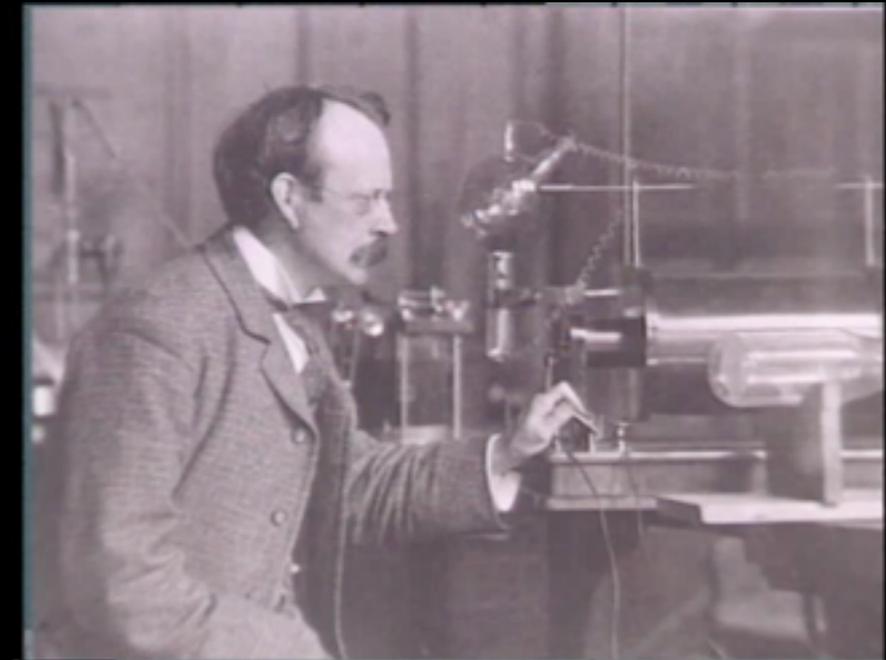


- Die Entdeckung des **Elektrons**

- Kathodenstrahlen: Bestimmung von e/m
- Unabhängig von Kathodenmaterial / Restgas
- Negativ geladen



1897: Thompson / Wiechert



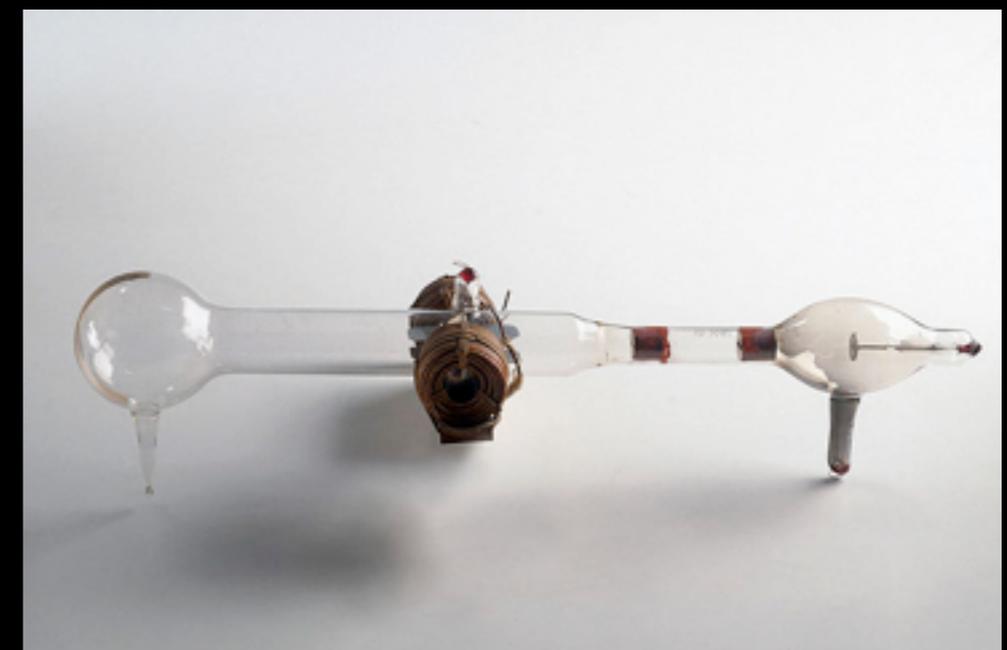
Historische Kathodenstrahlröhre

- **Zeeman Effekt:**

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

1896: Zeeman (Beobachtung)

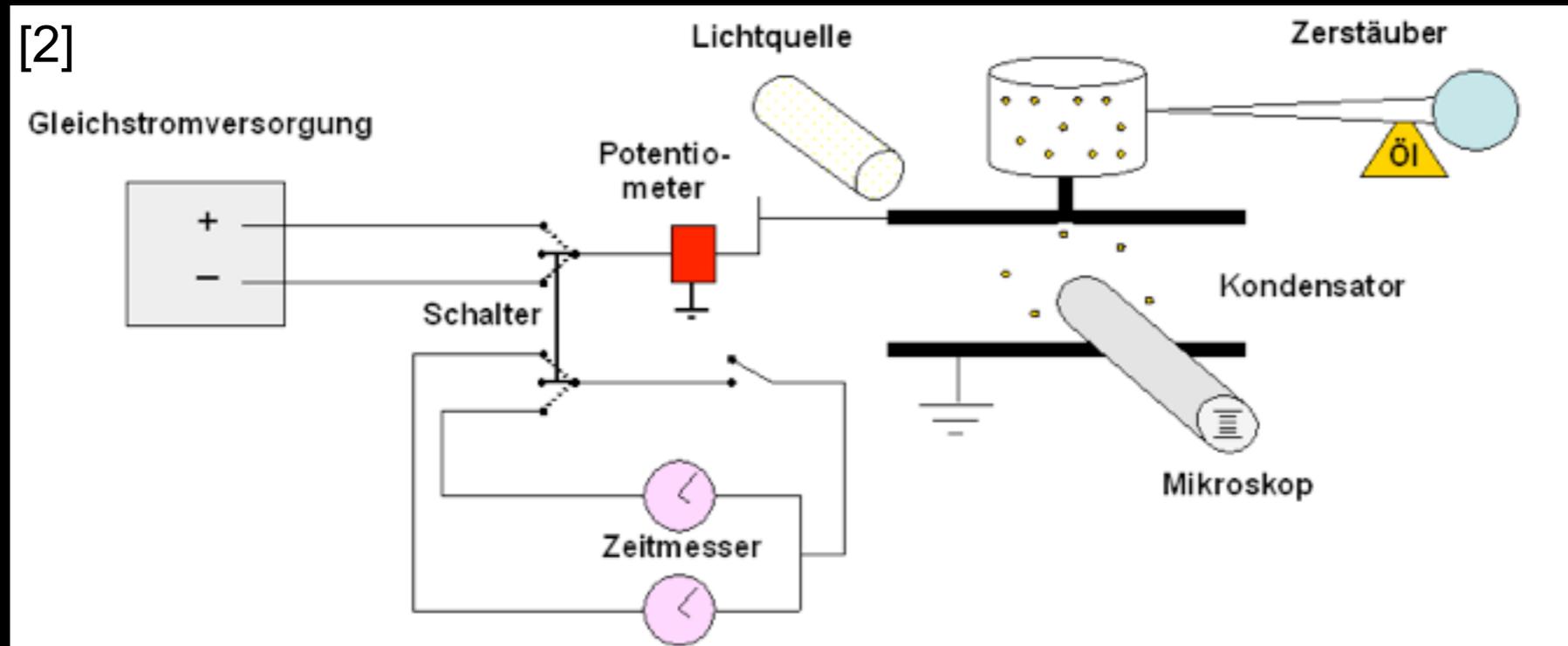
1899: Lorentz (Erklärung)



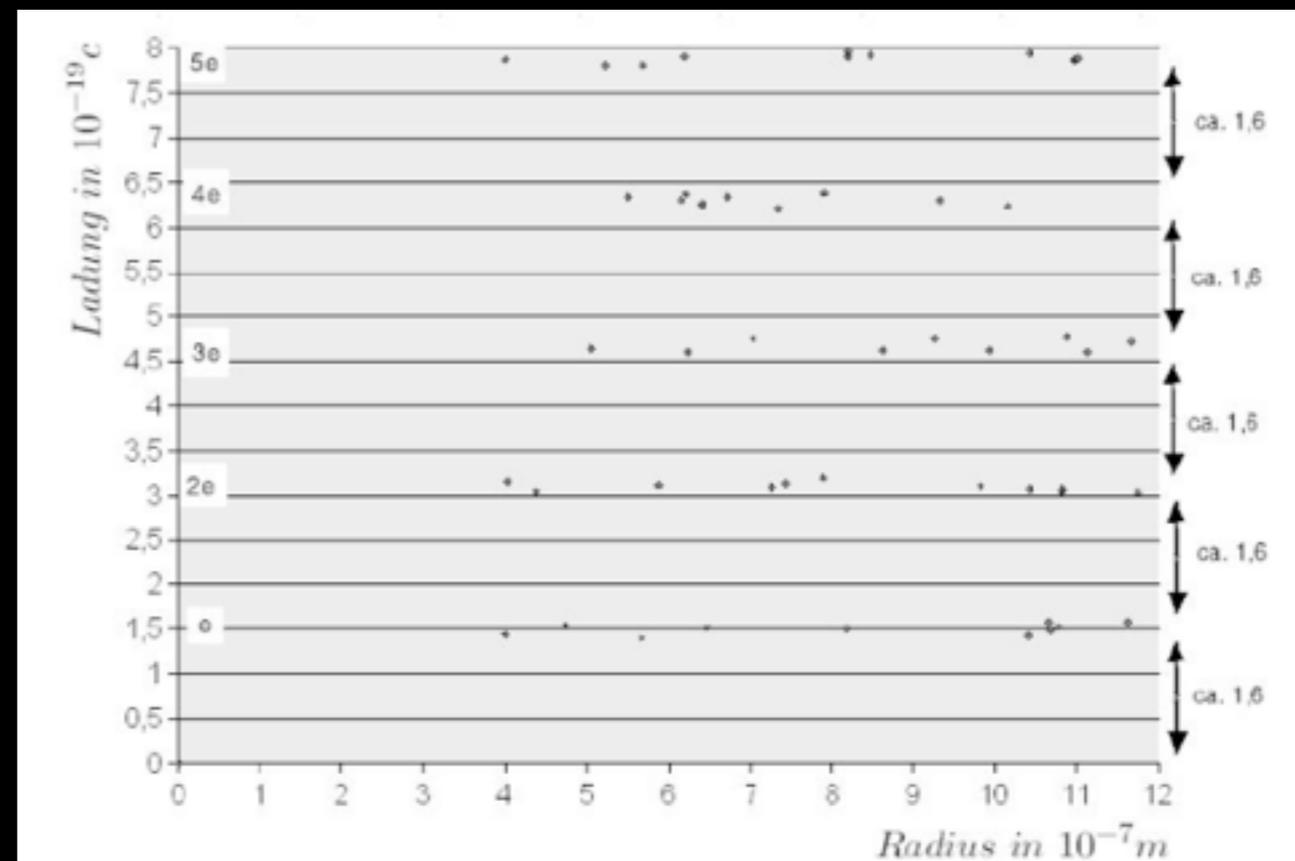
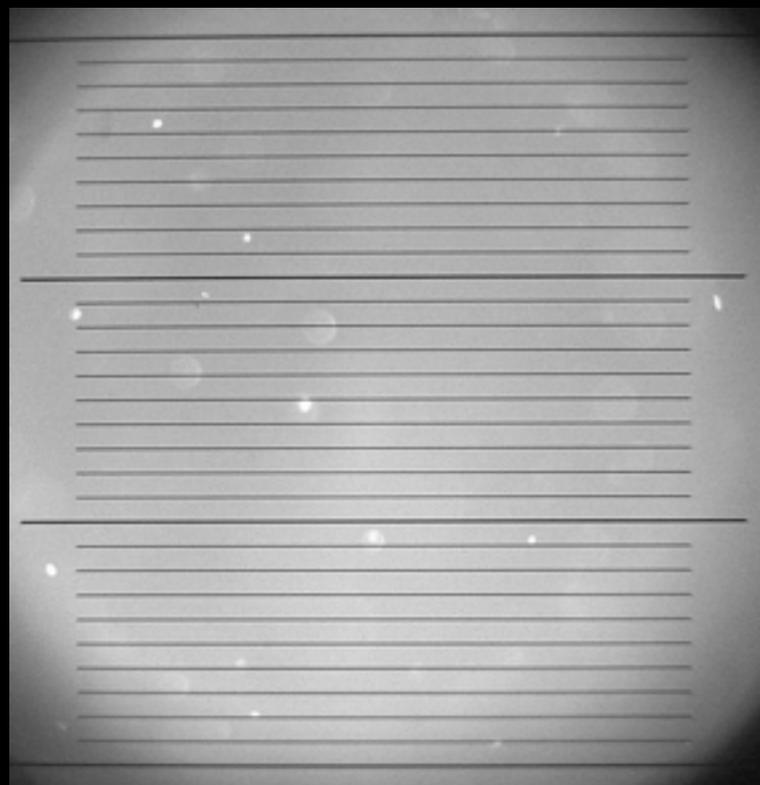
Bestimmung der Elementarladung

- Millikan Versuch

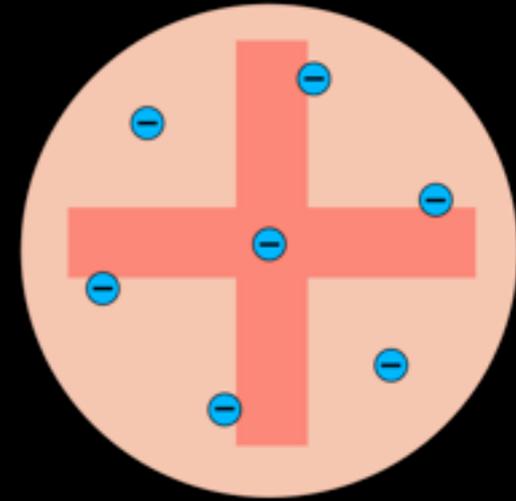
1910: Millikan / Fletcher



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



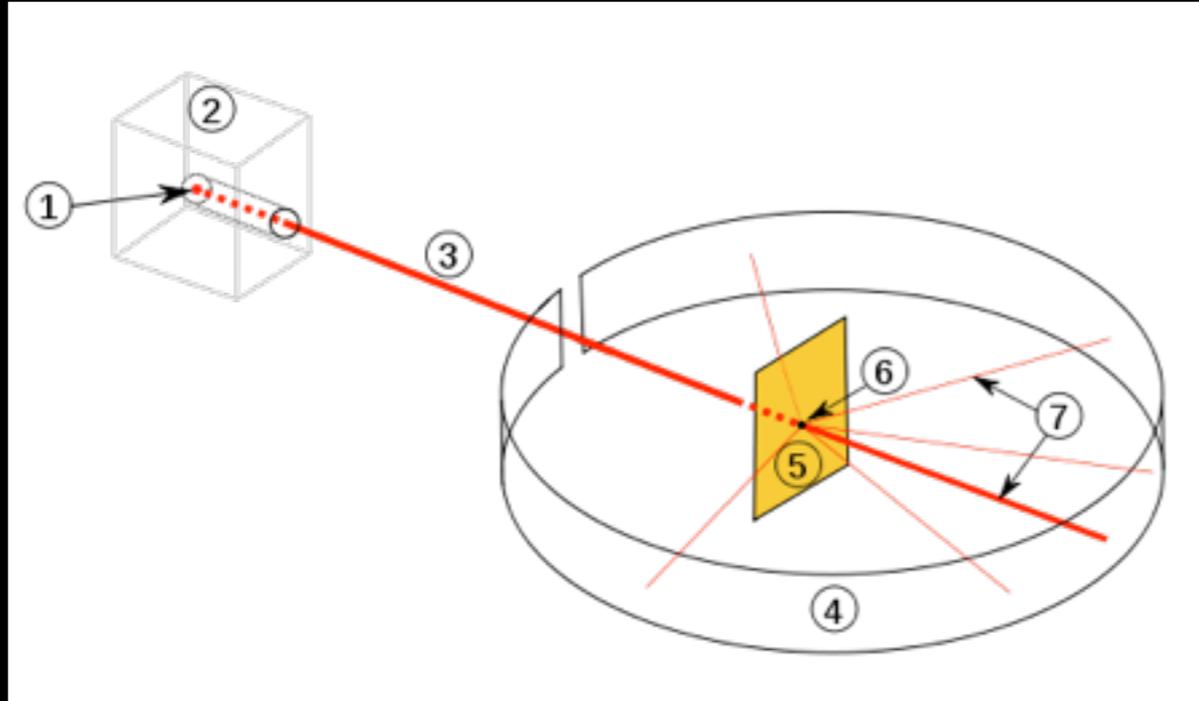
- Thomson: „*Rosinenkuchen*“-Modell
 - Elektronen in homogene, pos. geladene Masse eingebettet



Rutherford Experiment

1909: Geiger / Marsden / Rutherford

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

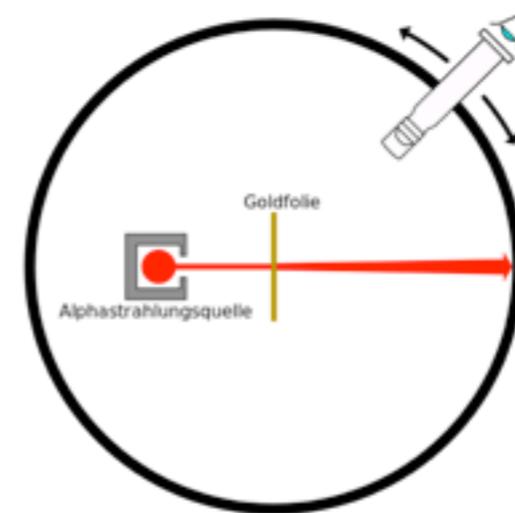
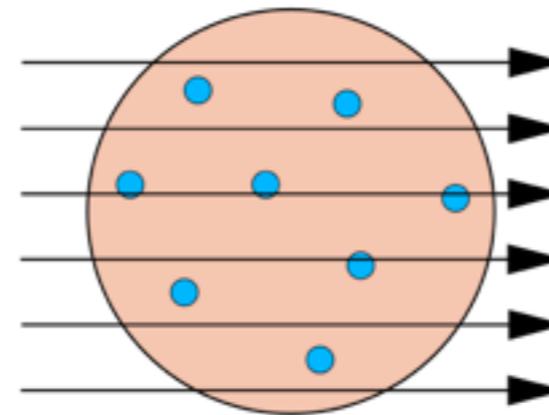


$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4E_0} \right)^2 \frac{1}{\sin^4\left(\frac{\vartheta}{2}\right)}$$

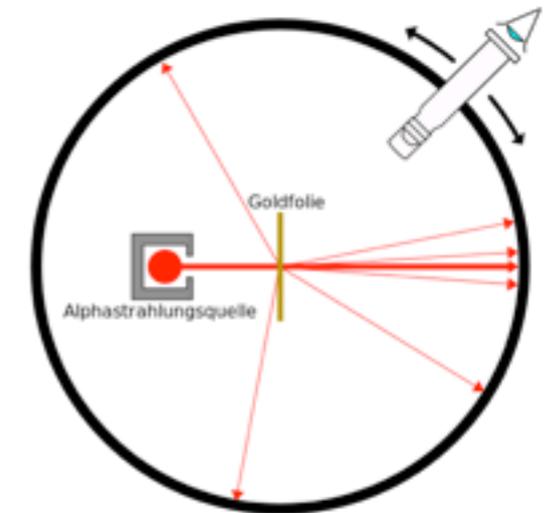
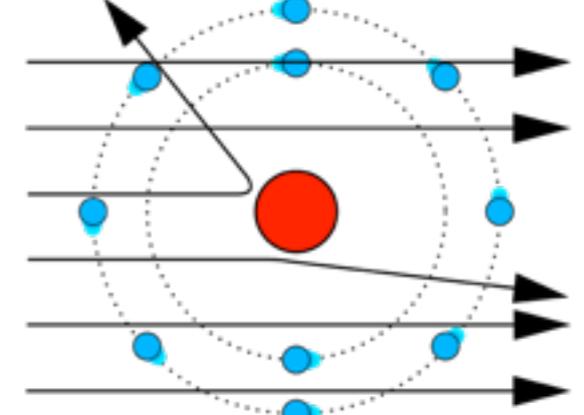
- Abschätzung Größe des Atomkerns:
 $\sim 10^{-3} \cdot \text{Atomdurchmesser} = \sim 10^{-14} \text{m}$

[2]

Thomsonsches Modell

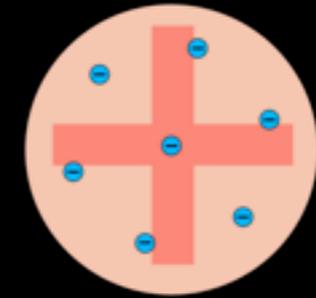


Rutherfordsches Modell



Beobachtetes Ergebnis

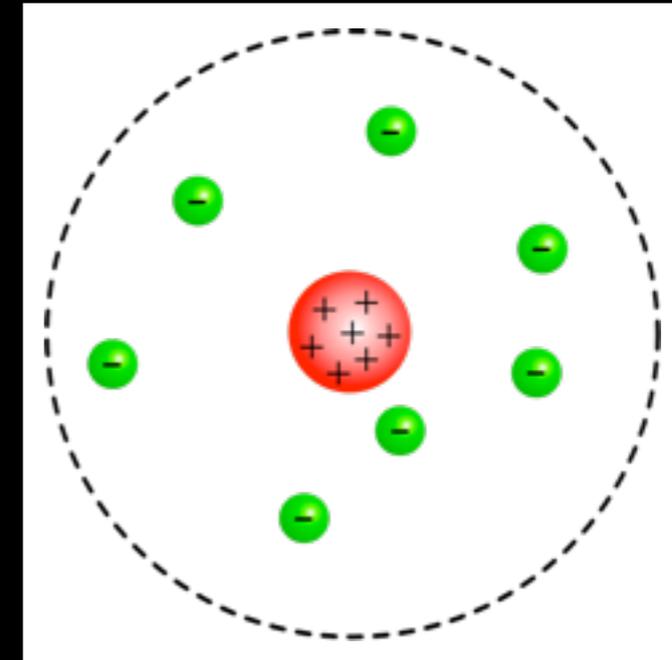
- Thomson: „*Rosinenkuchen*“-Modell
 - Elektronen in homogene, pos. geladene Masse eingebettet



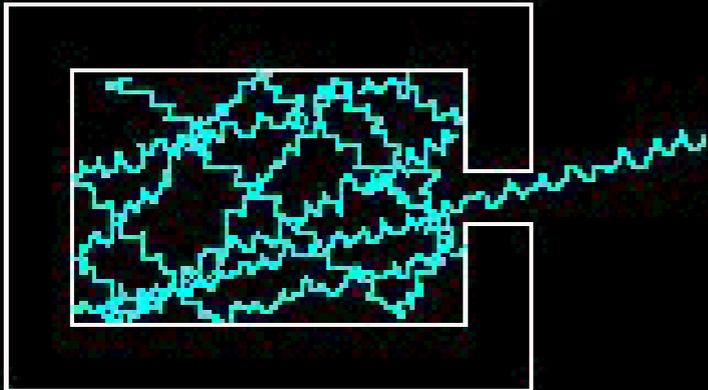
1900

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

1911



Max Planck: 1900



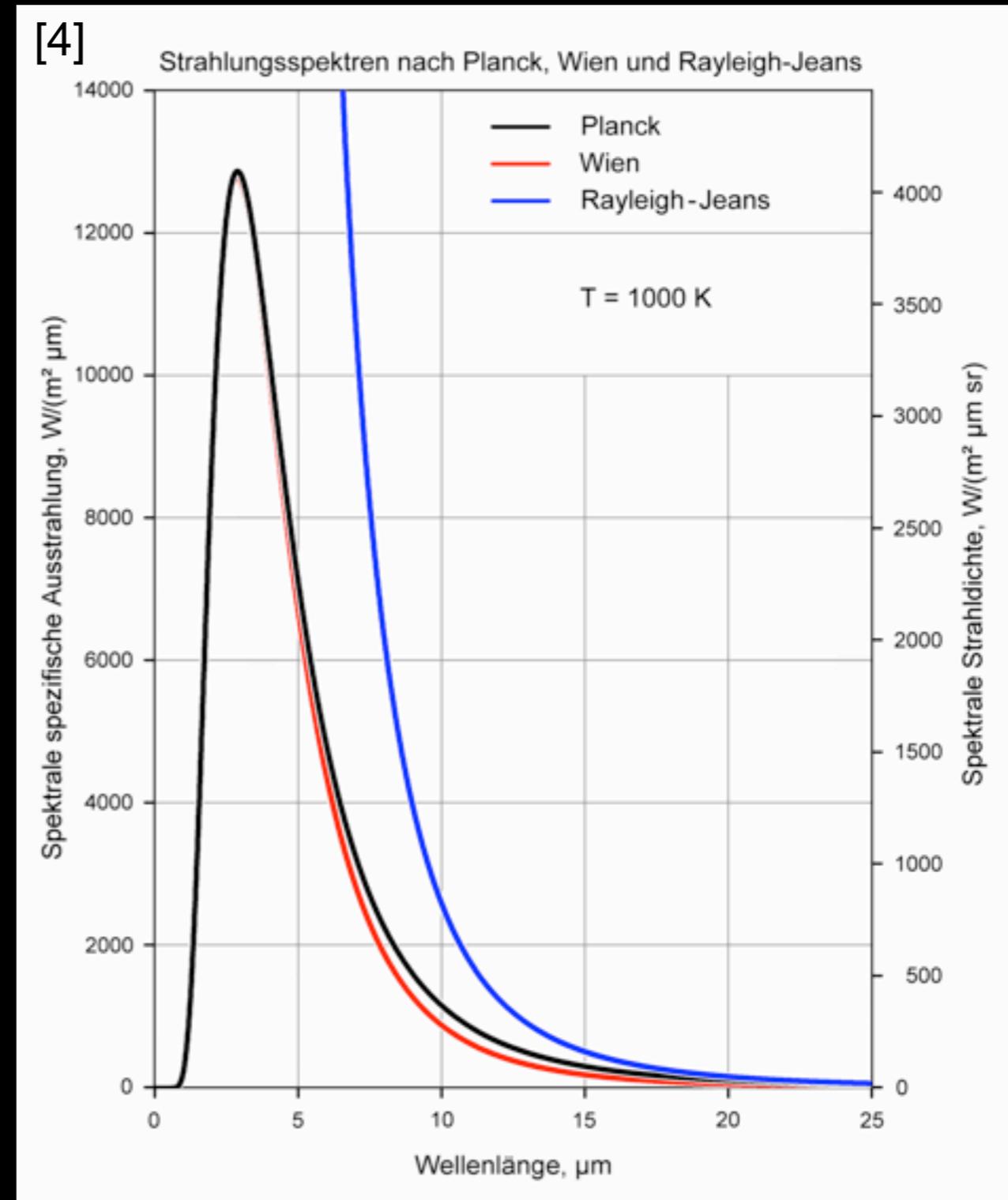
- Schwarzkörperstrahlung erst erklärbar durch Einführung von Energie-Quanten

- Oszillatoren in den Wänden können nur Energiepakete $\varepsilon = h \nu$

- Plancksche Strahlungsgesetz:

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

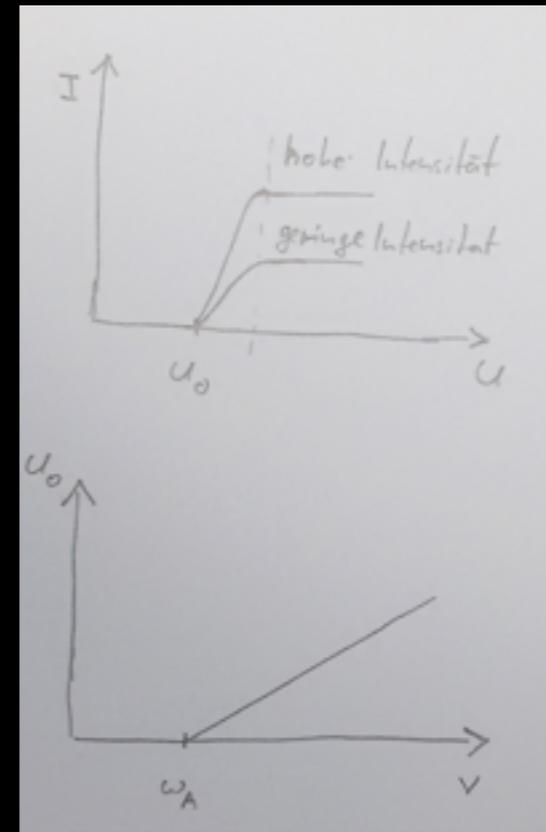
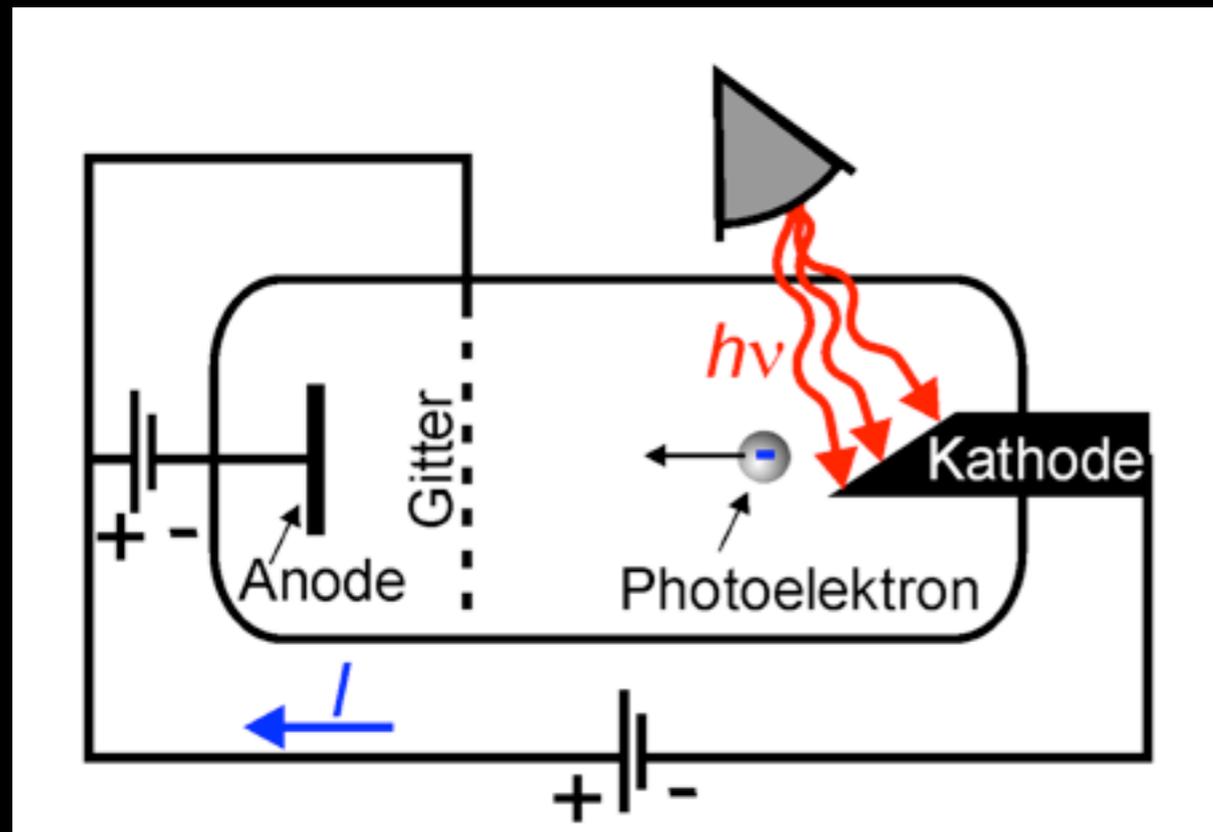
- neue fundamentale Konstante: h



Quanten - Photoelektrischer Effekt

- Auslösung von Elektronen aus Metalloberflächen bei Lichteinfall:

Einstein: 1905

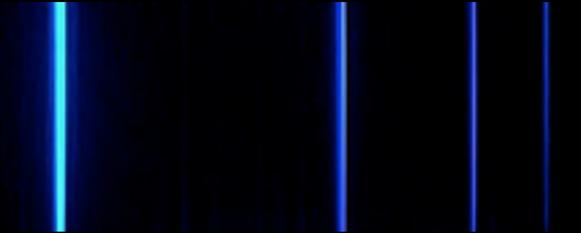


- Energie der Elektronen unabhängig von Lichtintensität!
- Nicht erklärbar mit dem klassischen Bild einer elektromagnetischen Welle!
- Erklärung durch Interaktion von Lichtquanten mit Elektronen:
 - „Ein Lichtquant gibt alle seine Energie an ein Elektron ab“

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

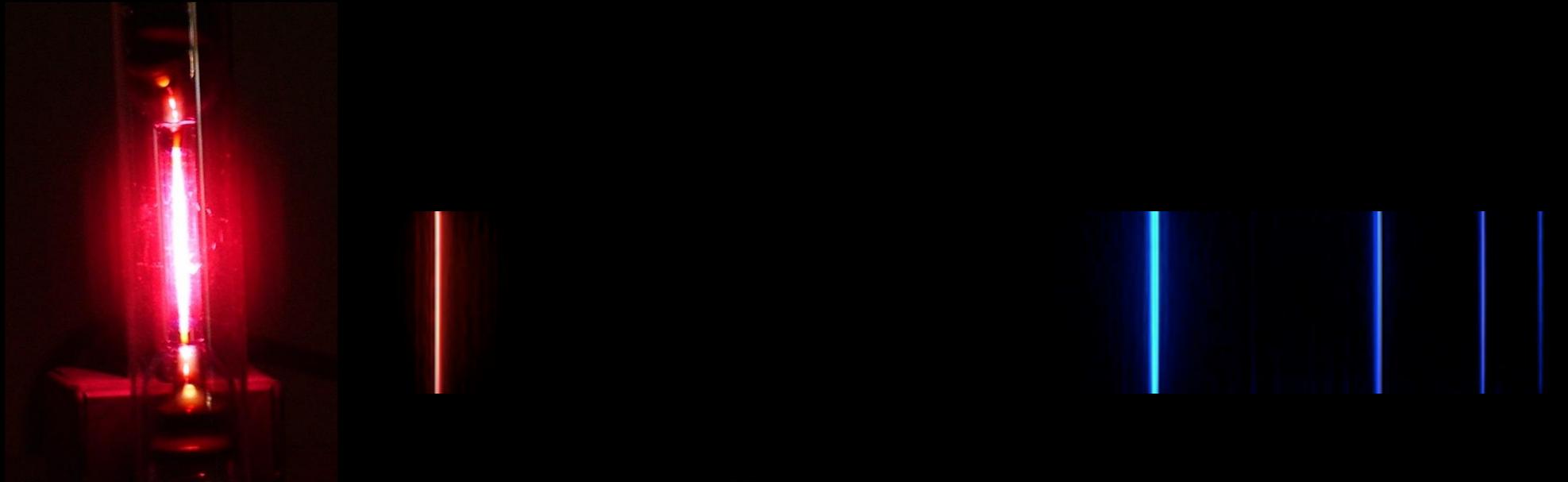
- Elektron
- Licht-Quant

Balmer: 1885



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

Balmer: 1885



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

Bohr: 1913

- **Lösung:**

Elektronen auf bestimmten, stabilen Bahnen

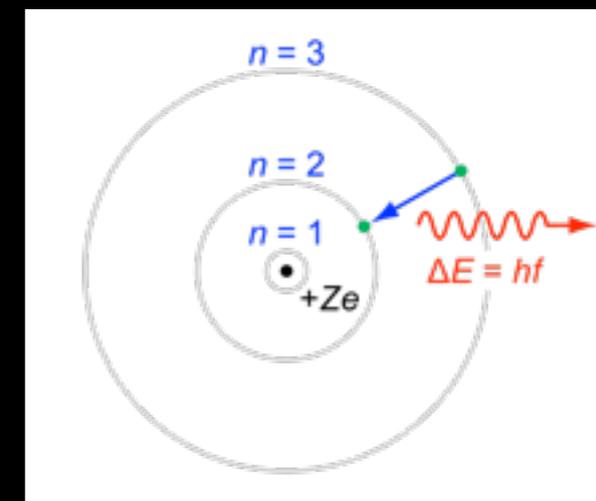
Energieänderung bei Bahnwechsel:

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

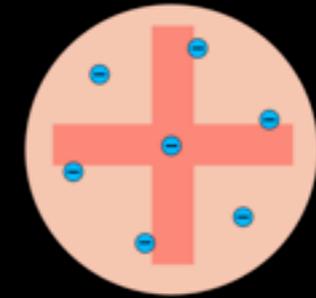
Drehimpuls der Elektronen quantisiert:

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

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

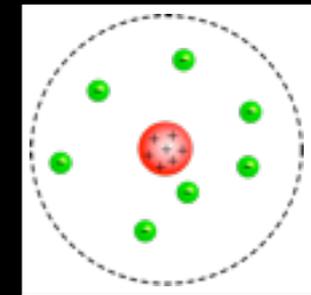


- Thomson: „Rosinenkuchen“-Modell
 - Elektronen in homogene, pos. geladene Masse eingebettet



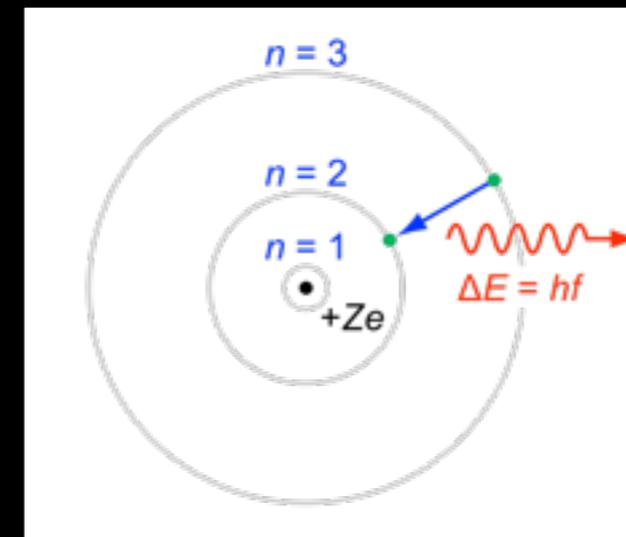
1900

- Rutherford: Masse und positive 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:**

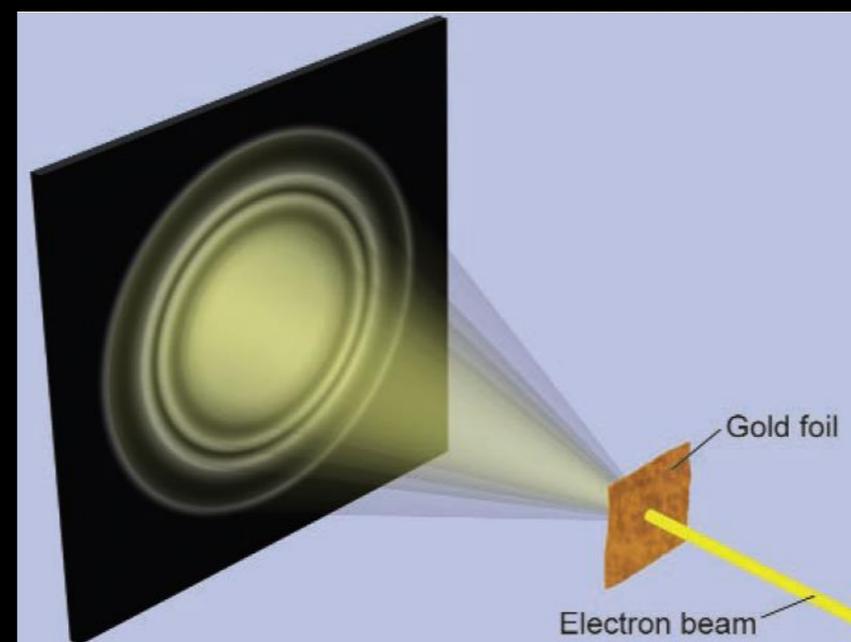
$$\lambda = h/p$$

- Experimentell betätigt: Beugung von Elektronen an Goldfolie

de Broglie: 1924

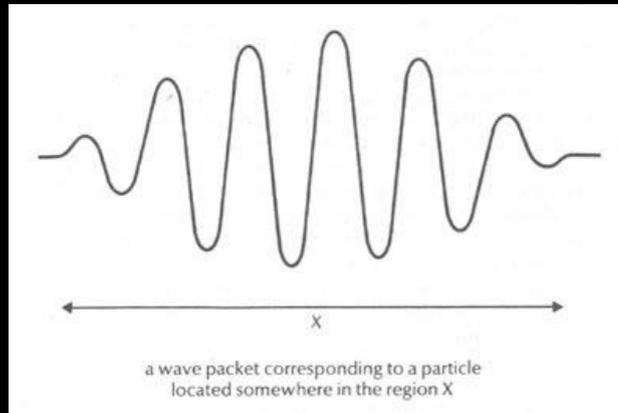


Davisson & Germer: 1927



- 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“ Δf wenn er nur über Zeit Δt 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

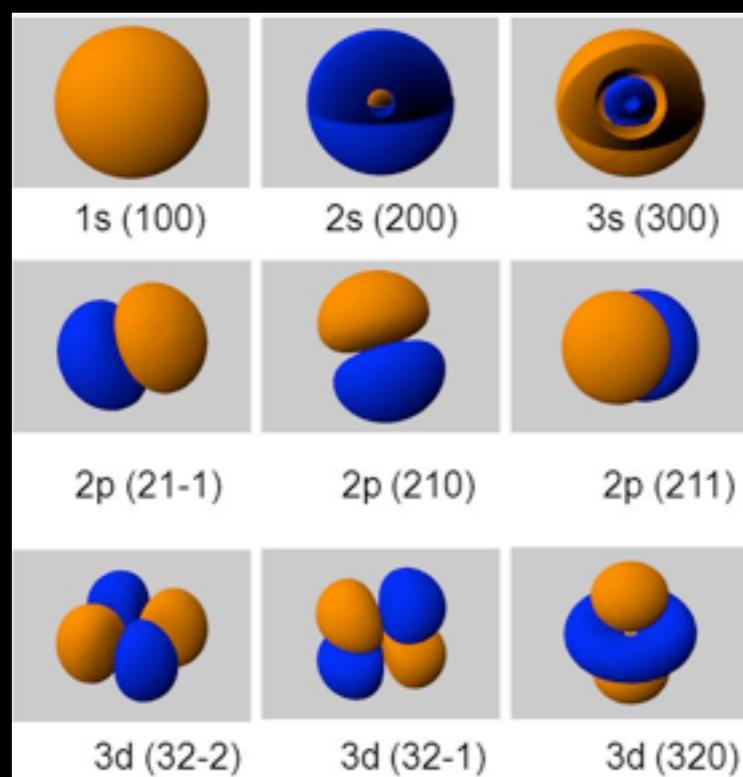
N.b.:
Kopenhagener Interpretation: Bohr / Heisenberg 1927

- 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

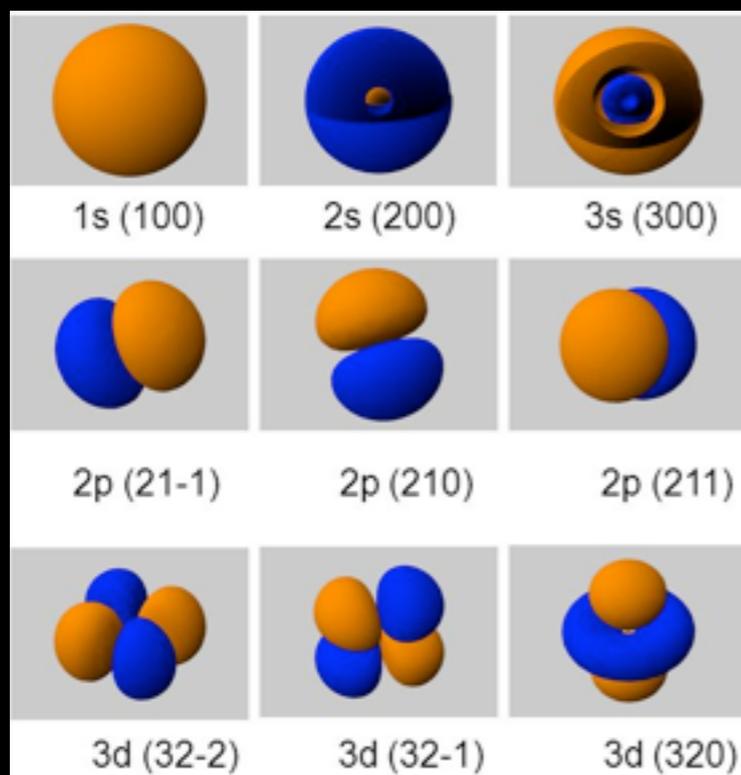
N.b.:
Kopenhagener Interpretation: Bohr / Heisenberg 1927

- Beispiel **Atom**:

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

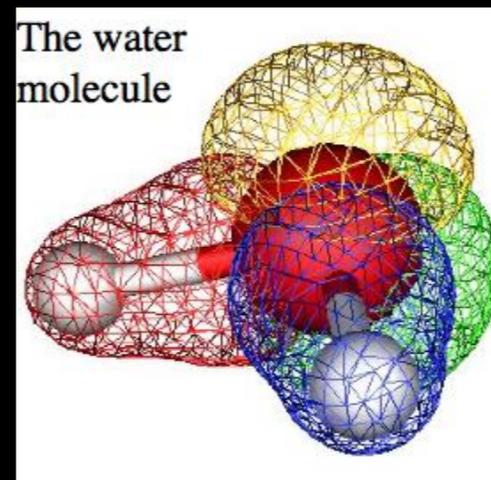
Orbitale des Wasserstoffs

[7]



Pauling: 1928

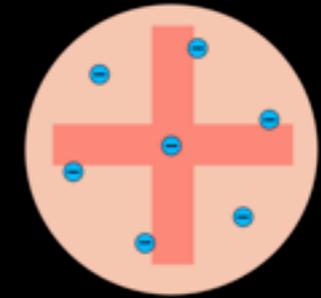
Chemische Bindungen reflektieren **Struktur** der Orbitale



Verständnis der Makroskopischen Strukturen!

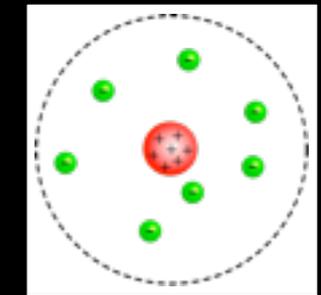
Atommodelle - 1928

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



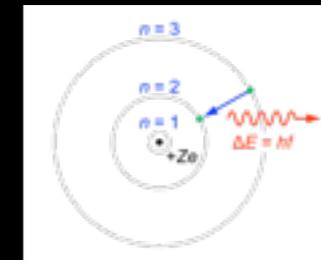
1900

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



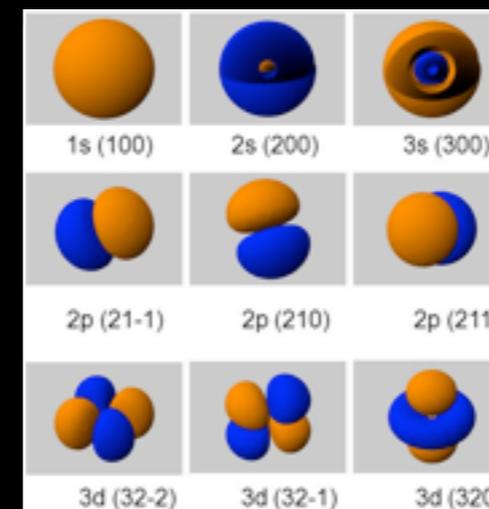
1911

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

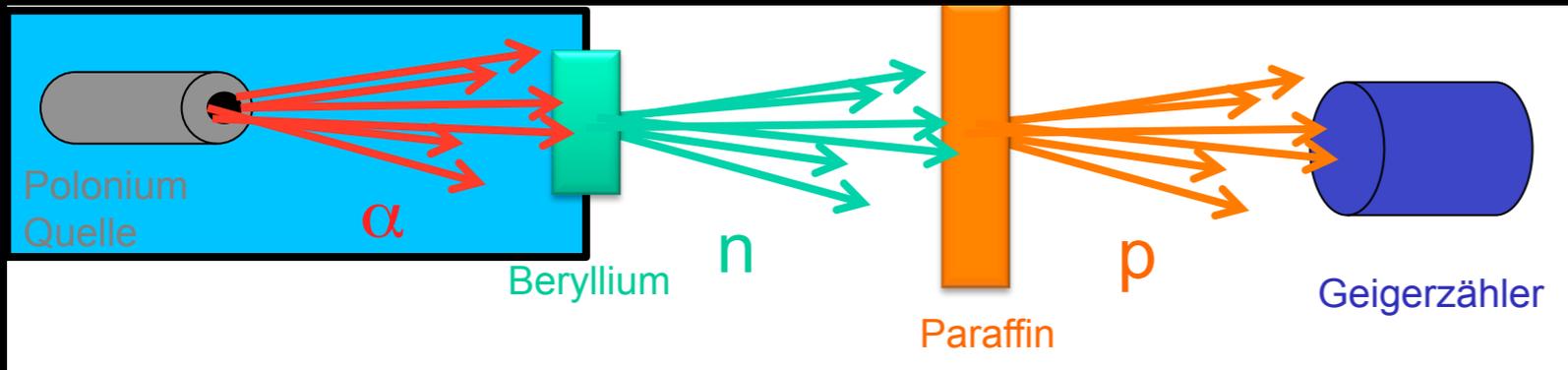


1913

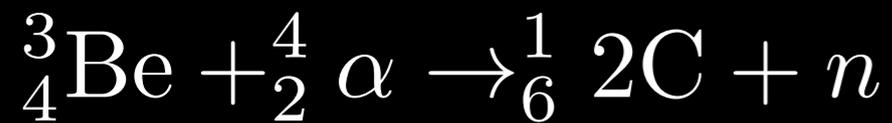
- Orbital-Modell (Born, Pauling):
 - Quantenmechanische Beschreibung der Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Elektronen



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

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

- mehr als 1 Lösung: +m, -m, +p, -p

- **Bedeutung von neg. Ruheenergie?**

- Relativistische Energie - Impuls Beziehung

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

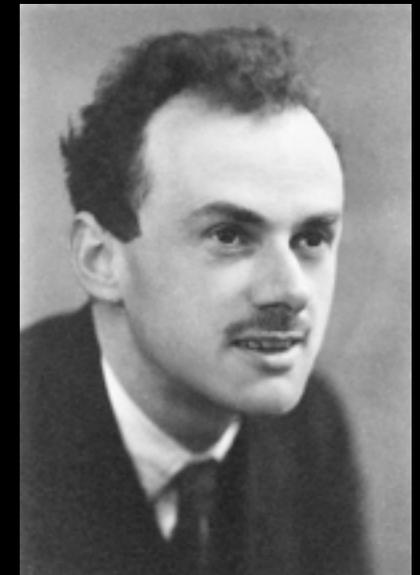
- mehr als 1 Lösung: +m, -m, +p, -p

- **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

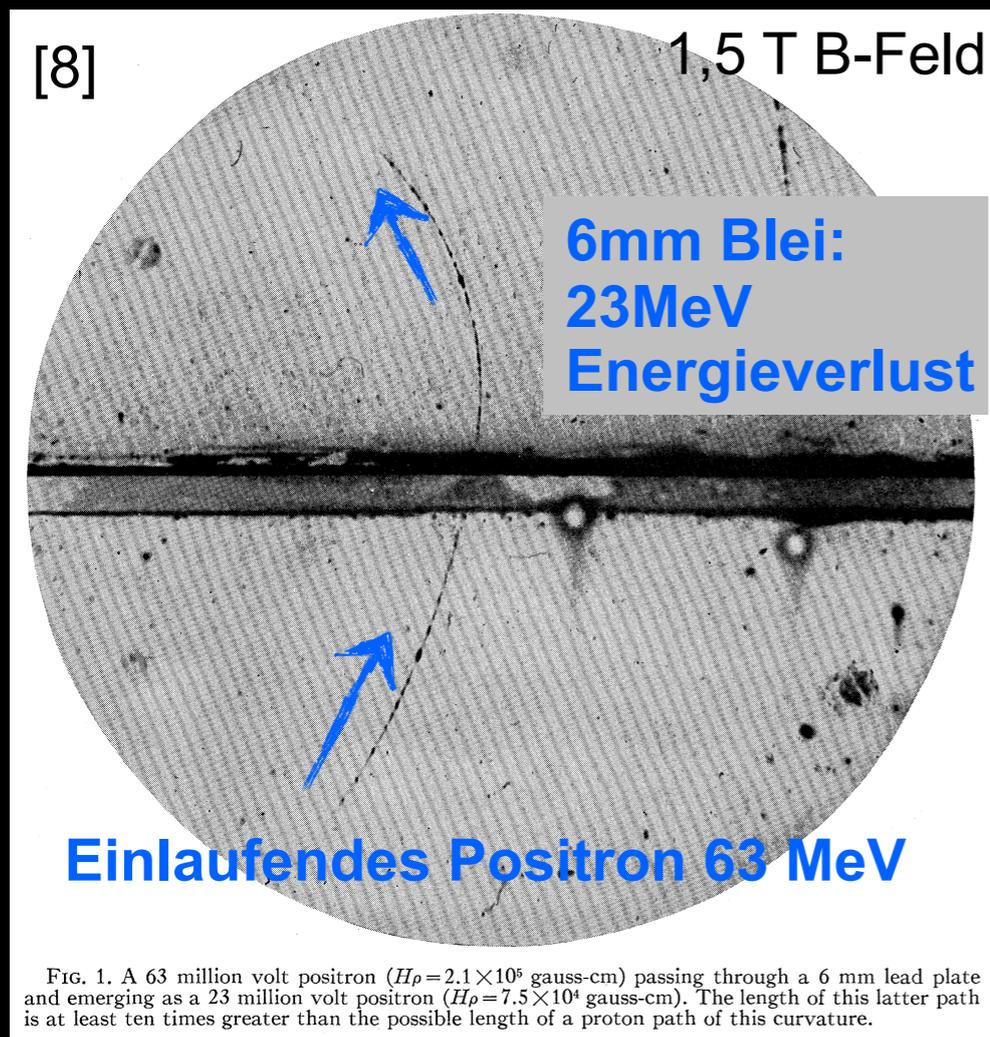
→ Pauli Prinzip 1940

Vorhersage von Anti-Teilchen

Entdeckung des Positrons

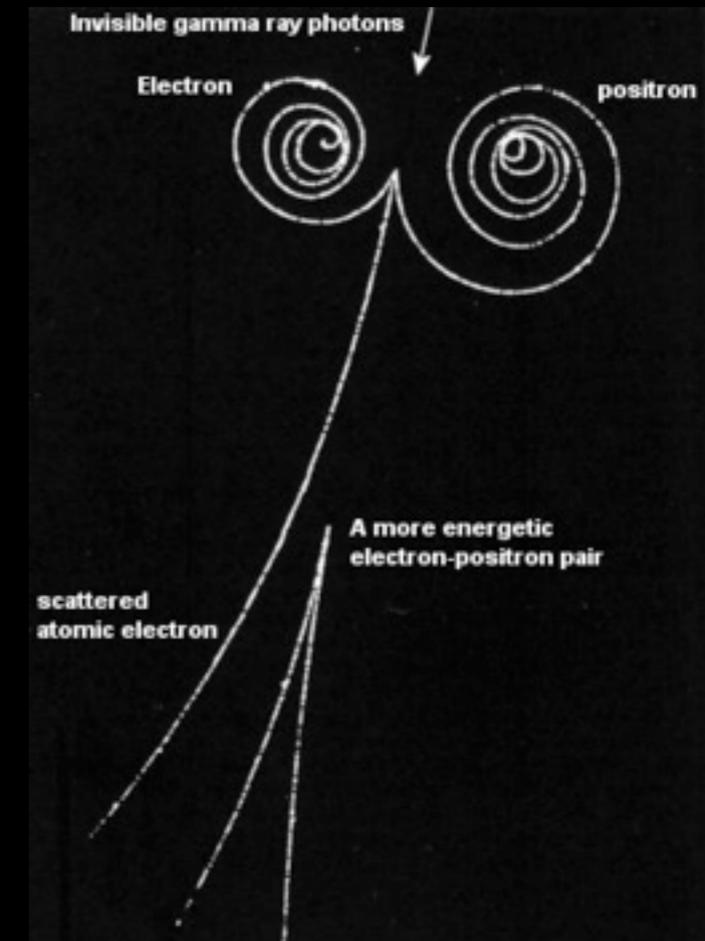
Anderson: 1932

- Nachweis von Positronen aus Höhenstrahlung in Nebelkammer



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

- Verhalten sich wie Teilchen, jedoch mit entgegengesetzter Ladung
 - gleiche Masse, Spin, Parität ...
- Erzeugung: $E = mc^2$
 - nur gepaart mit ‚normalen‘ Teilchen:
 - **Teilchen - Antiteilchen Paarerzeugung**

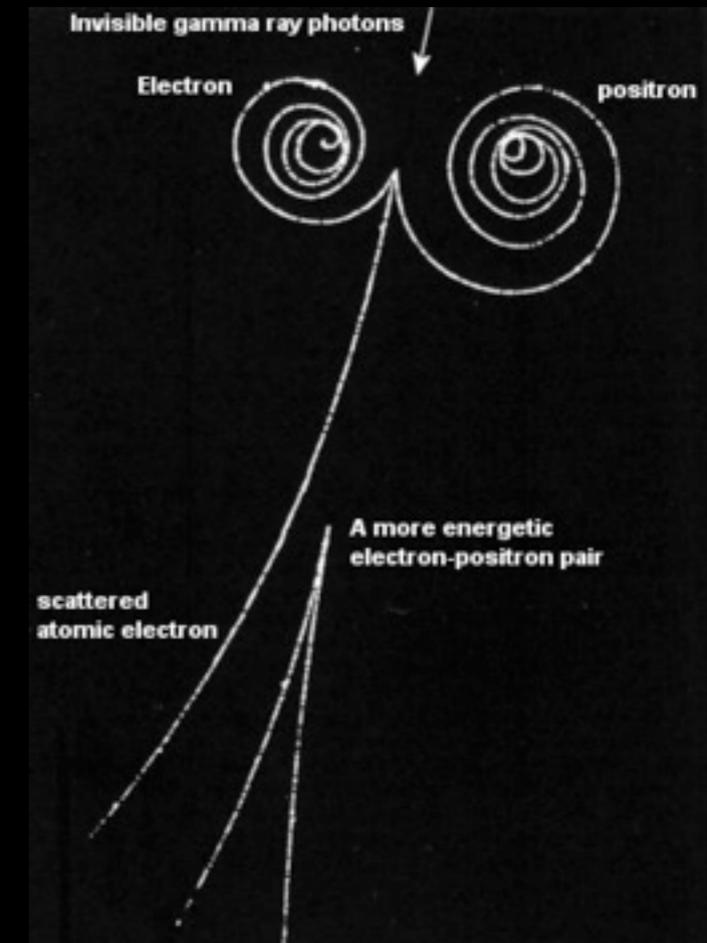


- Verhalten sich wie Teilchen, jedoch mit entgegengesetzter Ladung
 - gleiche Masse, Spin, Parität ...

- 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)

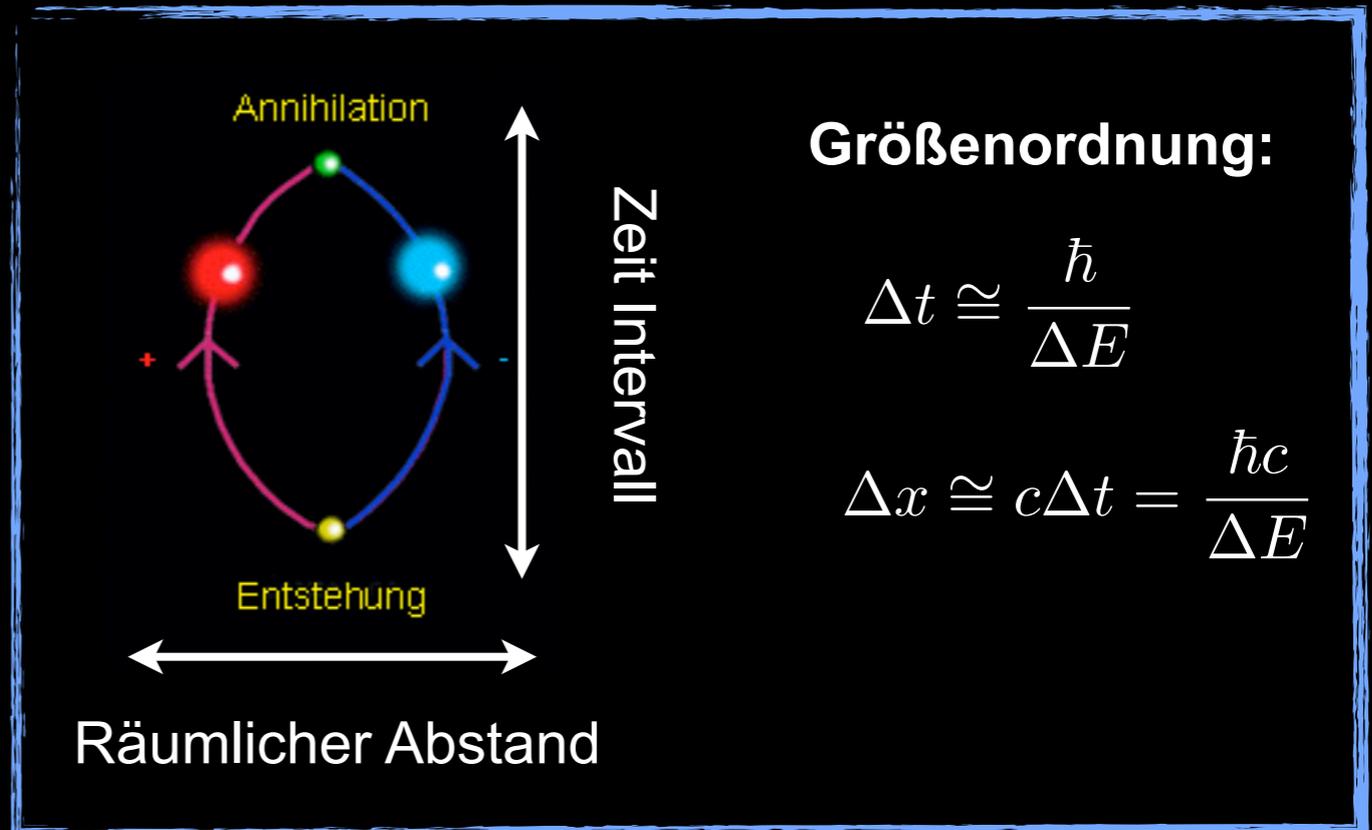
- Paarerzeugung: $E = mc^2$
- Heisenbergsche Unschärferelation: $\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$

Antiteilchen und das Vakuum

- Paarerzeugung: $E = mc^2$
- Heisenbergsche 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**

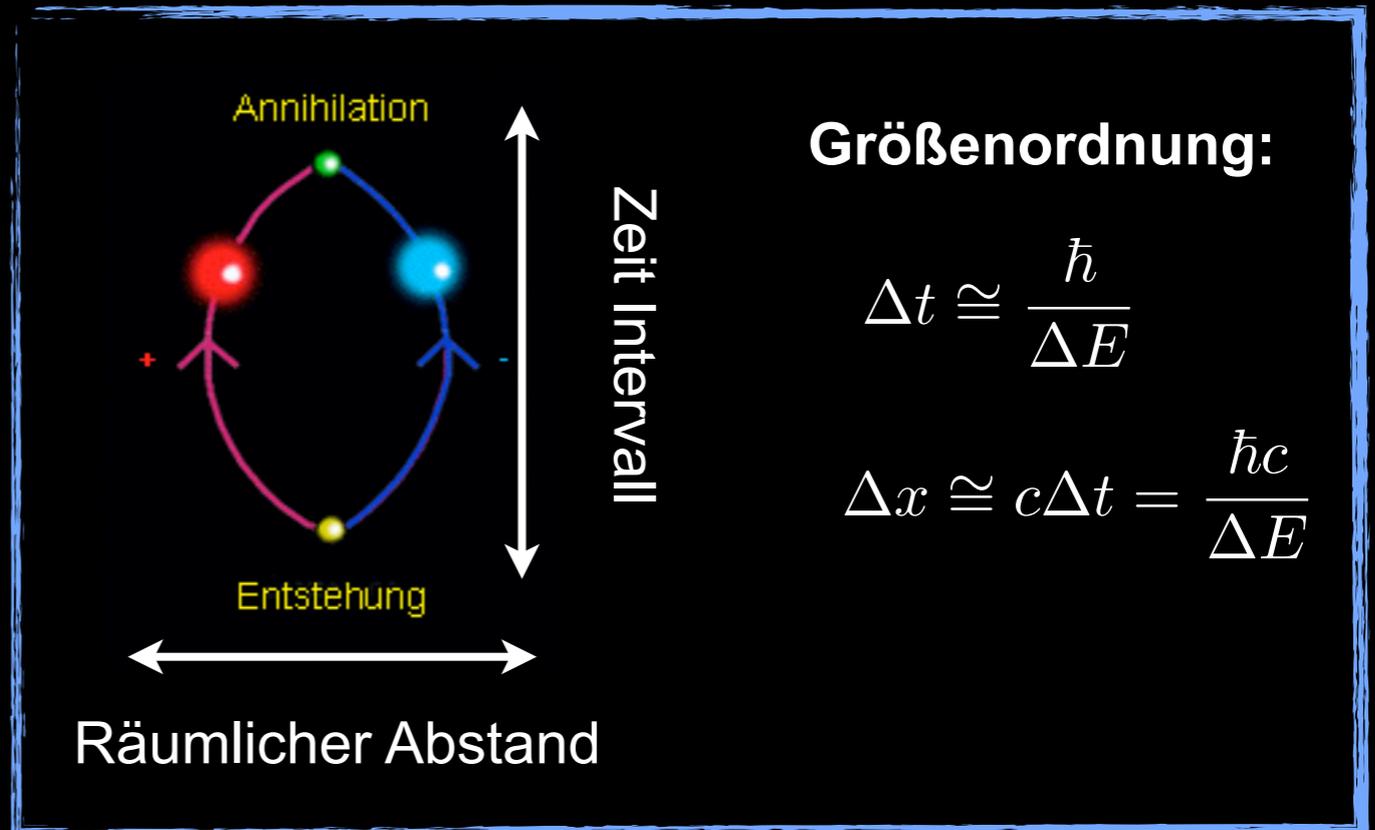


Antiteilchen und das Vakuum

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

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

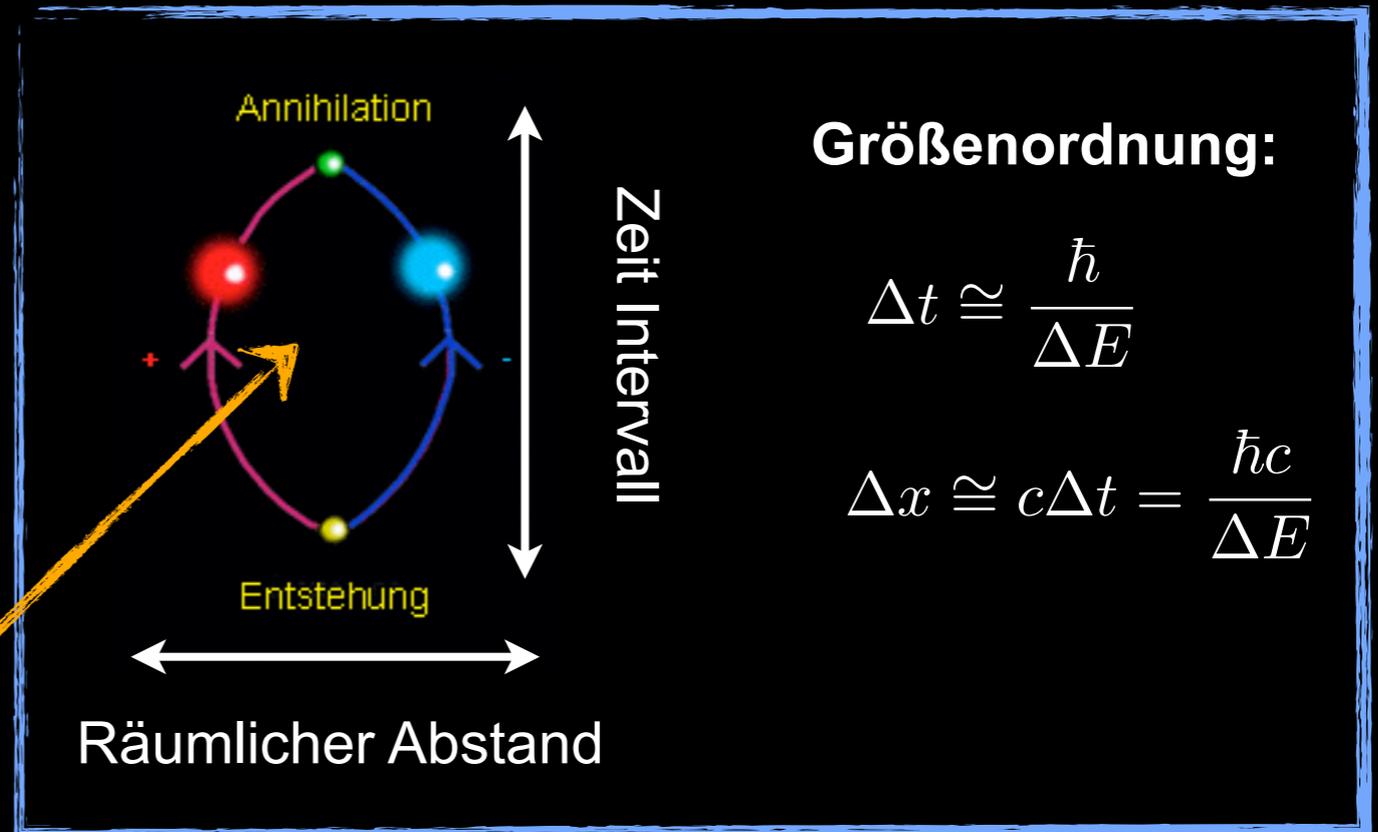
- **Vakuumfluktuation**
- Keine absolute Ruhe in physikalischen Systemen!
 - Nullpunktsenergie



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:

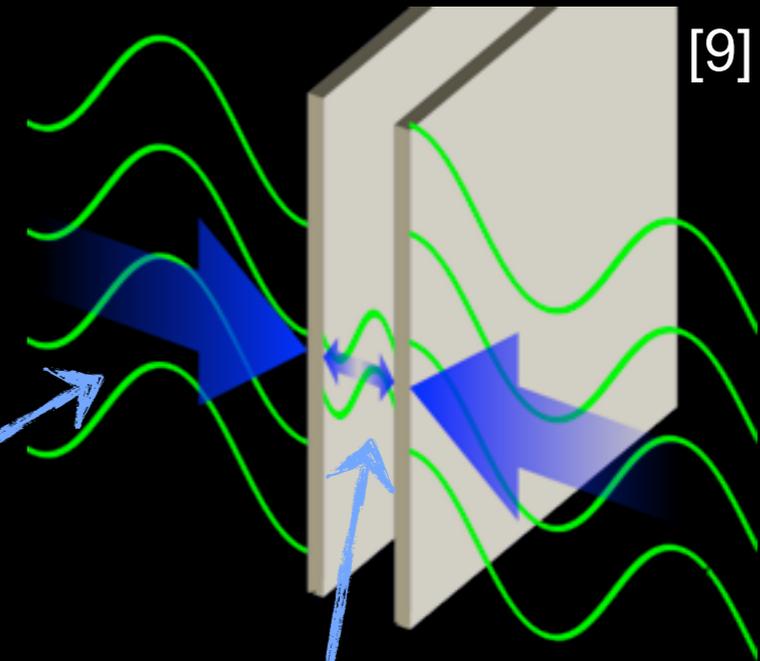
- Messbarer äußerer Druck auf Metall platten

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

- ~1 bar @ d = 11nm

Alle Wellenlängen
(Energien) möglich

Nur passende
Wellenlängen möglich



- Casimir Effekt:

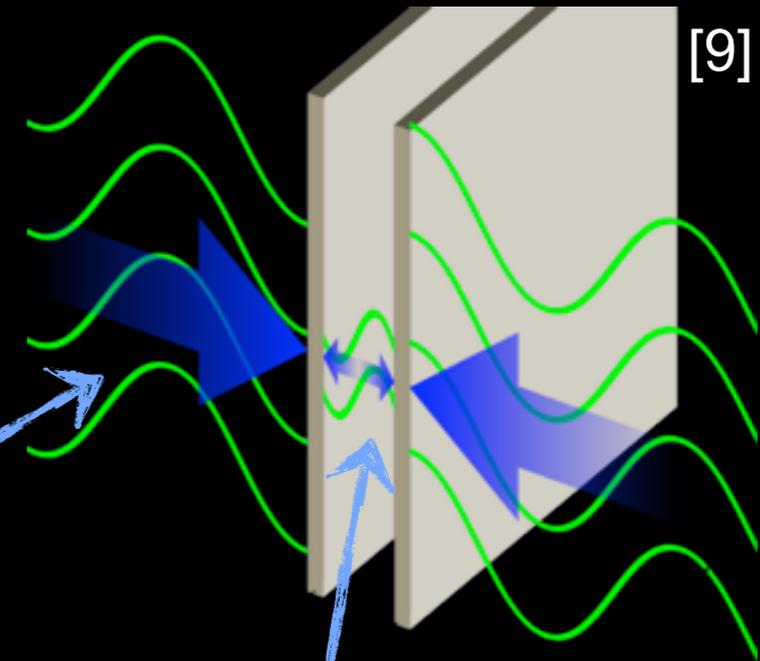
- Messbarer äußerer Druck auf Metall platten

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

- ~1 bar @ d = 11nm

Alle Wellenlängen
(Energien) möglich

Nur passende
Wellenlängen möglich



- Elektron polarisiert Vakuumfluktuationen!

- Gemessene Ladung = ‚nackte‘ Ladung + Polarisation

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

- Casimir Effekt:

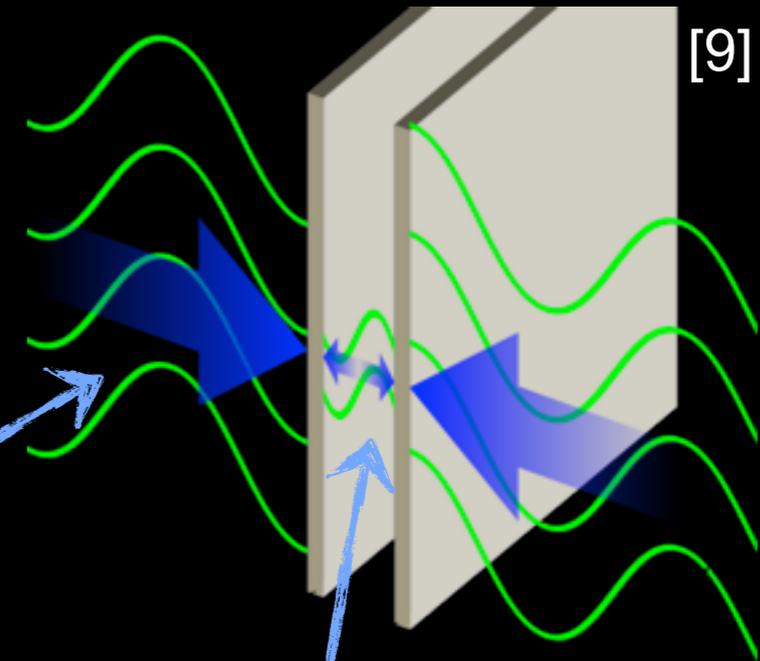
- Messbarer äußerer Druck auf Metall platten

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

- ~1 bar @ d = 11nm

Alle Wellenlängen
(Energien) möglich

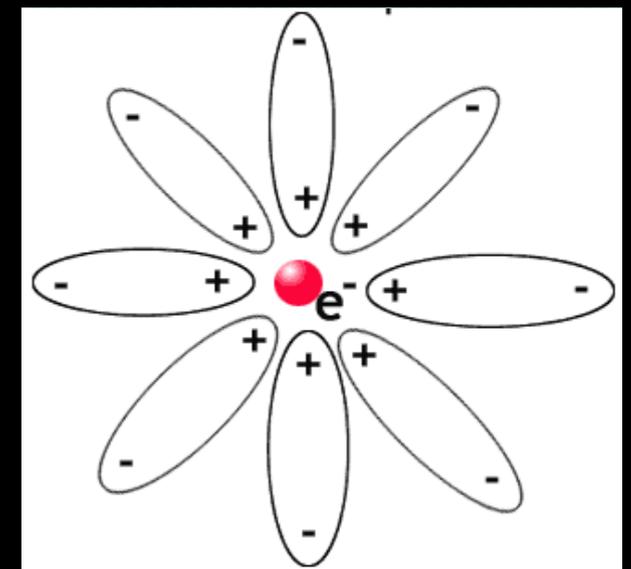
Nur passende
Wellenlängen möglich



- Elektron polarisiert Vakuumfluktuationen!

- Gemessene Ladung = ‚nackte‘ Ladung + Polarisation

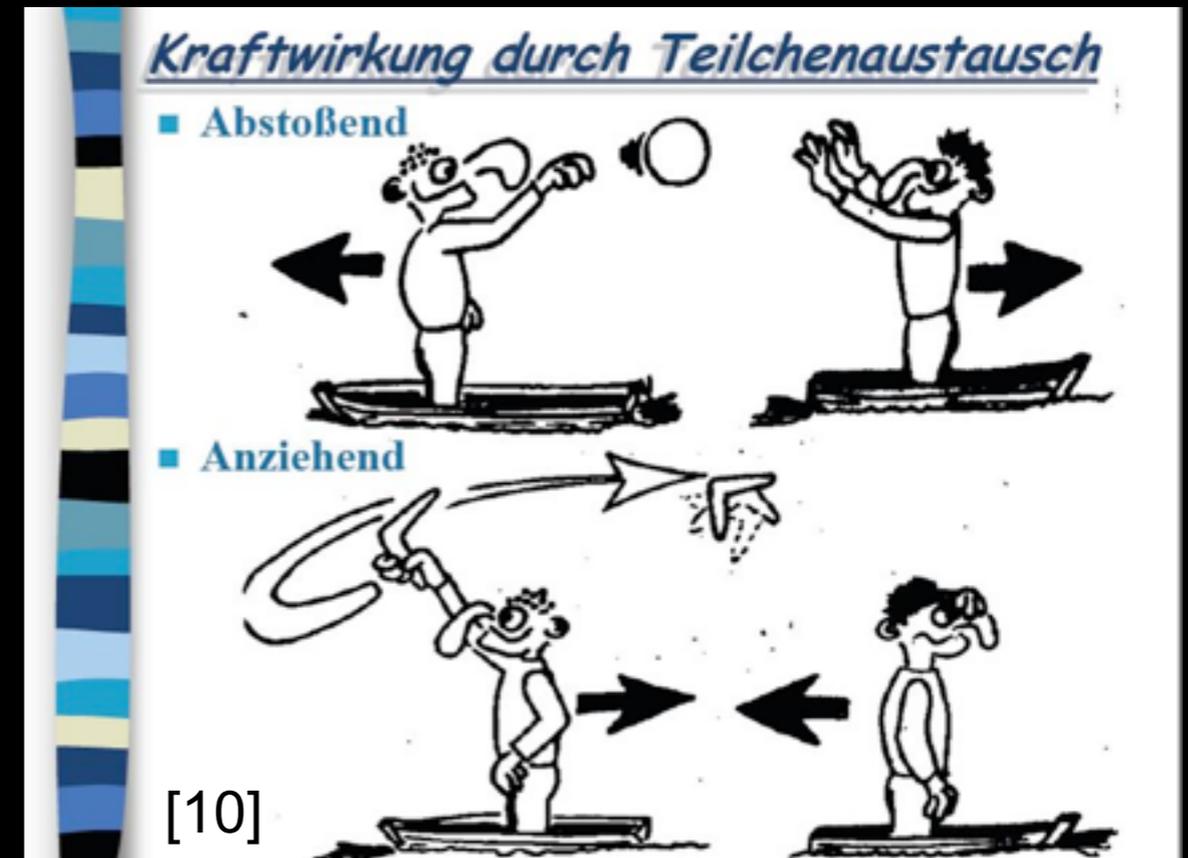
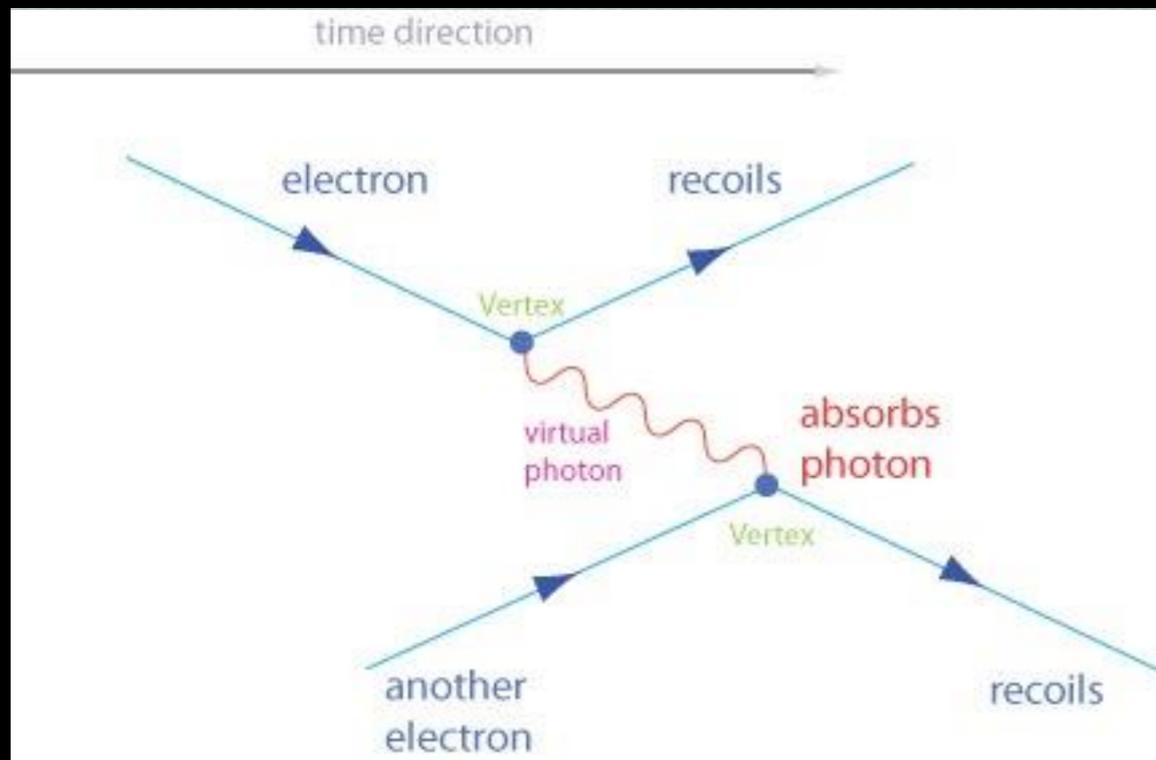
- ▶ Scheinbare Ladung abhängig vom Abstand!
- ▶ „laufende“ elektromagnetische Kopplungsstärke



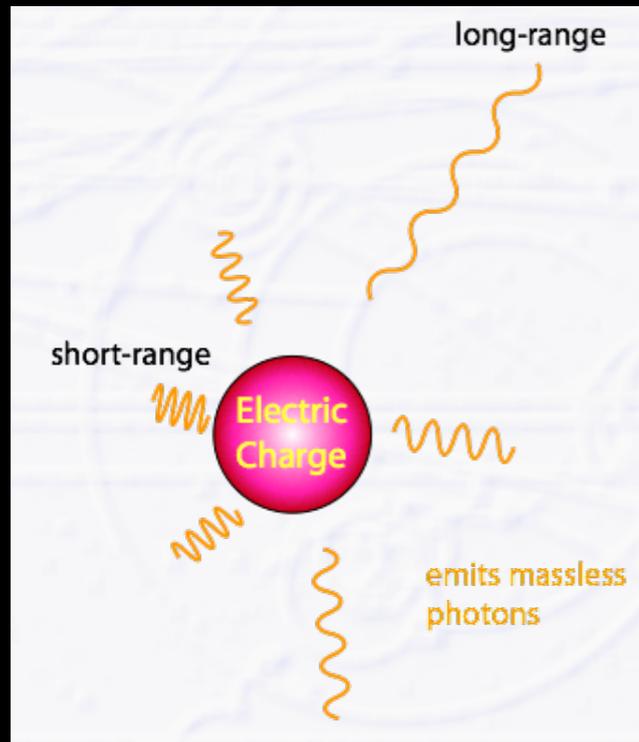
Vakuumfluktuationen - Berechnung?

Feynman, Schwinger,
Tomonoga, Dyson:
1934-1948

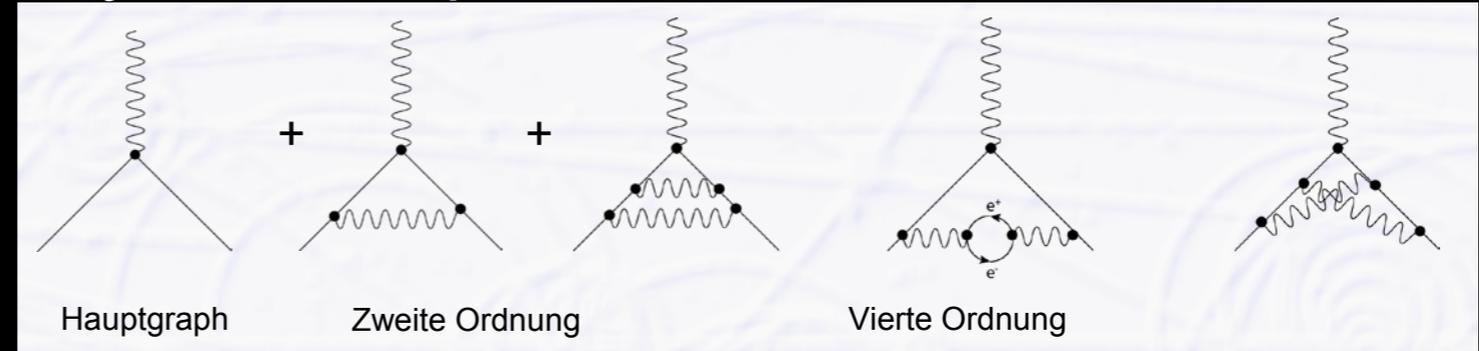
- Wie berechnet man die Interaktion zweier Elektronen?
 - Lösung: **Quantisierung des Elektromagnetischen Feldes** (2. Quantisierung)
 - **Photonen** entsprechen den **Feld-Quanten**
 - Feld-Quanten übertragen Kraft - **Austauschteilchen**
 - **Virtuelle Teilchen**: Nicht beobachtbar (zu kurzlebig)



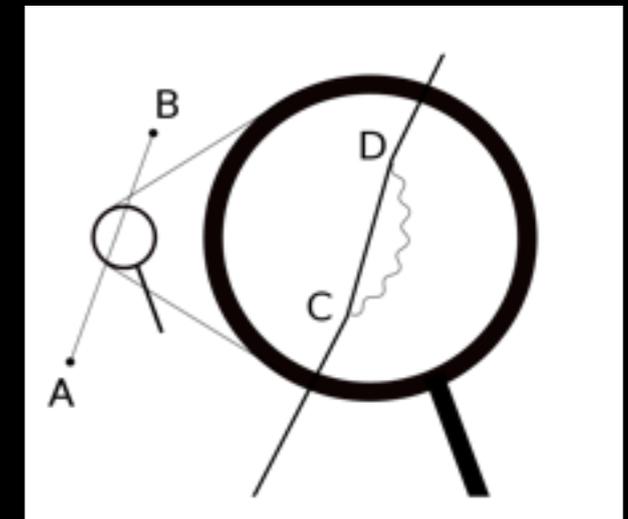
- Virtuelle Teilchen
 - Aber wie viele?



- Feynman Graphen für QED Korrekturen



- Elektron Selbstenergie
 - Wird ∞



- 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!**

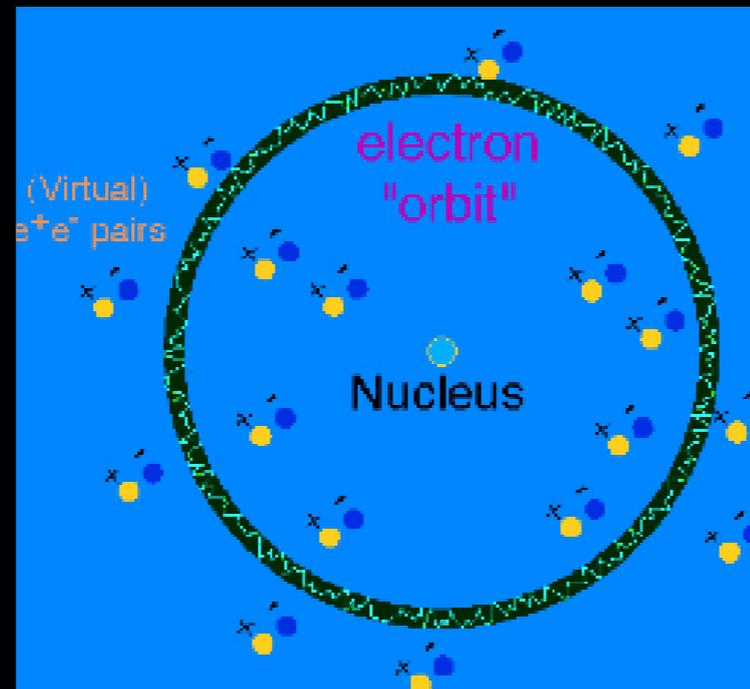
1946

- **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)

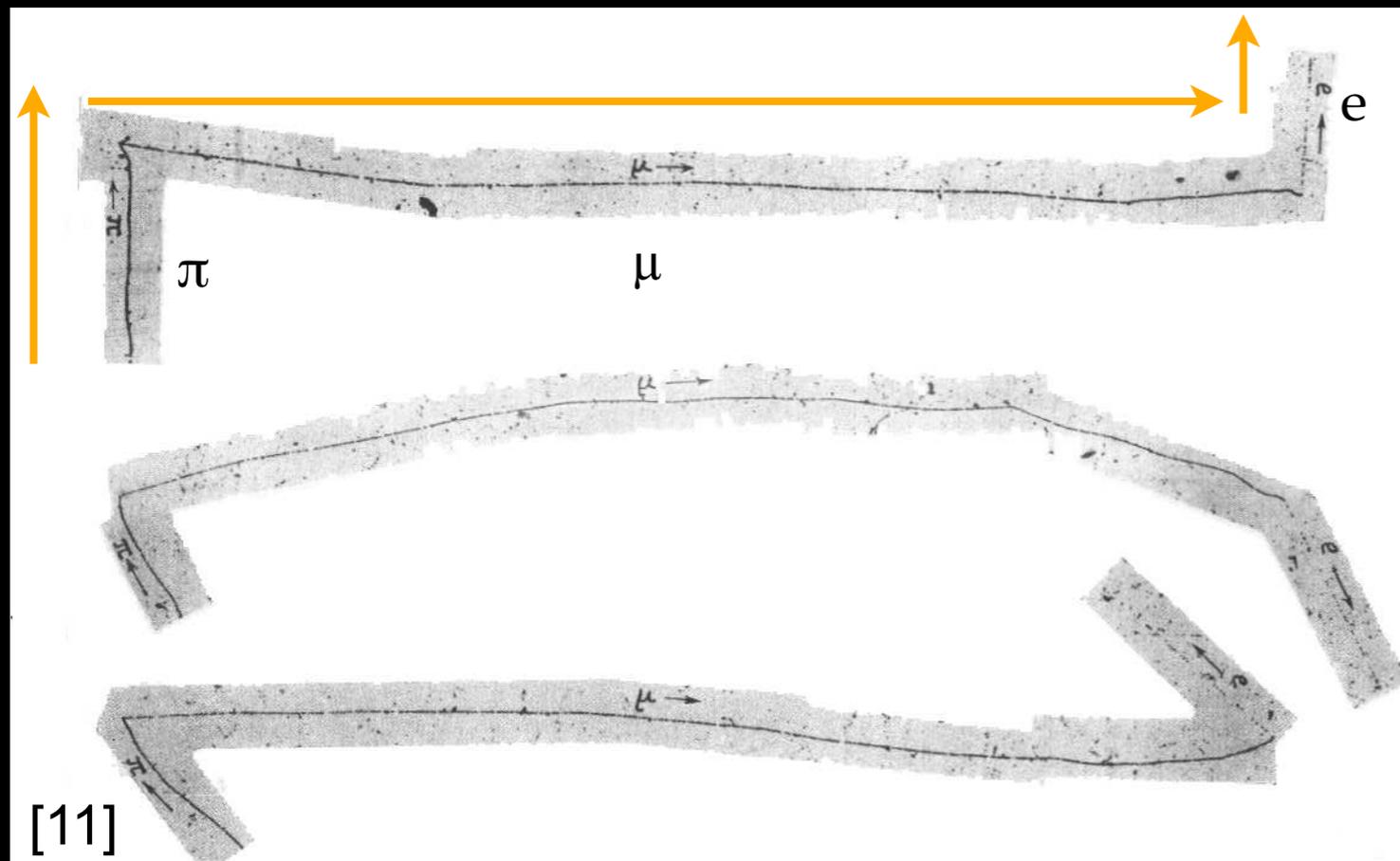
Yukawa: 1935

- 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
- Kräfte: Elektromagnetismus, starke Kernkraft
 - Kraftwirkung durch Austauschteilchen
- Quantenmechanik & Quantenfeldtheorie entwickelt $\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$
- Vollständig Beschrieben: Elektromagnetismus durch QED

Stunde 2

- 1935: Yukawa sagt das **Pion** voraus, als **Austauschteilchen** der starken Kernkraft
 - Masse wurde über Kernradius vorhergesagt: 100 - 200 MeV
- Fieberhafte Suche in der Kosmischen Höhenstrahlung (auf hohen Bergen)
 - Entdeckung 1947 (Powell / Perkins) (auf Pic du Midi / Pyrenäen)
 - Bei dieser Suche wurde auch **μ Entdeckt**
- 1948: Erstmals Pionen an einem **Beschleuniger** Erzeugt
 - Zyklotron in Berkley

Wer sucht - der findet

- Rasante Entwicklung in der Beschleunigertechnik
 - 1938: 80 keV - 1939: 19 MeV - 1946: 195 MeV - 1947: 6 GeV - 1960: 30 GeV
- Entdeckung neuer Teilchen
 - ‚**Resonanzen**‘ im invarianten Massenspektrum der Nachgewiesenen Teilchen

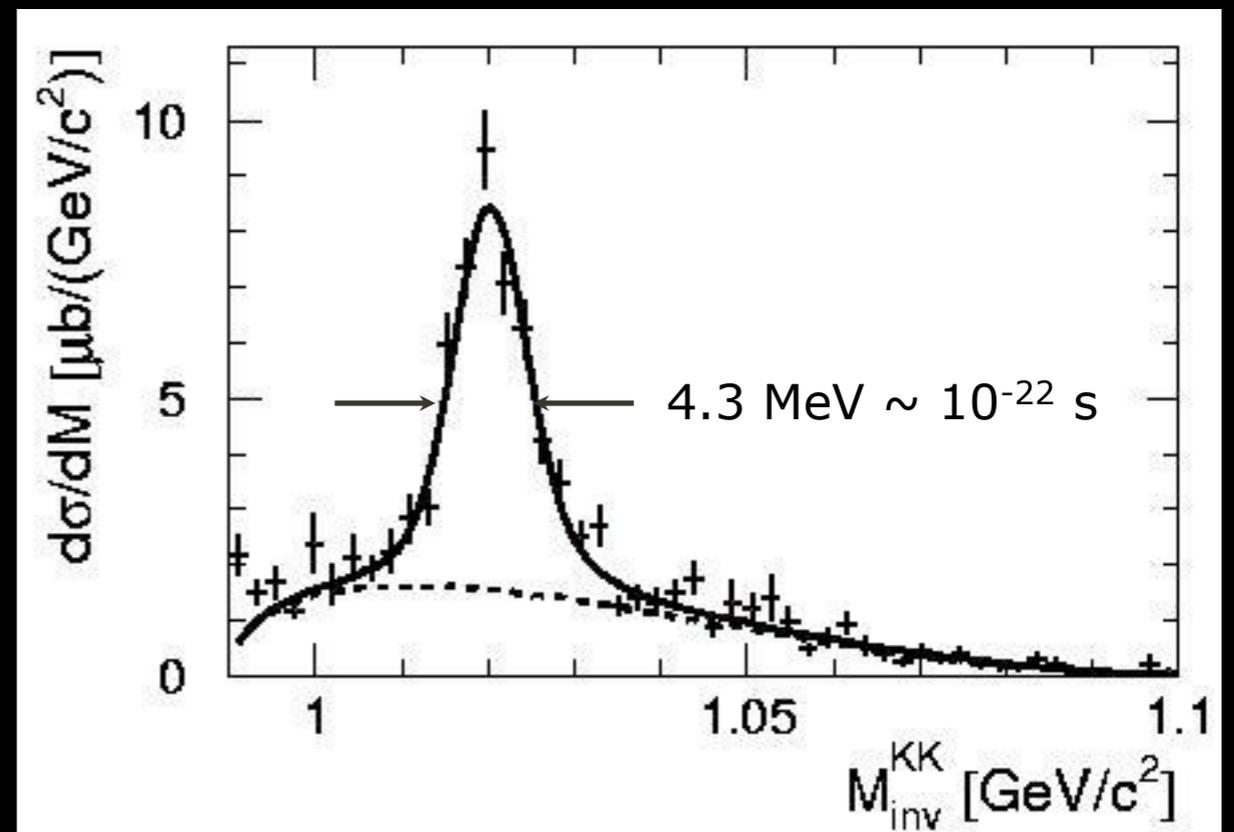
- invariante Masse M:

$$E^2 = (mc^2)^2 + \vec{p}^2 c^2$$

$$(mc^2)^2 = E^2 - \vec{p}^2 c^2$$

$$\rightarrow (Mc^2)^2 = \sum (E)^2 - \left(\sum \vec{p}c \right)^2$$

bleibt im Zerfall erhalten!

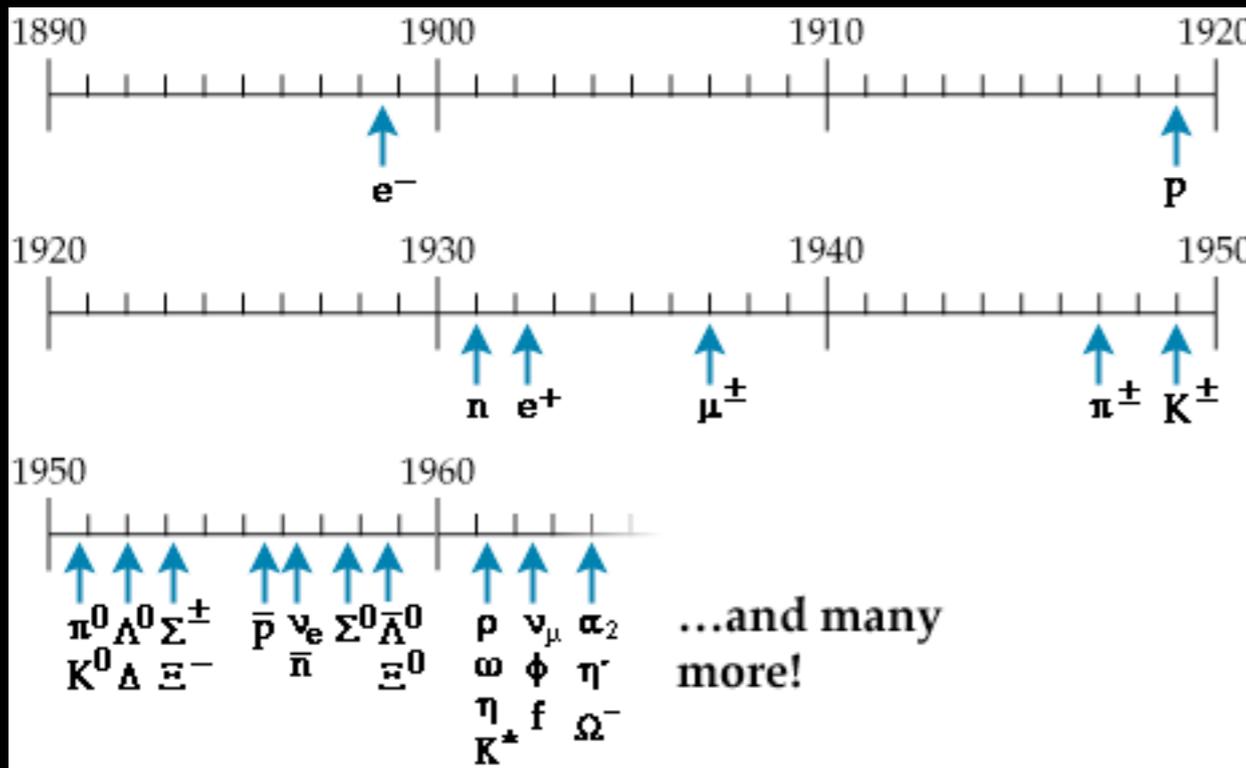


Wer sucht - der findet ... mehr als gewollt



- Rasante Entwicklung in der Beschleunigertechnik
 - 1938: 80 keV - 1939: 19 MeV - 1946: 195 MeV - 1947: 6 GeV - 1960: 30 GeV

- Entdeckung einer Vielzahl neuer Teilchen \Rightarrow „Teilchenzoo“



Baryonen

p^\pm (938.3), n (939.6), $N(1440)$, $N(1520)$, $N(1535)$, $N(1650)$, $N(1675)$, $N(1680)$, $N(1700)$, $N(1710)$, $N(1720)$, $N(1875)$, $N(1900)$, $N(2190)$, $N(2220)$, $N(2250)$, $N(2600)$, $\Delta(1232)$, $\Delta(1600)$, $\Delta(1620)$, $\Delta(1700)$, $\Delta(1905)$, $\Delta(1910)$, $\Delta(1920)$, $\Delta(1930)$, $\Delta(1950)$, $\Delta(2420)$, $\Lambda(1116)$, $\Lambda(1405)$, $\Lambda(1520)$, $\Lambda(1600)$, $\Lambda(1670)$, $\Lambda(1690)$, $\Lambda(1800)$, $\Lambda(1810)$, $\Lambda(1820)$, $\Lambda(1830)$, $\Lambda(1890)$, $\Lambda(2100)$, $\Lambda(2110)$, $\Lambda(2350)$, $\Sigma^+(1189)$, $\Sigma^0(1193)$, $\Sigma^-(1197)$, $\Sigma(1385)$, $\Sigma(1660)$, $\Sigma(1670)$, $\Sigma(1750)$, $\Sigma(1775)$, $\Sigma(1915)$, $\Sigma(1940)$, $\Sigma(2030)$, $\Sigma(2250)$, $\Xi^0(1315)$, ...

Mesonen

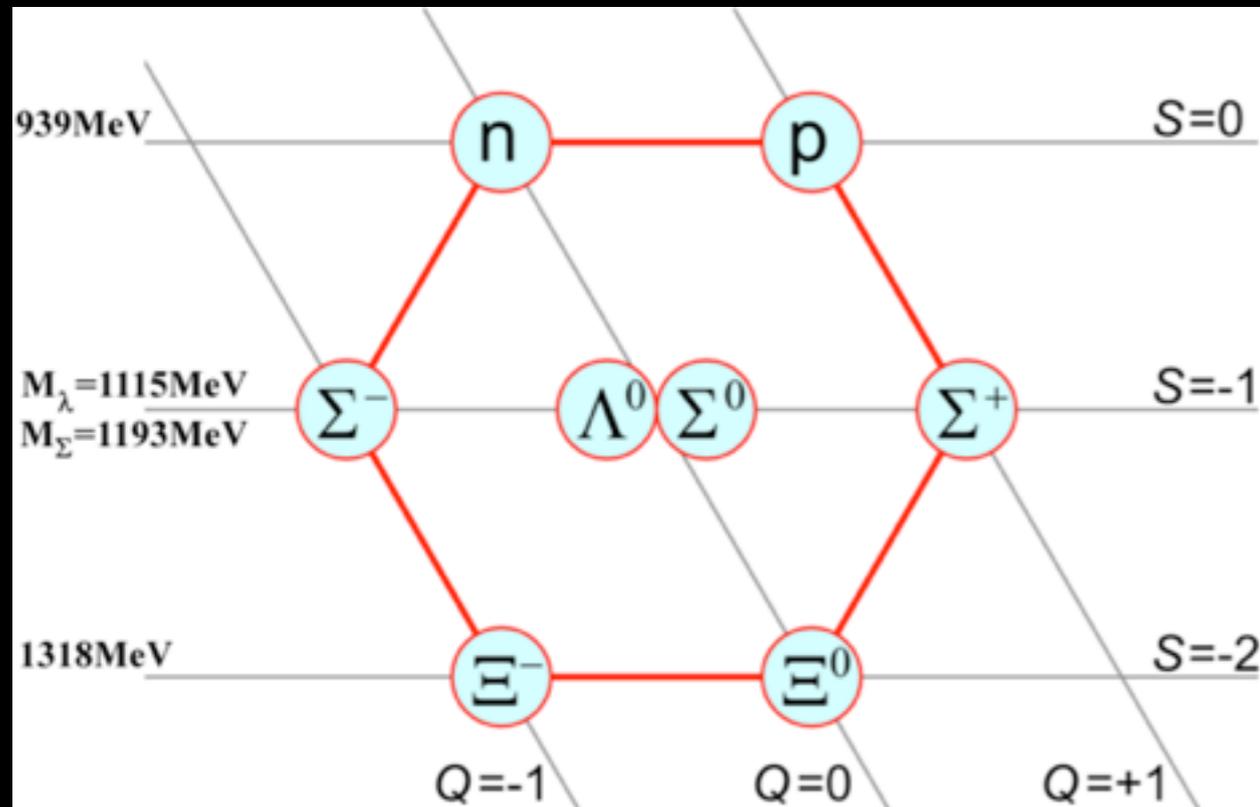
π^\pm (139.6), π^0 (135.0), η (547.9), σ (400-550), ρ (770), ω (782.7), η' (957.8), f_0 (990), a_0 (980), ϕ (1019), h_1 (1170), b_1 (1229), a_1 (1230), f_2 (1275), f_1 (1282), η (1295), π (1300), a_2 (1318), f_0 (1370), π_1 (1400), η (1409), f_1 (1426), ω (1400-1450), a_0 (1474), ρ (1465), η (1476), f_0 (1505), f_2 (1525), π_1 (1662), η_2 (1617), ω (1670), ω_3 (1667), π_2 (1672), ϕ (1680), ρ_3 (1689), ρ (1720), f_0 (1720), π (1812), ϕ_3 (1854), π_2 (1895), f_2 (1944), f_2 (2011), a_4 (1996), f_4 (2018), ϕ (2175), f_2 (2297), f_2 (2339), K^\pm (493.7), K^0 (497.6), K^0_s , K^0_L , K^* (891.7), K_1 (1272), K_1 (1403), K^* (1414), K^*_0 (1425), K^*_2 (1426), K^* (1717), K_2 (1773), K^*_3 (1776), K_2 (1816), K^*_4 (2045), ...

Wie bringt man Ordnung in dieses Chaos?

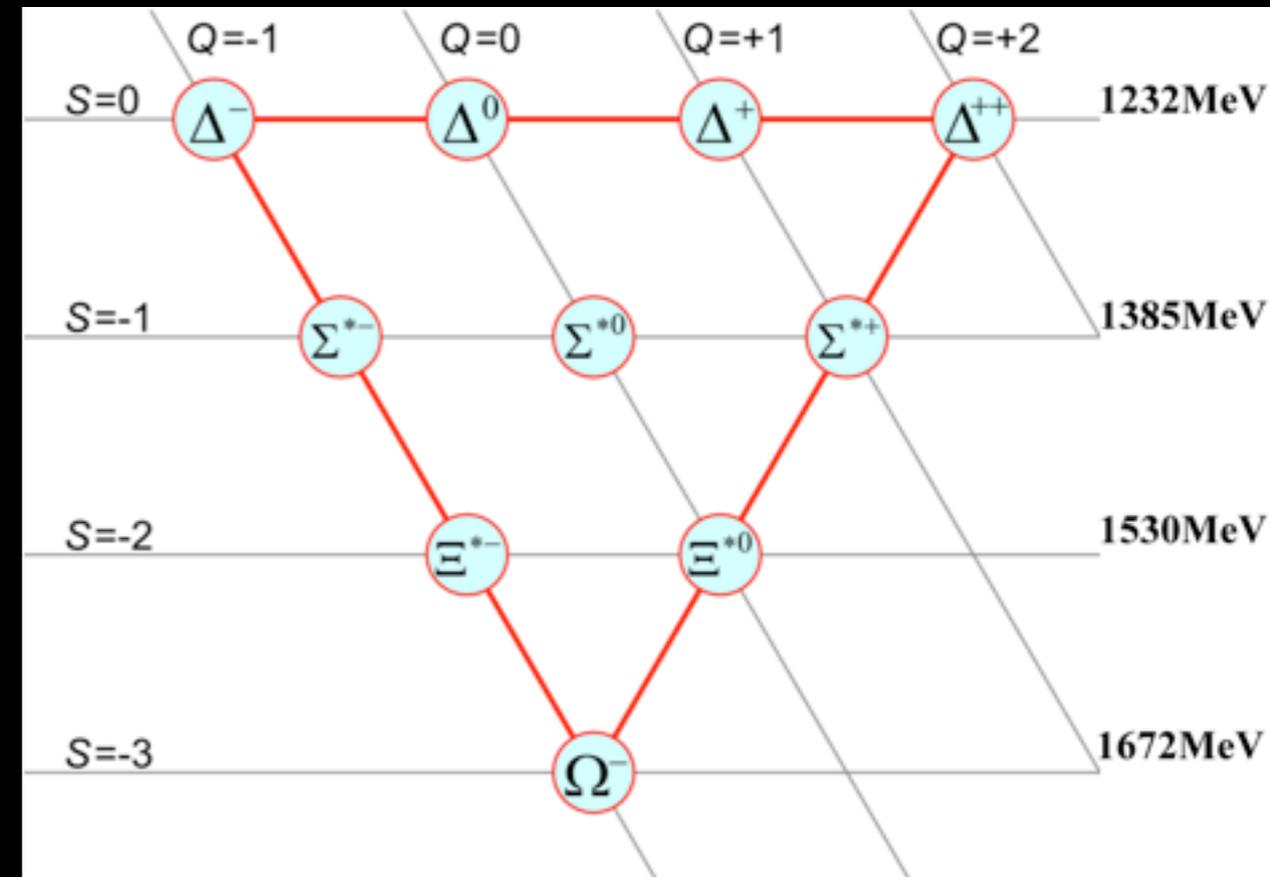
Hadron - Multiplets

- Suche Nach Strukturen:

Spin = 1/2



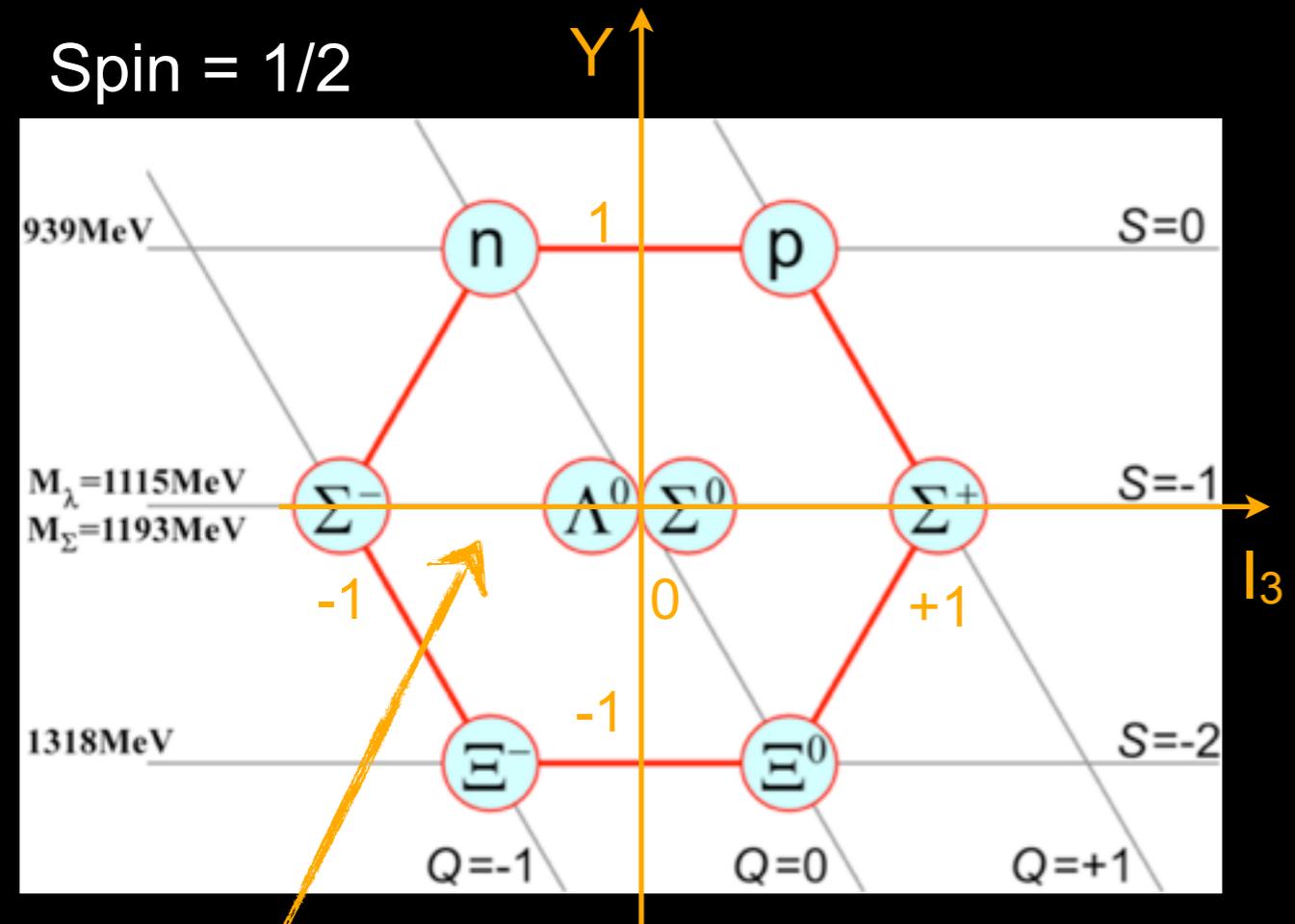
Spin = 3/2



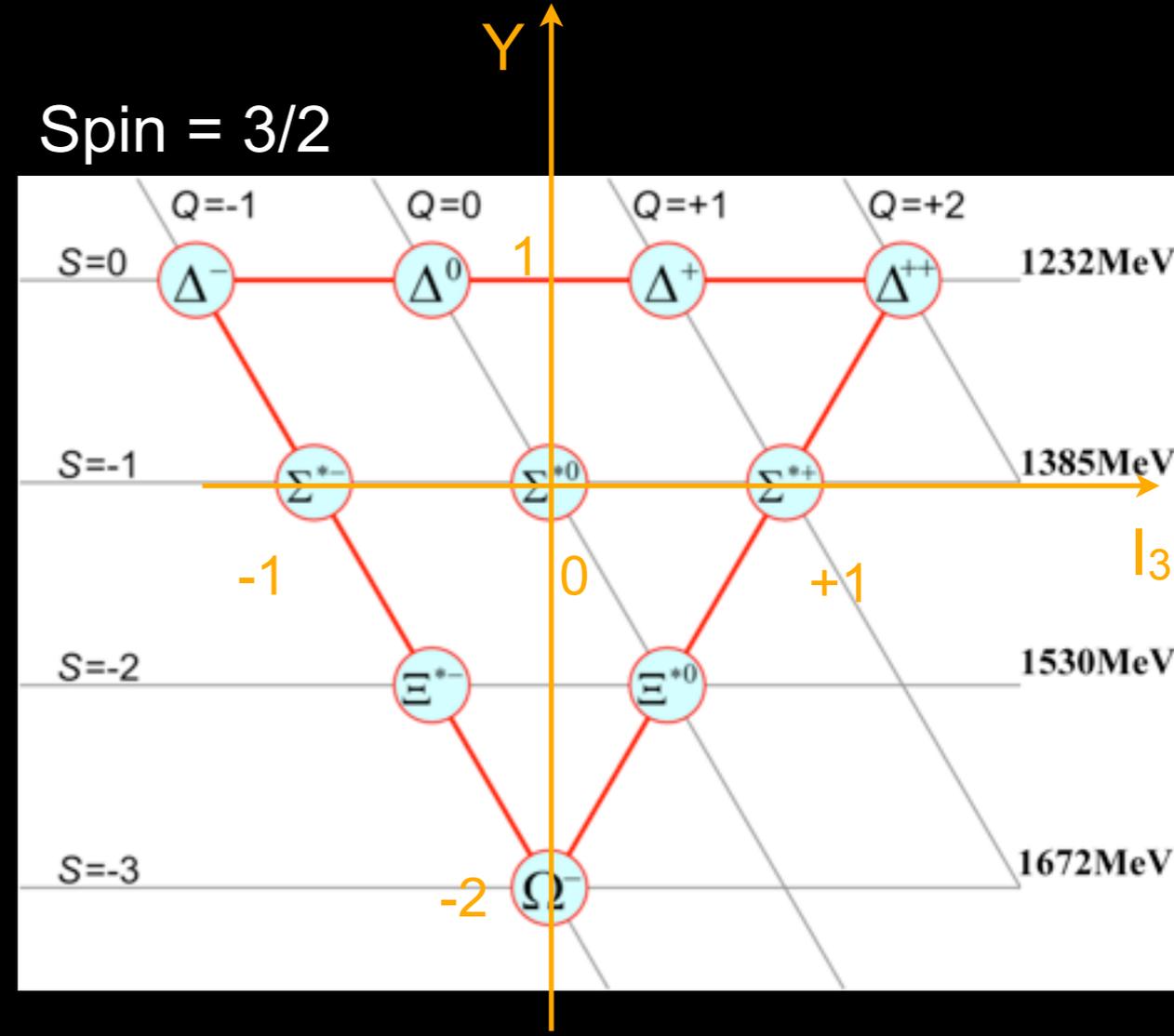
Hadron - Multiplets

- Suche Nach Strukturen:

Spin = 1/2



Spin = 3/2



Isospin:
Symmetrie zwischen p & n:
2 Zustände eines „Teilchens“

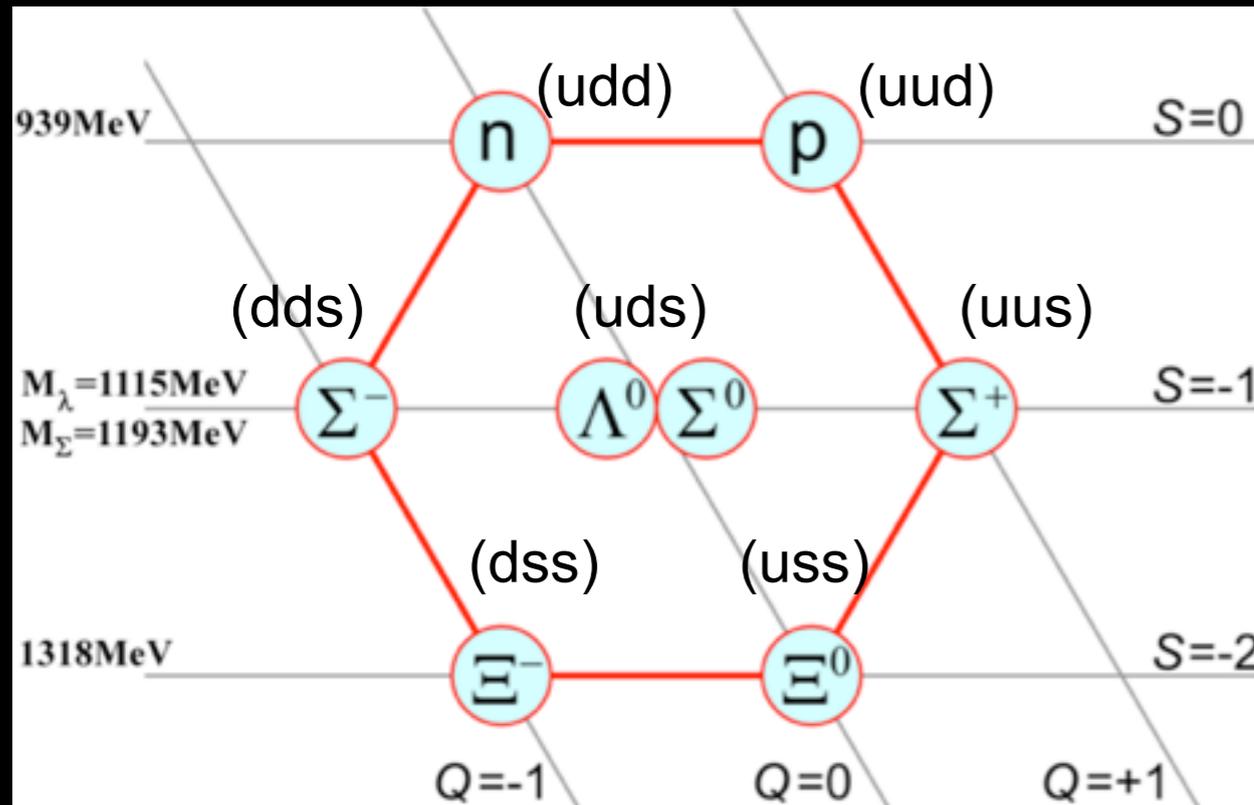
Formal analog zum Spin

Ordnung durch innere Struktur

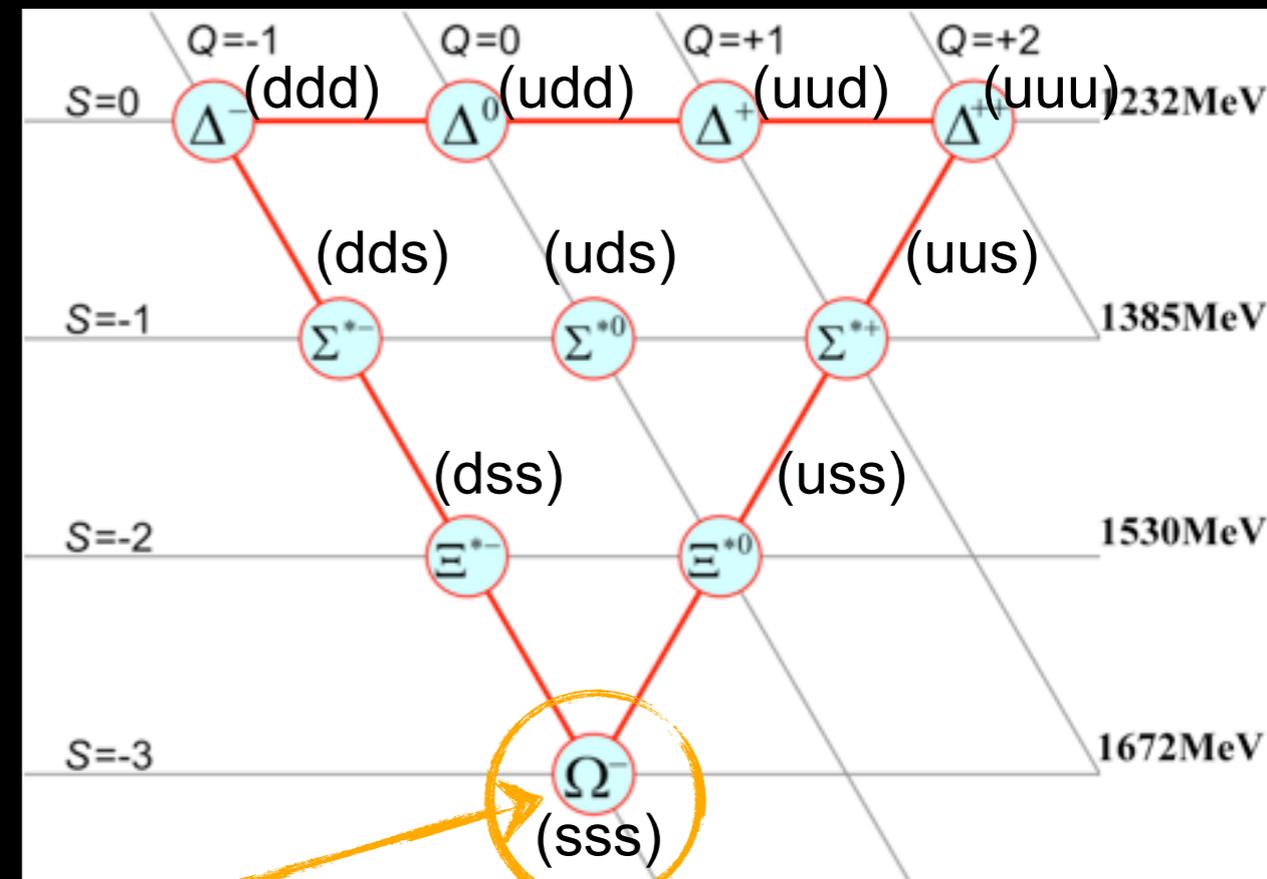
- Postulat:
 - Es gibt **3 fundamentale Teilchen** aus denen alle Hadronen aufgebaut sind (+ Antiteilchen)
 - **Quarks:** up, down, strange

Gell-Mann / Zweig: 1963

Spin = 1/2



Spin = 3/2



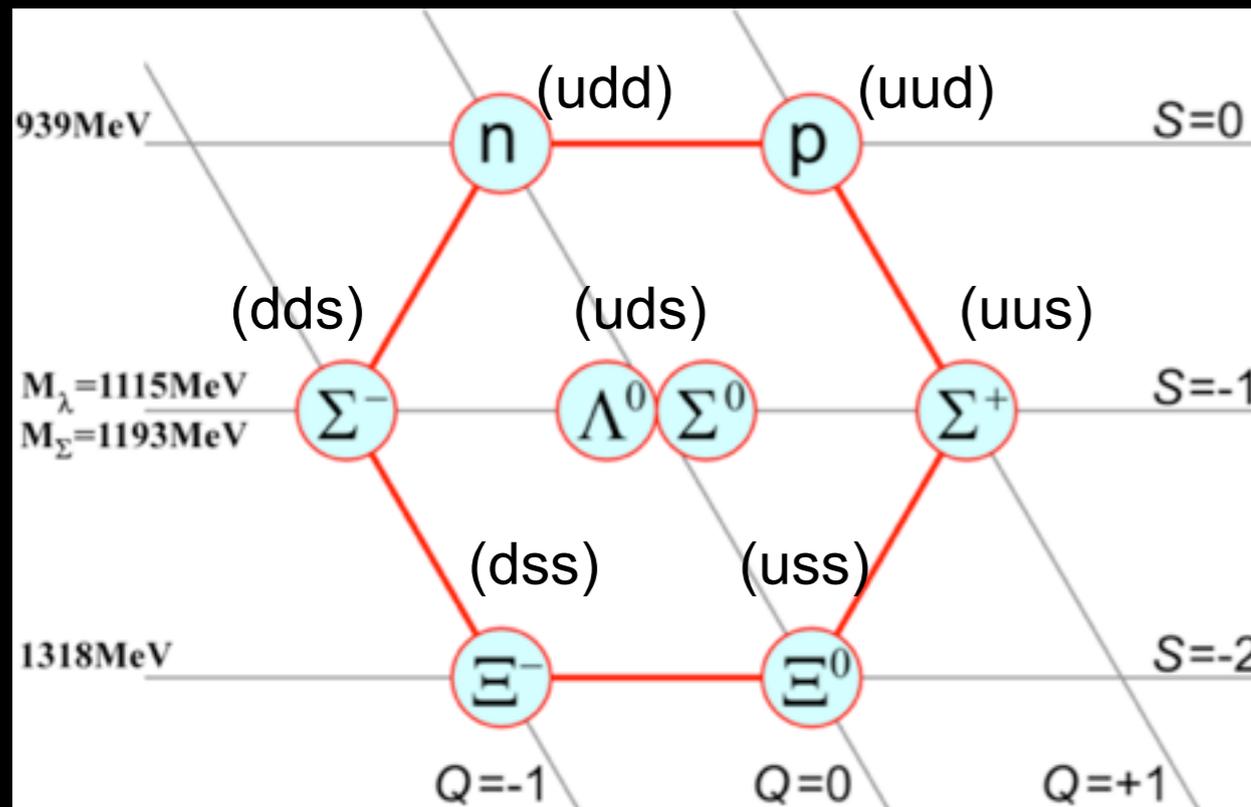
Vorhersage vor Experimenteller
Entdeckung

Ordnung durch innere Struktur

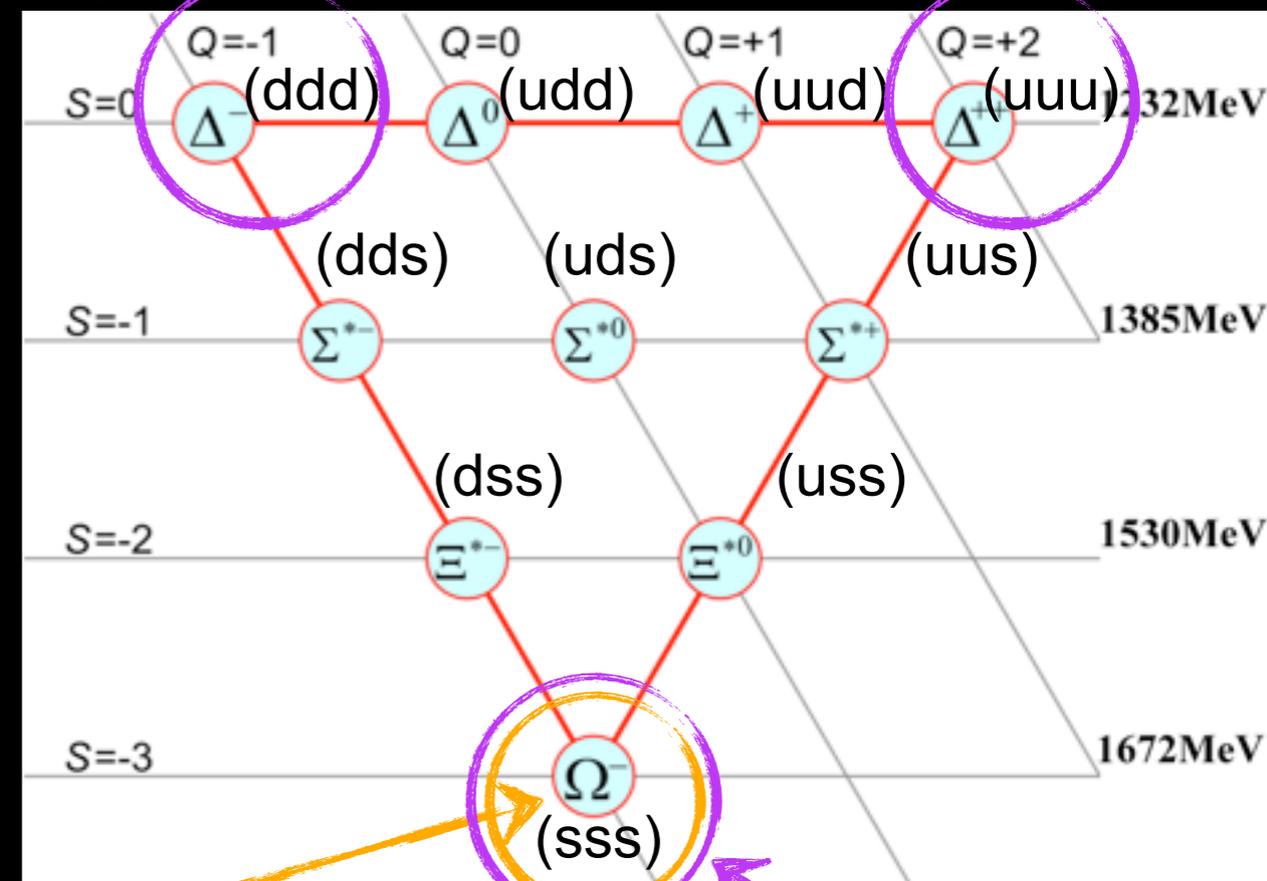
- Postulat:
 - Es gibt **3 fundamentale Teilchen** aus denen alle Hadronen aufgebaut sind (+ Antiteilchen)
 - **Quarks:** up, down, strange

Gell-Mann / Zweig: 1963

Spin = 1/2



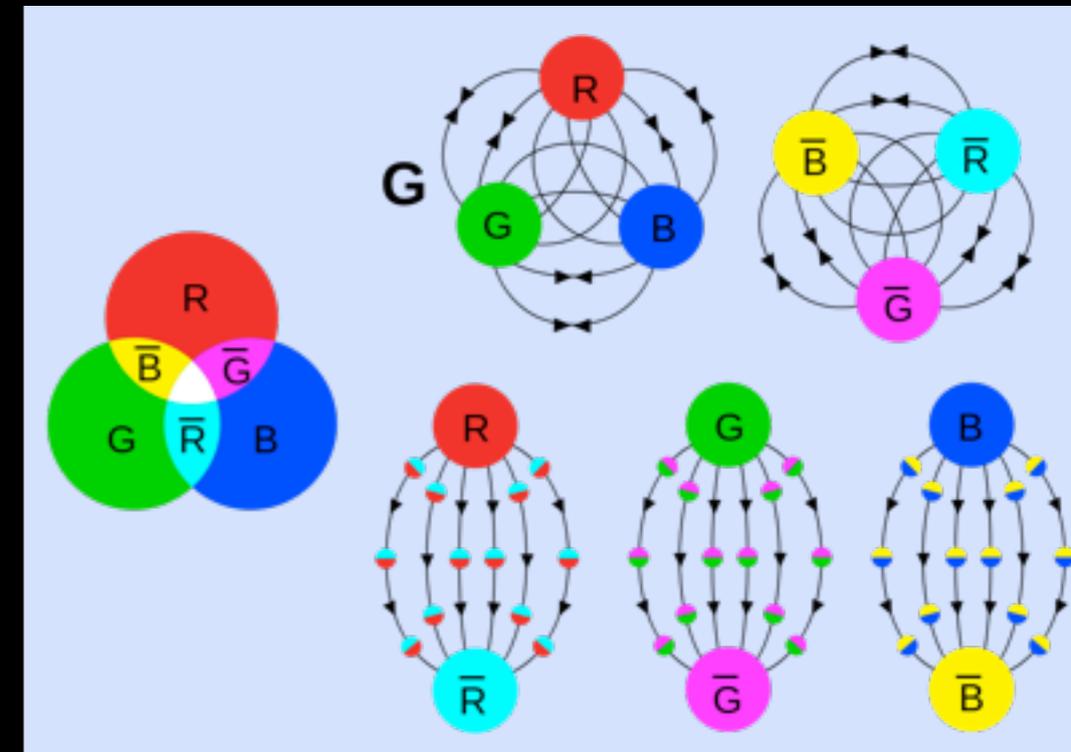
Spin = 3/2



Vorhersage vor Experimenteller Entdeckung

Problem: Verletzt Pauli Prinzip!
3 identische Quarks
⇒ **Farbladung**

- Quarks haben zusätzliche Eigenschaft (auch Quantenzahl / Ladung genannt):
 - **Farbe** - 3 Zustände nötig um Multiplets zu erklären (rot, grün, blau)
 - Farbe = Ladung der ‚starken‘ (Kern-) Kraft
 - Austauscheteilchen: Gluon (masselos)
 - Ändern Farbladung der Quarks
⇒ tragen selbst Farbe (und Anti-Farbe)

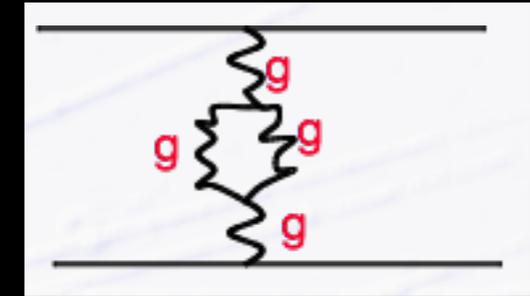


• Dogma der QCD:

- Es existieren nur Farbneutrale Objekte
 - Farbe + Antifarbe (Mesonen)
 - rot + grün + blau (Baryonen)

Glukonen - verflixter Kleber

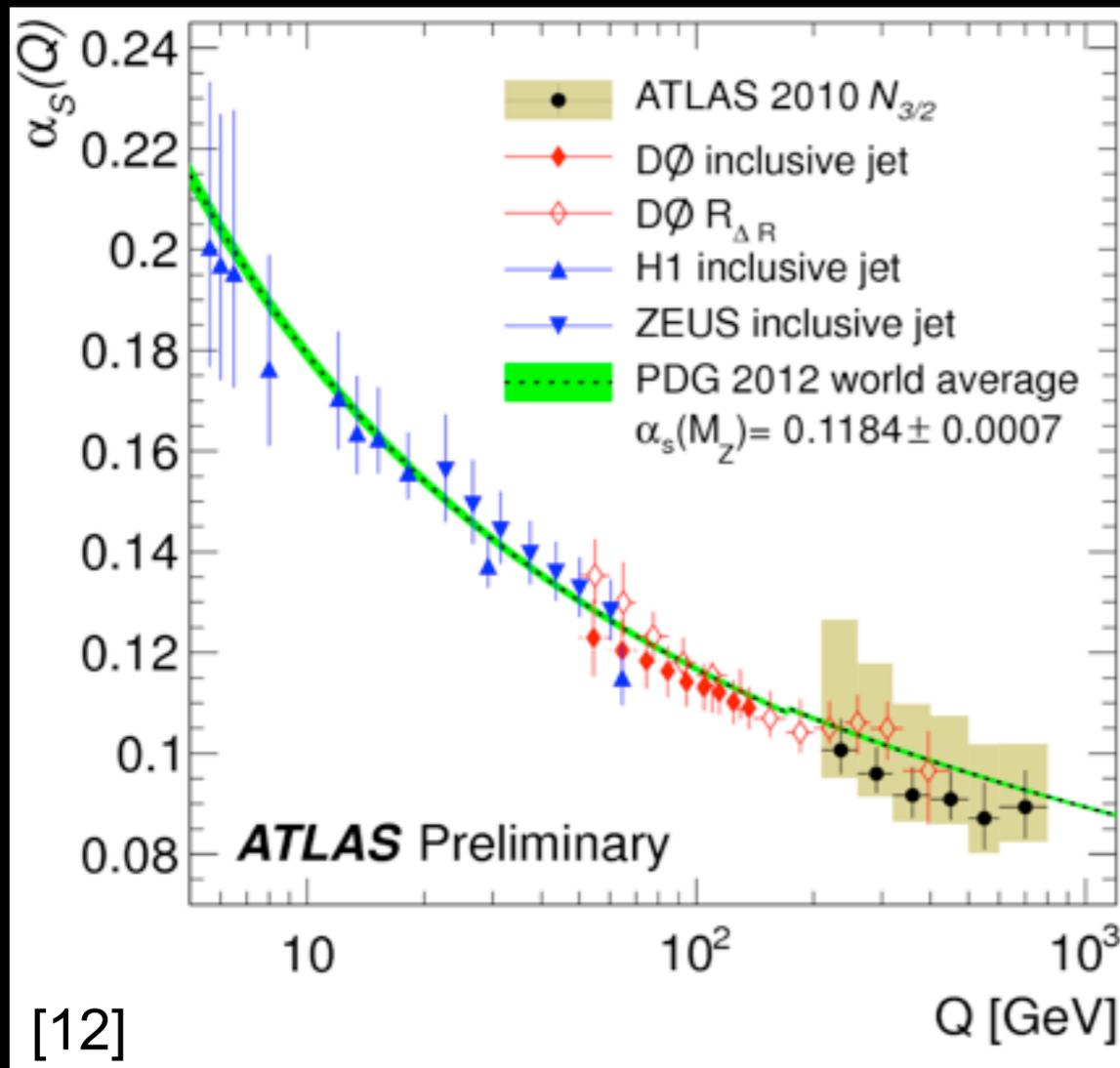
- Glukonen tragen Farbe → können mit sich selbst Wechselwirken



- Fundamentaler Unterschied zur QED

- **Laufende Kopplung:**

- Je **größter die Energie** (= je kleiner der Abstand) desto **kleiner die Kopplung**



[12]

- Sehr kleine Abstände

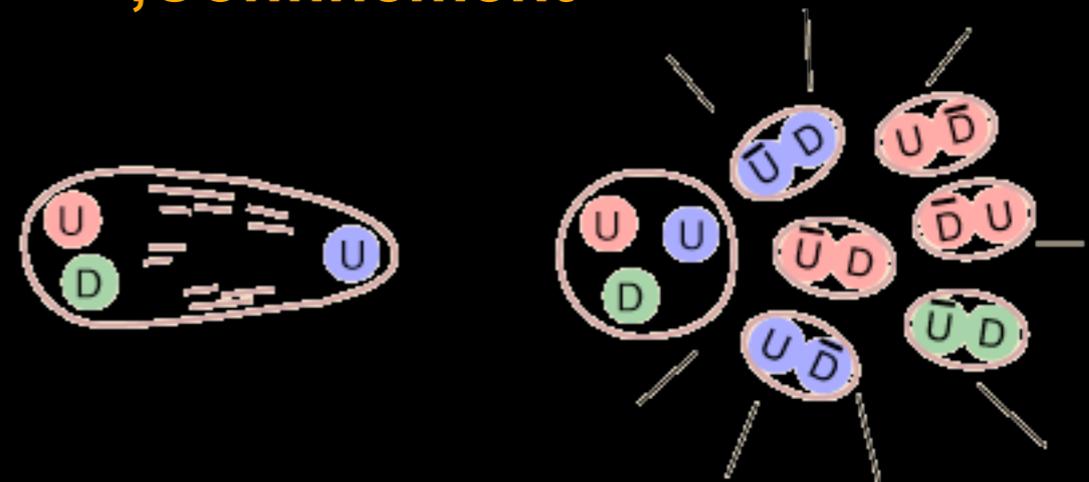
- Quarks spüren nichts voneinander

- **Asymptotische Freiheit**

- große Abstände

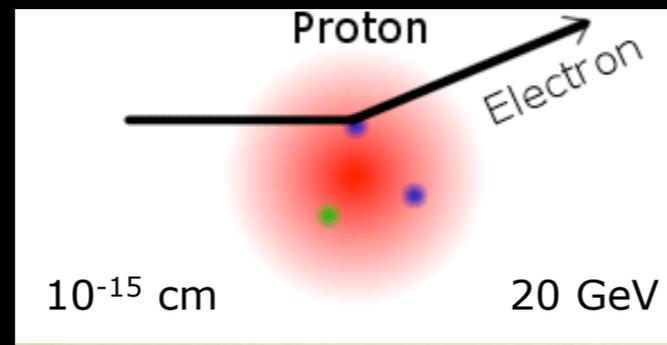
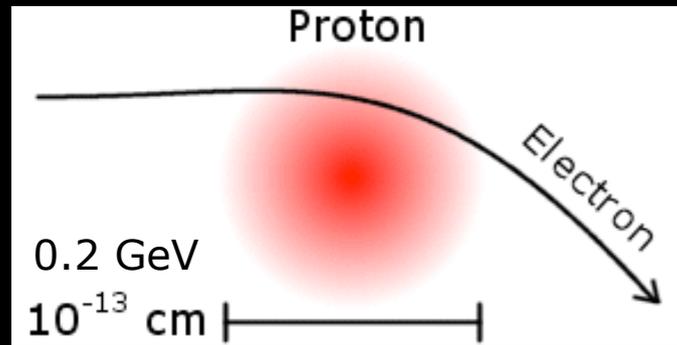
- Kopplung und damit potentielle Energie zwischen zwei quarks nimmt zu! $\sim 1 \text{ GeV}/c^2$ pro fm

- **„Confinement“**



Elektron-Streuung am Proton

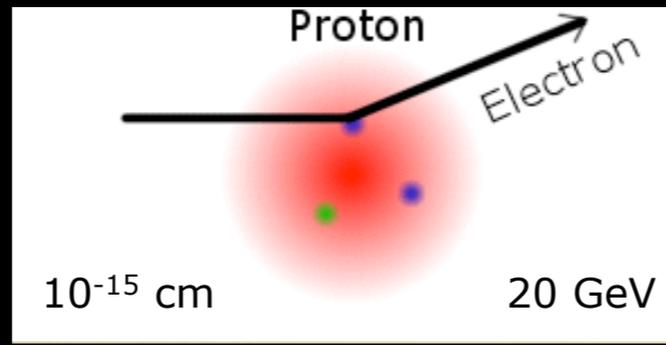
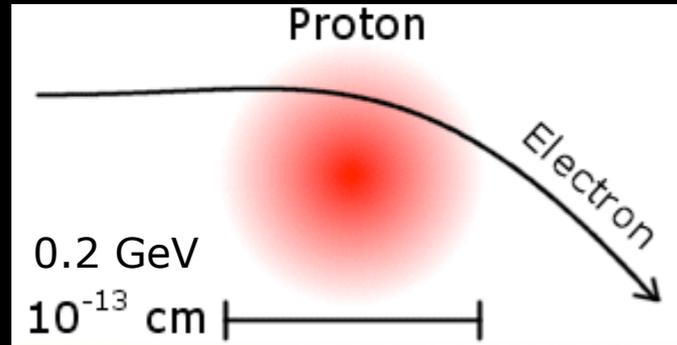
Friedmann, Kendall,
Taylor: 1969



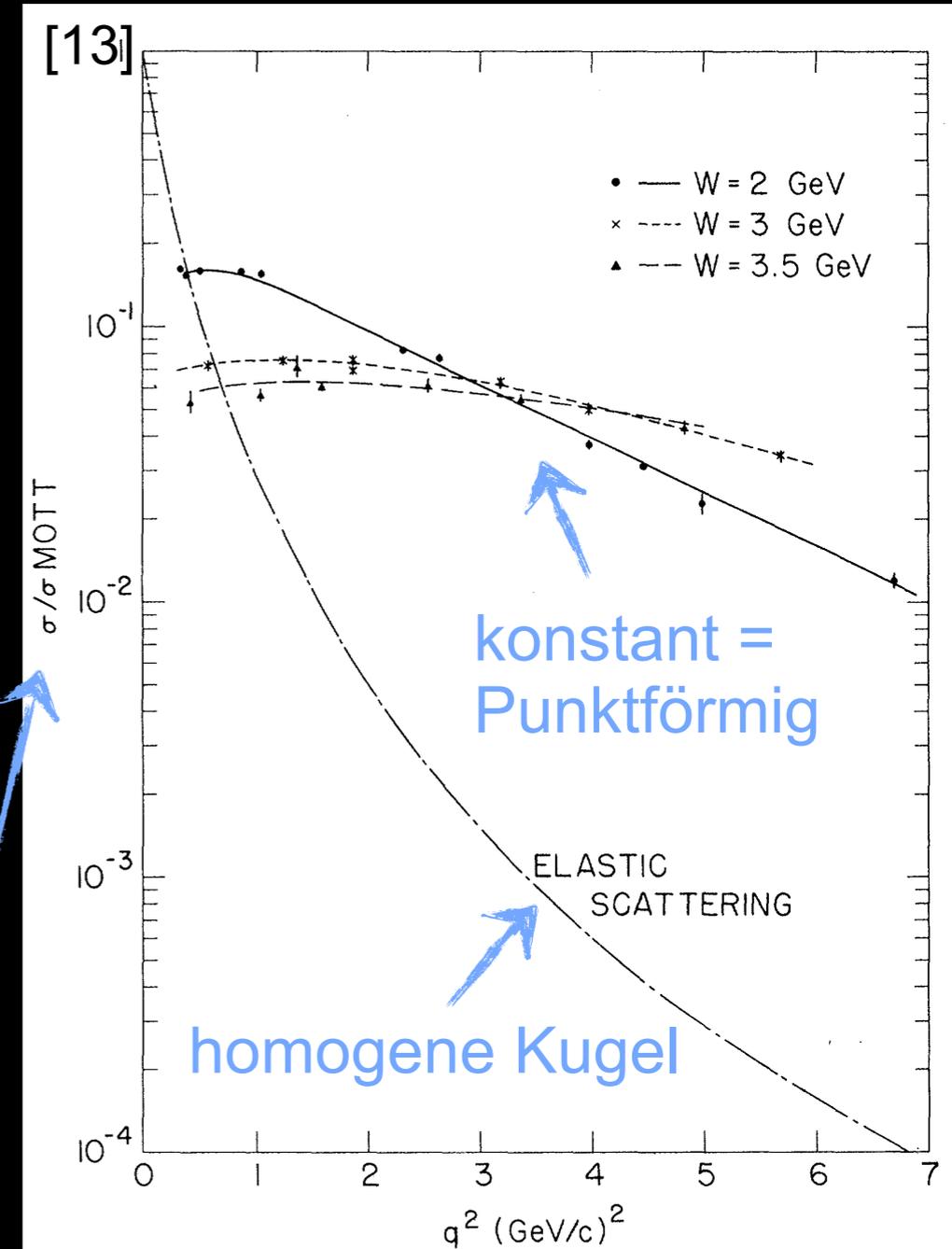
- **Elastische Streuung:**
 - Messung des Proton Radius
- **Inelastische Streuung:**
 - Streuung an Konstituenten
- relativistische Ereignisse
 - Ereignisse charakterisiert durch Impulsübertrag² = q^2 , Anstelle des Streuwinkels
 - $(\Delta E + m_p c^2)^2 = (\Delta \vec{p})^2 c^2 + (m_W c^2)^2$
 - $m_W = m_p$: Elastische Streuung

Elektron-Streuung am Proton

Friedmann, Kendall,
Taylor: 1969



- **Elastische Streuung:**
 - Messung des Proton Radius
- **inelastische Streuung:**
 - Streuung an Konstituenten
- relativistische Ereignisse
 - Ereignisse charakterisiert durch Impulsübertrag² = q^2 , Anstelle des Streuwinkels
 - $(\Delta E + m_p c^2)^2 = (\Delta \vec{p})^2 c^2 + (m_W c^2)^2$
 - $m_W = m_p$: Elastische Streuung

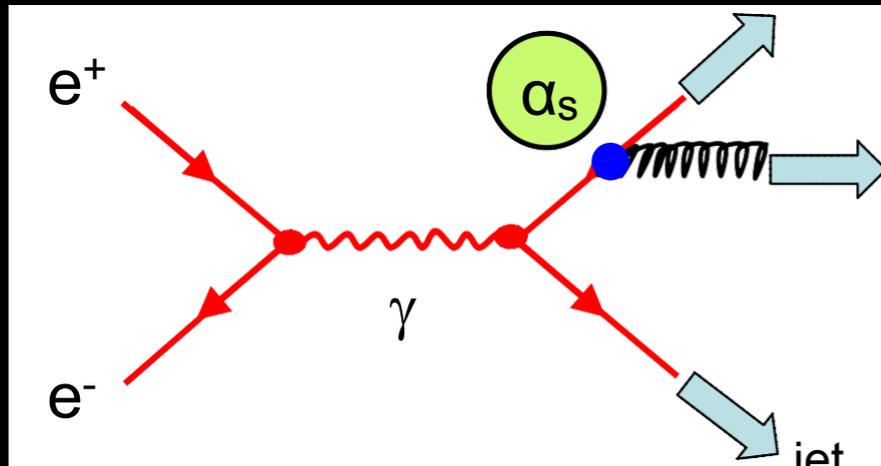


Formfaktor F

Entdeckung des Gluons

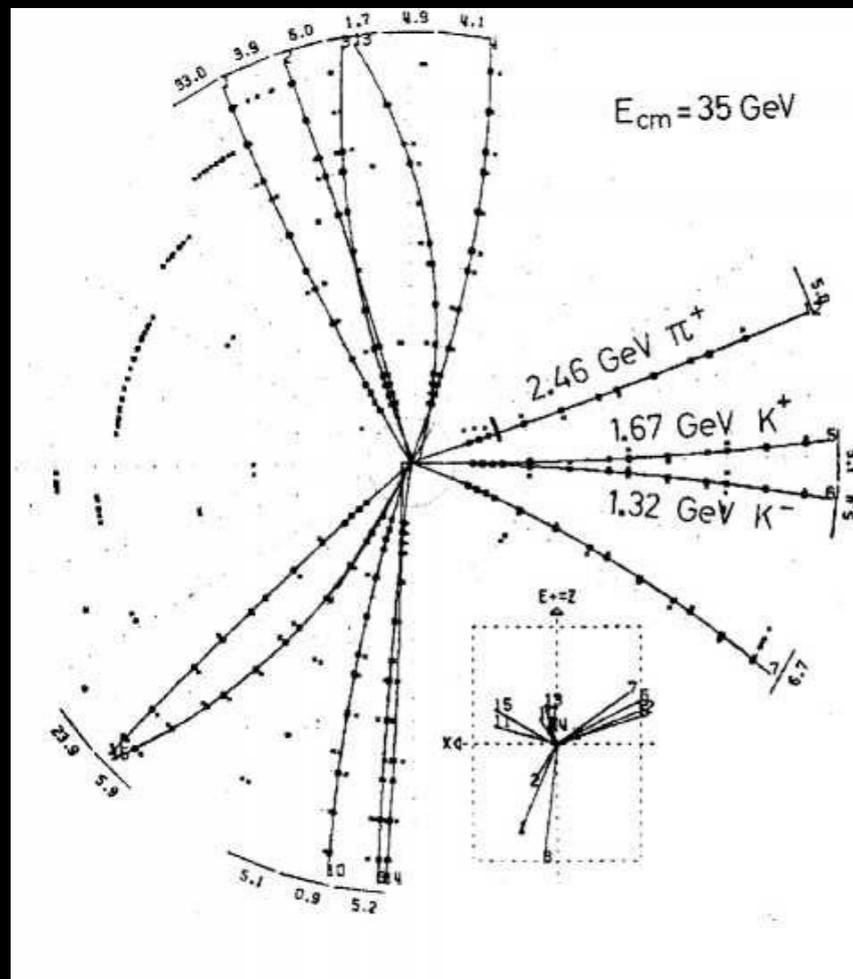
Desy (Petra): 1979

- Erzeugung von Quark - Antiquark Paaren
 - 3ter „jet“ durch Gluonstrahlung



- Bestimmung der Kopplungskonstanten:

$$\alpha_s \sim \frac{\# \text{ 3 jet events}}{\# \text{ 2 jet events}}$$

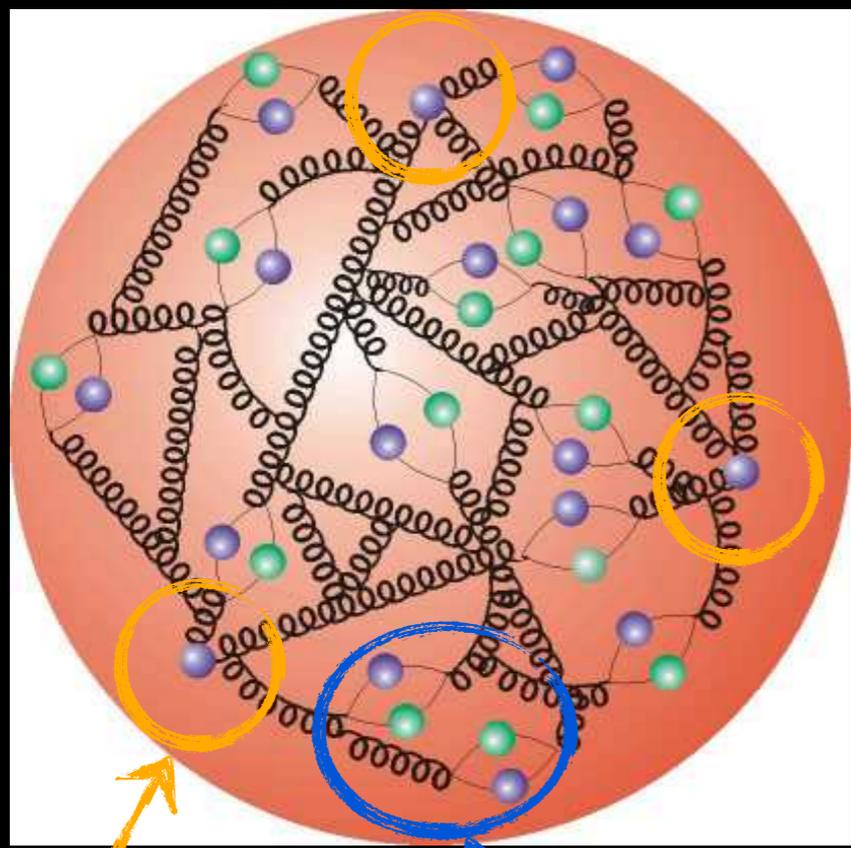


- Experimente am Petra e+e- Beschleuniger am **DESY**
 - Experimente TASSO, Pluto, Mark-J, JADE

Das Proton - heute



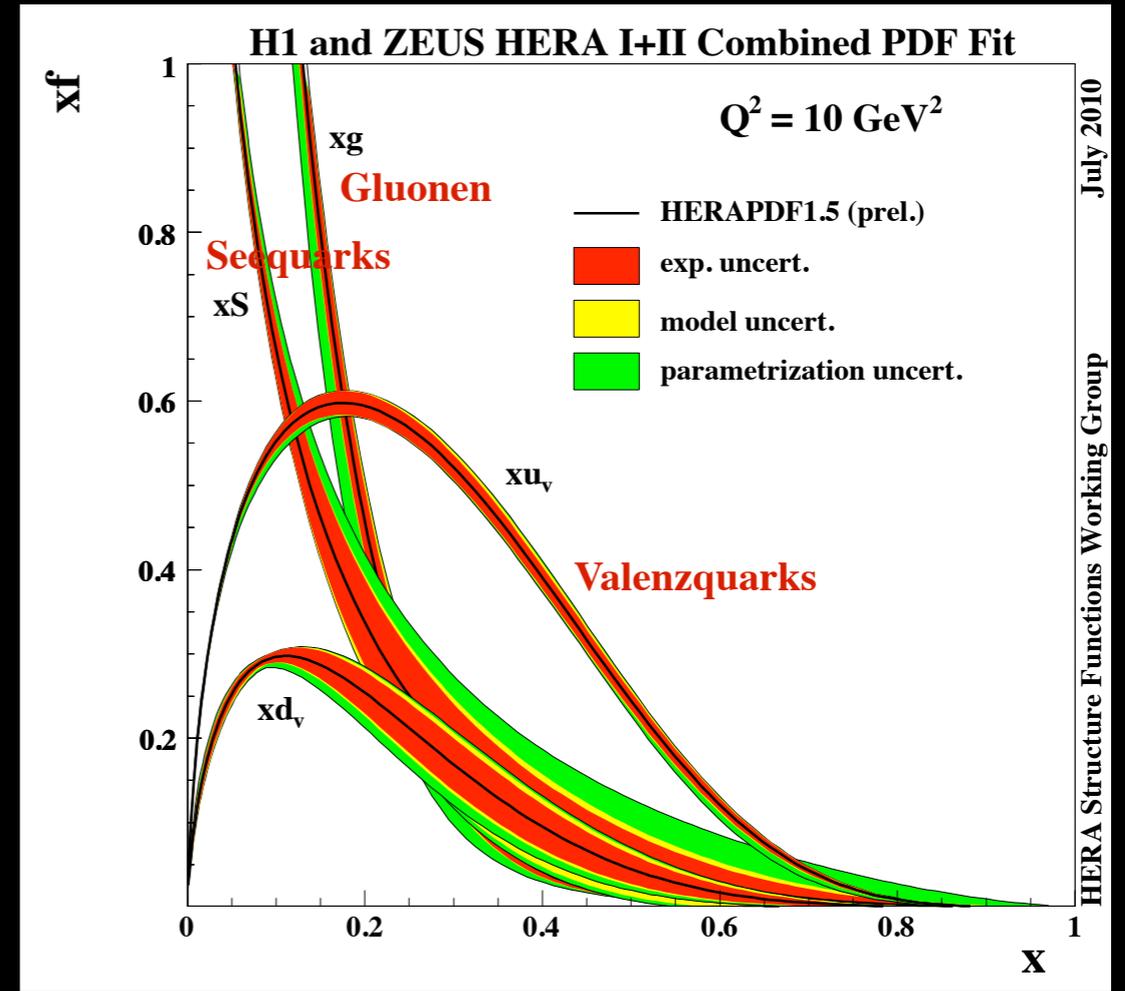
- Komplexes Viel-Teilchen System
 - Quarks, Antiquarks, Gluonen



Valenzquarks
(uud)

Seequarks
Quark-Antiquark Paare

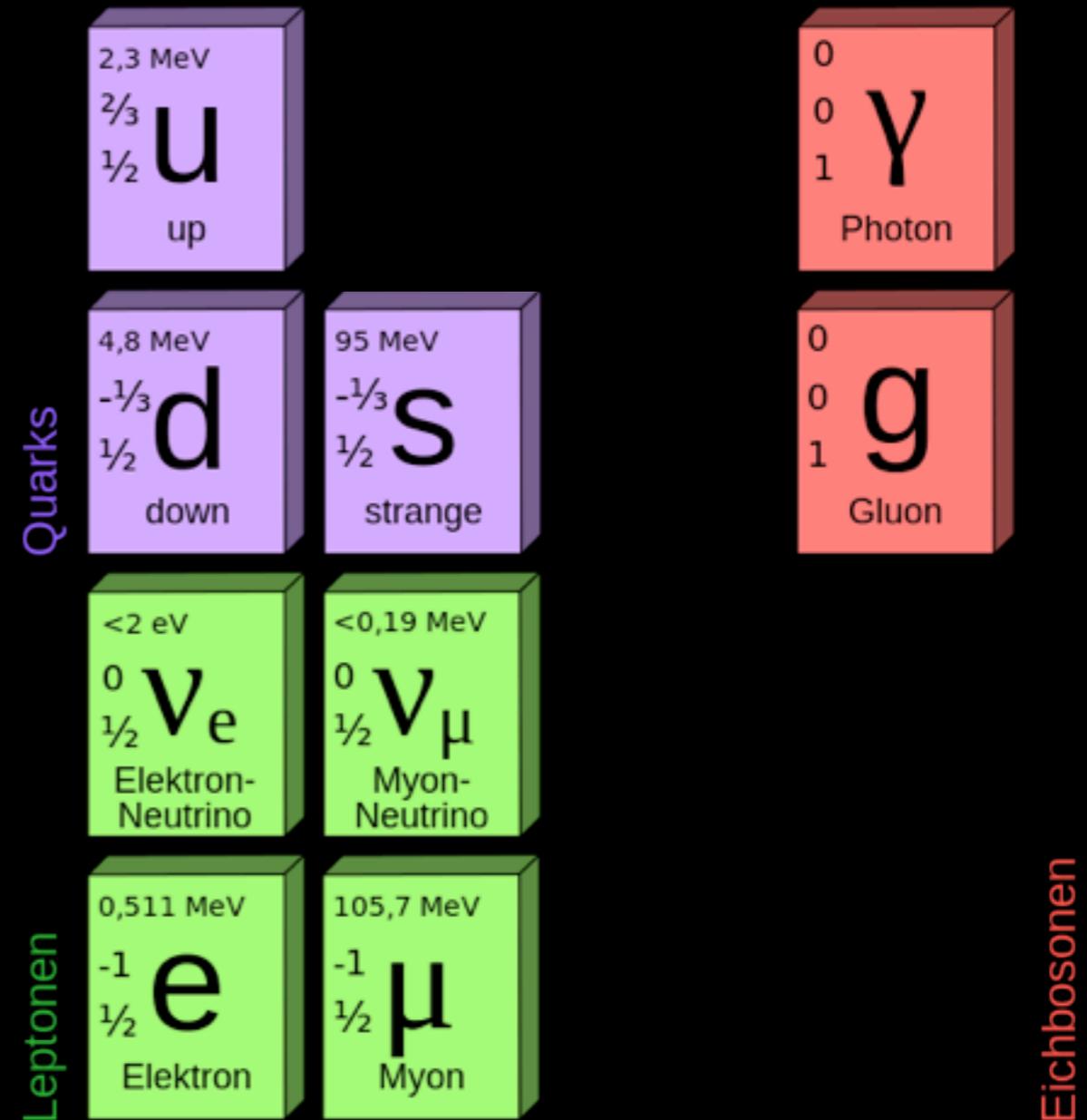
- Hochenergetische Kollisionen:
 - Kollision einzelner ‚Partonen‘
 - Welchen Impuls Tragen die Partonen?
 - ▶ PDFs (Parton density function)



x: Impulsanteil des Partons am Proton
(Björken x)

• Elementare Teilchen

- Bausteine der Materie
 - Fermionen ($S=1/2$)
- Überträger der Kräfte
 - Bosonen ($S=1$)

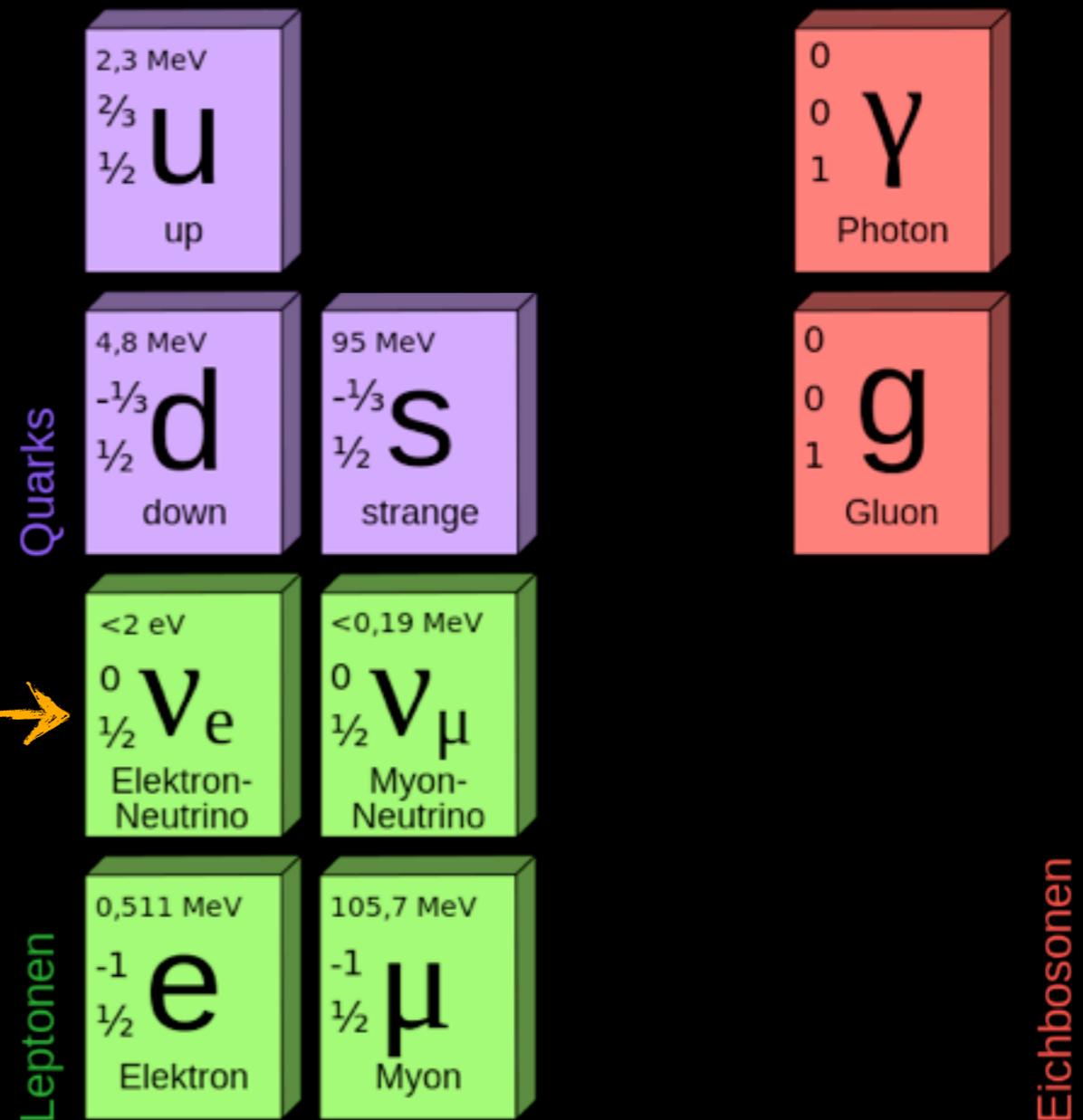


Was wir bisher kennengelernt haben

• Elementare Teilchen

- Bausteine der Materie
 - Fermionen ($S=1/2$)
- Überträger der Kräfte
 - Bosonen ($S=1$)

Neutrinos bisher vernachlässigt



Schwache Wechselwirkung

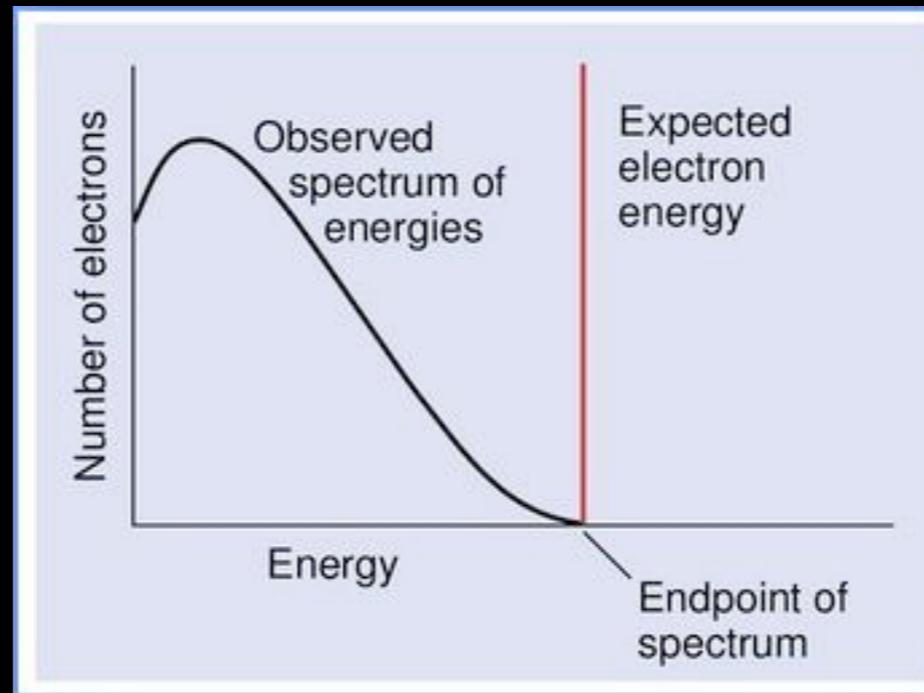
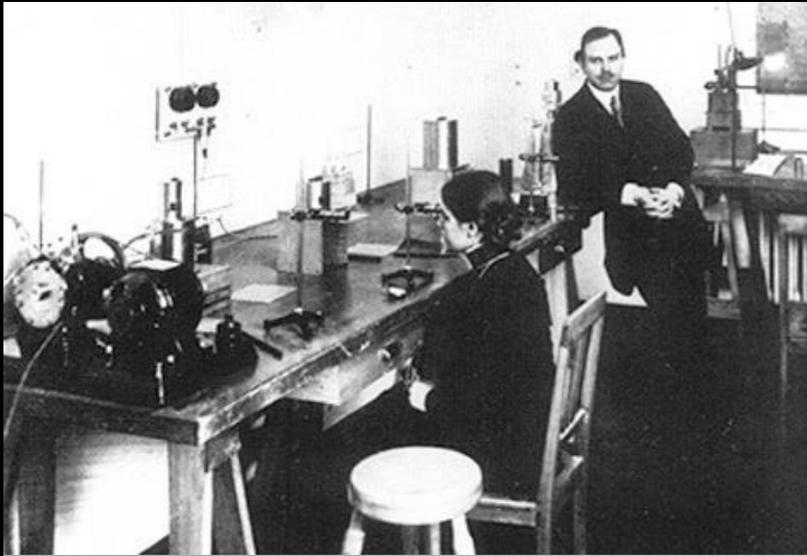
- **Zurück zum Anfang des 20. Jahrhunderts**
 - 1895: Wilhelm Röntgen entdeckt Röntgenstrahlung
 - 1896: Henri Becquerel entdeckt Strahlung von Urankristallen
 - 1898: Marie und Pierre Curie: Strahlung von Pechblende (U + Polonium)
- **Dauerte 35 Jahre um diese Phänomene grob zu Verstehen**

β -Zerfall

- β - Zerfall von Atomkernen

Beobachtet: $A_Z \rightarrow A_{Z+1} + e^-$

Meitner, Hahn: 1911



- Verletzung der Energieerhaltung?

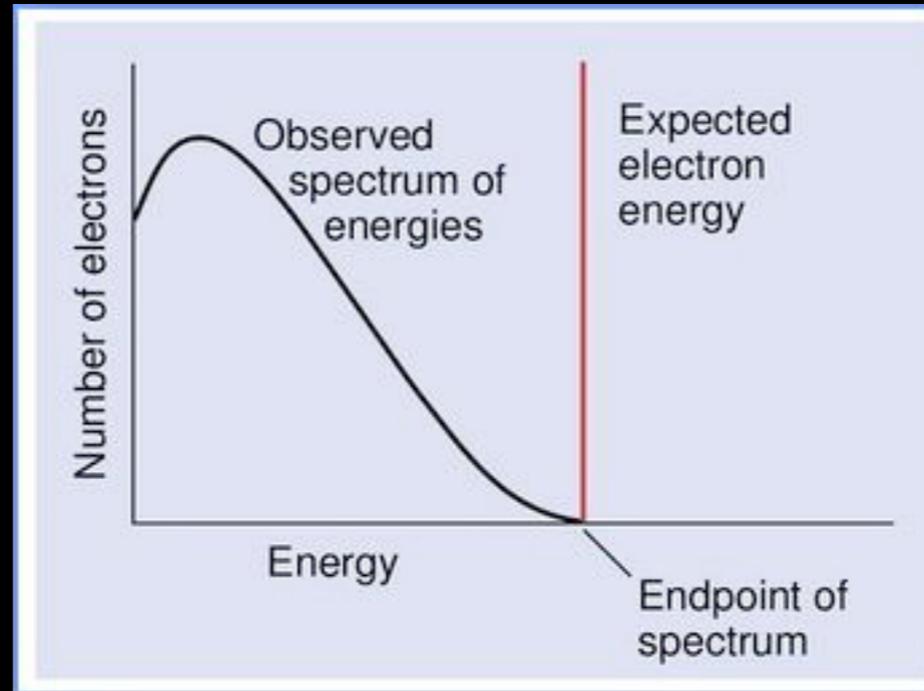
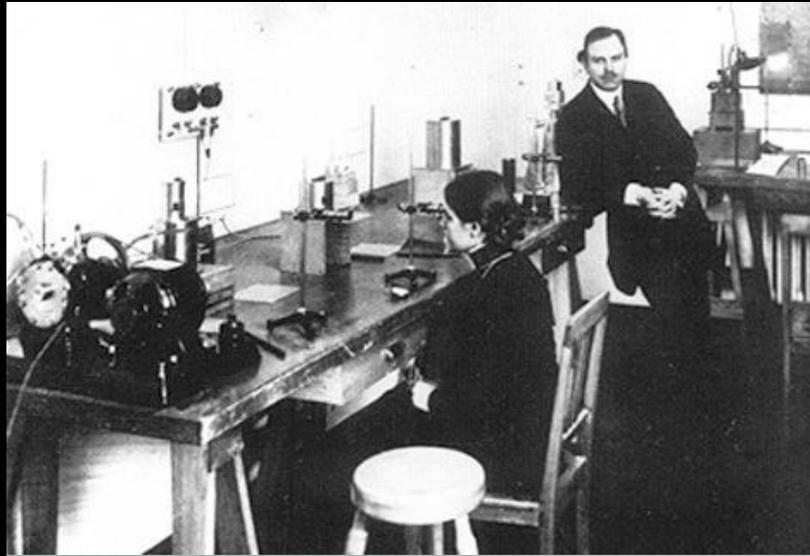
Pauli: 1930

β -Zerfall

- β - Zerfall von Atomkernen

Meitner, Hahn: 1911

Beobachtet: $A_Z \rightarrow A_{Z+1} + e^-$



- **Verletzung der Energieerhaltung?**

Pauli: 1930

- Lösung: zusätzliches sehr leichtes Teilchen in Zerfall erzeugt

Postulat: $A_Z \rightarrow A_{Z+1} + e^- + \bar{\nu}$

Neutrino (kleines Neutron)
Nachweis erst 1956.

- Beobachtungen:

Fermi: 1934

- Umwandlung von Materie Teilchen
- Schwach (Lange Lebensdauer im Vergleich zu EM Zerfällen)
- Kurz-Reichweitig

⇒ **neue Wechselwirkung!** (1934 nur Gravitation & EM bekannt)

n

p⁺

e⁻

- **Beobachtungen:**

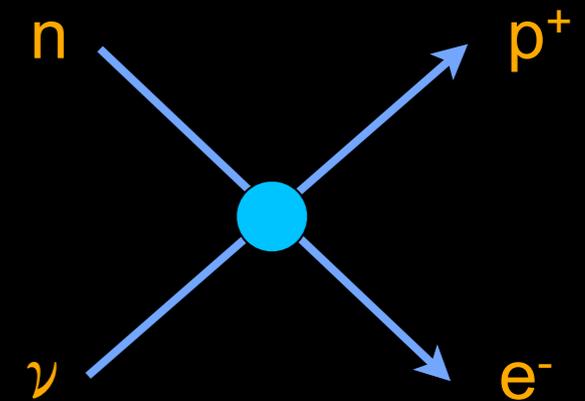
- Umwandlung von Materie Teilchen
- Schwach (Lange Lebensdauer im Vergleich zu EM Zerfällen)
- Kurz-Reichweitig

Fermi: 1934

⇒ **neue Wechselwirkung!** (1934 nur Gravitation & EM bekannt)

- **Phänomenologische Erklärung von Enrico Fermi:**

- Punktförmige Wechselwirkung von 4 Teilchen
- Schwach: G_F 10^{-5} relativ zur EM WW
- Analogie zu 2 Teilchenströmen: p, n / e, ν

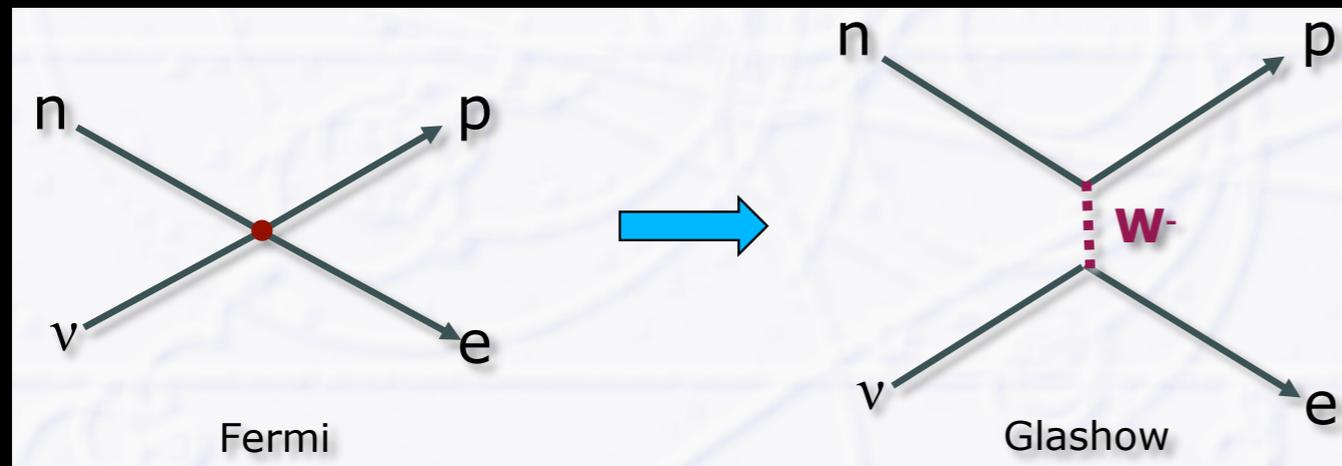


⇒ Berechnung von β - Zerfällen & Wechselwirkungswahrscheinlichkeiten möglich

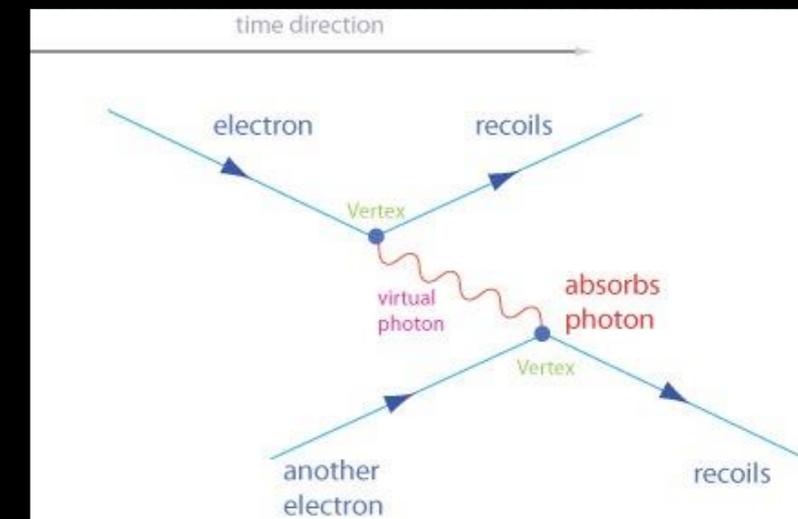
- Großes Problem in ~ 1950
 - Streuquerschnitt für $p + \nu \sim (G_F E_\nu)$
 - **Verletzt Unitarität** für $E > 300 \text{ GeV}$ (Wahrscheinlichkeit > 1)

Glashow: 1958

- Lösungsansatz:
 - Schwache Wechselwirkung durch schweres Austauschteilchen übertragen
 - (Photon bereits als Austauschteilchen bekannt)



Elektron Streuung



- Große Masse des W - Teilchens erklärt kurze Reichweite ($\sim 10^{-18} \text{ m}$) und kleine Wechselwirkungswahrscheinlichkeit

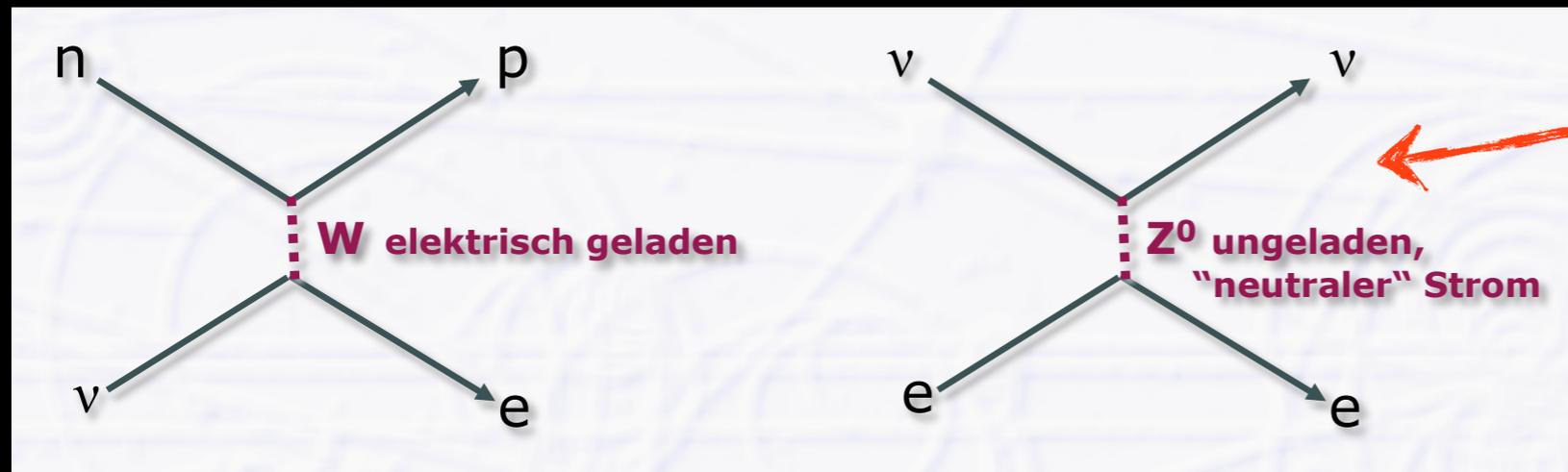
Elektroschwache Wechselwirkung



- Erkenntnis: Elektromagnetische & schwache Wechselwirkung sind Manifestationen derselben zugrundeliegenden WW sind

Glashow, Salam, Weinberg: 1968

- Vereinheitlichung zur Elektroschwachen Kraft!
 - Neue „schwache“ Ladung: tragen Quarks & Leptonen



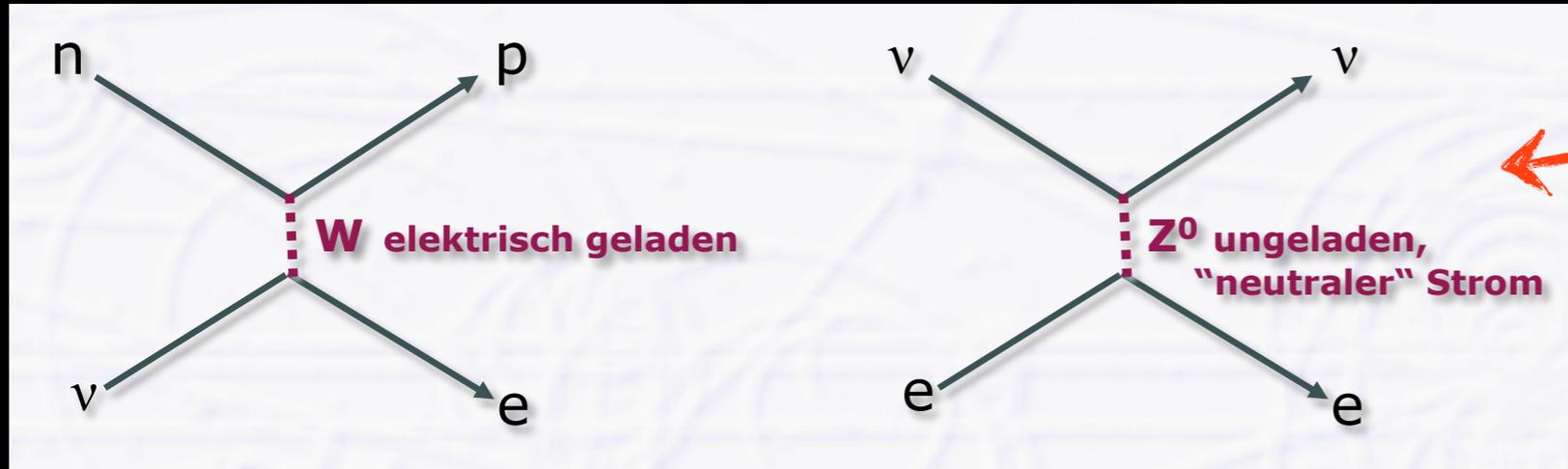
Zu dieser Zeit noch Unbeobachtet

- 2 geladene Austauschteilchen: W^+ , W^- (massiv)
- 2 neutrale Austauschteilchen: γ (masselos), Z^0 (massiv)

- Vereinheitlichung zur **Elektroschwachen** Kraft!

Glashow, Salam,
Weinberg: 1968

- Neue „schwache“ Ladung: tragen Quarks & Leptonen



Zu dieser Zeit noch
Unbeobachtet

schwache Hyperladung -
(Verbindung zur el. Ladung)

- Zu diesem Ansatz gehört eine neue Symmetrie ($SU(2) \times U(1)$)

- Symmetrie nur bei großen Energien realisiert:
 - Wechselwirkungen haben gleiche Stärke!

- Bei niedrigen Energien:
 - Symmetrie „spontan“ gebrochen

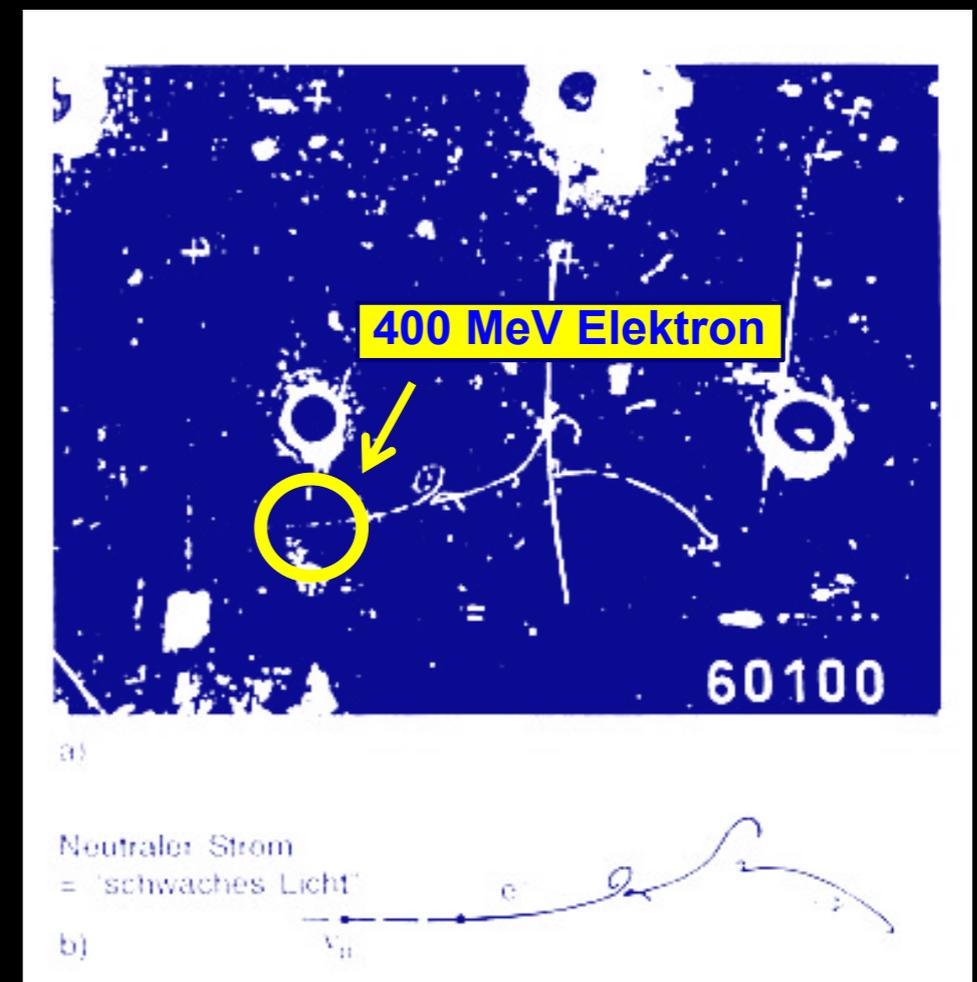
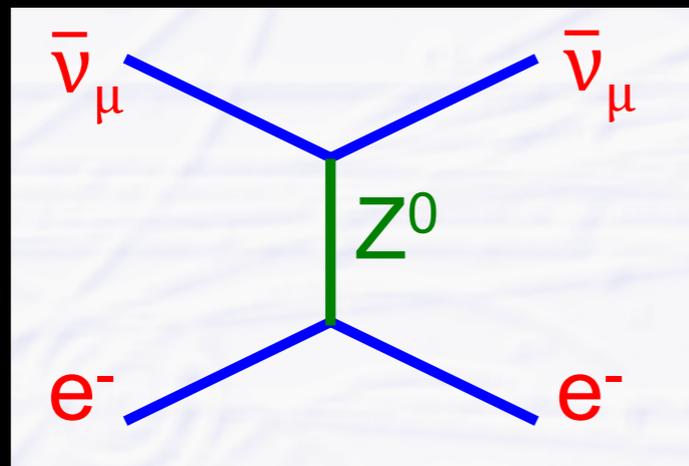
schwacher Isospin - verbindet
 e^- & ν (vgl. Isospin bei p,n)

- W&Z Bosonen erhalten **Masse** durch Interaktion mit **Higgs** Feld
 - Mehr in Stunde 3

Entdeckung des neutralen Stroms

CERN: 1973

- Indirekter Hinweis auf Z^0
 - elastische Streuung von Neutrino an Elektron aus Atomhülle



Experimenteller Nachweis von W & Z



CERN: 1983

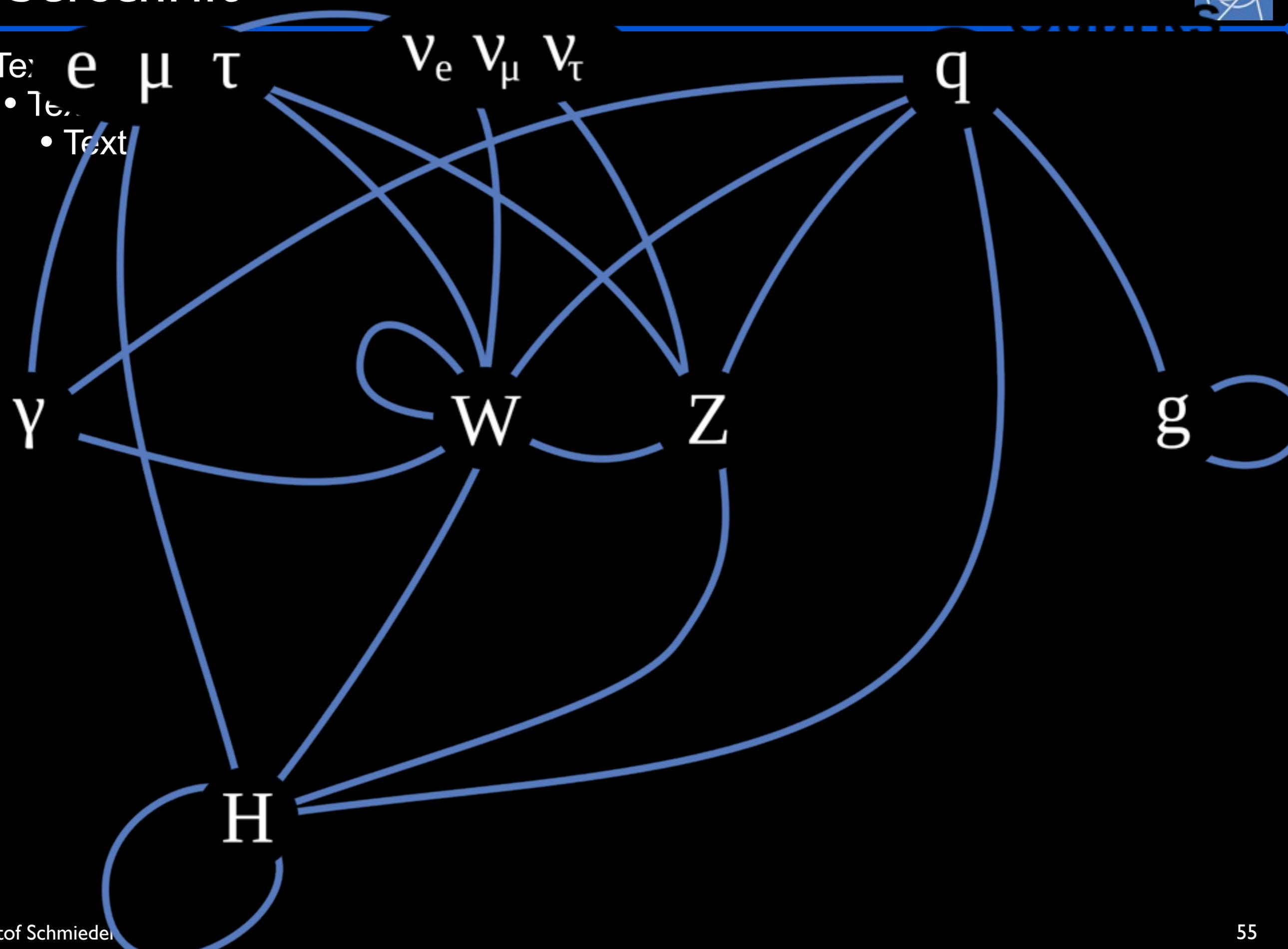
- Text
 - Text
 - Text

- Text
 - Text
 - Text

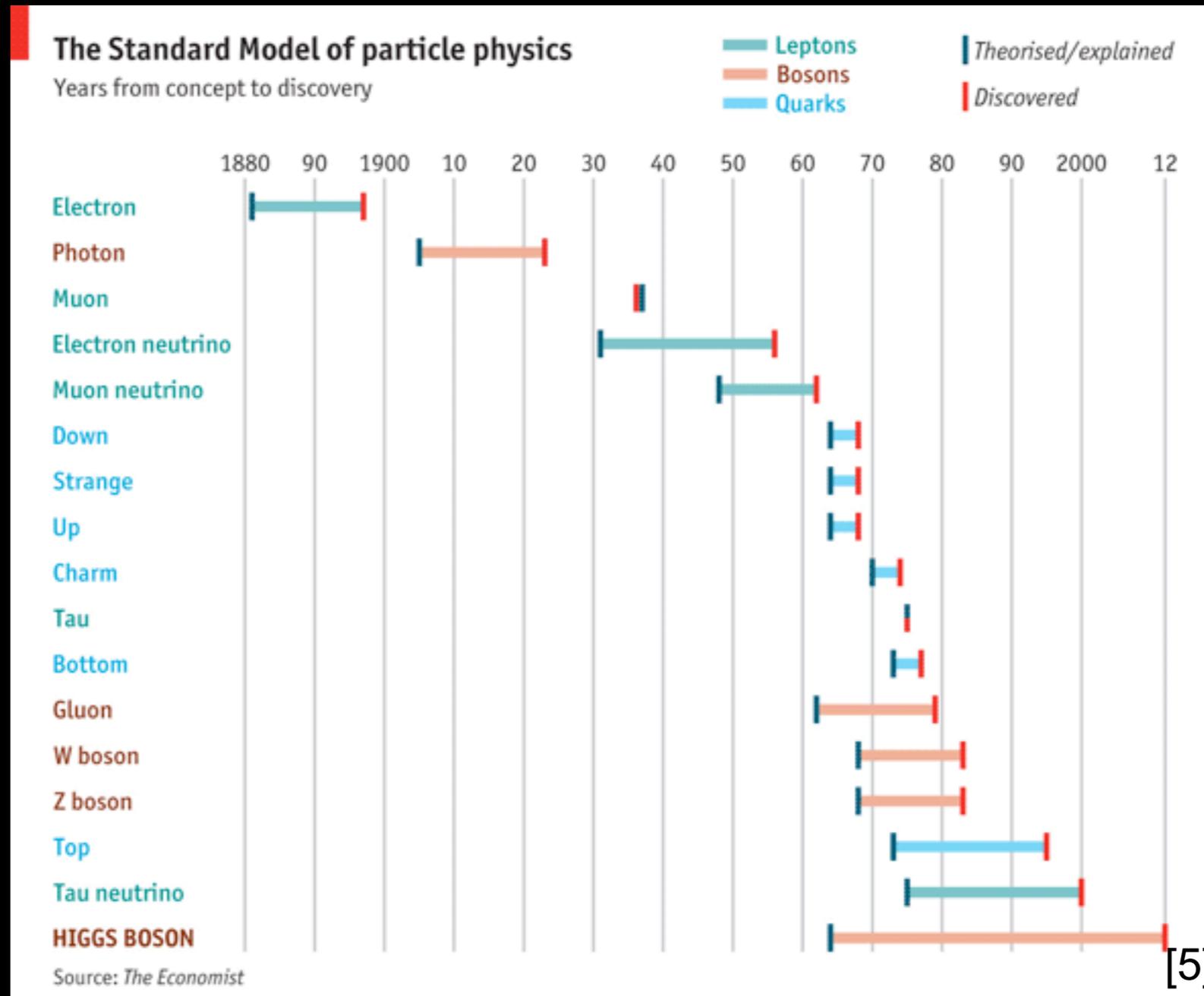
Überschrift



- Teilchen
- Teilchen
- Teilchen



- Text
 - Text
 - Text



- [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>