



Teilchenphysik

Lehrerprogramm - Oktober 2017

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

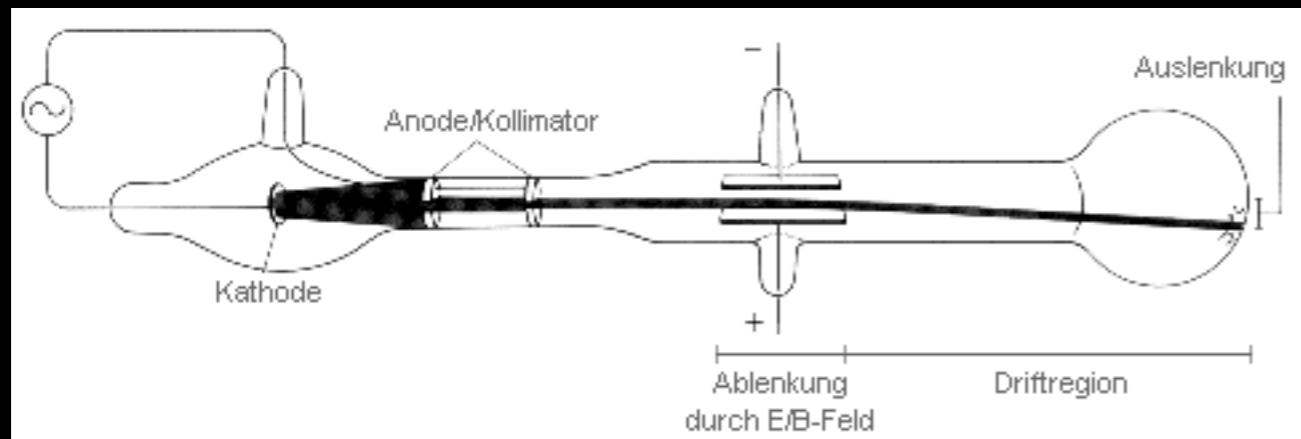
Wünsche für folgende Stunden

Feedback!
Direkt
& am Ende

Was ist elementar?

- Die Entdeckung des **Elektrons**

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



1897: Thompson / Wiechert



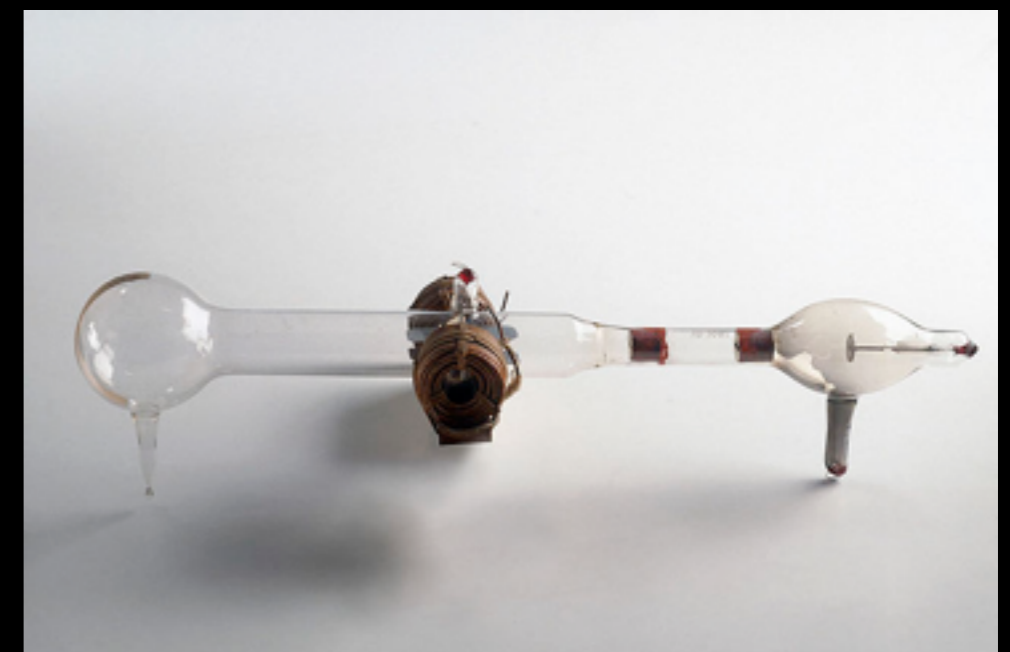
Historische Kathodenstrahlröhre

- **Zeeman Effekt:**

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

1896: Zeeman (Beobachtung)

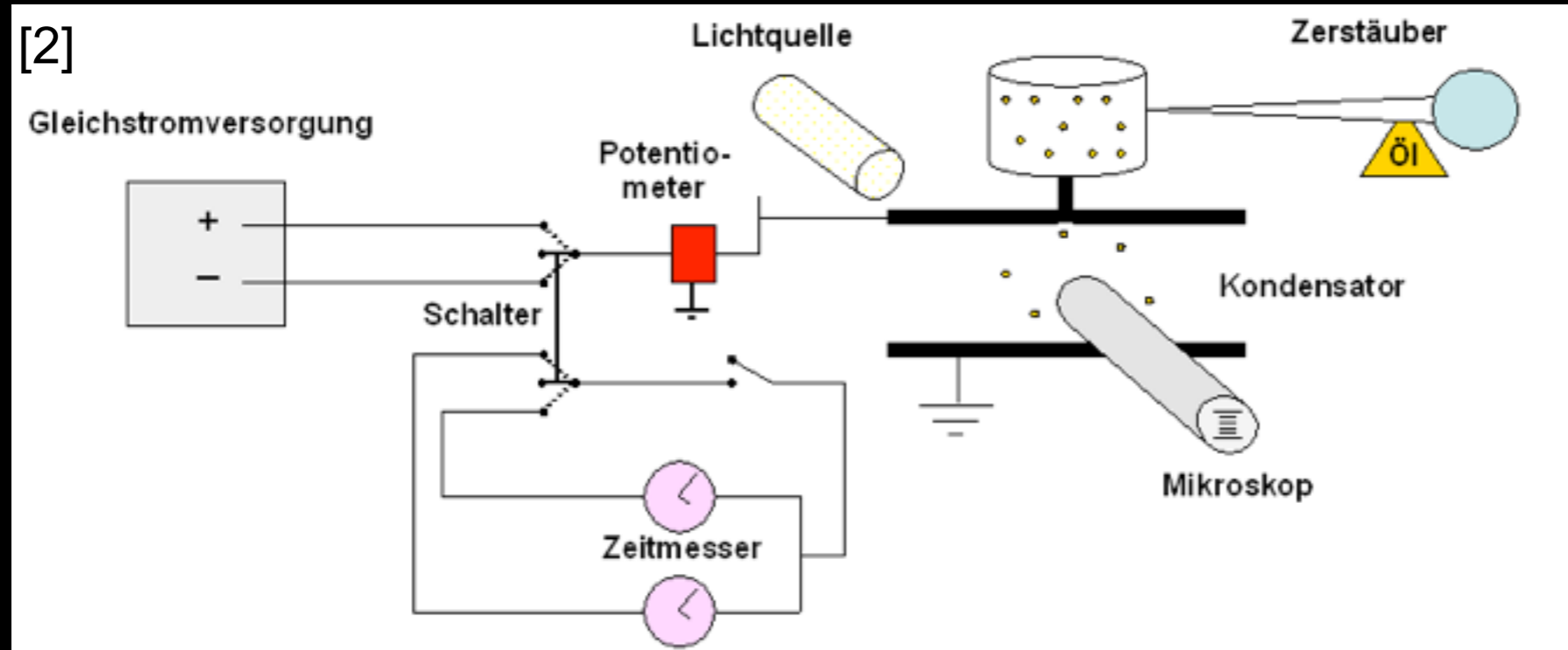
1899: Lorentz (Erklärung)



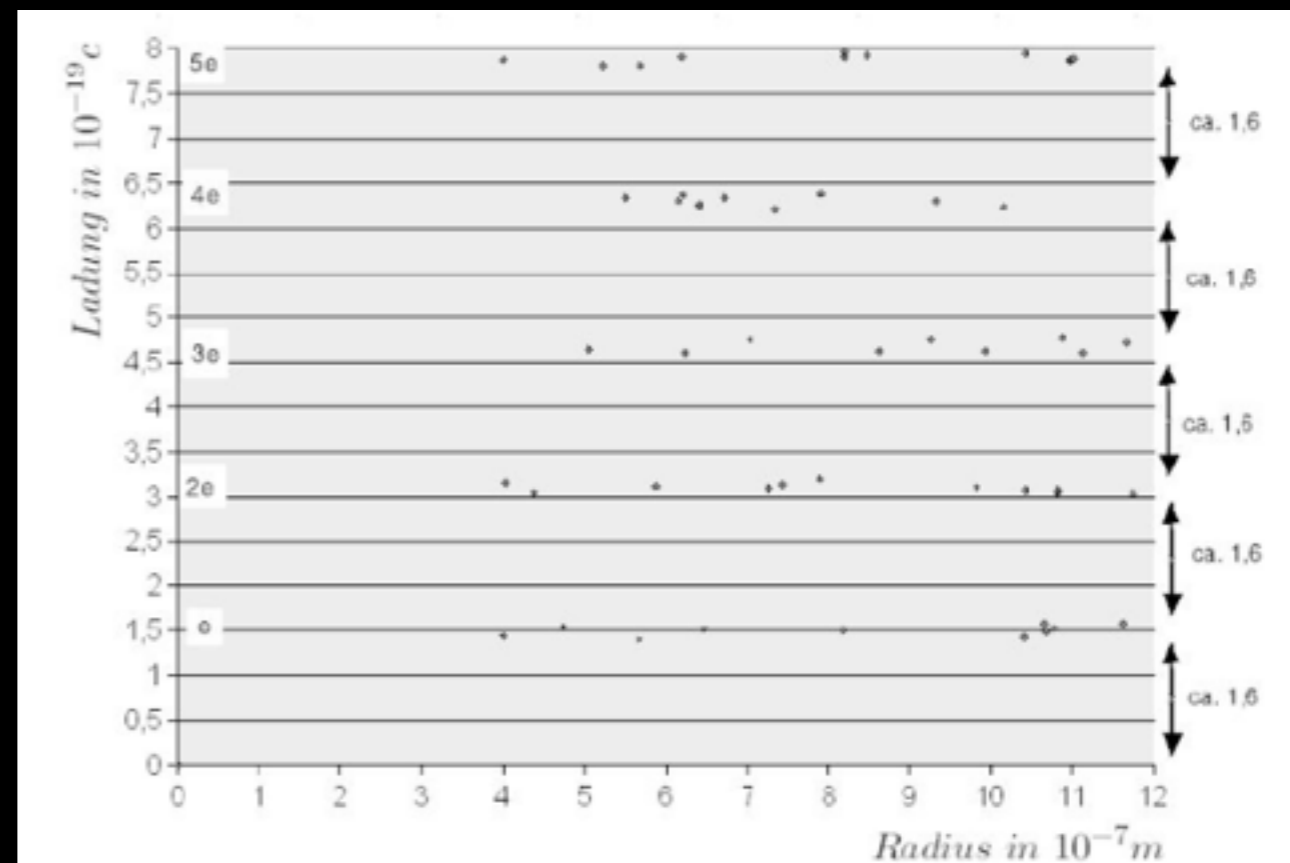
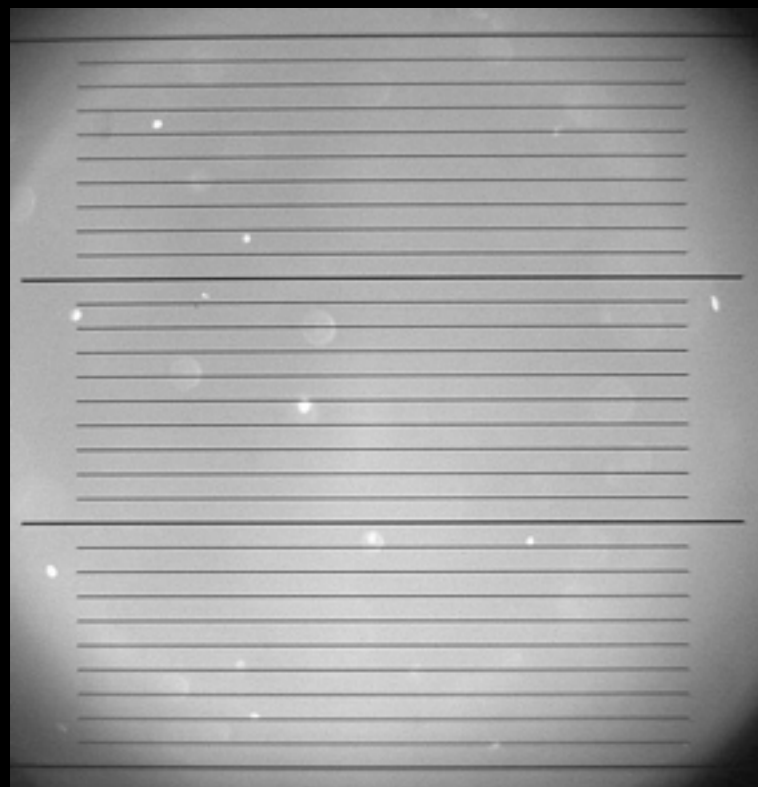
Bestimmung der Elementarladung

- Millikan Versuch

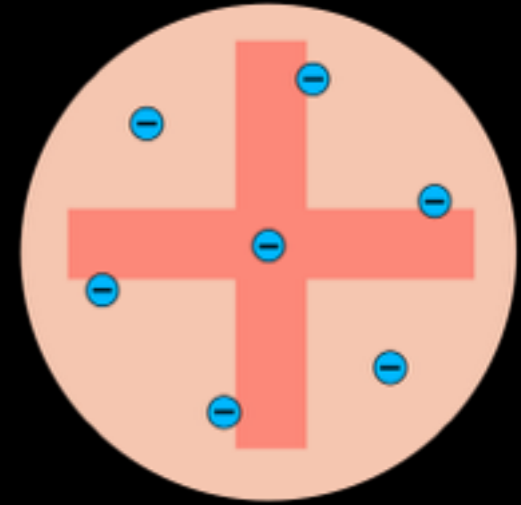
1910: Millikan / Fletcher



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



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

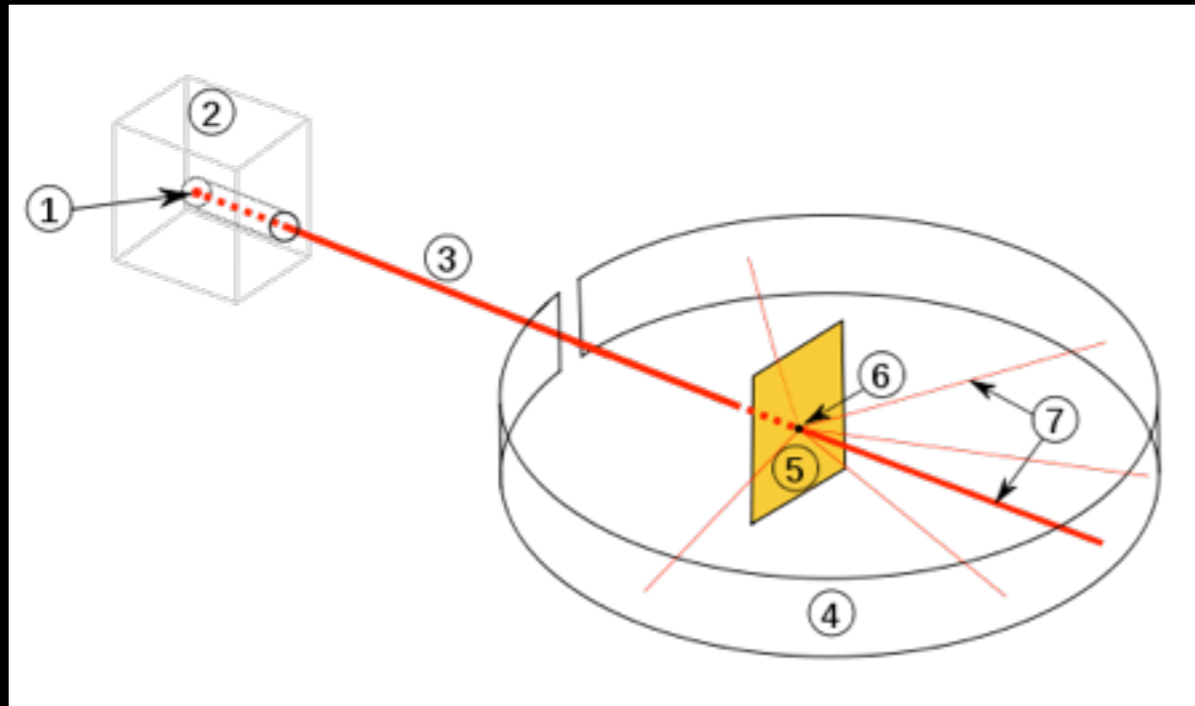


Rutherford Experiment

1909: Geiger / Marsden / Rutherford

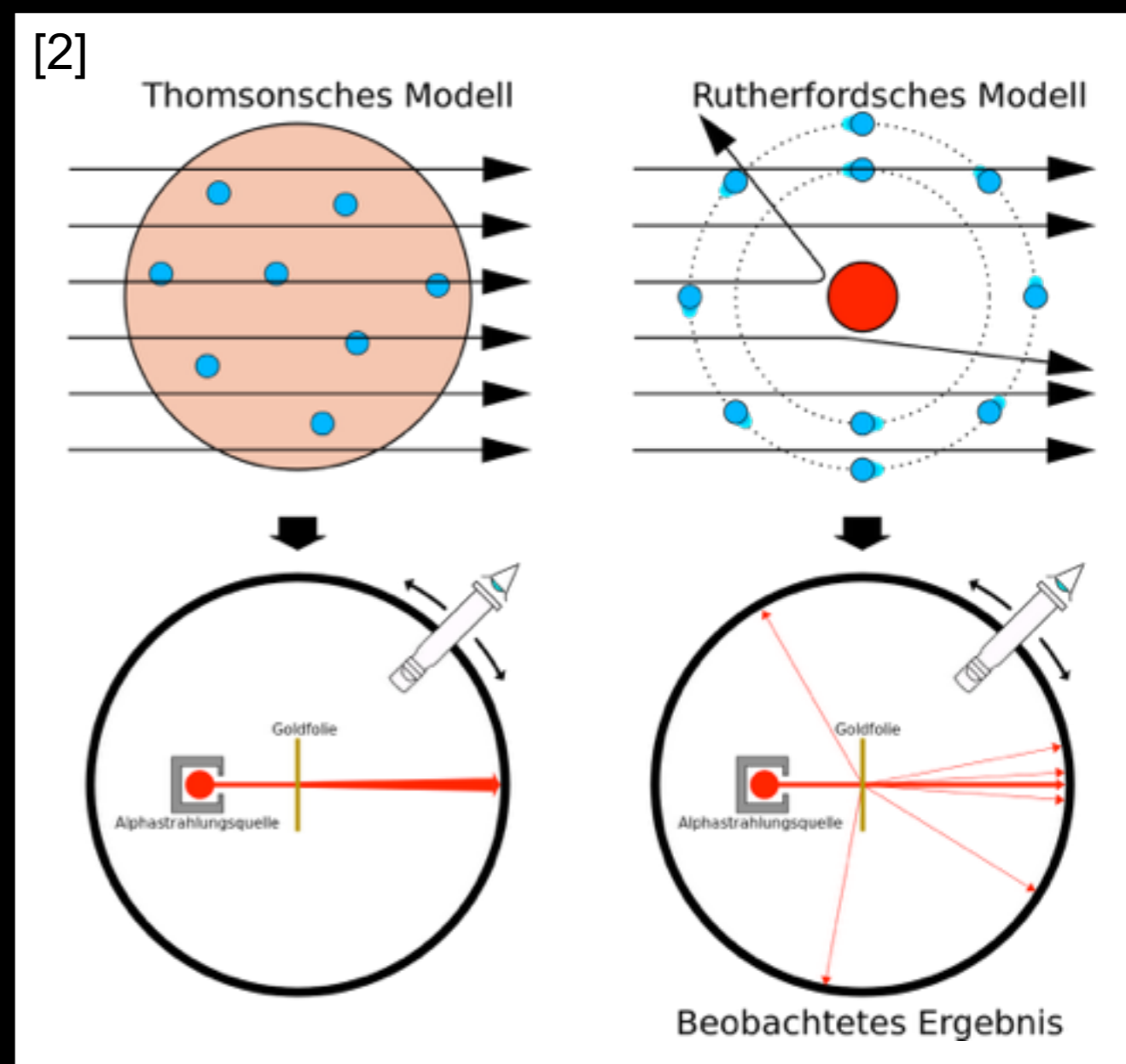
- **Atom hauptsächlich leer!**

- Fast alle Masse & elektrische Ladung in kleinem Bereich konzentriert

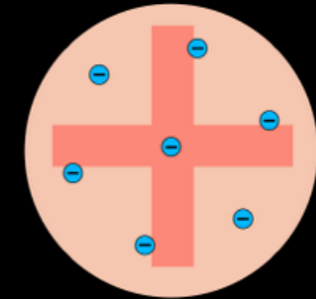


$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4E_0} \right)^2 \frac{1}{\sin^4\left(\frac{\vartheta}{2}\right)}$$

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



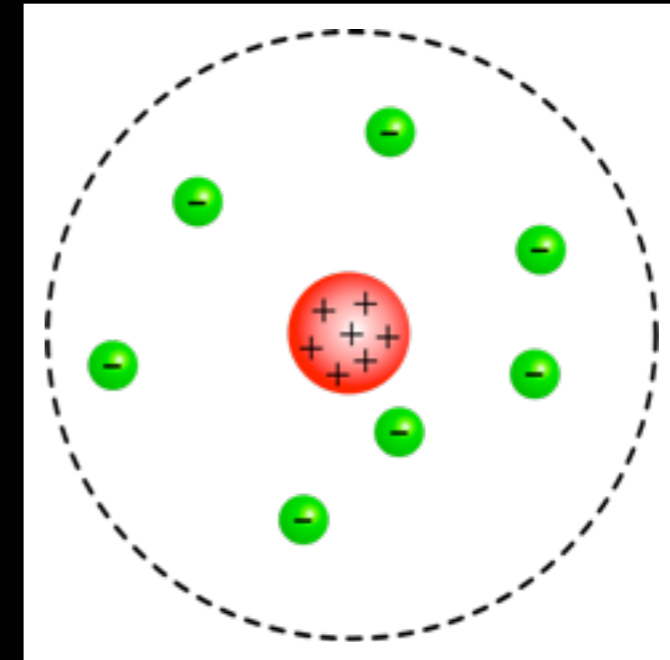
- Thomson: „*Rosinenkuchen*“-Modell
 - Elektronen in homogene, el. pos. geladene Masse eingebettet



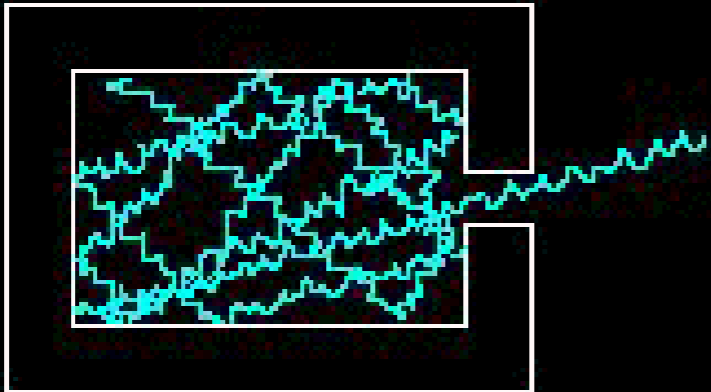
1900

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

1911



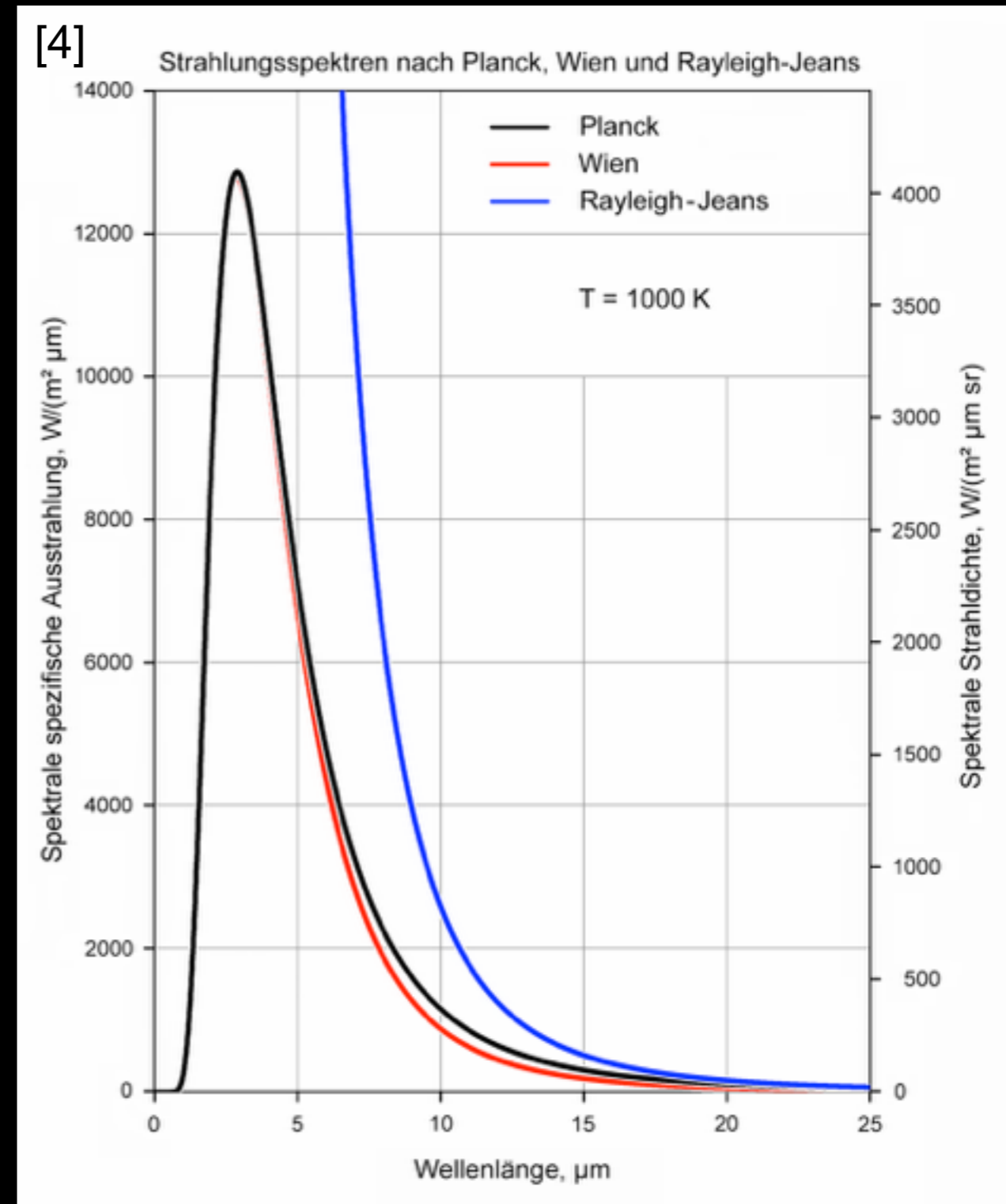
Max Planck: 1900



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

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

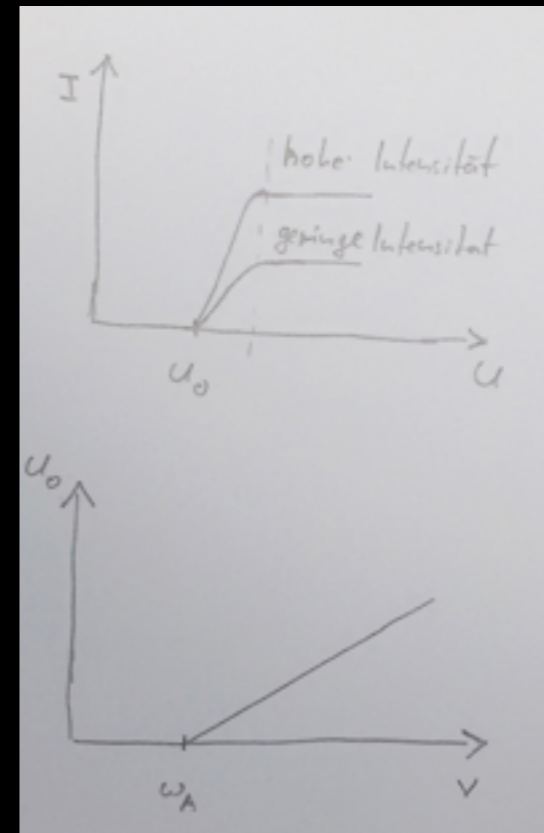
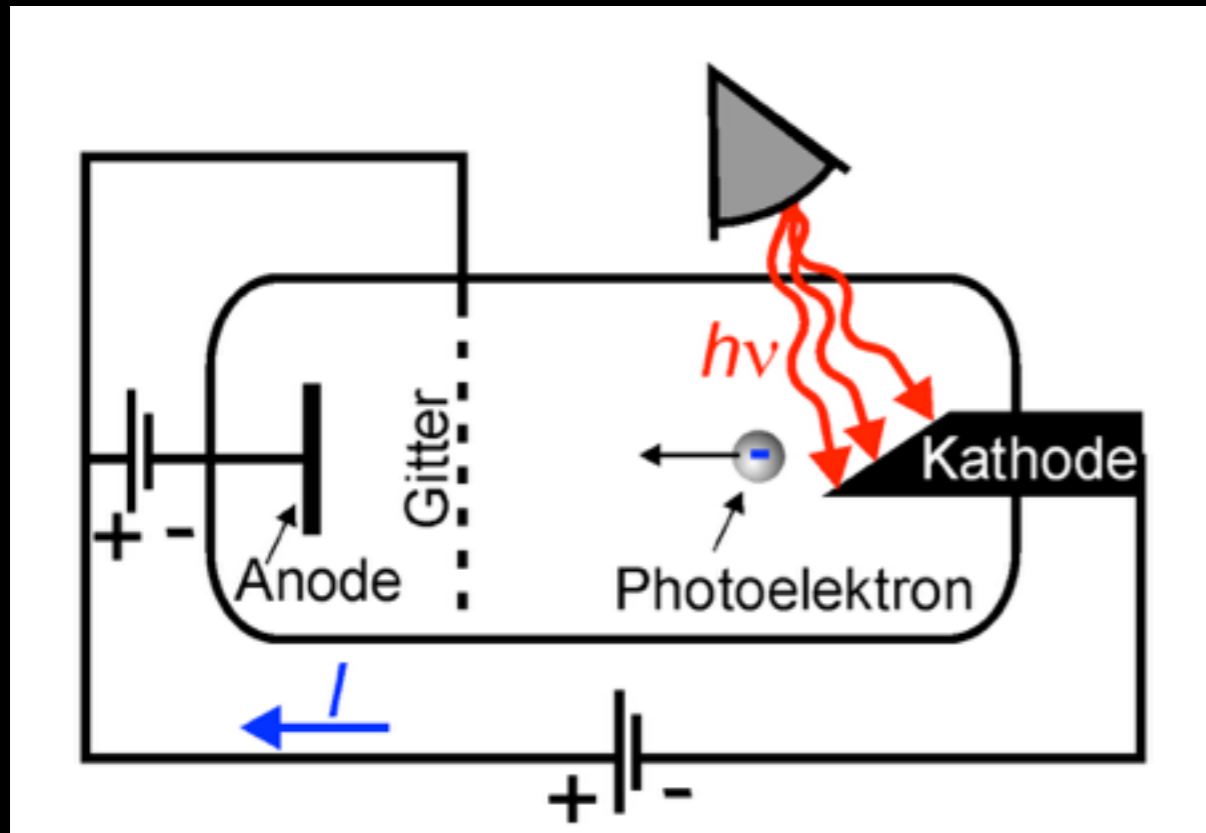
- neue fundamentale Konstante: **h**
 - setzt Energie und Frequenz in beziehung



Quanten - Photoelektrischer Effekt

- Auslösung von Elektronen aus Metalloberflächen bei Lichteinfall:

Einstein: 1905

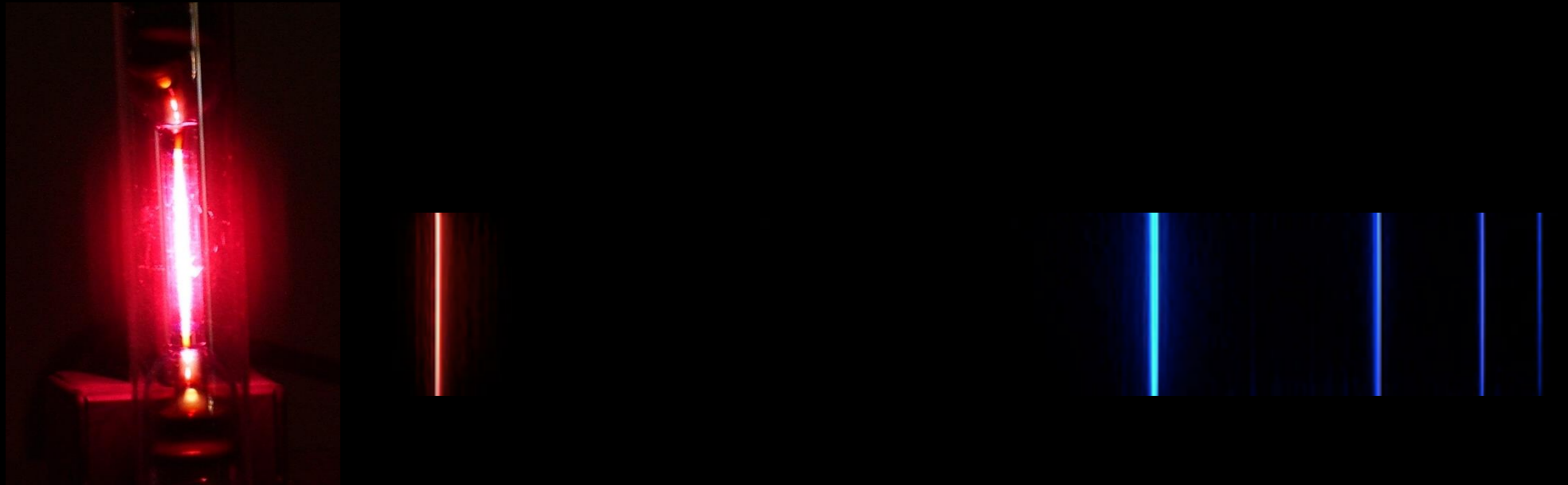


- Energie der Elektronen unabhängig von Lichtintensität!
- Nicht erklärbar mit dem klassischen Bild einer elektromagnetischen Welle!
- Erklärung durch Interaktion von Lichtquanten mit Elektronen:
 - „Ein Lichtquant gibt alle seine Energie an ein Elektron ab“

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

- 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?**

Bohr: 1913

- **Lösung:**

Elektronen auf bestimmten, stabilen Bahnen

Drehimpuls der Elektronen quantisiert:

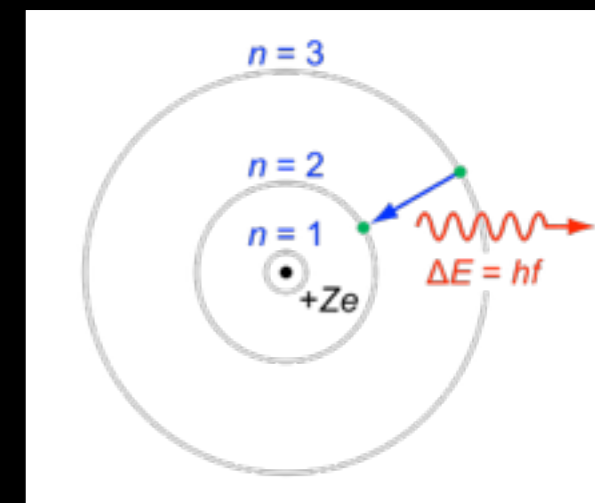
$$L = n\hbar = n \frac{h}{2\pi}$$

Energieänderung bei Bahnwechsel:

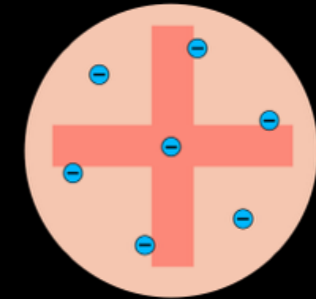
$$\Delta E = f \cdot h$$

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

13,6 eV => 156.000K

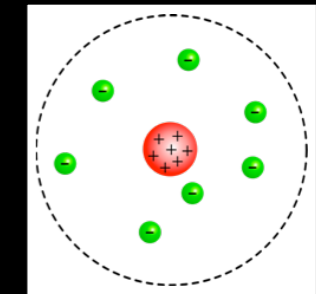


- Thomson: „Rosinenkuchen“-Modell
 - Elektronen in homogene, el. pos. geladene Masse eingebettet



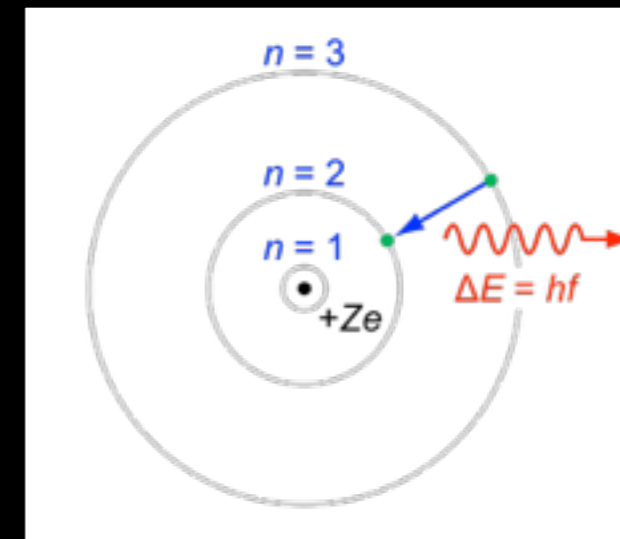
1900

- 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

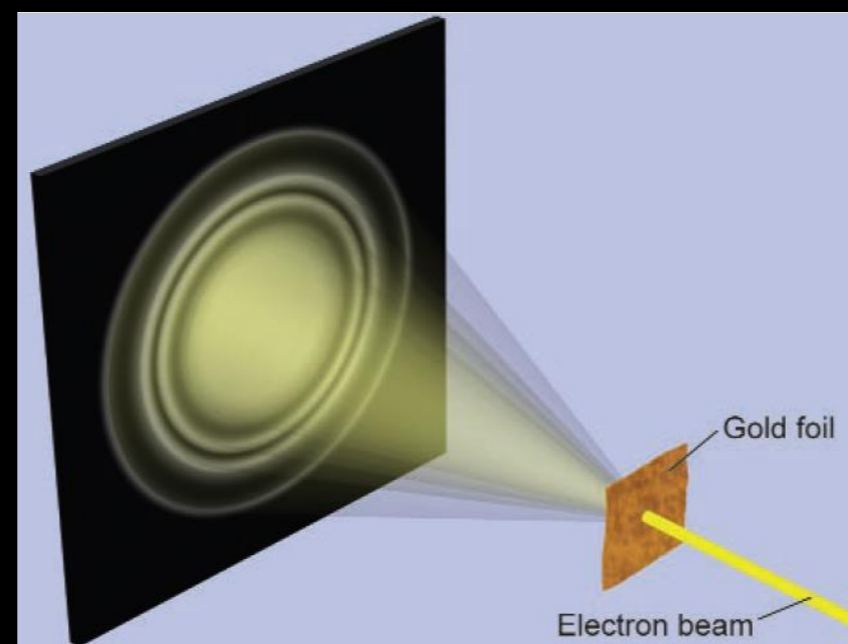
- Postulat: **Teilchen verhalten sich wie Wellen mit Wellenlänge:**
 $\lambda = h/p$

- Experimentell betätigt: Beugung von Elektronen an Goldfolie

de Broglie: 1924

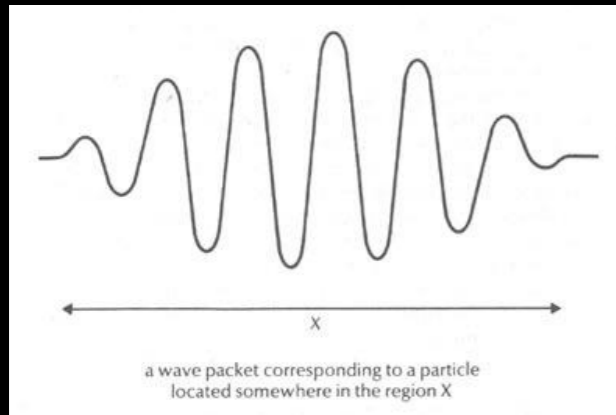


Davisson & Germer: 1927



- 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“ 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:

QM Zustand der nur für kurze Zeit existiert
kann keine definierte Energie haben!

- 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: $p = h/\lambda = \hbar k$ $p \rightarrow i\hbar\nabla$

Energie einer Welle: $E = \hbar\omega$ $E \rightarrow i\hbar\frac{\partial}{\partial t}$

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

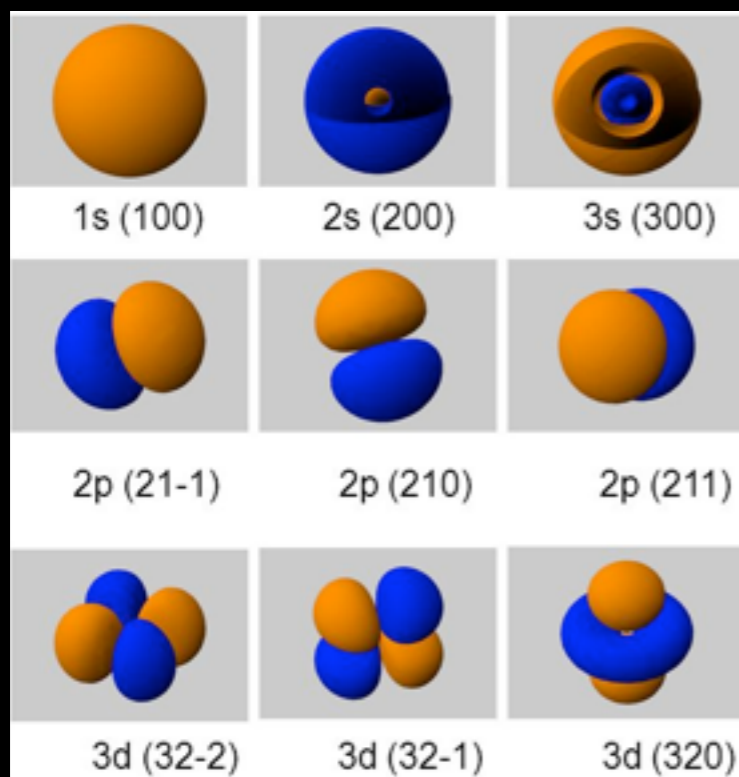
N.b.:
Kopenhagener Interpretation: Bohr / Heisenberg 1927

- Beispiel **Atom**:

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

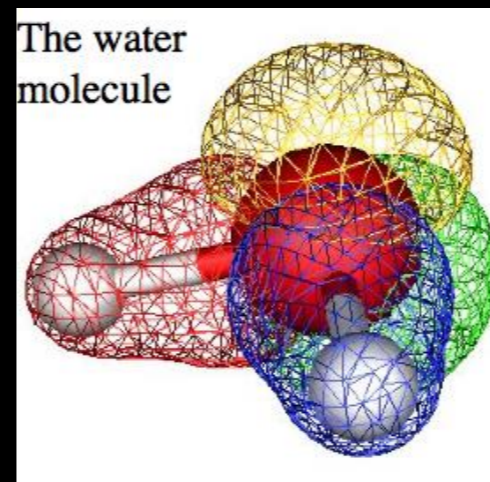
Orbitale des Wasserstoffs

[7]



Pauling: 1928

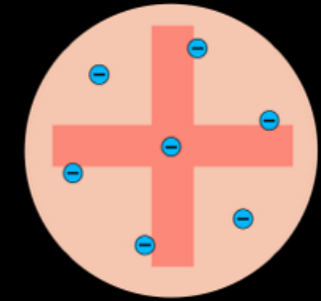
Chemische Bindungen reflektieren **Struktur** der Orbitale



Verständnis der makroskopischen Strukturen!

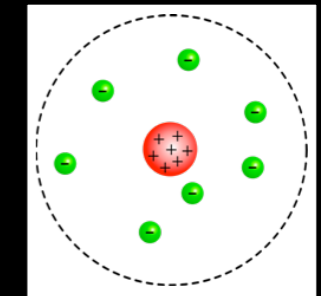
Atommodelle - 1928

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



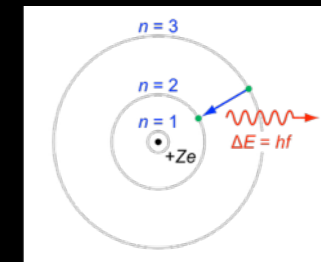
1900

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



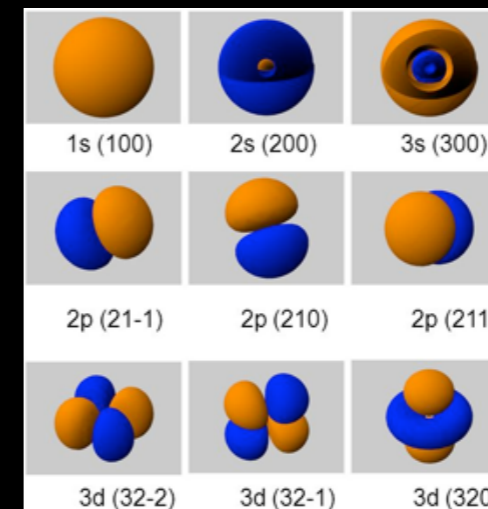
1911

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

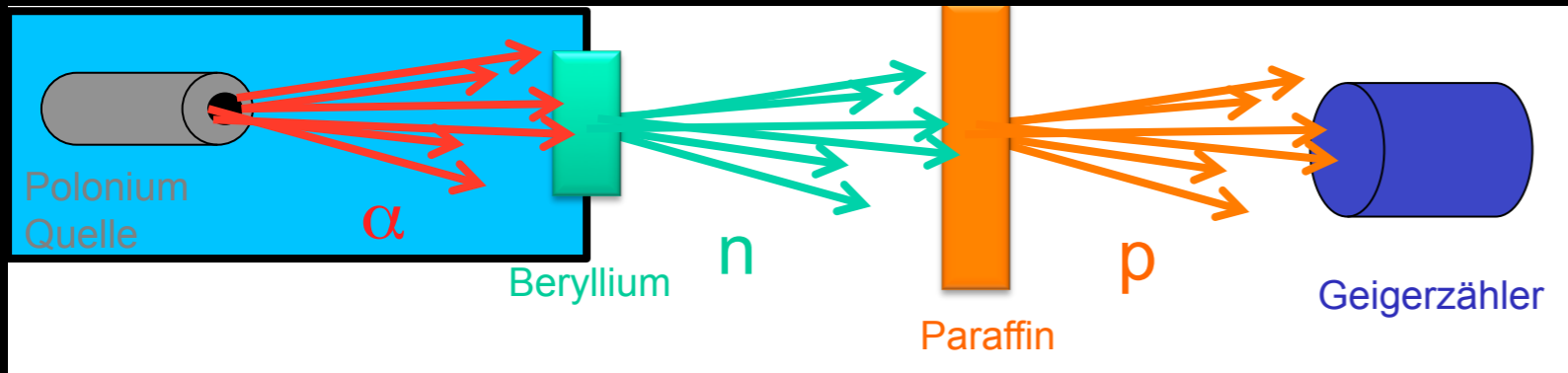


1913

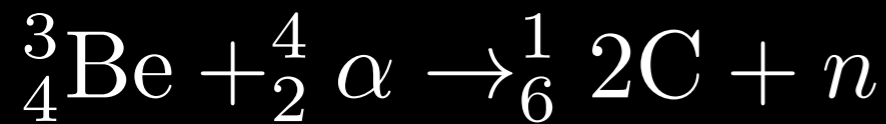
- **Orbital-Modell (Born, Pauling):**
 - Quantenmechanische Beschreibung der Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Elektronen



1928



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



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

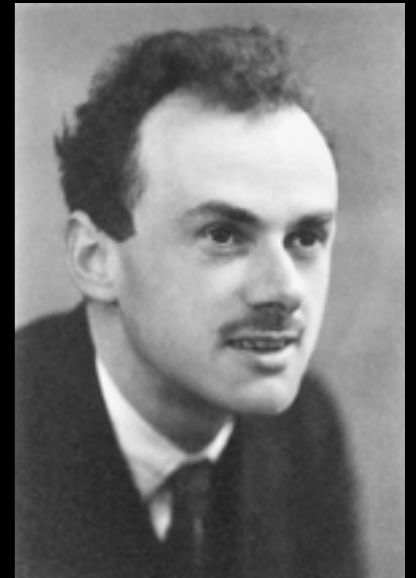
Bild des Atoms vollständig!

Nun zu etwas Anderem
- Anti-Teilchen -

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

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

Dirac: 1928



- Energie Eigenwerte: $E = \pm \sqrt{m_0^2 c^4 + p^2 c^2}$
- **Bedeutung von Zuständen neg. Energie?**
 - **Antiteilchen!**
 - Entdeckung 4 Jahre später

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

Erklärung des Spin 1/2
→ Pauli Prinzip 1940

Vorhersage von Anti-Teilchen

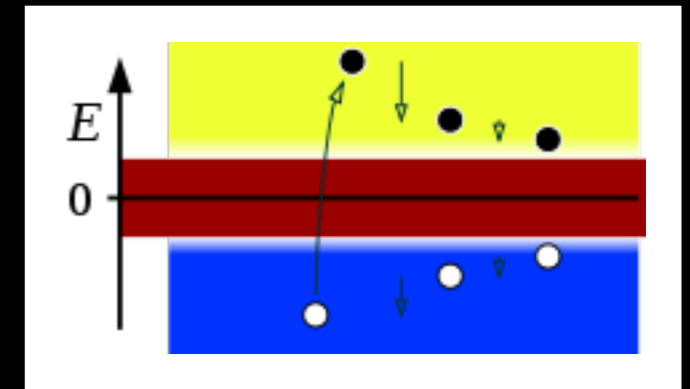
Zustände mit negativer Energie

- Historisch: Dirac See

- Unendlich viele Teilchen neg. Energie besetzten ALLE Zustände negativer Energie

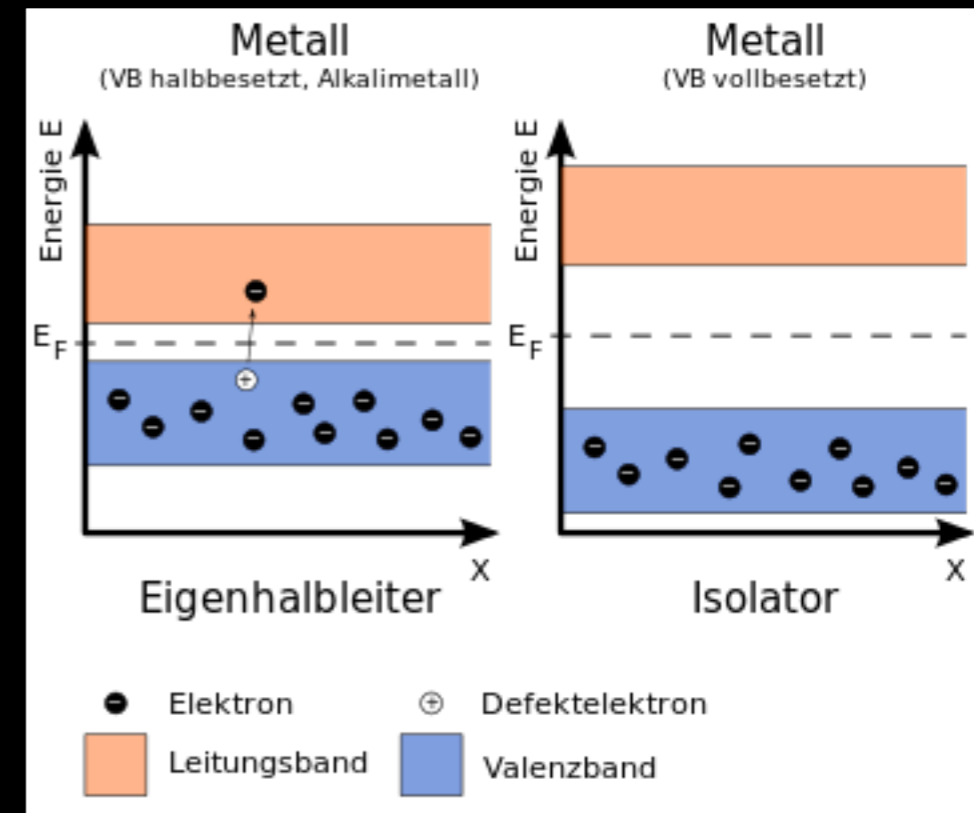
- Teilchen mit negativer Energie = Loch im Dirac See

- Analog: Halbleiter



- Neuinterpretation in Quanten-Feld-Theorie

- Antiteilchen werden wie reale Teilchen nicht wie unbesetzte Zustände behandelt



- Erzeugung von Teilchen => Energie erhöht => $E > 0$

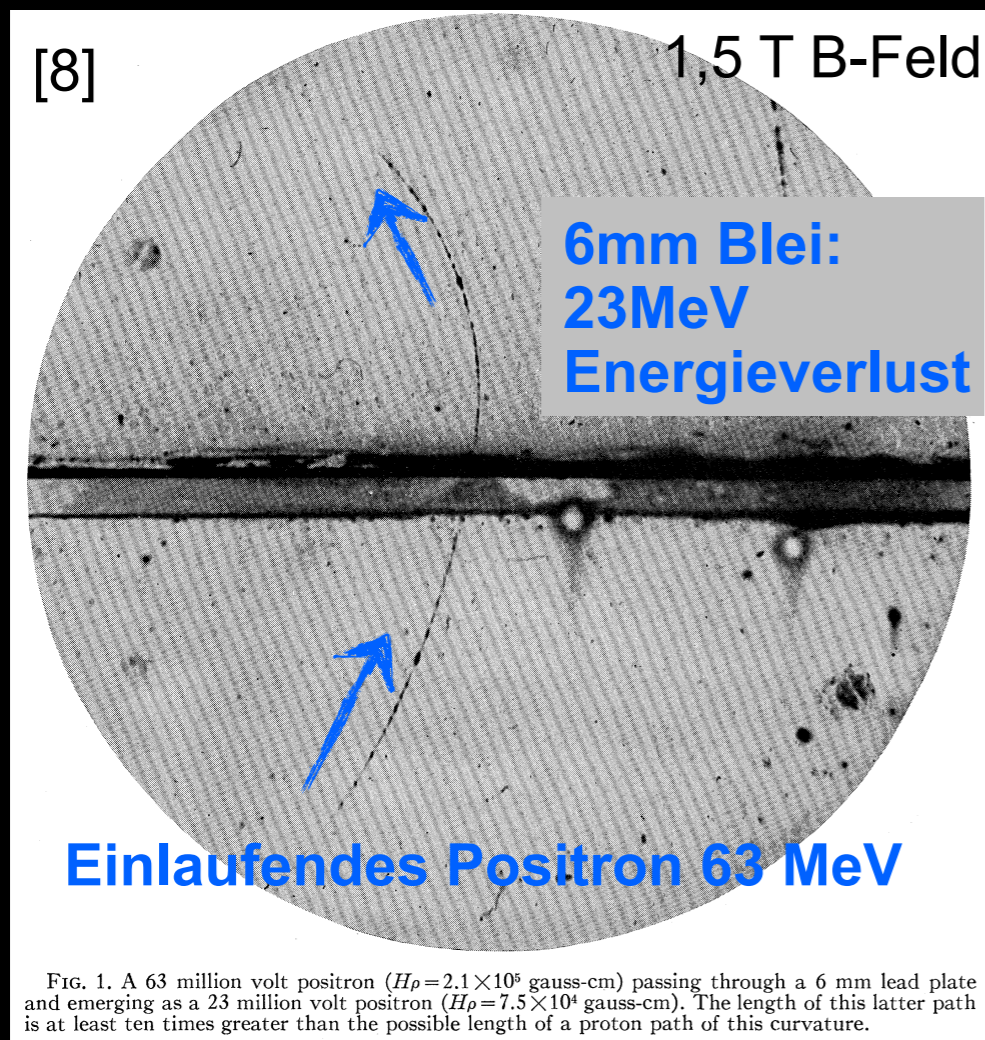
- Vernichtung von Teilchen => Energie erniedrigt => $E < 0$
 == Erzeugung von Anti-Teilchen

Entdeckung des Positrons

Anderson: 1932



- Nachweis von Positronen aus Höhenstrahlung in Nebelkammer



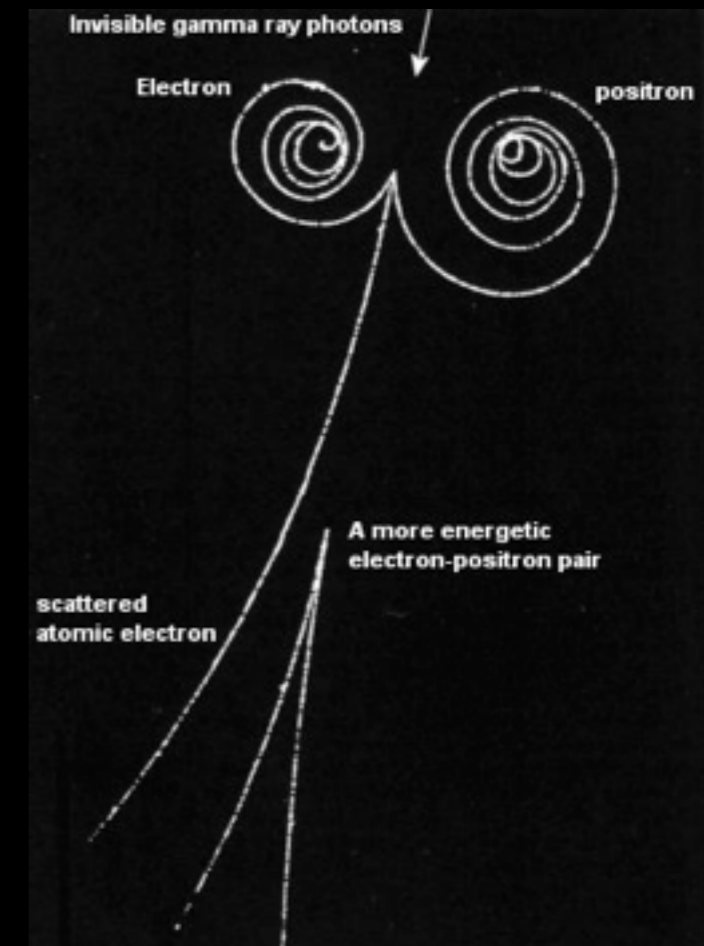
- Flugrichtung durch E-Verlust bestimmt
- Masse & E durch Krümmung / E-Verlust
- Entdeckung des **Myons** 1936
 - „Who ordered that?“
 - Erstes Teilchen der „2. Familie“

- 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**



- **Erhaltungsgrößen:**

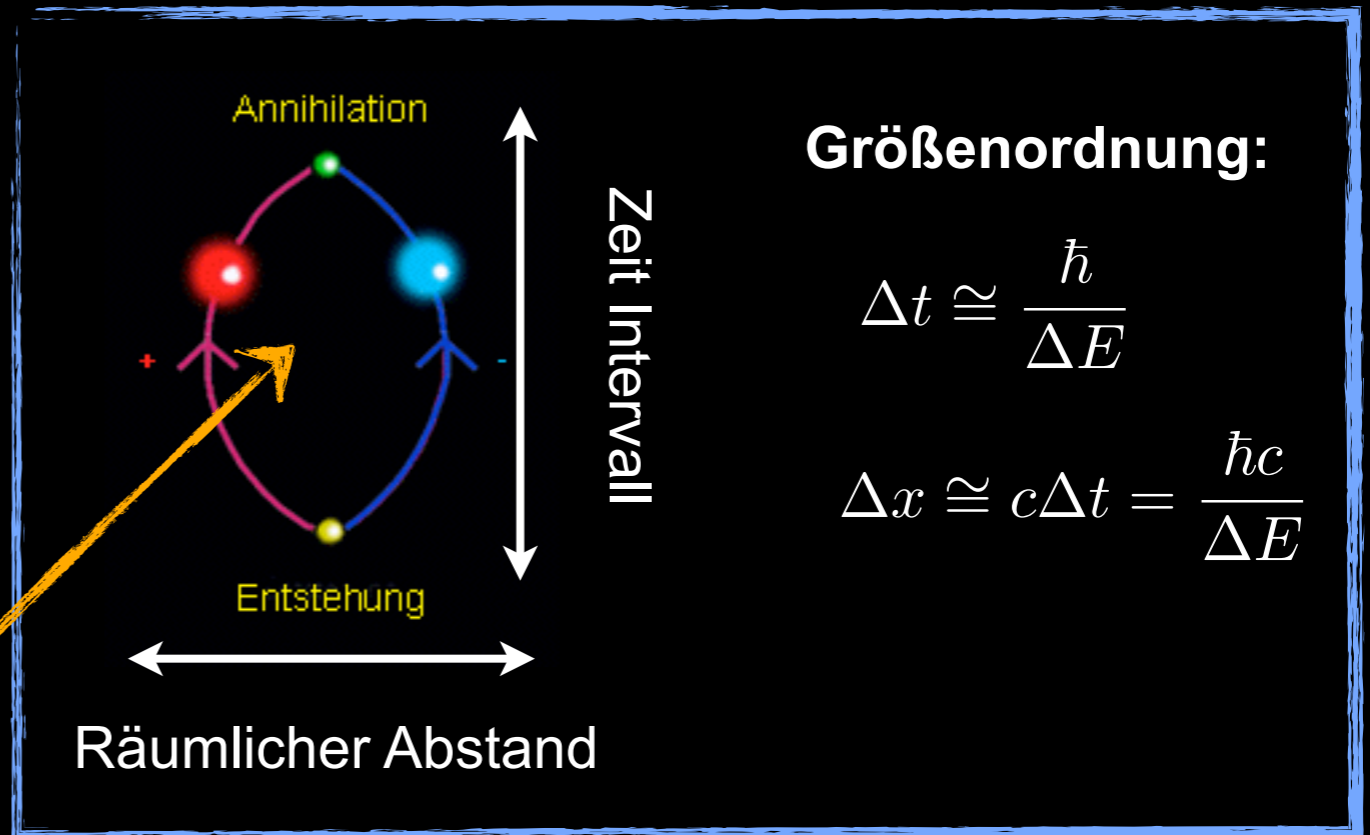
- Leptonzahl → **Neutrinoloser doppel-Beta Zerfall**
- Baryonzahl (Proton, Neutron, ...) → **Baryogenese / Protonzerfall**
- B-L (In allen Theorien erhalten)

Antiteilchen und das Vakuum

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

• Für **kurze Zeit** können Teilchen - Antiteilchen Paare erzeugen werden (Virtuelle Teilchen $\rightarrow m \neq m_0$)

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



Virtuelle Teilchen

- Casimir Effekt:

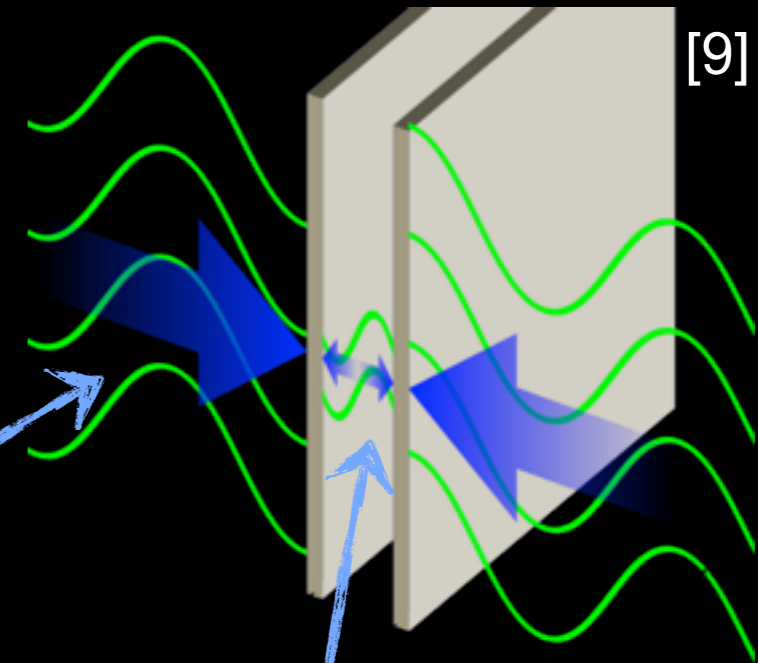
- Messbarer äußerer Druck auf Metallplatten

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

- ~1 bar @ d = 11nm

Alle Wellenlängen
(Energien) möglich

Nur passende
Wellenlängen möglich

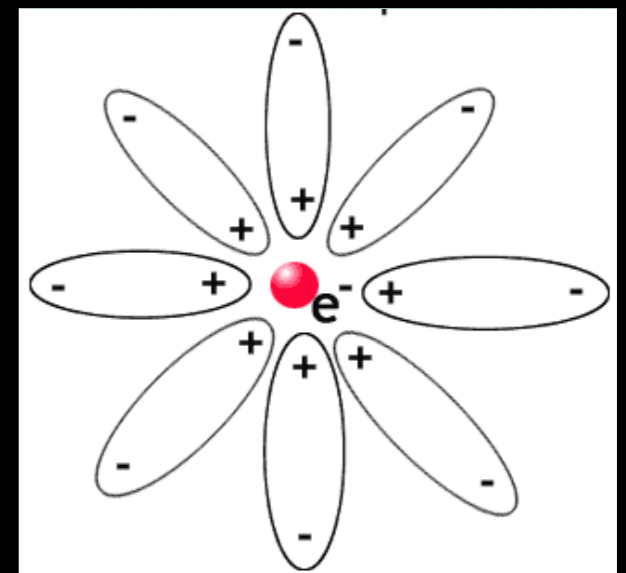


[9]

- Elektron **polarisiert Vakuumfluktuationen!**

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

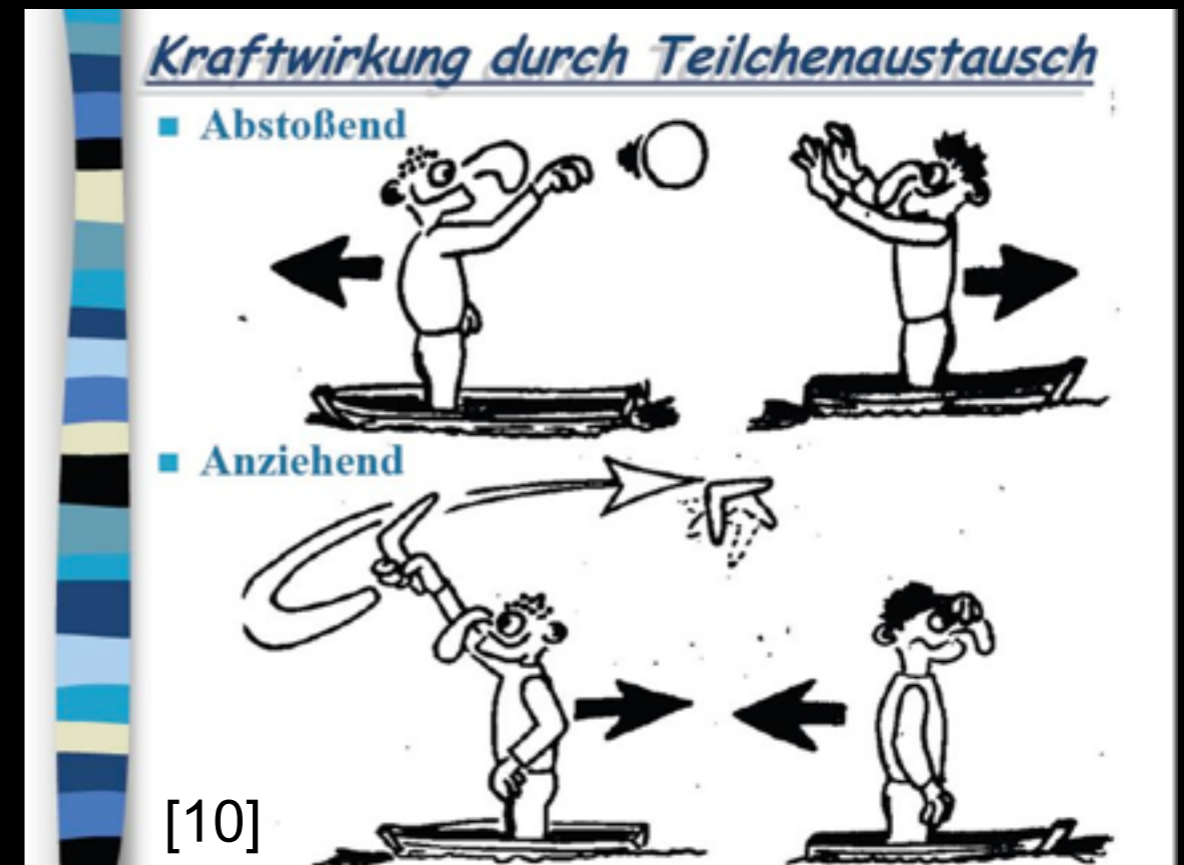
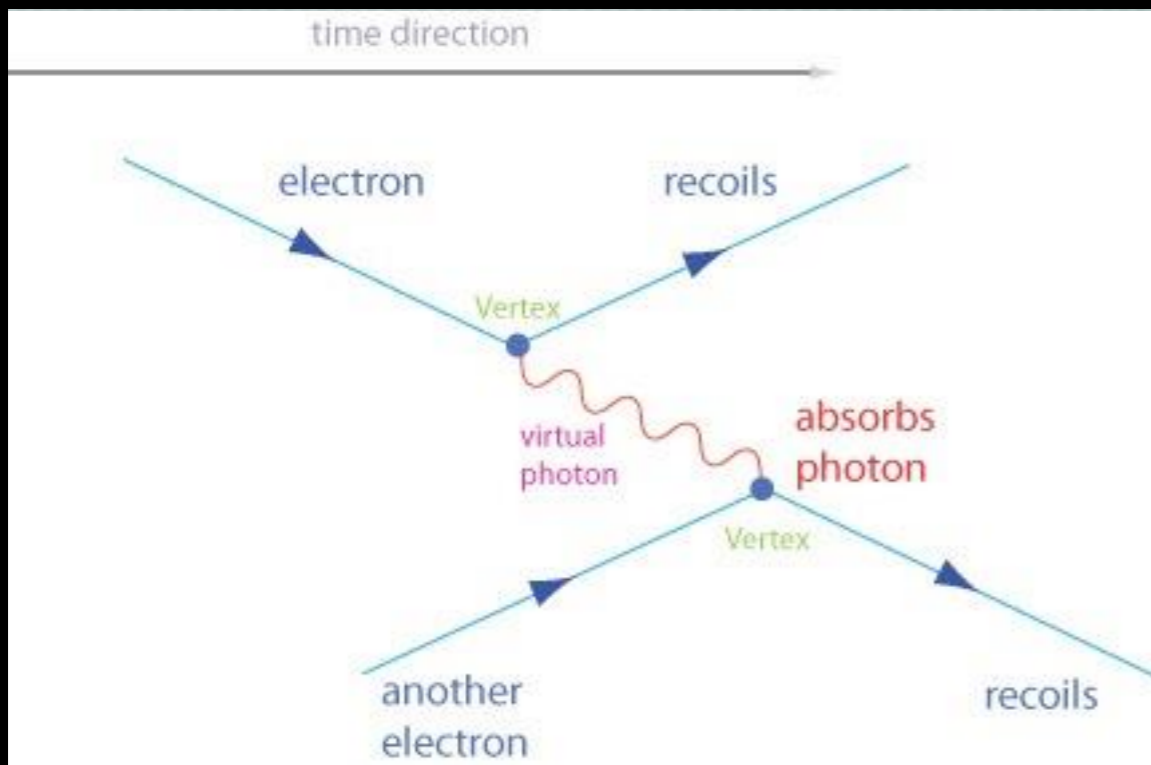
- ▶ Scheinbare el. Ladung abhängig vom Abstand!
- ▶ „**laufende**“ elektromagnetische Kopplungsstärke



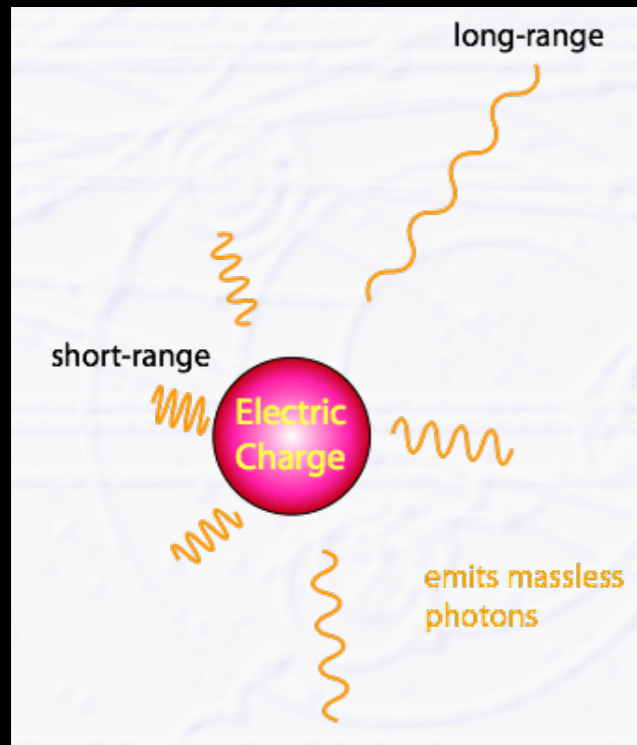
Vakuumfluktuationen - Berechnung?

Feynman, Schwinger,
Tomonoga, Dyson:
1934-1948

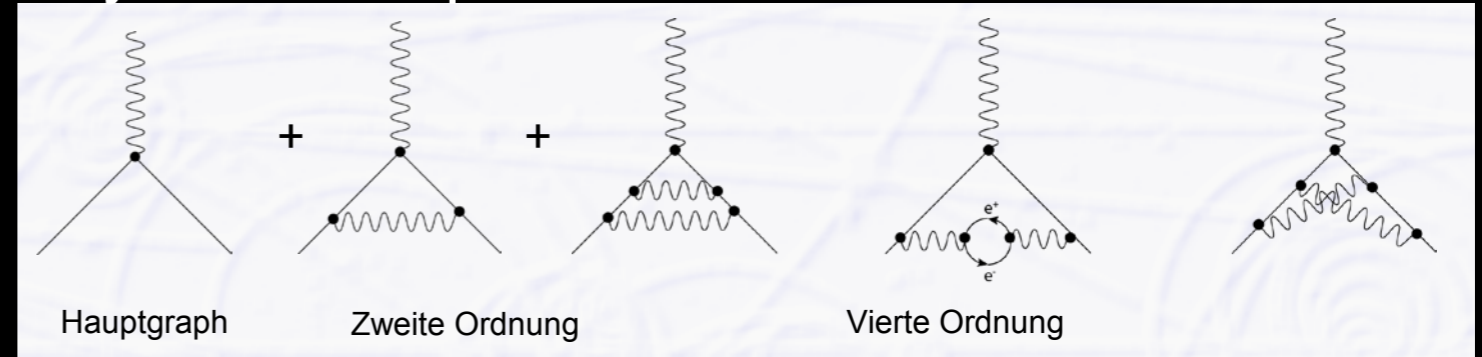
- Wie berechnet man die Interaktion zweier Elektronen?
 - Lösung: **Quantisierung des elektromagnetischen Feldes** (2. Quantisierung)
 - **Photonen** entsprechen den **Feld-Quanten**
 - Feld-Quanten übertragen Kraft - **Botenteilchen** (oder: **Austauschteilchen**)
 - **Virtuelle Teilchen**: Nicht beobachtbar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



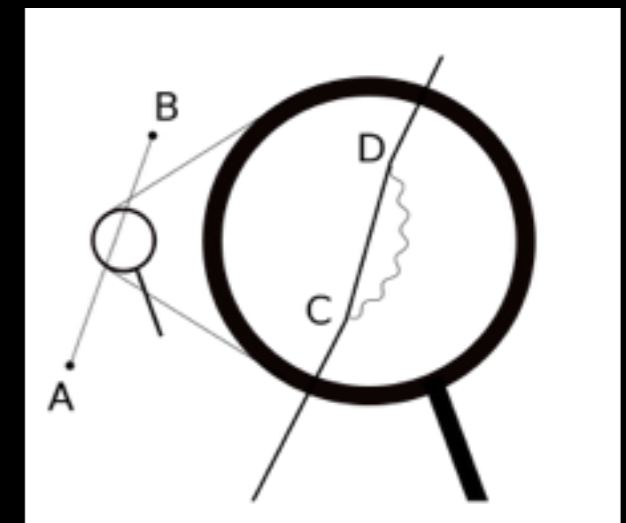
- Virtuelle Teilchen
 - Aber wie viele?



- Feynman Graphen für QED Korrekturen



- Elektron Selbstenergie
 - Wird ∞

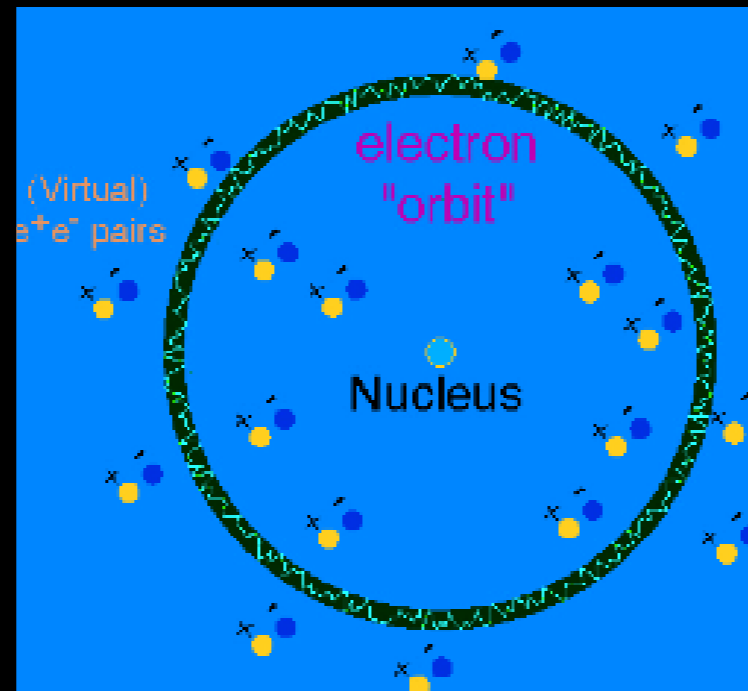


- Unendlich viele \rightarrow Rechenergebnisse = **Unendlich**
- Betrachte nur Teilchen bis zu einer gewissen Energie („Renormierung“)
 - Ergebnisse werden endlich \rightarrow **physikalisch bedeutsam!**
 - **Ergebnisse** der Quantenfeldtheorie sind **Näherungen**

- **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

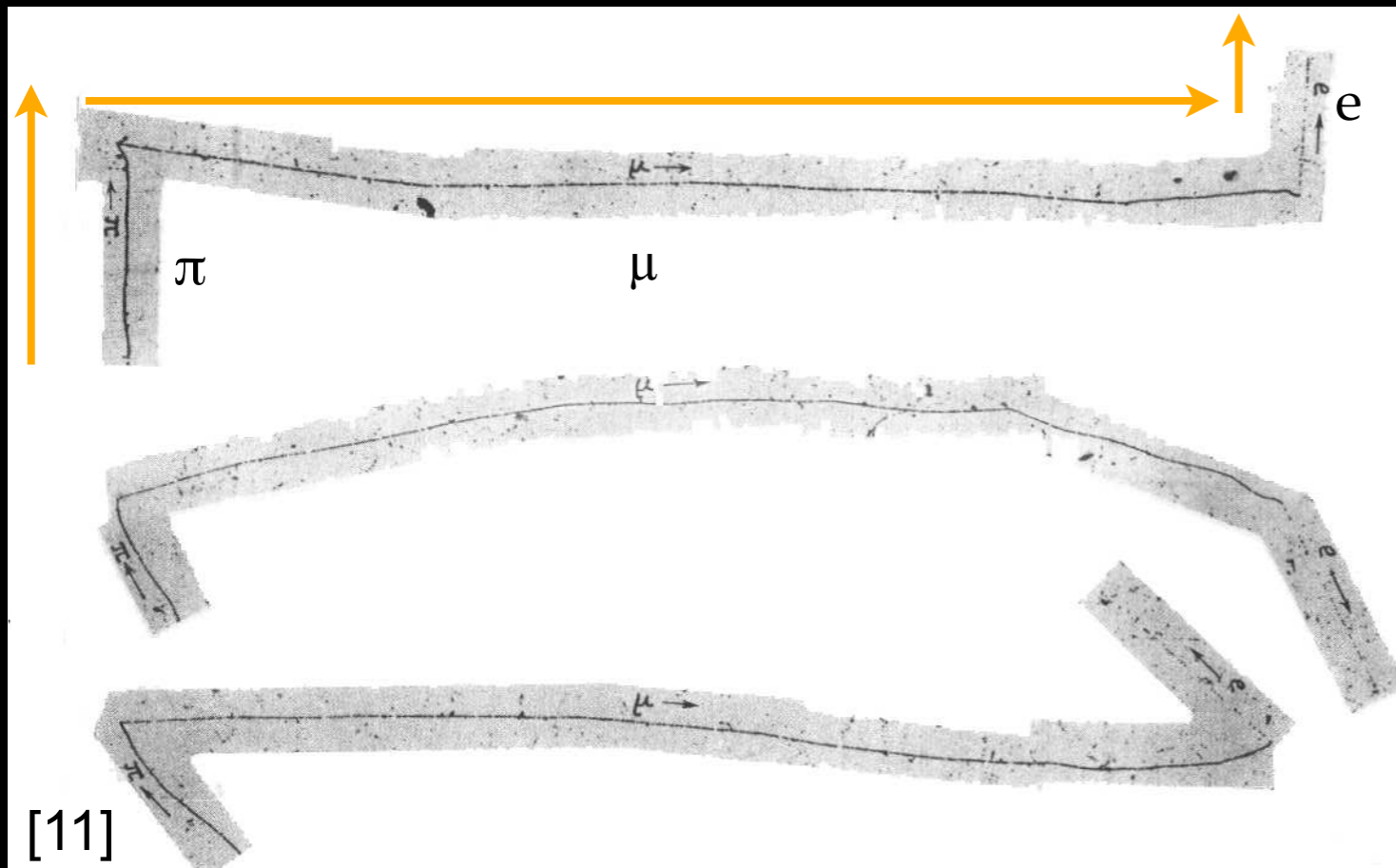
- Austausch von schweren Teilchen: **Pion**
 - Vorhergesagt von Yukawa:

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

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

- Entdeckung in Höhenstrahlung:

Powell / Perkins: 1947



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

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

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

- 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
- Vollständig beschrieben: Elektromagnetismus durch QED

weiter mit
elementaren Teilchen

STERNENFOLLEN | STERNEN

- 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

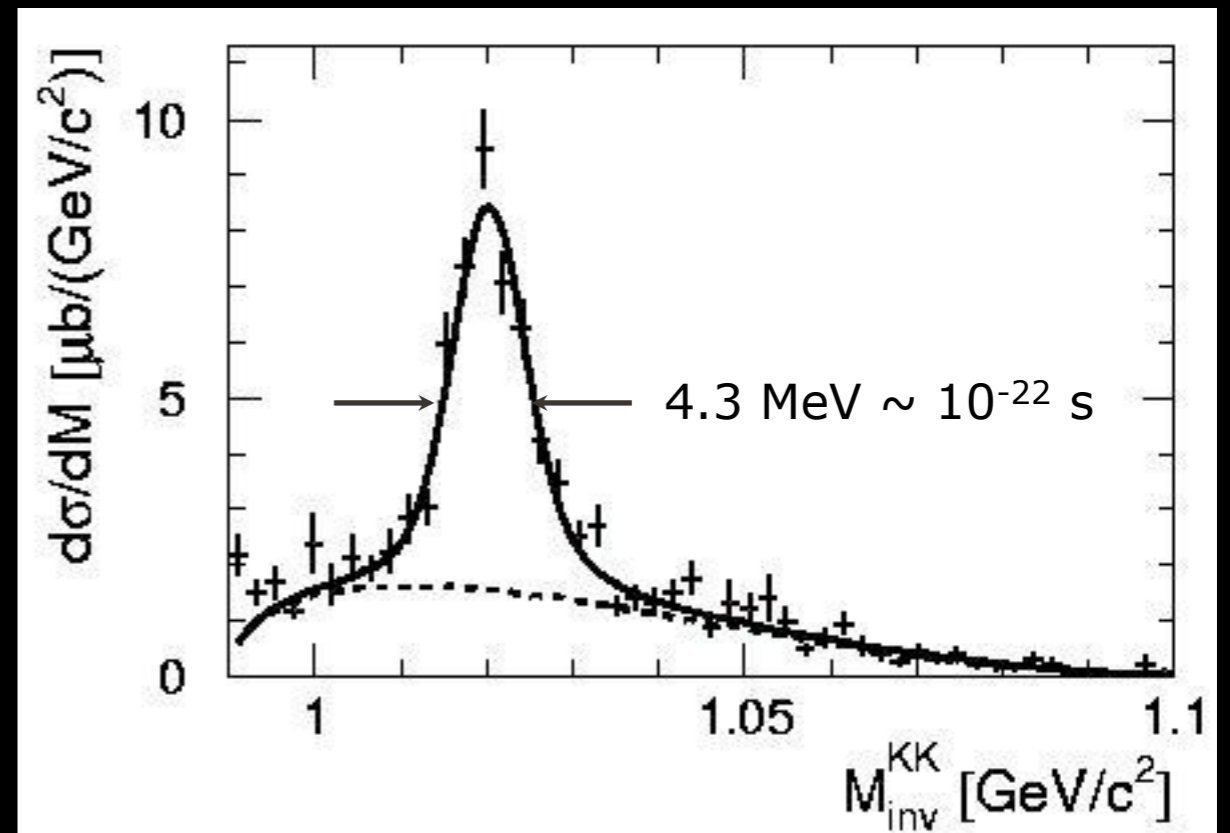
- invariante Masse M:

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

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

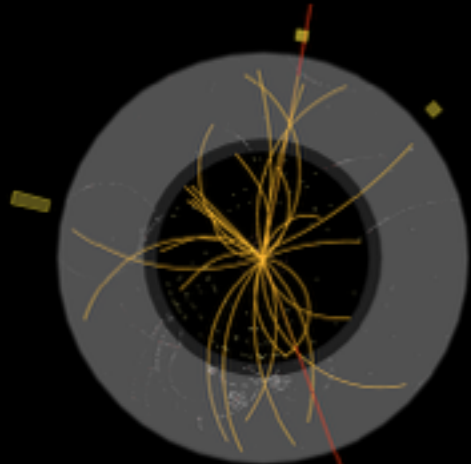
$$\rightarrow (Mc^2)^2 = \sum (E)^2 - \left(\sum \vec{p}c \right)^2$$

bleibt in Umwandlung erhalten!



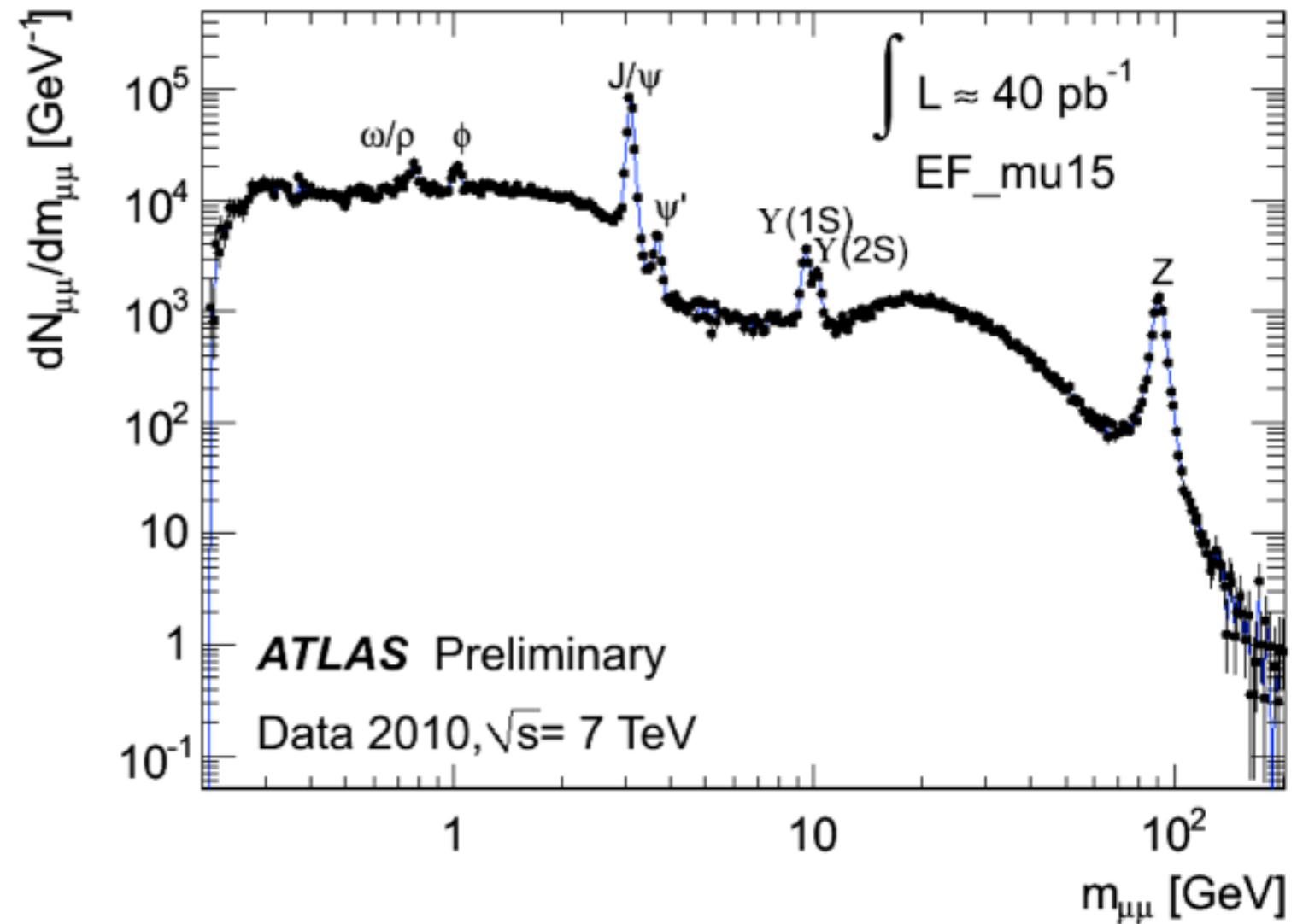
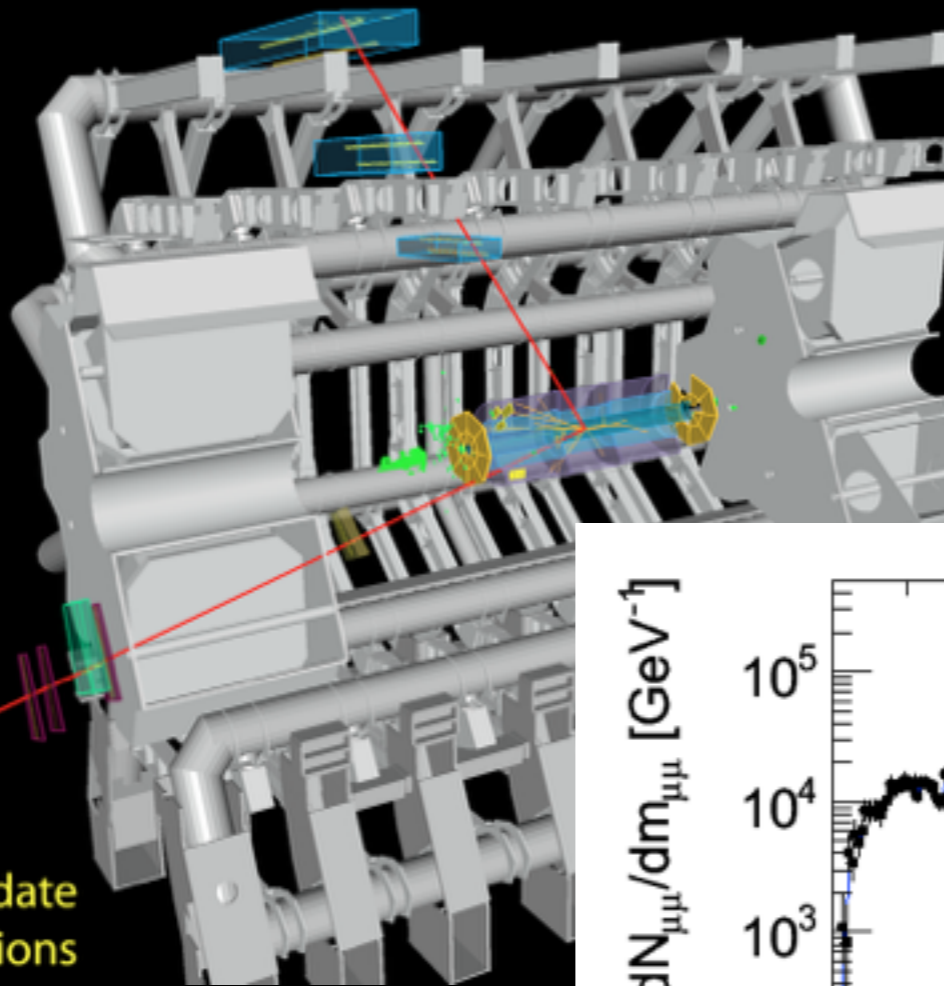
ATLAS
EXPERIMENT

Run: 154822, Event: 14321500
Date: 2010-05-10 02:07:22 CEST



$p_T(\mu^-) = 27 \text{ GeV}$ $\eta(\mu^-) = 0.7$
 $p_T(\mu^+) = 45 \text{ GeV}$ $\eta(\mu^+) = 2.2$
 $M_{\mu\mu} = 87 \text{ GeV}$

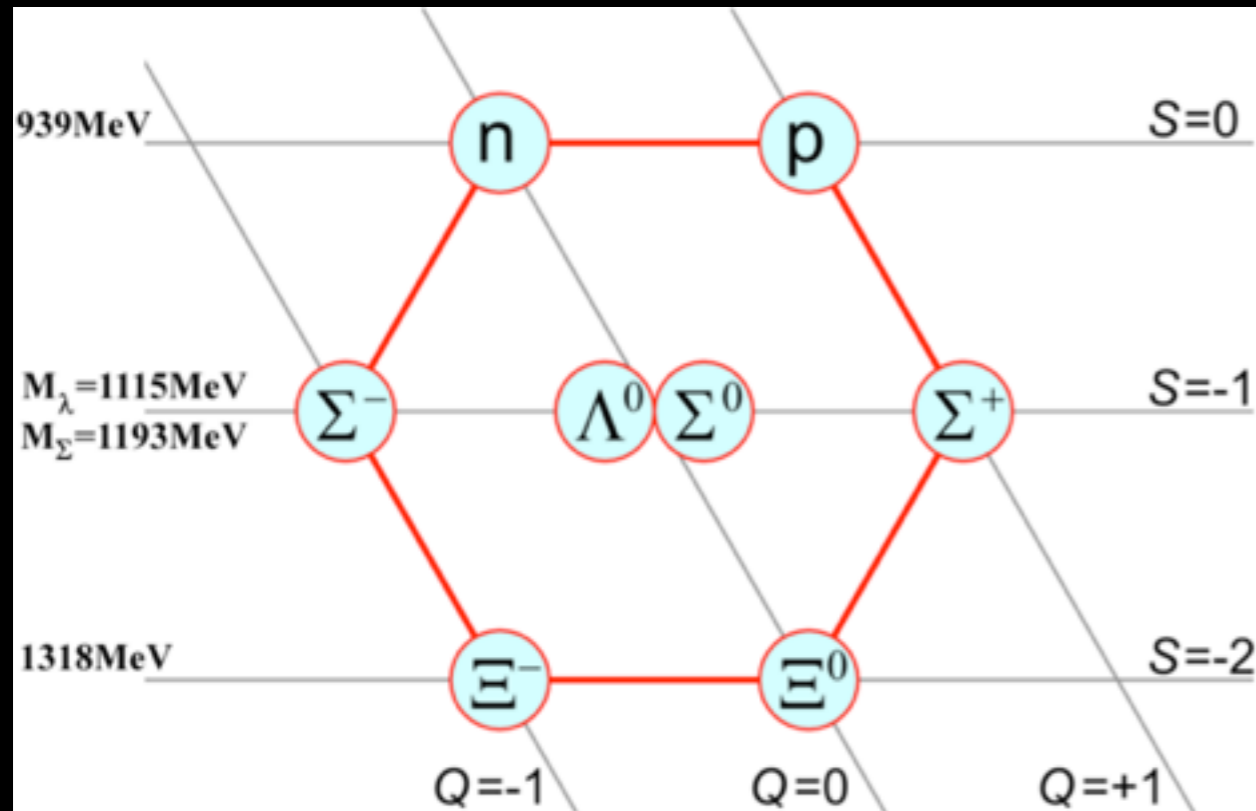
**Z $\rightarrow\mu\mu$ candidate
in 7 TeV collisions**



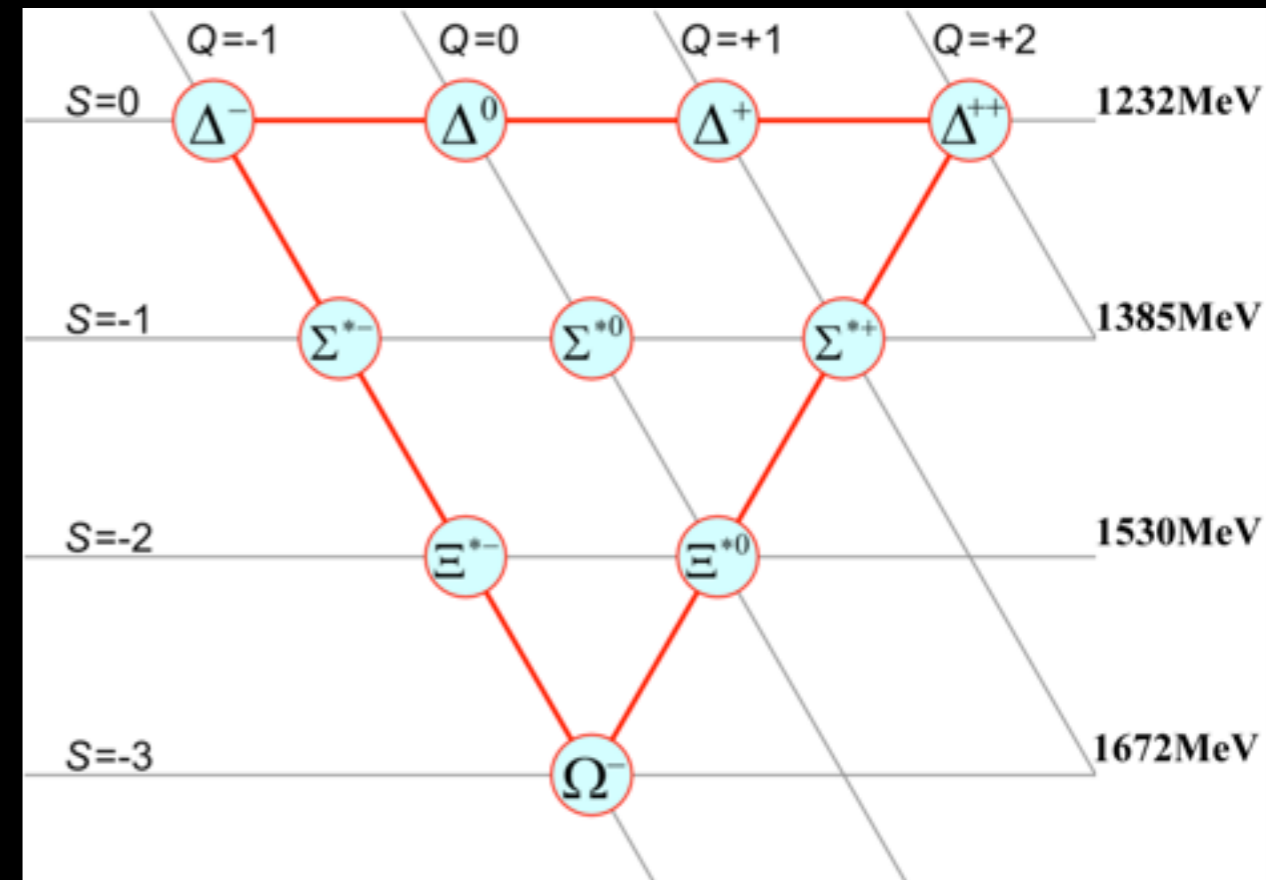
Hadron - Multiplets

- Suche nach Strukturen:

Spin = 1/2



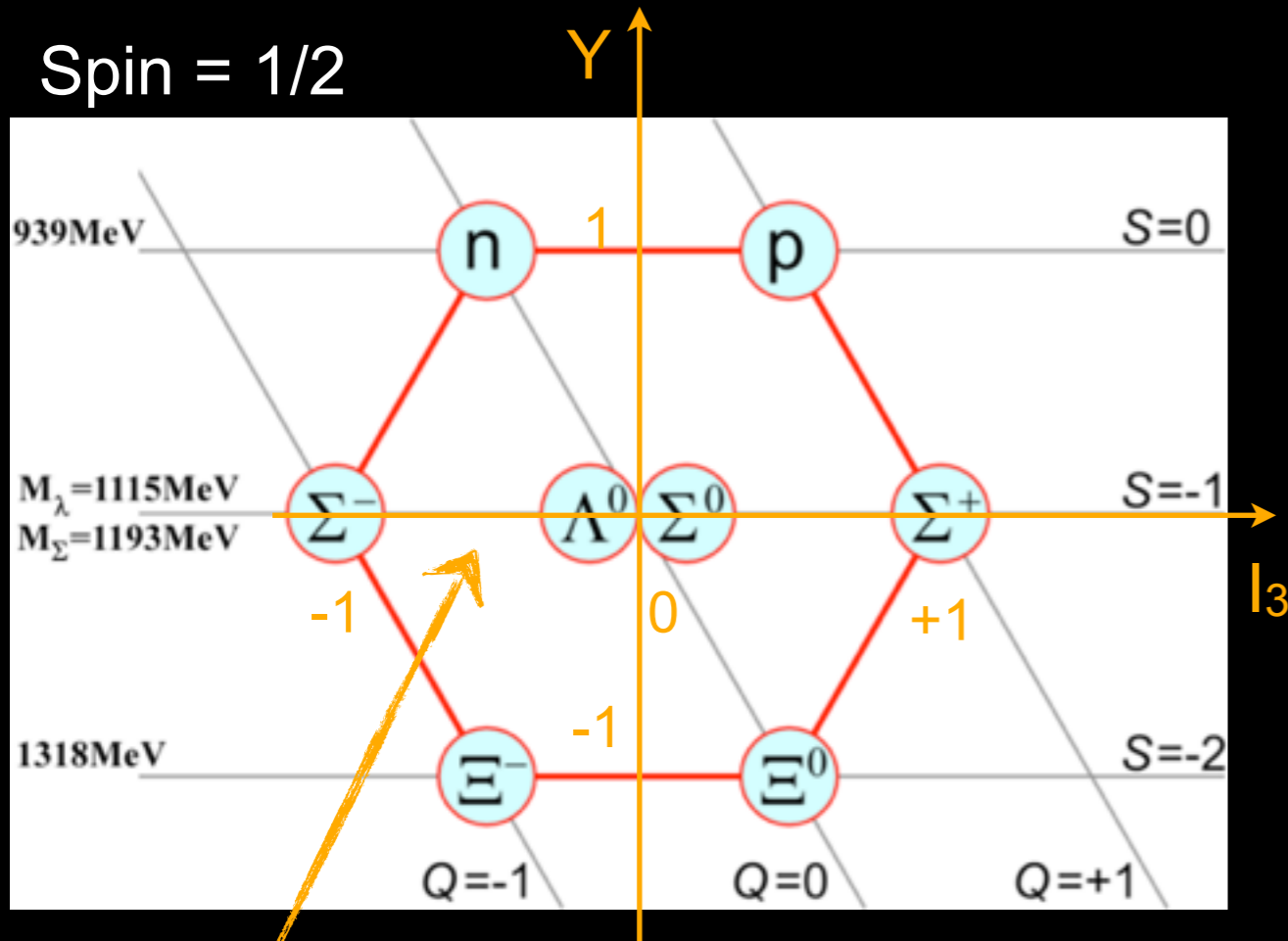
Spin = 3/2



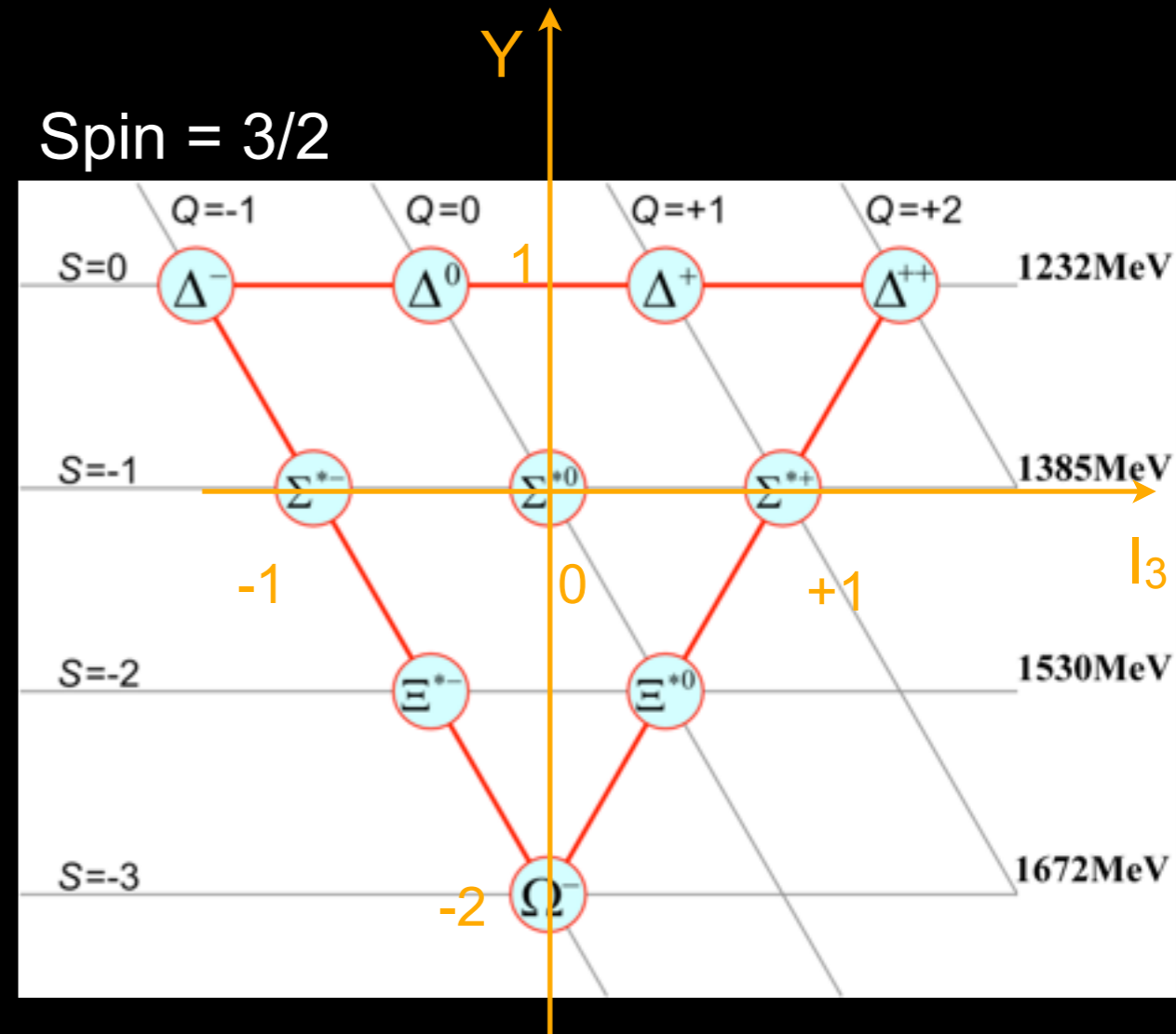
Hadron - Multiplets

- Suche Nach Strukturen:

Spin = 1/2



Spin = 3/2



Isospin:

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

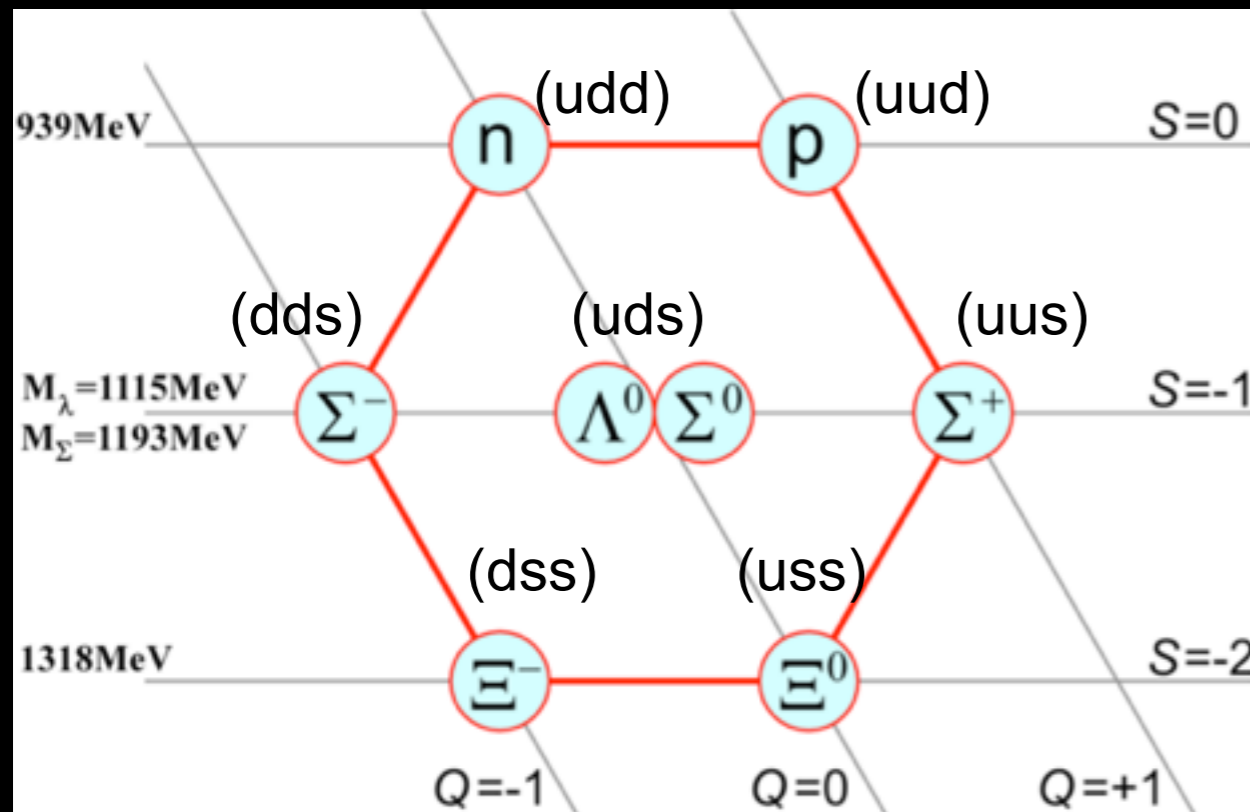
Formal analog zum Spin

Ordnung durch innere Struktur

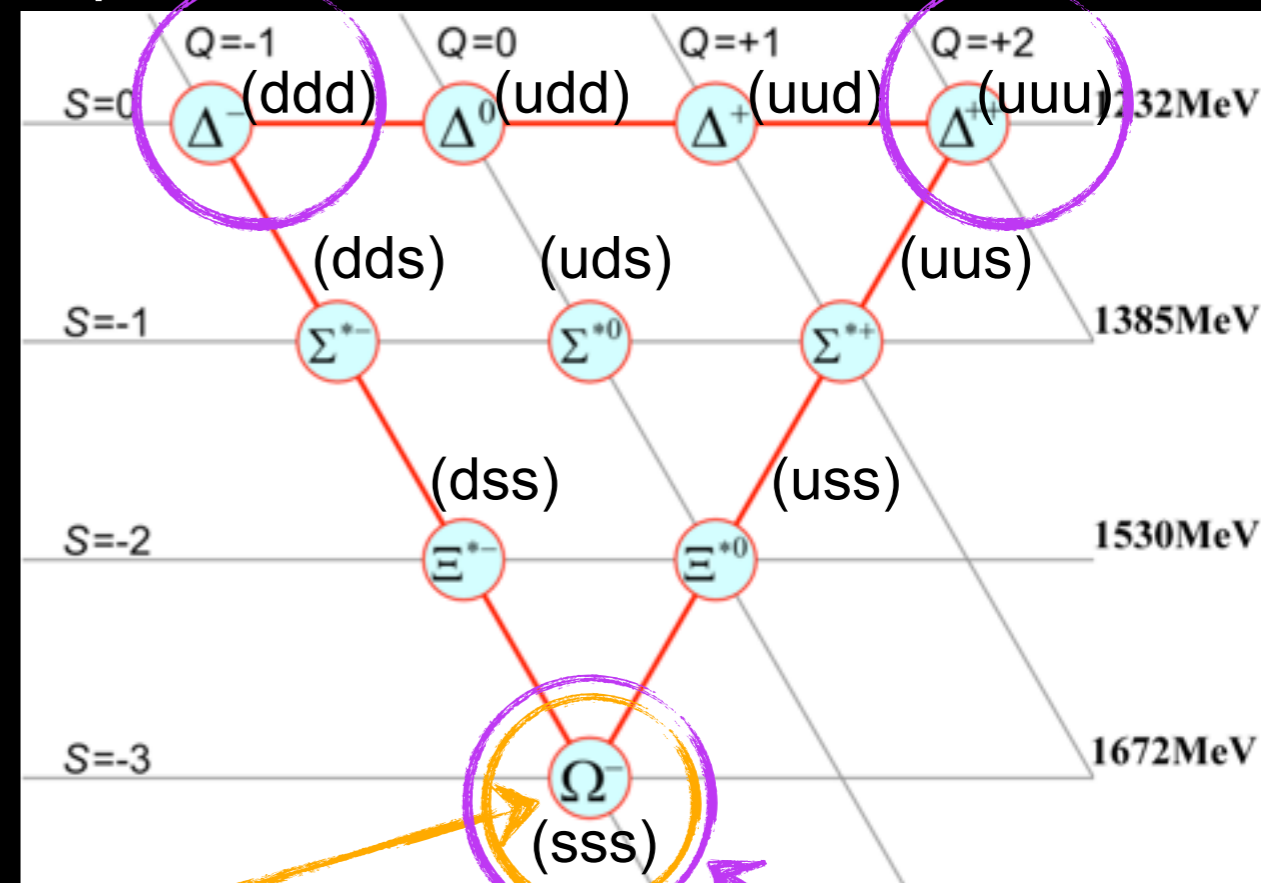
- Postulat:
 - Es gibt **3 fundamentale Teilchen** aus denen alle Hadronen aufgebaut sind (+ Antiteilchen)
 - **Quarks:** up, down, strange

Gell-Mann / Zweig: 1963

Spin = 1/2



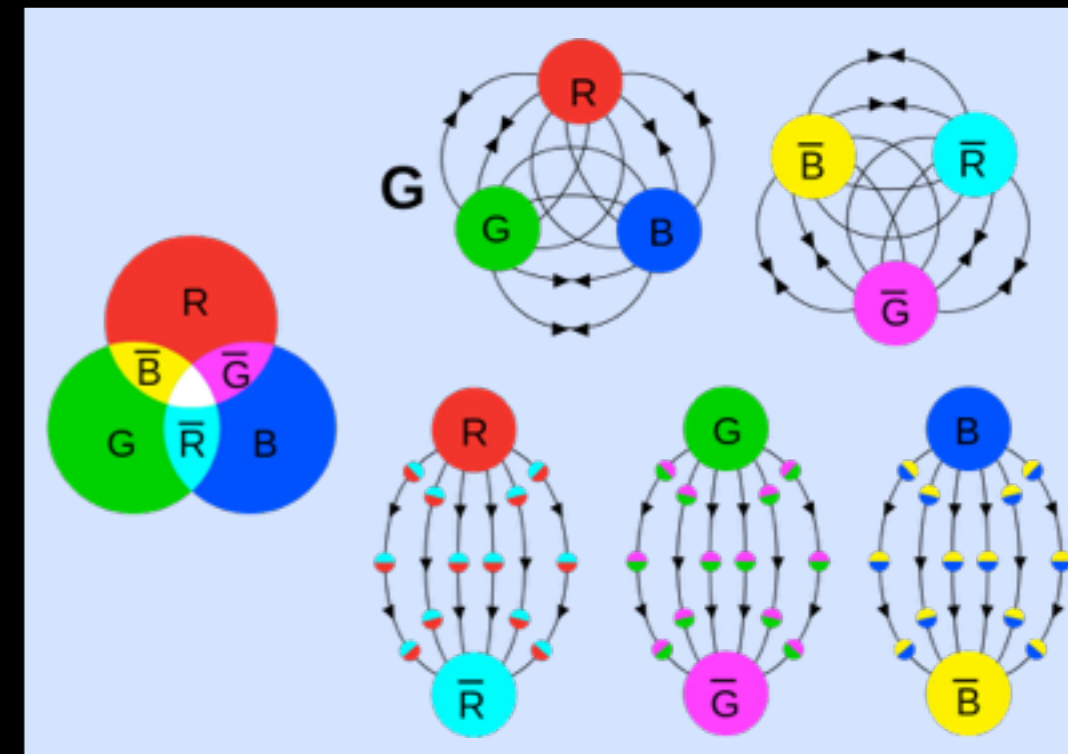
Spin = 3/2



Vorhersage vor experimenteller Entdeckung

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)
 - Vektorieller Charakter
 - Farbe = Ladung der ‚starken‘ (Kern-) Wechselwirkung
 - Botenteilchen: Gluon (masselos)
 - Ändern Farbladung der Quarks
 - ⇒ besitzen selbst Farbe (und Anti-Farbe)



• Dogma der QCD:

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

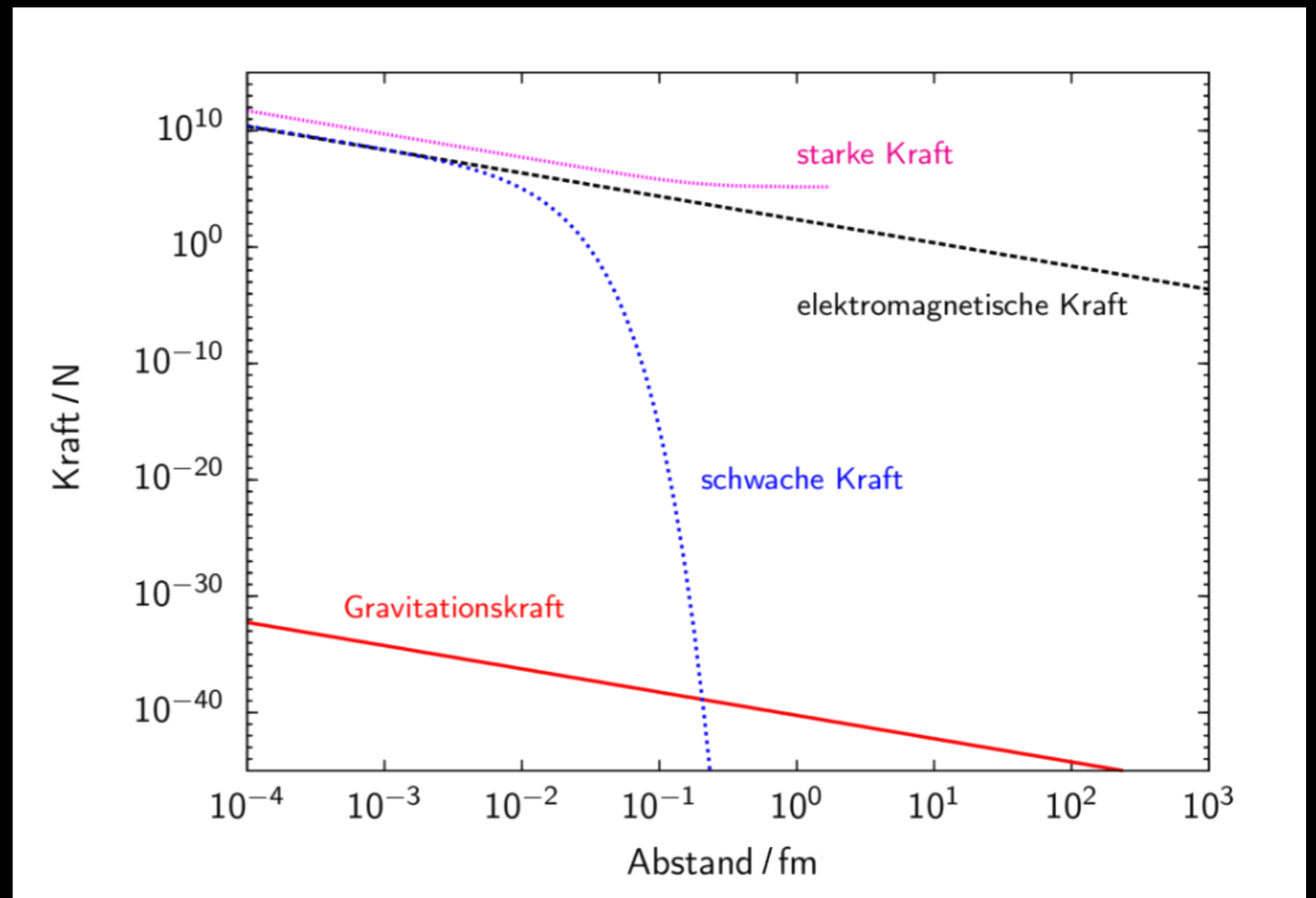
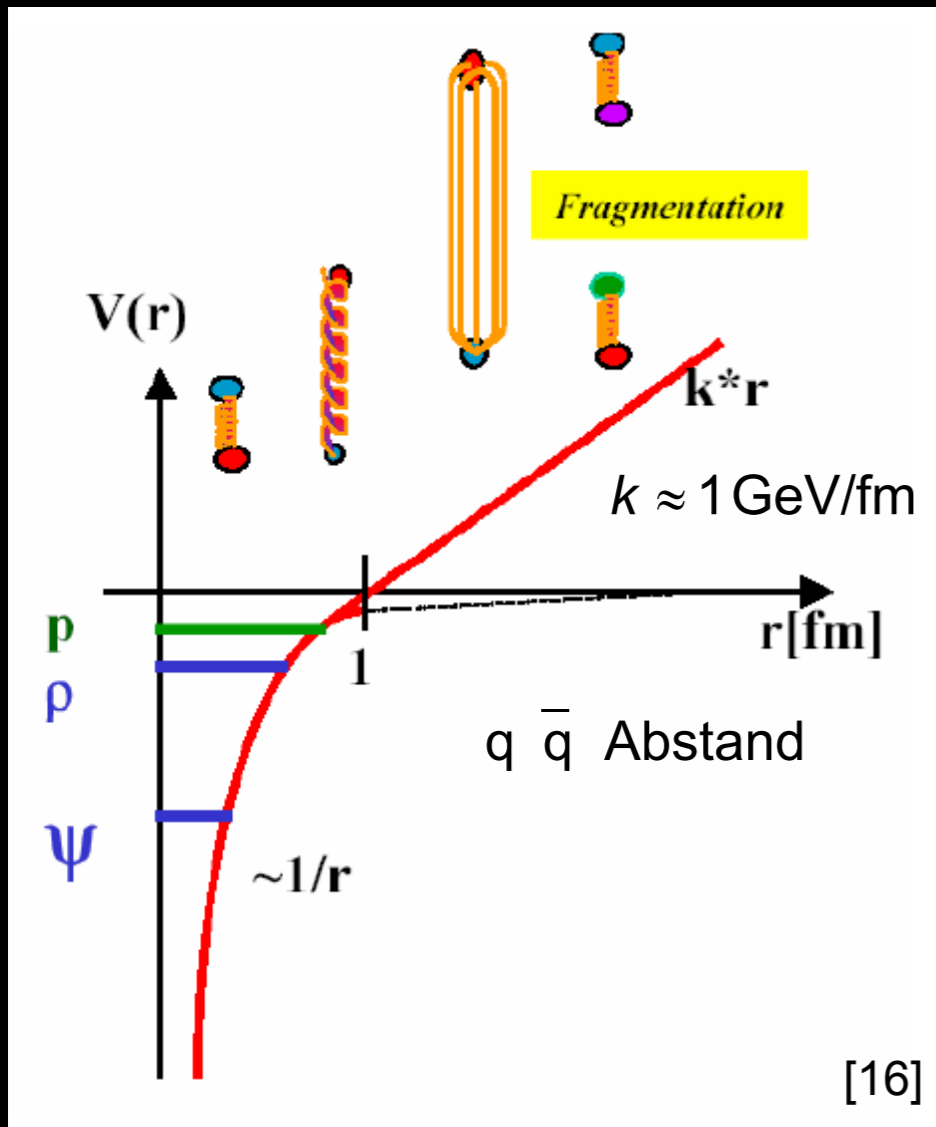
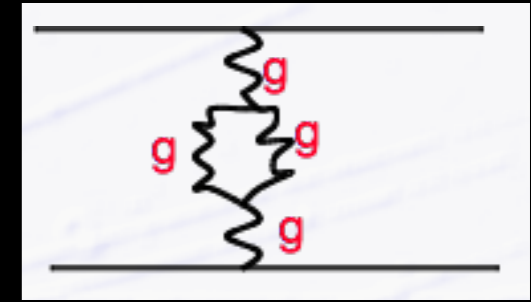
Glukonen - verflixter Kleber

- Glukonen besitzen Farbe → können mit sich selbst wechselwirken

- Fundamentaler Unterschied zur QED

- Potential:
$$V(r) = -\frac{4}{3} \frac{\alpha_s^{eff}}{r} + kr$$

„eff“ - Effektiv:
Kopplung
abhängig von r



Intermezzo: Farbe & andere Ladungen

- Ladungen sind die Quelle von Kräften

Unterrichtsmaterialien Netzwerk Teilchenwelt
Susanne Duehrkoop - Mittwoch Mittag

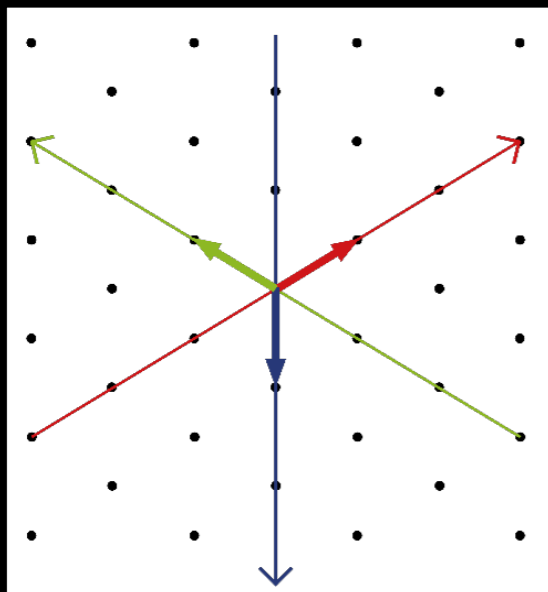
- Zu jeder Wechselwirkung gehört eine Ladung
 - Nur Teilchen, die die passende Ladung besitzen nehmen teil

Welchselwirkung	Ladung	Zeichen = Einheit
Elektromagnetismus	elektrische	$q = 1$ Elektron
Schwache WW	schwache	$I = 1/2$
Starke WW	Farbe	$\vec{C} = \text{rot, grün, blau}$

- Ladungen sind **additiv**

- Bsp.: Kernladung = Summe der Protonen Ladungen
- Gleiches für schwache Ladung
- Wie funktioniert das für die **Farbladung**?

- Ladungen sind erhalten**
 - In allen Reaktionen



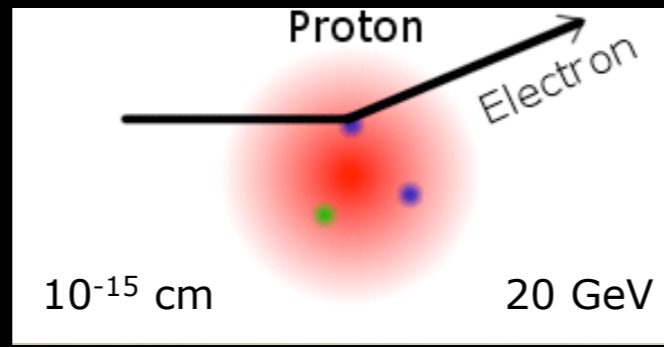
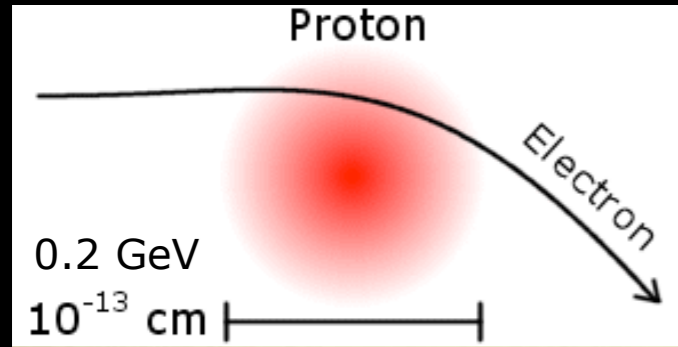
- Farb-Ladung ist ein 2D Vektor



$$\vec{C}_u + \vec{C}_u + \vec{C}_d = \rightarrow + \leftarrow + \downarrow = \downarrow \rightarrow = \vec{0}$$

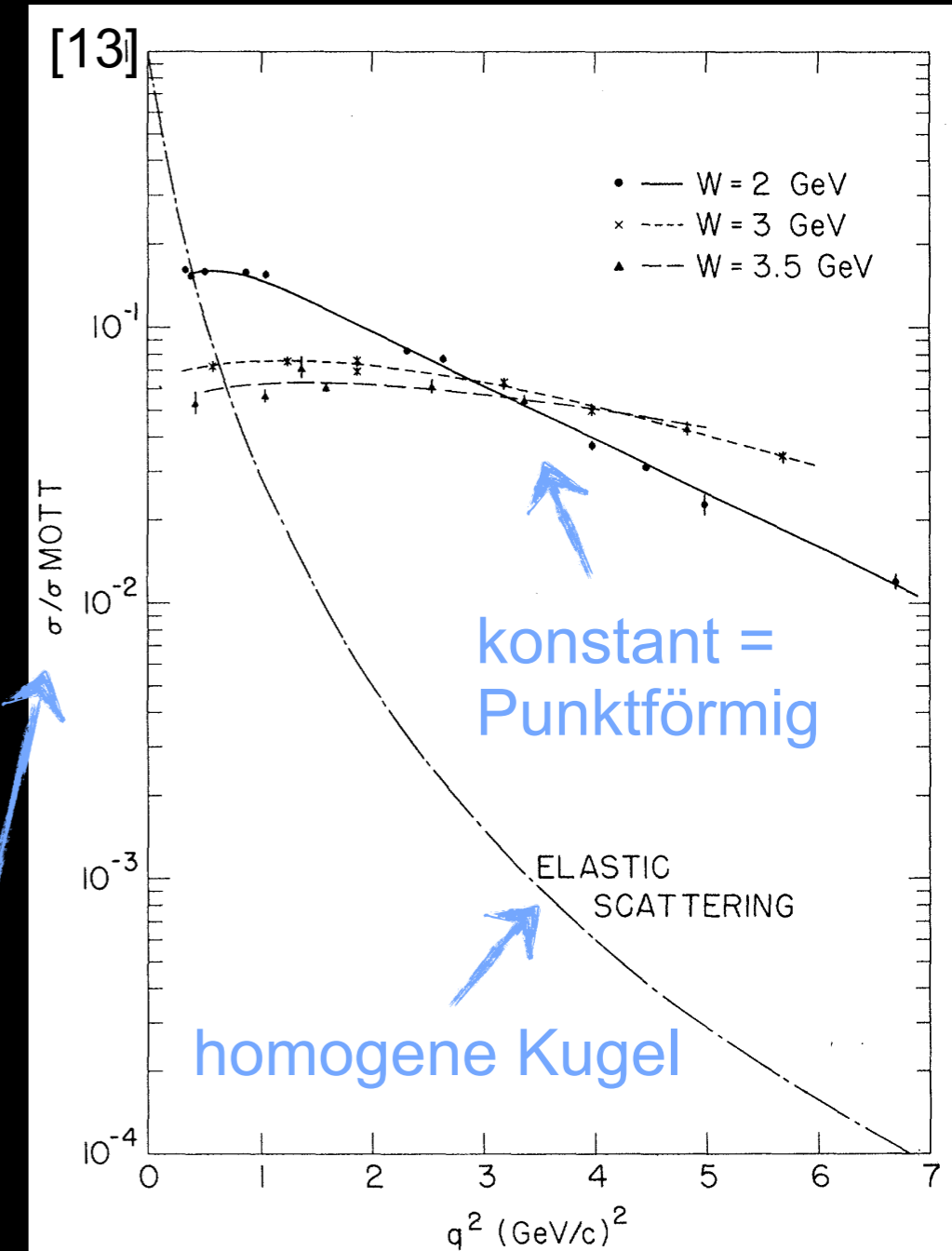
- Bsp.: **Proton**:
 - Summe der Farbvektoren = 0 (**weiß**)

Elektron-Streuung am Proton



Friedmann, Kendall, Taylor: 1969

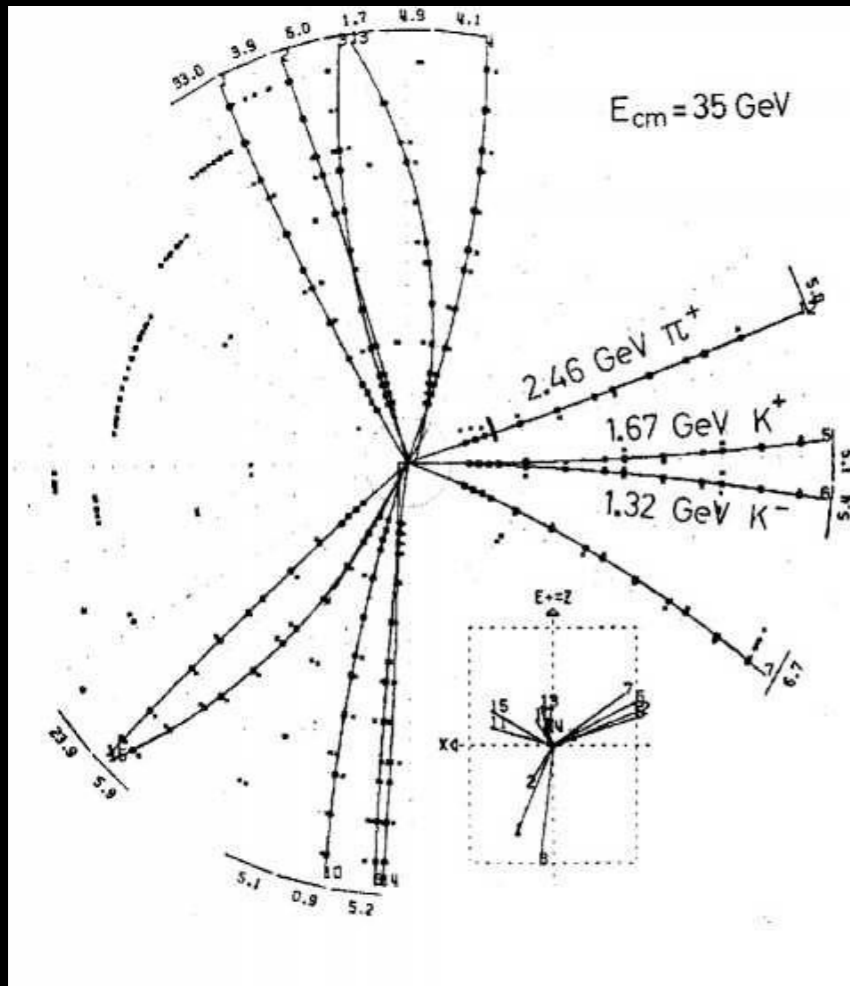
- **Elastische Streuung:**
 - Messung des Proton Radius
- **Inelastische Streuung:**
 - Streuung an Konstituenten
- **Relativistische Ereignisse**
 - Ereignisse charakterisiert durch Impulsübertrag² = q^2 , Anstelle des Streuwinkels
 - $(\Delta E + m_p c^2)^2 = (\Delta \vec{p})^2 c^2 + (m_W c^2)^2$
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



Formfaktor F

Desy (Petra): 1979

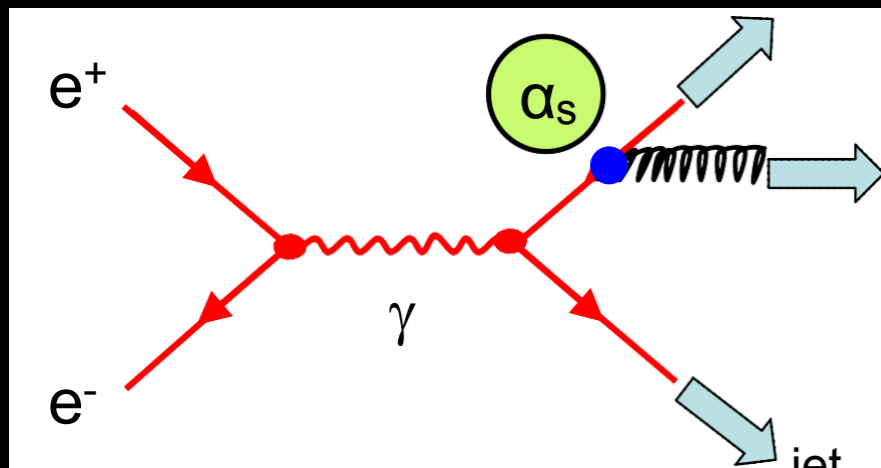
- Erzeugung von Quark - Antiquark Paaren
 - 3ter „jet“ durch Gluonstrahlung



- Bestimmung der Kopplungskonstanten:

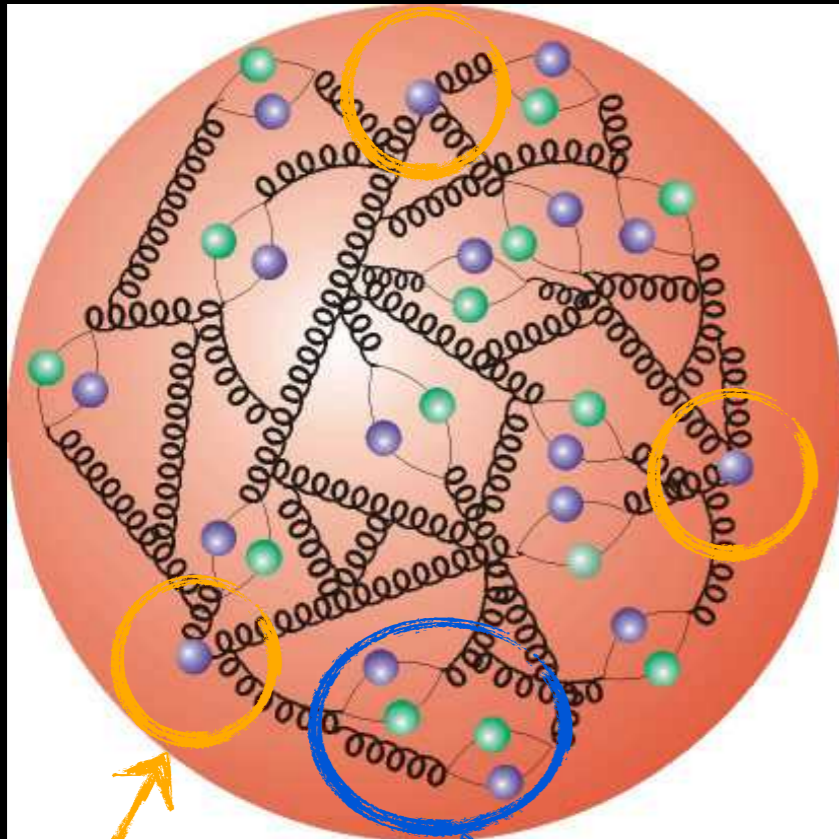
$$\alpha_s \sim \frac{\# \text{ 3 jet events}}{\# \text{ 2 jet events}}$$

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



Das Proton - heute

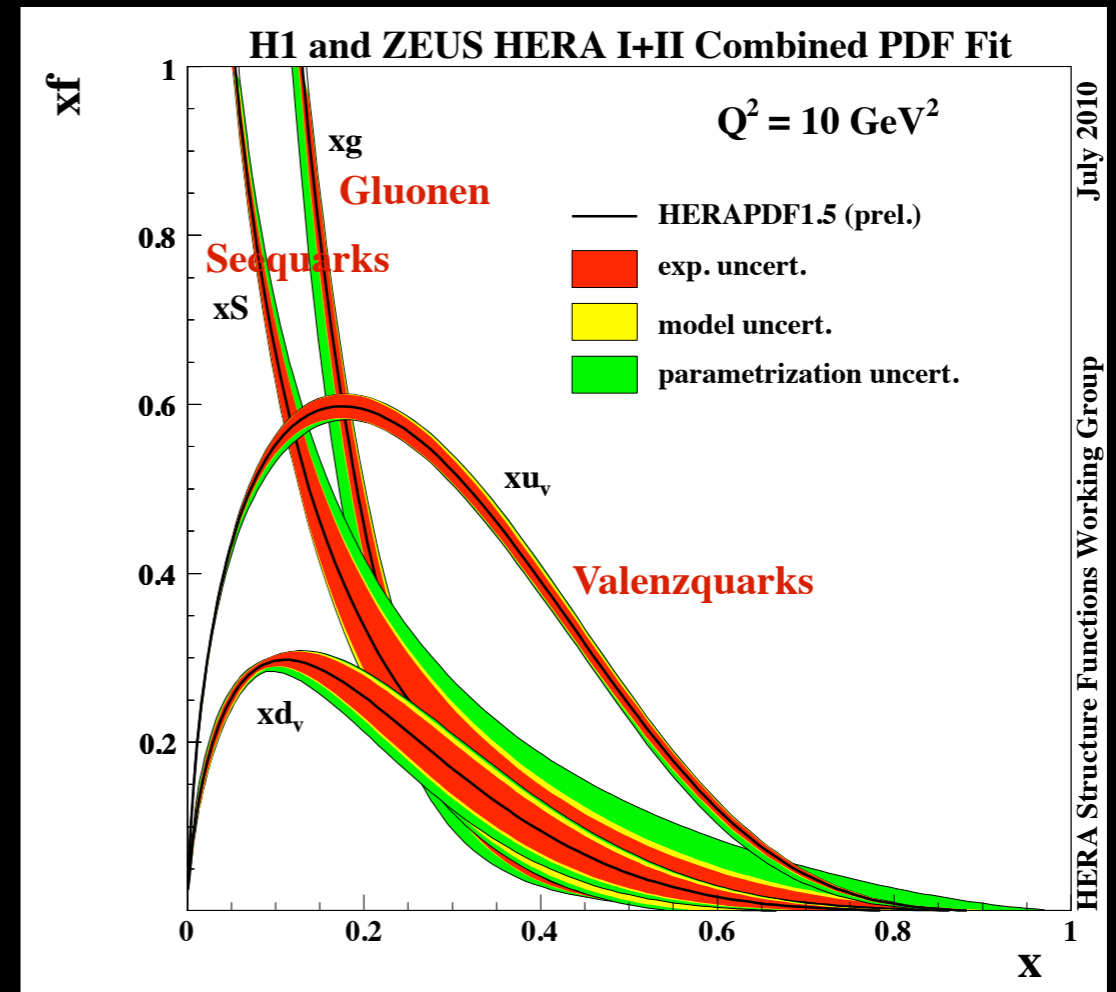
- Komplexes Viel-Teilchen-System
 - Quarks, Antiquarks, Gluonen



Valenzquarks
(uud)

Seequarks
Quark-Antiquark Paare

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



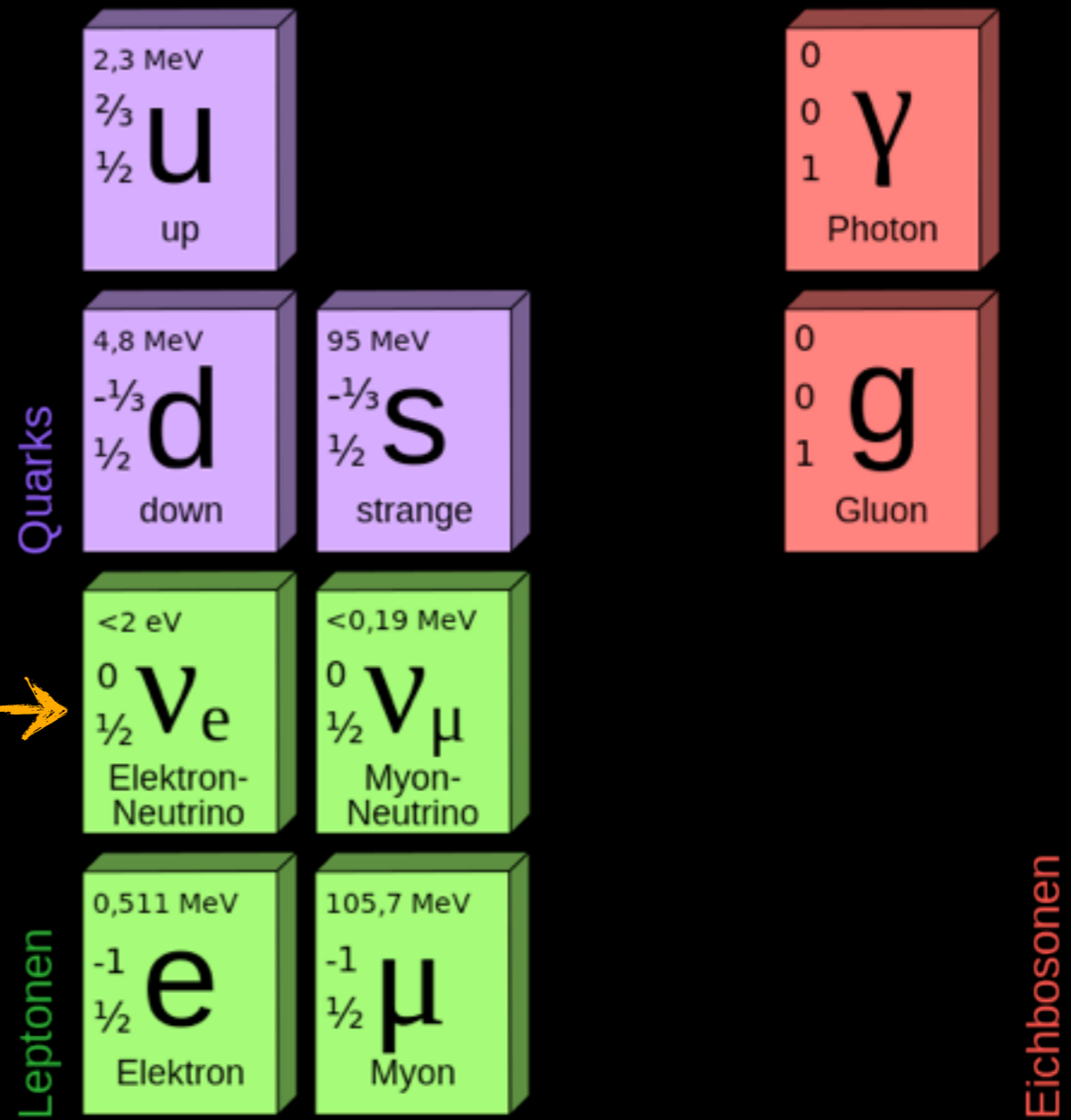
x: Impulsanteil des Partons am Proton
(Björken x)

Was wir bisher kennengelernt haben

• Elementare Teilchen

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

Neutrinos bisher vernachlässigt →



Schwache Wechselwirkung

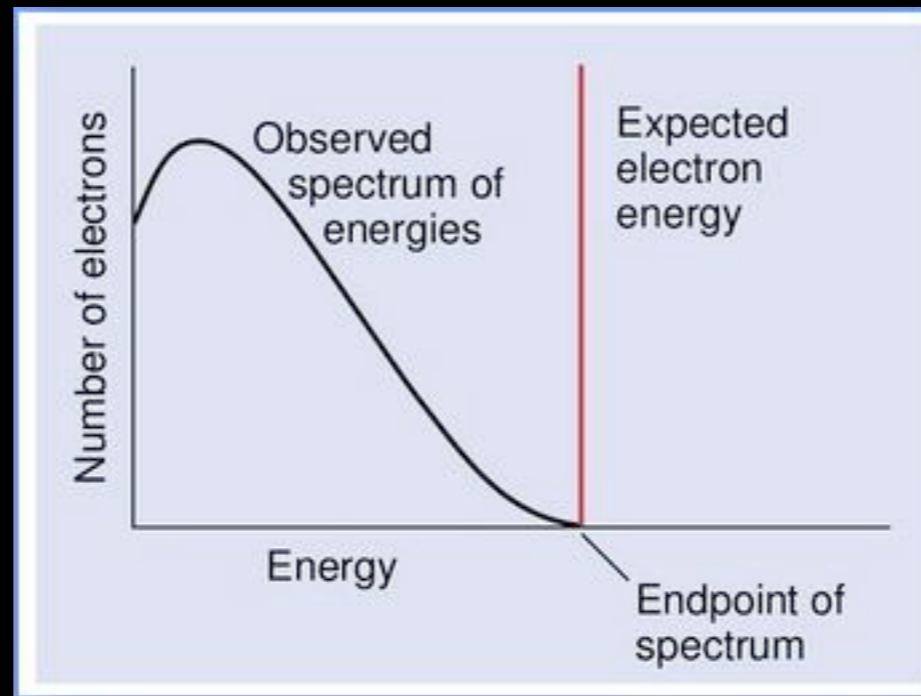
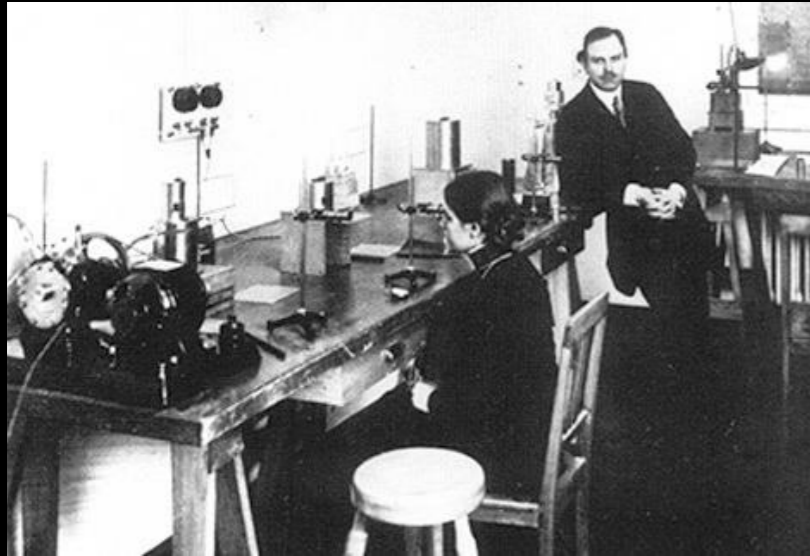
- **Zurück zum Anfang des 20. Jahrhunderts**
 - 1895: Wilhelm Röntgen entdeckt Röntgenstrahlung
 - 1896: Henri Becquerel entdeckt Strahlung von Urankristallen
 - 1898: Marie und Pierre Curie: Strahlung von Pechblende (U + Polonium)
- **Dauerte 35 Jahre um diese Phänomene grob zu verstehen**

β -Zerfall

- β - Zerfall von Atomkernen

Meitner, Hahn: 1911

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



- **Verletzung der Energieerhaltung?**

Pauli: 1930

- Lösung: zusätzliches sehr leichtes Teilchen im Zerfall erzeugt

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

Neutrino (kleines Neutron)
Nachweis erst 1956.

- Beobachtungen:

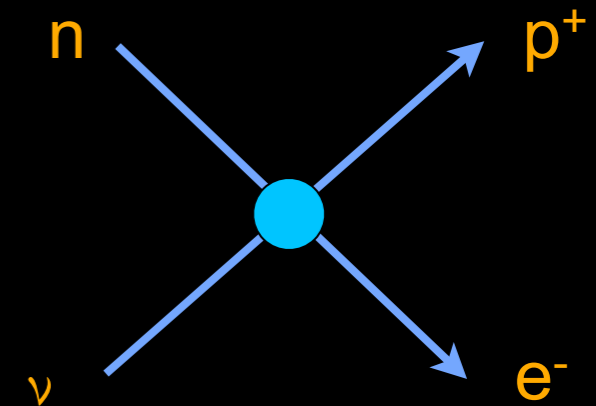
Fermi: 1934

- Umwandlung von Materie Teilchen
- Schwach (lange Lebensdauer im Vergleich zu EM Zerfällen)
- Kurze Reichweite

⇒ **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: $p, n / e, \nu$

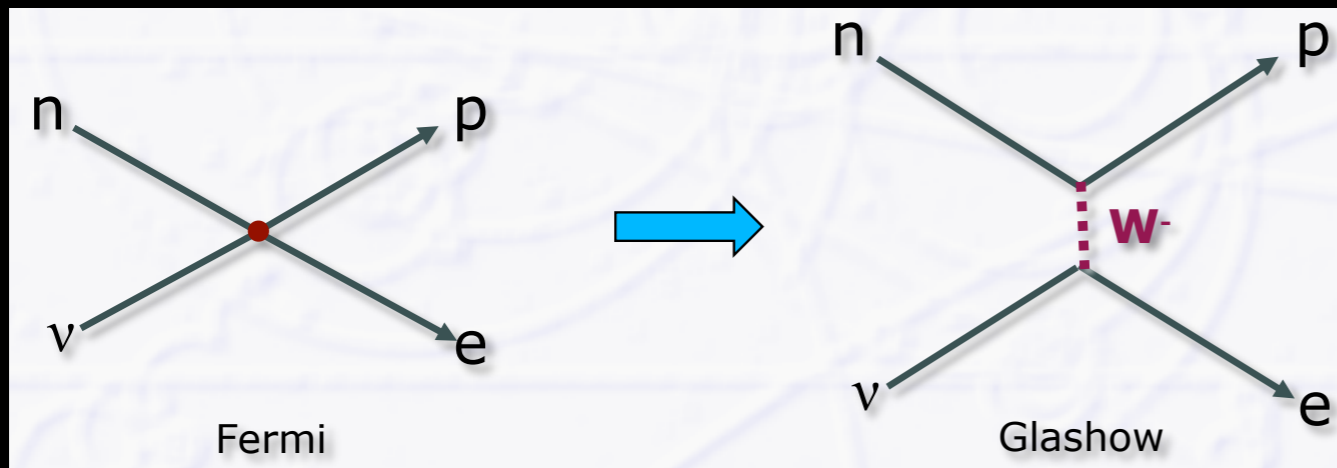


⇒ Berechnung von β - Zerfällen & Wechselwirkungswahrscheinlichkeiten möglich

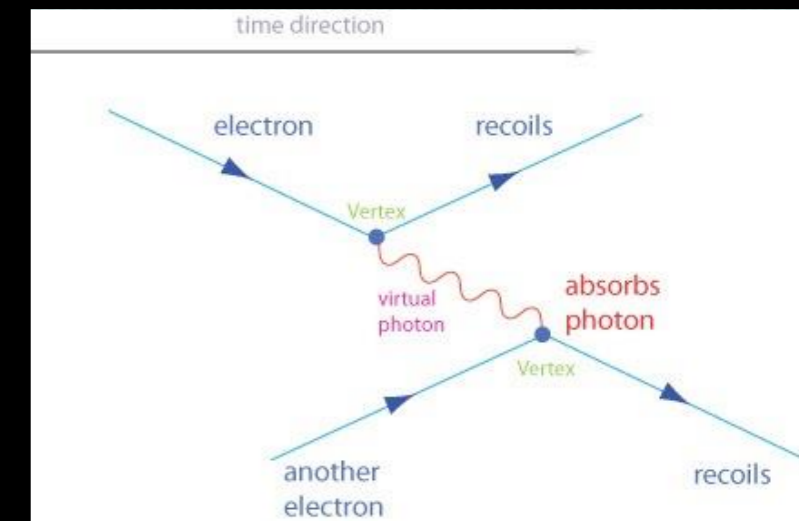
- Großes Problem in ~ 1950
 - Streuquerschnitt für $p + \nu \sim (G_F E_\nu)$
 - **Verletzt Unitarität** für $E > 300 \text{ GeV}$ (Wahrscheinlichkeit > 1)

Glashow: 1958

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



Elektron Streuung

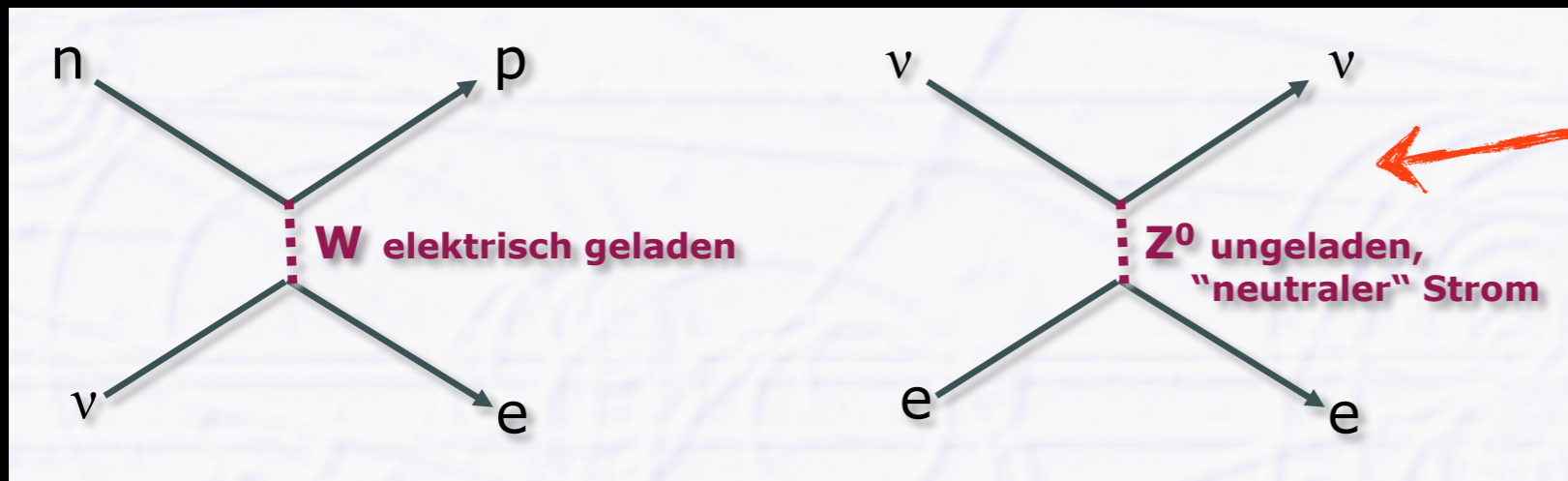


- Große Masse des W - Teilchens erklärt kurze Reichweite ($\sim 10^{-18} \text{m}$) und kleine Wechselwirkungswahrscheinlichkeit

Elektroschwache Wechselwirkung

- Erkenntnis: Elektromagnetische & schwache Wechselwirkung sind Manifestationen derselben zugrundeliegenden WW sind
- Vereinheitlichung zur elektroschwachen Wechselwirkung!
 - Neue „schwache“ Ladung: besitzen Quarks & Leptonen

Glashow, Salam,
Weinberg: 1968



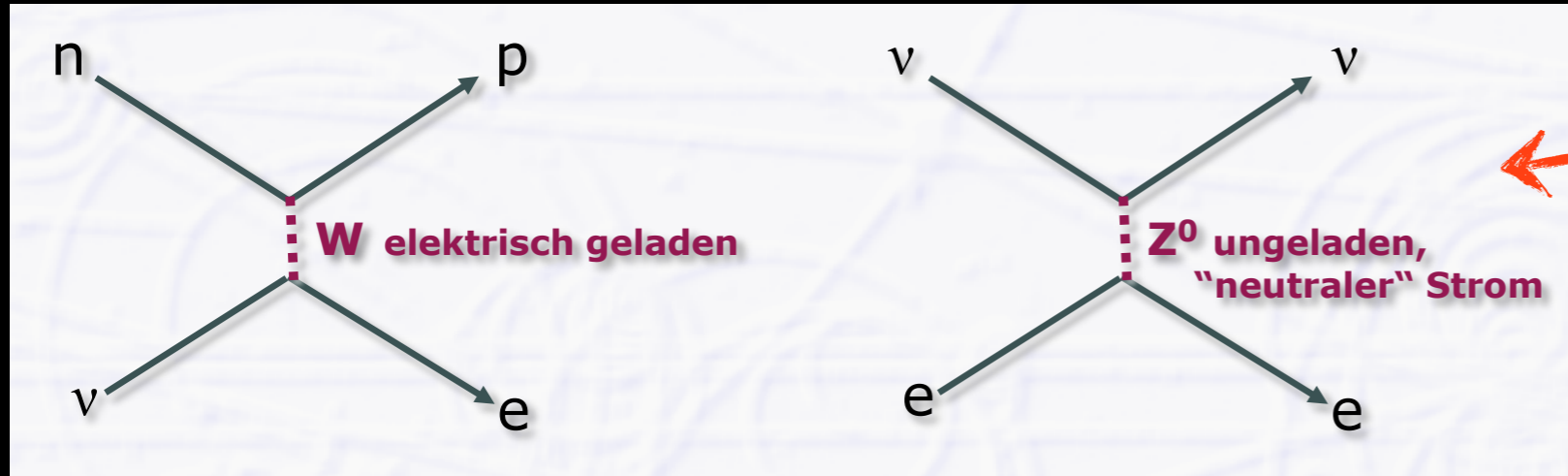
Zu dieser Zeit noch
unbeobachtet

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

Elektroschwache Wechselwirkung

- Vereinheitlichung zur **elektroschwachen** Wechselwirkung!
 - Neue „schwache“ Ladung: besitzen Quarks & Leptonen

Glashow, Salam,
Weinberg: 1968



Zu dieser Zeit noch
Unbeobachtet

schwache Hyperladung -
(Verbindung zur el. Ladung)

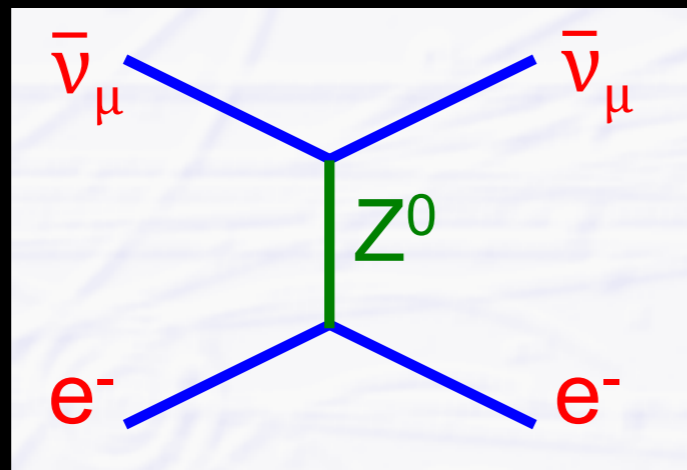
- Zu diesem Ansatz gehört eine neue Symmetrie ($SU(2) \times U(1)$)
 - Symmetrie nur bei großen Energien realisiert:
 - Wechselwirkungen haben gleiche Stärke!
 - Bei niedrigen Energien:
 - Symmetrie „spontan“ gebrochen
- W & Z Bosonen erhalten **Masse** durch Interaktion mit **Higgs** Feld
 - Mehr in Stunde 3

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

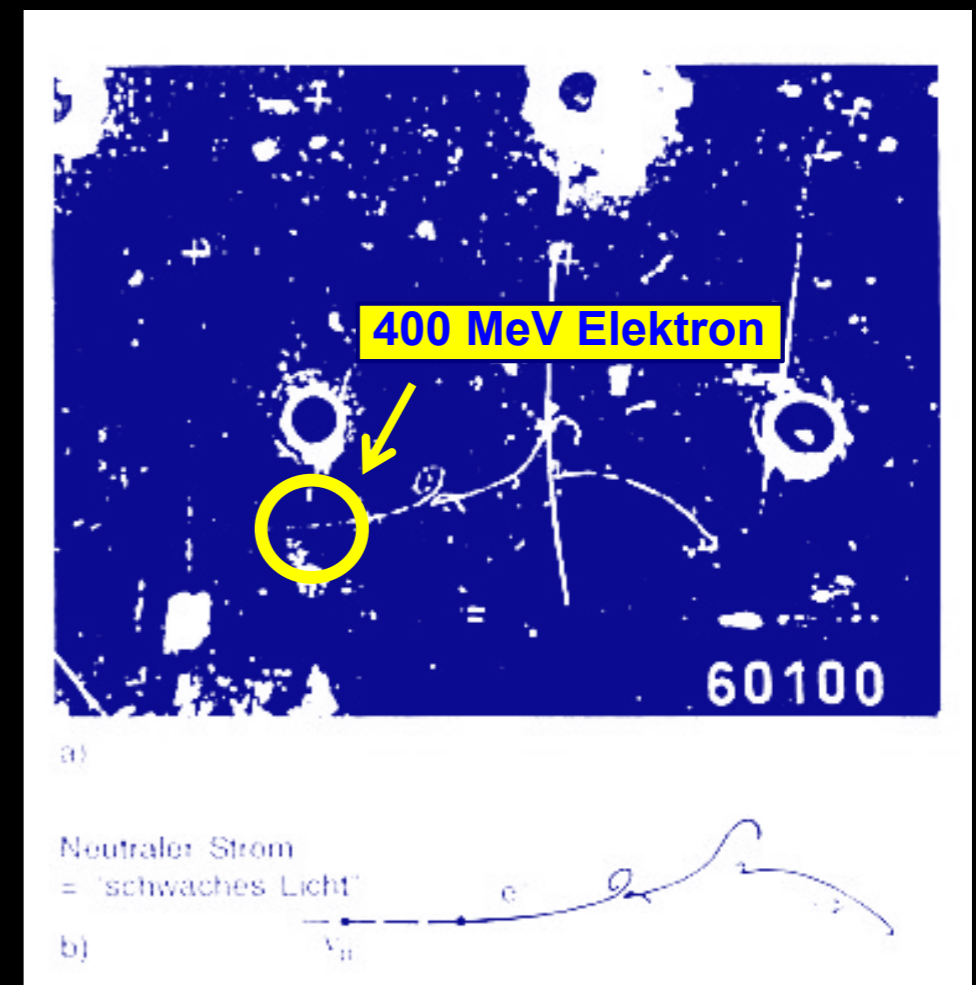
Entdeckung des neutralen Stroms

CERN: 1973

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



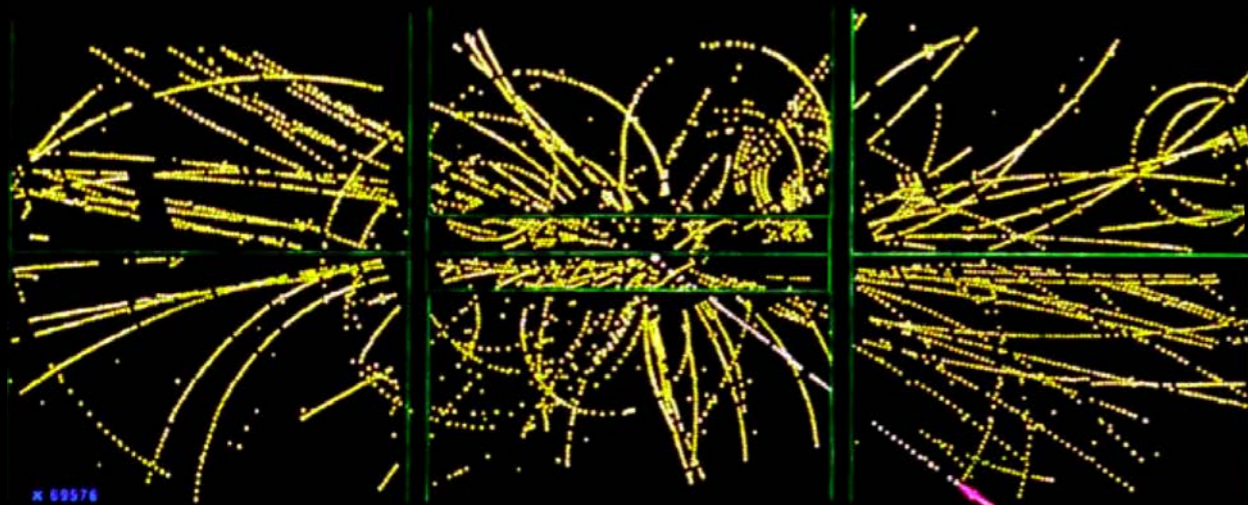
Gargamelle Blasen-kammer



Experimenteller Nachweis von W & Z

- SPS Beschleuniger im Kollisionsmodus:
 - Proton - Anti-Proton Kollisionen (Sp \bar{p} S)
 - Experimente UA1 & UA2

CERN: 1983



Hochenergetisches Elektron



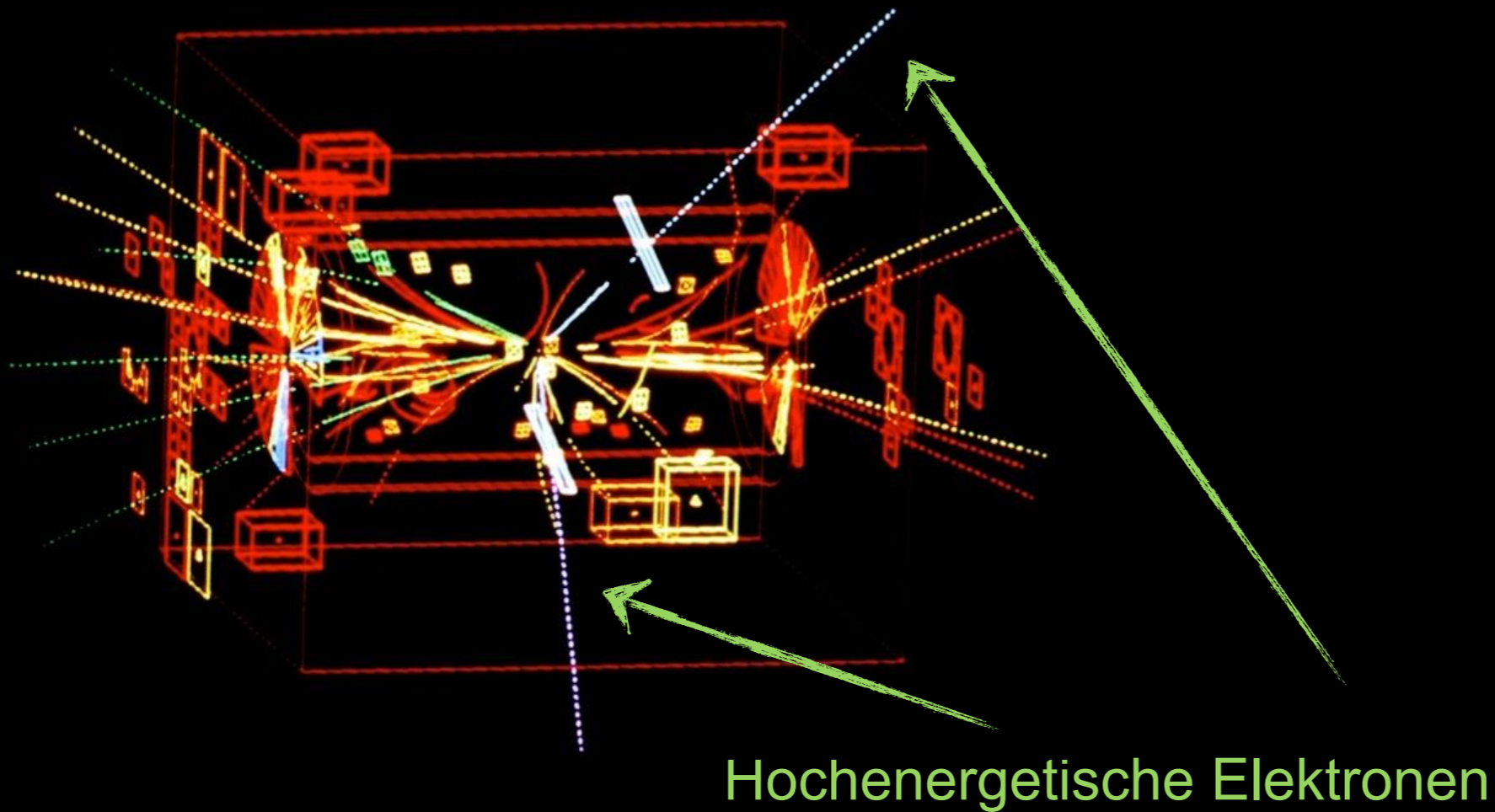
Rubio, van der Meer

Experimenteller Nachweis von W & Z

- SPS Beschleuniger im Kollisionsmodus:
 - Proton - Anti-Proton Kollisionen (Sp \bar{p} S)
 - Experimente UA1 & UA2

CERN: 1983

$$p\bar{p} \rightarrow Z^0 + X \rightarrow e^-e^+ + X$$



Rubio, van der Meer

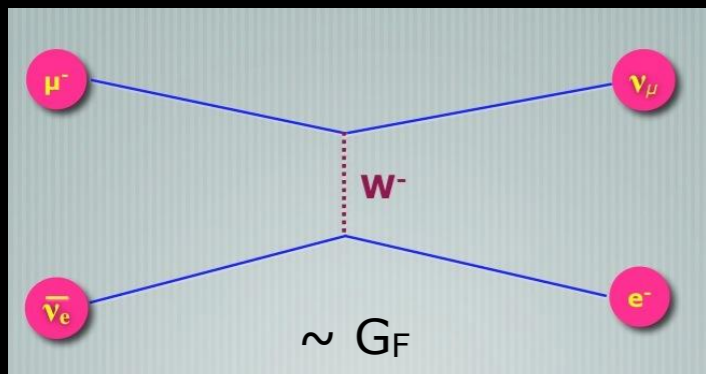
- **Quarks:** u, d, s

- **Leptonen:** $\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix}$

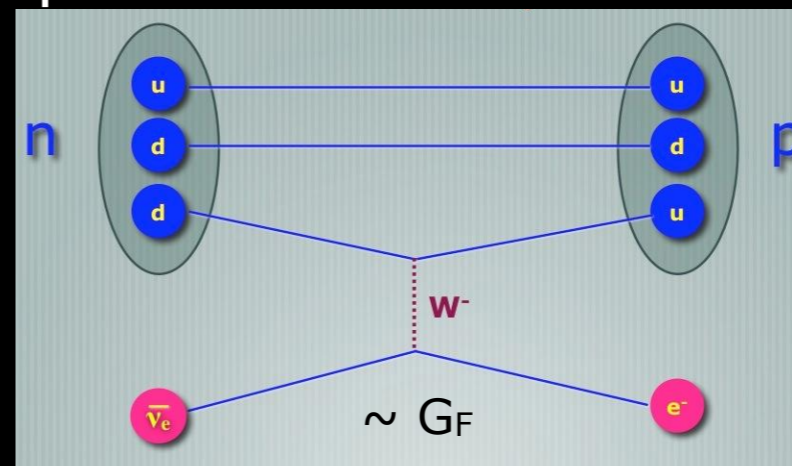
- Reaktionen der schwachen Wechselwirkung

↖ schwache Isospin
1/2 doublets!

Muon Zerfall

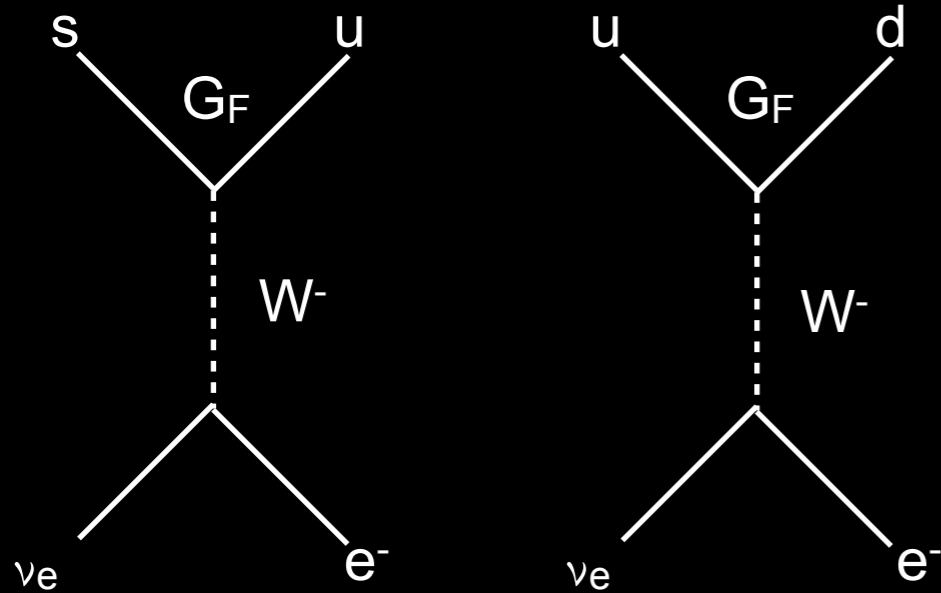


β -Zerfall



- Kopplungsstärke sollte **gleich sein**: gleiche schwache Ladung für Quarks & Leptonen
 - wurde aber leicht unterschiedlich gemessen!

Beobachtung in Teilchenreaktionen:



Beide Reaktionen sollten gleich häufig auftreten!

$$\frac{\begin{matrix} \text{(sdd)} \\ \Sigma^- \end{matrix} \rightarrow \begin{matrix} \text{(udd)} \\ n \end{matrix} + e^- + \bar{\nu}_e}{\begin{matrix} \text{(udd)} \\ n \end{matrix} \rightarrow \begin{matrix} \text{(uud)} \\ p \end{matrix} + e^- + \bar{\nu}_e} \sim 20$$

- Quarks (u,d,s) sind **Eigenzustände** der **starken WW!**
 - Diese ‚Teilchen‘ interagieren miteinander durch starke WW

Cabibbo: 1963
(5 Jahre nach
Einführung des W
Bosons)

- Erinnerung: **Teilchen sind Wellen!**
 - Können sich überlagern, interferieren, mischen (vgl. Elektrotechnik!)
- An schwacher Wechselwirkung ist eine **Mischung obiger Quarks** beteiligt

Eigenzustände der starken WW \neq Eigenzustände der schwachen WW

- Basistransformation:
$$\begin{pmatrix} \cos \theta_C & \sin \theta_C \\ -\sin \theta_C & \cos \theta_C \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |d\rangle \\ |s\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_C |d\rangle + \sin \theta_C |s\rangle \\ -\sin \theta_C |d\rangle + \cos \theta_C |s\rangle \end{pmatrix}$$

- Eigenzustände der schwachen WW: ‚schwache isospin doublets‘

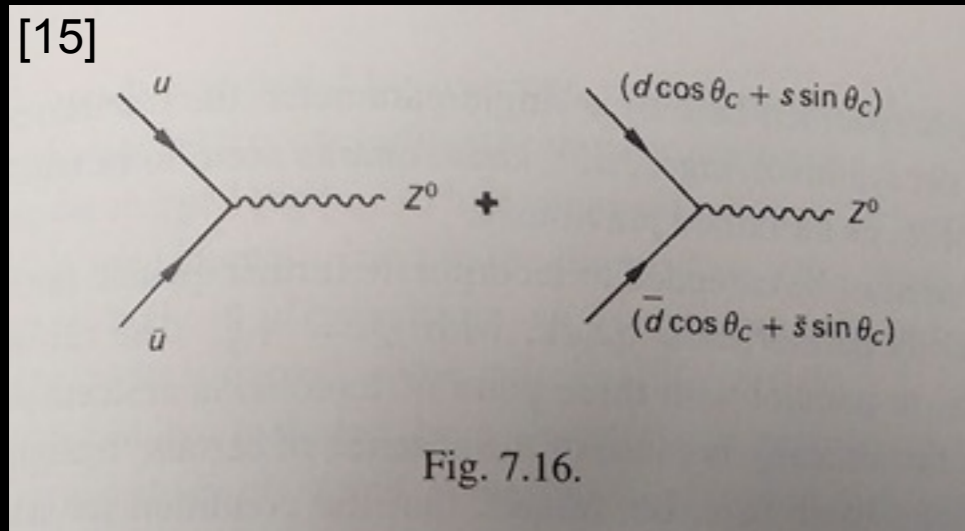
- **Quarks:**
$$\begin{pmatrix} |u\rangle \\ \cos \theta_C |d\rangle + \sin \theta_C |s\rangle \end{pmatrix} \quad (-\sin \theta_C |d\rangle + \cos \theta_C |s\rangle)$$
- **Leptonen:**
$$\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix}$$

Dies löst voriges Problem

Weitere Messungen - weitere ‚Probleme‘

- Neutrale ströme (Z^0) - keine flavour Änderung beobachtet

$$\frac{\begin{matrix} (\bar{u}s) \\ K^+ \end{matrix} \rightarrow \begin{matrix} (\bar{u}d) \\ \pi^+ \end{matrix} + \nu + \bar{\nu}}{\begin{matrix} (\bar{u}s) \\ K^+ \end{matrix} \rightarrow \begin{matrix} (\bar{u}u) \\ \pi^0 \end{matrix} + \mu^+ + \nu_\mu} \leq 10^{-5}$$



$$^{15]} \underbrace{u\bar{u} + (d\bar{d} \cos^2 \theta_c + s\bar{s} \sin^2 \theta_c)}_{\Delta S = 0} + \underbrace{(s\bar{d} + d\bar{s}) \sin \theta_c \cos \theta_c}_{\Delta S = 1}$$

„Flavour“ Änderung:
nicht beobachtet!

Weitere Messungen - weitere ‚Probleme‘

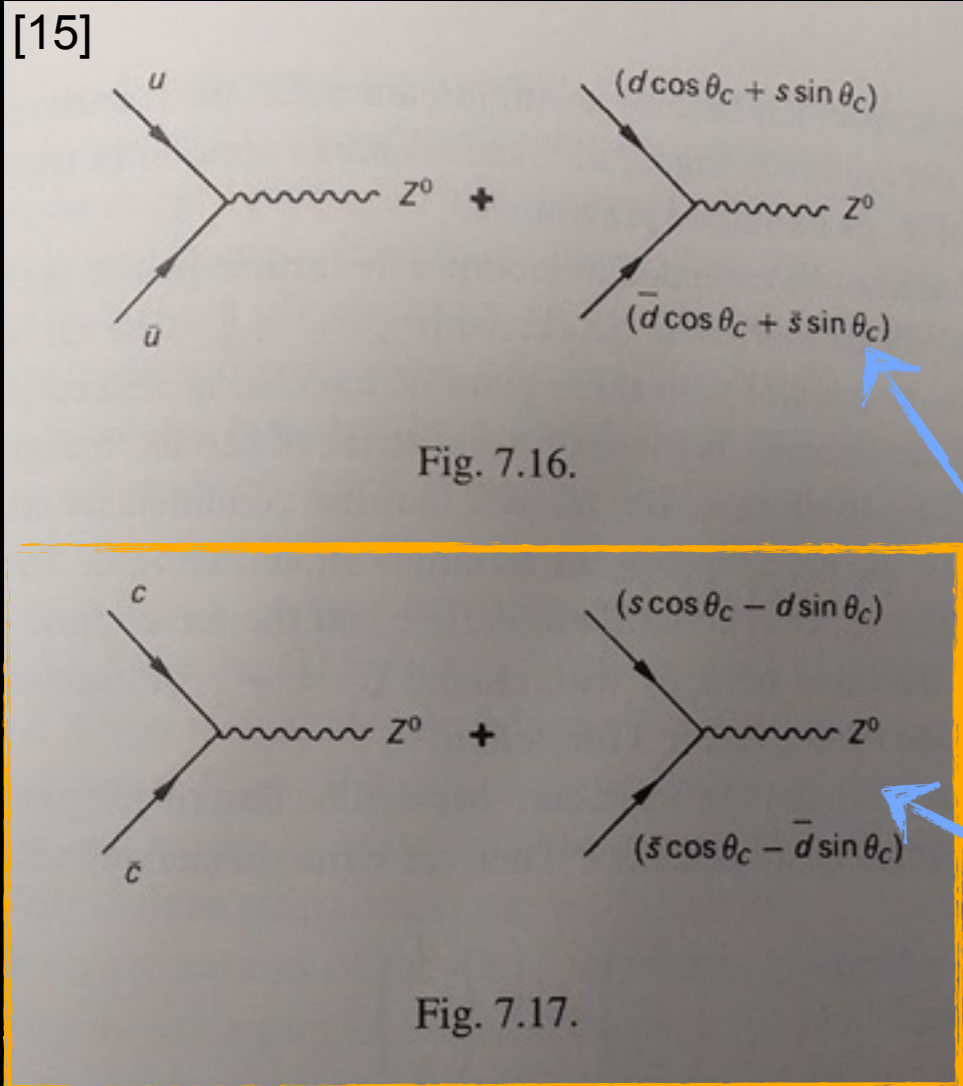
- Neutrale ströme (Z^0) - keine flavour Änderung beobachtet

Glashow, Iliopoulos, Maiani: 1970

→ GIM Mechanismus

$$\frac{\begin{matrix} (\bar{u}s) \\ K^+ \end{matrix} \rightarrow \begin{matrix} (\bar{u}d) \\ \pi^+ \end{matrix} + \nu + \bar{\nu}}{\begin{matrix} (\bar{u}s) \\ K^+ \end{matrix} \rightarrow \begin{matrix} (\bar{u}u) \\ \pi^0 \end{matrix} + \mu^+ + \nu_\mu} \leq 10^{-5}$$

Neues Teilchen: „charm“ Quark



[15]

$$\underbrace{u\bar{u} + c\bar{c} + (d\bar{d} + s\bar{s}) \cos^2 \theta_c + (s\bar{s} + d\bar{d}) \sin^2 \theta_c}_{\Delta S = 0}$$

$$+ \underbrace{(s\bar{d} + \bar{s}d - \bar{s}d - s\bar{d}) \sin \theta_c \cos \theta_c}_{\Delta S = 1}$$

„Flavour“ Änderung: = 0

Quantenmechanisch: Interferenz dieser Diagramme

Weitere Messungen - weitere ‚Probleme‘

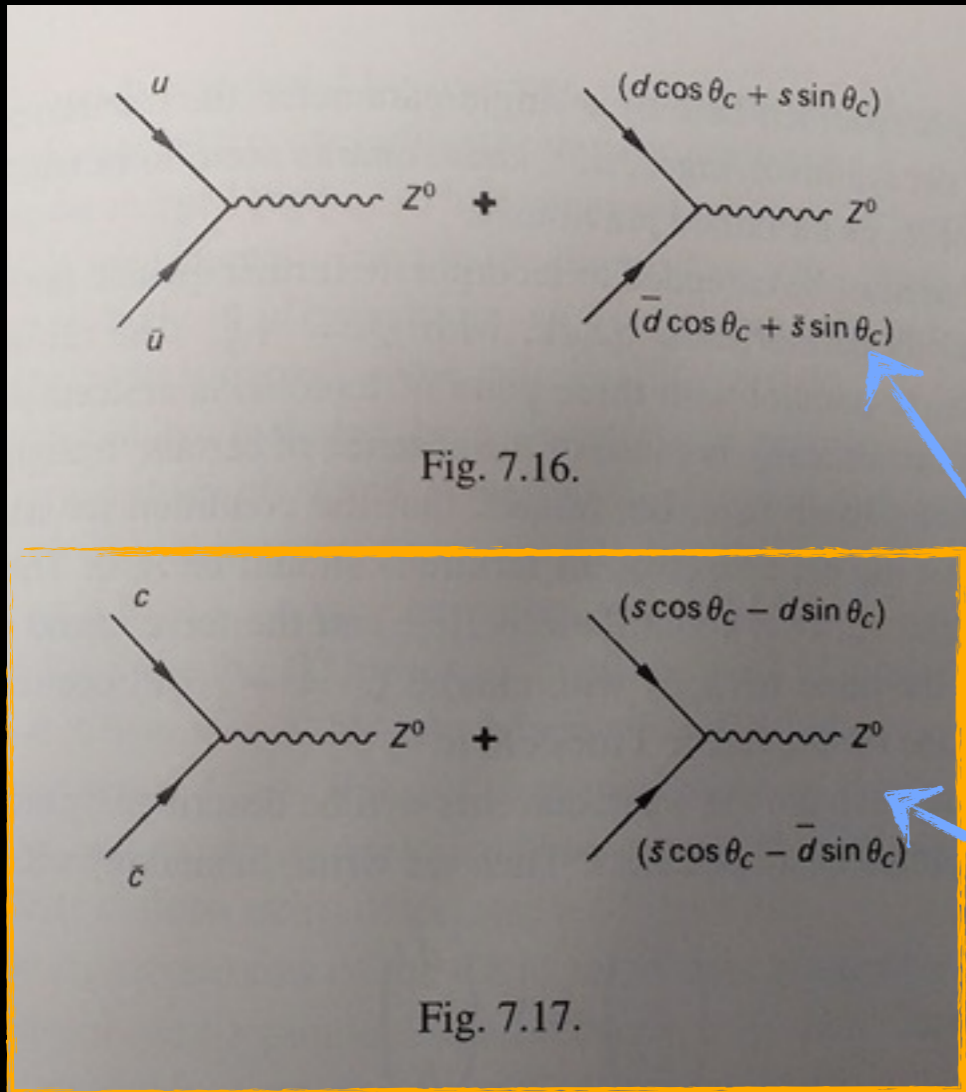
schwache Eigenzustände

Glashow, Iliopolus, Maiani: 1970

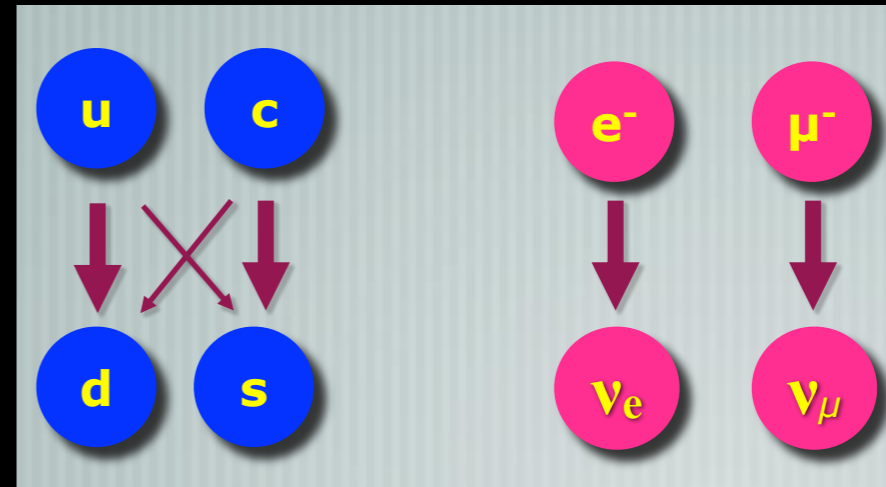
$$\begin{pmatrix} |u\rangle \\ \cos\theta_C |d\rangle + \sin\theta_C |s\rangle \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |c\rangle \\ -\sin\theta_C |d\rangle + \cos\theta_C |s\rangle \end{pmatrix}$$

→ GIM Mechanismus

Drehung im ‚flavour‘ Raum



Neues Teilchen: „charm“ Quark



Quantenmechanisch: Interferenz dieser Diagramme

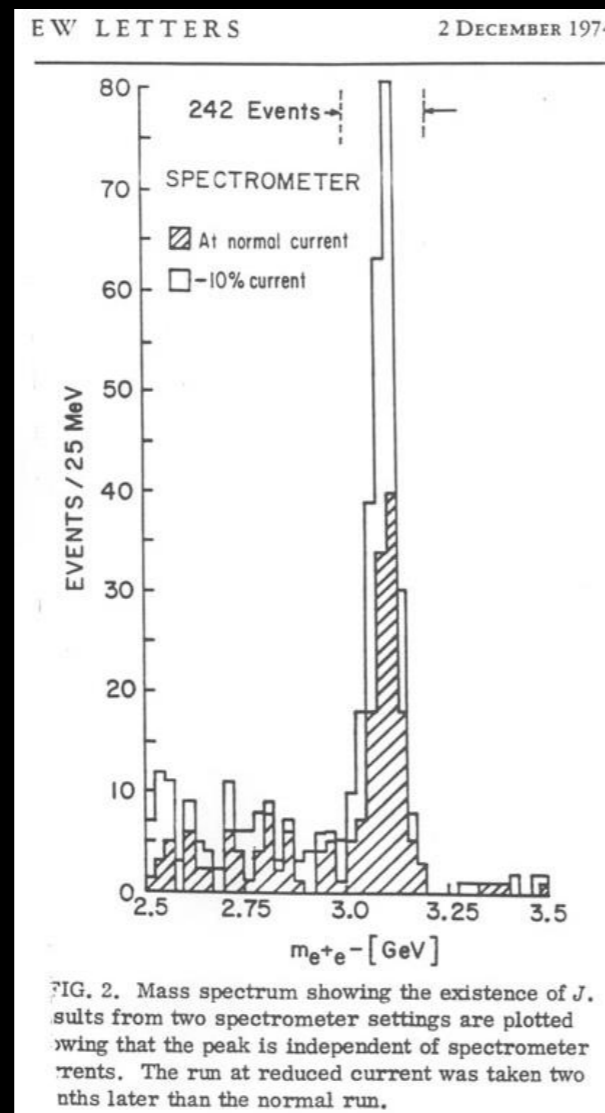
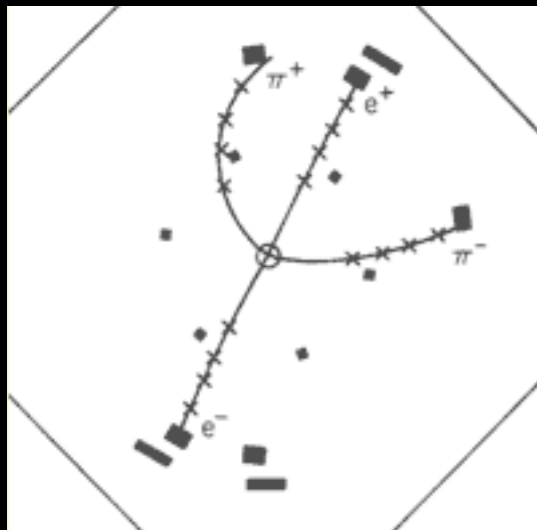
Nachweis des charm - Quarks

- Entdeckt durch gezielte Experimente
 - Gleichzeitig von 2 unabhängigen Gruppen

Richter (Slac) & Ting (Brookhaven):
November 1974

Richter: Ψ

Ting: J



Teilchen wurde J/Ψ genannt!

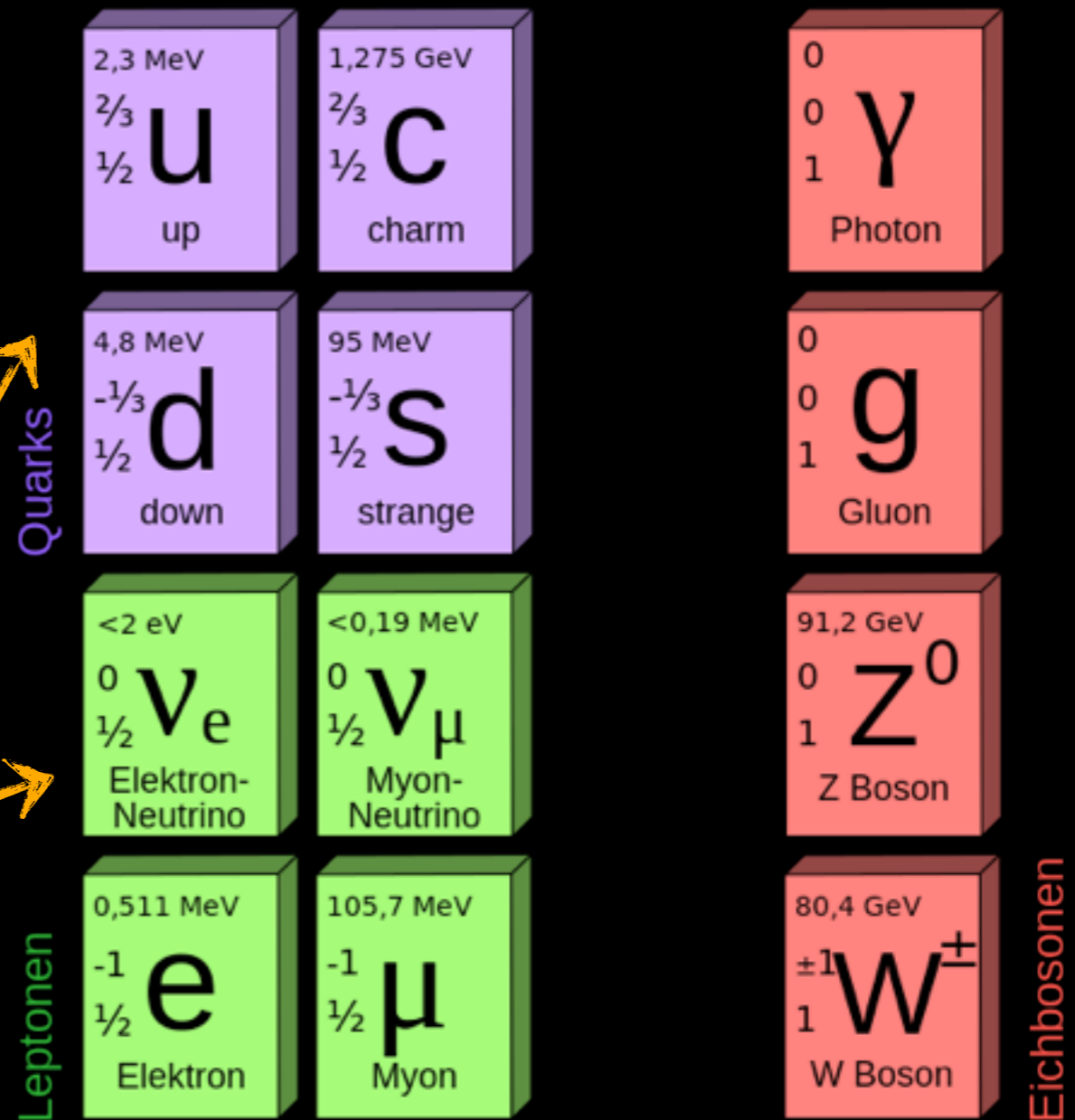
- Gebundener Zustand aus charm & anti-charm Quark
- Kann nur über schwache WW Zerfallen
 - langlebig! (10^{-20} sec)
 - => schmale Resonanz

Was wir bisher kennengelernt haben

• Elementare Teilchen

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

Doublets der schwachen Ladung

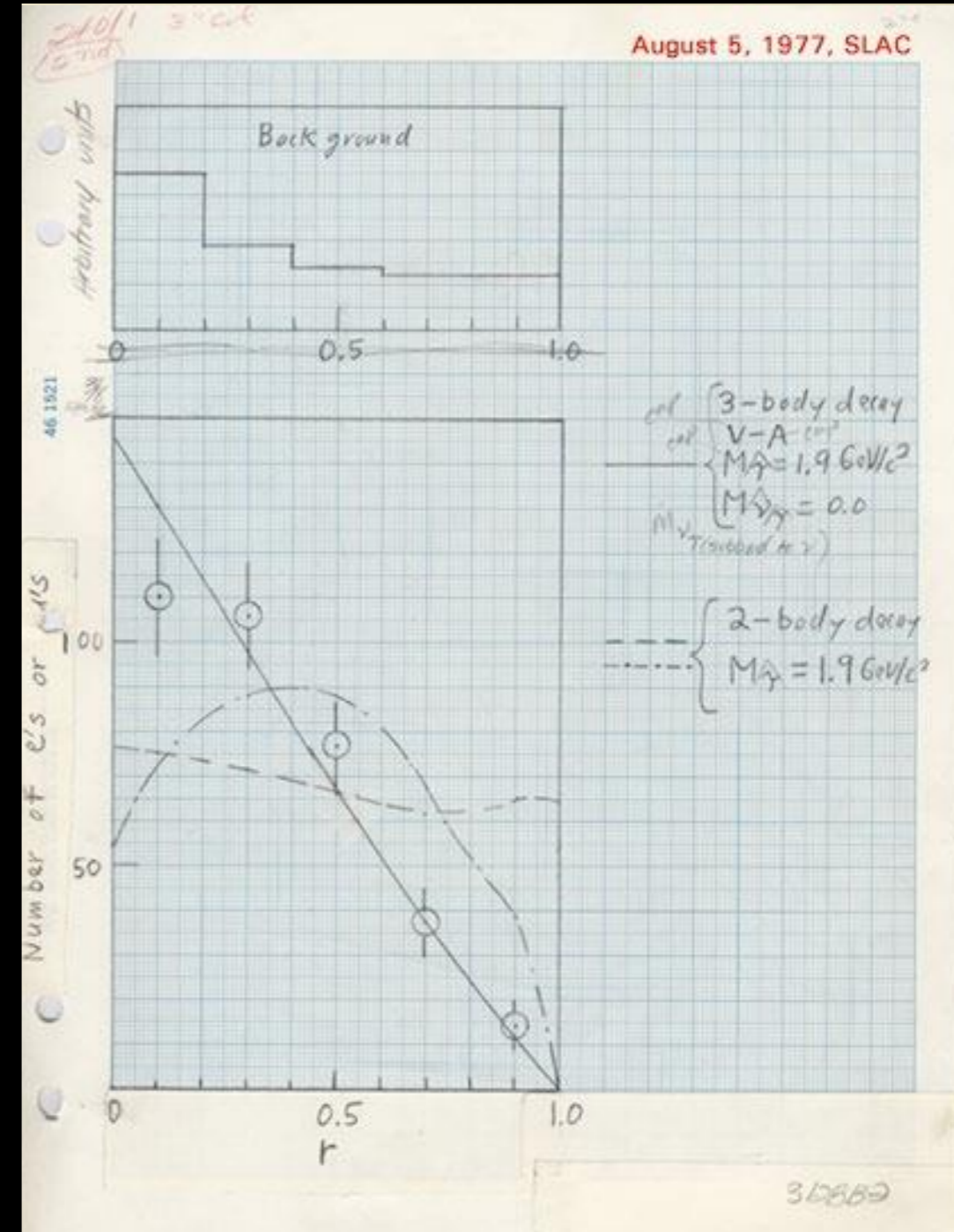
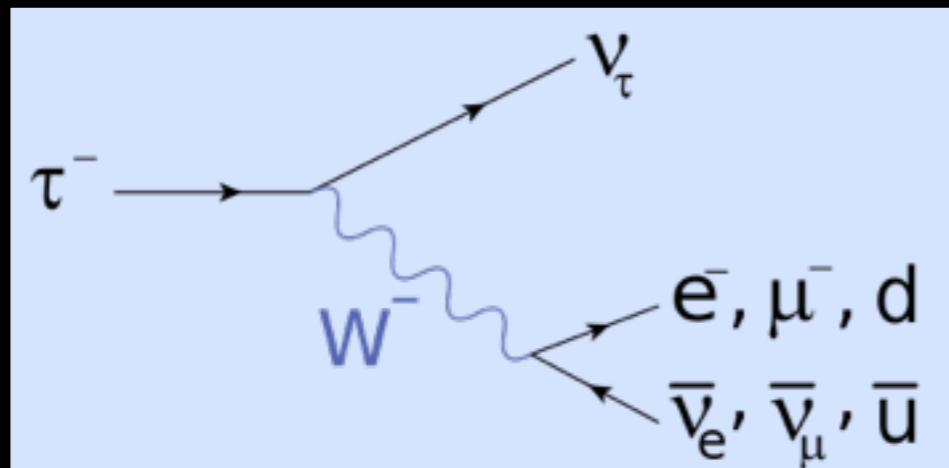


Und was ist das jetzt?

- Entdeckung eines 3. Leptons

SLAC: 1975

- Das Tauon: τ
- Neues, ‚schweres‘ Elektron ($3500 m_e$)
- Dazu muss ein weiteres Neutrino gehören
- Sowie 2 weitere Quarks!



Was wir bisher kennengelernt haben

• Elementare Teilchen

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

Doublets der schwachen Ladung

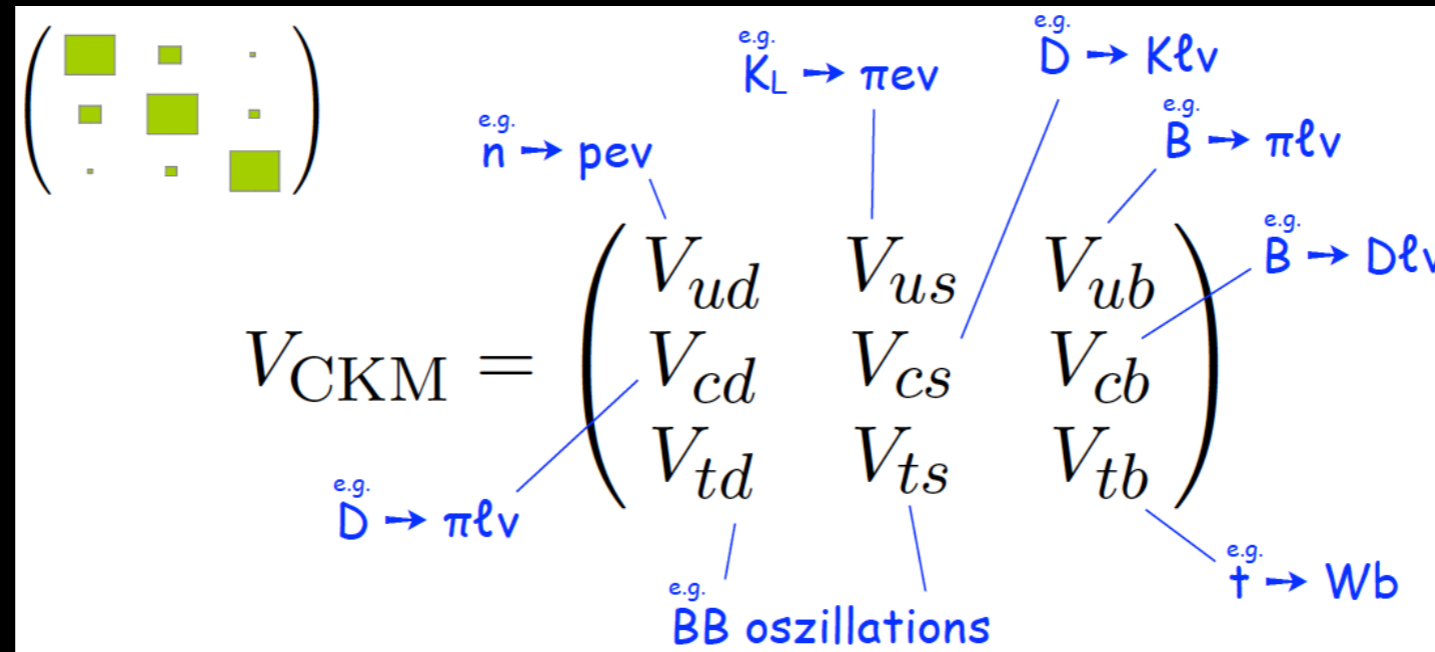
	1.	2.	3.	Familie / Generation
Quarks	2,3 MeV $\frac{2}{3}$ u up	1,275 GeV $\frac{2}{3}$ c charm	173,07 GeV $\frac{2}{3}$ t top	0 0 1 γ Photon
	4,8 MeV $-\frac{1}{3}$ d down	95 MeV $-\frac{1}{3}$ s strange	4,18 GeV $-\frac{1}{3}$ b bottom	0 0 1 g Gluon
Leptonen	<2 eV 0 $\frac{1}{2}$ ν_e Elektron-Neutrino	<0,19 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ Myon-Neutrino	<18,2 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ Tau-Neutrino	91,2 GeV 0 1 Z^0 Z Boson
	0,511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e Elektron	105,7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ Myon	1,777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ Tau	80,4 GeV ± 1 1 W^\pm W Boson
				Eichbosonen

Bottom & Top am Fermilab entdeckt,
 1977 1995

3 Familien ...

- Schwache WW:
 - Übergänge **innerhalb** & **zwischen** den Familien

Cabibbo, Kobayashi, Maskawa:
(Nobelpreis 2008)



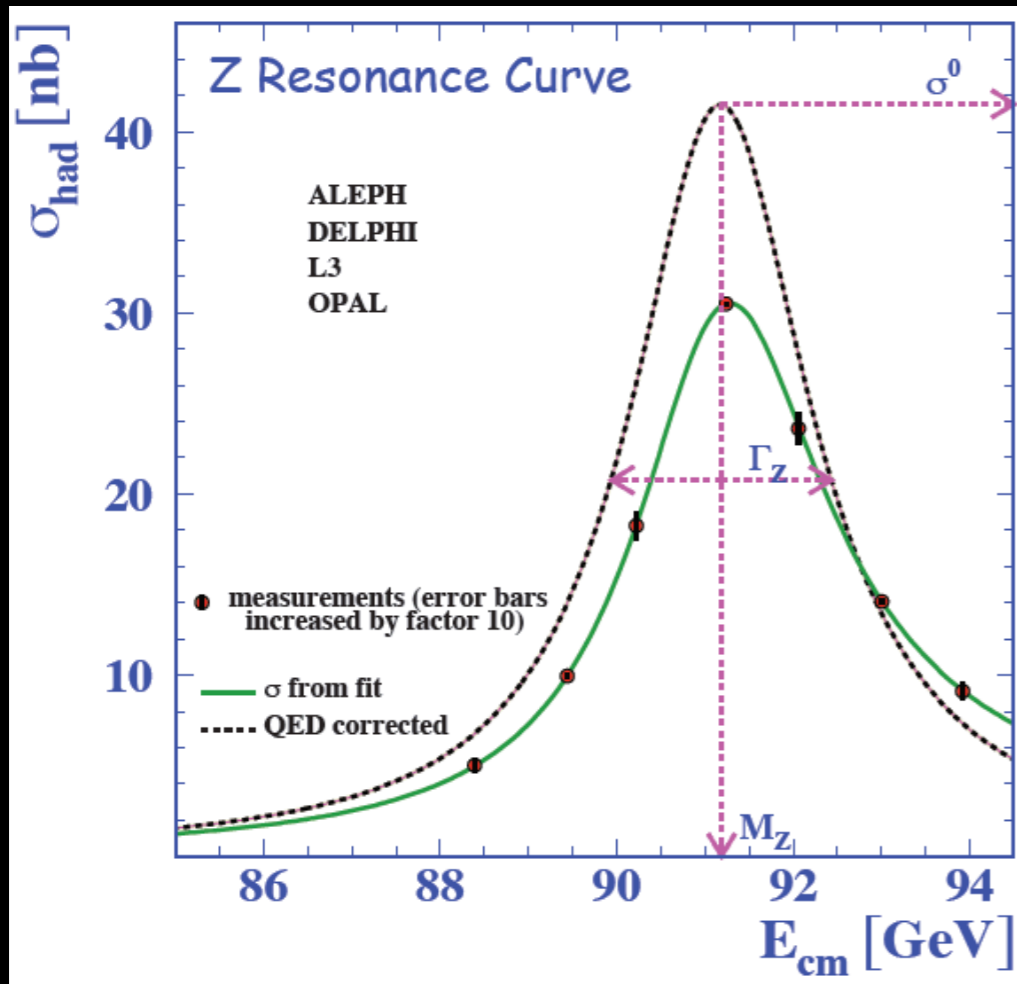
- Essentiell zur Erklärung von ‚CP‘ Verletzung:
 - **Unterschiedliche Behandlung von Materie & Antimaterie durch physikalische Gesetze!**
 - Erst möglich bei min. 3 Quark Generationen
 - Ursprüngliche Anstoß zur Vorhersage einer 3. Generation

Gibt es mehr als 3 Familien?

- Untersuchung des Z-Teilchens im Detail:

Breit-Wigner Kurve
→ harmonischer Oszillator

Gemessen in Reaktion: $e^+ e^- \rightarrow Z \rightarrow e^+ e^-$



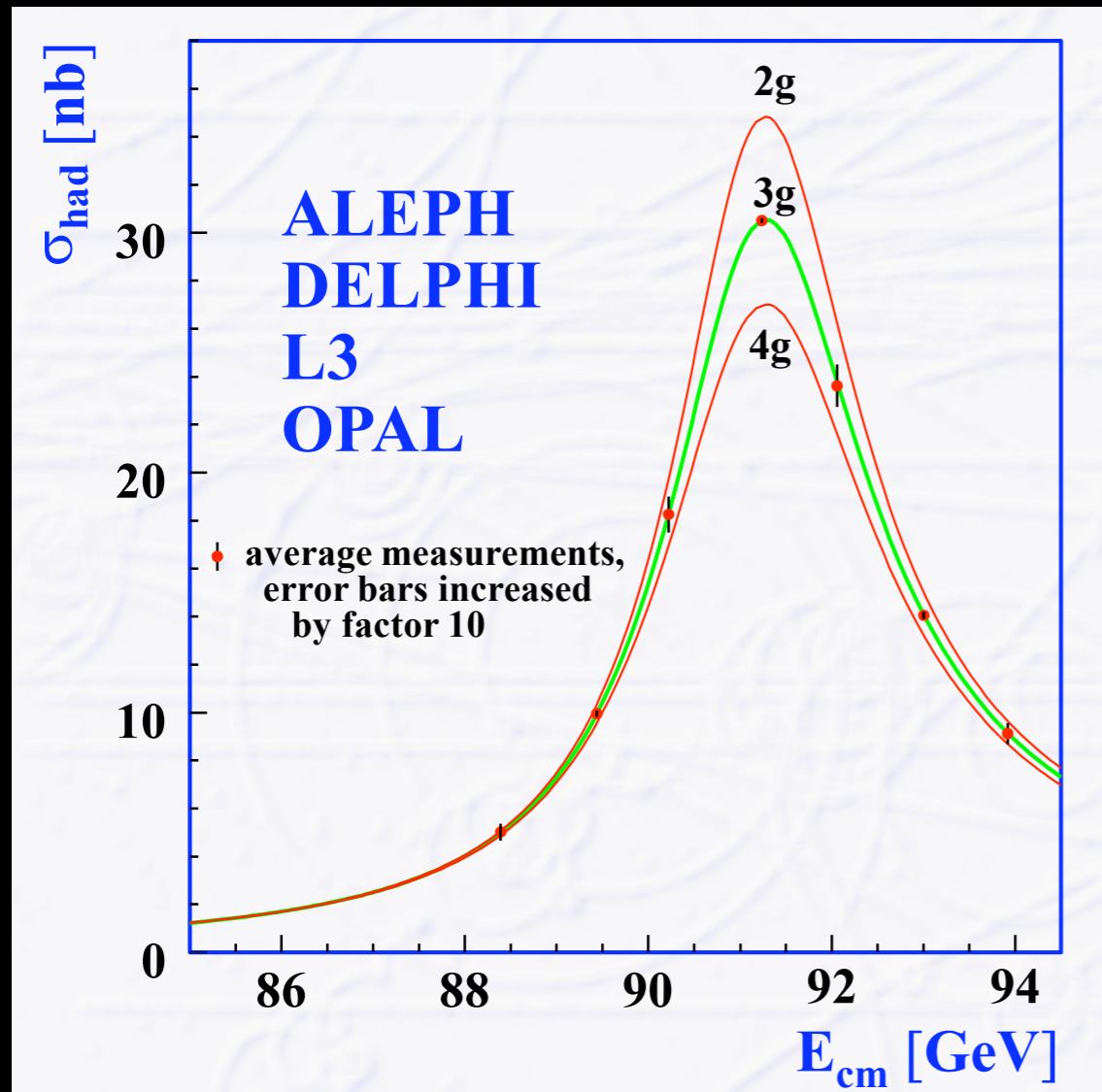
Exakte Form abhängig von

- Vakuumfluktuationen
- Abstrahlung von Photonen
- Virtuelle Photonen zwischen Leptonen

Gibt es mehr als 3 Familien? - Nein

- Untersuchung des Z-Teilchens im Detail:

Gemessen in Reaktion: $e^+ e^- \rightarrow Z \rightarrow e^+ e^-$



Exakte Form abhängig von

- Vakuumfluktuationen
- Abstrahlung von Photonen
- Virtuelle Photonen zwischen Leptonen
- Anzahl der **leichten Neutrino ,Flavour'**

• Elementare Teilchen

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

Doublets der schwachen Ladung

	1.	2.	3.	Familie / Generation	
	2,3 MeV $\frac{2}{3}$ u up	1,275 GeV $\frac{2}{3}$ c charm	173,07 GeV $\frac{2}{3}$ t top	0 0 γ Photon	125,9 GeV 0 0 H Higgs Boson
	4,8 MeV $-\frac{1}{3}$ d down	95 MeV $-\frac{1}{3}$ s strange	4,18 GeV $-\frac{1}{3}$ b bottom	0 0 g Gluon	
	<2 eV 0 $\frac{1}{2}$ ν_e Elektron-Neutrino	<0,19 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ Myon-Neutrino	<18.2 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ Tau-Neutrino	91,2 GeV 0 0 Z^0 Z Boson	
Leptonen	0,511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e Elektron	105,7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ Myon	1,777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ Tau	80,4 GeV ± 1 1 W^\pm W Boson	Eichbosonen

Quarks

Leptonen

Eichbosonen

Was ist noch unklar?

- [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>
- [15] D. Perkins: Introduction to high energy physics
- [16] www.physi.uni-heidelberg.de/~uwer/lectures/PhysikV/Vorlesung/Kapitel-VIIa.pdf

Frage - haben Bosonen Anti-Teilchen?



- Ja
- Allgemein: Teilchen die keine Ladung haben sind ihre eigenen Anti-teilchen
 - Ladungen: Elektrisch, Schwach, Farbe
 - W^+ W^- sind Anti-Teilchen zueinander
 - Z^0 & Photon sind ihre Eigenen Anti-Teilchen
 - Vektor-Boson-Fusion: $W^++W^- \rightarrow Z^0$; $Z^0+Z^0 \rightarrow H$
 - Gluonen besitzen Farbe & Anti-Farbe: Teilchen-Antiteilchen Paare
 - Bosonen gehorchen Bose-Statistik:
 - können einzeln erzeugt und Vernichtet werden!
 - Fermionen gehorchen Fermi-Statistik
 - können nur Paarweise erzeugt / Vernichtet Werden
 - Leptonzahl / Baryonzahl Erhaltung

1912

- Beobachtungen der „durchdringenden Strahlung“ in Abhängigkeit der Höhe bei Ballonfahrten
 - Instrument: „Wulfscher Strahlungsapparat“
 - Ionisationskammer mit elektrostatischer Auslese => Ionen / Volumen / Zeit
 - Zunahme der Ionisationsrate bei großen Höhen (>3000m)
 - Erklärung: Natürliche Strahlung hat 3 Komponenten:
 - Radioaktive Zerfälle in der Erdkruste
 - Radioaktive Zerfälle in der Atmosphäre
 - Quellen außerhalb der Erd (nicht die Sonne)
- Bekannt zu dieser Zeit:
 - α, β, γ Strahlung & Röntgenstrahlung
 - Elektron / Elementarladung / Rutherford-Atommodell
 - (seit 1-2 Jahren) (gerade entwickelt)
- Muon noch unbekannt

- **Praktische Verwendung in der Teilchenphysik: Kopenhagener Deutung**
 - Quadrat der Wellenfunktion = Aufenthaltswahrscheinlichkeit
- **Messproblem:**
 - Jeder Messapparat ist auch ein Quantensystem und interagiert = ändert den Zustand des zu beobachteten Quantensystems
 - Widerspruch zwischen deterministischer zeitlicher Systementwicklung und indeterministischen Messergebnissen
- **Kopenhagener Deutung in der Philosophie abgeschrieben**
- **Heutige Interpretationen:**
 - **Viele-WeltenTheorie:**
 - Alle möglichen Messausgänge sind realisiert in parallelen Welten
 - **De-Broglie-Bohm-Theorie (bohmsche Mechanik):**
 - Teilchenzustand beschrieben durch exakten Ort & Wellenfunktion. In orthodoxer QM ist Position verborgene Variable
 - Dynamik ist deterministisch
 - Anfangszustand nicht exakt bestimmbar => Indeterministischer Charakter von Quantenphänomenen
 - **Mathematisch weit ausgearbeitet**

- [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>