



# Teilchenphysik

Lehrerprogramm - Oktober 2018

European Organisation for Nuclear Research

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



**Kristof Schmieden**  
EP Department

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

## Verständnis der Bausteine unseres Universums

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



Fragen!  
Immer & jederzeit

Fragen!  
Immer & jederzeit

Fragen!  
Immer & jederzeit

Wünsche für folgende Stunden

Feedback!  
Direkt  
& am Ende

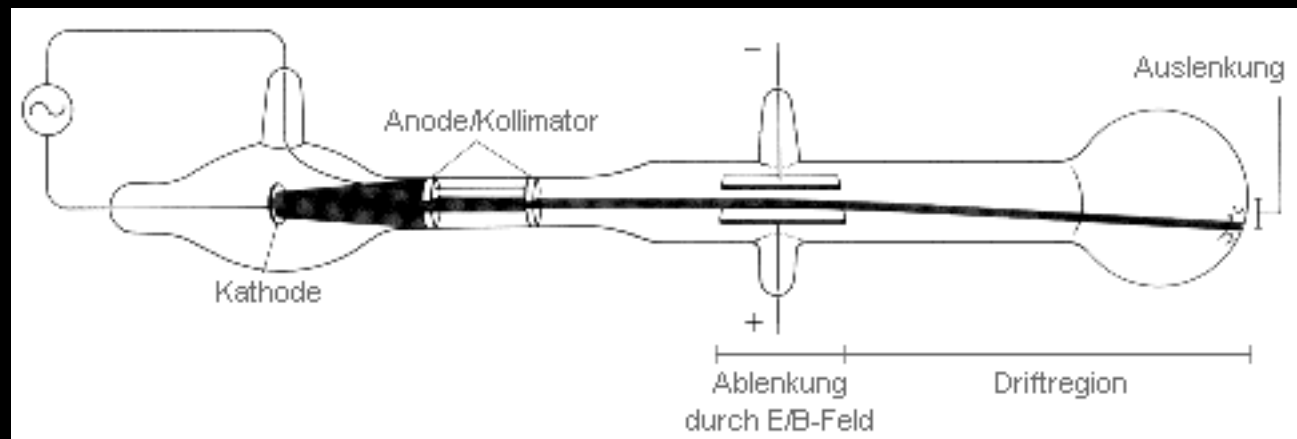
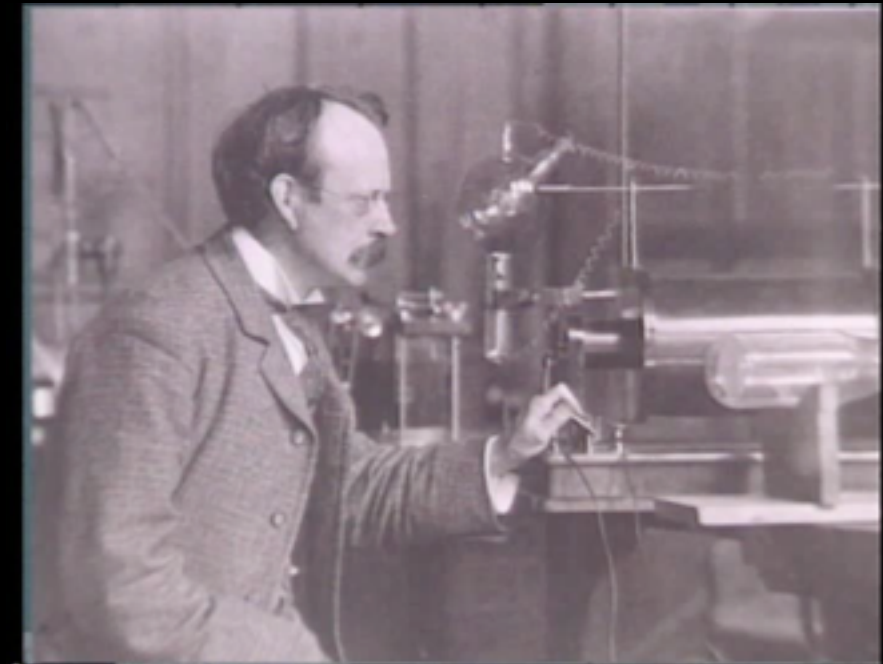
Was ist elementar?



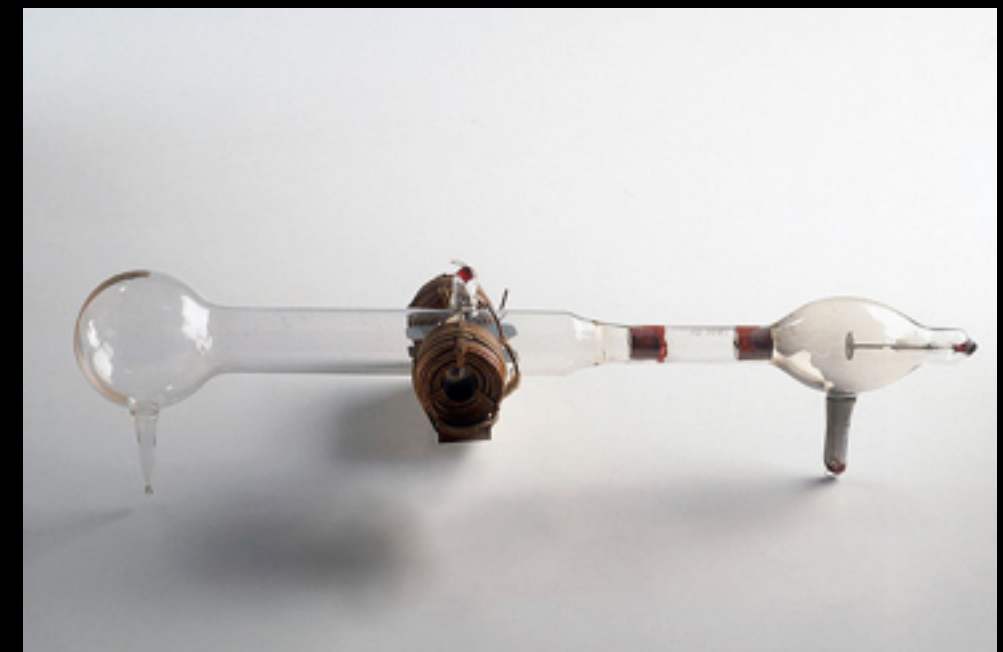
- Die Entdeckung des **Elektrons**

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

1897: Thompson / Wiechert

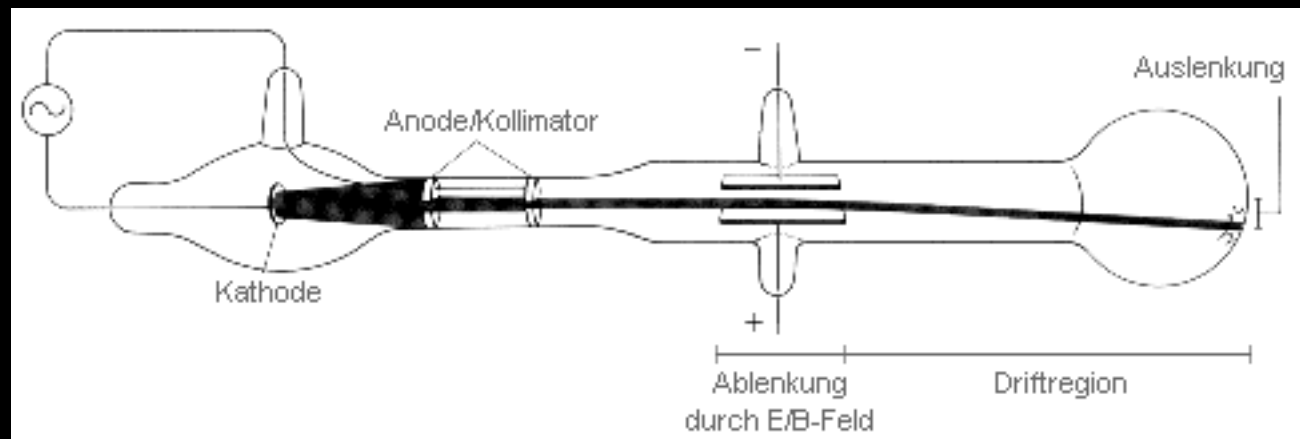


Historische Kathodenstrahlröhre



- Die Entdeckung des **Elektrons**

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



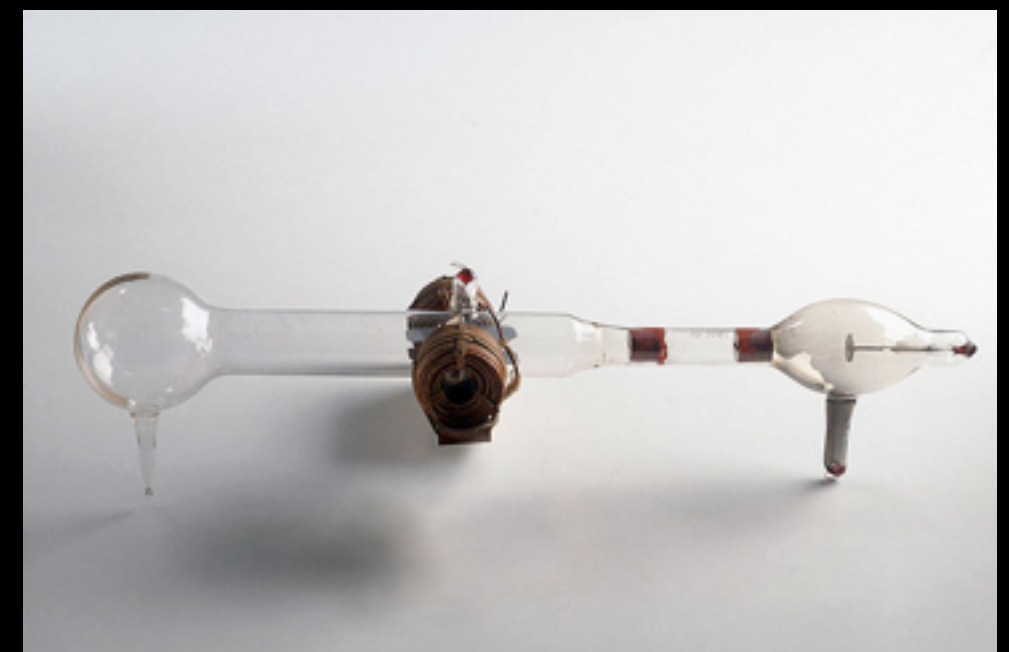
1897: Thompson / Wiechert



Historische Kathodenstrahlröhre

- **Zeeman Effekt:**

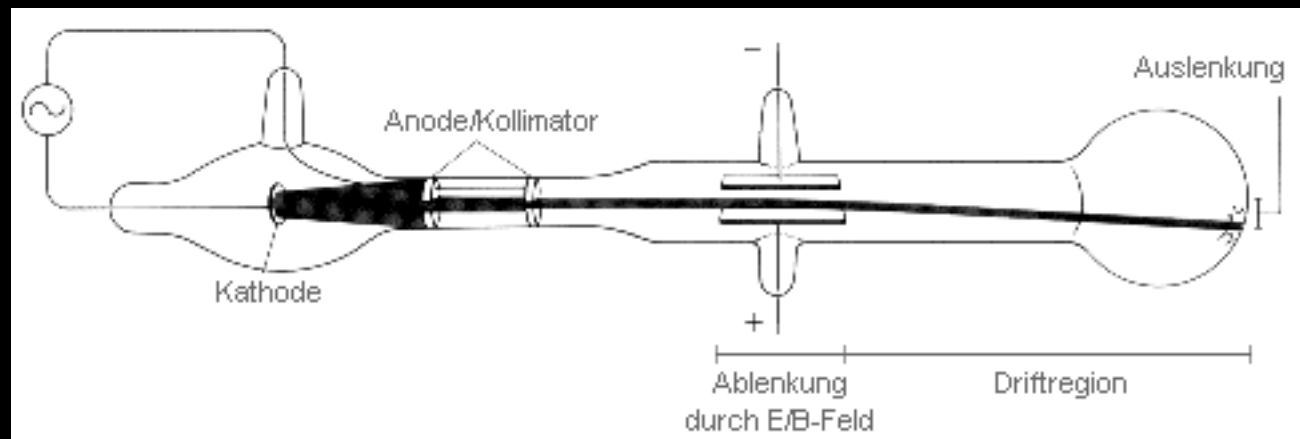
- Aufspaltung von Spektrallinien im Magnetfeld
- Erklärung mittels Elektronen
  - (**Spin** erst viel später eingeführt)





- Die Entdeckung des **Elektrons**

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



1897: Thompson / Wiechert



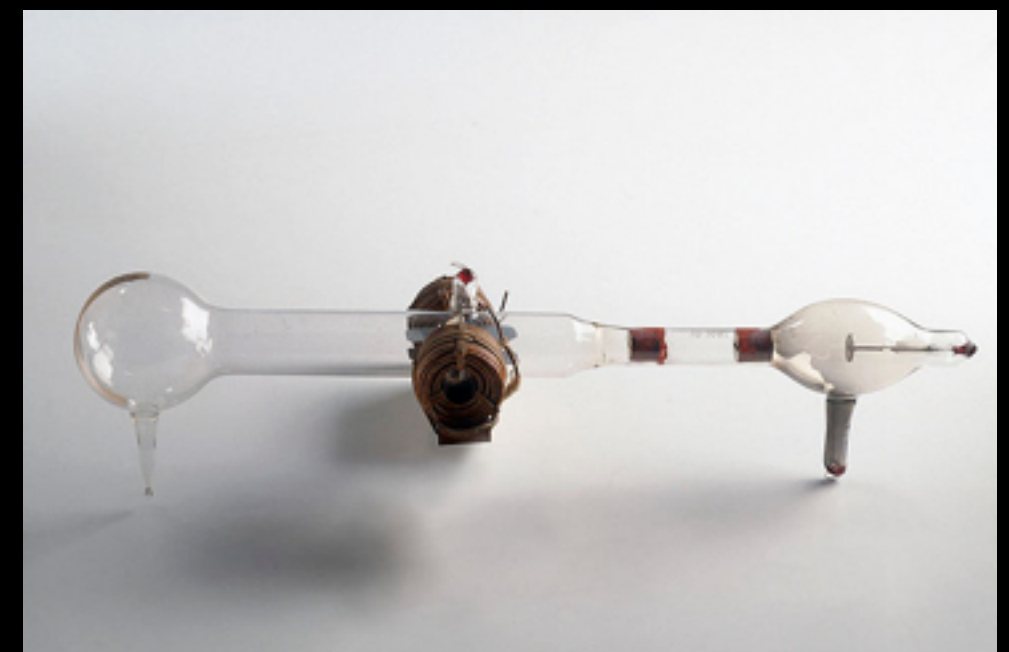
Historische Kathodenstrahlröhre

- **Zeeman Effekt:**

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

1896: Zeeman (Beobachtung)

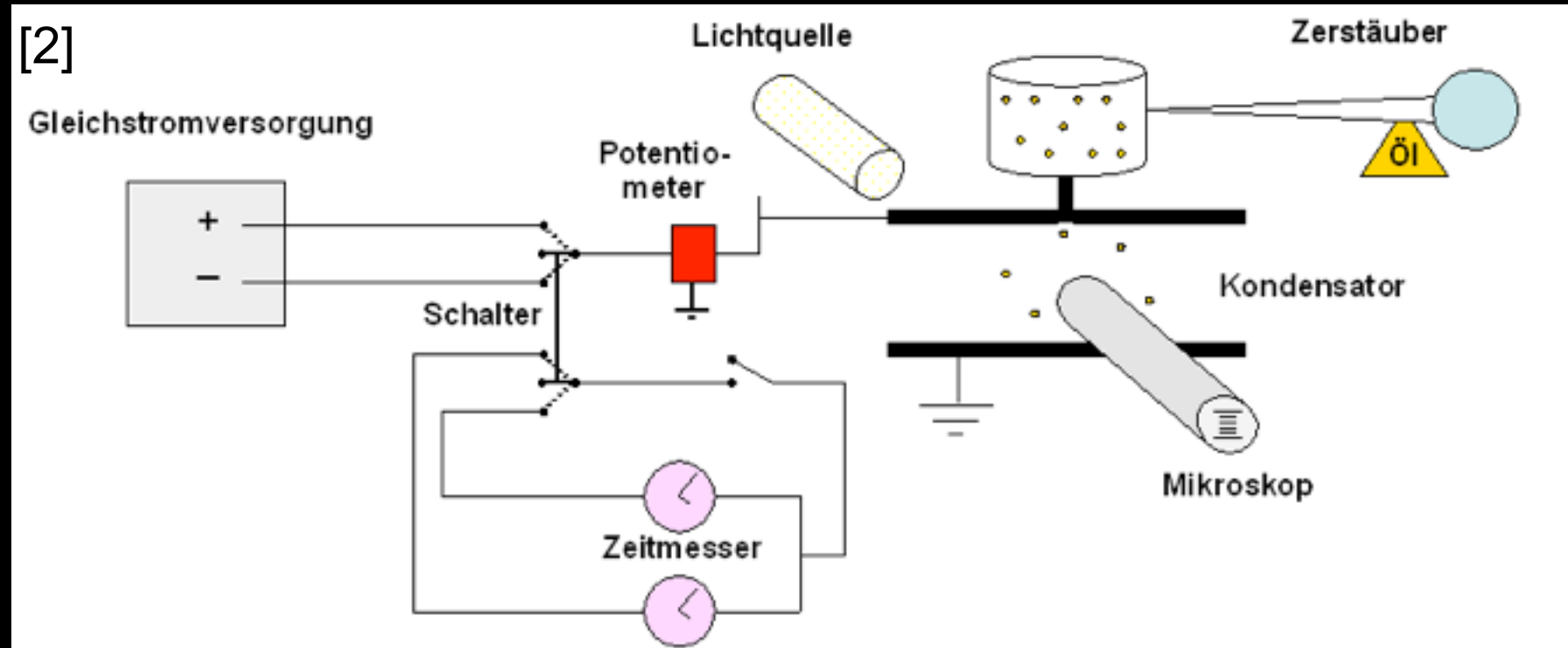
1899: Lorentz (Erklärung)



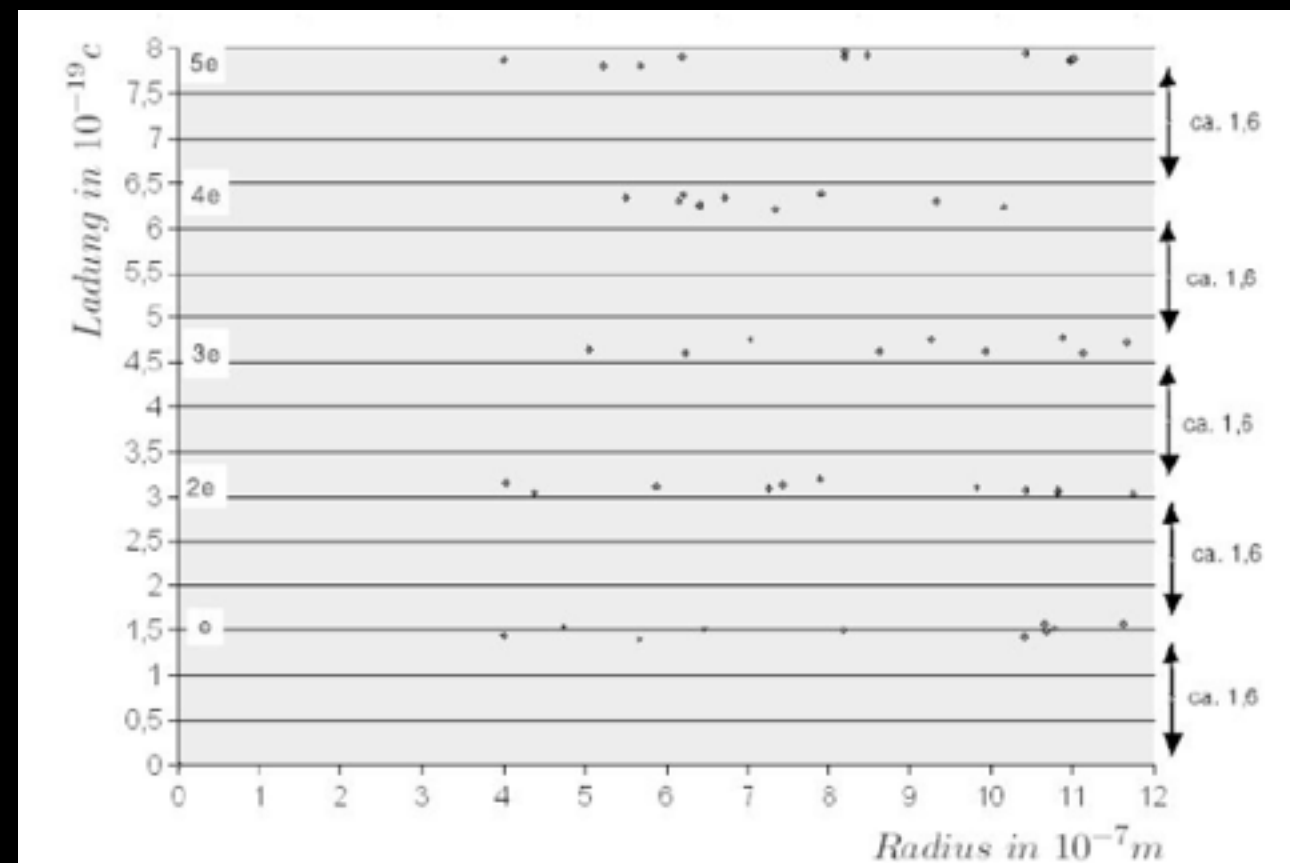
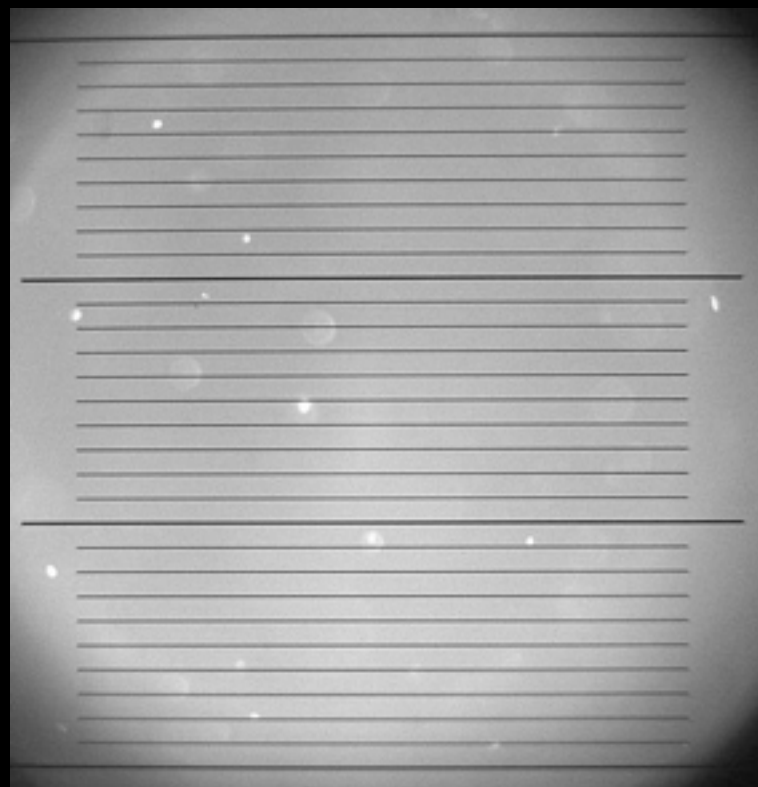
# Bestimmung der Elementarladung

- Millikan Versuch

1910: Millikan / Fletcher

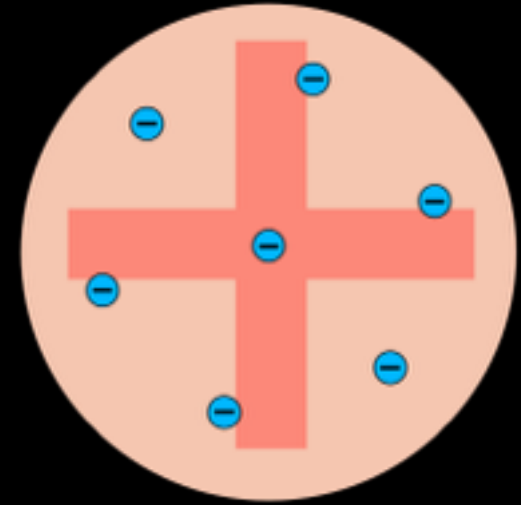


$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$





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

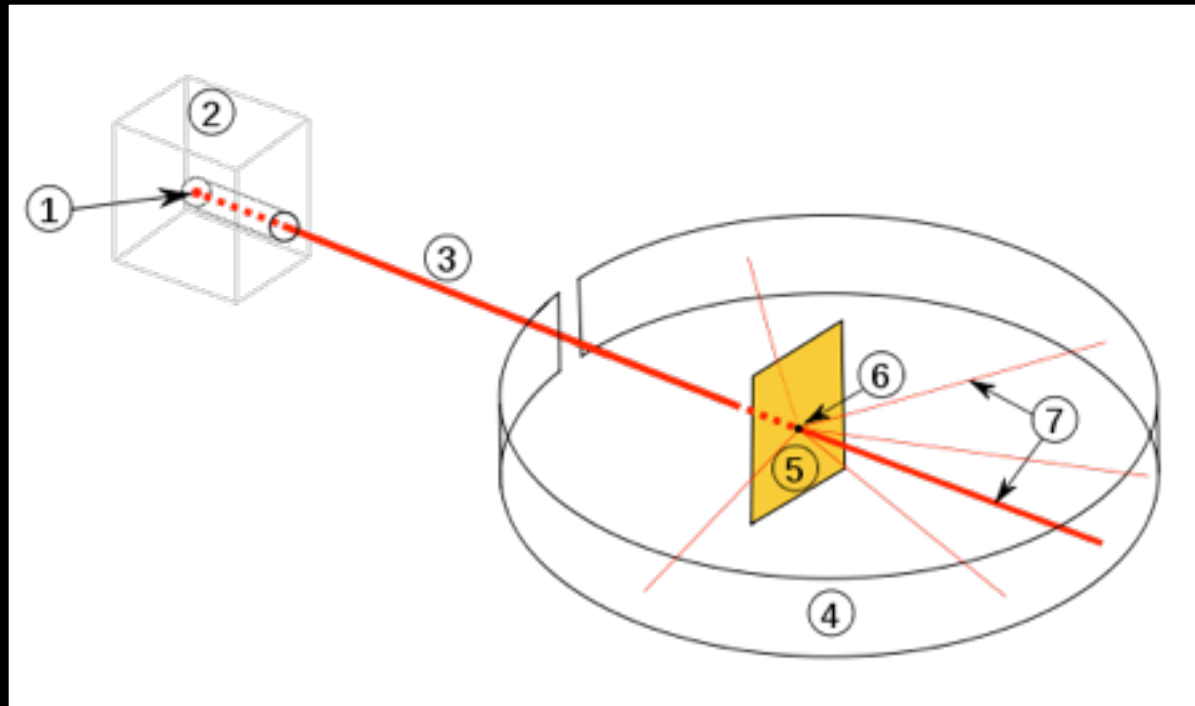


# Rutherford Experiment

1909: Geiger / Marsden / Rutherford

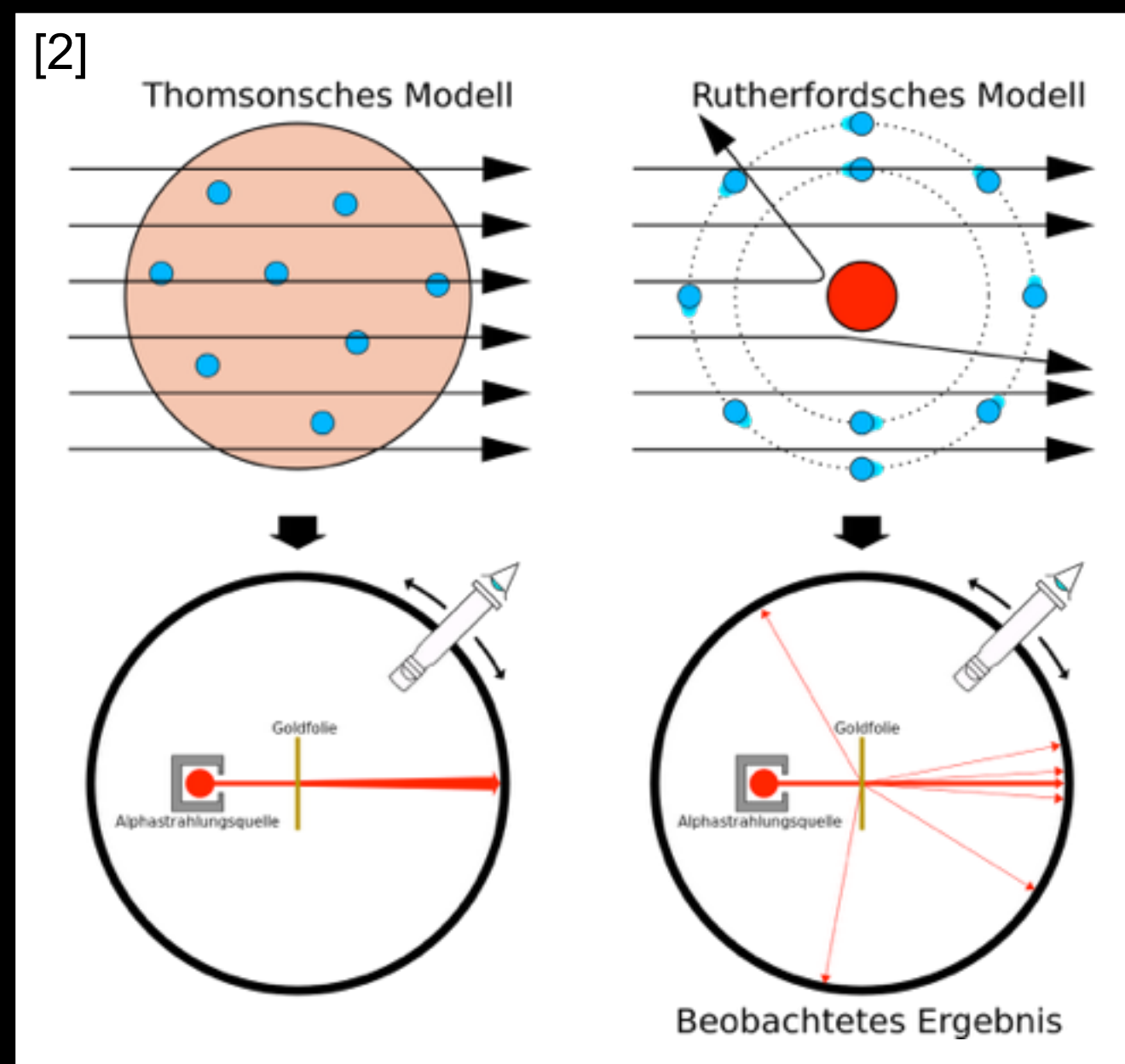
- **Atom hauptsächlich leer!**

- Fast alle Masse & elektrische Ladung in kleinem Bereich konzentriert



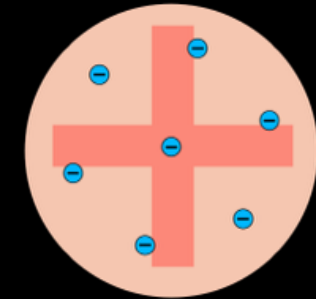
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left( \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4E_0} \right)^2 \frac{1}{\sin^4\left(\frac{\vartheta}{2}\right)}$$

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





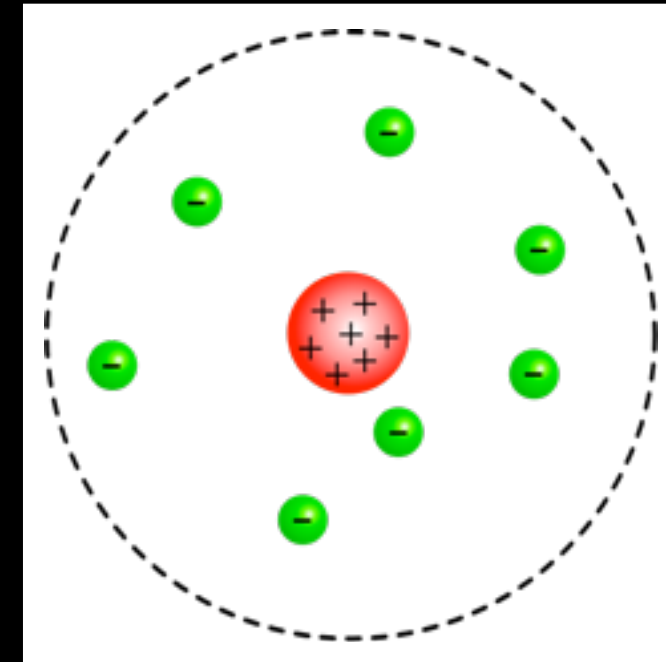
- Thomson: „*Rosinenkuchen*“-Modell
  - Elektronen in homogene, el. pos. geladene Masse eingebettet



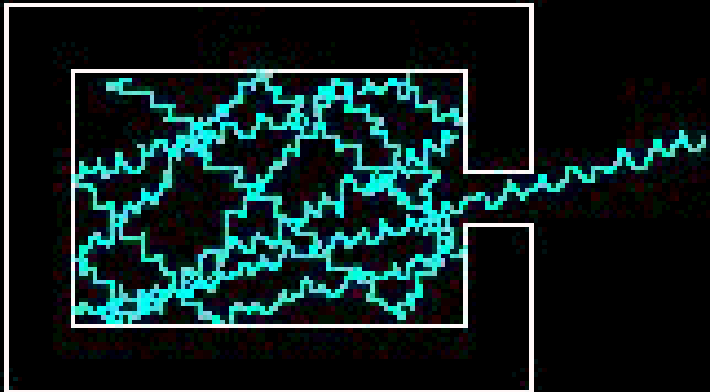
1900

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

1911



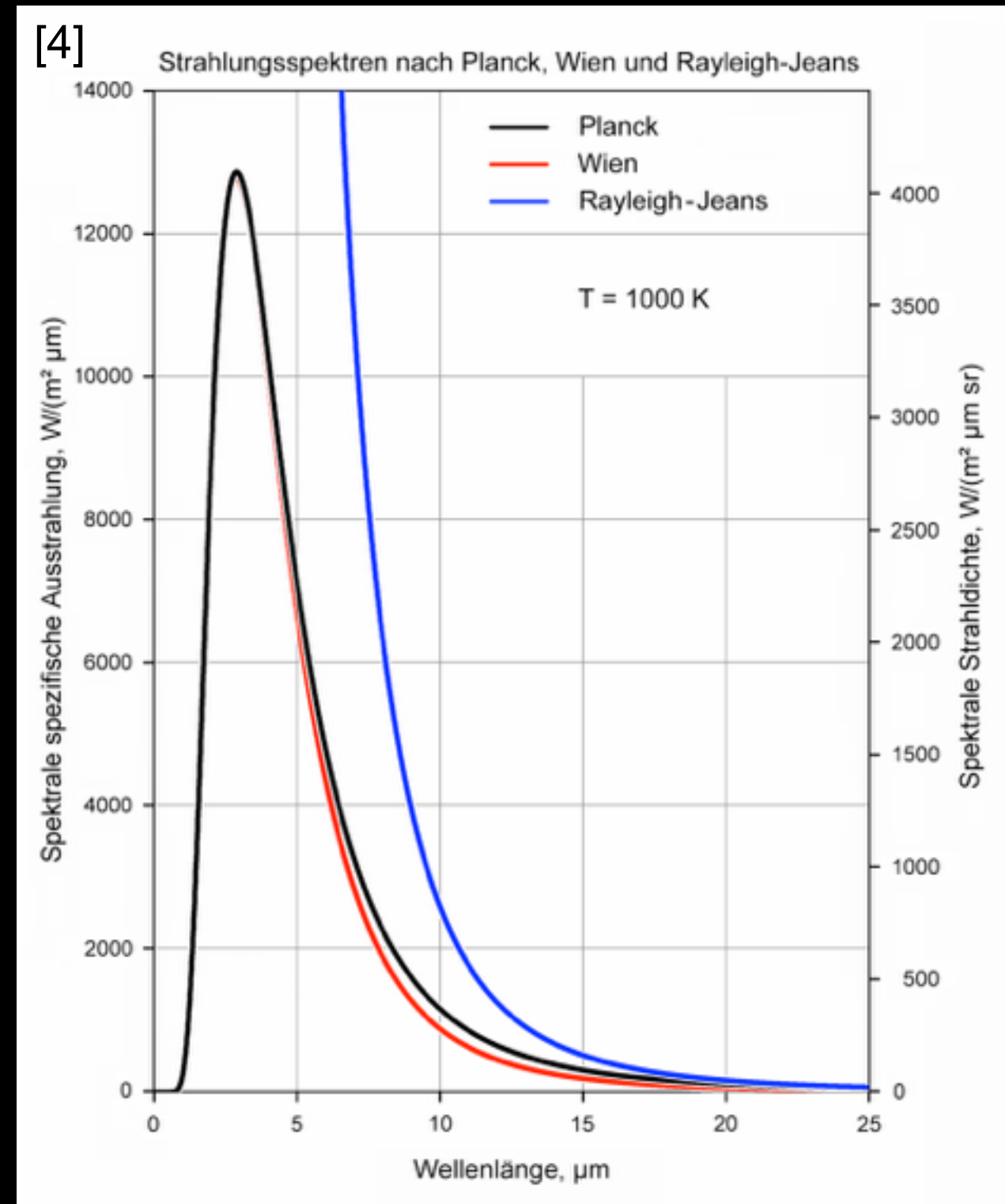
Max Planck: 1900



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

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

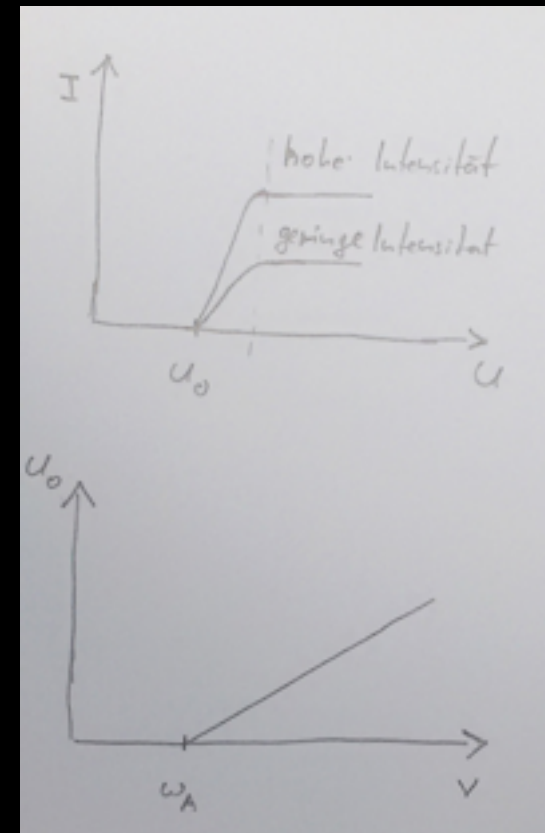
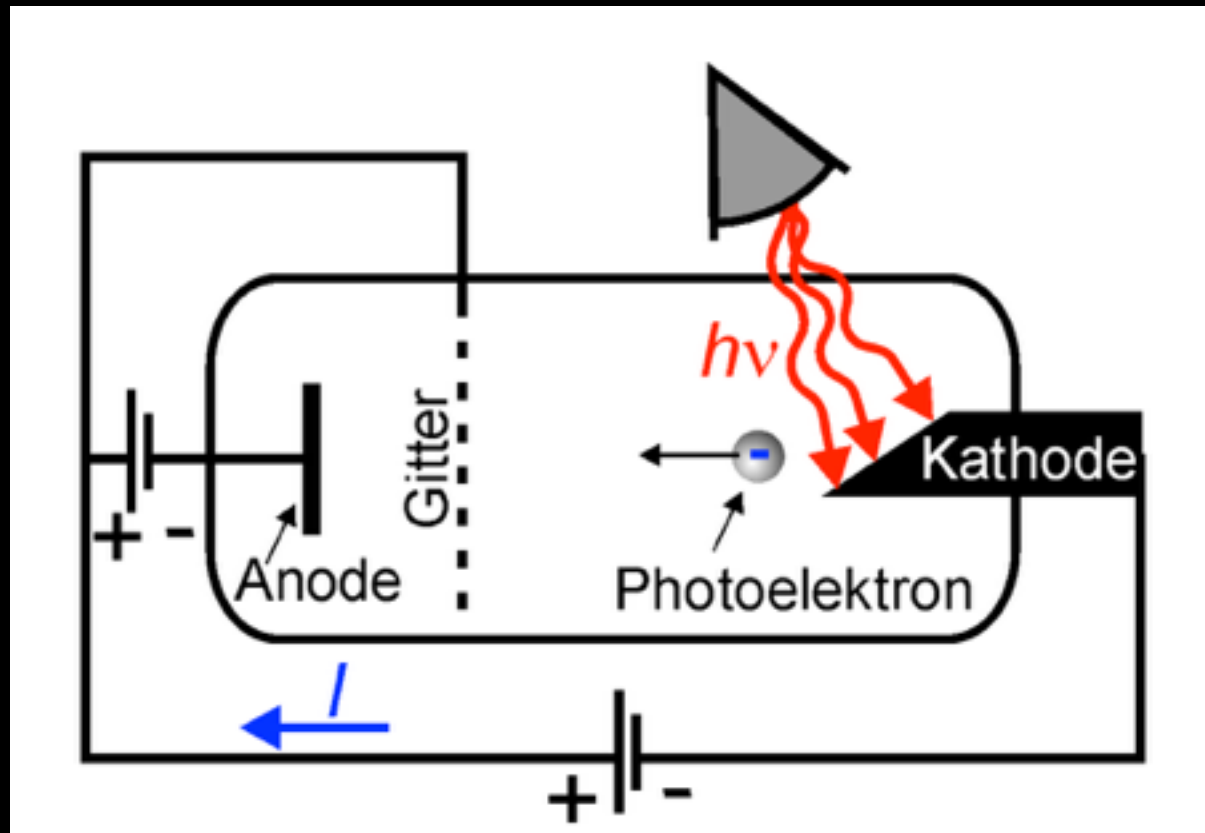
- neue fundamentale Konstante: **h**
  - setzt Energie und Frequenz in beziehung



# Quanten - Photoelektrischer Effekt

- Auslösung von Elektronen aus Metalloberflächen bei Lichteinfall:

Einstein: 1905



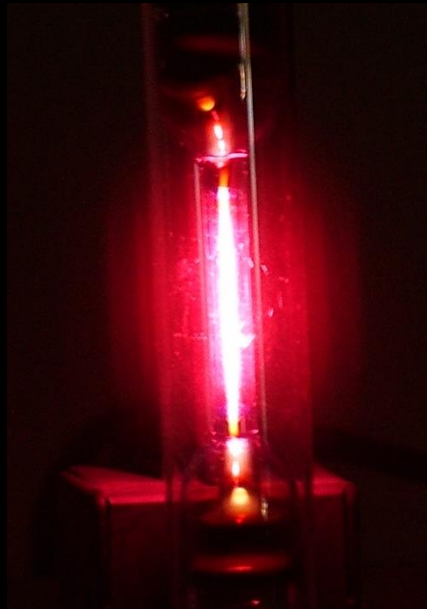
- Energie der Elektronen unabhängig von Lichtintensität!
- Nicht erklärbar mit dem klassischen Bild einer elektromagnetischen Welle!
- Erklärung durch Interaktion von Lichtquanten mit Elektronen:
  - „Ein Lichtquant gibt alle seine Energie an ein Elektron ab“

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

- Elektron
- Licht-Quant



Balmer: 1885

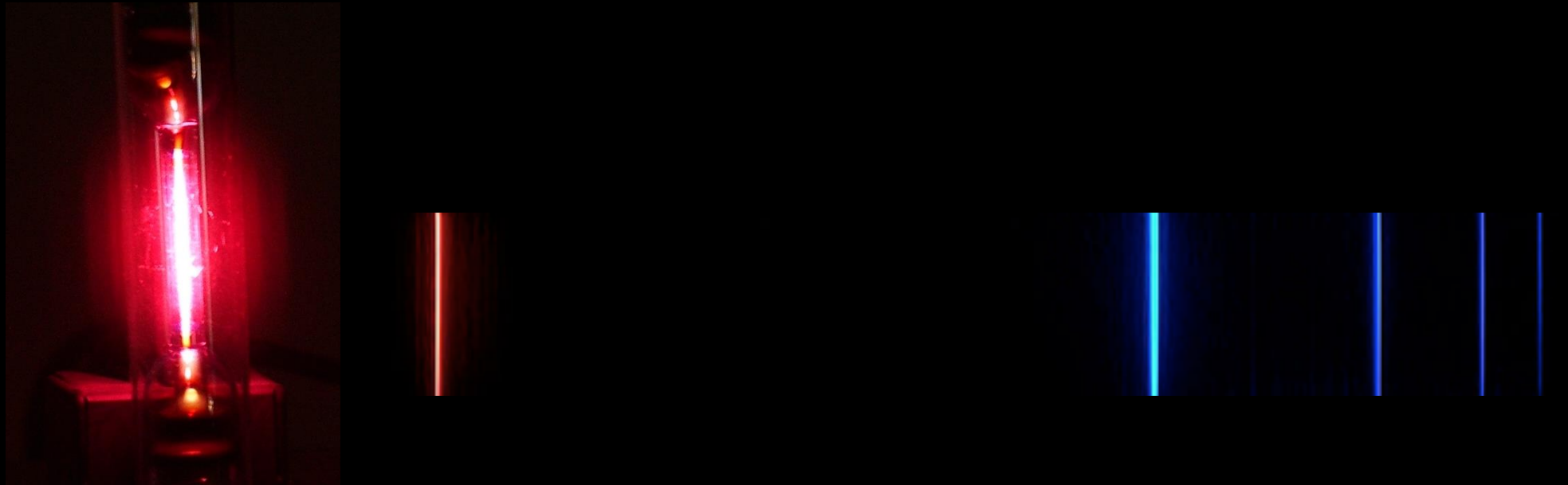


- Spektrallinien von Wasserstoff bekannt, jedoch nicht verstanden
- Problem mit Rutherfords Atommodell:
  - Elektronen umkreisen Kern
    - bewegte el. Ladung → Abstrahlung elektromagnetischer Wellen
  - **Wieso ist Atom stabil?**

13,6 eV => 156.000K

# Quanten - und die Spektrallinien

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:

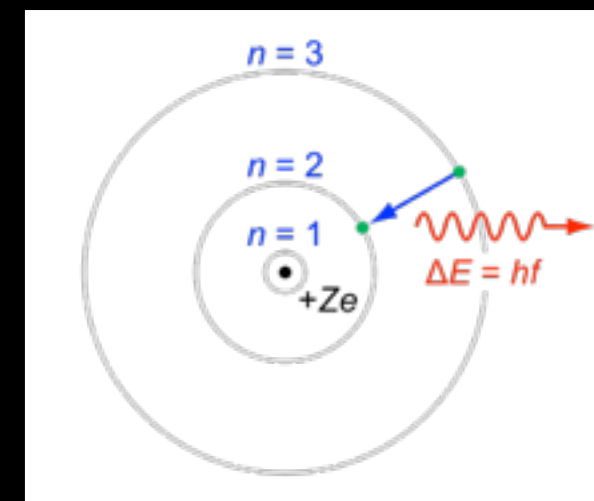
$$L = n\hbar = n \frac{h}{2\pi}$$

Energieänderung bei Bahnwechsel:

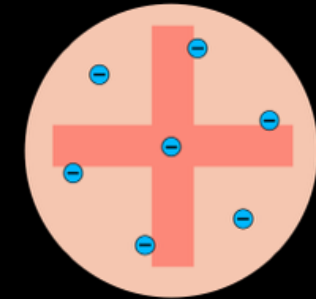
$$\Delta E = f \cdot h$$

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

$$13,6 \text{ eV} \Rightarrow 156.000\text{K}$$

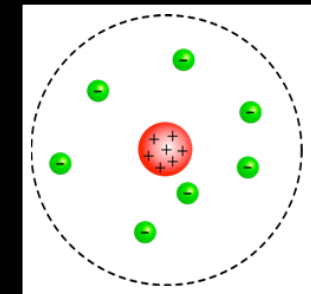


- Thomson: „Rosinenkuchen“-Modell
  - Elektronen in homogene, el. pos. geladene Masse eingebettet



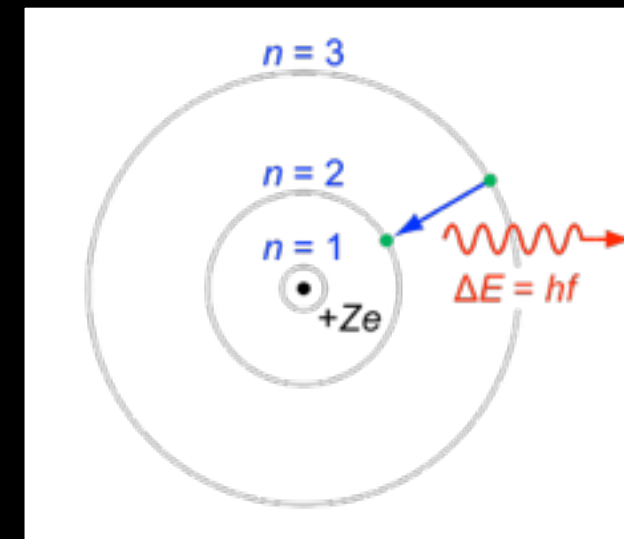
1900

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



1911

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



1913

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

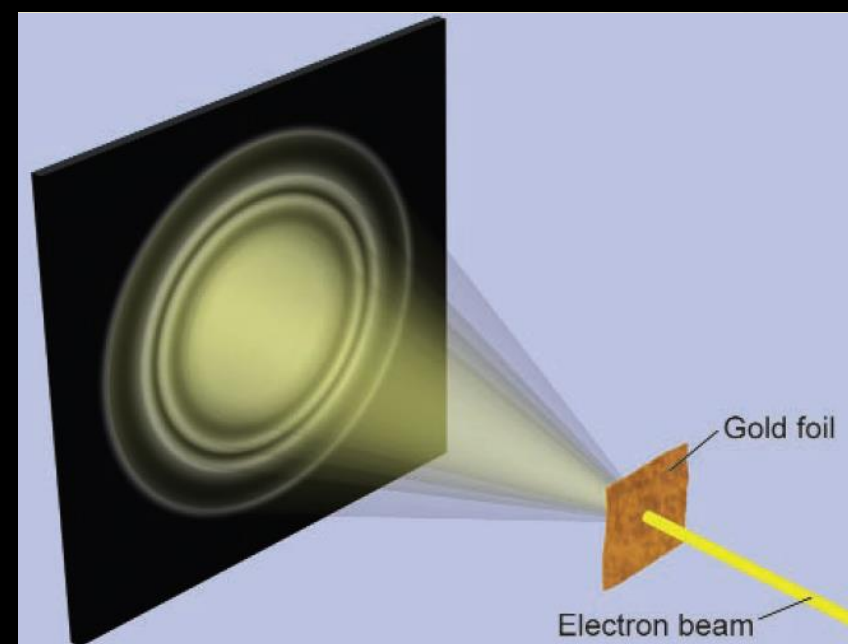
- Postulat: **Teilchen verhalten sich wie Wellen mit Wellenlänge:**  
 $\lambda = h/p$

- Experimentell betätigt: Beugung von Elektronen an Goldfolie

de Broglie: 1924

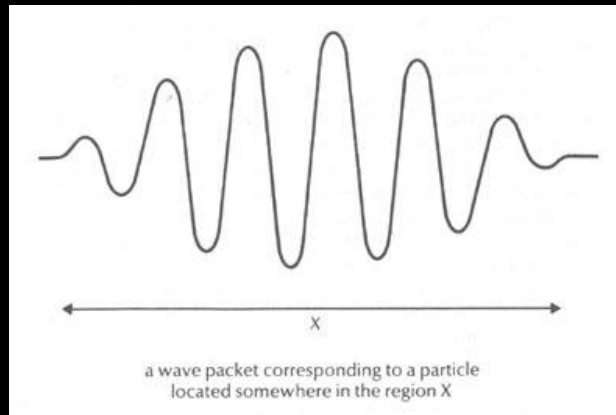


Davisson & Germer: 1927



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

Heisenberg: 1925



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



- Analogie:

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

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

Energie - Zeit - Unschärfe:

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!

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

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

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

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

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

# Und was bedeutet das?

- Wahrscheinlichkeitsinterpretations:

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

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

Max Born: 1926

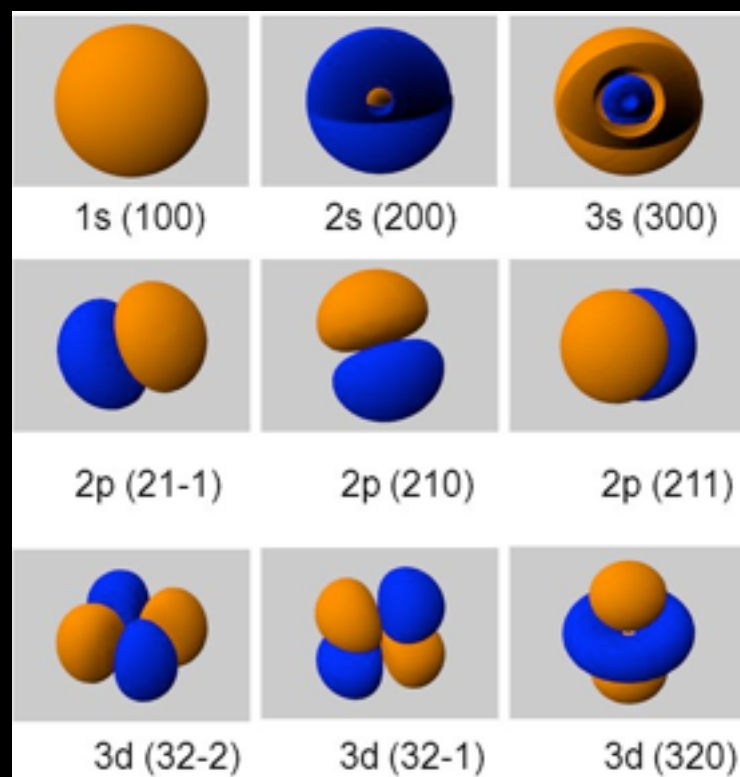
N.b.:  
Kopenhagener  
Interpretation: Bohr /  
Heisenberg 1927

- Beispiel **Atom**:

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

## Orbitale des Wasserstoffs

[7]





# Und was bedeutet das?

- Wahrscheinlichkeitsinterpretations:

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

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

Max Born: 1926

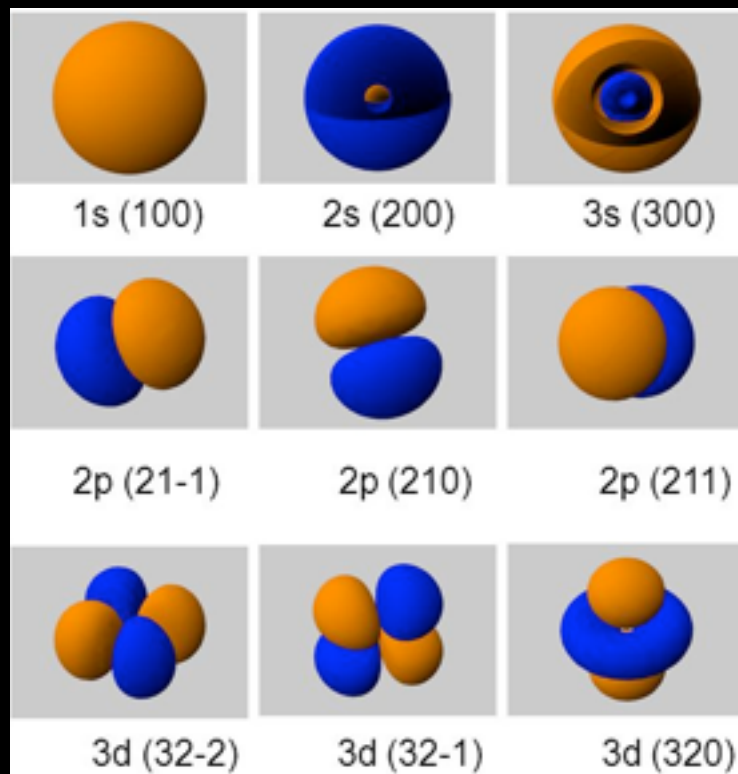
N.b.:  
Kopenhagener Interpretation: Bohr / Heisenberg 1927

- Beispiel **Atom**:

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

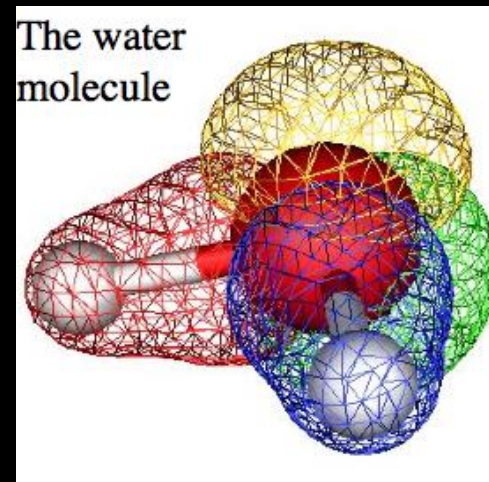
## Orbitale des Wasserstoffs

[7]



Pauling: 1928

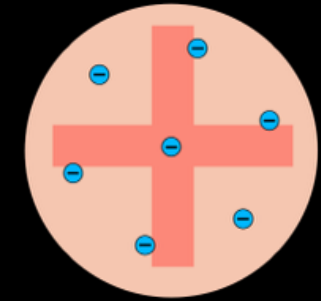
**Chemische Bindungen** reflektieren **Struktur** der Orbitale



**Verständnis der makroskopischen Strukturen!**

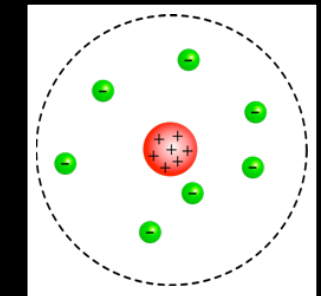
# Atommodelle - 1928

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



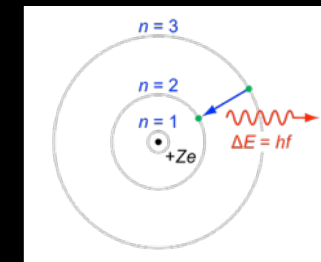
1900

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



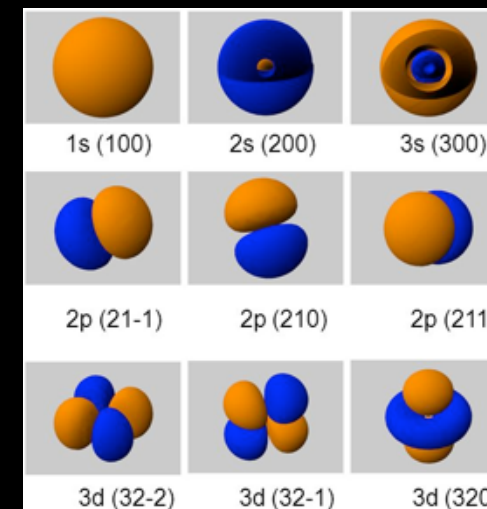
1911

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

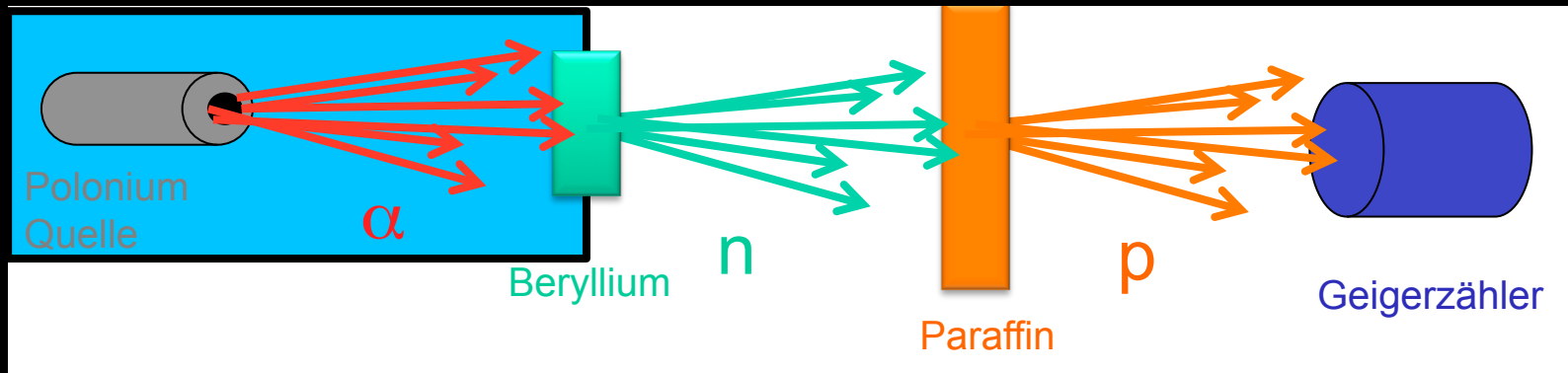


1913

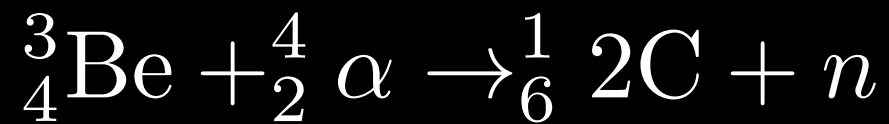
- **Orbital-Modell (Born, Pauling):**
  - Quantenmechanische Beschreibung der Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Elektronen



1928



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



- Bereits Rutherford postulierte neutrale Teilchen im Atomkern
- Experiment zur Untersuchung von 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**

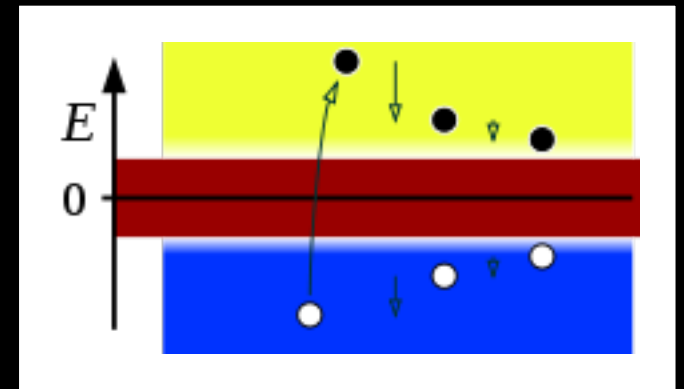
→ Pauli Prinzip 1940

**Vorhersage von Anti-Teilchen**



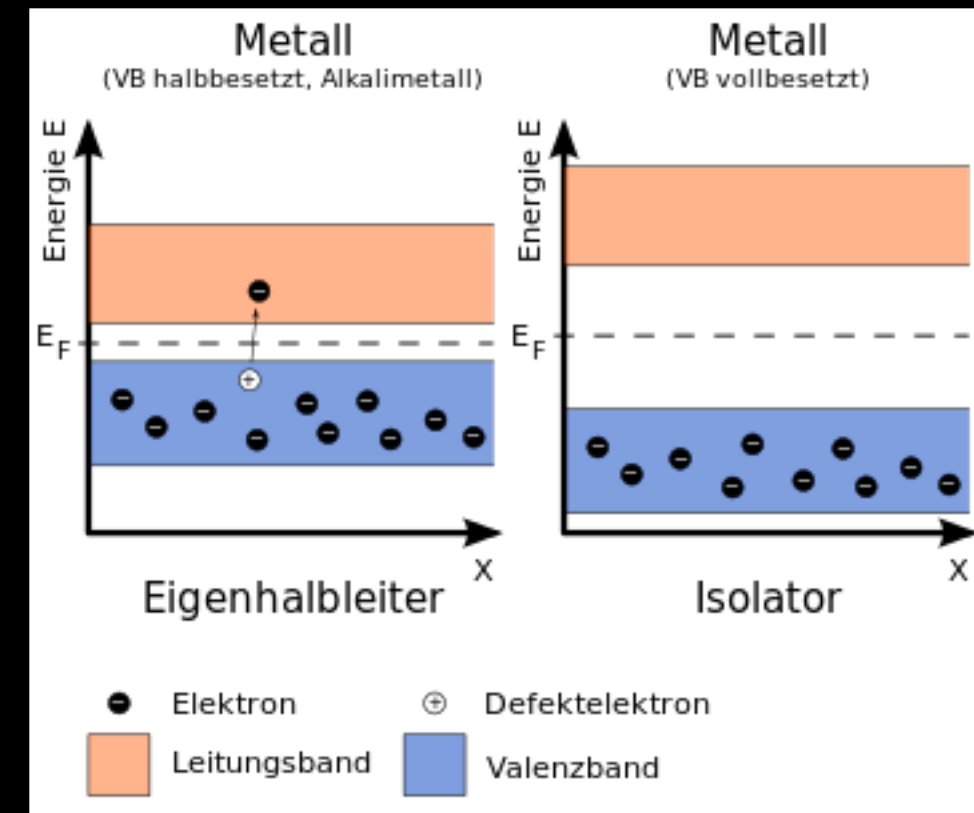
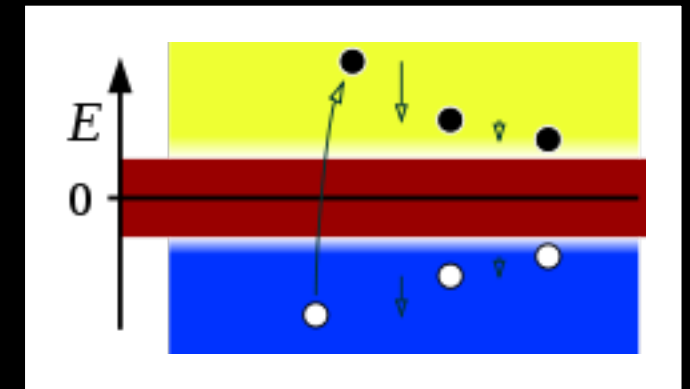
# Zustände mit negativer Energie

- Historisch: Dirac See
  - Unendlich viele Teilchen neg. Energie besetzten ALLE Zustände negativer Energie
  - Teilchen mit negativer Energie = Loch im Dirac See
  - Analog: Halbleiter



# 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



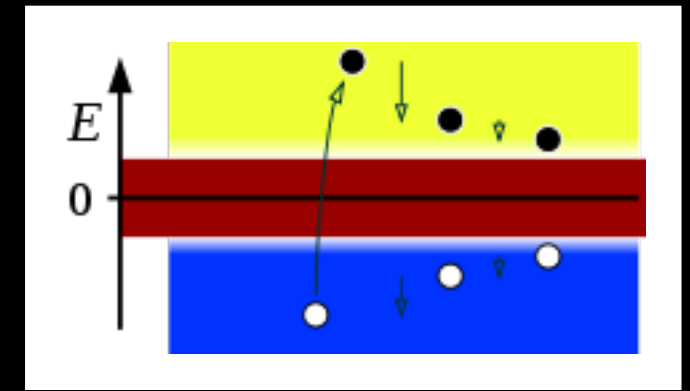
# Zustände mit negativer Energie

- Historisch: Dirac See

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

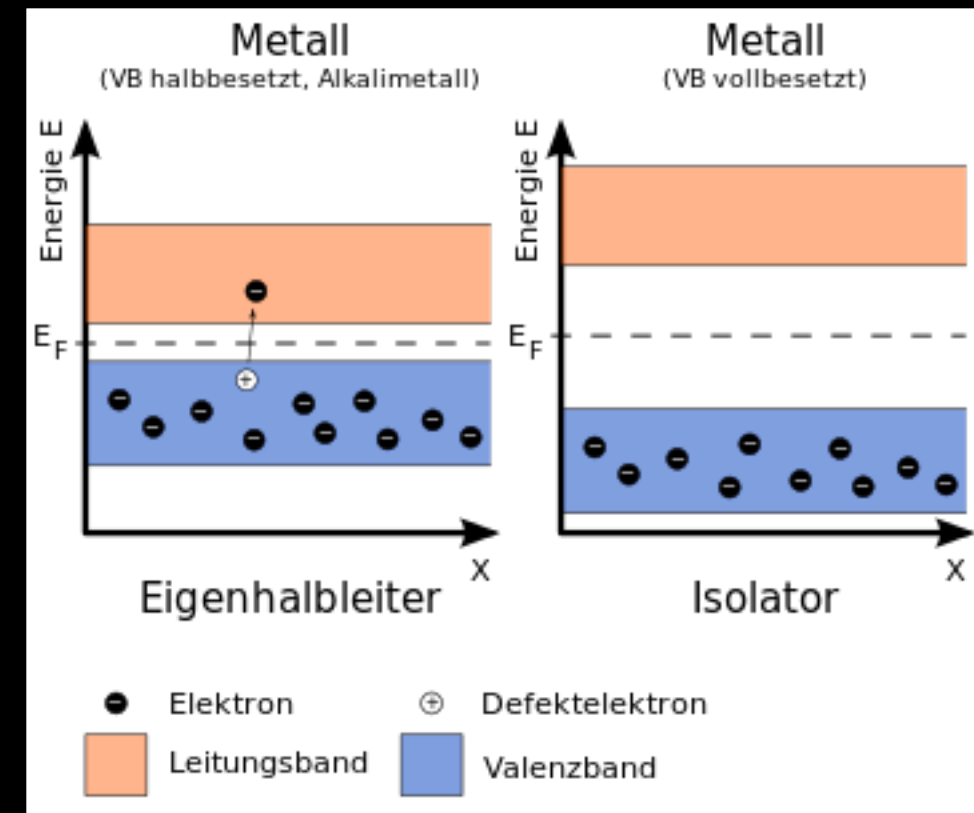
- Teilchen mit negativer Energie = Loch im Dirac See

- Analog: Halbleiter



- Neuinterpretation in Quanten-Feld-Theorie

- Antiteilchen werden wie reale Teilchen nicht wie unbesetzte Zustände behandelt



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

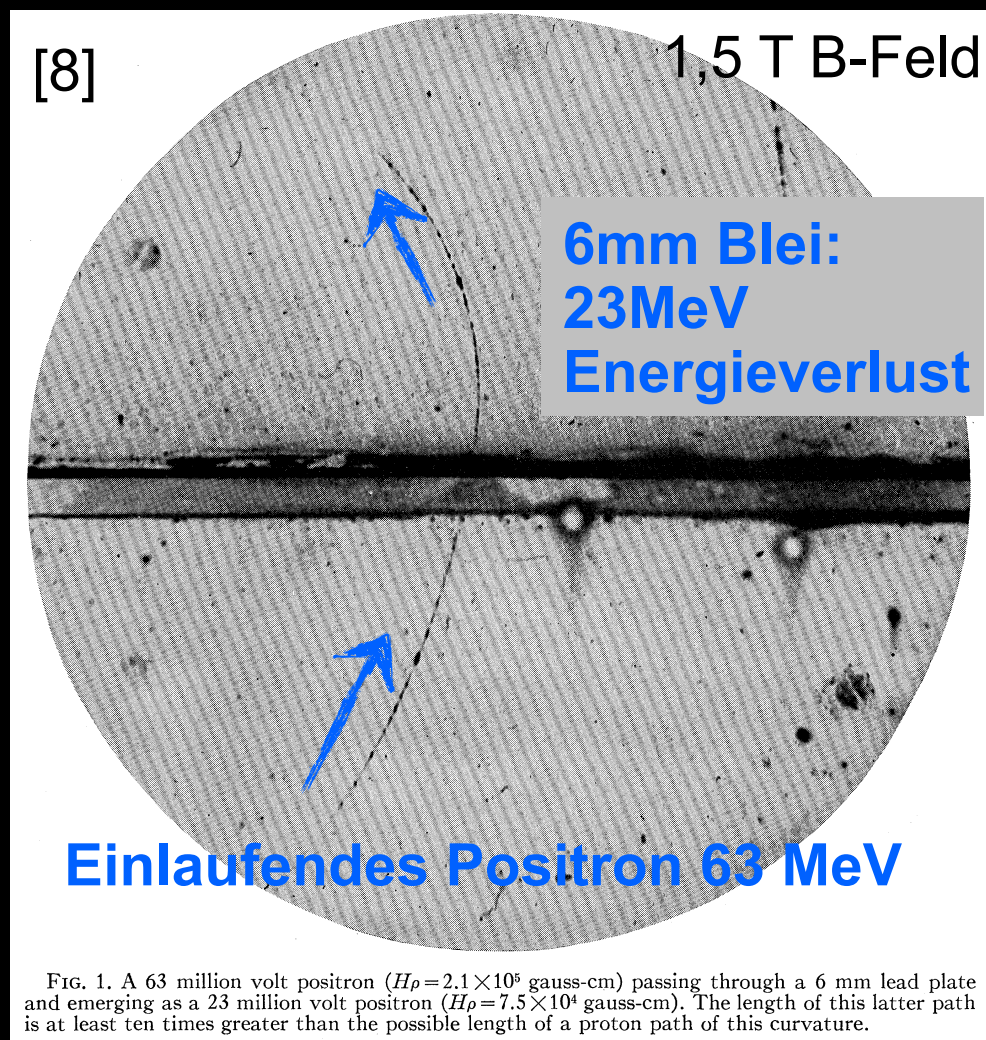
- Vernichtung von Teilchen => Energie erniedrigt =>  $E < 0$

== Erzeugung von Anti-Teilchen

## Entdeckung des Positrons

Anderson: 1932

- Nachweis von Positronen aus Höhenstrahlung in Nebelkammer



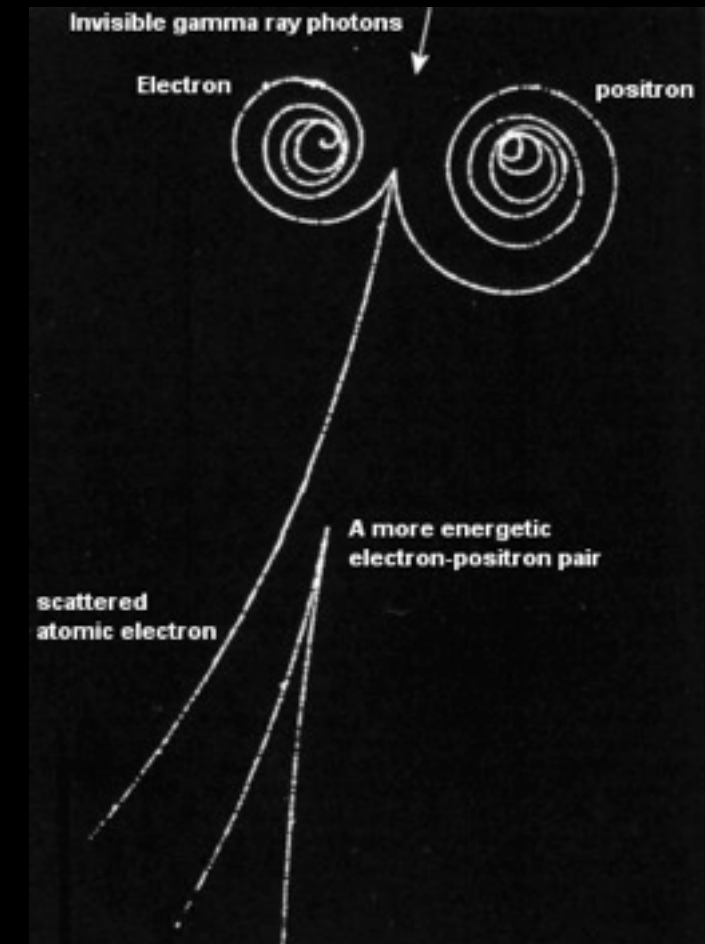
- Flugrichtung durch E-Verlust bestimmt
- Masse & E durch Krümmung / E-Verlust
- Entdeckung des **Myons** 1936
  - „Who ordered that?“
  - Erstes Teilchen der „2. Familie“

- 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**



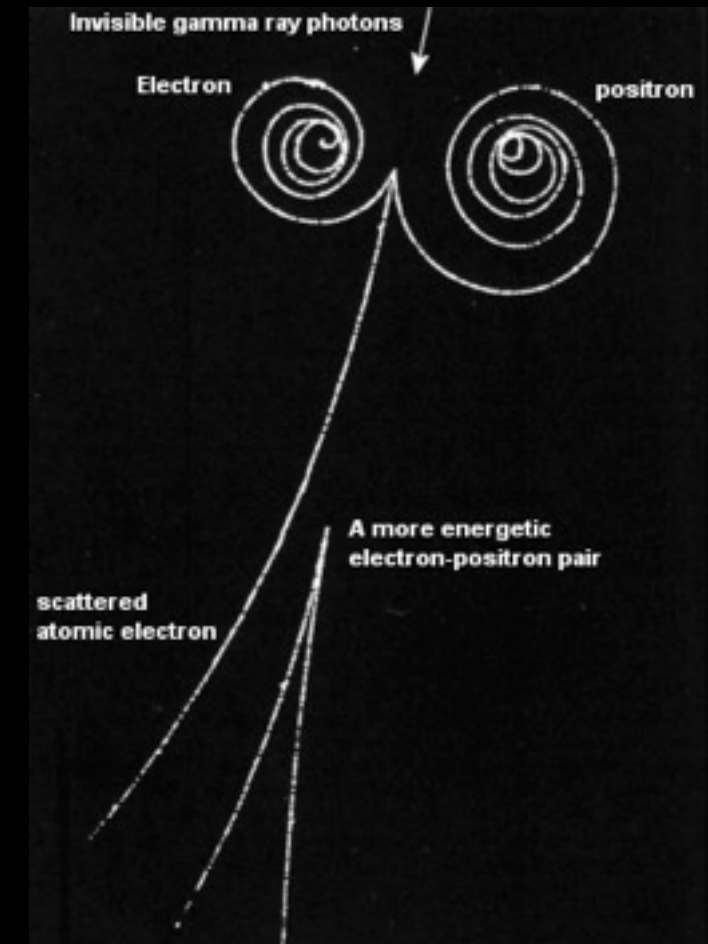


- Verhalten sich wie Teilchen, jedoch mit entgegengesetzter el. Ladung
  - gleiche Masse, Spin, Parität ...

- **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

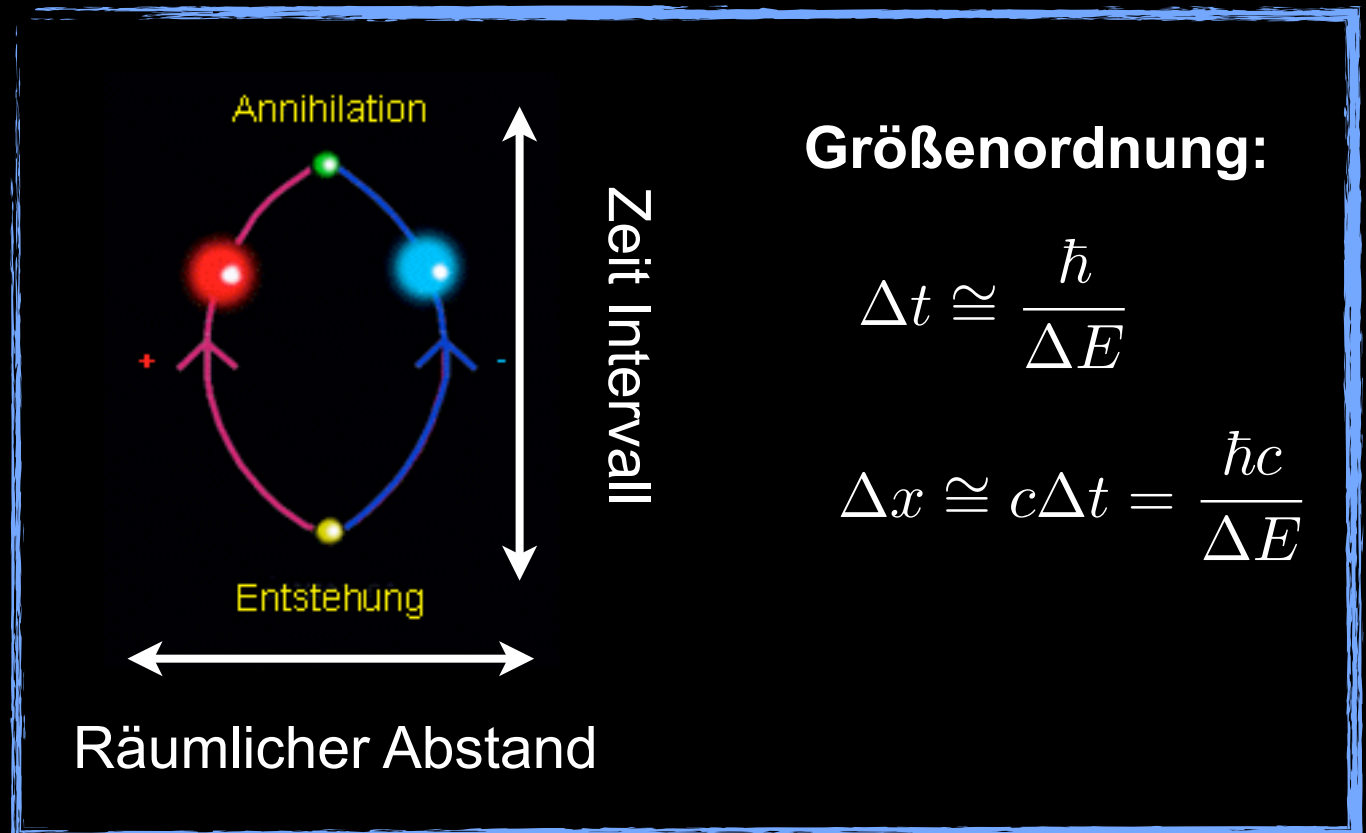
- Paarerzeugung:  $E = mc^2$
- Heisenbergsche Unschärferelation:  $\Delta E \cdot \Delta t \approx \frac{\hbar}{2}$

# 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 erzeugt werden (Virtuelle Teilchen  $\rightarrow m \neq m_0$ )

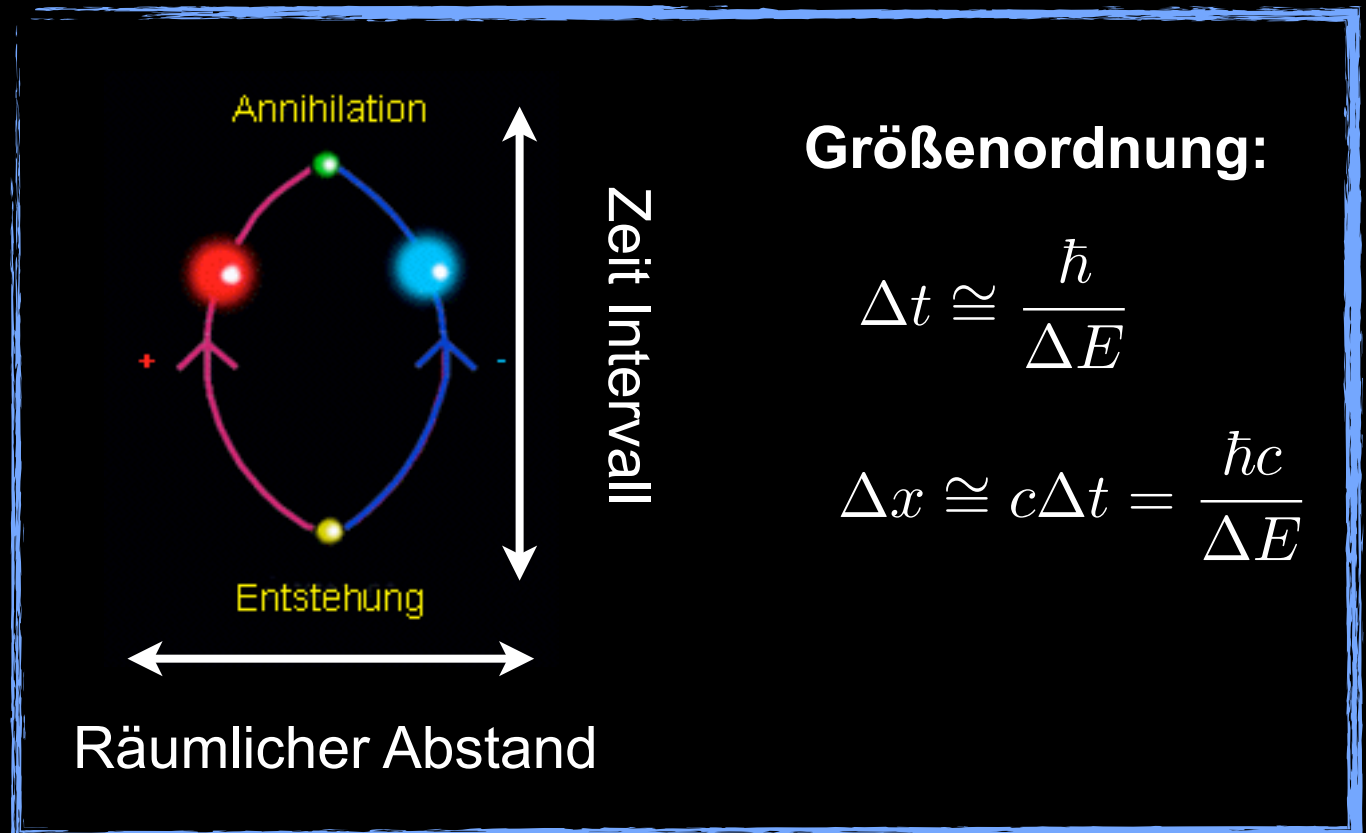
- **Vakuumfluktuation**



# 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

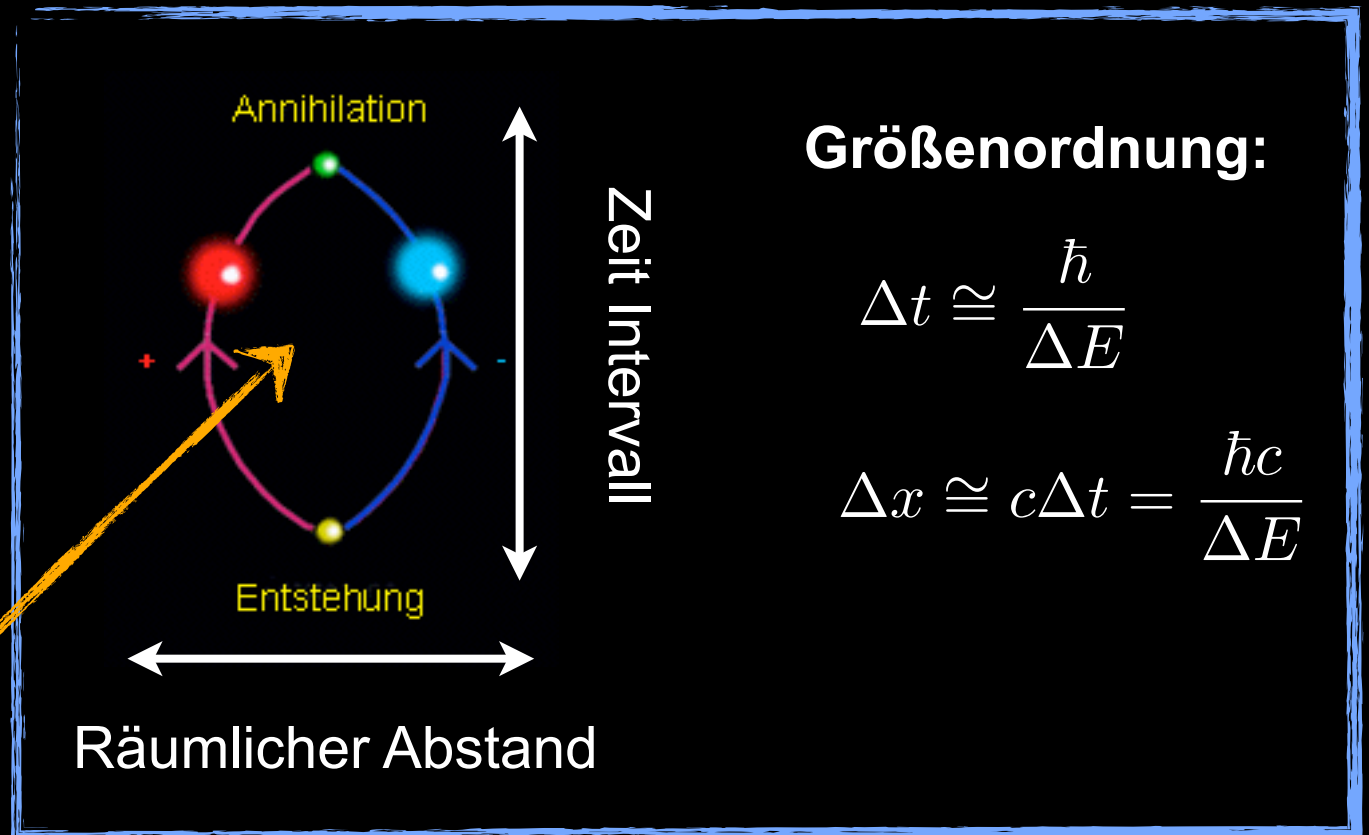


# Antiteilchen und das Vakuum

- 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**

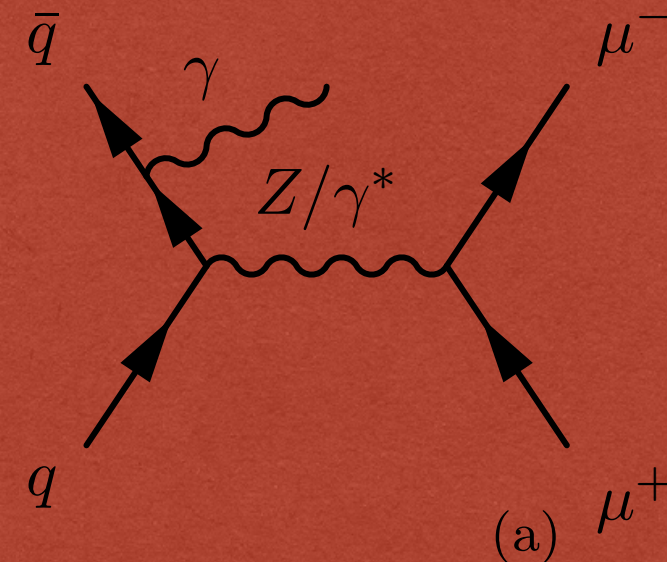
# Antiteilchen und das Vakuum

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

Virtuelle Teilchen & Unschärferelation - Jetzt ganz genau:

**=> Zeit spielt keine Rolle!** Virtuelle Teilchen treten nur in Wechselwirkungen auf

- Virtuelle Teilchen = mathematisches Konstrukt & Vorstellungshilfe!
- Keine realen, beobachtbaren Teilchen



**Virtuelle Teilchen**





- Casimir Effekt:

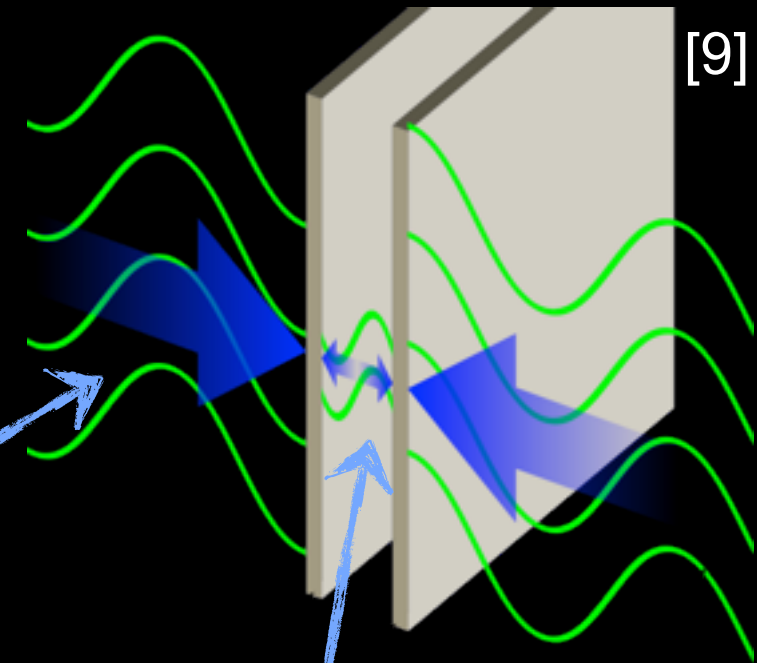
- Messbarer äußerer Druck auf Metallplatten

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

- ~1 bar @ d = 11nm

Alle Wellenlängen  
(Energien) möglich

Nur passende  
Wellenlängen möglich



- Casimir Effekt:

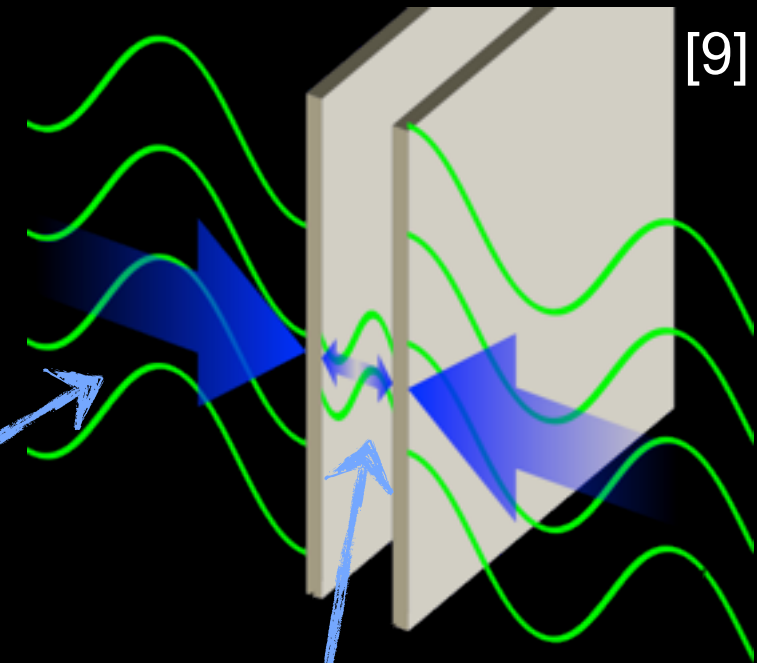
- Messbarer äußerer Druck auf Metallplatten

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

- ~1 bar @ d = 11nm

Alle Wellenlängen  
(Energien) möglich

Nur passende  
Wellenlängen möglich



- Elektron **polarisiert Vakuumfluktuationen!**

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

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

- Casimir Effekt:

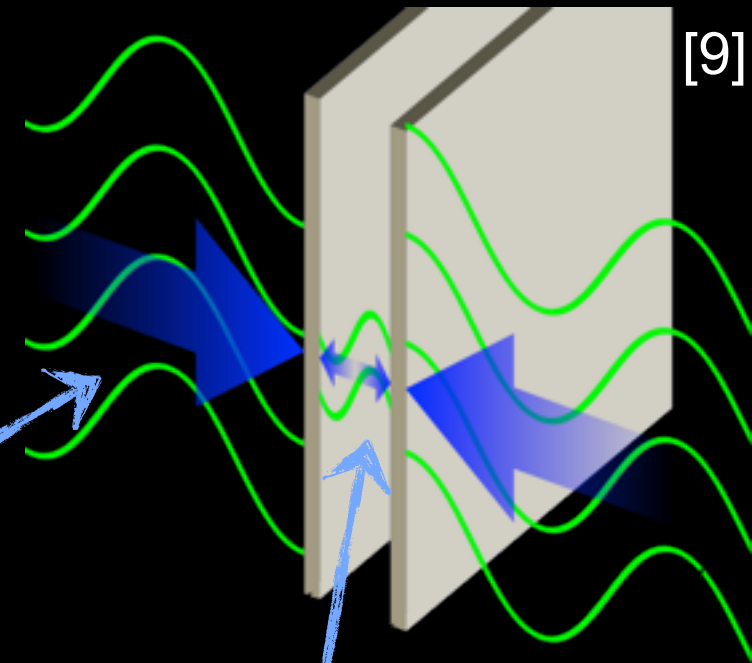
- Messbarer äußerer Druck auf Metallplatten

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

- ~1 bar @ d = 11nm

Alle Wellenlängen  
(Energien) möglich

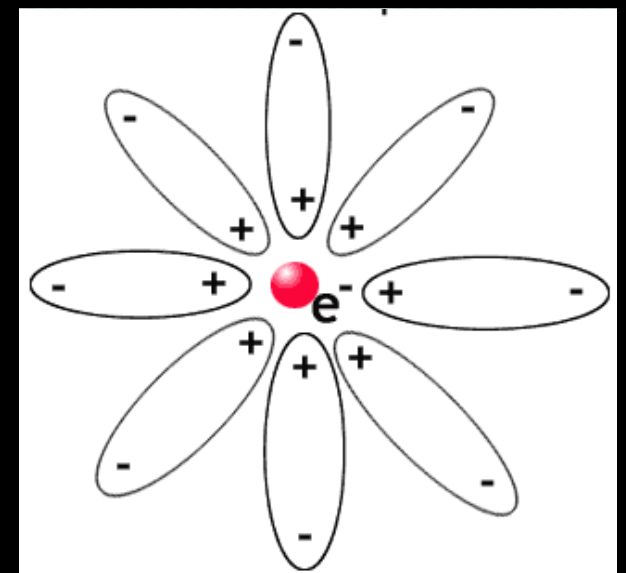
Nur passende  
Wellenlängen möglich



- Elektron **polarisiert Vakuumfluktuationen!**

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

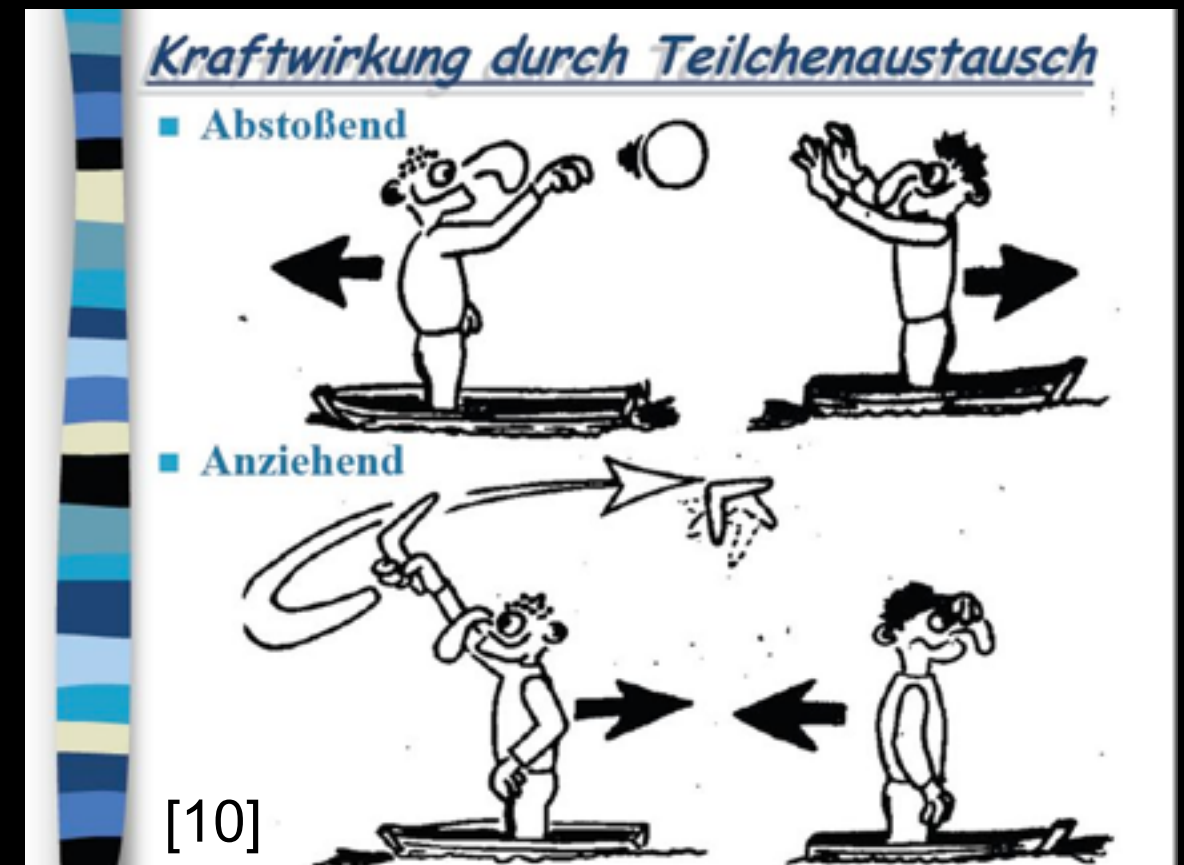
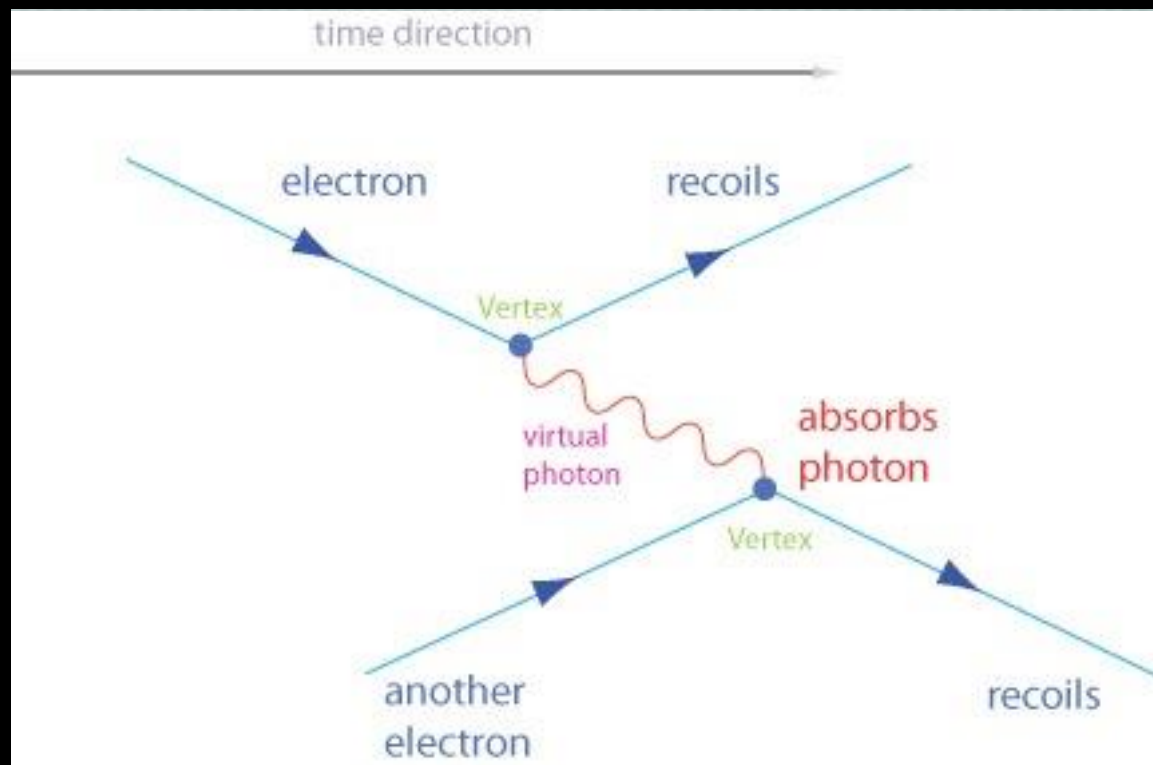
- ▶ Scheinbare el. Ladung abhängig vom Abstand!
- ▶ „**laufende**“ elektromagnetische Kopplungsstärke



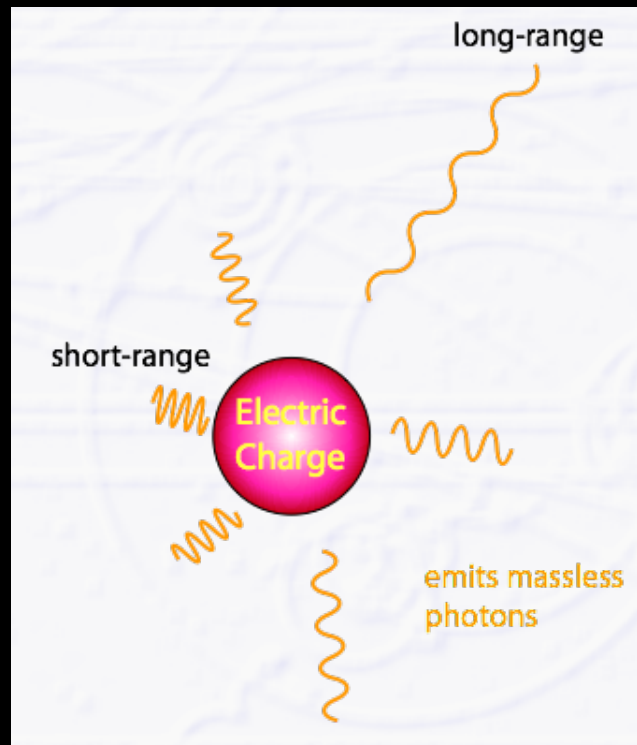
# Vakuumfluktuationen - Berechnung?

Feynman, Schwinger,  
Tomonoga, Dyson:  
1934-1948

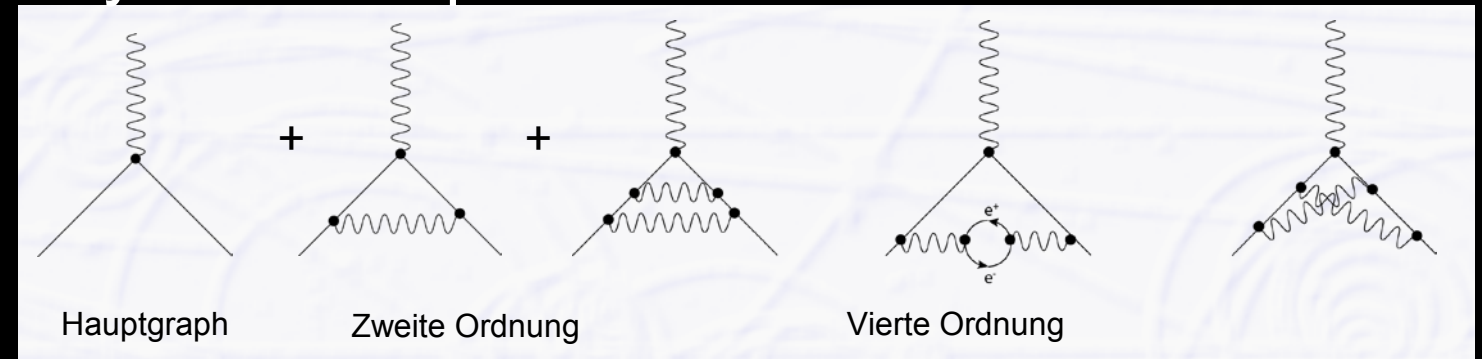
- Wie berechnet man die Interaktion zweier Elektronen?
  - Lösung: **Quantisierung des elektromagnetischen Feldes** (2. Quantisierung)
    - **Photonen** entsprechen den **Feld-Quanten**
    - Feld-Quanten übertragen Kraft - **Botenteilchen** (oder: **Austauschteilchen**)
    - **Virtuelle Teilchen**: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



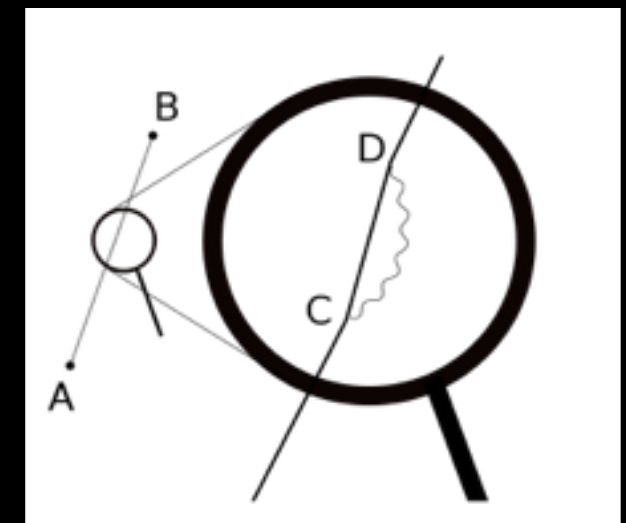
- Virtuelle Teilchen
  - Aber wie viele?



- Feynman Graphen für QED Korrekturen



- Elektron Selbstenergie
  - Wird  $\infty$



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



# Näherungen können sehr präzise sein



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

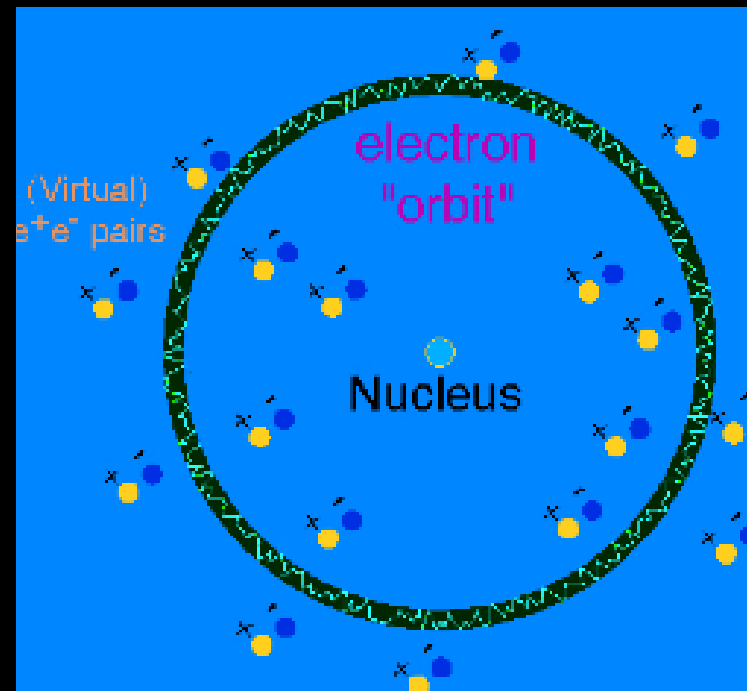
1946

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

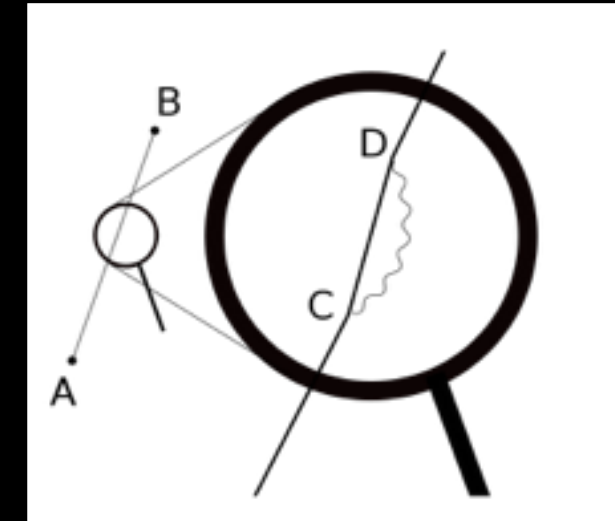
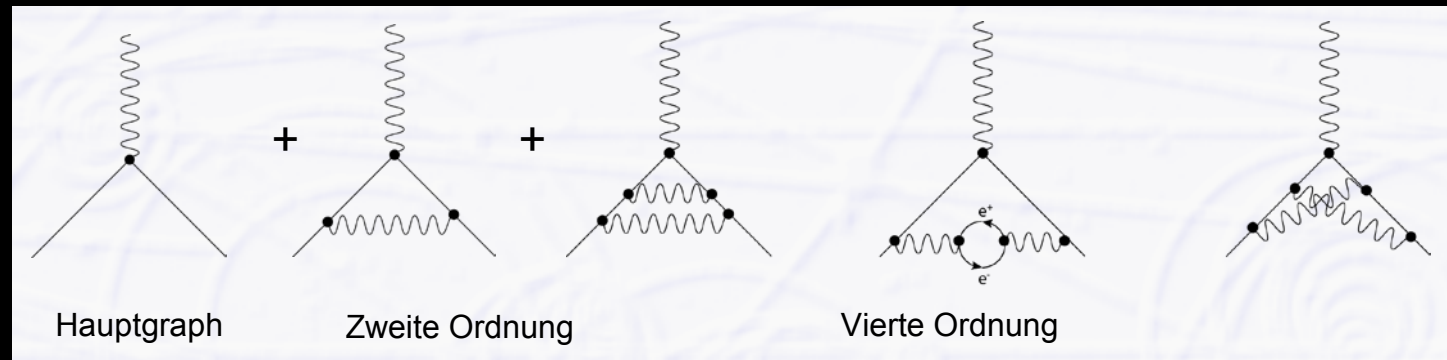
- **Lamb Shift**

1948

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



- Feynman Graphen für QED Korrekturen => Störungsreihe



- Störungsreihe entspricht einer ‚effektiven‘ Feldtheorie
  - Nur gültig innerhalb eines **endlichen Energiebereiches**
  - Bei Berechnungen werden methodenbedingt auch Bereiche außerhalb des Gültigkeitsbereichs mit einbezogen
    - **Kann zu unendlichen Ergebnissen führen**

- Elektron Selbstenergie
  - Wird  $\infty$

- 1) Betrachte nur Beiträge bis zu einer gewissen Energie („Regularisierung“)
  - 2) Redefinition der Parameter der Theorie (Kopplungskonstanten, Ladungen ..)
    - Berücksichtigung von (Strahlungs-)Korrekturen außerhalb des Gültigkeitsbereiches
    - Ergebnisse werden endlich → **physikalisch bedeutsam!**
- **Laufende Kopplungskonstanten**
  - **Veränderliche Ladungen**  
in Abhängigkeit des Energiebereiches

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:

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

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

# Was hält Protonen und Neutronen zusammen?

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

Yukawa: 1935

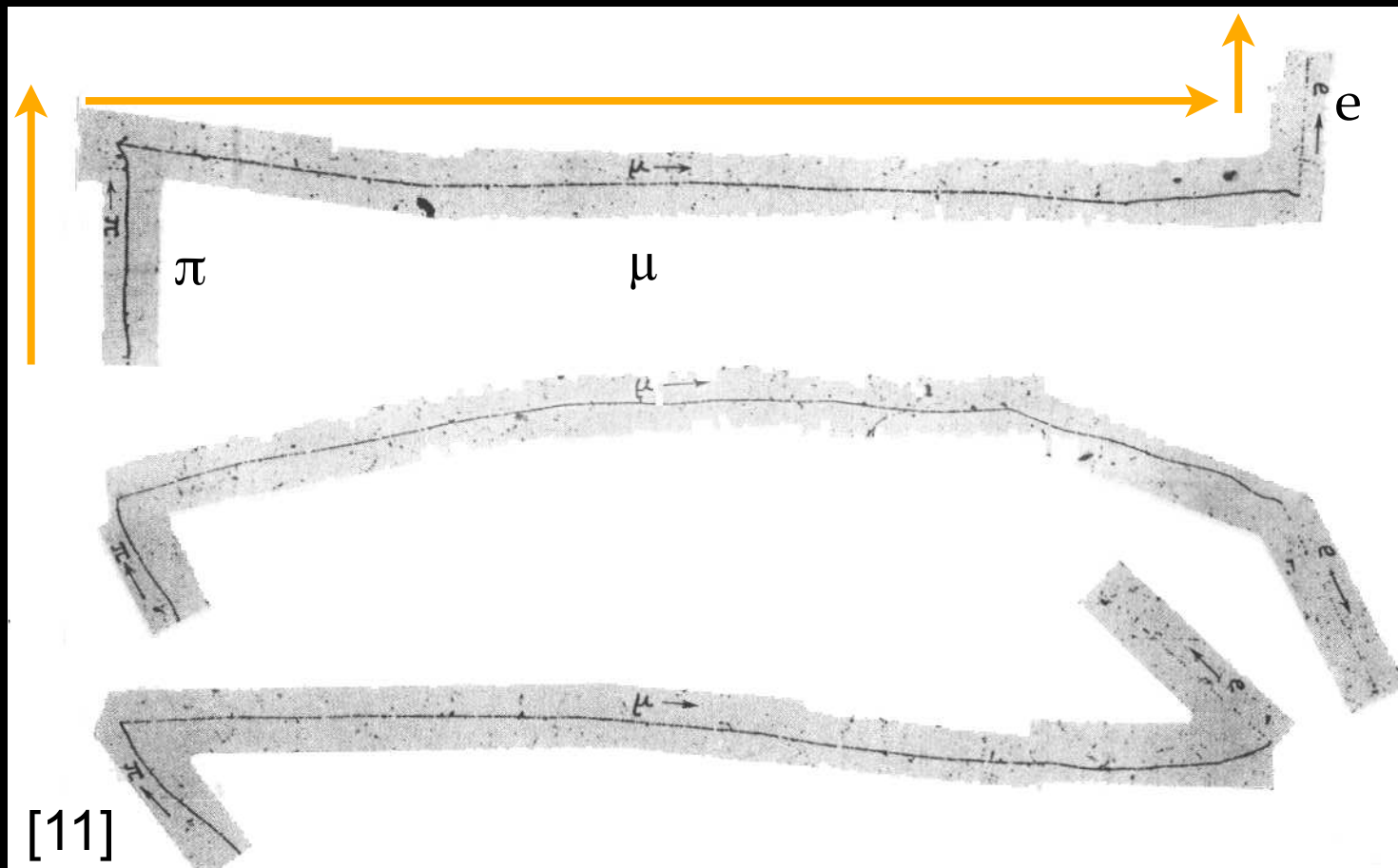
- Austausch von schweren Teilchen: **Pion**
  - Vorhergesagt von Yukawa:

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

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

- 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

STERNENFOLGEN | 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  **$\mu$  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

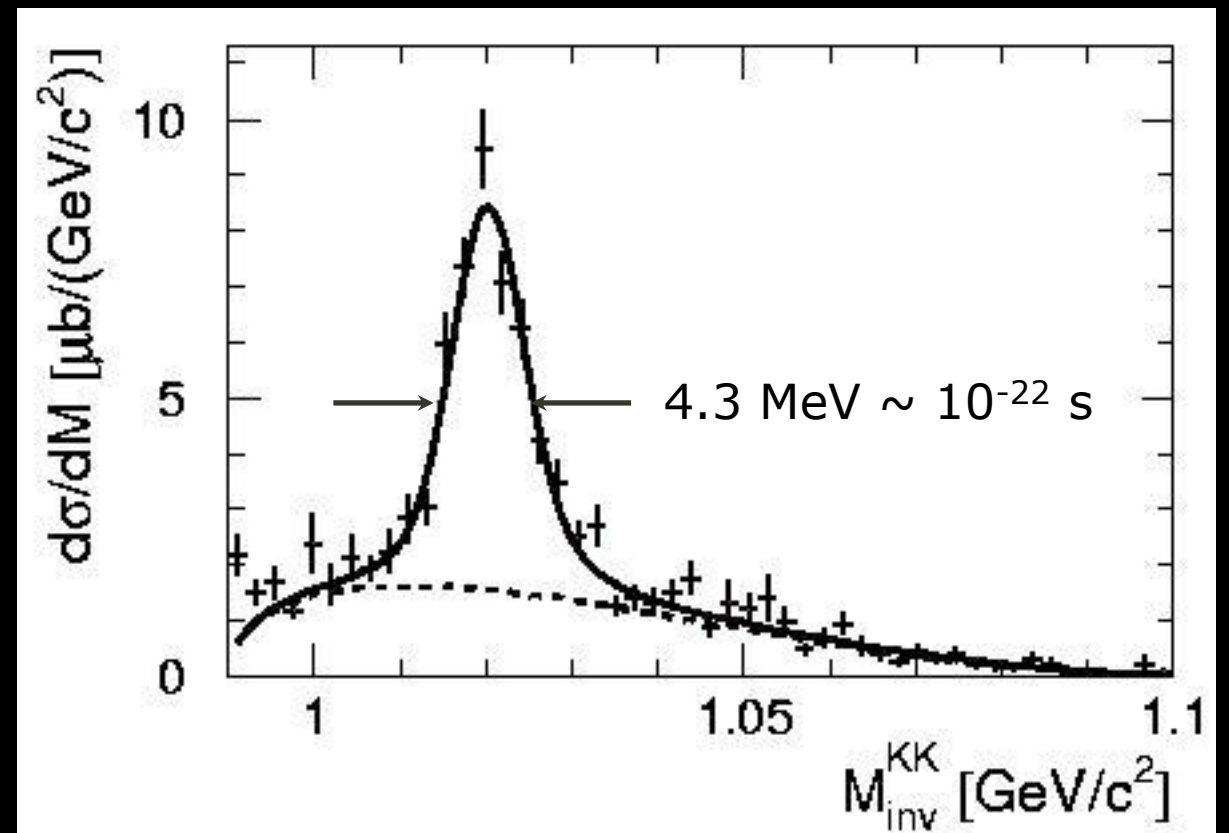
- invariante Masse M:

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

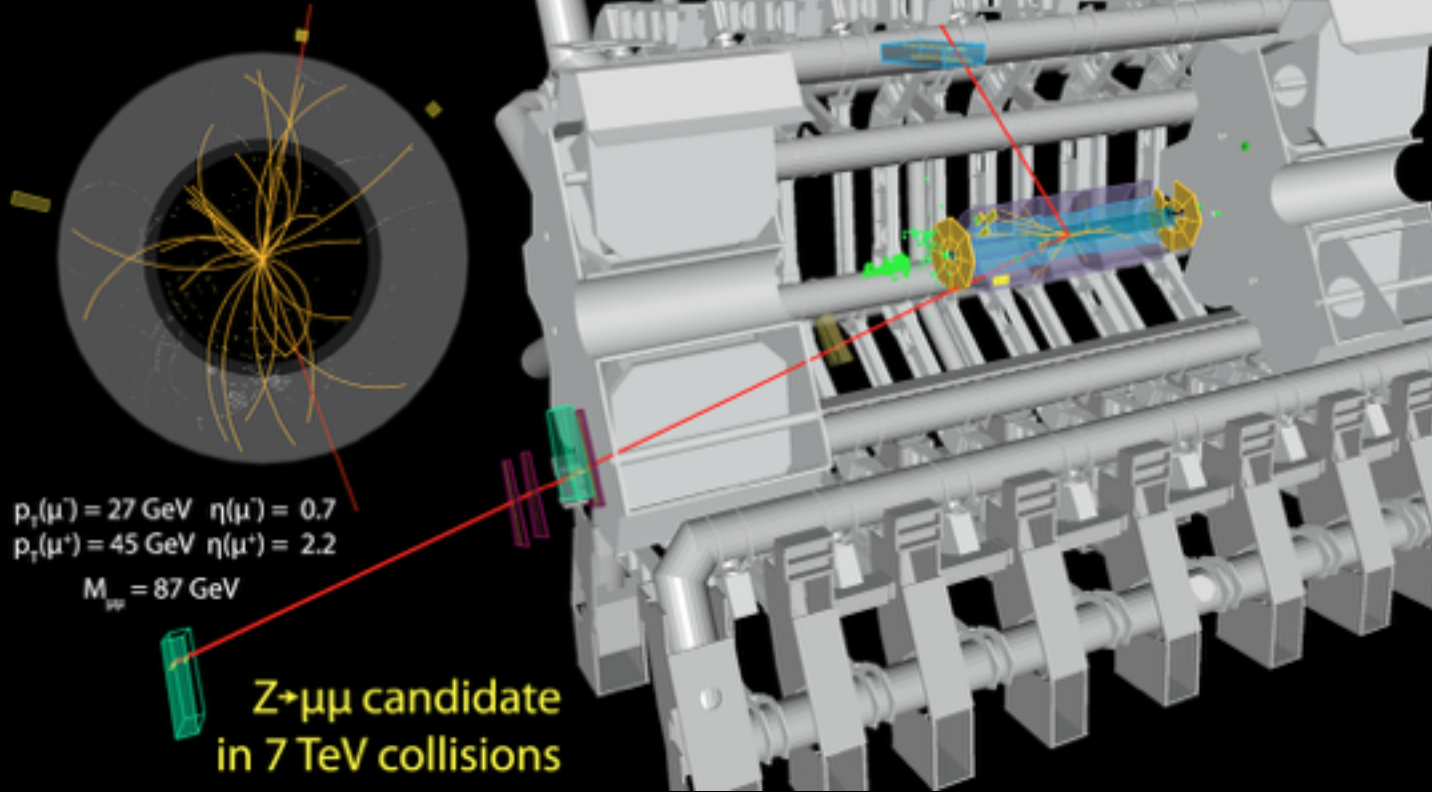
$$(mc^2)^2 = E^2 - \vec{p}^2 c^2$$

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

bleibt in Umwandlung erhalten!

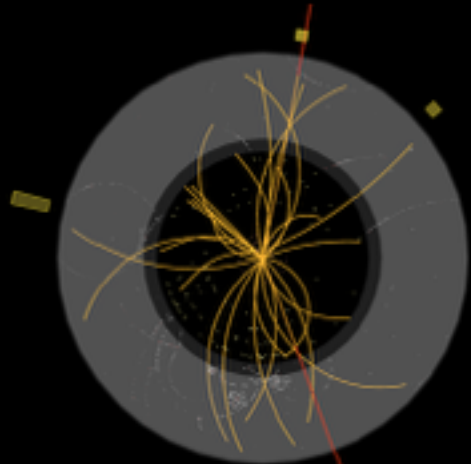


**ATLAS**  
EXPERIMENT  
Run: 154822, Event: 14321500  
Date: 2010-05-10 02:07:22 CEST



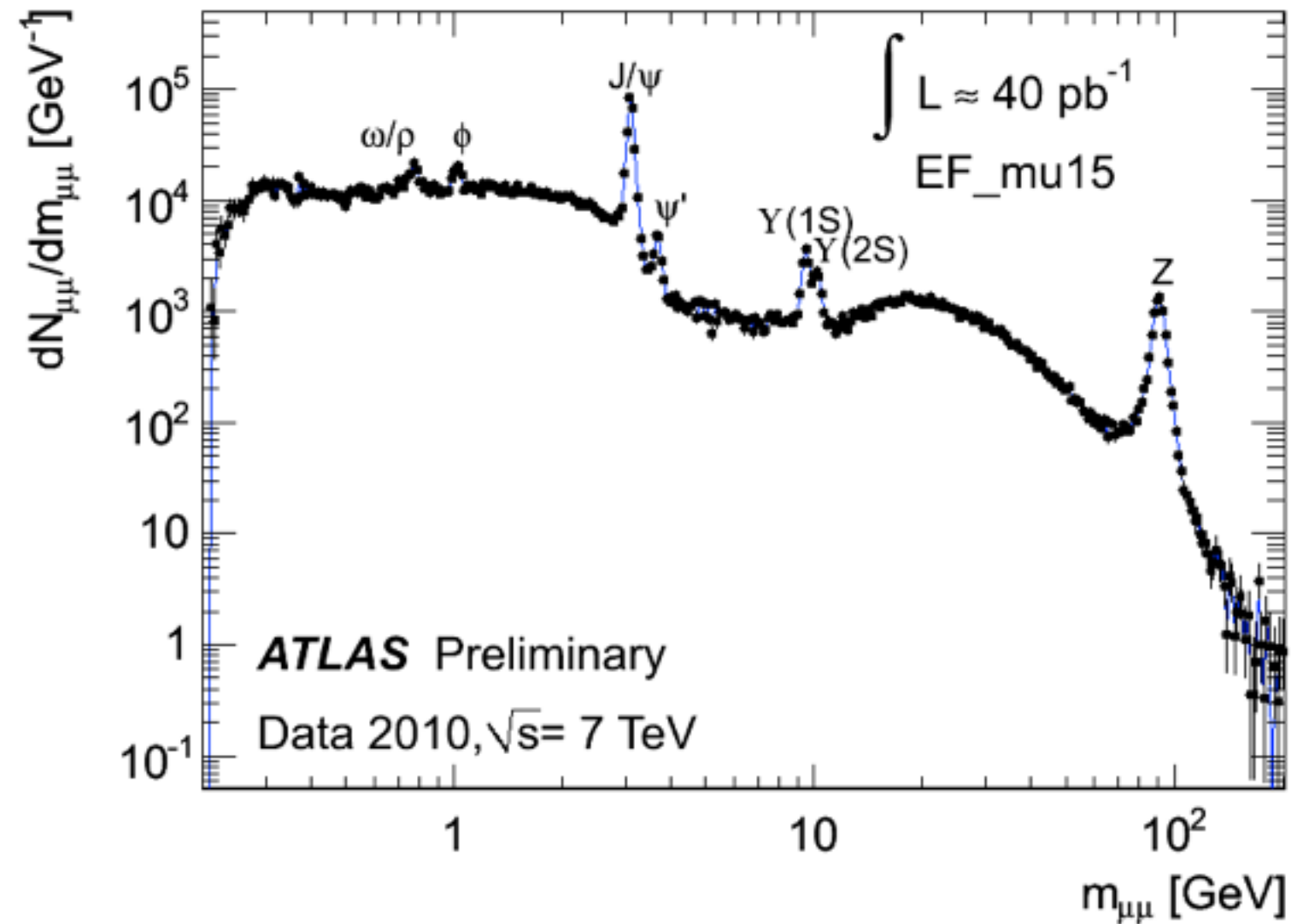
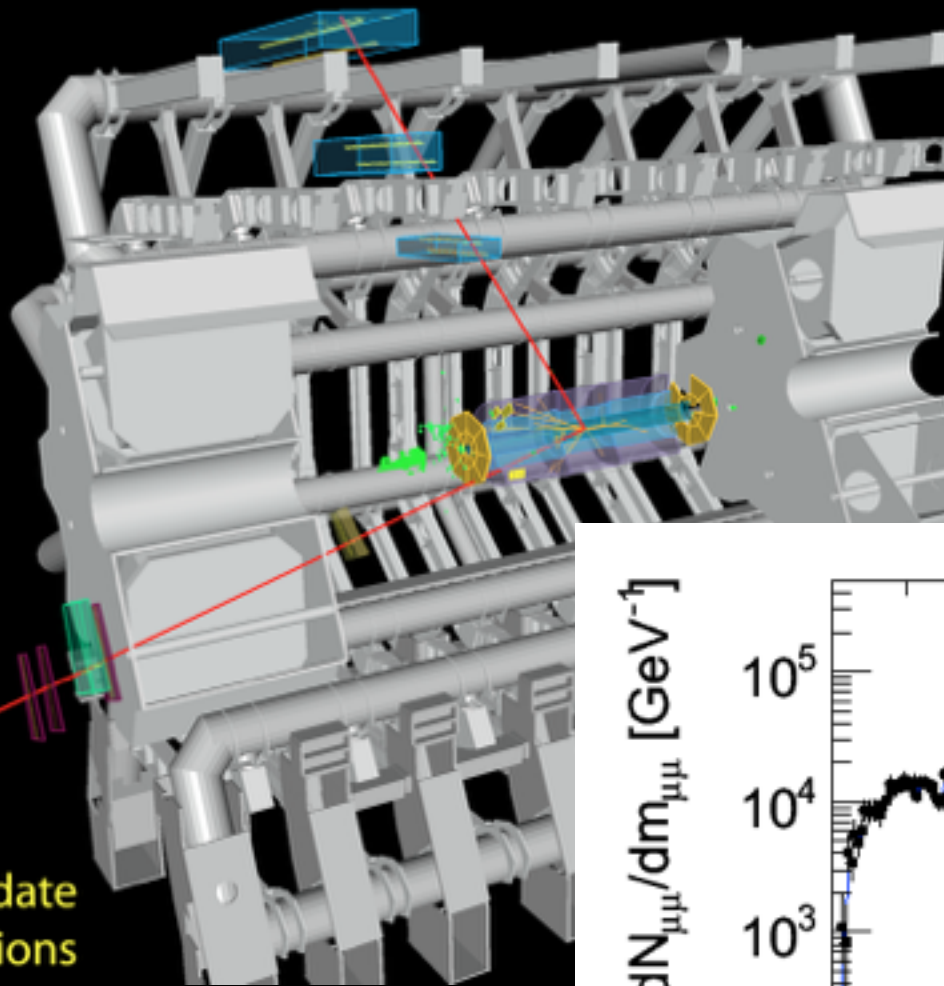
**ATLAS**  
EXPERIMENT

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**

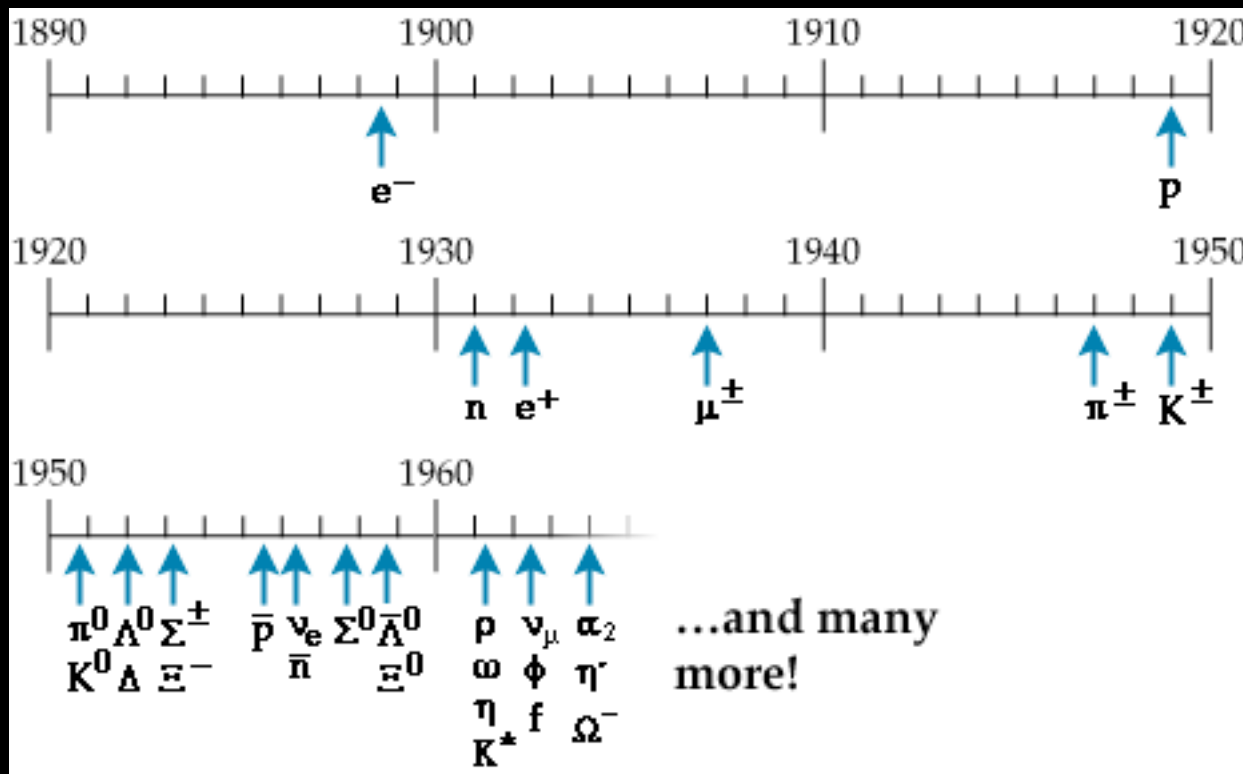




# Wer sucht - der findet ... mehr als gewollt



- 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

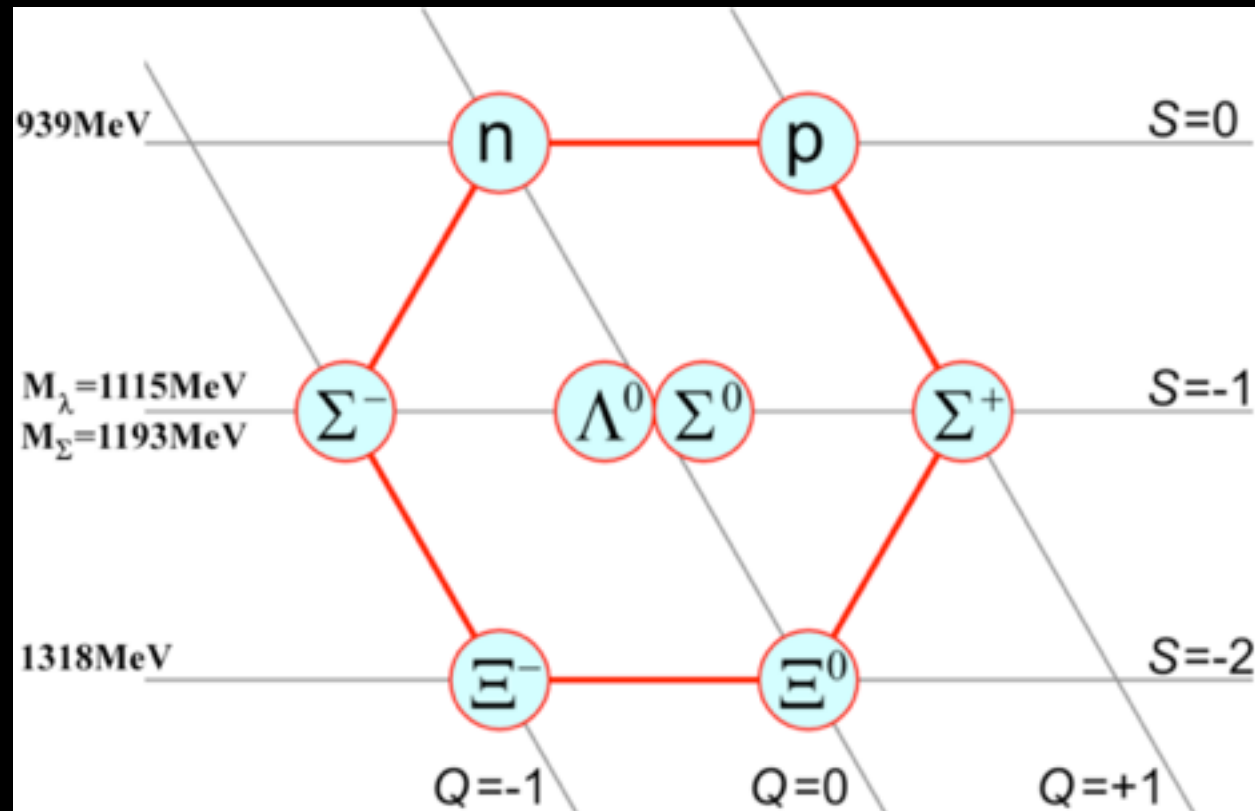
$\pi^\pm$  (139.6),  $\pi^0$  (135.0),  $\eta$  (547.9),  $\sigma$  (400-550),  $\rho$  (770),  $\omega$  (782.7),  $\eta'$  (957.8),  $f_0$  (990),  $a_0$  (980),  $\phi$  (1019),  $h_1$  (1170),  $b_1$  (1229),  $a_1$  (1230),  $f_2$  (1275),  $f_1$  (1282),  $\eta$  (1295),  $\pi$  (1300),  $a_2$  (1318),  $f_0$  (1370),  $\pi_1$  (1400),  $\eta$  (1409),  $f_1$  (1426),  $\omega$  (1400-1450),  $a_0$  (1474),  $\rho$  (1465),  $\eta$  (1476),  $f_0$  (1505),  $f_2$  (1525),  $\pi_1$  (1662),  $\eta_2$  (1617),  $\omega$  (1670),  $\omega_3$  (1667),  $\pi_2$  (1672),  $\phi$  (1680),  $\rho_3$  (1689),  $\rho$  (1720),  $f_0$  (1720),  $\pi$  (1812),  $\phi_3$  (1854),  $\pi_2$  (1895),  $f_2$  (1944),  $f_2$  (2011),  $a_4$  (1996),  $f_4$  (2018),  $\phi$  (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?

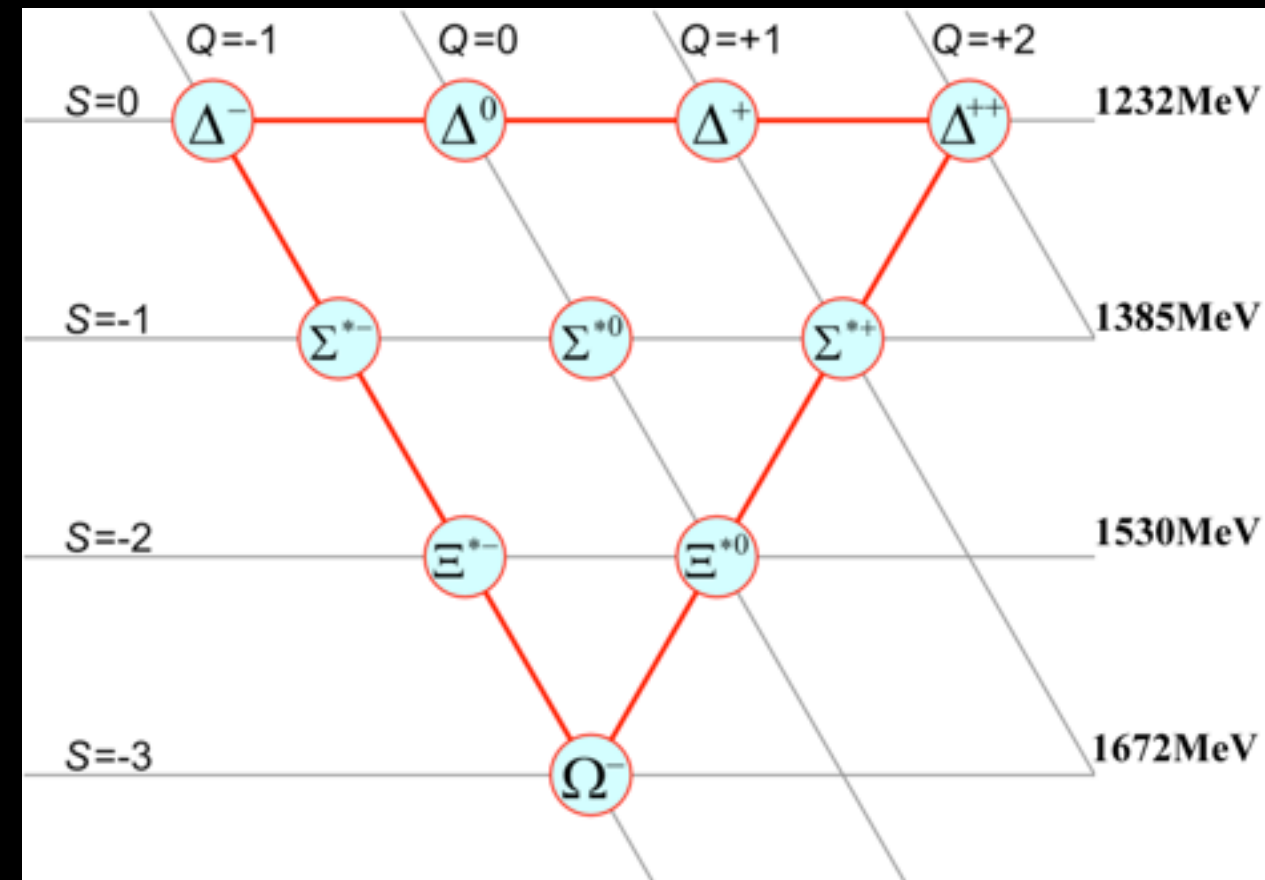
# Hadron - Multiplets

- Suche nach Strukturen:

Spin = 1/2



Spin = 3/2

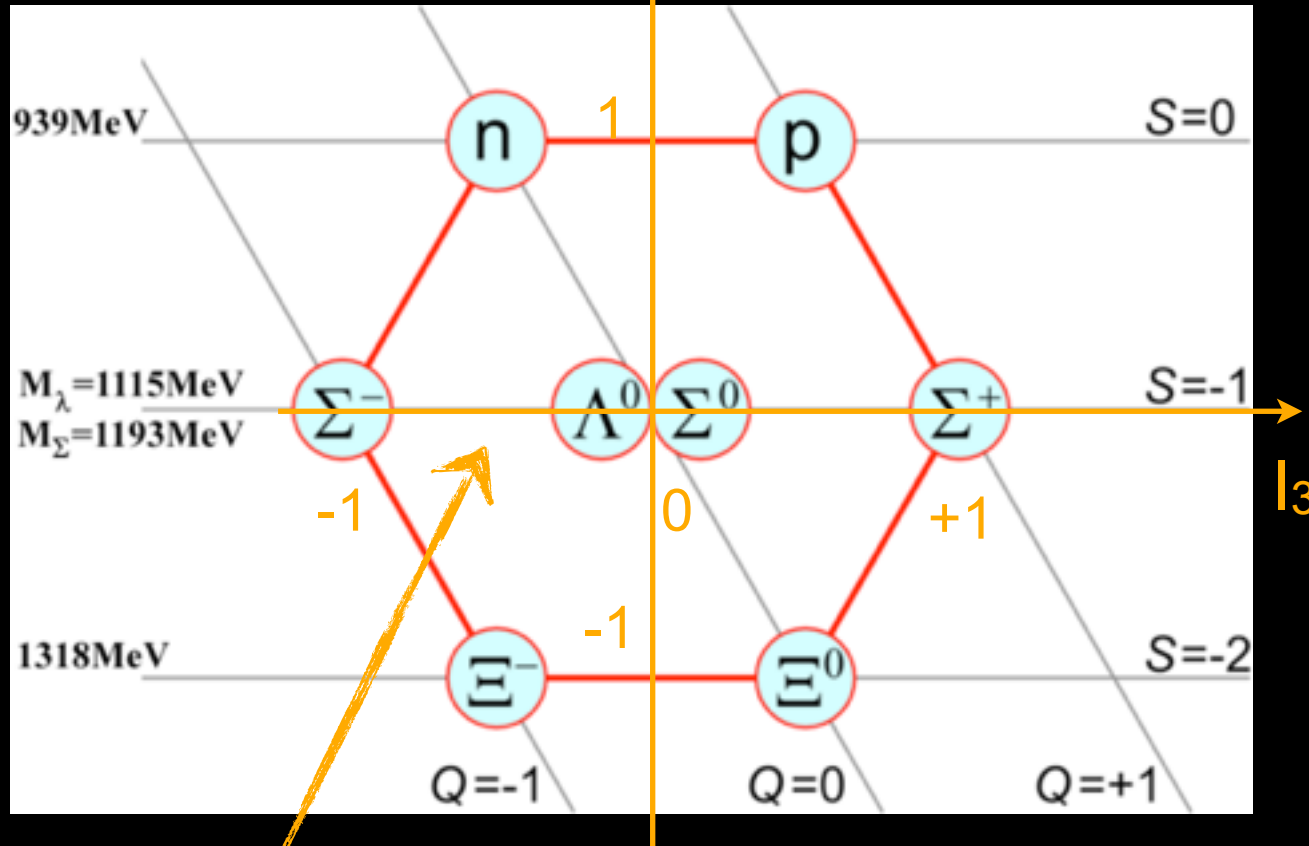


# Hadron - Multiplets

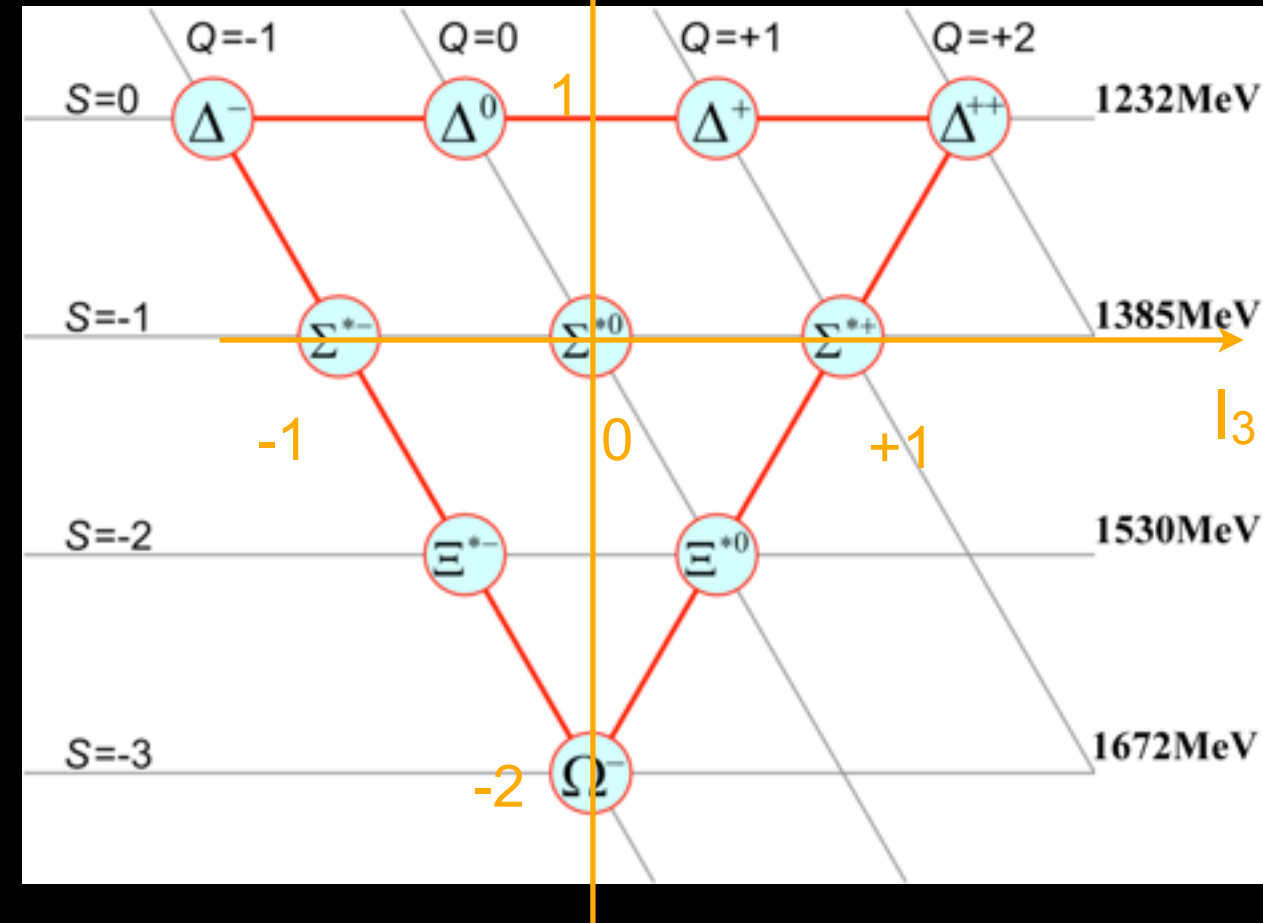
- Suche Nach Strukturen:

Spin = 1/2

$$Y = 2(Q - I_3)$$



Spin = 3/2



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

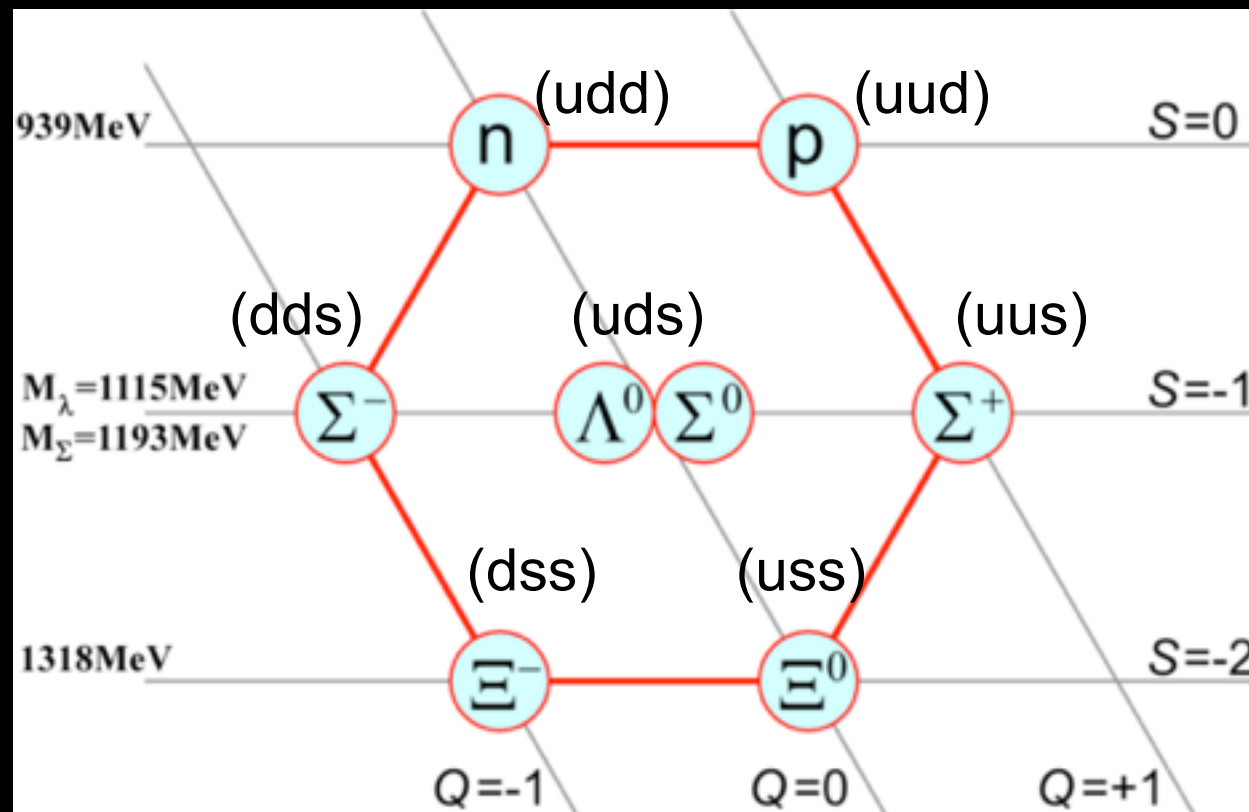
Formal analog zum Spin

# Ordnung durch innere Struktur

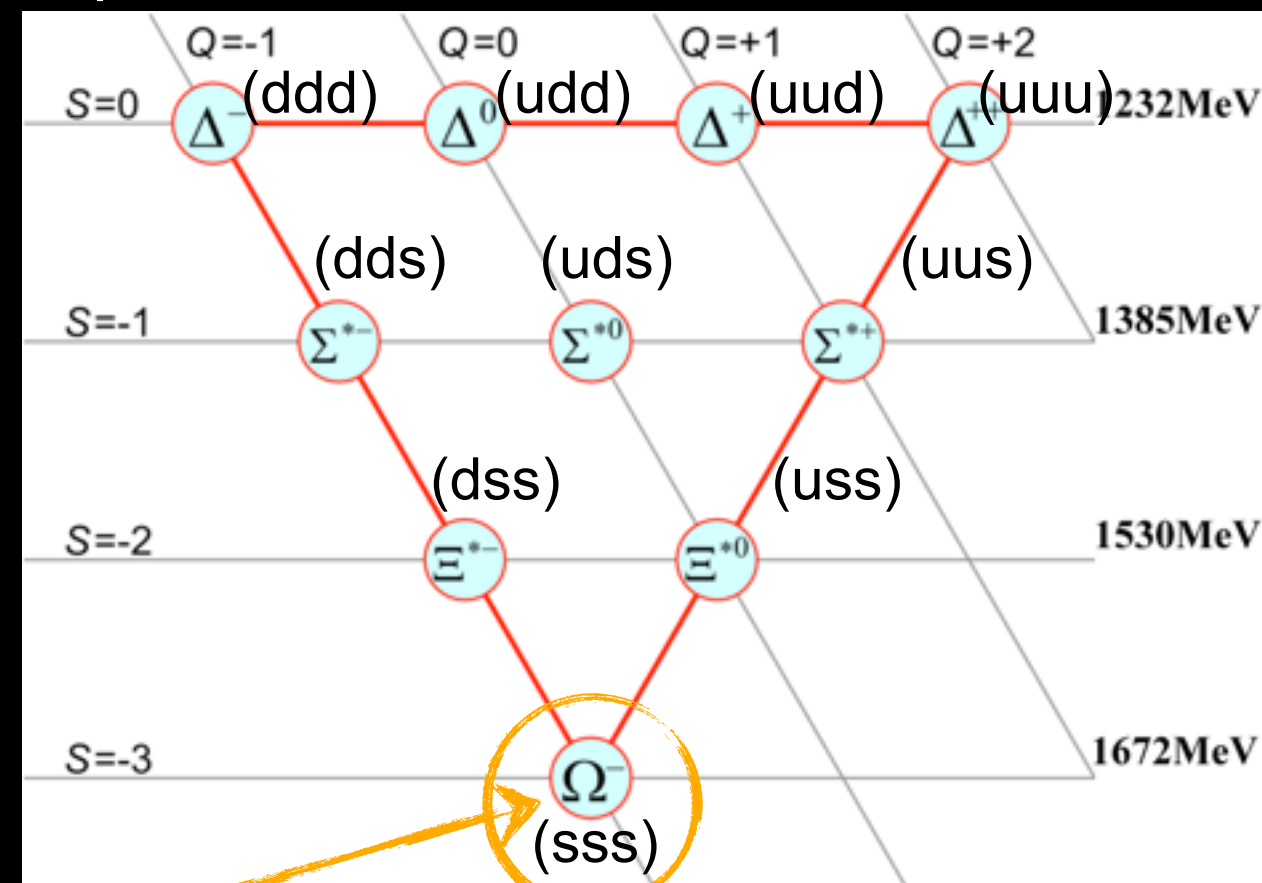
- Postulat:
  - Es gibt **3 fundamentale Teilchen** aus denen alle Hadronen aufgebaut sind (+ Antiteilchen)
  - **Quarks:** up, down, strange

Gell-Mann / Zweig: 1963

Spin = 1/2



Spin = 3/2



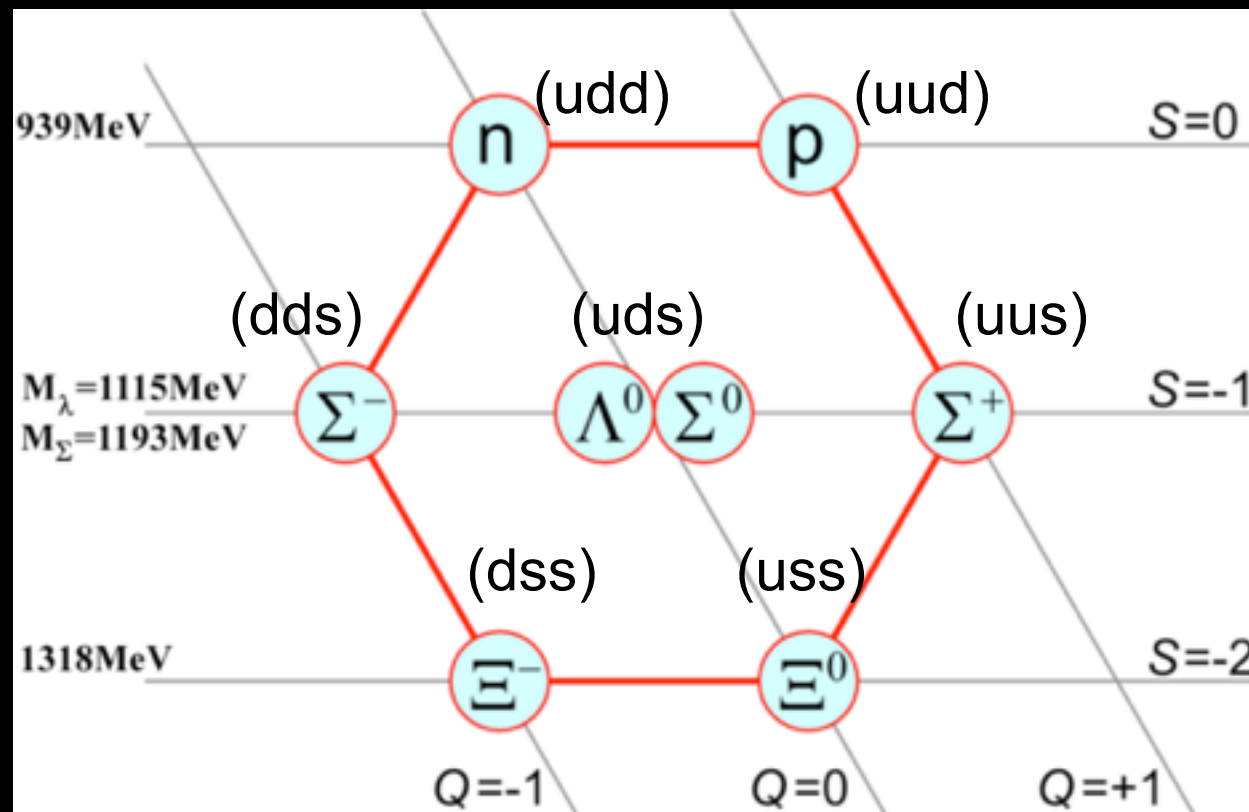
Vorhersage vor experimenteller  
Entdeckung

# Ordnung durch innere Struktur

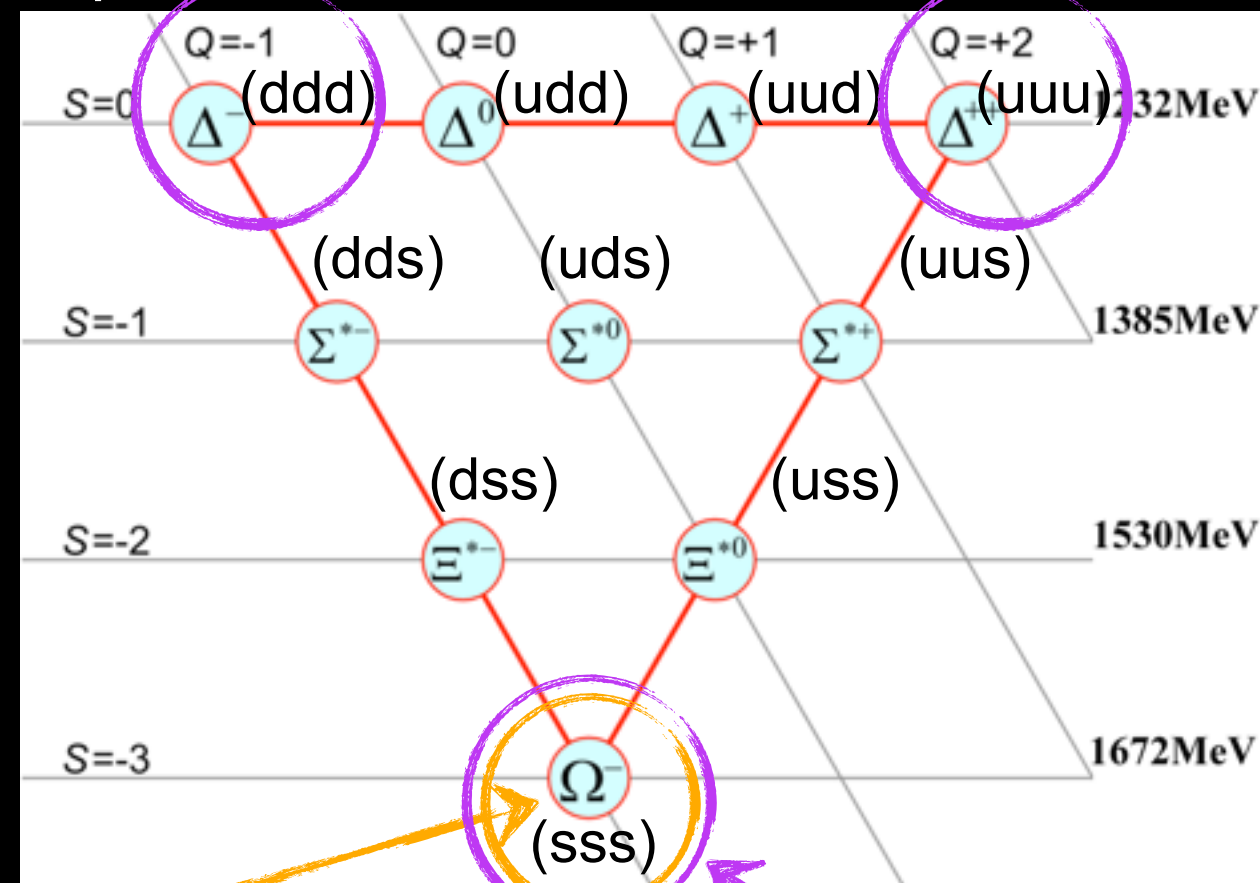
- Postulat:
  - Es gibt **3 fundamentale Teilchen** aus denen alle Hadronen aufgebaut sind (+ Antiteilchen)
  - **Quarks:** up, down, strange

Gell-Mann / Zweig: 1963

Spin = 1/2



Spin = 3/2

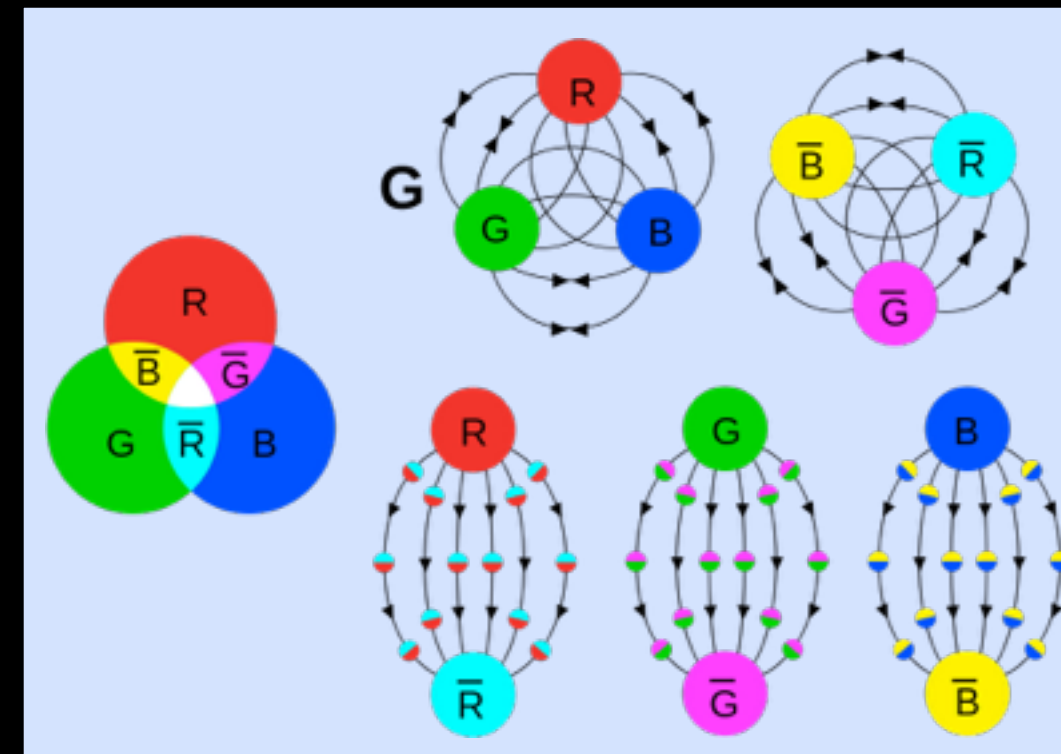


Vorhersage vor experimenteller Entdeckung

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



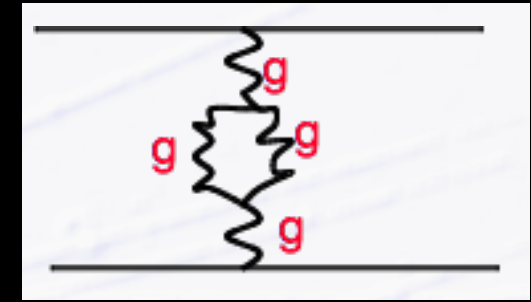
## • Dogma der QCD:

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

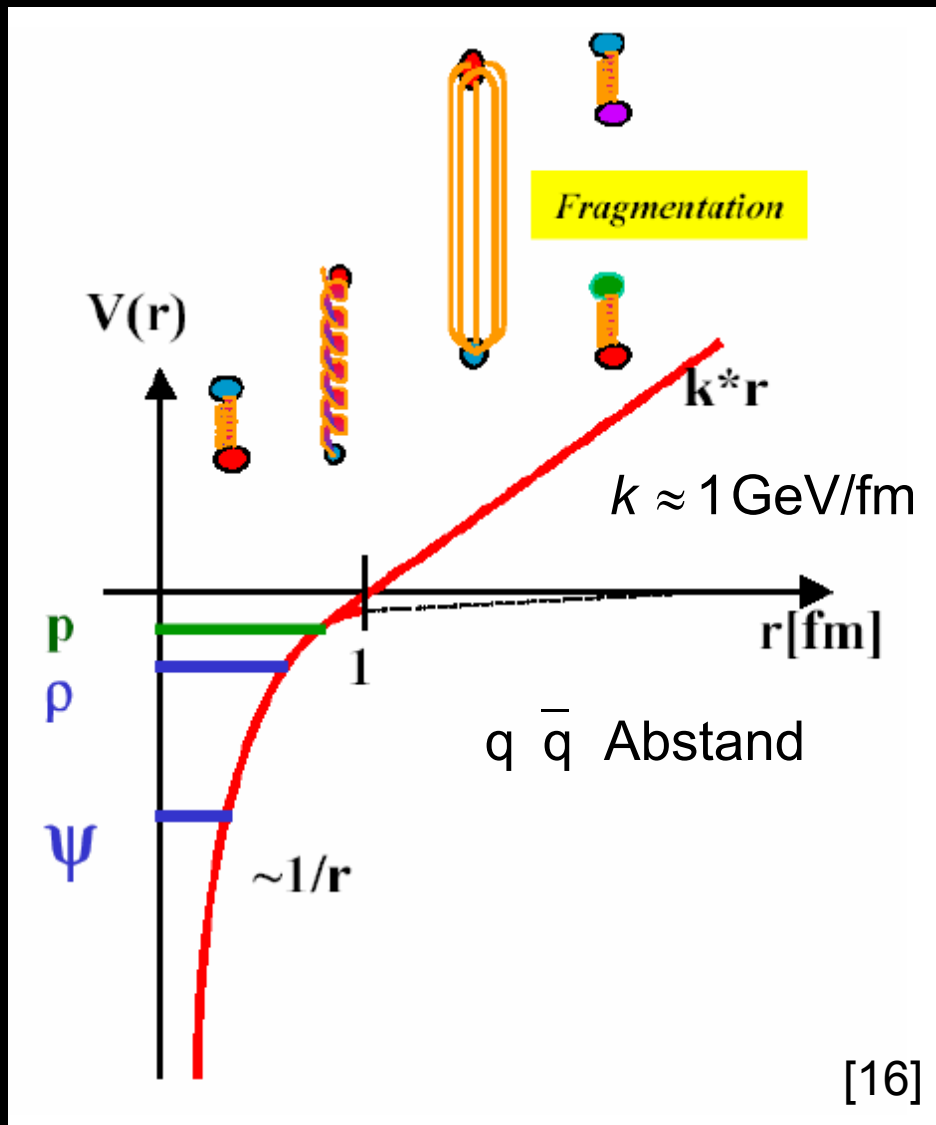


# Glukonen - verflixter Kleber

- Glukonen besitzen Farbe → können mit sich selbst wechselwirken
- Fundamentaler Unterschied zur QED



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



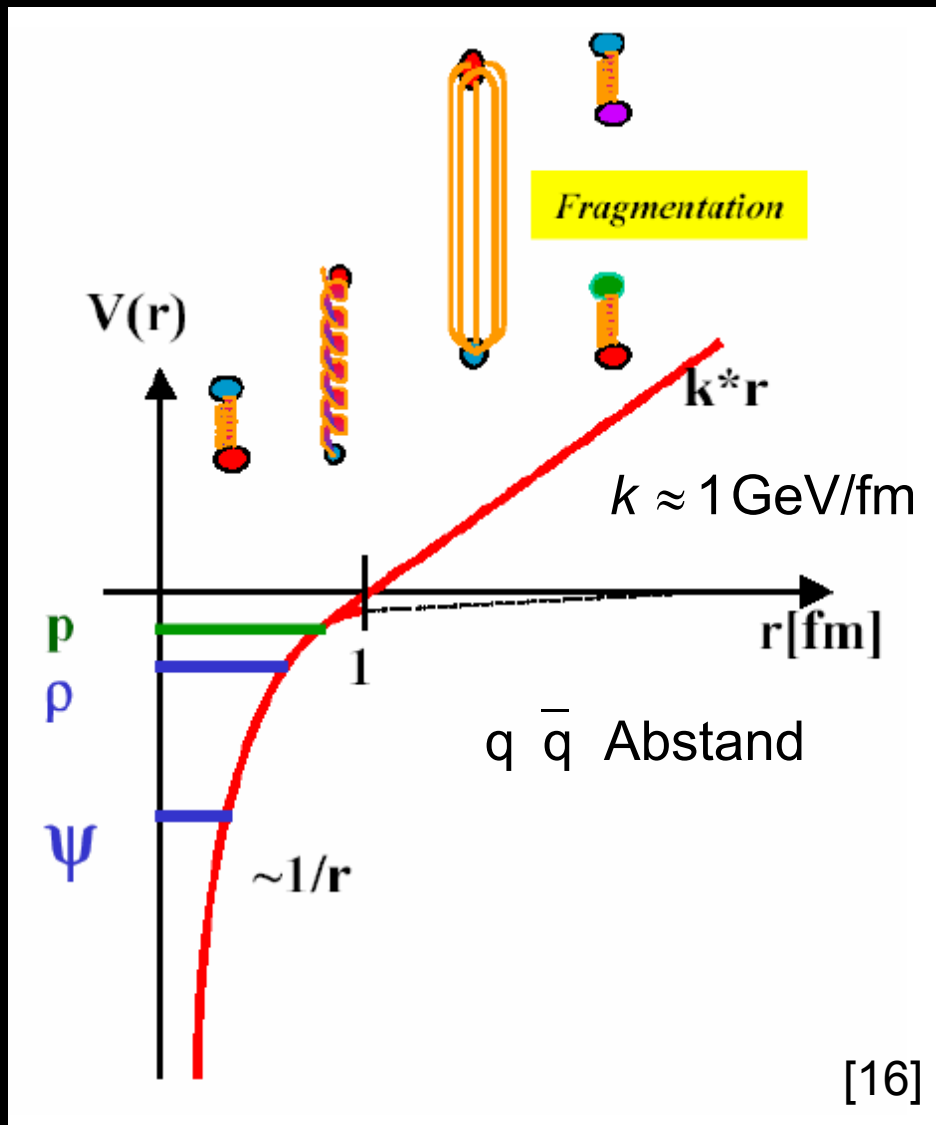
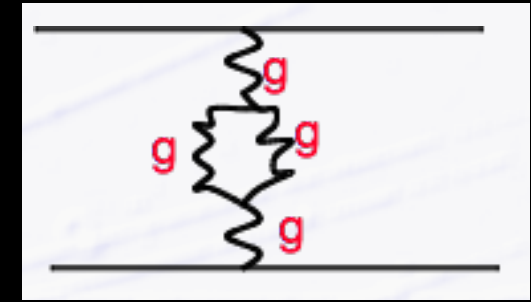
# Glukonen - verflixter Kleber

- 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



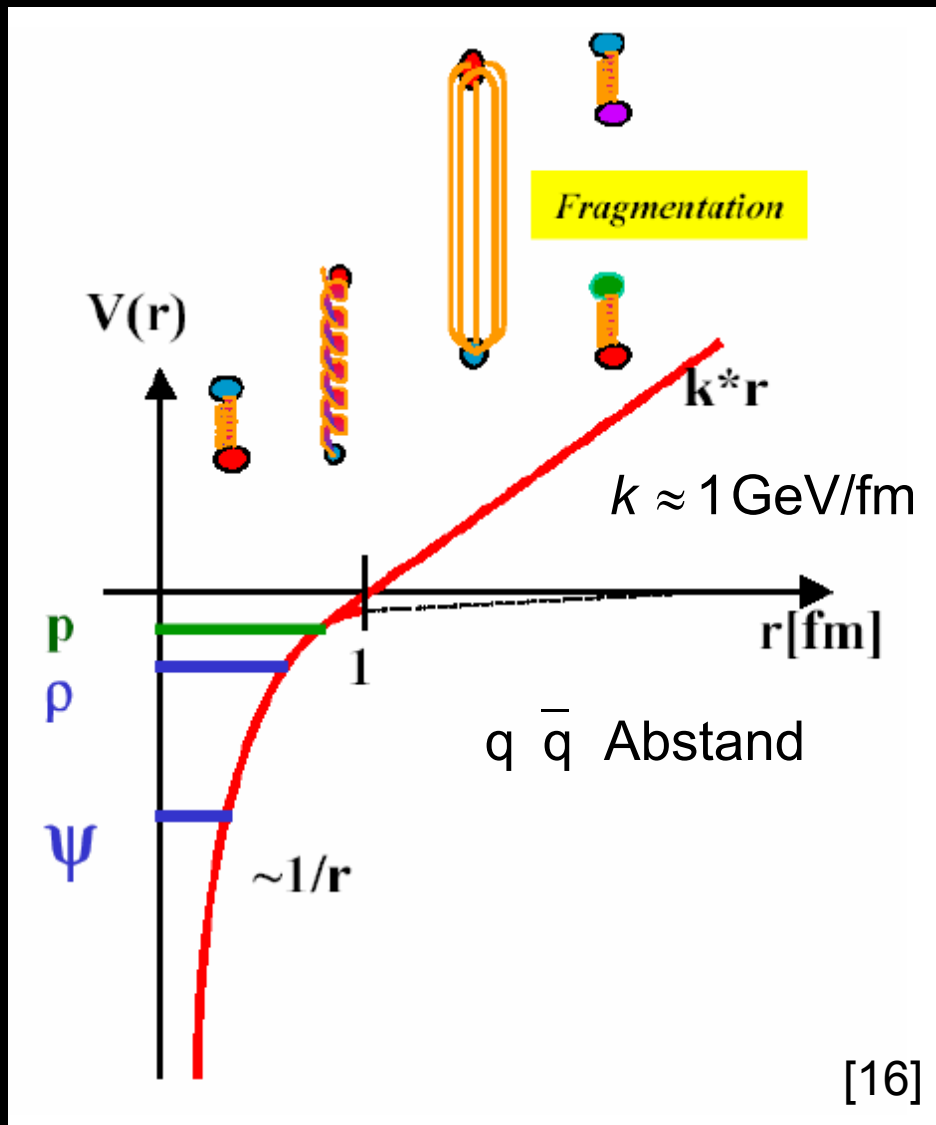
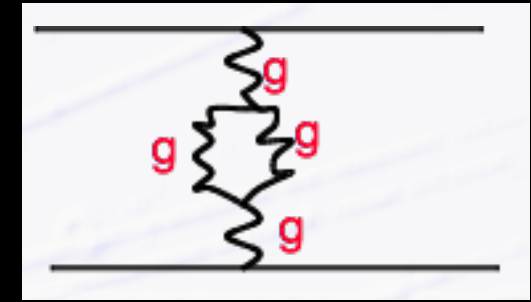
# Glukonen - verflixter Kleber

- Glukonen besitzen Farbe → können mit sich selbst wechselwirken

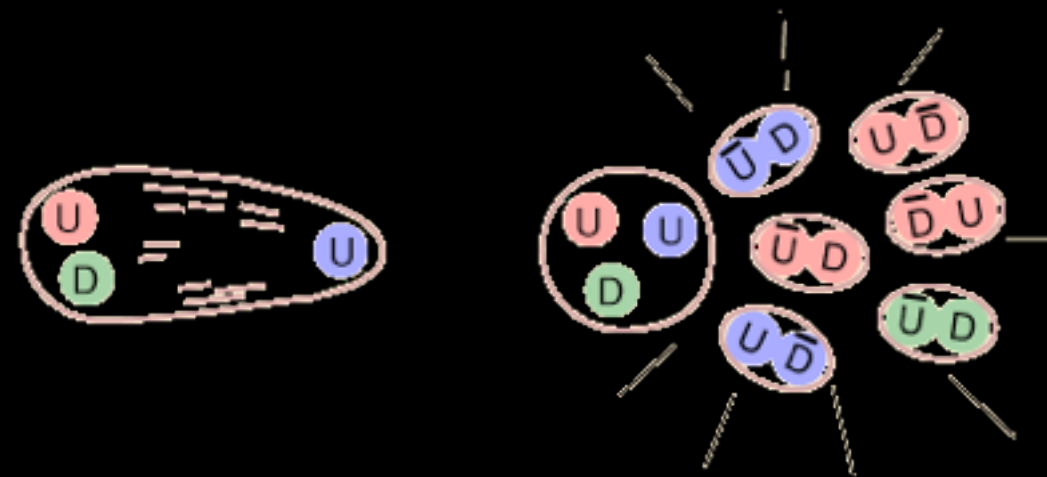
- Fundamentaler Unterschied zur QED

„eff“ - Effektiv:  
Kopplung  
abhängig von r

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



- große Abstände
  - Potentielle Energie zwischen zwei quarks nimmt linear mit Abstand zu!  
~1 GeV pro fm
  - **„Confinement“**



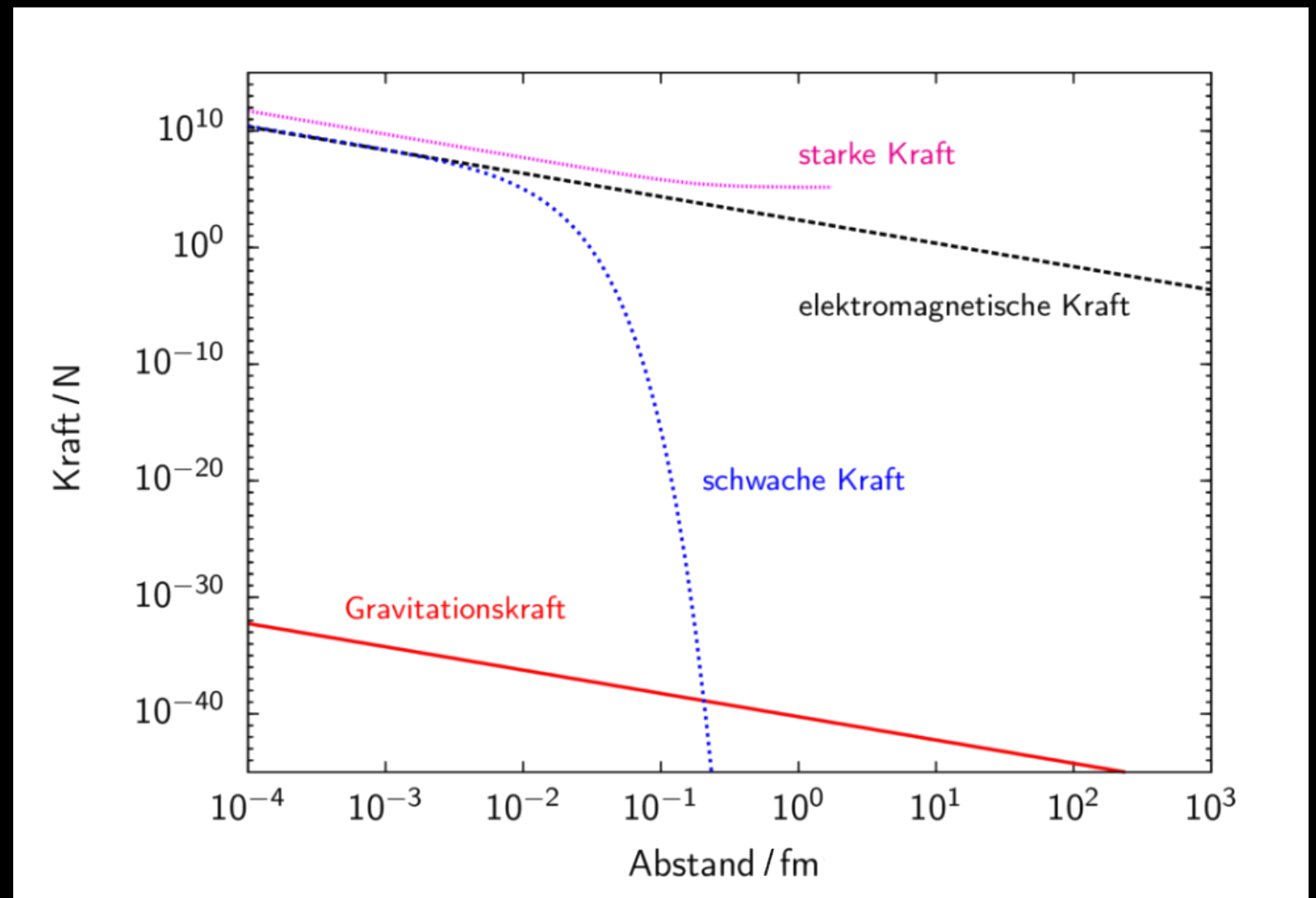
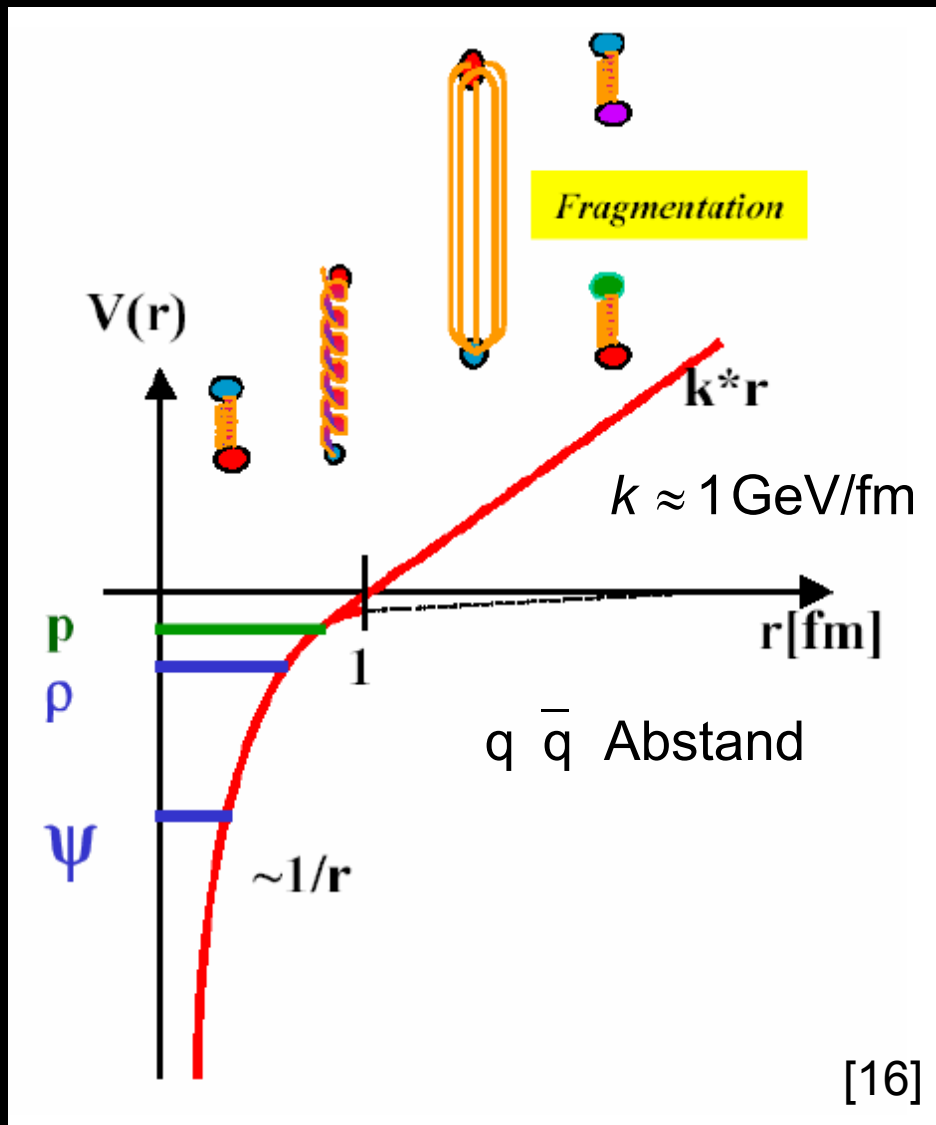
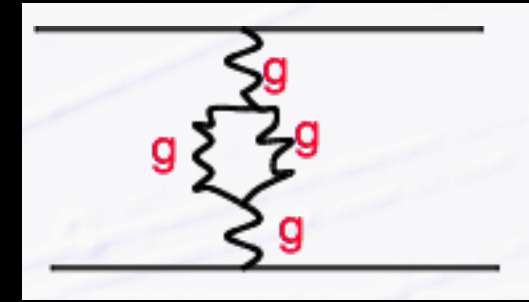
# Glukonen - verflixter Kleber

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

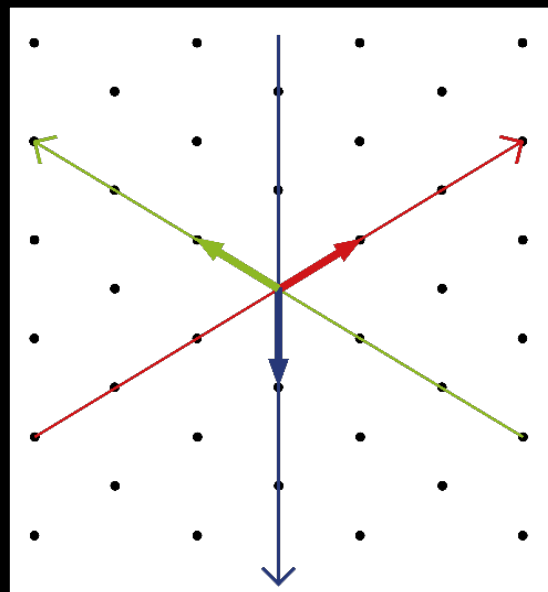
Welchselwirkung	Ladung	Zeichen = Einheit
<b>Elektromagnetismus</b>	elektrische	$q = 1$ Elektron
<b>Schwache WW</b>	schwache	$I = 1/2$
<b>Starke WW</b>	Farbe	$\vec{C} = \text{rot, grün, blau}$

# Intermezzo: Farbe & andere Ladungen

- Ladungen sind die Quelle von Kräften
  - Zu jeder Wechselwirkung gehört eine Ladung
    - Nur Teilchen, die die passende Ladung besitzen nehmen teil

Welchselwirkung	Ladung	Zeichen = Einheit
<b>Elektromagnetismus</b>	elektrische	$q = 1$ Elektron
<b>Schwache WW</b>	schwache	$I = 1/2$
<b>Starke WW</b>	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**?



- Farb-Ladung ist ein 2D Vektor



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

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



# Intermezzo: Farbe & andere Ladungen

- Ladungen sind die Quelle von Kräften

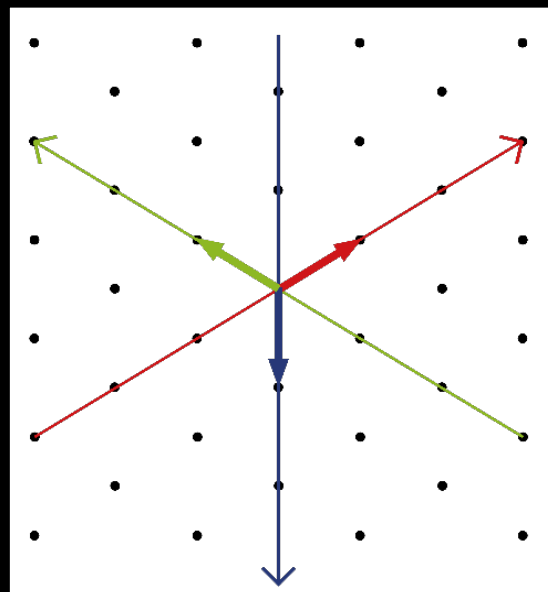
- Zu jeder Wechselwirkung gehört eine Ladung
  - Nur Teilchen, die die passende Ladung besitzen nehmen teil

Welchselwirkung	Ladung	Zeichen = Einheit
<b>Elektromagnetismus</b>	elektrische	$q = 1$ Elektron
<b>Schwache WW</b>	schwache	$I = 1/2$
<b>Starke WW</b>	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

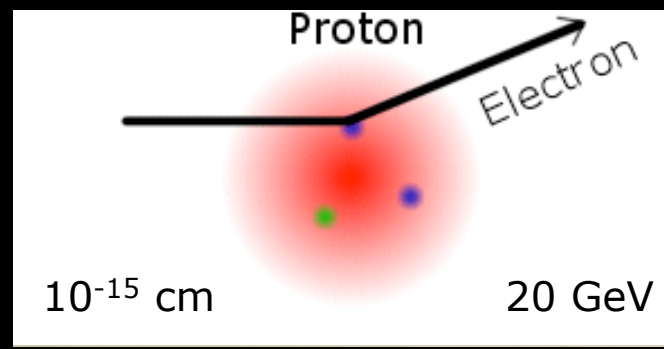
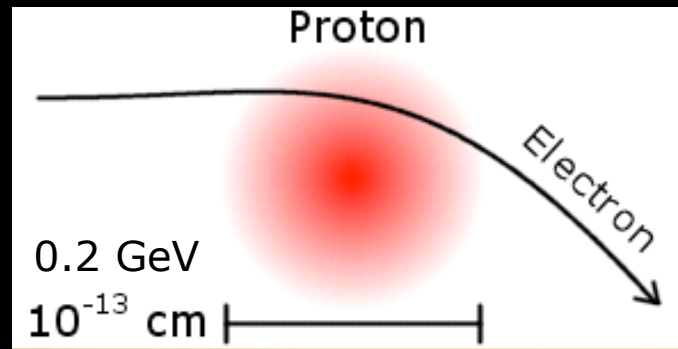


$$\vec{C}_{u \rightarrow} + \vec{C}_{u \leftarrow} + \vec{C}_{d \downarrow} = \rightarrow + \leftarrow + \downarrow = \downarrow \rightarrow = \vec{0}$$

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

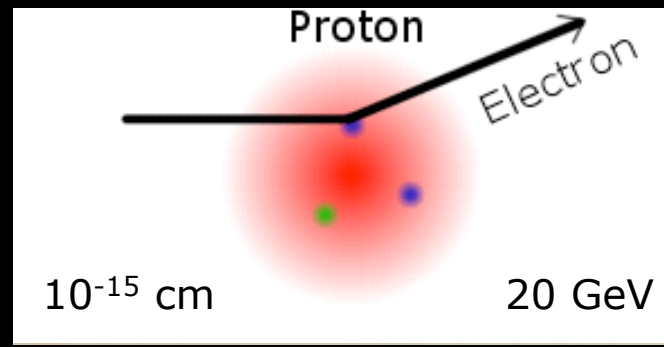
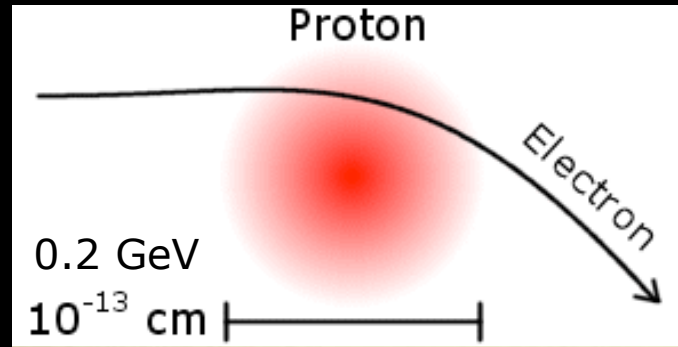
## Elektron-Streuung am Proton

Friedmann, Kendall,  
Taylor: 1969



- **Elastische Streuung:**
  - Messung des Proton Radius
- **Inelastische Streuung:**
  - Streuung an Konstituenten
- **Relativistische Ereignisse**
  - Ereignisse charakterisiert durch Impulsübertrag<sup>2</sup> =  $q^2$ , 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



- **Elastische Streuung:**

- Messung des Proton Radius

- **Inelastische Streuung:**

- Streuung an Konstituenten

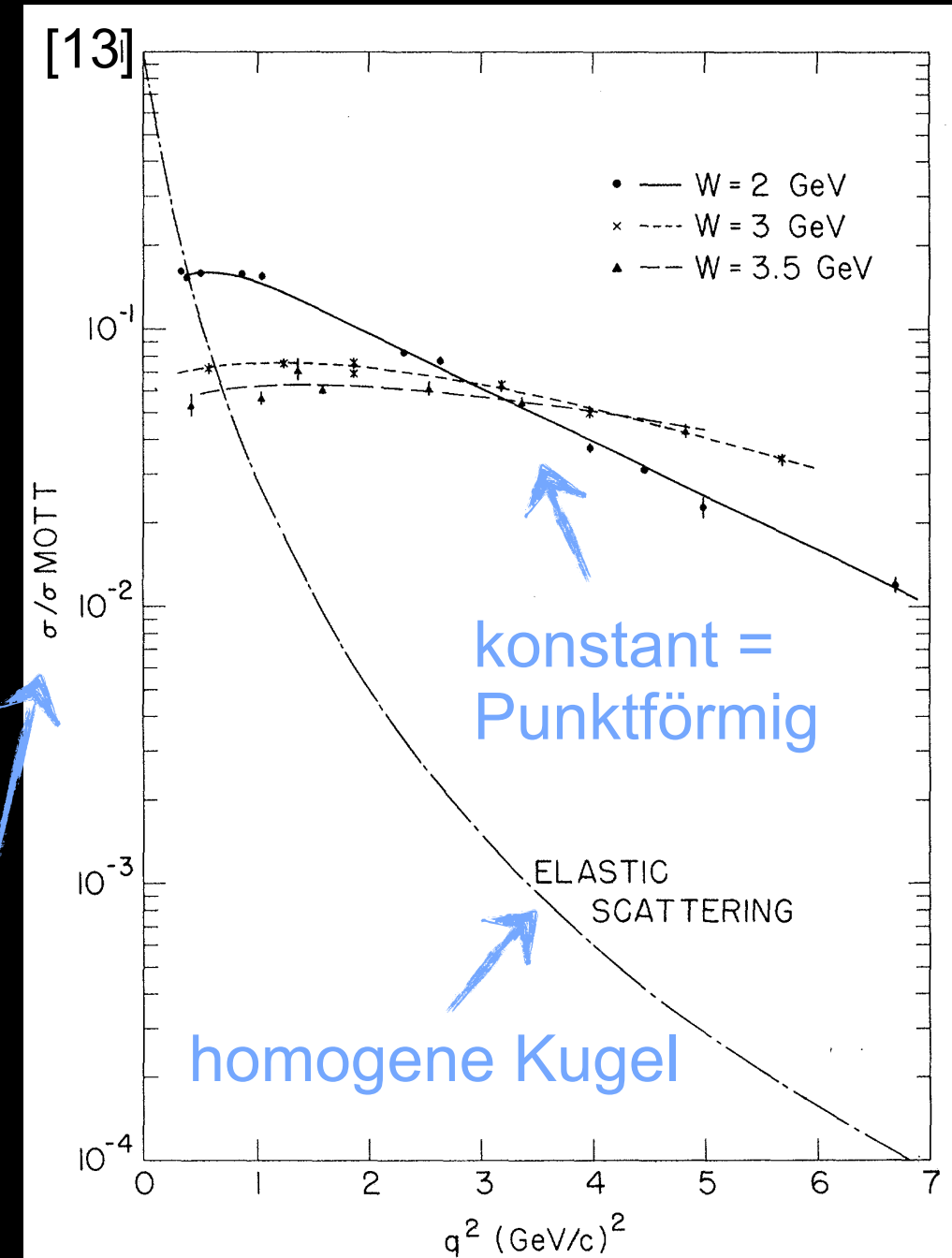
- **Relativistische Ereignisse**

- Ereignisse charakterisiert durch Impulsübertrag<sup>2</sup> =  $q^2$ , 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

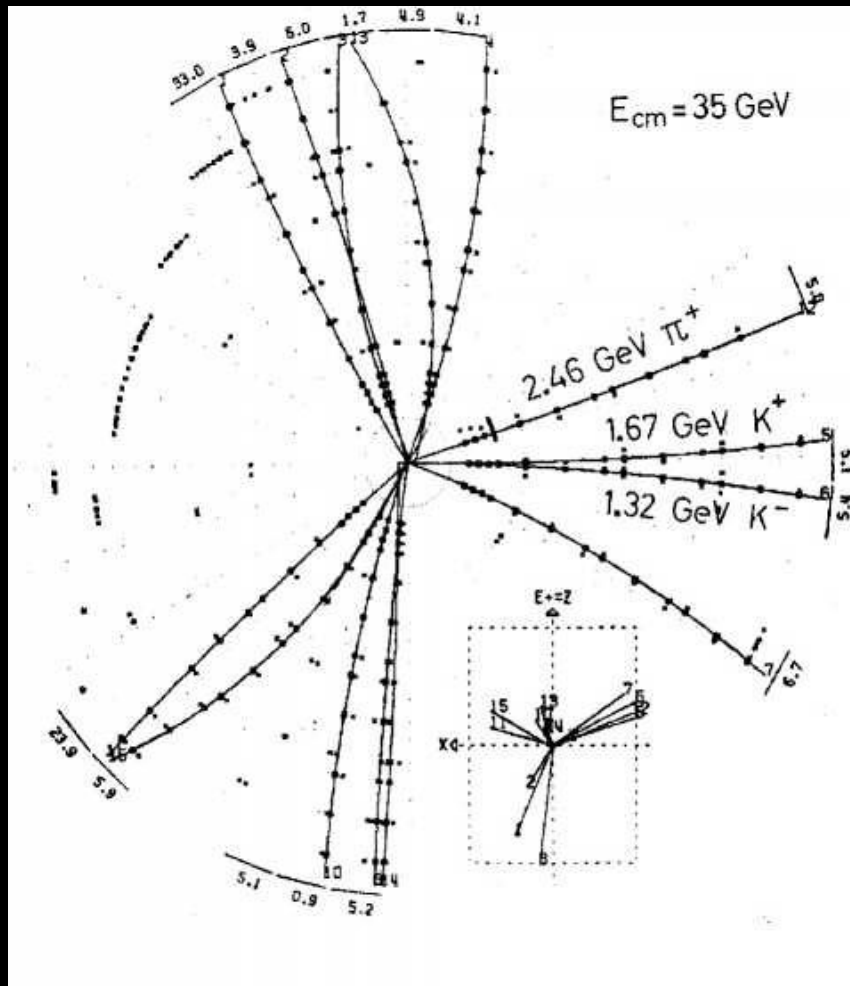
Friedmann, Kendall, Taylor: 1969



Formfaktor F

Desy (Petra): 1979

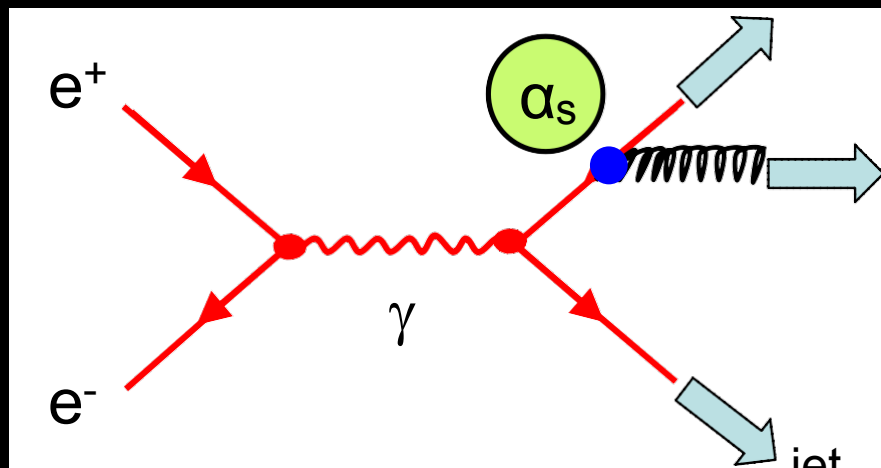
- Erzeugung von Quark - Antiquark Paaren
  - 3ter „jet“ durch Gluonstrahlung



- Bestimmung der Kopplungskonstanten:

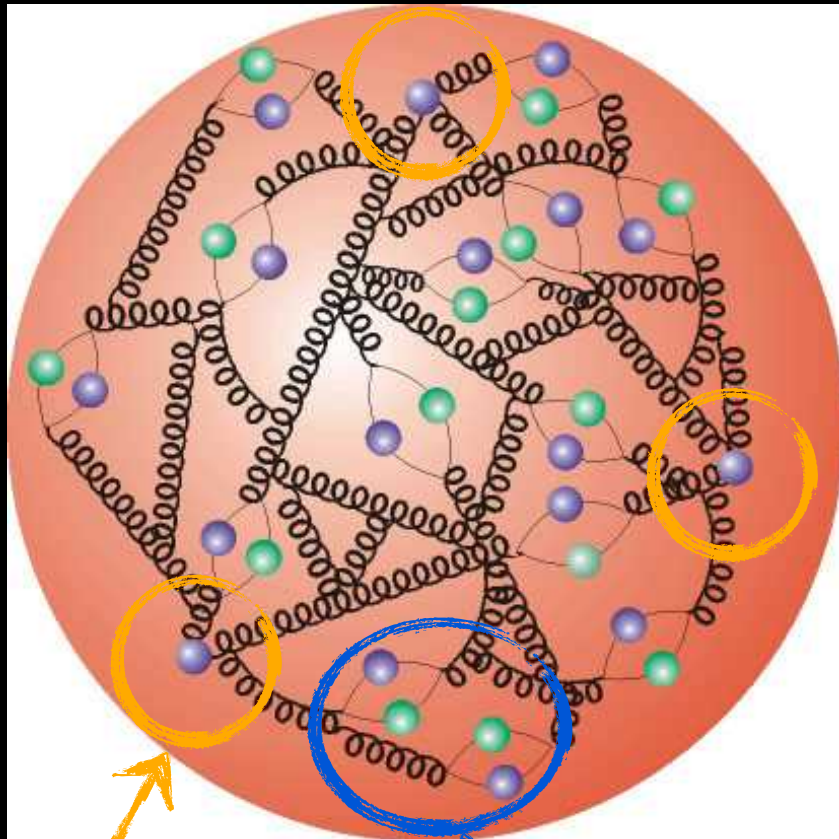
$$\alpha_s \sim \frac{\# \text{ 3 jet events}}{\# \text{ 2 jet events}}$$

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



# Das Proton - heute

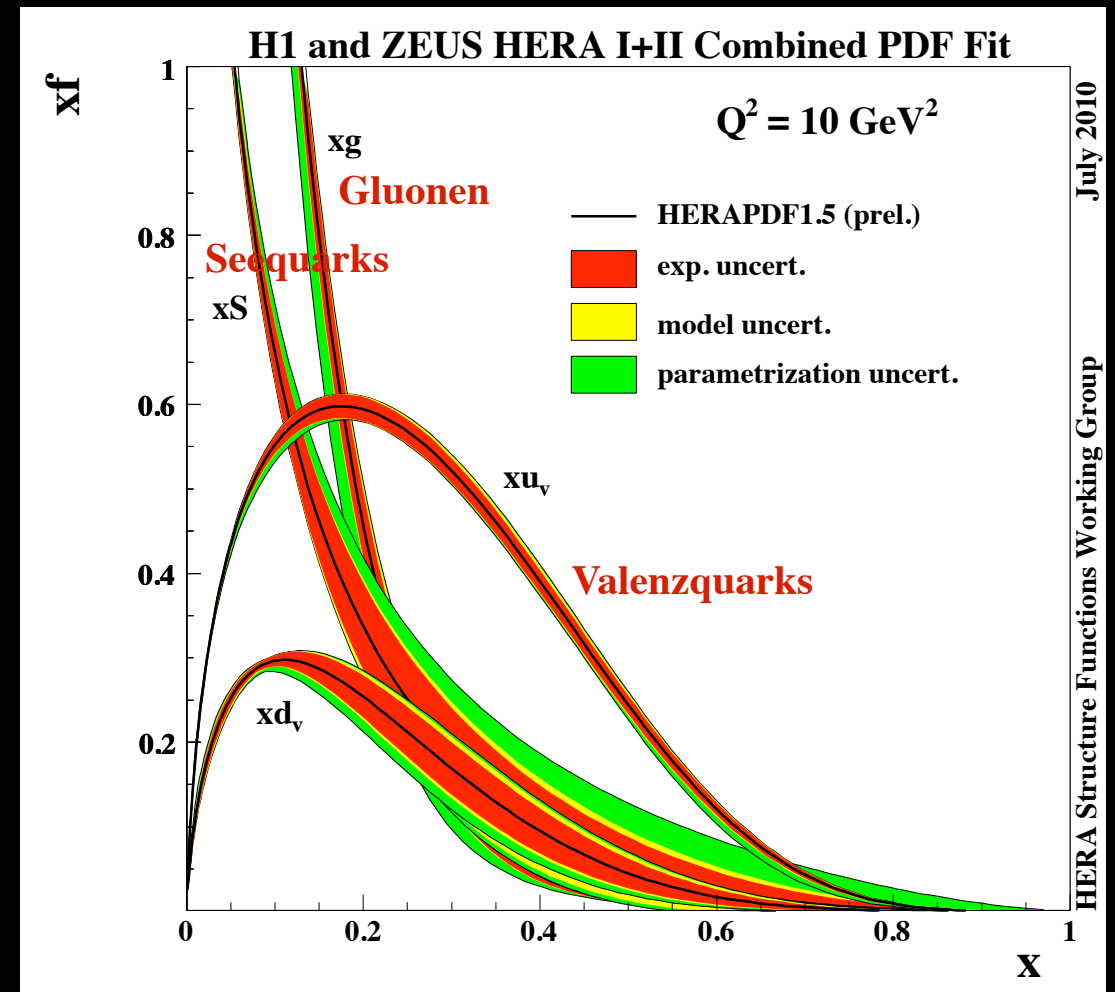
- Komplexes Viel-Teilchen-System
  - Quarks, Antiquarks, Gluonen



Valenzquarks  
(uud)

Seequarks  
Quark-Antiquark Paare

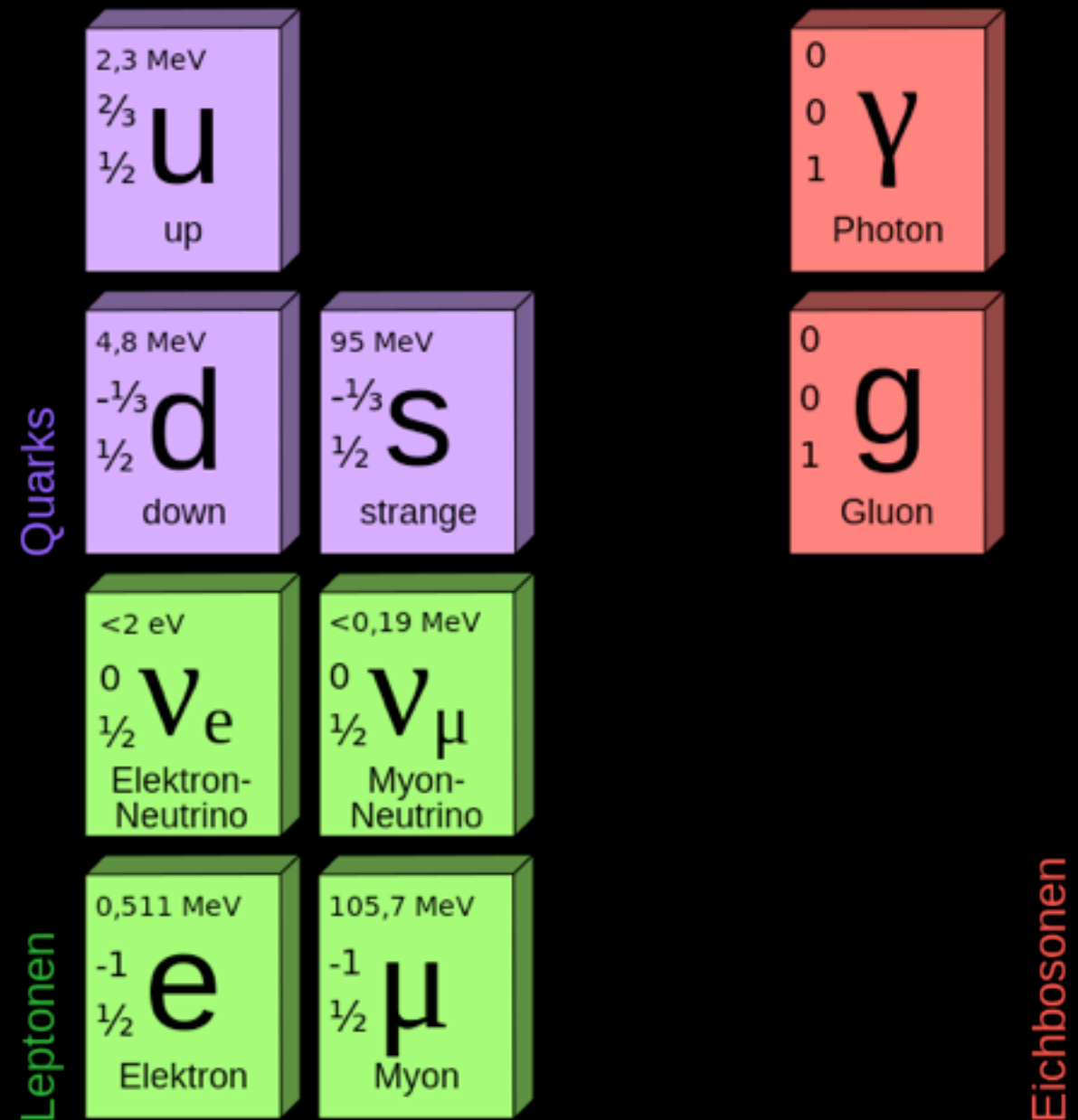
- Hochenergetische Kollisionen:
  - Kollision einzelner ‚Partonen‘
  - Welchen Impuls tragen die Partonen?
    - ▶ PDFs (Parton density function)



x: Impulsanteil des Partons am Proton  
(Björken x)

## • Elementare Teilchen

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



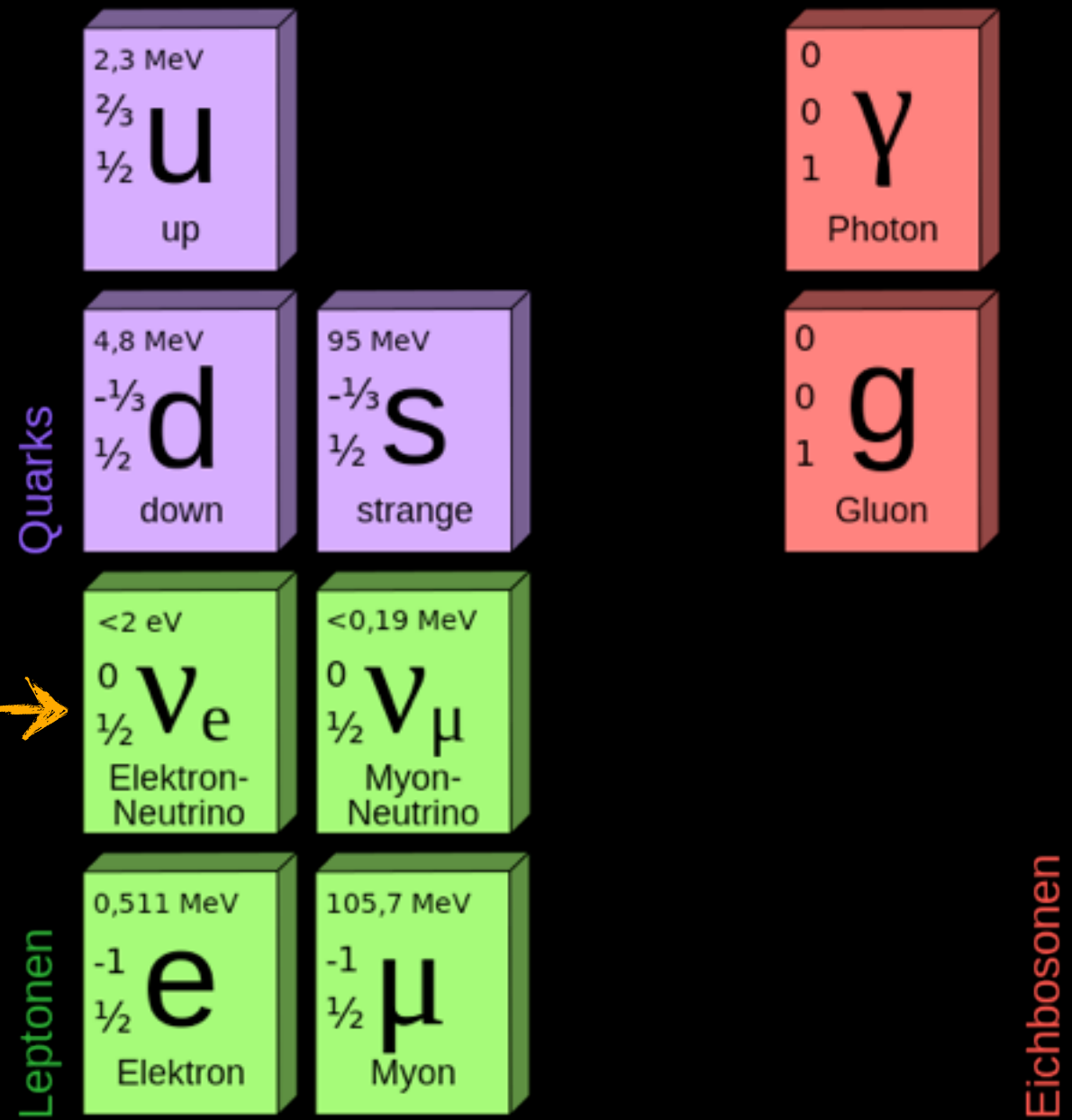


# Was wir bisher kennengelernt haben

## • Elementare Teilchen

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

Neutrinos bisher vernachlässigt →



- **Standard Modell der Teilchenphysik:**
  - Quantisierung der elektrischen Ladung rein **phänomenologisch!** Keine theoretische Motivation
  - Summe aller Ladungen innerhalb einer Familie muss 0 ergeben:
    - $3_{\text{color}} * (Q_{\text{up}} + Q_{\text{down}}) + Q_e + Q_\nu = 0$
- **Sprachgebrauch:**
  - **Quantum** der elektrischen Ladung:  $1/3$  (wobei auch 1 gebräuchlich ist, je nach Kontext)
    - $1/3$  tritt nur in gebundenen Systemen auf, niemals als freies Teilchen
  - **Elementarladung** = Ladung des Elektrons bzw. Protons
- **Theoretische Seite**
  - **Im SM der Teilchenphysik:**
    - Starke und schwache Kraft beschrieben durch Symmetriegruppen  $SU(3)$  bzw.  $SU(2)$ 
      - Nur diskrete Ladungen erlaubt! ( $\rightarrow$  **Quantisierung zwingend in Theorie**)
    - Hyperladung beschrieben durch abelsche  $U(1)$  Gruppe
      - **Beliebige Ladungen erlaubt!**
  - **Ausweg: Große vereinheitlichte Theorien (GUT)**
    - Hyperladung eingebettet in größere Symmetrie  $\rightarrow$  natürliche Quantisierung

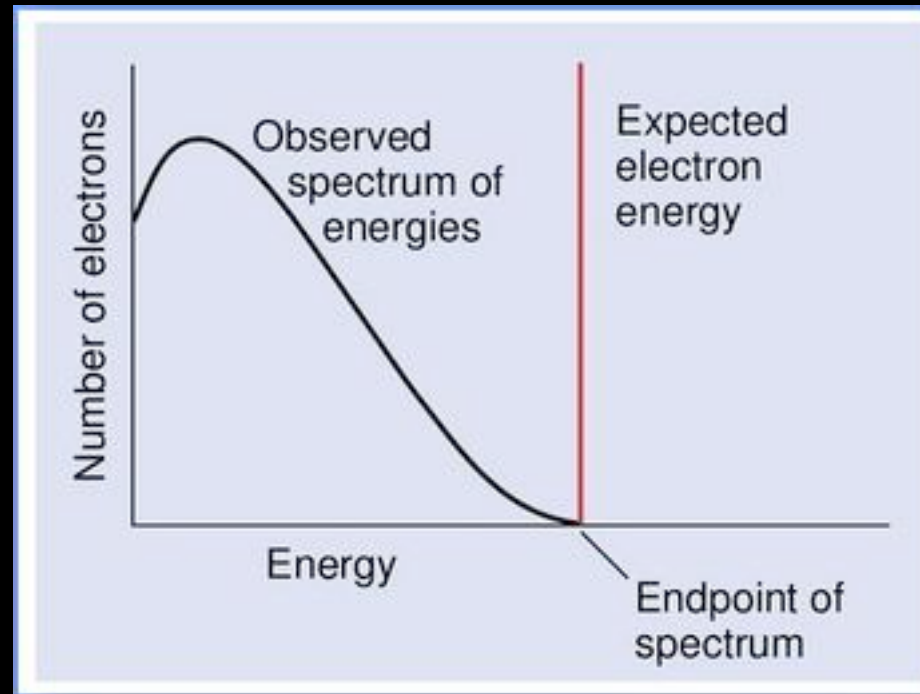
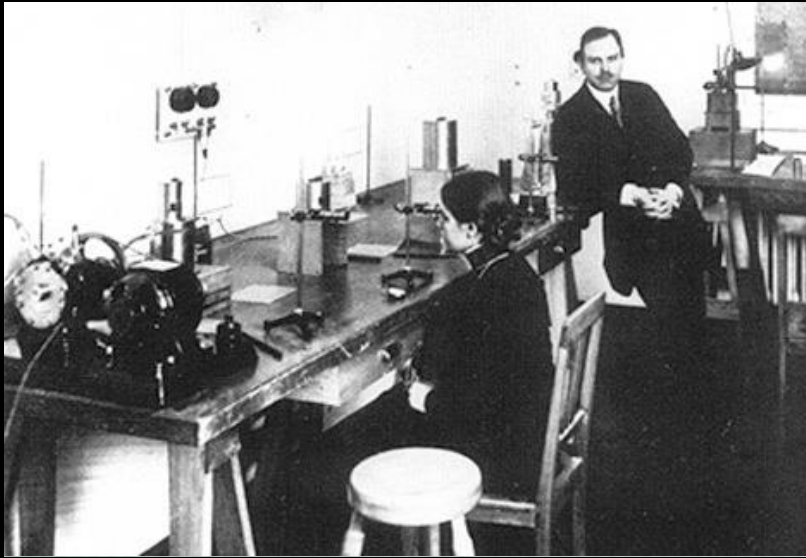
# Schwache Wechselwirkung

- **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**

- $\beta$  - Zerfall von Atomkernen

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

Meitner, Hahn: 1911



- Verletzung der Energieerhaltung?

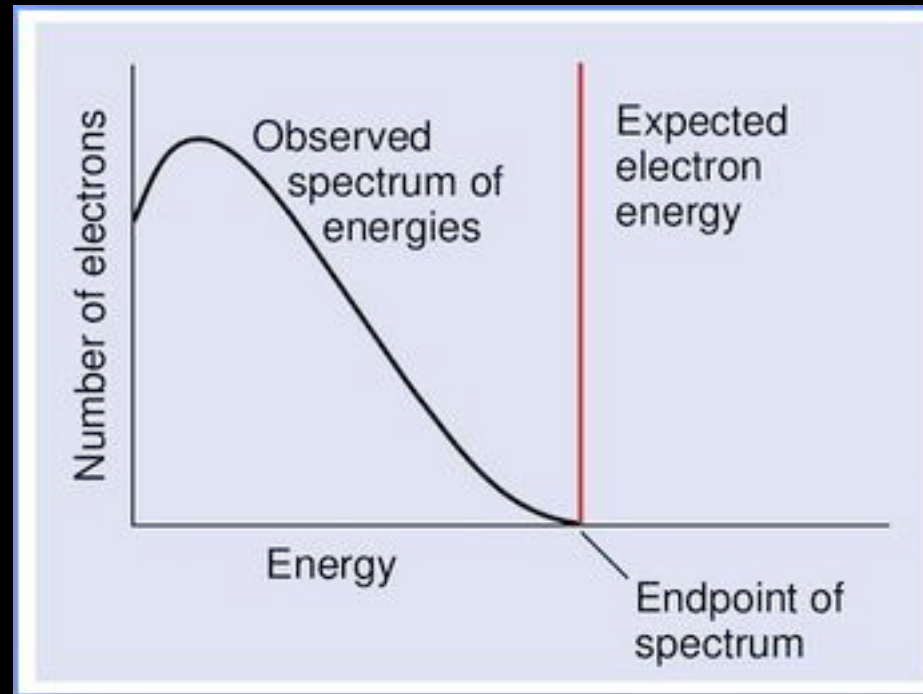
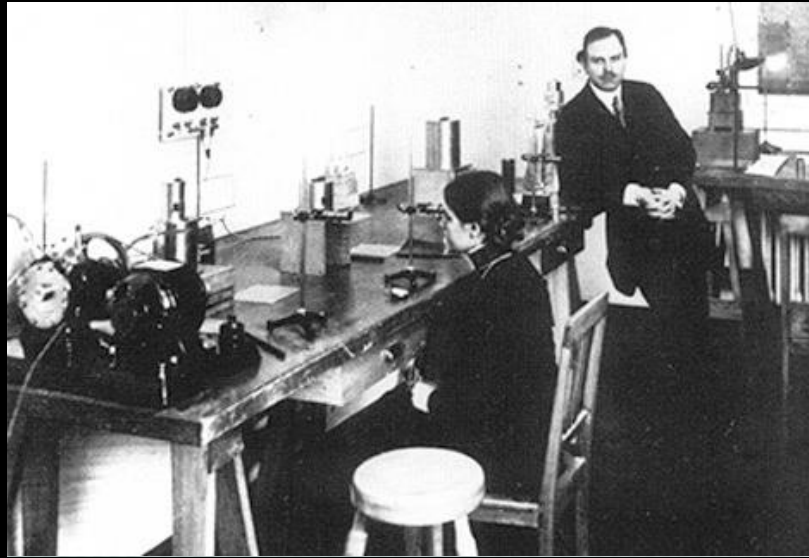
Pauli: 1930

# $\beta$ -Zerfall

- $\beta$  - 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)



- Beobachtungen:

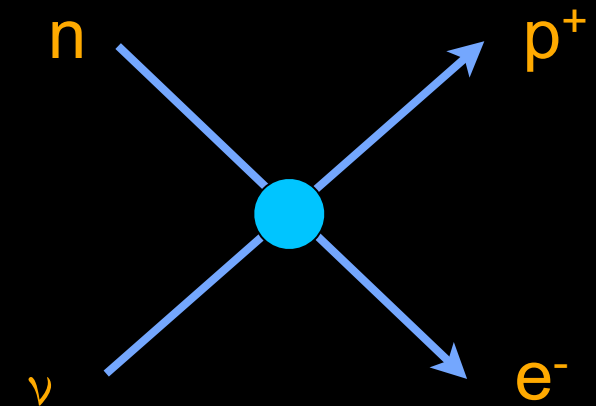
Fermi: 1934

- 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:  $p, n / e, \nu$

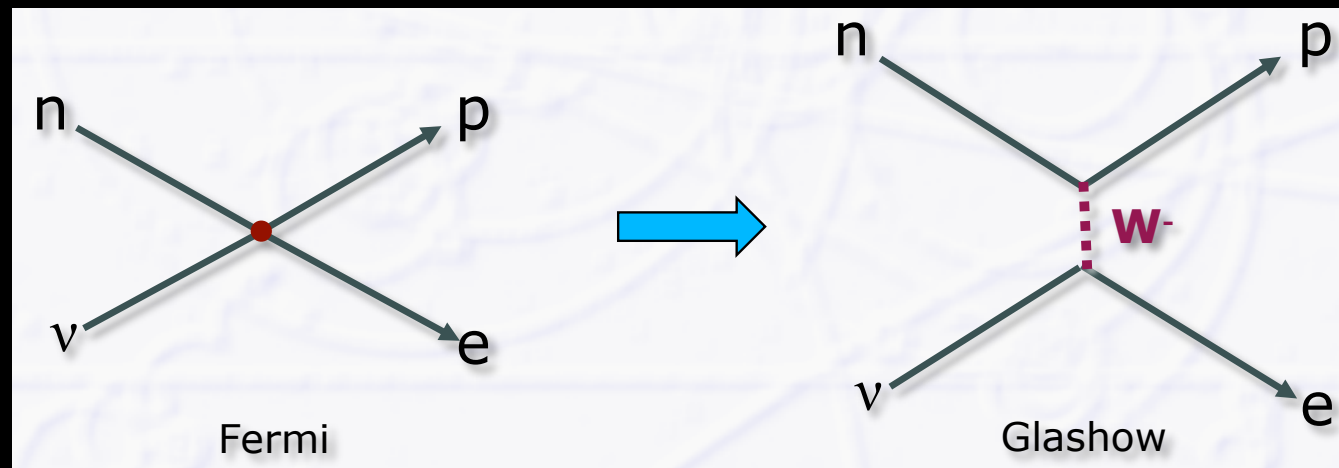


⇒ Berechnung von  $\beta$  - Zerfällen & Wechselwirkungswahrscheinlichkeiten möglich

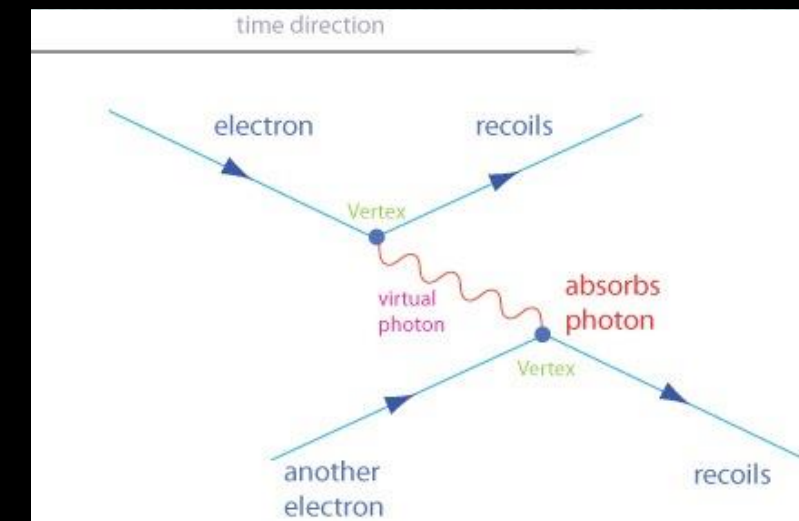
- Großes Problem in ~ 1950
  - Streuquerschnitt für  $p + \nu \sim (G_F E_\nu)$ 
    - **Verletzt Unitarität** für  $E > 300 \text{ GeV}$  (Wahrscheinlichkeit  $> 1$ )

Glashow: 1958

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



## Elektron Streuung

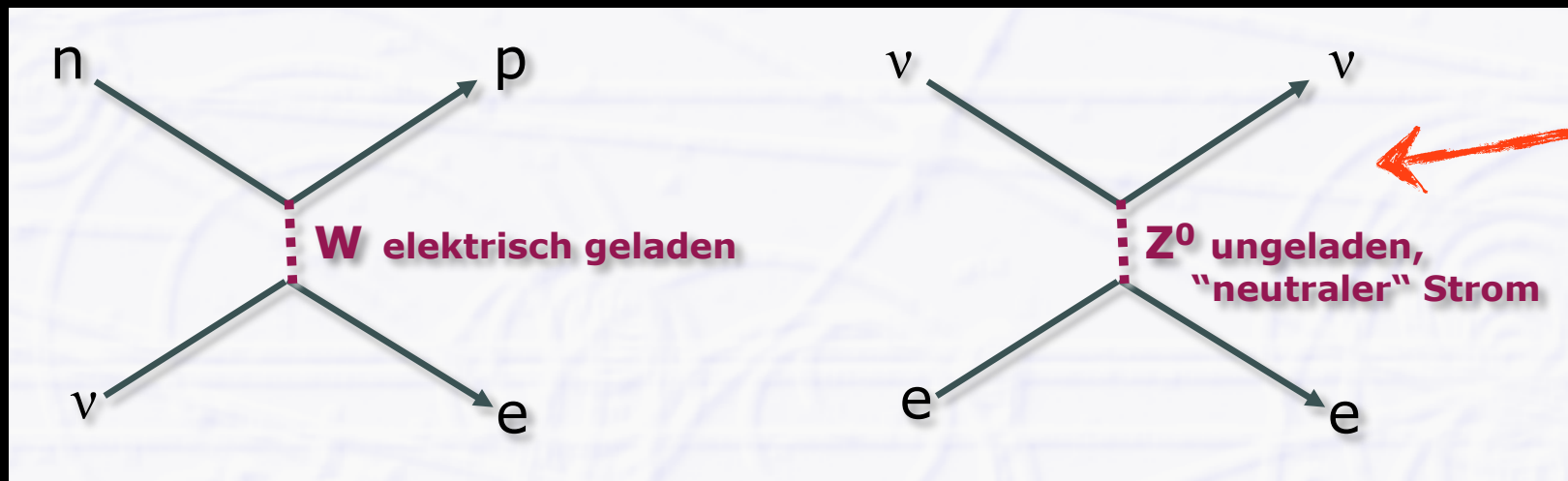


- Große Masse des  $W^-$  Teilchens erklärt kurze Reichweite ( $\sim 10^{-18} \text{ m}$ ) und kleine Wechselwirkungswahrscheinlichkeit

# 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



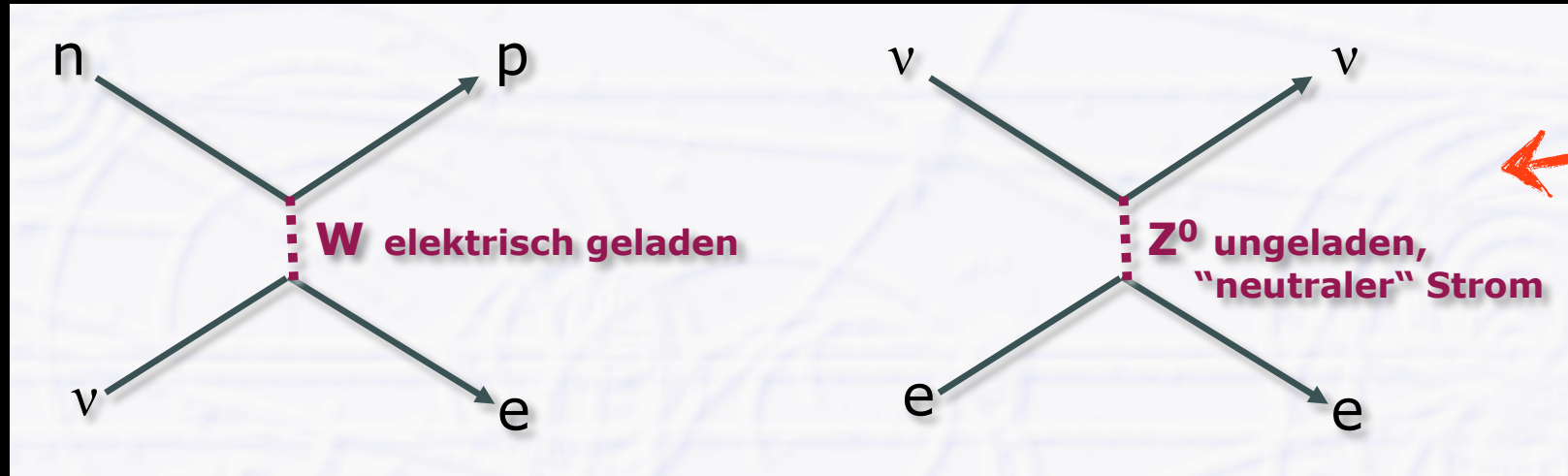
Zu dieser Zeit noch  
unbeobachtet

- 2 el. geladene Austauschteilchen:  $W^+$ ,  $W^-$  (massiv)
- 2 neutrale Austauschteilchen:  $\gamma$  (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)

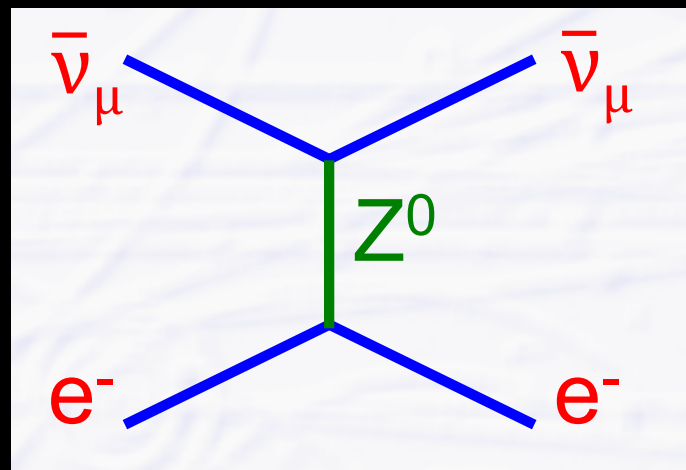
- Zu diesem Ansatz gehört eine neue Symmetrie (  $SU(2) \times U(1)$  )
  - Symmetrie nur bei großen Energien realisiert:
    - Wechselwirkungen haben gleiche Stärke!
  - Bei niedrigen Energien:
    - Symmetrie „spontan“ gebrochen
- W&Z Bosonen erhalten **Masse** durch Interaktion mit **Higgs** Feld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

schwacher Isospin - verbindet  
 $e^-$  &  $\nu$  (vgl. Isospin bei p,n)

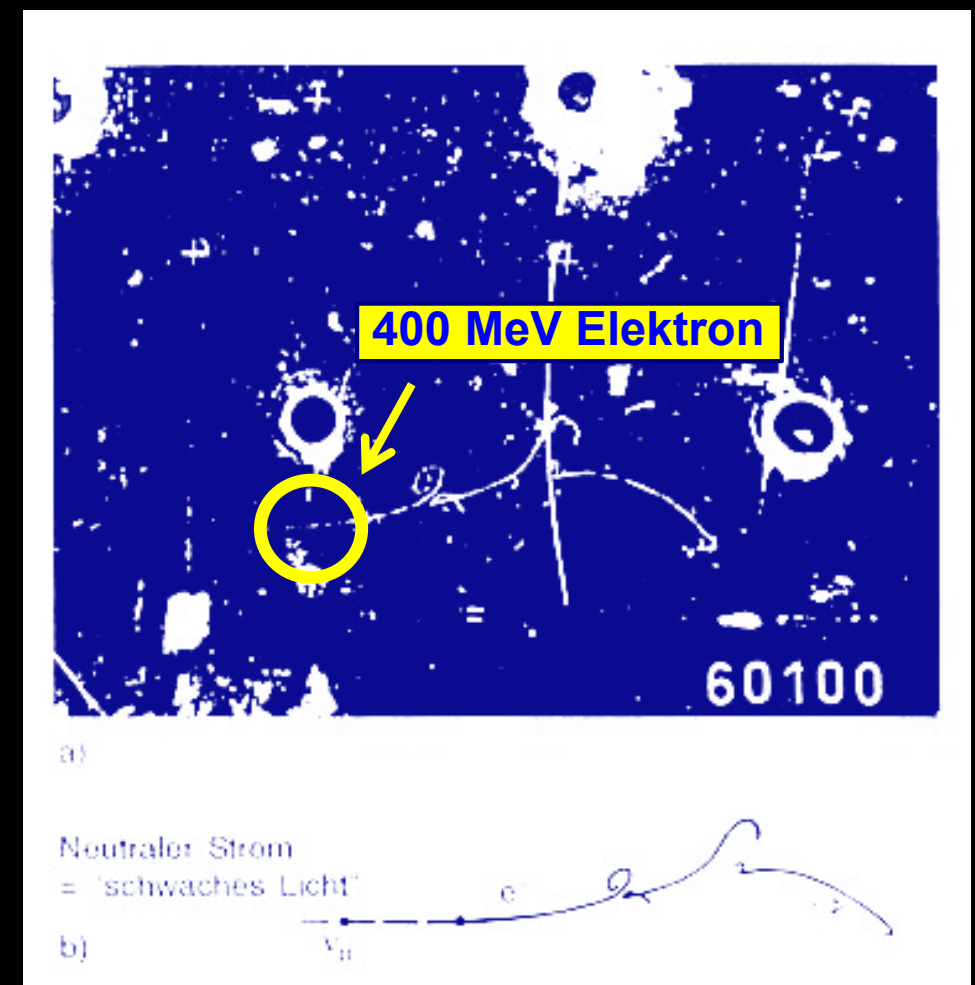
# Entdeckung des neutralen Stroms

CERN: 1973

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



Gargamelle Blasen-kammer

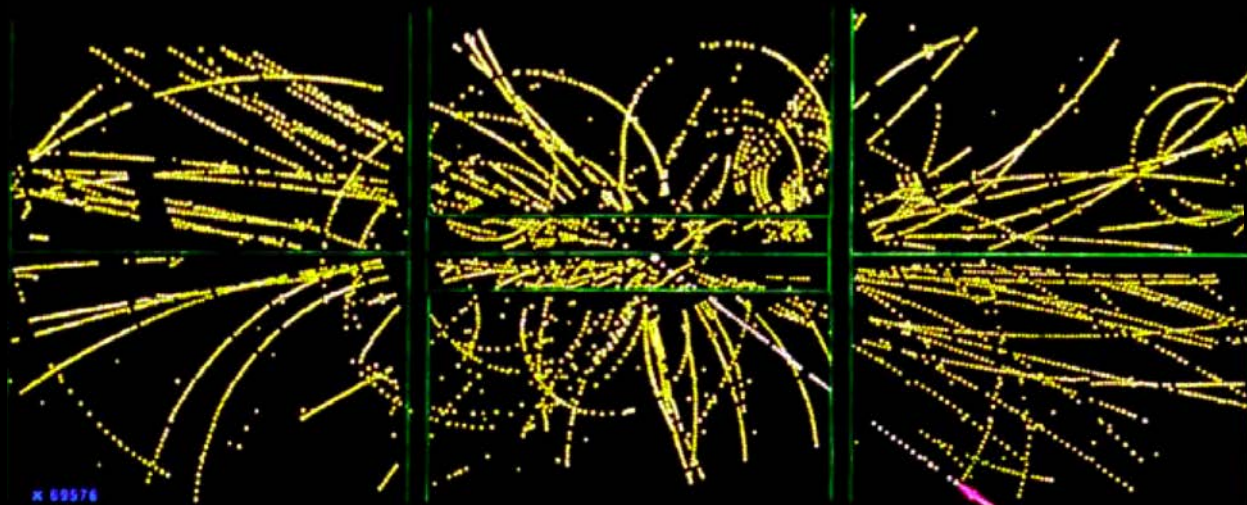




# Experimenteller Nachweis von W & Z

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

CERN: 1983



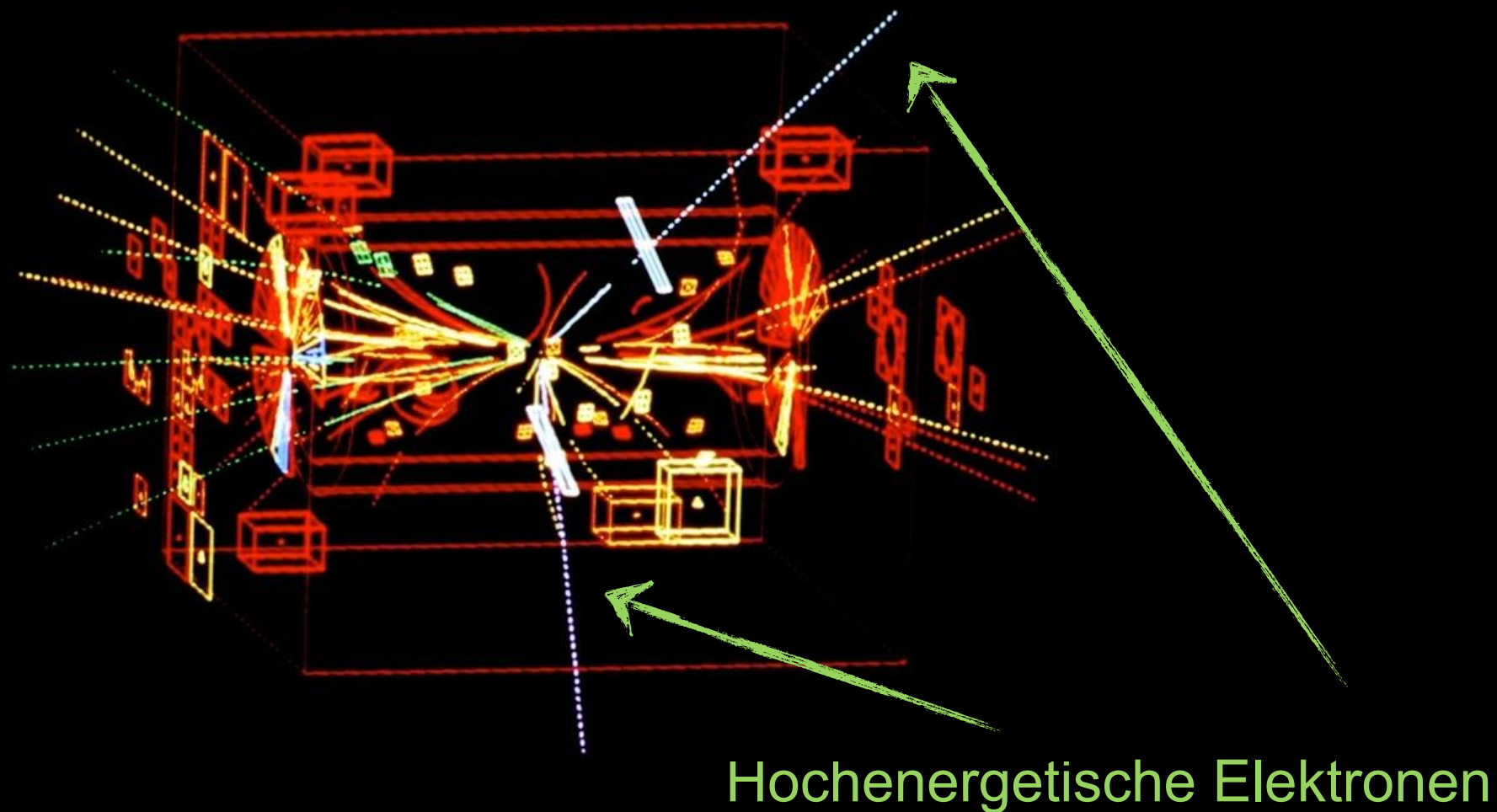
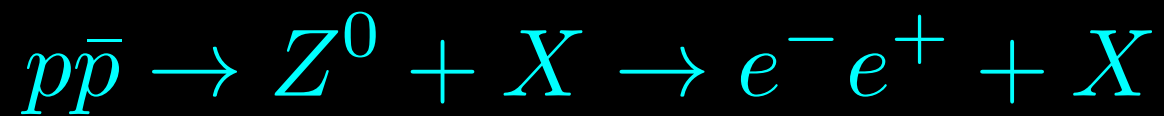
Hochenergetisches Elektron



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



Rubio, van der Meer



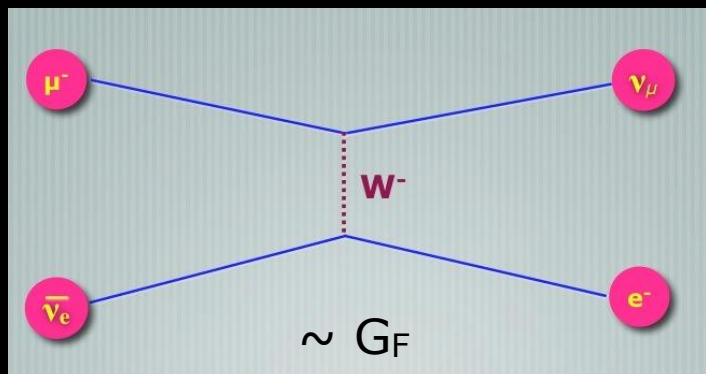
- **Quarks:** u, d, s

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

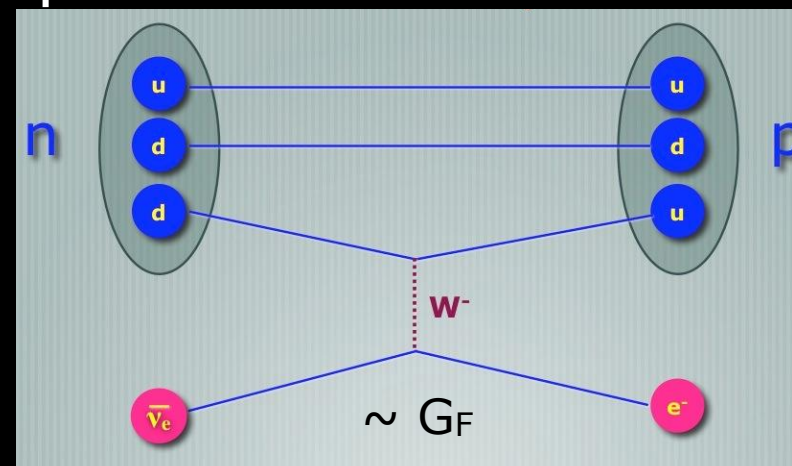
- Reaktionen der schwachen Wechselwirkung

schwache Isospin  
1/2 doublets!

## Muon Zerfall

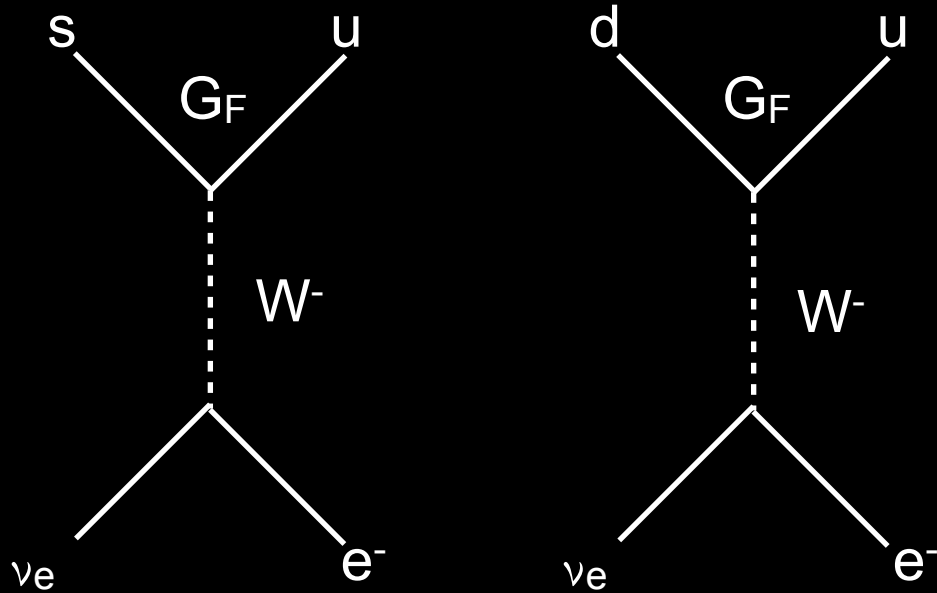


## $\beta$ -Zerfall



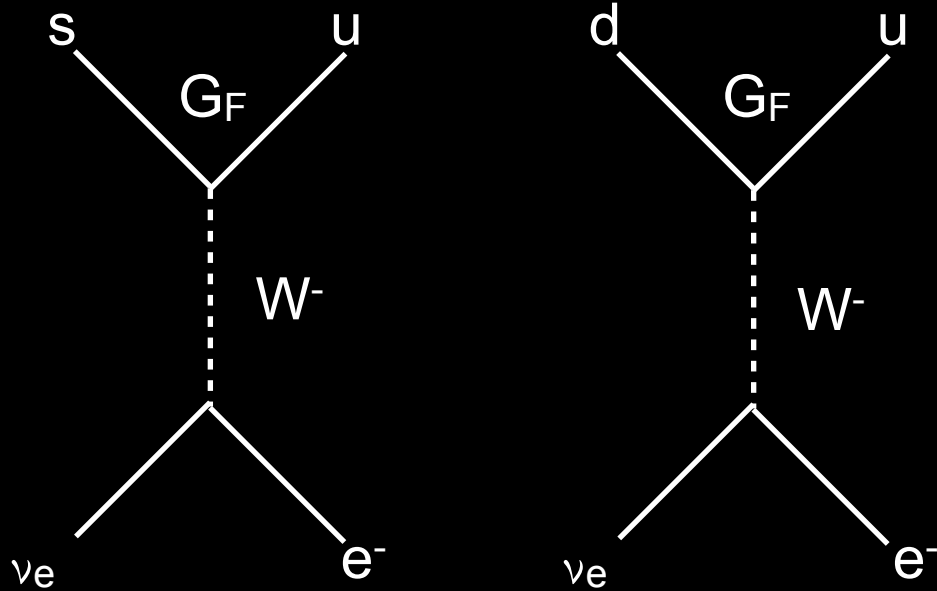
- Kopplungsstärke sollte **gleich sein**: gleiche schwache Ladung für Quarks & Leptonen
  - wurde aber leicht unterschiedlich gemessen!

## Beobachtung in Teilchenreaktionen:



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

Beobachtung in Teilchenreaktionen:



Beide Reaktionen sollten gleich häufig auftreten!

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

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

- 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 != Eigenzustände der schwachen WW**

- 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‘

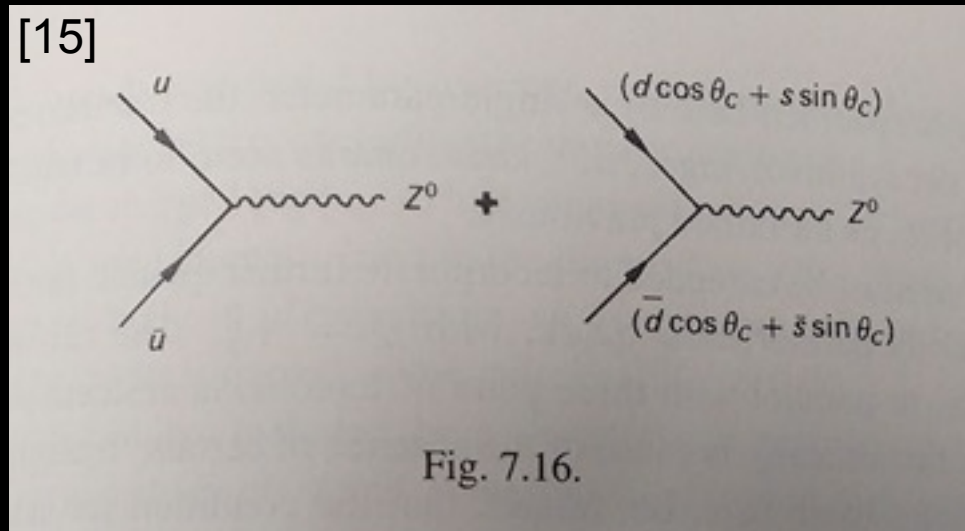
- **Quarks:** 
$$\begin{pmatrix} |u\rangle \\ \cos \theta_C |d\rangle + \sin \theta_C |s\rangle \end{pmatrix} \quad (-\sin \theta_C |d\rangle + \cos \theta_C |s\rangle)$$
- **Leptonen:** 
$$\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix}$$

**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‘

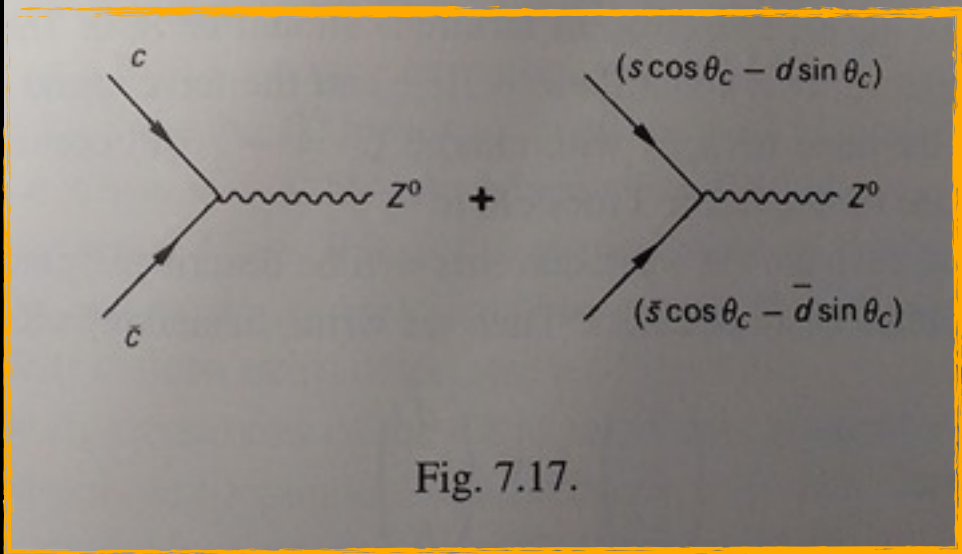
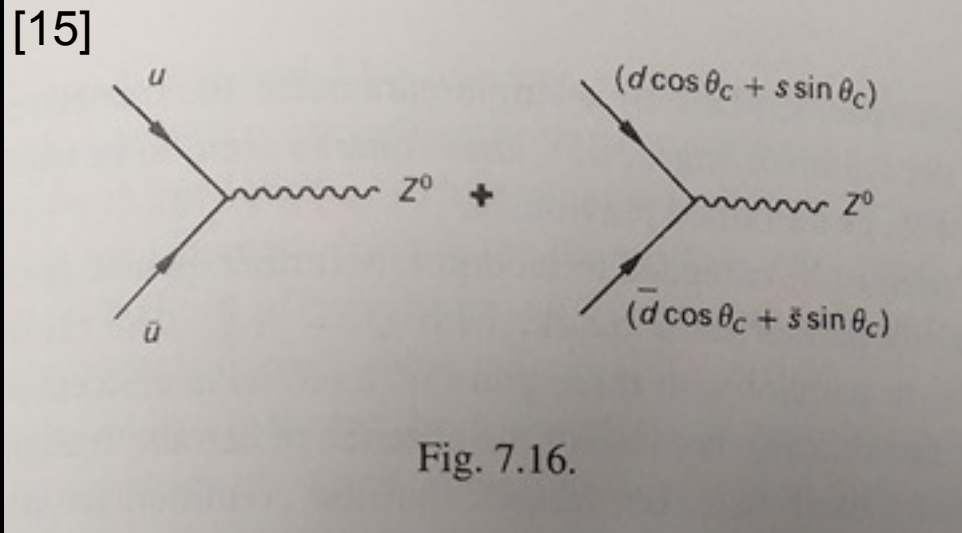
- Neutrale ströme ( $Z^0$ ) - keine flavour Änderung beobachtet

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



# Weitere Messungen - weitere „Probleme“

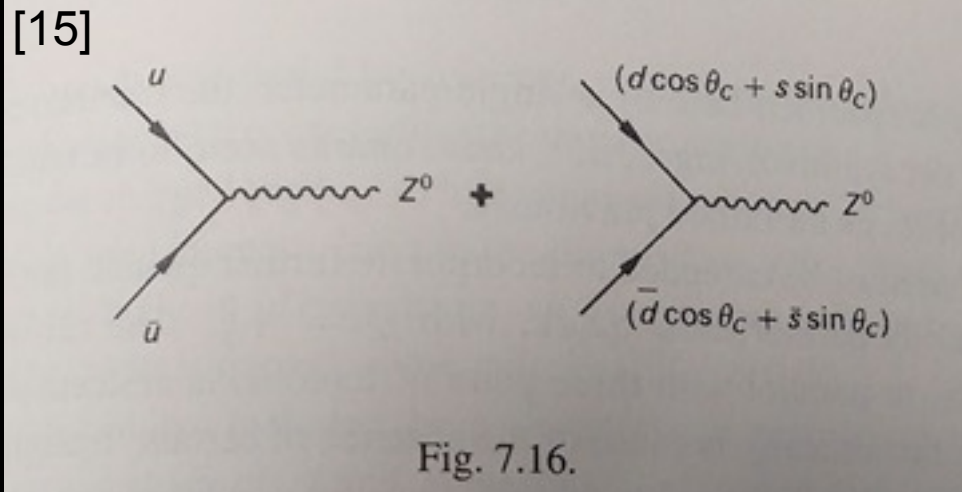
- Neutrale ströme ( $Z^0$ ) - keine flavour Änderung beobachtet

Glashow, Iliopoulos, Maiani: 1970

→ GIM Mechanismus

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

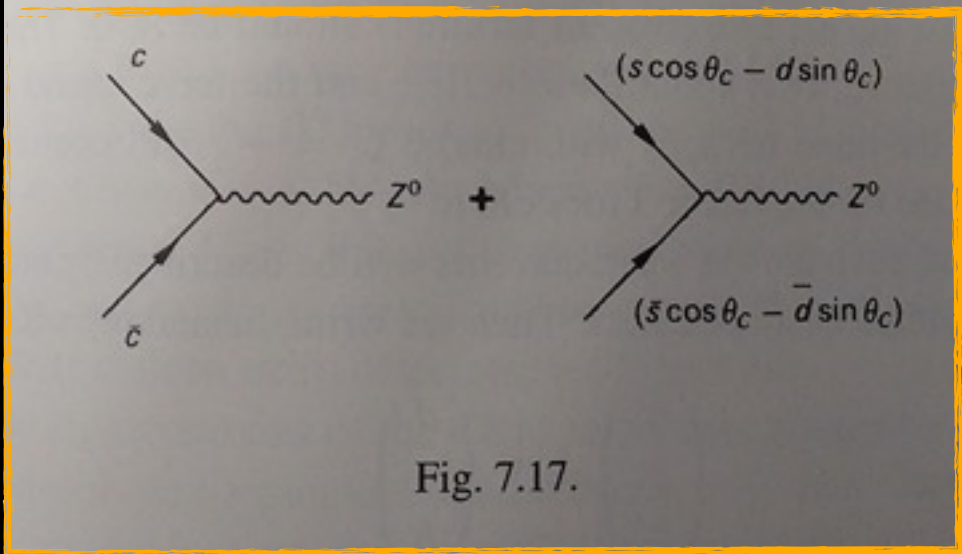
Neues Teilchen: „charm“ Quark



[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

# Weitere Messungen - weitere ‚Probleme‘

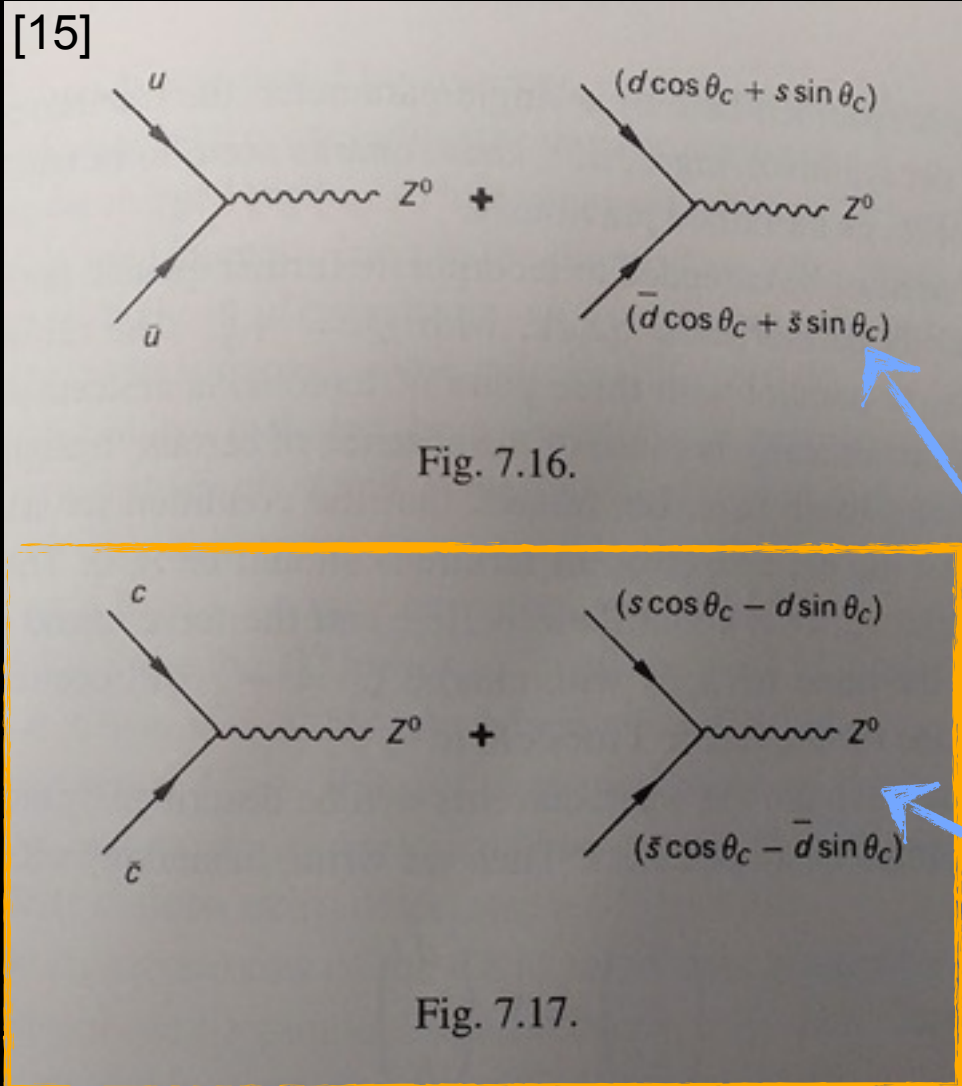
- Neutrale ströme ( $Z^0$ ) - keine flavour Änderung beobachtet

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‘

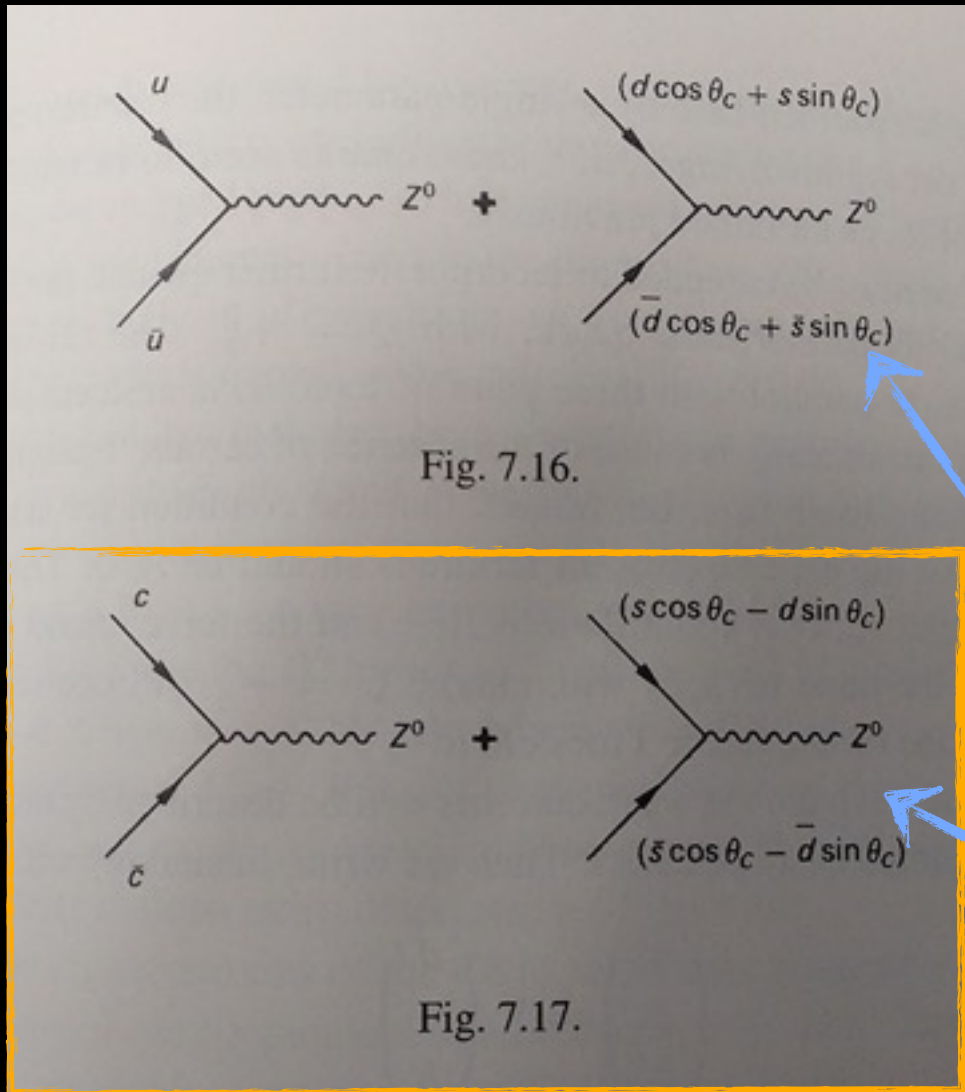
schwache Eigenzustände

Glashow, Iliopolus, Maiani: 1970

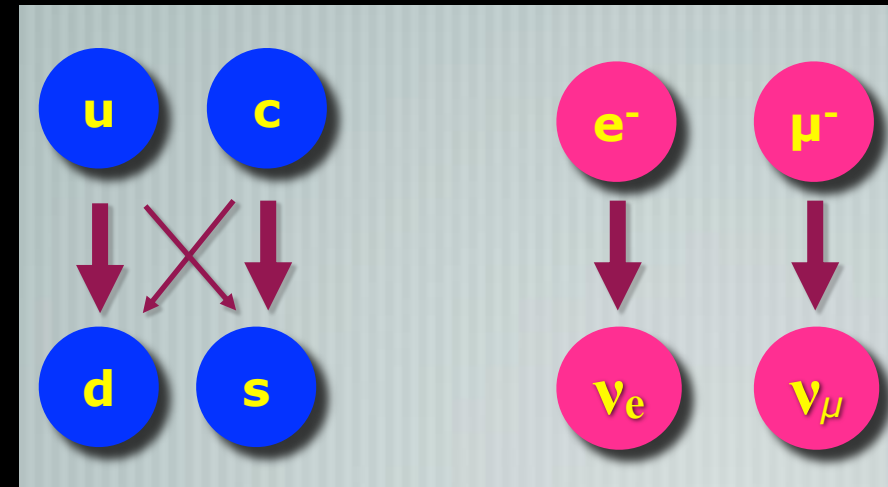
$$\begin{pmatrix} |u\rangle \\ \cos\theta_C |d\rangle + \sin\theta_C |s\rangle \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |c\rangle \\ -\sin\theta_C |d\rangle + \cos\theta_C |s\rangle \end{pmatrix}$$

→ GIM Mechanismus

Drehung im ‚flavour‘ Raum



Neues Teilchen: „charm“ Quark



Quantenmechanisch: Interferenz dieser Diagramme

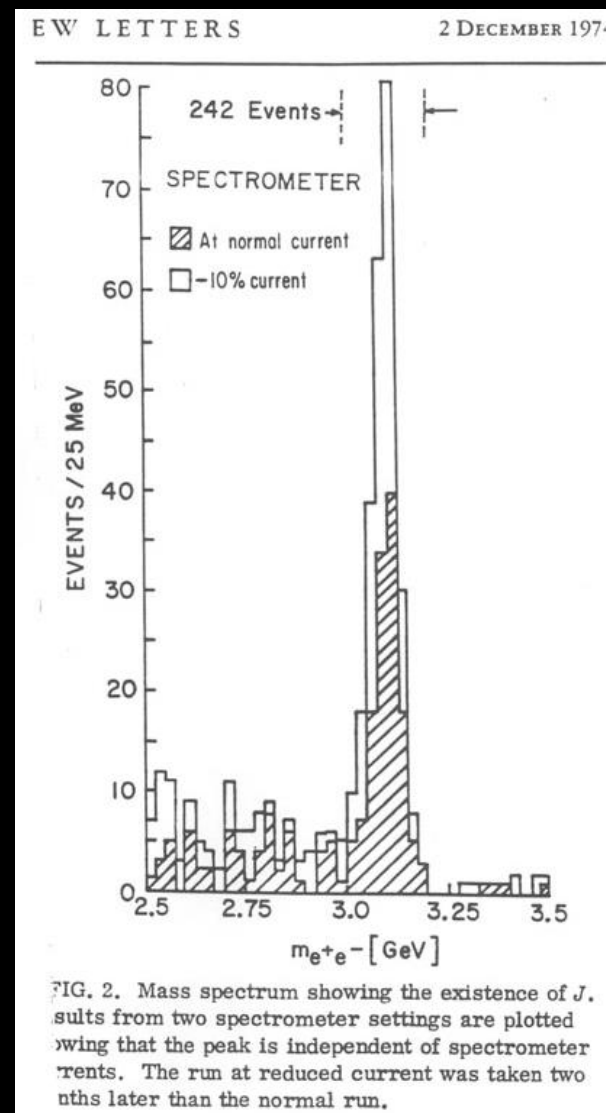
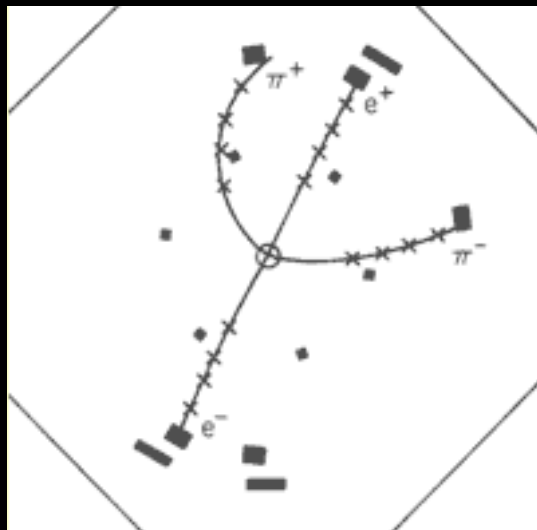
# Nachweis des charm - Quarks

- Entdeckt durch gezielte Experimente
  - Gleichzeitig von 2 unabhängigen Gruppen

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

Richter:  $\Psi$

Ting: J

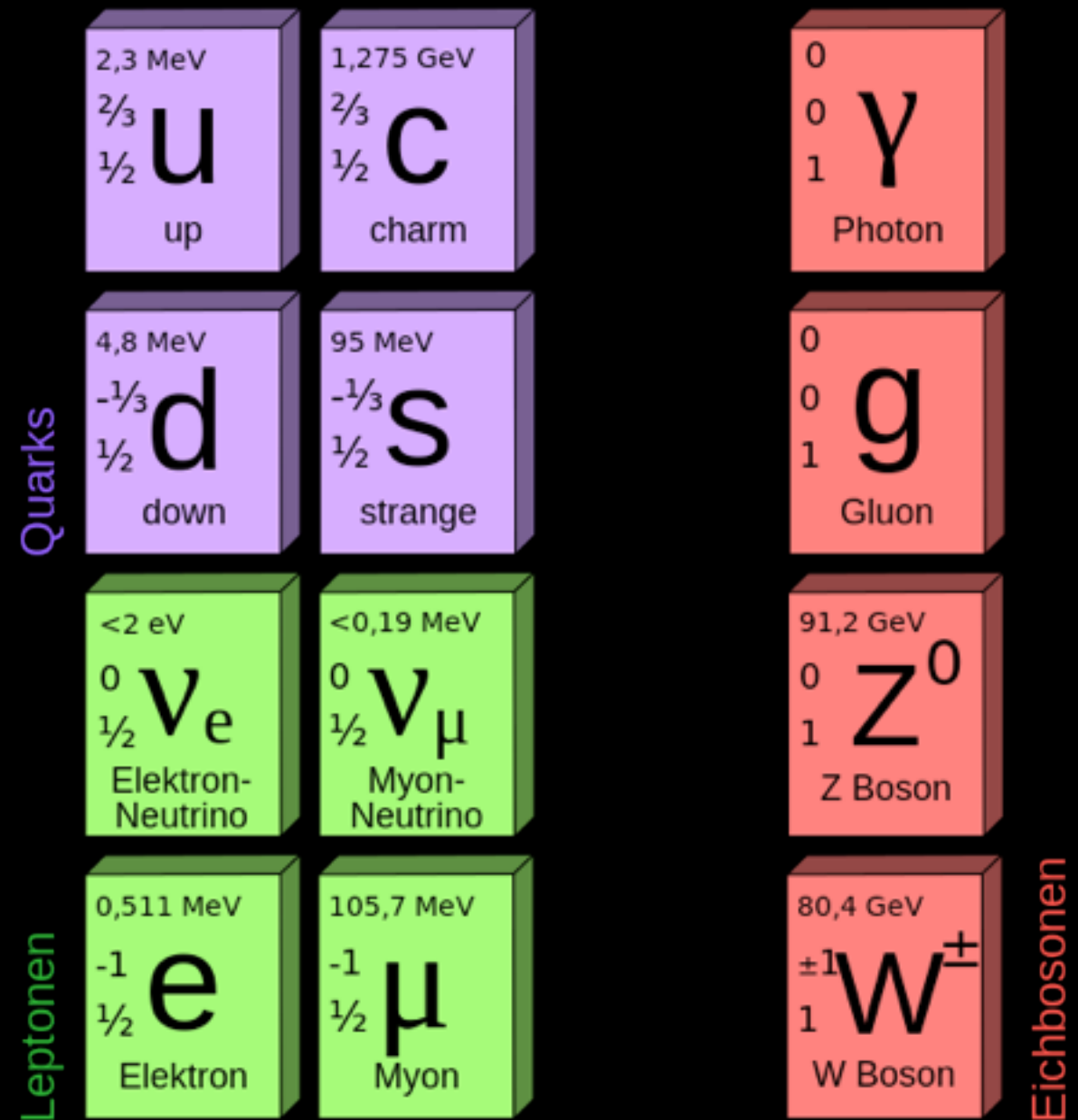


Teilchen wurde  $J/\Psi$  genannt!

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

## • Elementare Teilchen

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



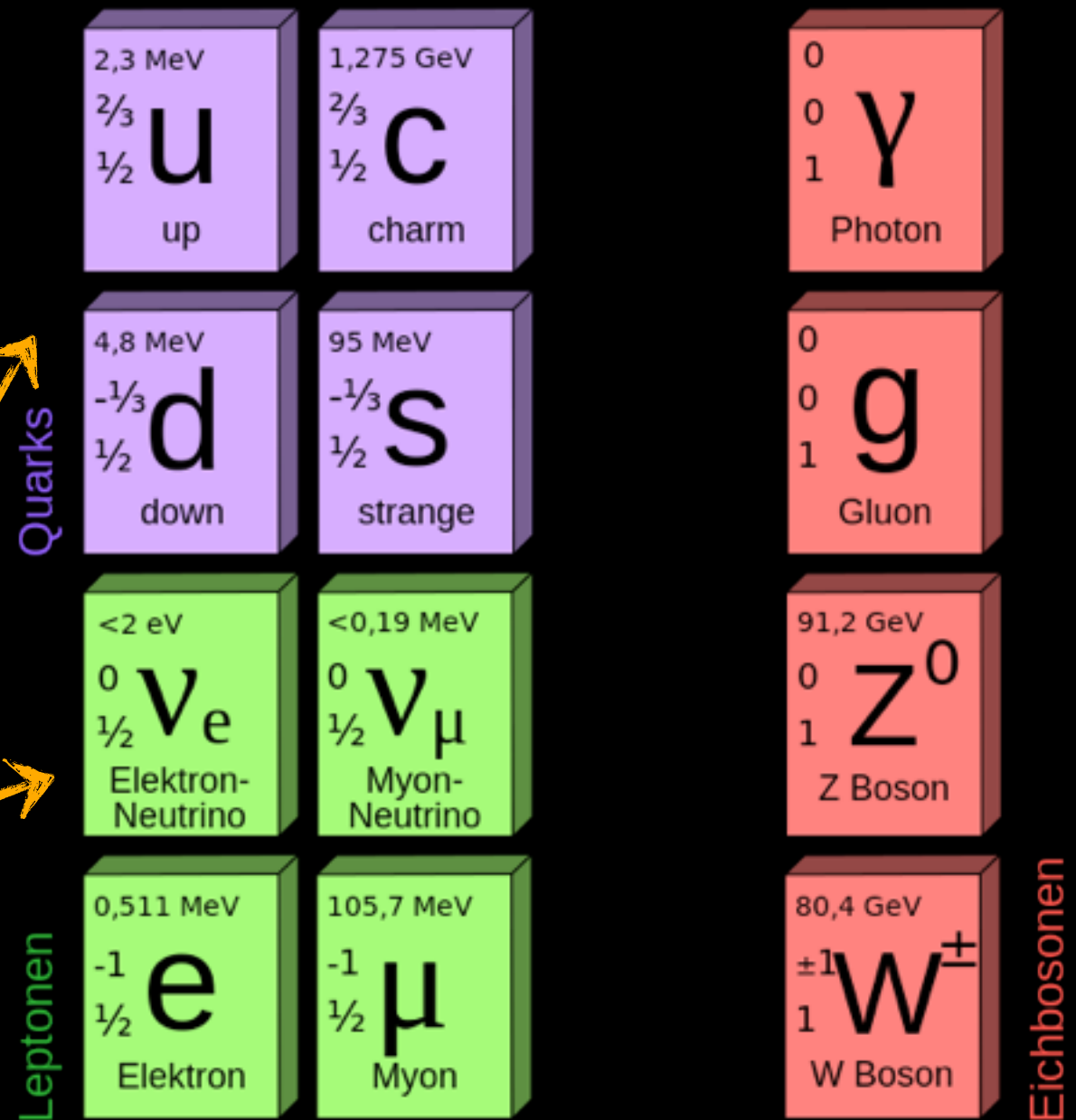


# Was wir bisher kennengelernt haben

## • Elementare Teilchen

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

Doublets der schwachen Ladung



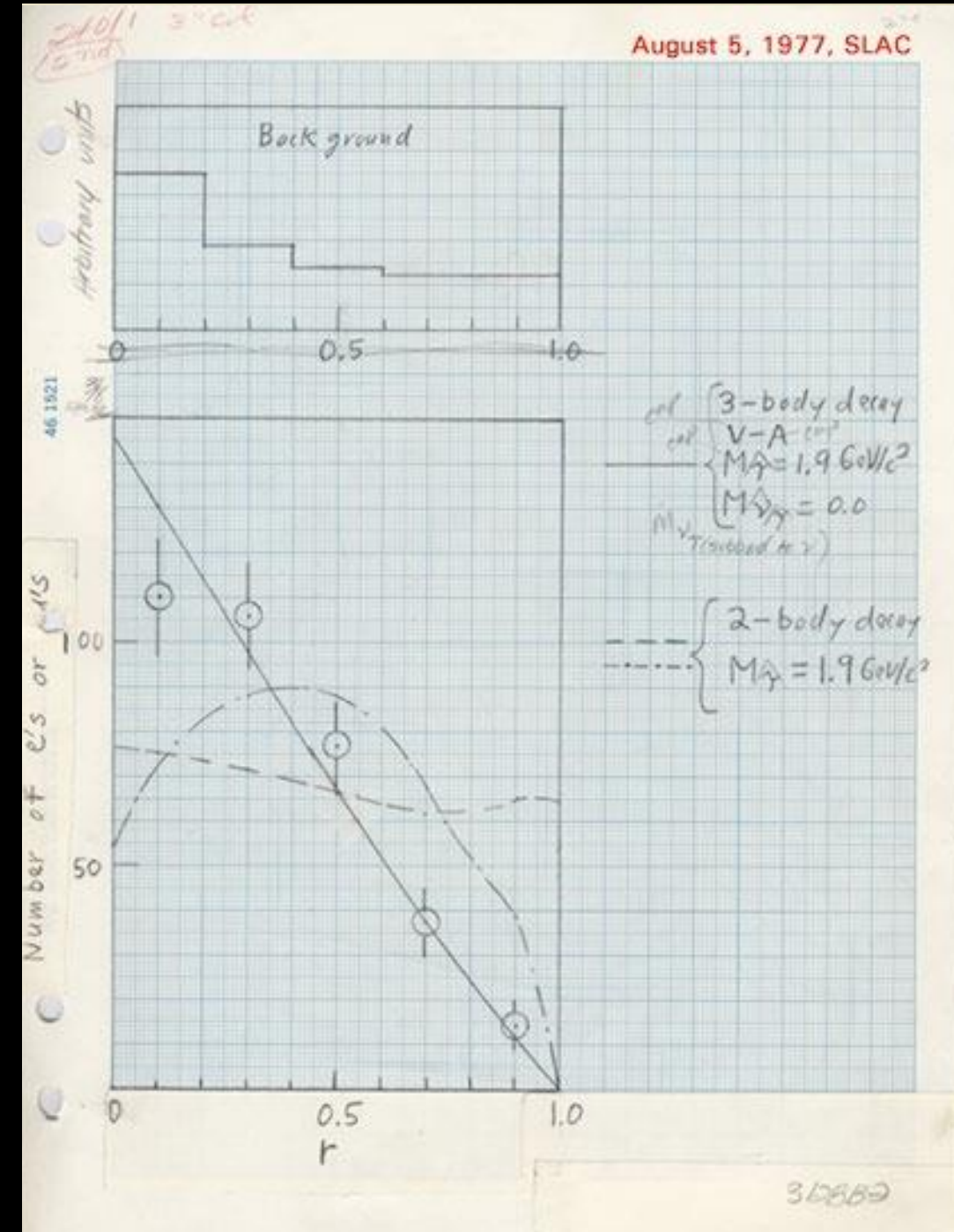
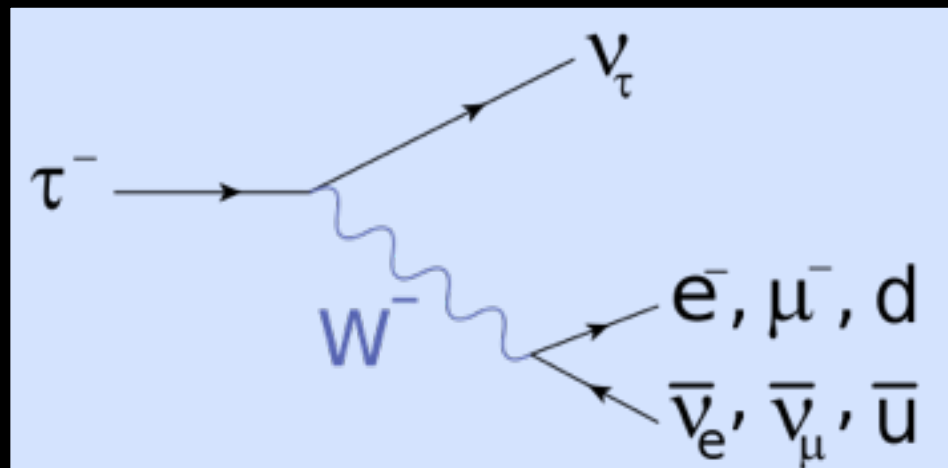
# Und was ist das jetzt?

- Entdeckung eines 3. Leptons

SLAC: 1975

- Das Tauon:  $\tau$
- 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 ( $S=1$ )

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

Bottom & Top am Fermilab entdeckt,  
1977 1995

# Was wir bisher kennengelernt haben

## • Elementare Teilchen

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

Doublets der schwachen Ladung

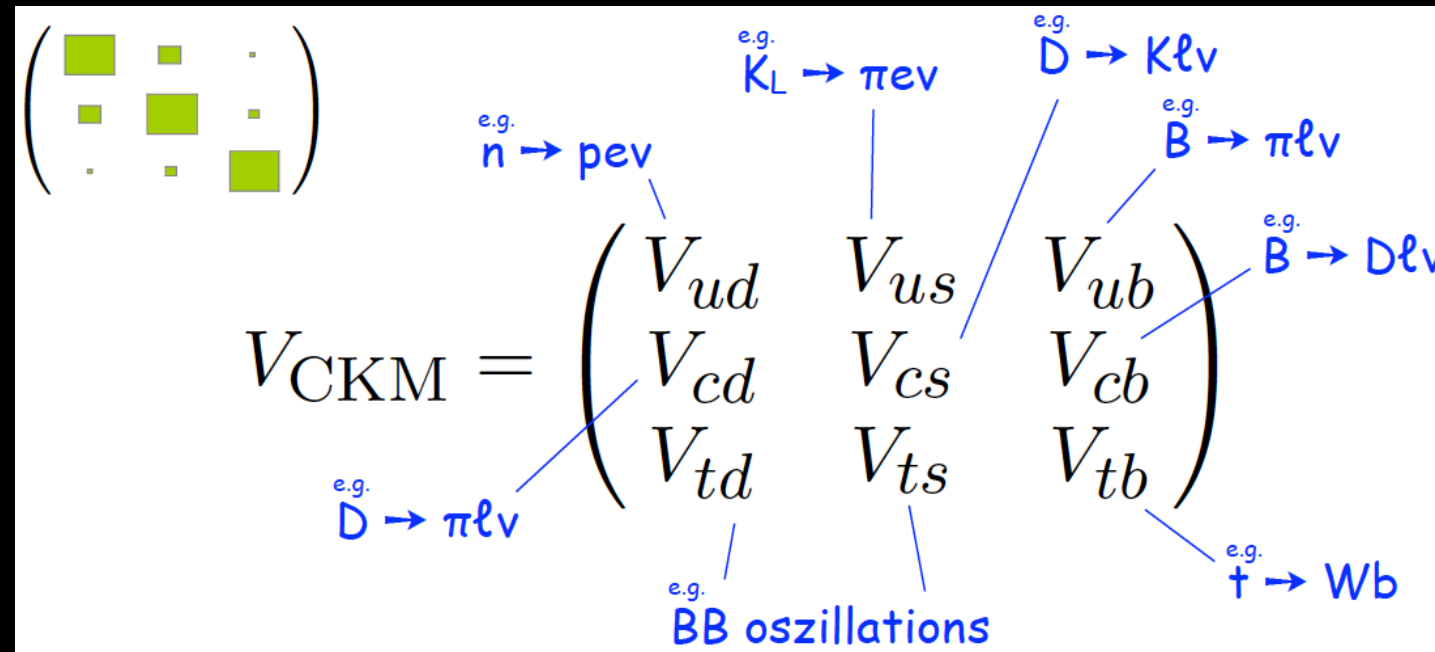
	1.	2.	3.	Familie / Generation
Quarks	2,3 MeV $\frac{2}{3}$ <b>u</b> up	1,275 GeV $\frac{2}{3}$ <b>c</b> charm	173,07 GeV $\frac{2}{3}$ <b>t</b> top	0 0 1 <b><math>\gamma</math></b> Photon
	4,8 MeV $-\frac{1}{3}$ <b>d</b> down	95 MeV $-\frac{1}{3}$ <b>s</b> strange	4,18 GeV $-\frac{1}{3}$ <b>b</b> bottom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

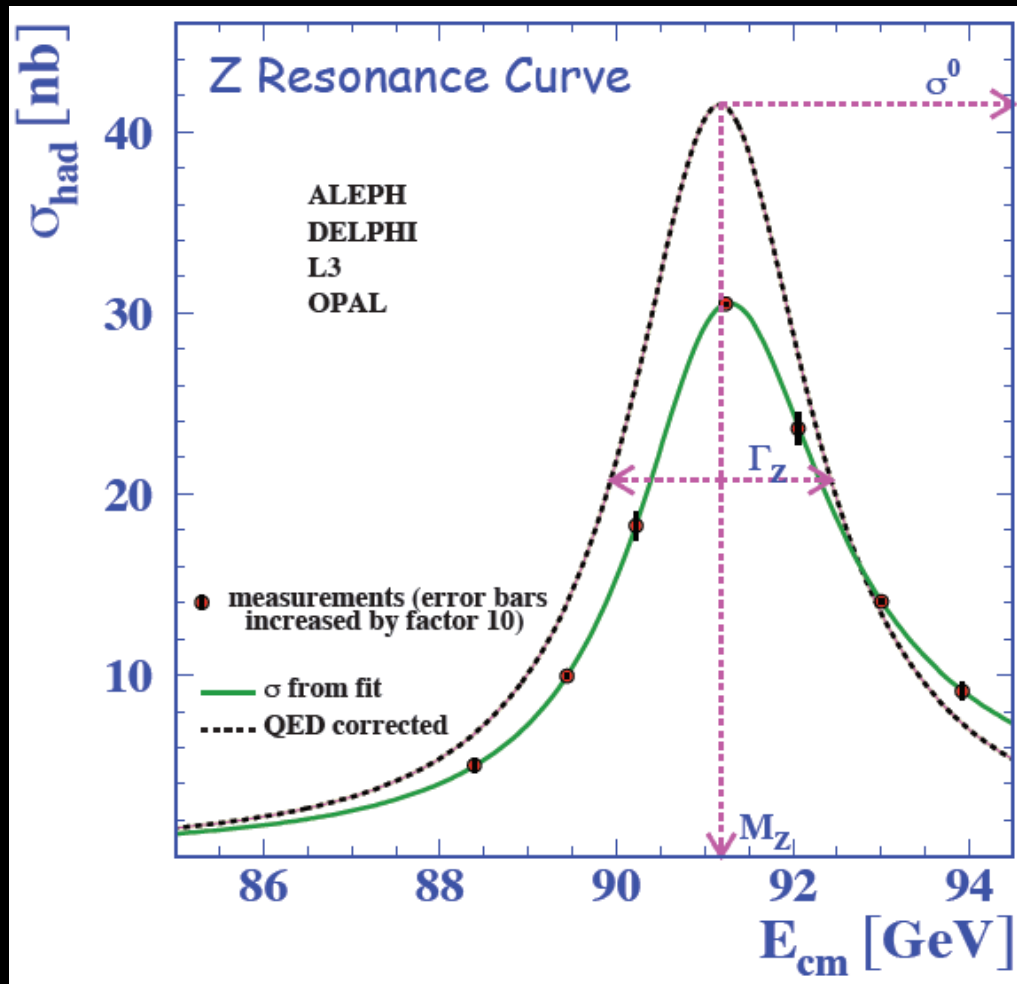


# Gibt es mehr als 3 Familien?

- Untersuchung des Z-Teilchens im Detail:

Breit-Wigner Kurve  
→ harmonischer Oszillator

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



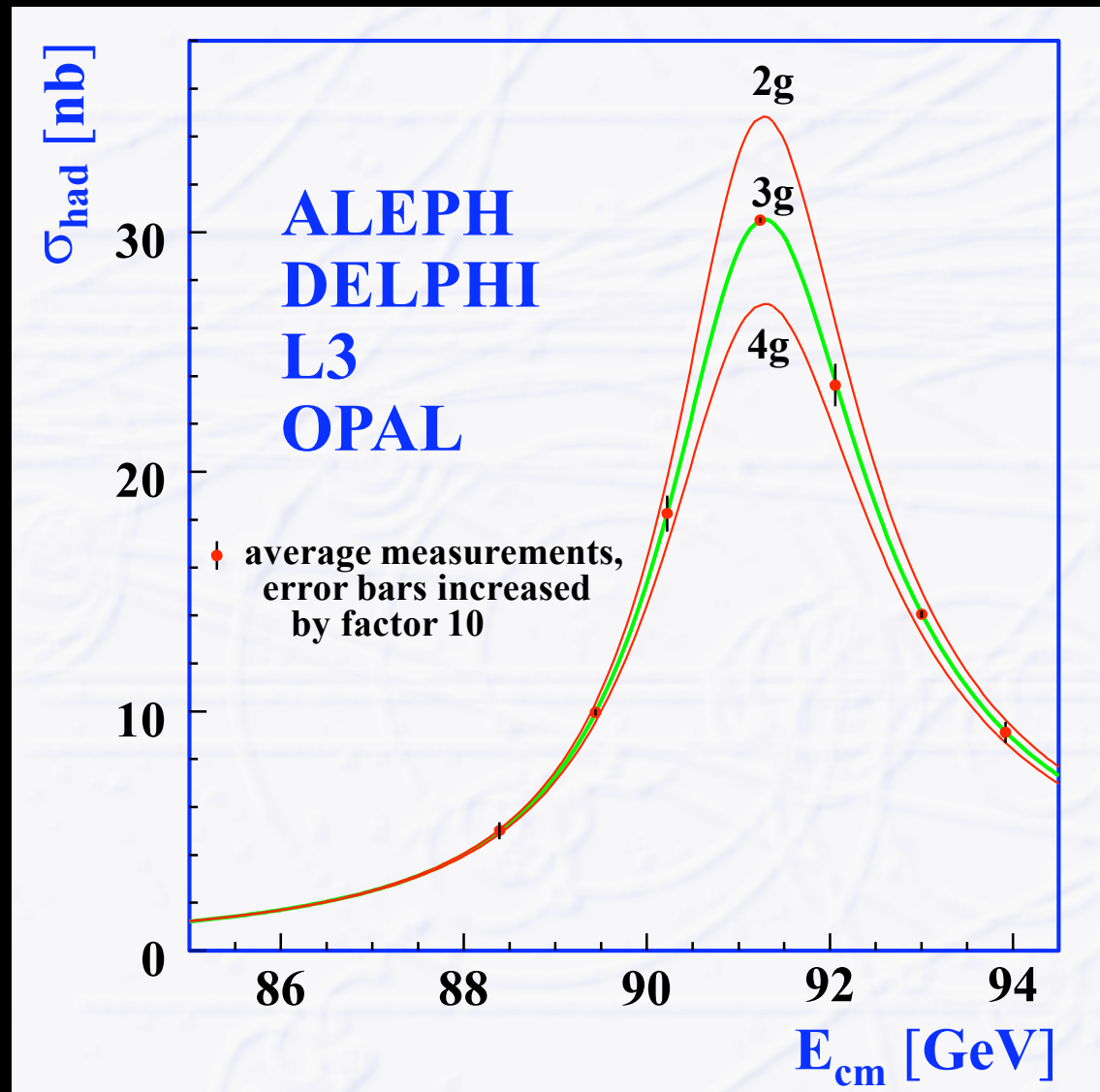
Exakte Form abhängig von

- 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 ( $S=1$ )

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

## • 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 $\frac{2}{3}$ <b>u</b> up	1,275 GeV $\frac{2}{3}$ <b>c</b> charm	173,07 GeV $\frac{2}{3}$ <b>t</b> top	0 0 <b><math>\gamma</math></b> Photon	125,9 GeV 0 0 <b>H</b> Higgs Boson
	4,8 MeV $-\frac{1}{3}$ <b>d</b> down	95 MeV $-\frac{1}{3}$ <b>s</b> strange	4,18 GeV $-\frac{1}{3}$ <b>b</b> bottom	0 0 <b>g</b> Gluon	
	<2 eV 0 $\frac{1}{2}$ <b><math>\nu_e</math></b> Elektron-Neutrino	<0,19 MeV 0 $\frac{1}{2}$ <b><math>\nu_\mu</math></b> Myon-Neutrino	<18,2 MeV 0 $\frac{1}{2}$ <b><math>\nu_\tau</math></b> Tau-Neutrino	91,2 GeV 0 0 <b><math>Z^0</math></b> Z Boson	
Leptonen	0,511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ <b>e</b> Elektron	105,7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ <b><math>\mu</math></b> Myon	1,777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ <b><math>\tau</math></b> Tau	80,4 GeV $\pm 1$ 1 <b><math>W^\pm</math></b> W Boson	Eichbosonen

Quarks

Leptonen

Eichbosonen

Was ist noch unklar?

# Higgs

- Higgs Mechanismus spielt eine zentrale Rolle in der elektroschwachen Theorie

Higgs,  
Englert,  
Brout: 1964

- Warum ist der „Higgs Mechanismus“ so wichtig für die Teilchenphysik?

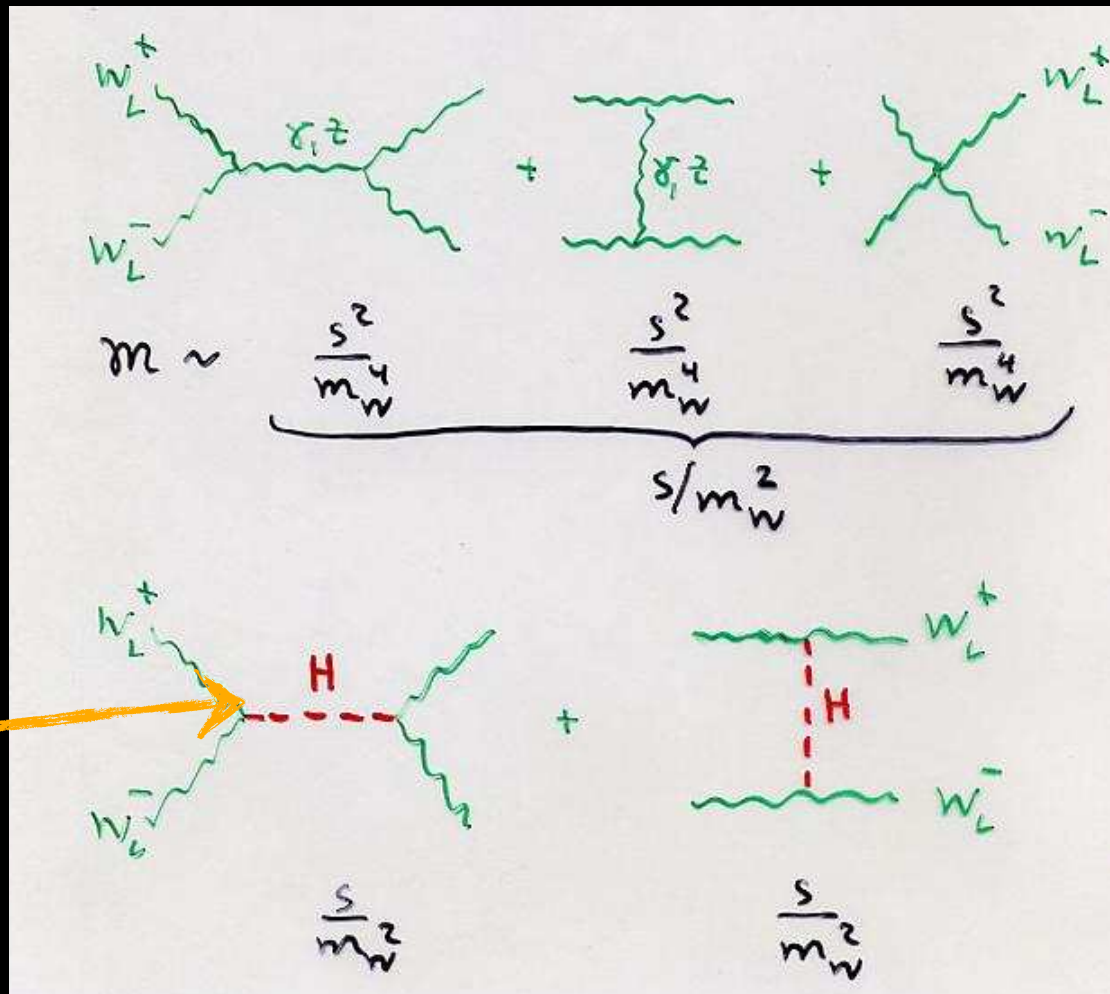
- Alle Eichbosonen sind masselos in der Theorie!
  - Aber W & Z Bosonen sind massiv in der Natur!
- Wahrscheinlichkeitserhaltung!

- Higgs Mechanismus spielt eine zentrale Rolle in der elektroschwachen Theorie

Higgs,  
Englert,  
Brout: 1964

- Warum ist der „Higgs Mechanismus“ so wichtig für die Teilchenphysik?

- Alle **Eichbosonen sind masselos** in der Theorie!
  - Aber W & Z Bosonen sind massiv in der Natur!
- **Wahrscheinlichkeitserhaltung!**



**Streuwahrscheinlichkeit > 1**  
für  $Q^2$  groß!

Alles zusammen: **destruktive Interferenz**  
→ **Wahrscheinlichkeit < 1**

Muss ‚Skalar‘  
sein: Spin = 0



# Massen der Eichbosonen

- Alle Eichbosonen sind masselos in elektroschwacher Theorie!
  - Masse ‚per Hand‘ hinzugefügt: Theorie bricht zusammen
    - → Eichinvarianz geht verloren
- Dynamische Erzeugung der Masse:
  - Interaktion mit einem skalaren Feld
    - Erfüllt das ganze Universum
  - Führt zu Massentermen in Gleichungen

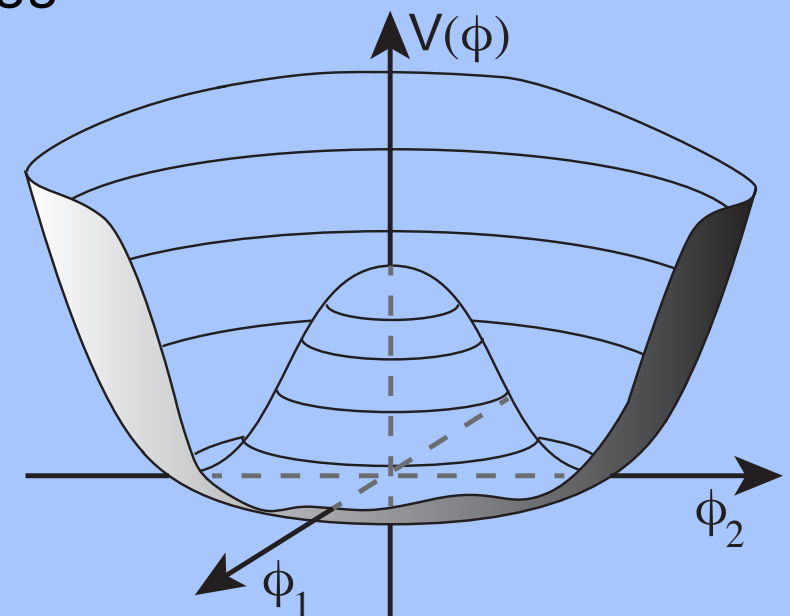
• **Symmetrie** des Potentialminimums ‚spontan‘ gebrochen

- Führt zur Brechung der EW Symmetrie
  - Elektromagnetismus & schwache WW

• Analoge Effekte bereits aus Festkörperphysik bekannt! (Supraleitung)

$$V(\phi^\dagger\phi) = m^2\phi^\dagger\phi + \lambda(\phi^\dagger\phi)^2, \quad m, \lambda \in \mathbb{R}.$$

Higgs - Potential



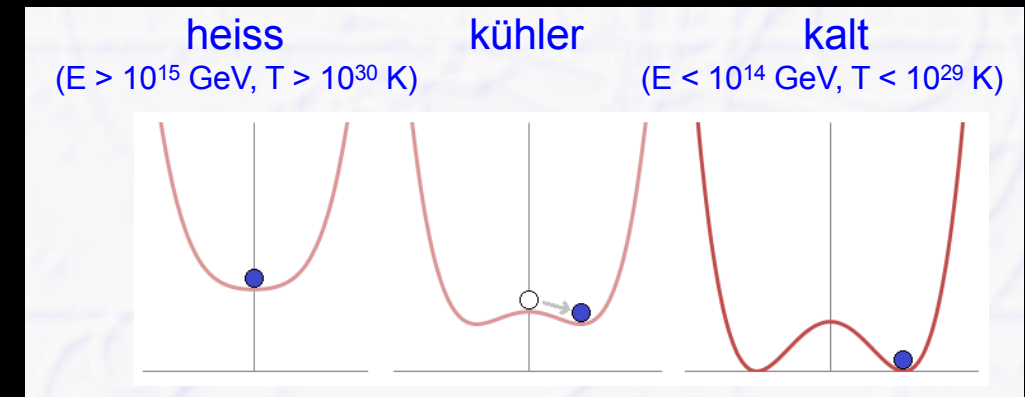
# Massen der Eichbosonen

- **Alle Eichbosonen sind masselos in elektroschwacher Theorie!**

- Masse ‚per Hand‘ hinzugefügt: **Theorie bricht zusammen**
  - → Eichinvarianz geht verloren

- **Dynamische Erzeugung der Masse:**

- **Interaktion mit einem skalaren Feld**
  - Erfüllt das ganze Universum
- Führt zu Massentermen in Gleichungen



Hohe Energiedichte

Niedrige Energiedichte

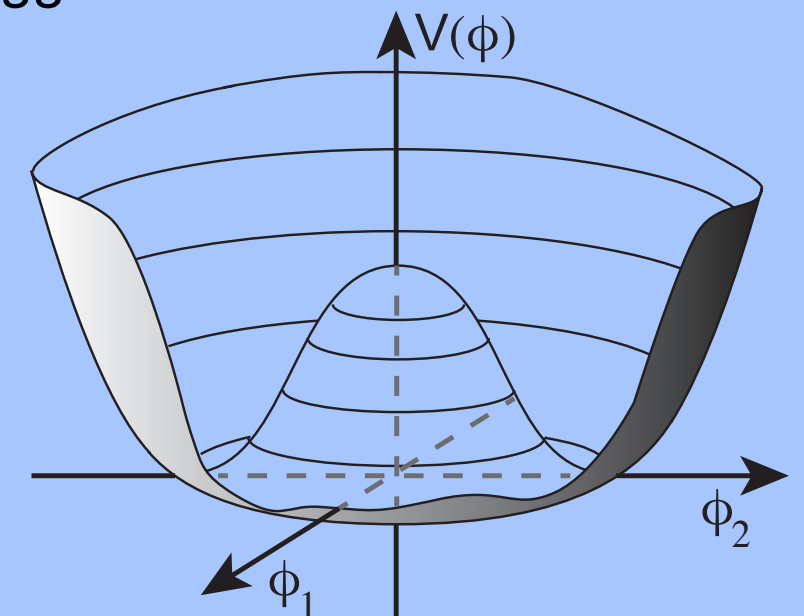
- **Symmetrie** des Potentialminimums ‚spontan‘ gebrochen

- Führt zur Brechung der EW Symmetrie
  - Elektromagnetismus & schwache WW

- **Analoge Effekte bereits aus Festkörperphysik bekannt! (Supraleitung)**

$$V(\phi^\dagger\phi) = m^2\phi^\dagger\phi + \lambda(\phi^\dagger\phi)^2, \quad m, \lambda \in \mathbb{R}.$$

Higgs - Potential



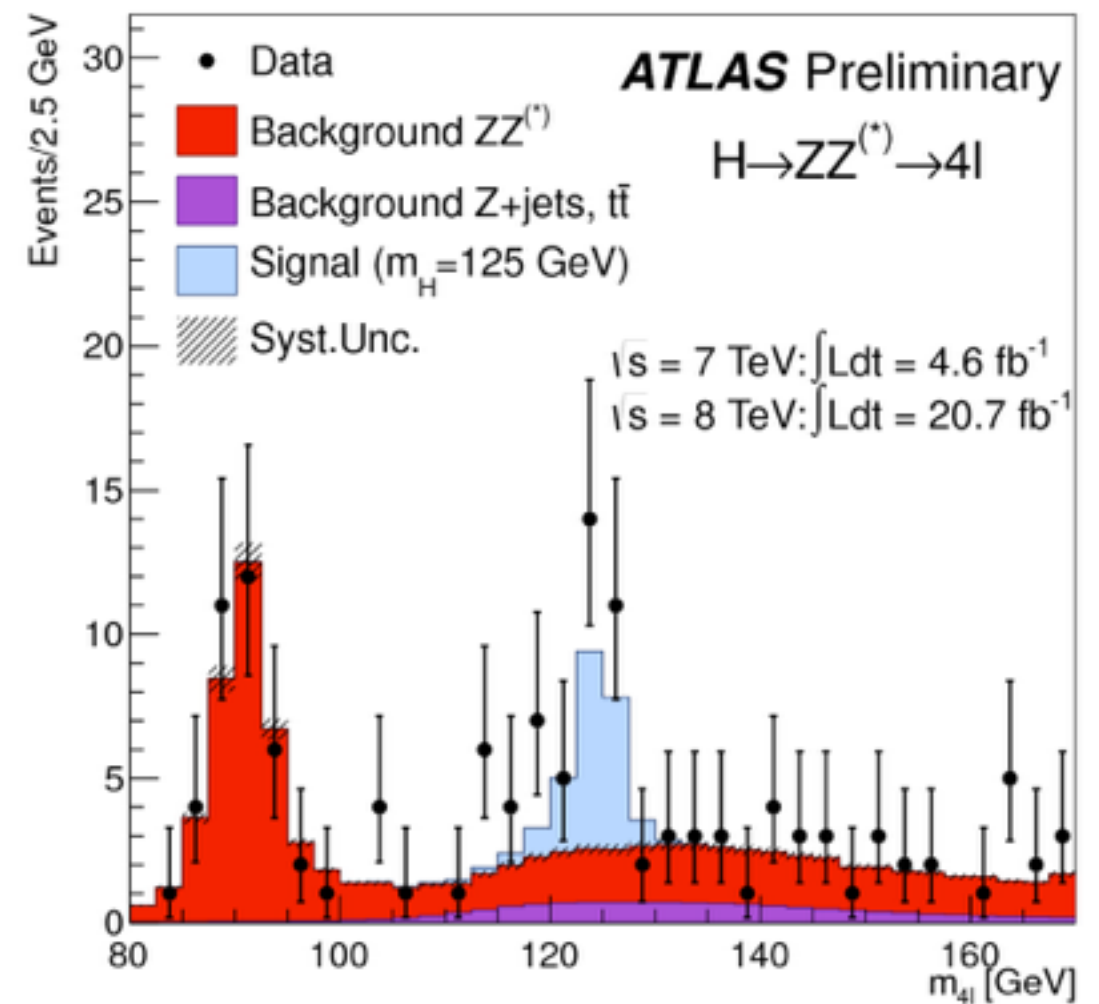
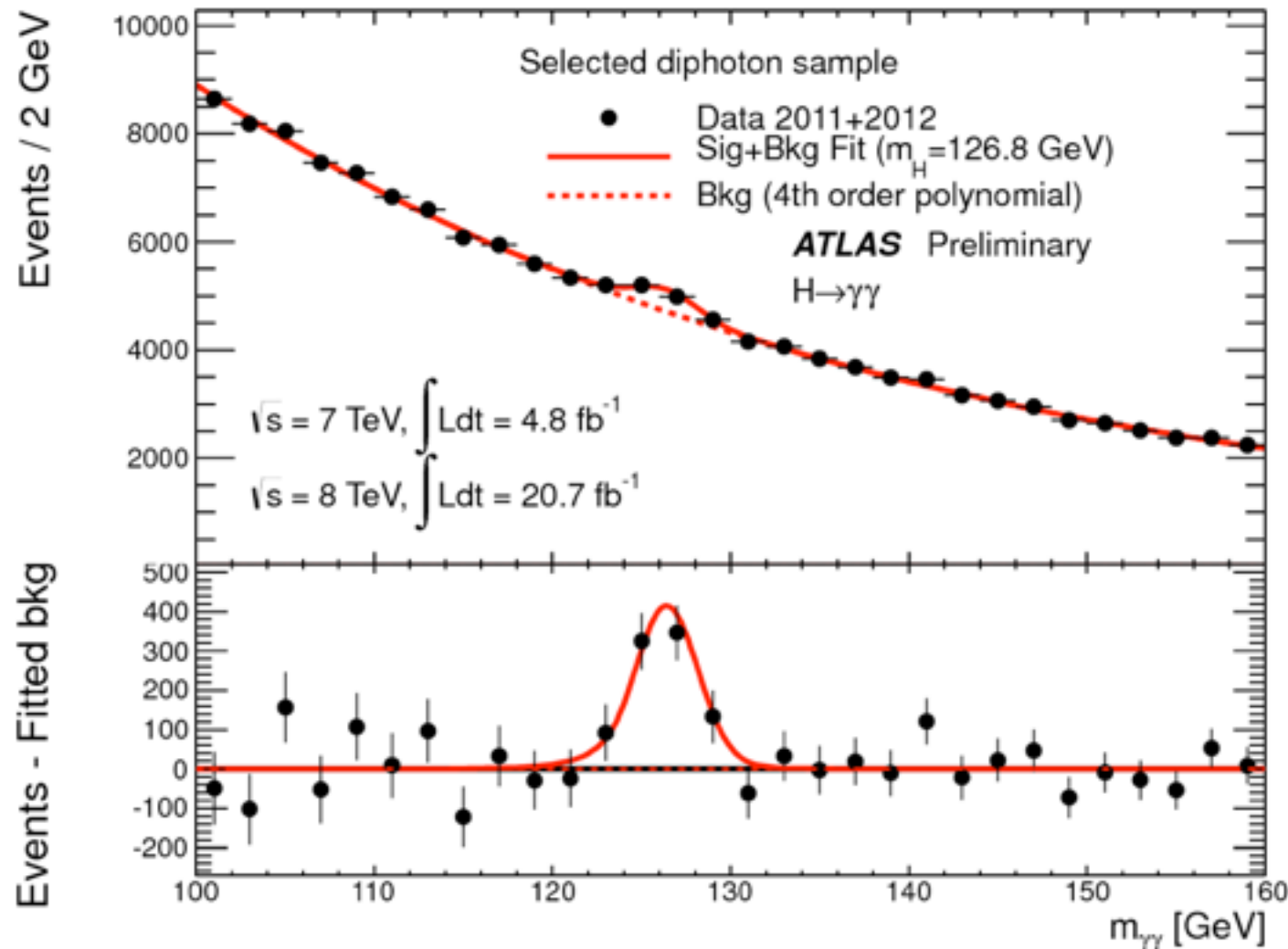
- Higgs Mechanismus erfordert zwingend ein **Teilchen mit Spin = 0** (Skalar)
  - Boson des Higgs Feldes, Botenteilchen der Interaktion mit diesem Feld

# Das Higgs Teilchen



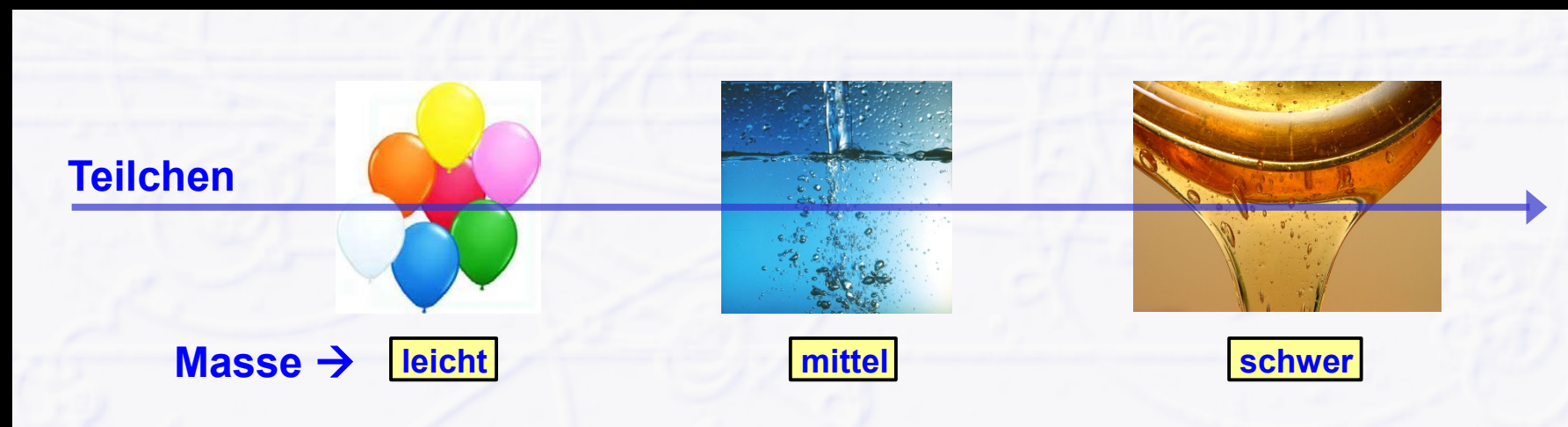
- Higgs Mechanismus erfordert zwingend ein **Teilchen mit Spin = 0** (Skalar)
  - Boson des Higgs Feldes, Botenteilchen der Interaktion mit diesem Feld

CERN  
(ATLAS &  
CMS): 2012



# Wie die Teilchen massiv wurden

- Masse der Teilchen hängt von Kopplungsstärke zum Higgsfeld ab:
  - Direkt verantwortlich für Masse der **Vektorbosonen**:  $g_V \sim m_V^2$ 
    - Gebrochene Symmetrie  $\rightarrow$  Goldstone Bosonen  $\rightarrow$  Freiheitsgrade absorbiert in massiven Eichbosonen
- Masse der Fermionen über Yukawa Wechselwirkung:
  - **Explizit hinzugefügt**
  - $g_F \sim m_F$



## • Elementare Teilchen

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

	1.	2.	3.	Familie / Generation
Quarks	2,3 MeV $\frac{2}{3}$ <b>u</b> up	1,275 GeV $\frac{2}{3}$ <b>c</b> charm	173,07 GeV $\frac{2}{3}$ <b>t</b> top	0 0 1 <b><math>\gamma</math></b> Photon
	4,8 MeV $-\frac{1}{3}$ <b>d</b> down	95 MeV $-\frac{1}{3}$ <b>s</b> strange	4,18 GeV $-\frac{1}{3}$ <b>b</b> bottom	0 0 1 <b>g</b> Gluon
Leptonen	<2 eV 0 $\frac{1}{2}$ <b><math>\nu_e</math></b> Elektron-Neutrino	<0,19 MeV 0 $\frac{1}{2}$ <b><math>\nu_\mu</math></b> Myon-Neutrino	<18,2 MeV 0 $\frac{1}{2}$ <b><math>\nu_\tau</math></b> Tau-Neutrino	91,2 GeV 0 0 1 <b><math>Z^0</math></b> Z Boson
	0,511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ <b>e</b> Elektron	105,7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ <b><math>\mu</math></b> Myon	1,777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ <b><math>\tau</math></b> Tau	80,4 GeV $\pm 1$ 1 <b><math>W^\pm</math></b> W Boson
				125,9 GeV 0 0 <b>H</b> Higgs Boson

Eichbosonen



## • 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 $\frac{2}{3}$ <b>u</b> up	1,275 GeV $\frac{2}{3}$ <b>c</b> charm	173,07 GeV $\frac{2}{3}$ <b>t</b> top	0 0 <b><math>\gamma</math></b> Photon	125,9 GeV 0 0 <b>H</b> Higgs Boson
	4,8 MeV $-\frac{1}{3}$ <b>d</b> down	95 MeV $-\frac{1}{3}$ <b>s</b> strange	4,18 GeV $-\frac{1}{3}$ <b>b</b> bottom	0 0 <b>g</b> Gluon	
	<2 eV 0 $\frac{1}{2}$ <b><math>\nu_e</math></b> Elektron-Neutrino	<0,19 MeV 0 $\frac{1}{2}$ <b><math>\nu_\mu</math></b> Myon-Neutrino	<18,2 MeV 0 $\frac{1}{2}$ <b><math>\nu_\tau</math></b> Tau-Neutrino	91,2 GeV 0 0 <b><math>Z^0</math></b> Z Boson	
Leptonen	0,511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ <b>e</b> Elektron	105,7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ <b><math>\mu</math></b> Myon	1,777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ <b><math>\tau</math></b> Tau	80,4 GeV $\pm 1$ 1 <b><math>W^\pm</math></b> W Boson	Eichbosonen

# Was haben wir jetzt gelernt?



- Dynamische Erzeugung von Masse
- Vereinheitlichung der elektromagnetischen & schwachen Wechselwirkung
- Elektroschwache Symmetriebrechung konsistent beschrieben
- Wie ist es möglich das W&Z massiv, das Photon aber masselos ist?
  - Wie ist es möglich das  $M_W \neq M_Z$

# Was haben wir jetzt gelernt?

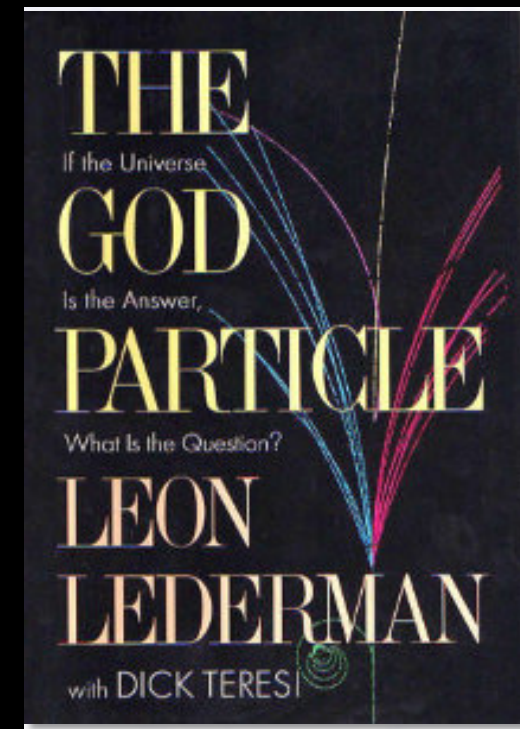


- Dynamische Erzeugung von Masse
- Vereinheitlichung der elektromagnetischen & schwachen Wechselwirkung
- Elektroschwache Symmetriebrechung konsistent beschrieben
- Wie ist es möglich das W&Z massiv, das Photon aber masselos ist?
  - Wie ist es möglich das  $M_W \neq M_Z$
- Wieso haben Fermionen eine Masse  $\neq 0$  ?
- Wieso haben Fermionen unterschiedliche Massen?
- Was bestimmt die „Massen-Hirarchie? [2 MeV (u) -- 173 GeV (t) ]

# Letzte Anmerkung zum Higgs



- Leon Lederman (frühere Direktor des Fermilab), Nobelpreis 1988
  - Schrieb 1993 Buch über Teilchenphysik und das Higgs-Teilchen
  - Präge den Begriff „Gottesteilchen“ - „God particle“
- Und der Grund:

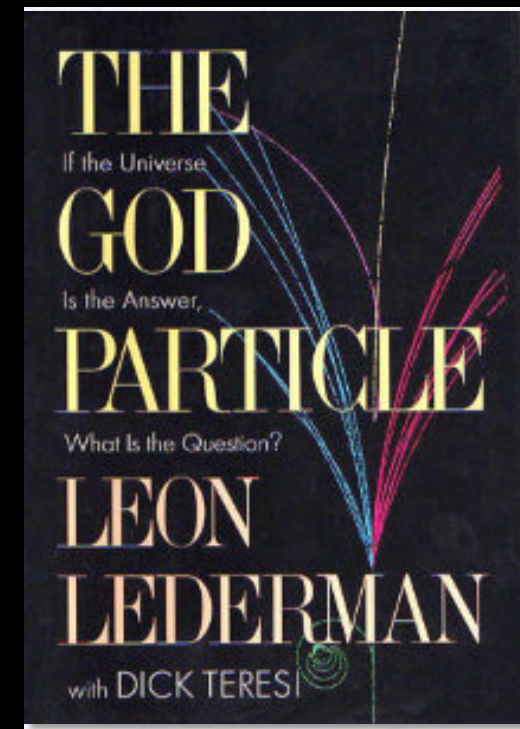


# Letzte Anmerkung zum Higgs

- Leon Lederman (frühere Direktor des Fermilab), Nobelpreis 1988
  - Schrieb 1993 Buch über Teilchenphysik und das Higgs-Teilchen
  - Prägte den Begriff „Gottesteilchen“ - „God particle“
- Und der Grund:

"so central to the state of physics today, so crucial to our final understanding of the structure of matter, yet so elusive"

but "the publisher wouldn't let us call it the **Goddamn Particle**, though that might be a more appropriate title, given its villainous nature and the expense it is causing."

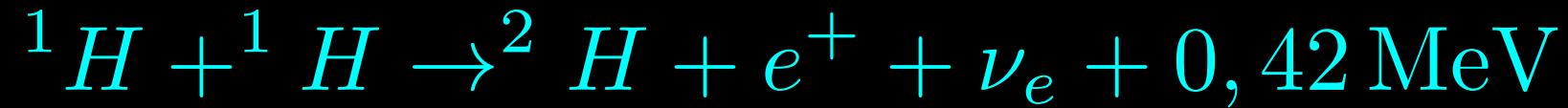


# Neutrinos



# Neutrinoquellen

- **Sonne / Supernovae:** Kernfusion



- **Kernreaktoren:** Kernspaltung
  - $\beta$  - Zerfall von Spaltprodukten & Neutronen  $\rightarrow \nu_e$
- **Atmosphäre:**
  - Myonzerfälle aus kosmischer Strahlung  $\rightarrow \nu_\mu, \nu_e$
- **Beschleuniger:**
  - Myonzerfälle  $\rightarrow \nu_\mu, \nu_e$

- Nachweis Stellarer Neutrinos im Homestake Experiment: **Davis Jr.: 1960er**
  - Gemessener Neutrinofluß 50% der Erwartung aufgrund der Sonnenleuchtkraft

- Nachweis Stellarer Neutrinos im Homestake Experiment: **Davis Jr.: 1960er**
  - Gemessener Neutrinofluß 50% der Erwartung aufgrund der Sonnenleuchtkraft
- Nachweis Stellarer Neutrinos in Superkamiokande
  - Bestätigung der Homestake Ergebnisse **Super Kamiokande: 1998**
- Nachweis Atmosphärischer Neutrinos
  - Fluß der von „oben“ und von „unten“ kommenden Neutrinos unterscheidet sich um ~50%
  - Was passiert mit den Neutrinos?

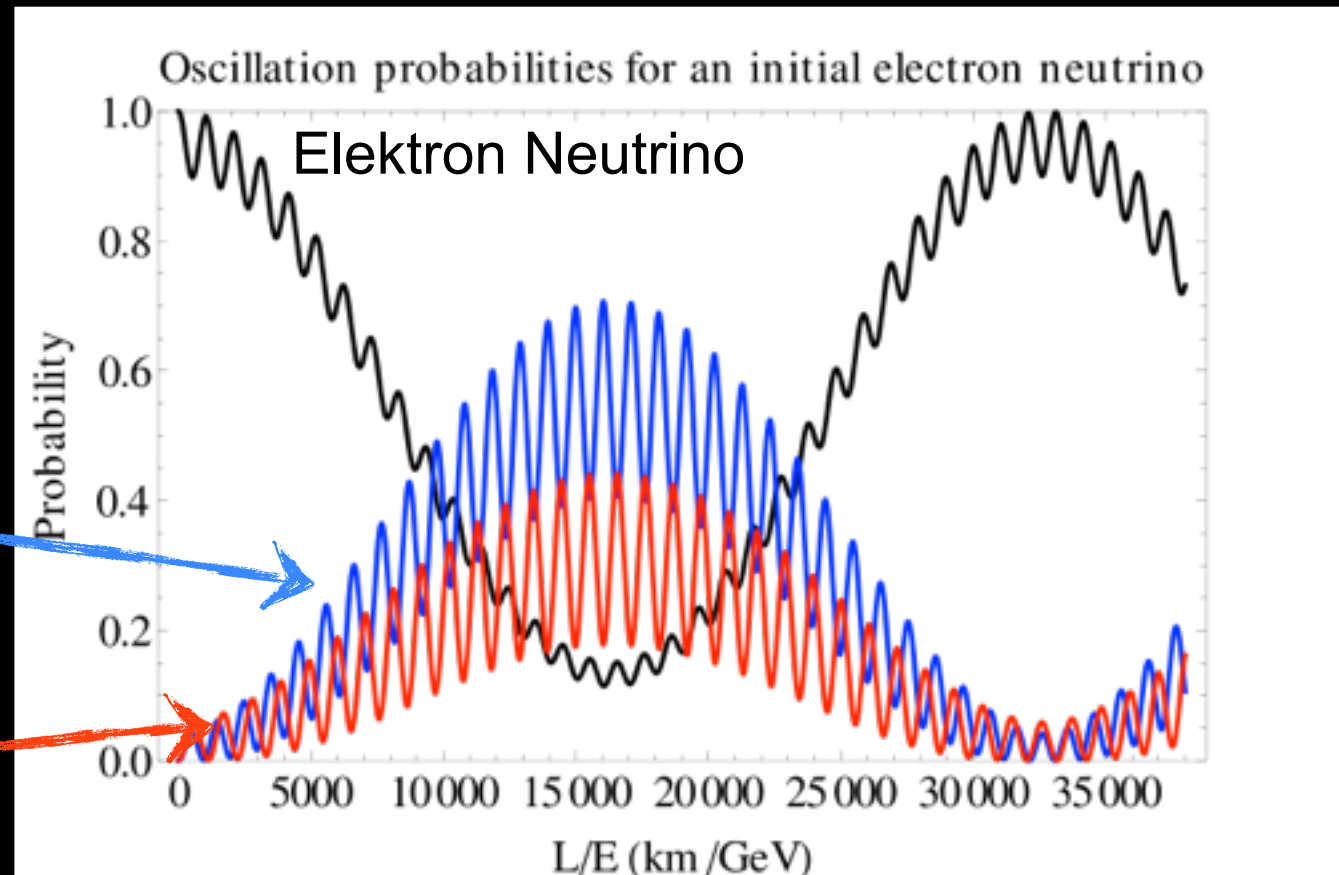
- Nachweis Stellarer Neutrinos im Homestake Experiment: Davis Jr.: 1960er
    - Gemessener Neutrinofluß 50% der Erwartung aufgrund der Sonnenleuchtkraft
  
  - Nachweis Stellarer Neutrinos in Superkamiokande Super Kamiokande: 1998
    - Bestätigung der Homestake Ergebnisse
  - Nachweis Atmosphärischer Neutrinos
    - Fluß der von „oben“ und von „unten“ kommenden Neutrinos unterscheidet sich um ~50%
    - Was passiert mit den Neutrinos?
- Neutrinos oszillieren von einer Art (flavour) zur anderen
    - Nur Elektron & Muon Neutrinos werden nachgewiesen

- Analog zum Quark-Sektor
- **Masseneigenzustände != flavour Eigenzustände**
- Erlaubt Mischung → Oszillationen
- Erfordert  $m_\nu > 0$  &  $m_{\nu_1} \neq m_{\nu_2} \neq m_{\nu_3}$

$$\begin{pmatrix} \nu_\alpha \\ \nu_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \Theta_m & \sin \Theta_m \\ -\sin \Theta_m & \cos \Theta_m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix},$$

Muon Neutrino

Tau Neutrino



$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = |\langle \nu_\beta(0) | \nu_\alpha(L) \rangle|^2 \approx \sin^2 \left( \frac{\Delta m^2 c^4}{4E} \frac{L}{\hbar c} \right) \cdot \sin^2 (2\Theta_m)$$

- Verschiedenen Reaktor & Beschleuniger Experimente
  - Detektoren in unterschiedlichen Entfernungen der Quelle
    - Double Chooz, KamLand, DayaBay / T2K, Opera, Minos
  - Messen Unterdrückung des Neutrinoflusses



# Neutrinooszillationen - Nachweis



- Verschiedenen Reaktor & Beschleuniger Experimente

- Detektoren in unterschiedlichen Entfernungen der Quelle
  - Double Chooz, KamLand, DayaBay / T2K, Opera, Minos

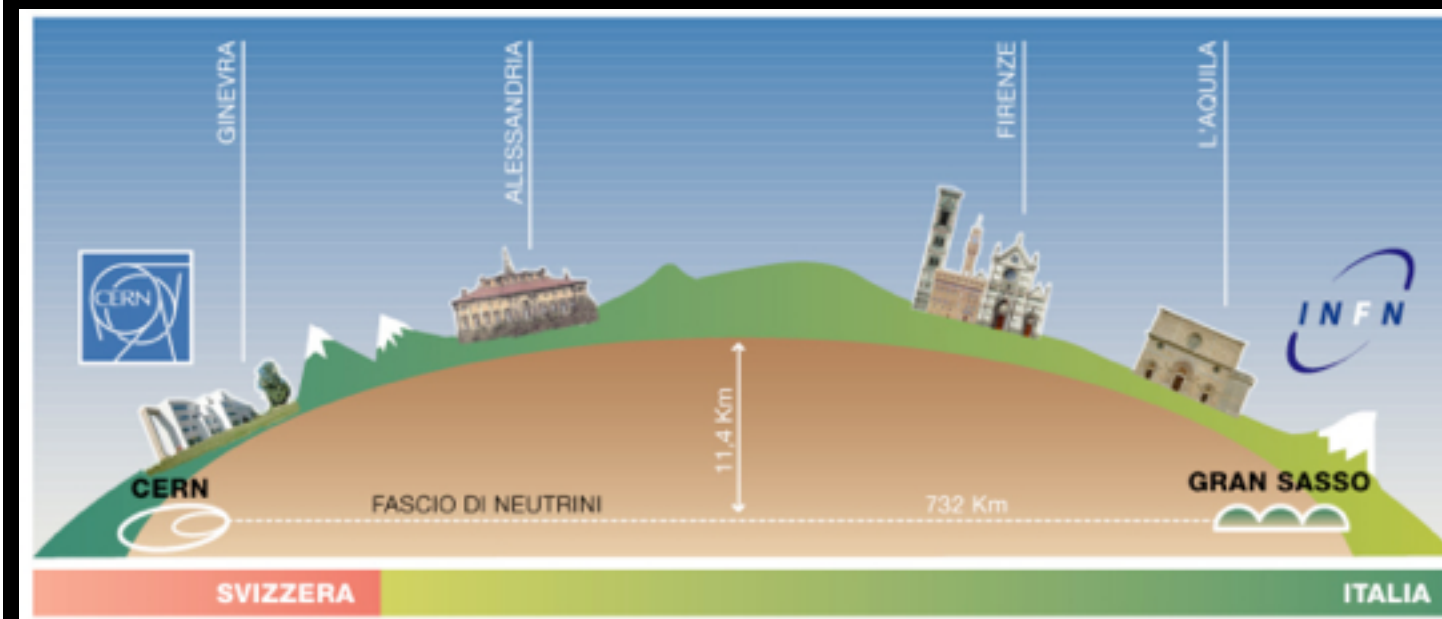
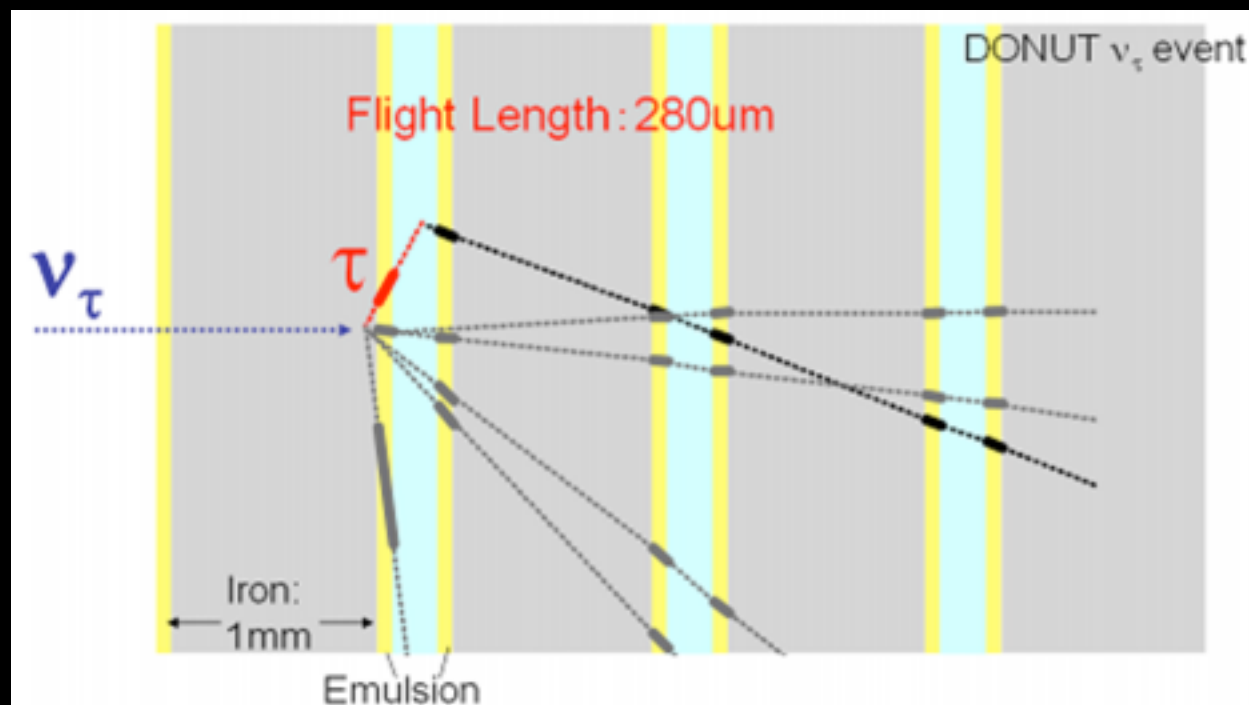
- Messen Unterdrückung des Neutrinoflusses

- **Opera: Erscheinen eines tau-Neutrinos nachgewiesen**

Opera: 2010-2014

- Neutrinostrahl ( $\mu$ ,  $e$ ) vom CERN 740km nach Gran Sasso (IT)

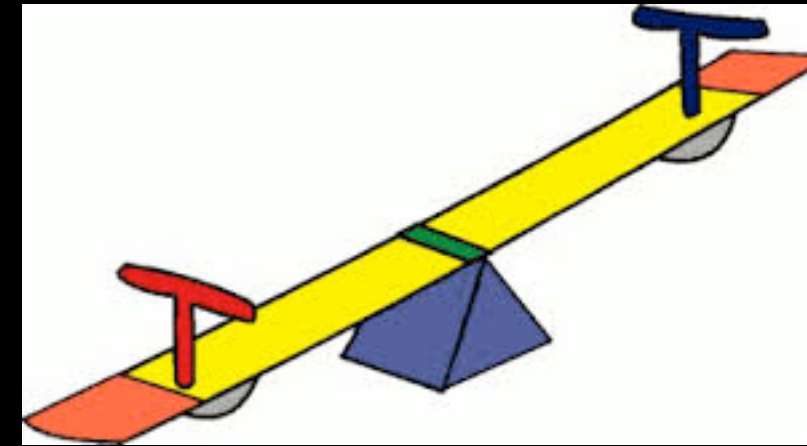
- Nachweis von Tau-Neutrinos im Neutrinostrahl (5x)



# Woher haben Neutrinos ihre Masse?



- Und wieso ist die Masse so klein im Vergleich zu Leptonen? ( $< 2\text{eV}$ )
- Genauso wie Elektronen, über Kopplung zum Higgsfeld?
  - Erfordert links & rechtshändige Neutrinos
    - Nur Linkshändige Neutrinos sind beobachtet worden!
- Anderer Mechanismus?
- Hoch im Trend: **See-Saw Mechanismus:**
  - Neutrinos sind Majorana Teilchen (eigene Anti-Teilchen)
  - Zusätzlich sehr schwere Rechtshändige Neutrinos (sterile Neutrinos)
    - Erzwingen sehr kleine Masse für bekannte Neutrinos
  - Dies verletzt Leptonzahlerhaltung & B-L
    - Könnte die Existenz von Materie über Leptogenesis erklären



## • Elementare Teilchen

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

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

## • Elementare Teilchen

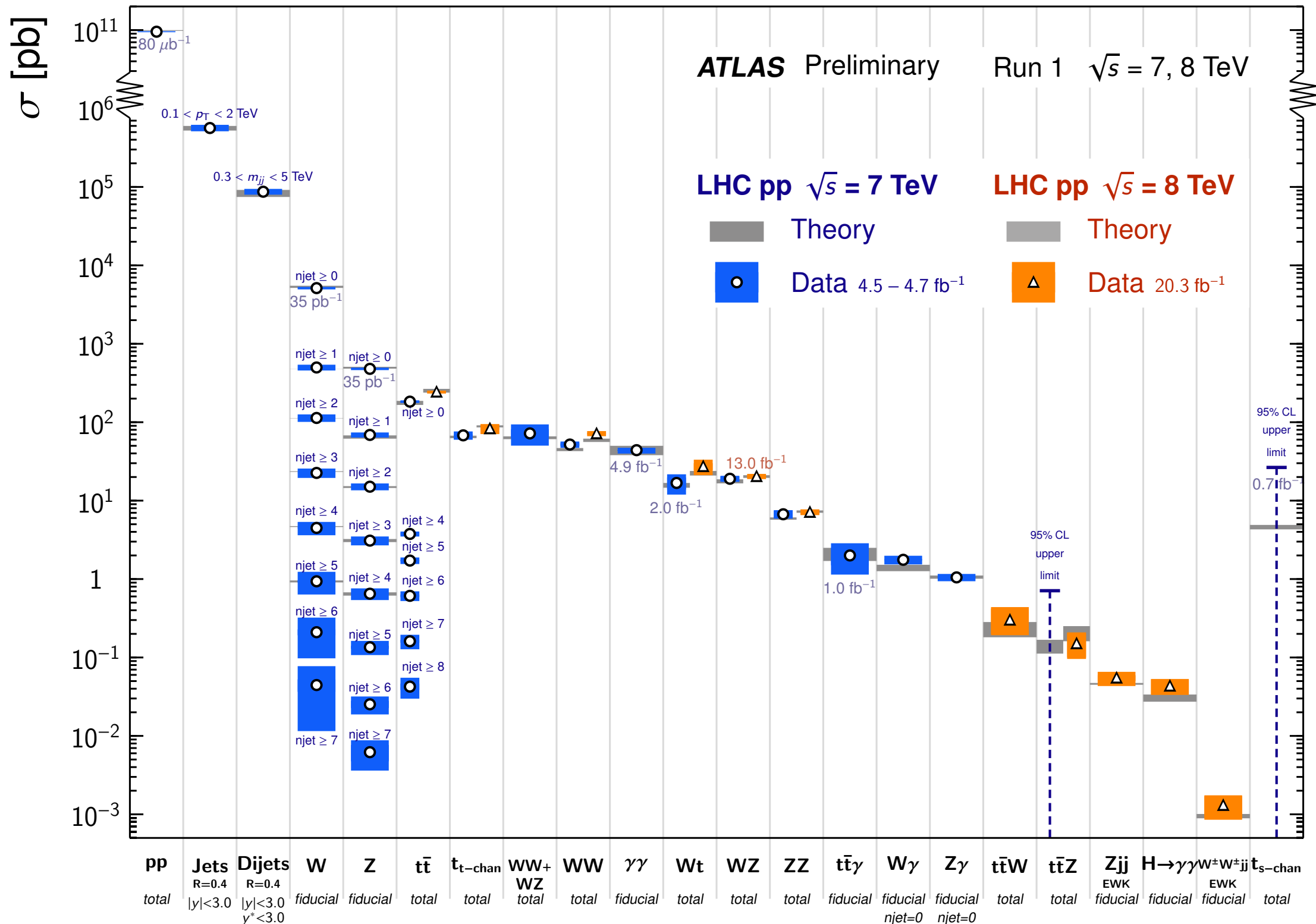
- Bausteine der Materie
  - Fermionen ( $S=1/2$ )
- Überträger der Kräfte
  - Bosonen ( $S=1$ )

Doublets der schwachen Ladung

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

### Standard Model Production Cross Section Measurements

Status: July 2014

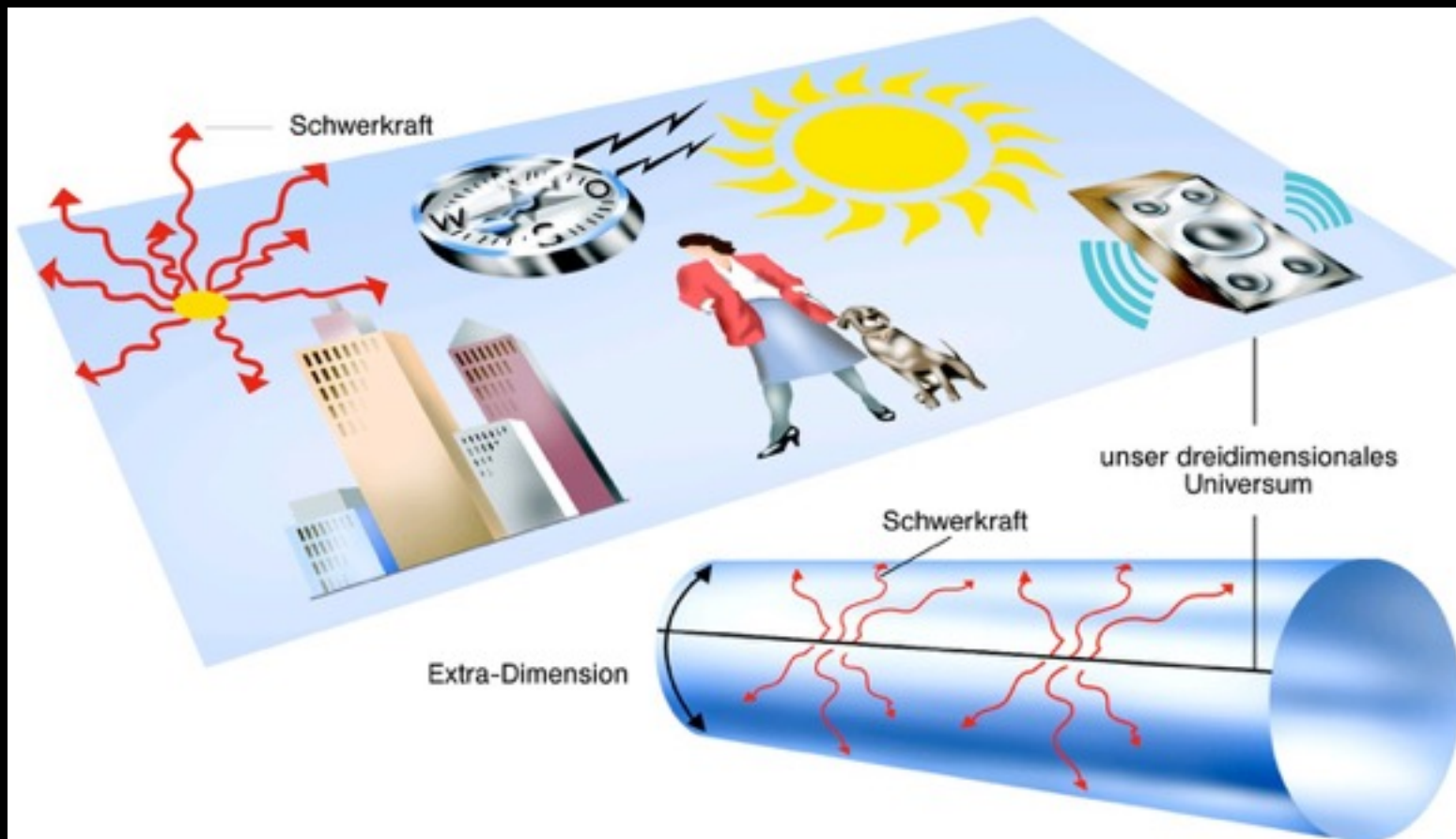


Noch ein paar Lose  
Enden ...

ENDEN ...

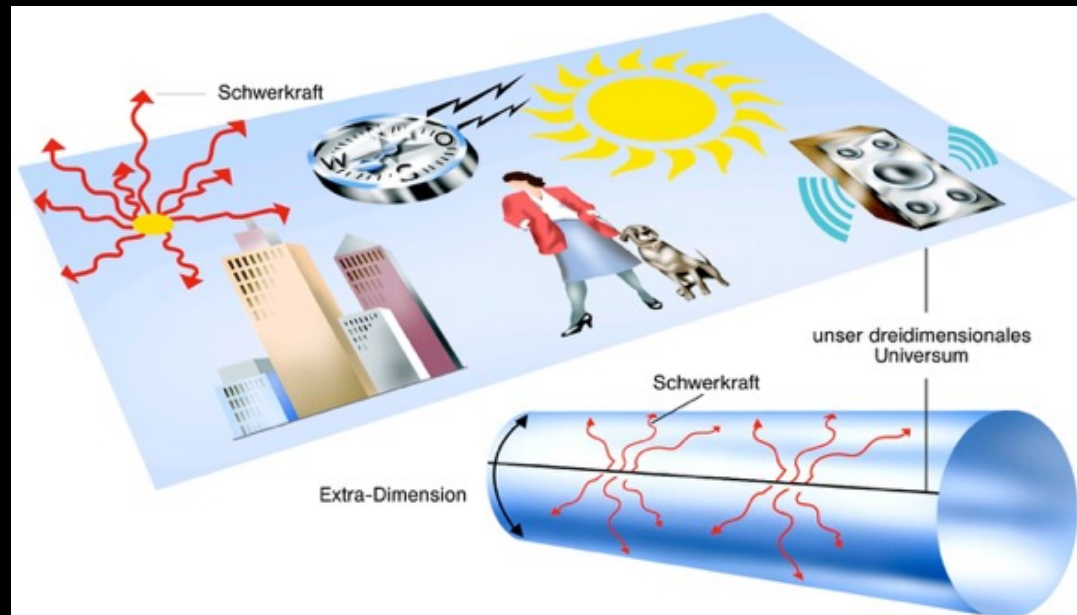


- Gravitation lässt sich nicht innerhalb des SM beschreiben
  - **Theoretisches Problem:** Allgemeine Relativitätstheorie und Quantenmechanik konnten bisher nicht zusammengefügt werden
- Wieso ist Gravitation so schwach?
  - Dominiert makroskopische Objekte
    - Auf Teilchenebene vernachlässigbar!
    - $10^{-38}$  mal so stark wie elektromagnetische Wechselwirkung!



• Zusätzliche Dimensionen?

- Wieso ist Gravitation so schwach?

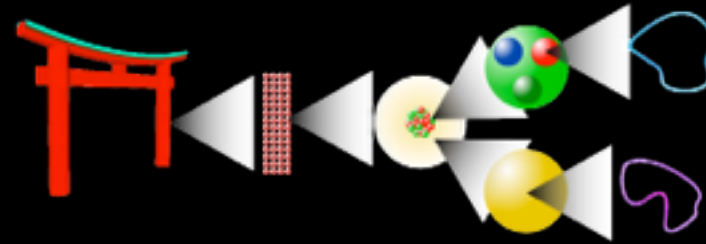


- Zusätzliche Dimensionen?

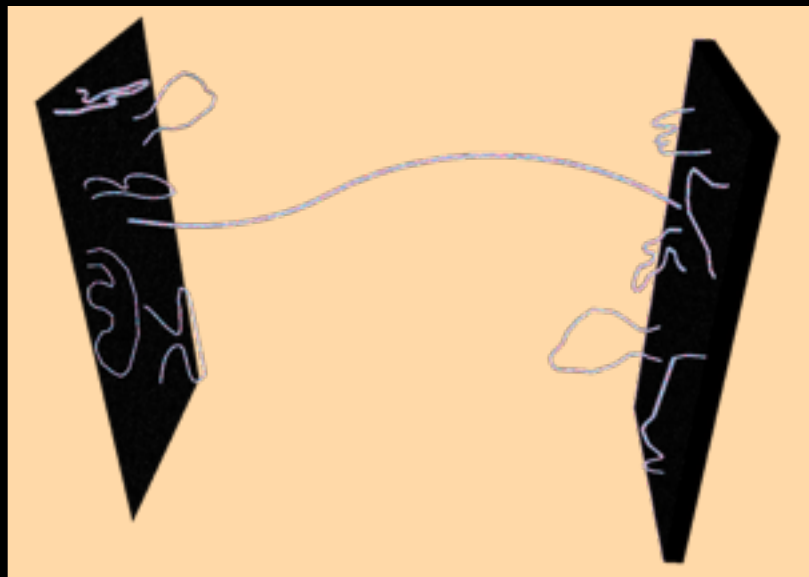
- Vorhersage von ‚schwarzen Löchern‘
  - Teilchen die am LHC erzeugt werden könnten
- Streuung an kompaktifizierten Extra-Dimensionen
  - Kaluza-Klein Tower / Anregungen (= stehende Wellen in Extra-Dimension)

Bisher nicht beobachtet :(

- Ein fundamentales Objekt:
  - String (Saite)
  - Größe ~ Planck Länge:  $10^{-35}\text{m}$



ab ~1980 bis heute



- Können offen oder geschlossen sein
  - Angeheftet auf „Welt-Brane“
  - Schwingungsmoden entsprechen beobachtbaren Teilchen
  - Branen leben in 11 dimensionalen Raum
  - M-Theorie
- Sehr einfacher, eleganter Ansatz
    - Vereinheitlichung aller bekannten Kräfte (beinhaltet Quanten-Gravitation)
    - Unglaublich schwer zu berechnen. Bisher keine überprüfbaren Vorhersagen

# Wo ist die Antimaterie?

- Bekannte **Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie** kann beobachtete Materie im Universum nicht erklären.
- CP - Verletzung der schwachen Wechselwirkung
  - **Teilchen und Anti-Teilchen werden Leicht unterschiedlich behandelt**
  - LHCb untersucht dies (u.a.)
- **Muss Wechselwirkungen außerhalb des Standardmodells geben!**



# Wo ist die Antimaterie?

- Bekannte **Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie** kann beobachtete Materie im Universum nicht erklären.
- CP - Verletzung der schwachen Wechselwirkung
  - **Teilchen und Anti-Teilchen werden Leicht unterschiedlich behandelt**
  - LHCb untersucht dies (u.a.)
- **Muss Wechselwirkungen außerhalb des Standardmodells geben!**



- => **Wie viel Energie ist im Universum?**

Bekannte Teilchen - Antiteilchen Asymmetrie:

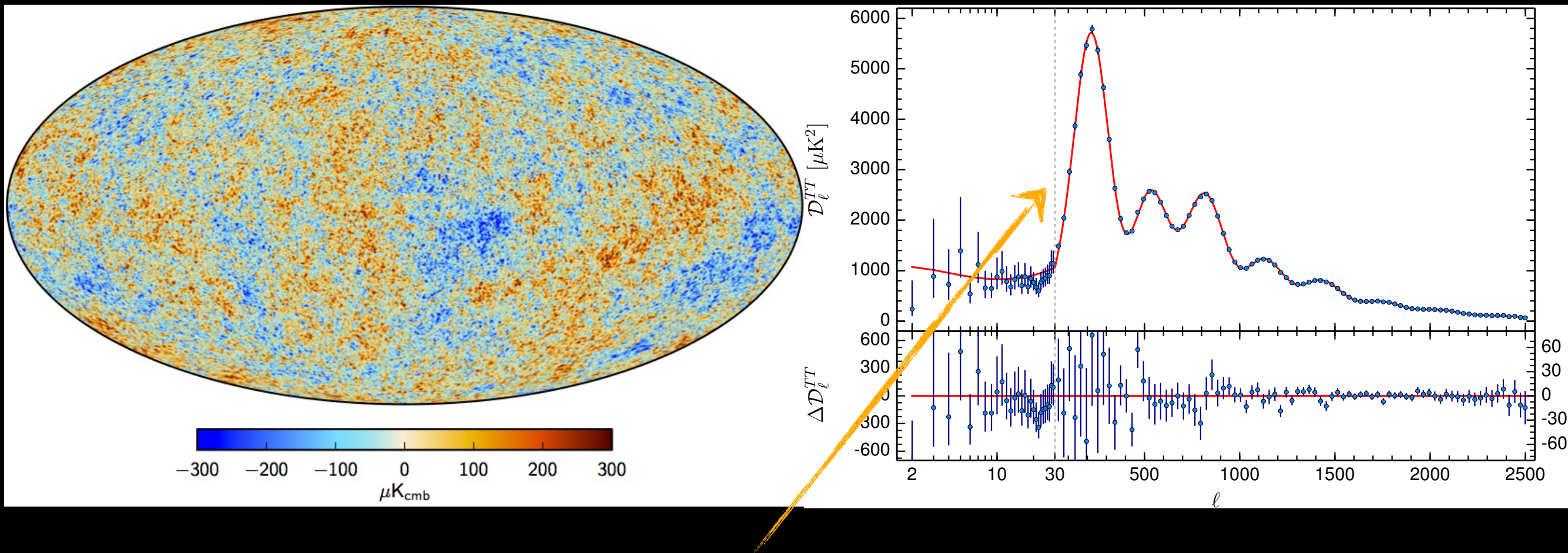
Erzeugte Menge an Materie / Antimaterie im Urknall > **totale Energiedichte**



- Beobachtungen der kosmischen Hintergrundstrahlung:

WMAP /  
Planck: 2010  
/ 2015

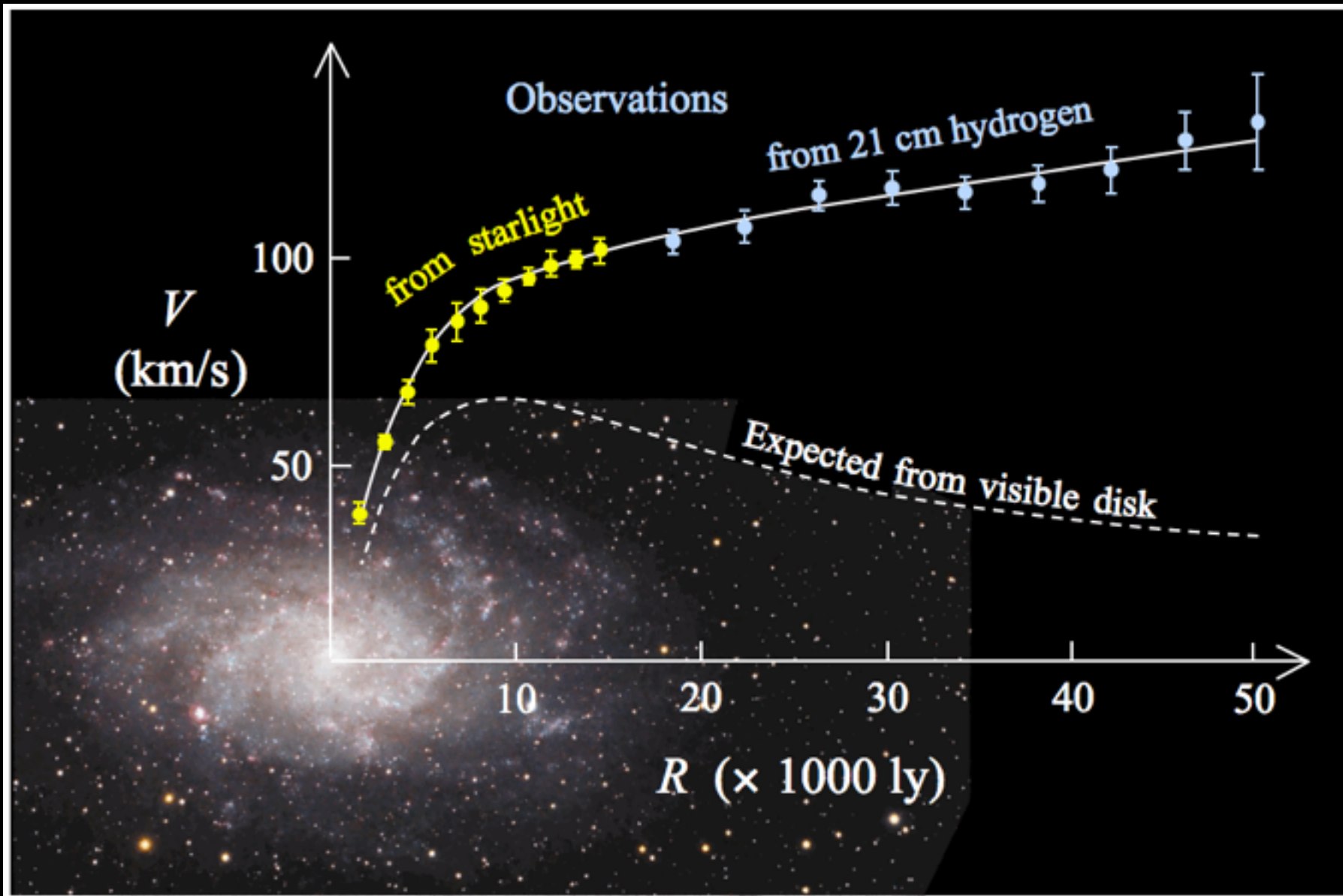
- Universum kühlt ab => Neutrale Atome => Durchsichtig
- Strahlung von diesem Zeitpunkt: Durchquert Universum, Wellenlänge durch Ausdehnung des Raums gedehnt: Röntgen → Mikrowellen



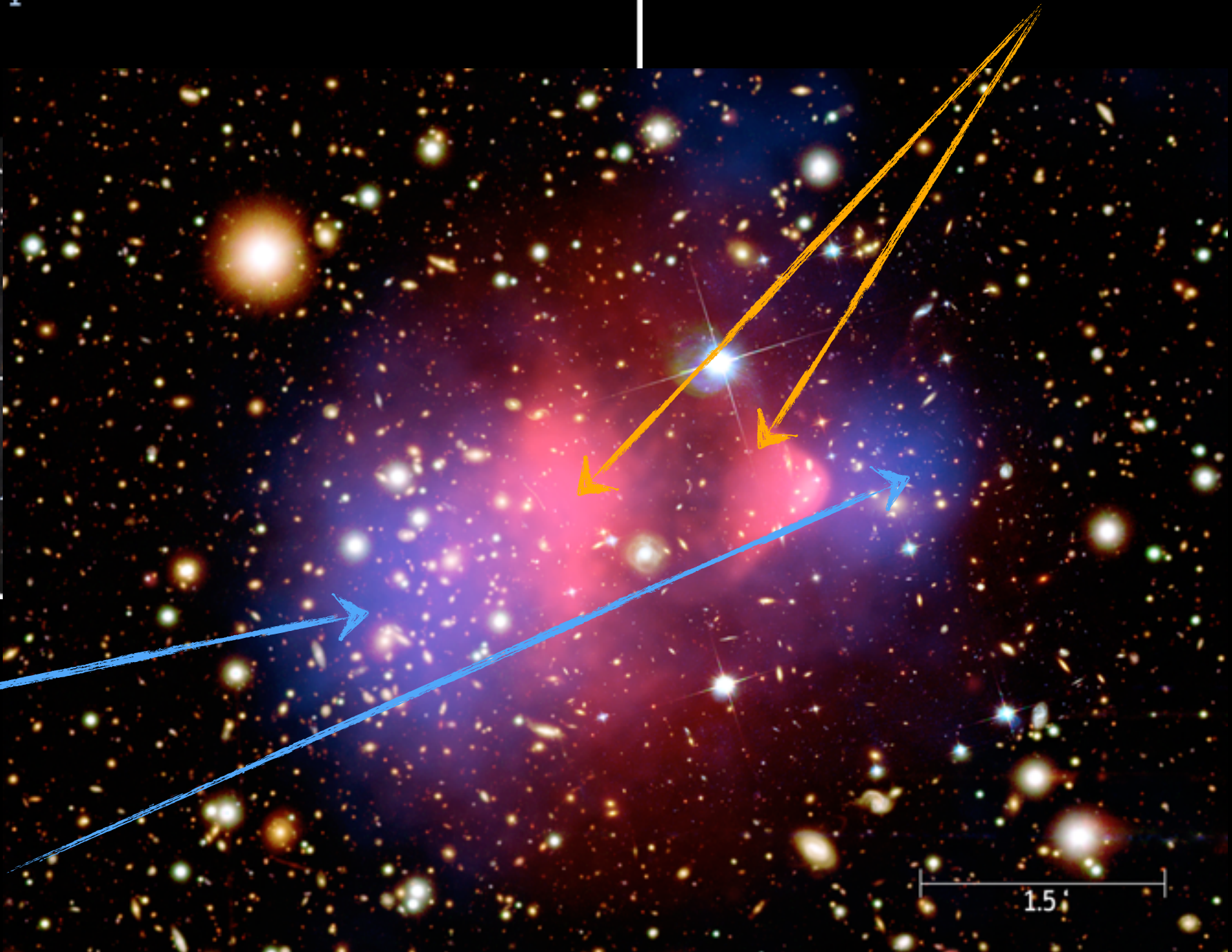
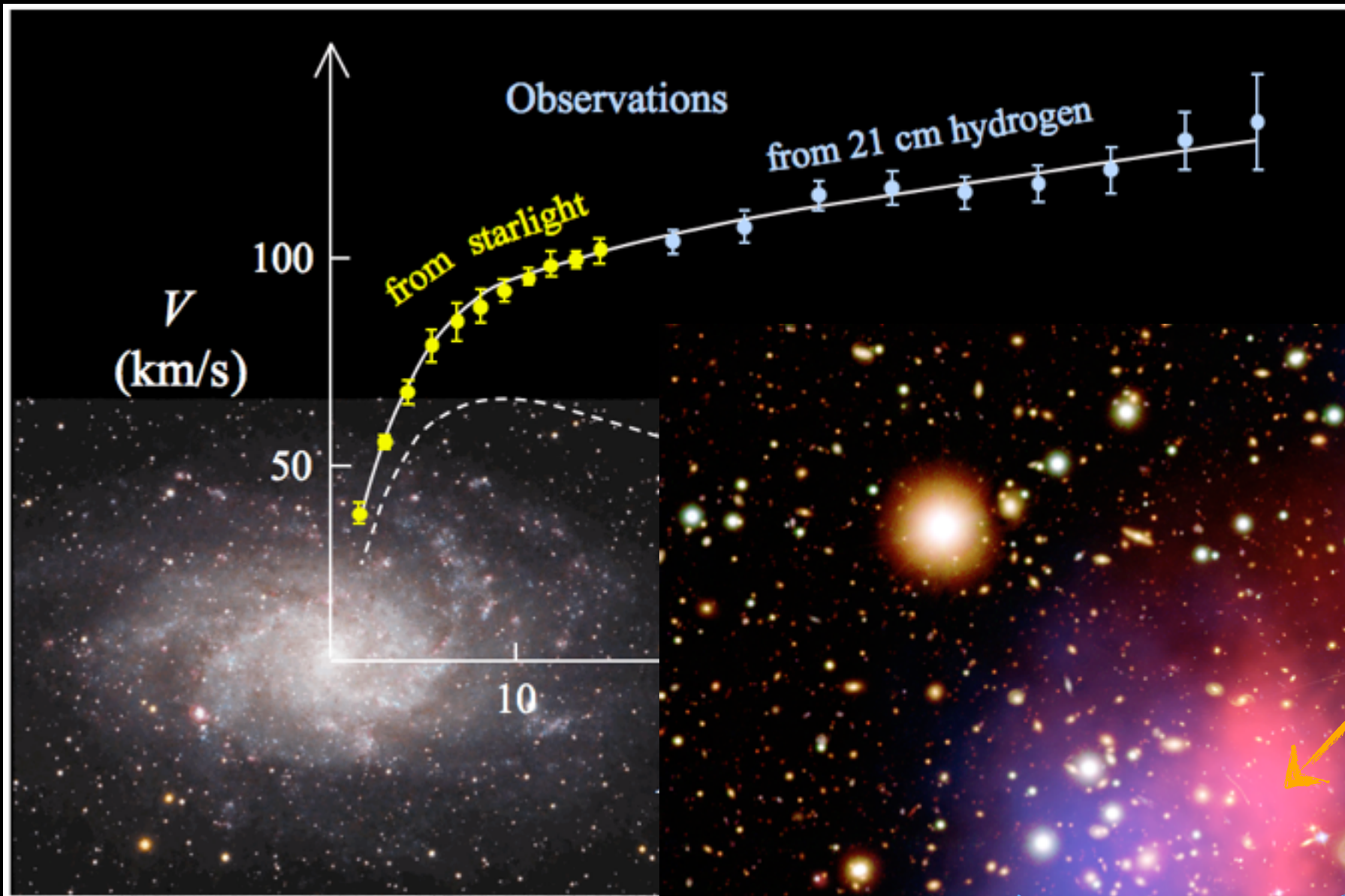
- Fit des  $\Lambda$ CDM Modells an Daten. Parameter: Baryon-Dichte, Materie-Dichte, Raumkrümmung, ....



# Apropos Dunkle Materie



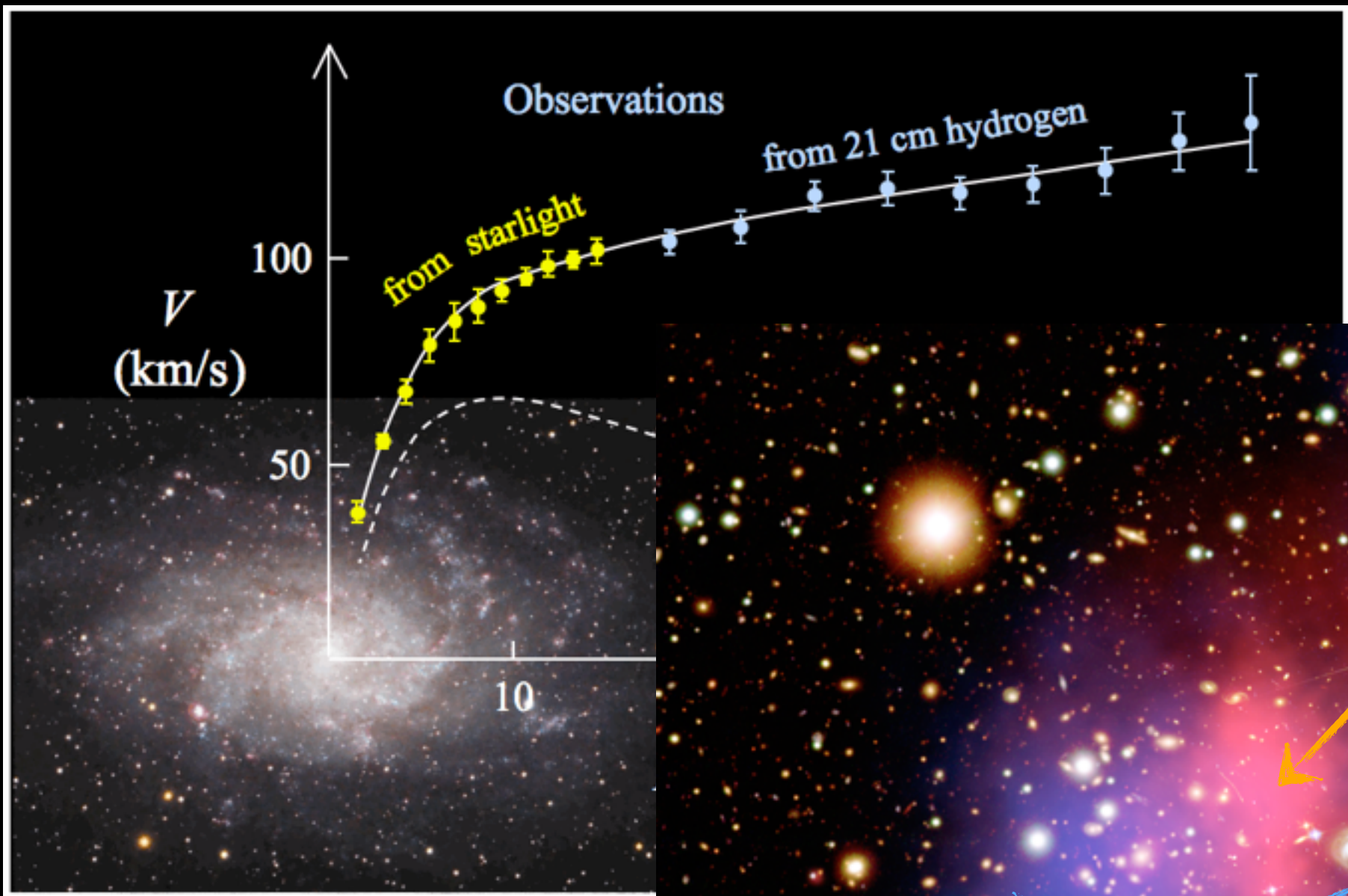
# Apropos Dunkle Materie



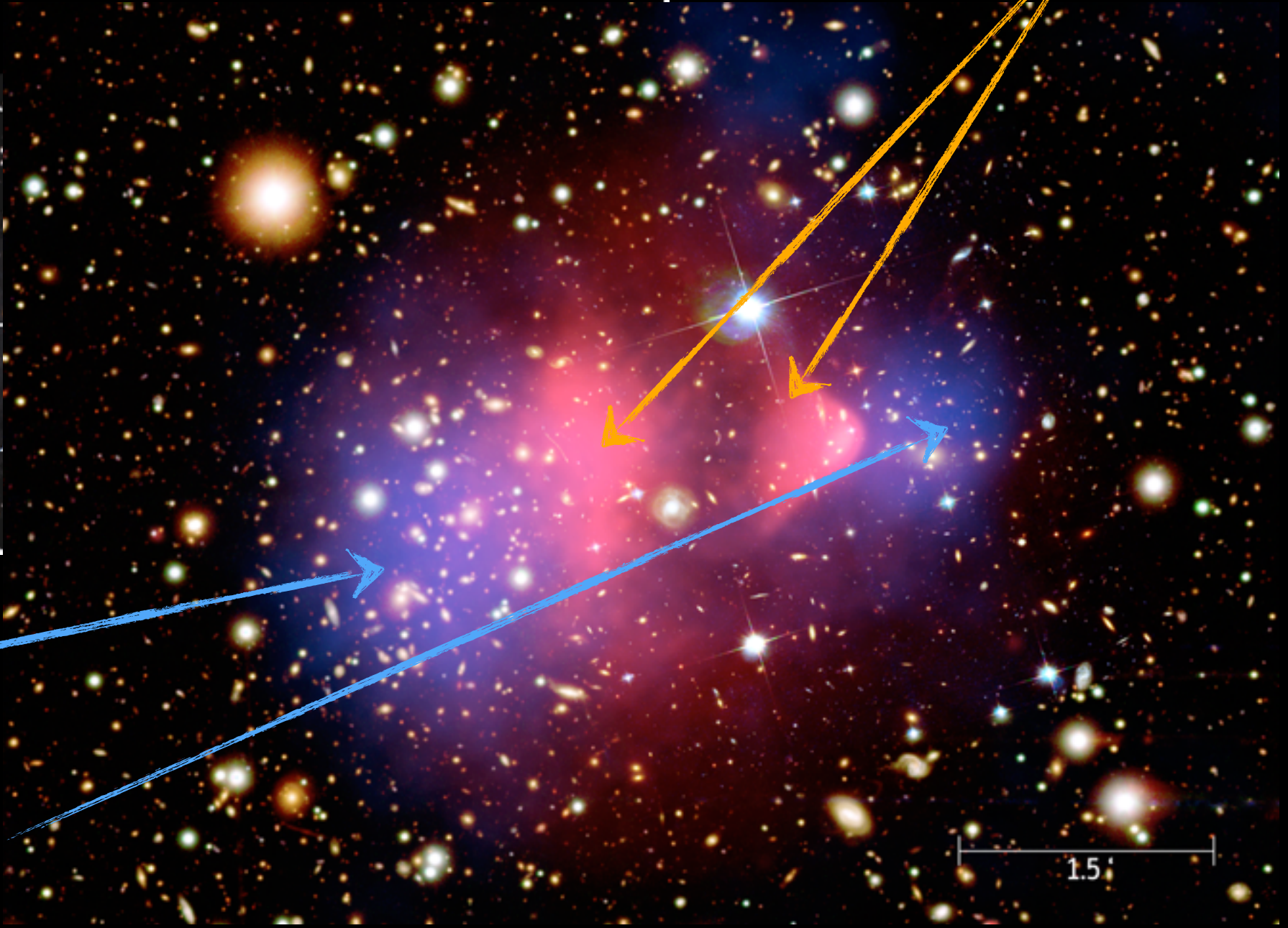
- Gravitationszentrum
- Per „Weak-Lensing“



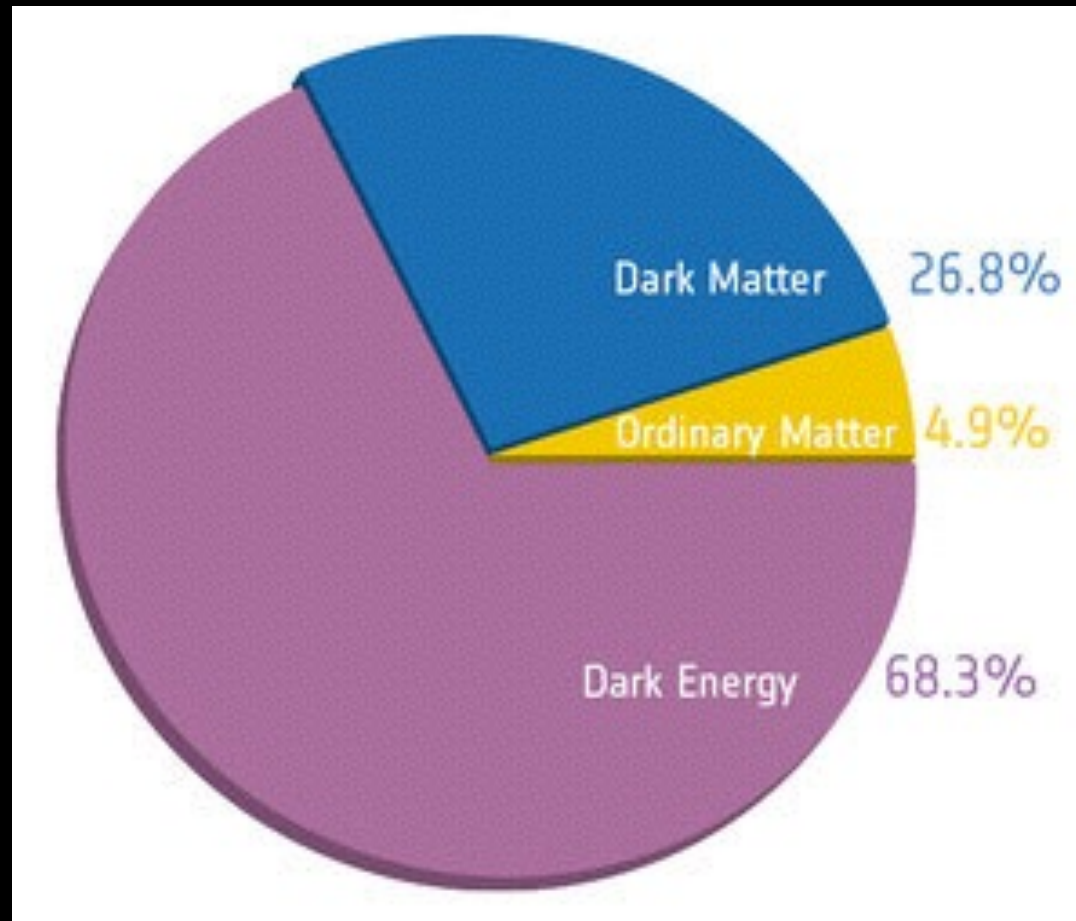
# Apropos Dunkle Materie



- X-ray Emission von heißem Gas
- höchste Baryondichte



- Gravitationszentrum
- Per „Weak-Lensing“



Dunkle Materie ?

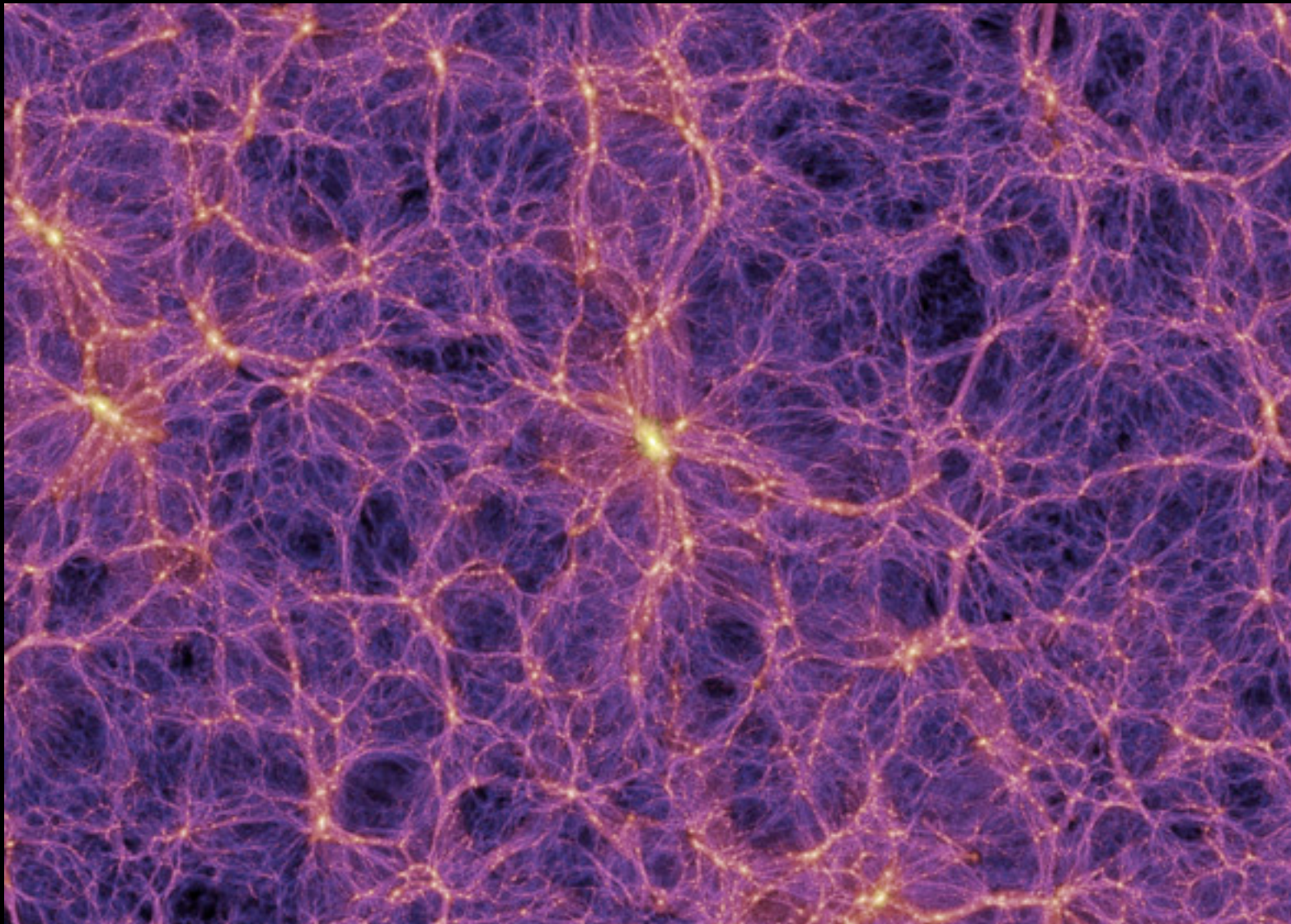
Baryonen

Dunkle Energie ???

- Mehrere Kandidaten + Erweiterungen des SM zur Beschreibung DM



- Eigenschaften:
  - Massiv (Gravitation)
  - Wechselwirken schwach



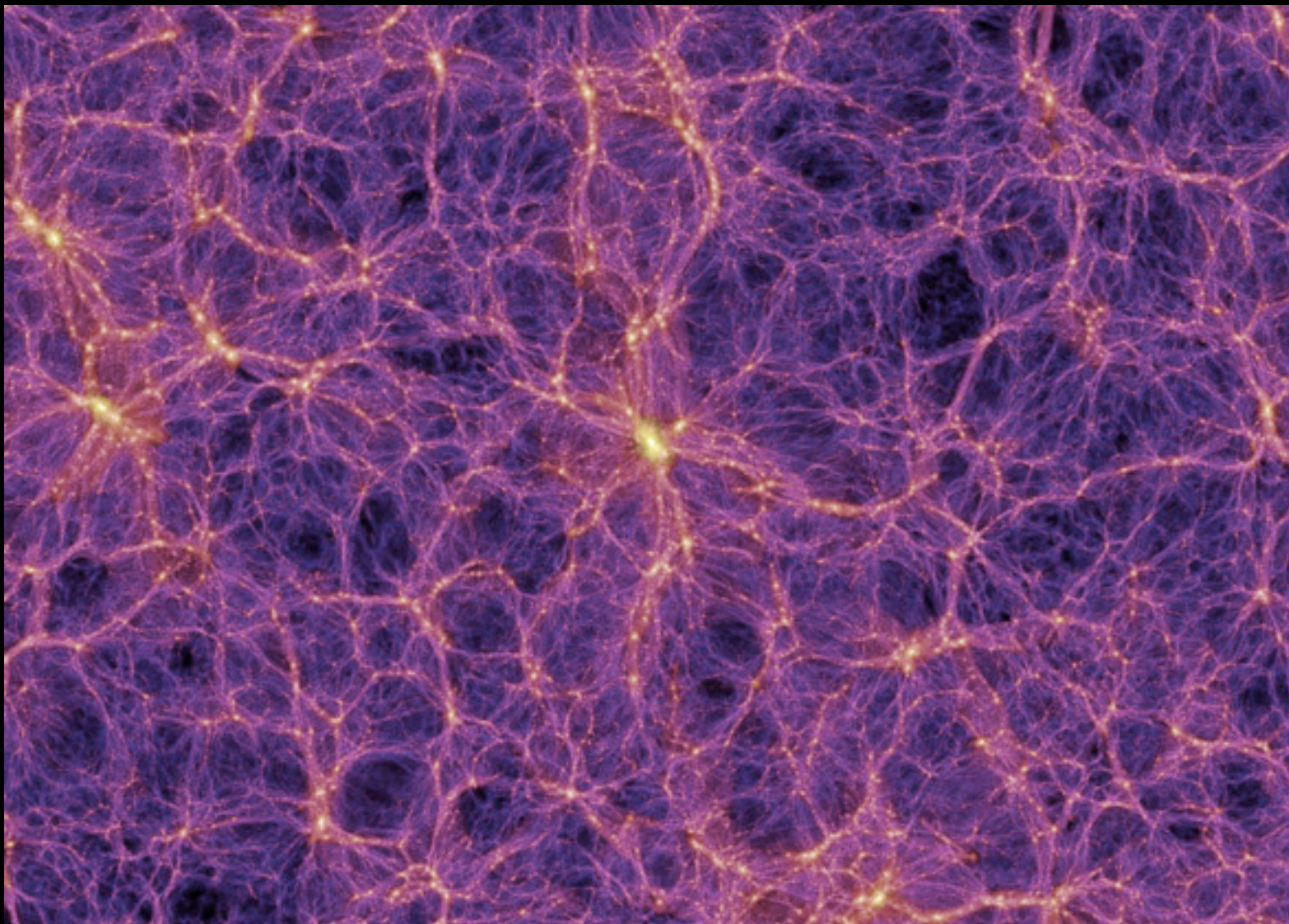


- Eigenschaften:

- Massiv (Gravitation)

→ Neutrinos?

- Wechselwirken schwach

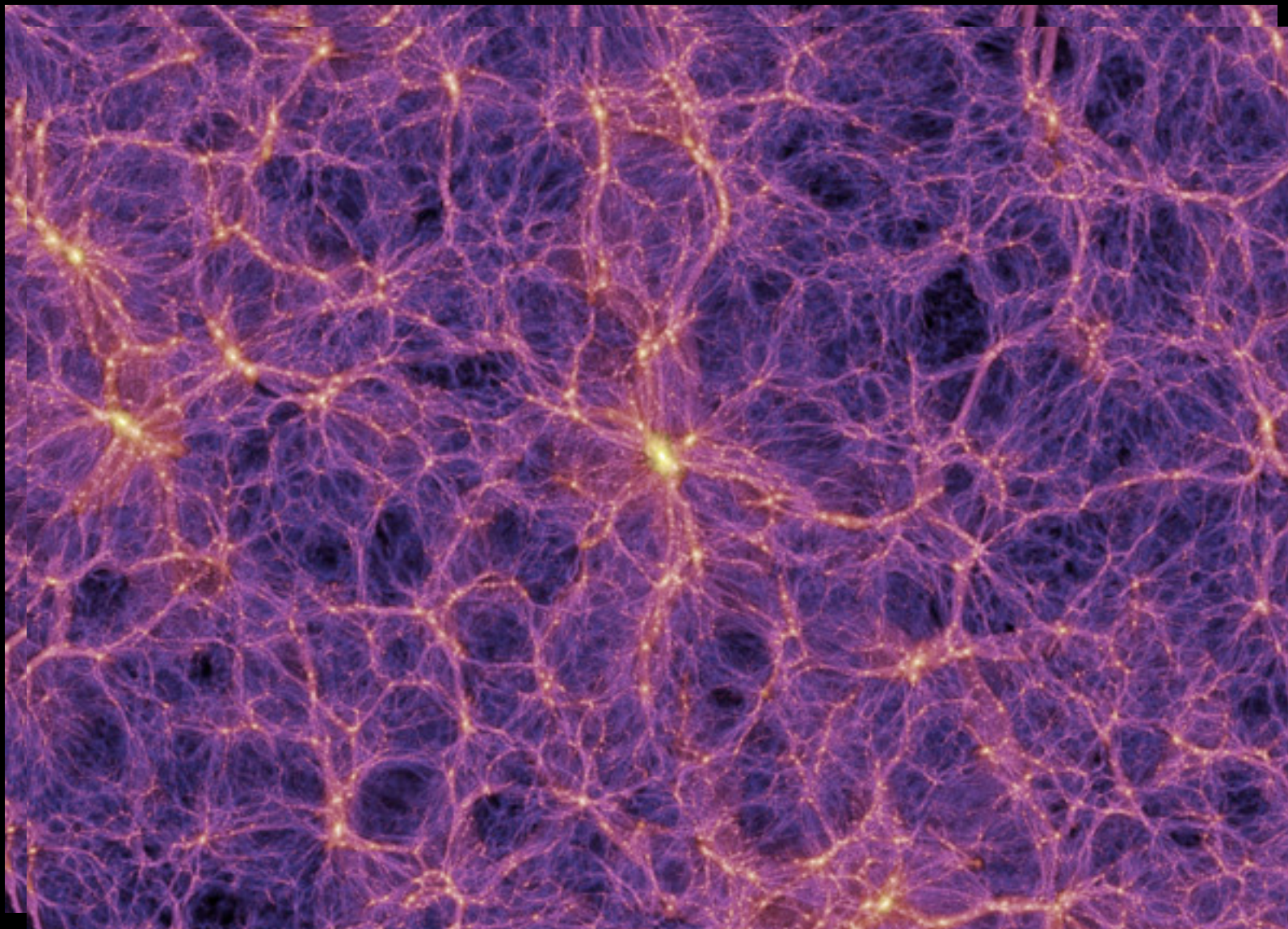




- Eigenschaften:
  - Massiv (Gravitation)
  - Wechselwirken schwach

→ Neutrinos?

**Nein!** Nur nicht-relativistische Teilchen tragen zur Strukturbildung bei!



- Eigenschaften:

- Massiv (Gravitation)
- Wechselwirken schwach
- ~Nichtrelativistisch
  - Ansätze mit ‚heißer‘ dunkler Materie existieren

- Kandidatenliste:

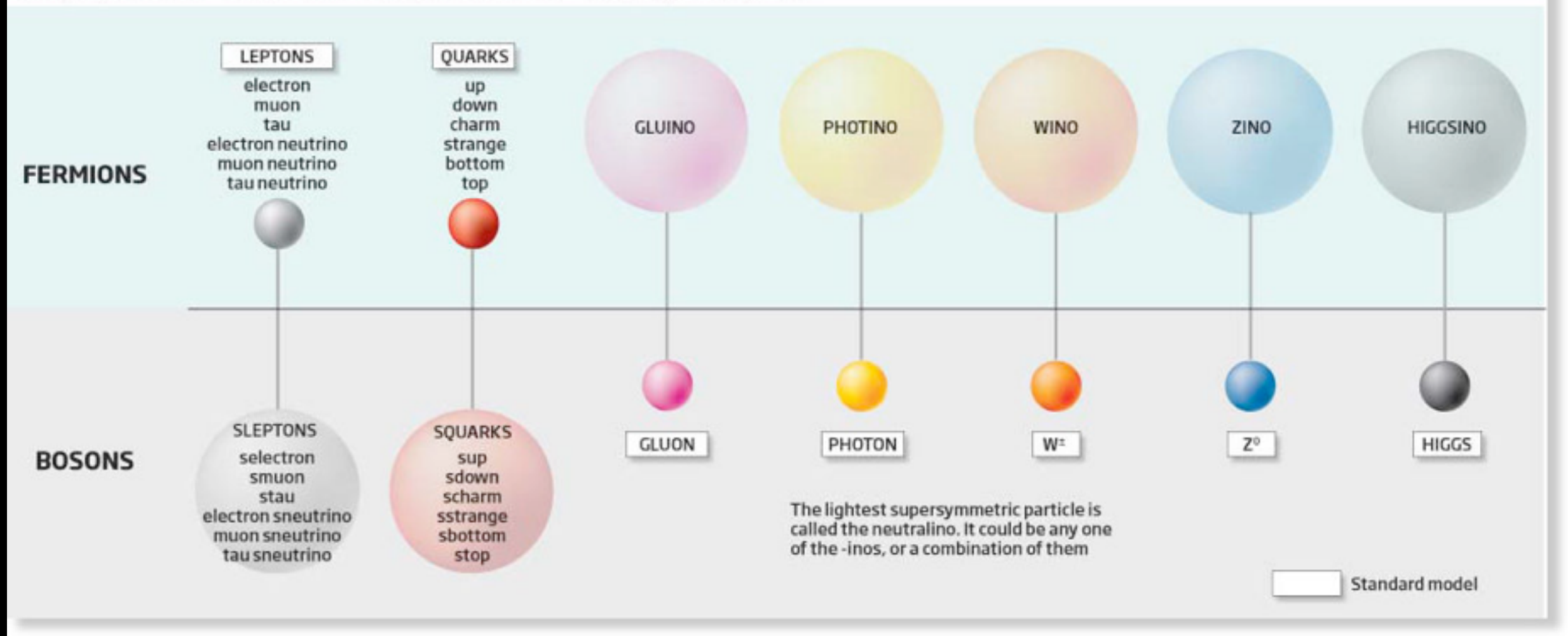
- **WIMPs** (Lightest Supersymmetric Particle?)
- **Axionen**
- Sterile Neutrinos

- **Neue Symmetrie:**
  - Jedem Boson ( $S=0,1$ ) wird ein neues Fermion ( $S=1/2$ ) zugeordnet, und umgekehrt

## Particle zoo

©NewScientist

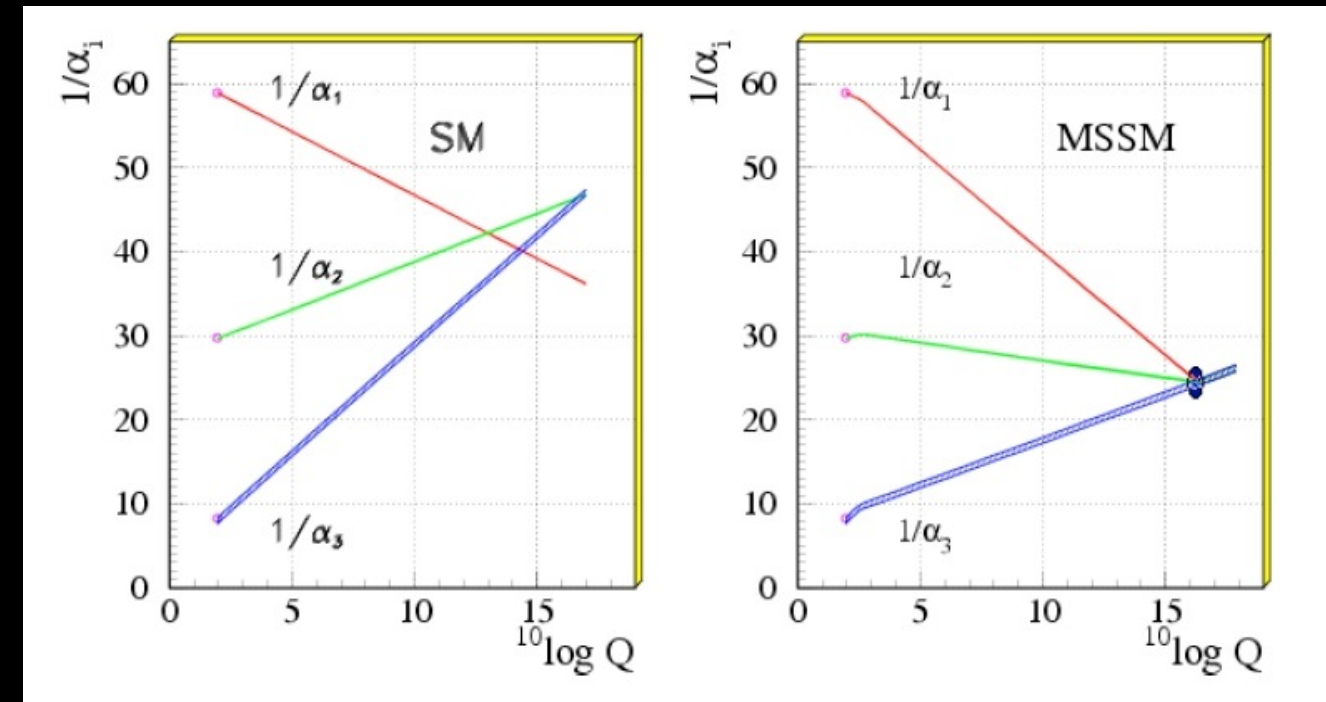
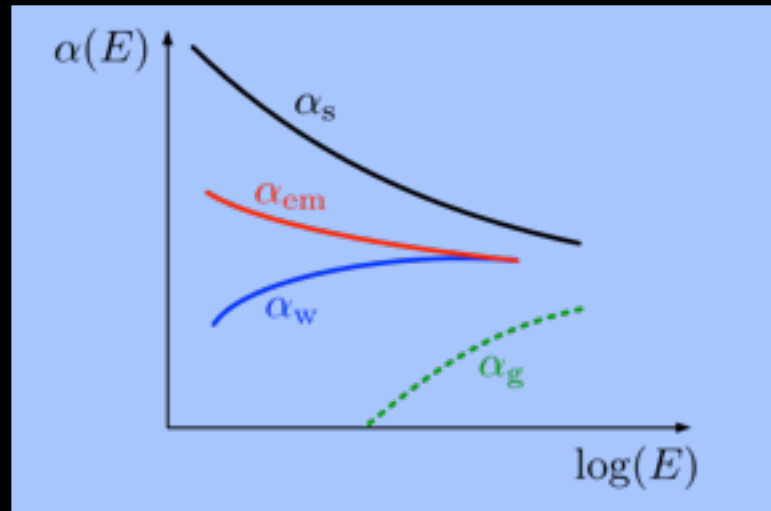
Particles are divided into two families called bosons and fermions. Among them are groups known as leptons, quarks and force-carrying particles like the photon. Supersymmetry doubles the number of particles, giving each fermion a massive boson as a super-partner and vice versa. The LHC is expected to find the first supersymmetric particle



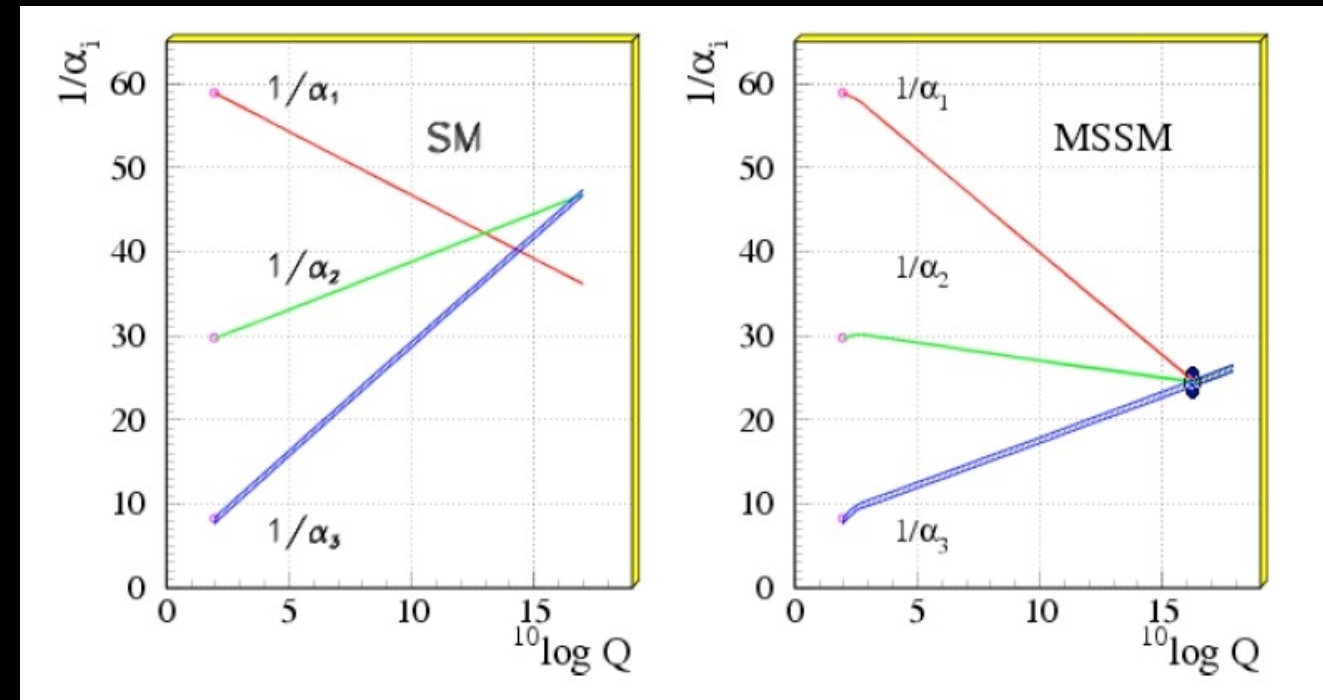
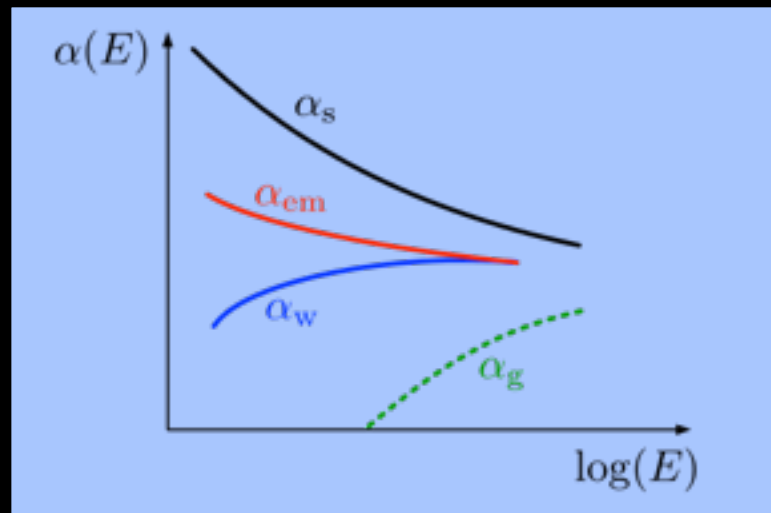


# Supersymmetrie

- „Komplettiert“ SM → alle Symmetrien ausgeschöpft
- Neue Teilchen beeinflussen das „Laufen“ der Kopplungen
  - Große Vereinheitlichung möglich

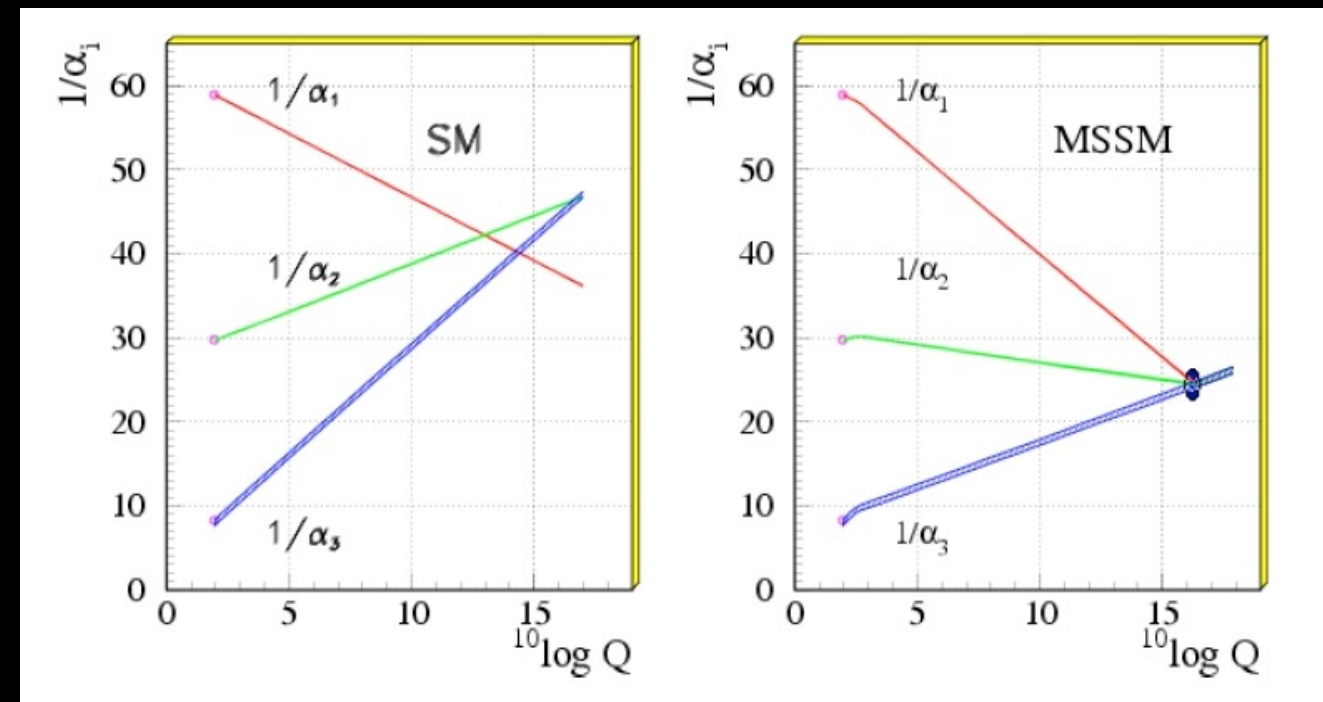
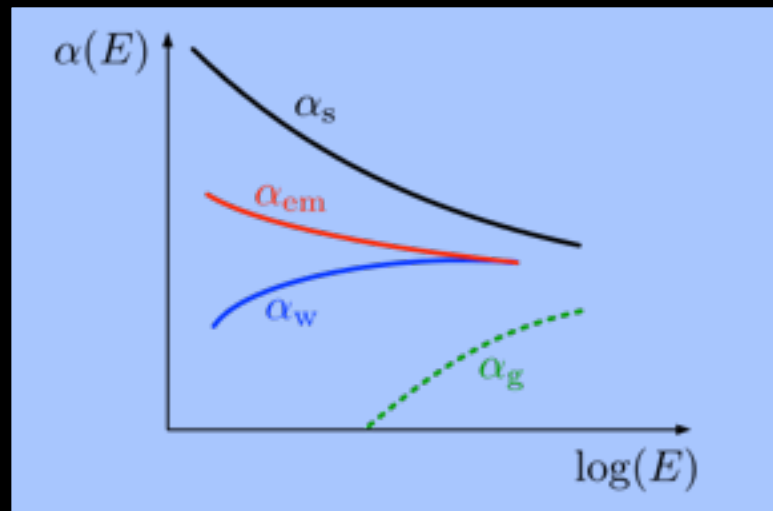


- „Komplettiert“ SM → alle Symmetrien ausgeschöpft
  - Neue Teilchen beeinflussen das „Laufen“ der Kopplungen
    - Große Vereinheitlichung möglich



- Neue Erhaltungsgröße: R-Parität (+1 für Teilchen, -1 für Superpartner)
  - Leichtestes Supersymmetrisches Teilchen kann nicht zerfallen!
  - Kandidat für Dunkle Materie

- „Komplettiert“ SM → alle Symmetrien ausgeschöpft
- Neue Teilchen beeinflussen das „Laufen“ der Kopplungen
  - Große Vereinheitlichung möglich



- Neue Erhaltungsgröße: R-Parität (+1 für Teilchen, -1 für Superpartner)
  - Leichtestes Supersymmetrisches Teilchen kann nicht zerfallen!
  - Kandidat für Dunkle Materie

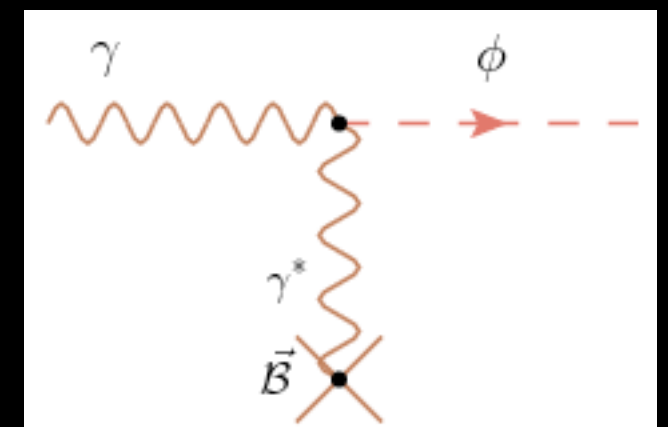
- Parameterraum für Supersymmetrie riesig
  - Parameter bestimmen Teilchenmasse, sind (fast) beliebig
  - Nicht ausschließbar



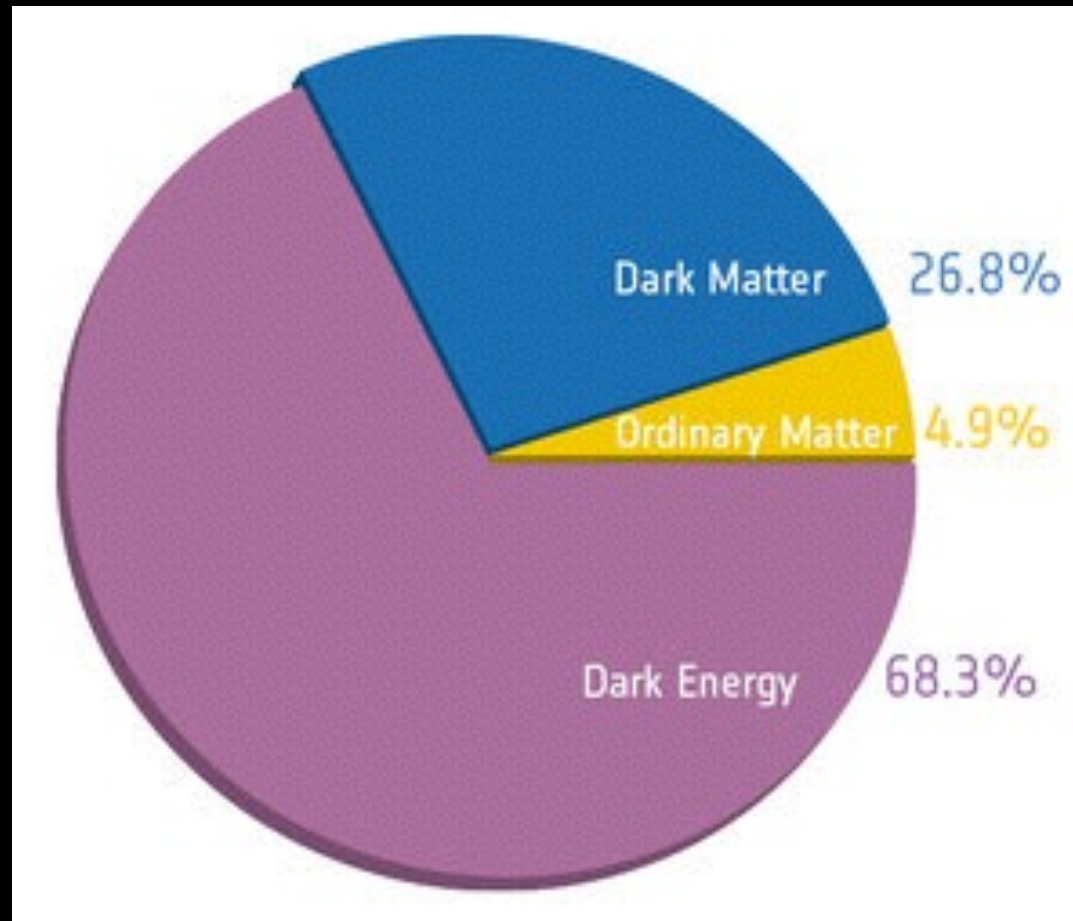
- Lösen das „starke CP Problem“
- QCD erlaubt CP verletzende Reaktionen. Stärke beschrieben durch Parameter  $\theta$ 
  - CP Verletzung  $\rightarrow$  Elektrisches Dipolmoment des Neutron
  - Experimentell:  $\text{EDM}(n) < 10^{-25} \text{ e}\cdot\text{cm}$ 
    - Wieso? **Erscheint nicht „natürlich“** (fine tuning)

- Lösen das „starke CP Problem“
- QCD erlaubt CP verletzende Reaktionen. Stärke beschrieben durch Parameter  $\theta$ 
  - CP Verletzung  $\rightarrow$  Elektrisches Dipolmoment des Neutron
  - Experimentell:  $EDM(n) < 10^{-25} \text{ e}\cdot\text{cm}$ 
    - Wieso? **Erscheint nicht „natürlich“** (fine tuning)
- Einführung eines weiteren komplexen, skalaren Feldes
  - Mit dazugehöriger **Symmetrie**, die **spontan gebrochen** ist (Analog zum Higgs Mechanismus)
  - $\theta$  wird ‚dynamisch‘ exakt 0
  - Neues, massives Teilchen: **Axion**
    - Kandidat für dunkle Materie

Peccei, Quinn:  
1977



Primakov Effekt



Dunkle Materie ?

Baryonen

Dunkle Energie ???

- Dunkle Energie ist völlig unerklärt
  - Zusammenhang mit Inflation?
  - Vakuumfluktuationen?
  - Quintessenz ?

- Gravitation lässt sich nicht innerhalb des SM beschreiben
  - Wieso ist Gravitation so schwach?
- Wieso gibt es keine Antimaterie im Universum?
- Der Dunkle Sektor? (Dunkle Materie, Dunkle Energie)
- Was ist die Natur der Neutrinos?
- Wieso gibt es 3 Familien?
- Wieso haben Teilchen unterschiedliche Masse?
- 
- 

[https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_unsolved\\_problems\\_in\\_physics](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_unsolved_problems_in_physics)

The End



- [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](http://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

# 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:
  - $\alpha, \beta, \gamma$  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 beobachten 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>