



# Teilchenphysik

Lehrerprogramm - Oktober 2016

European Organisation for Nuclear Research

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



**Kristof Schmieden**  
*EP Department*

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

- 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

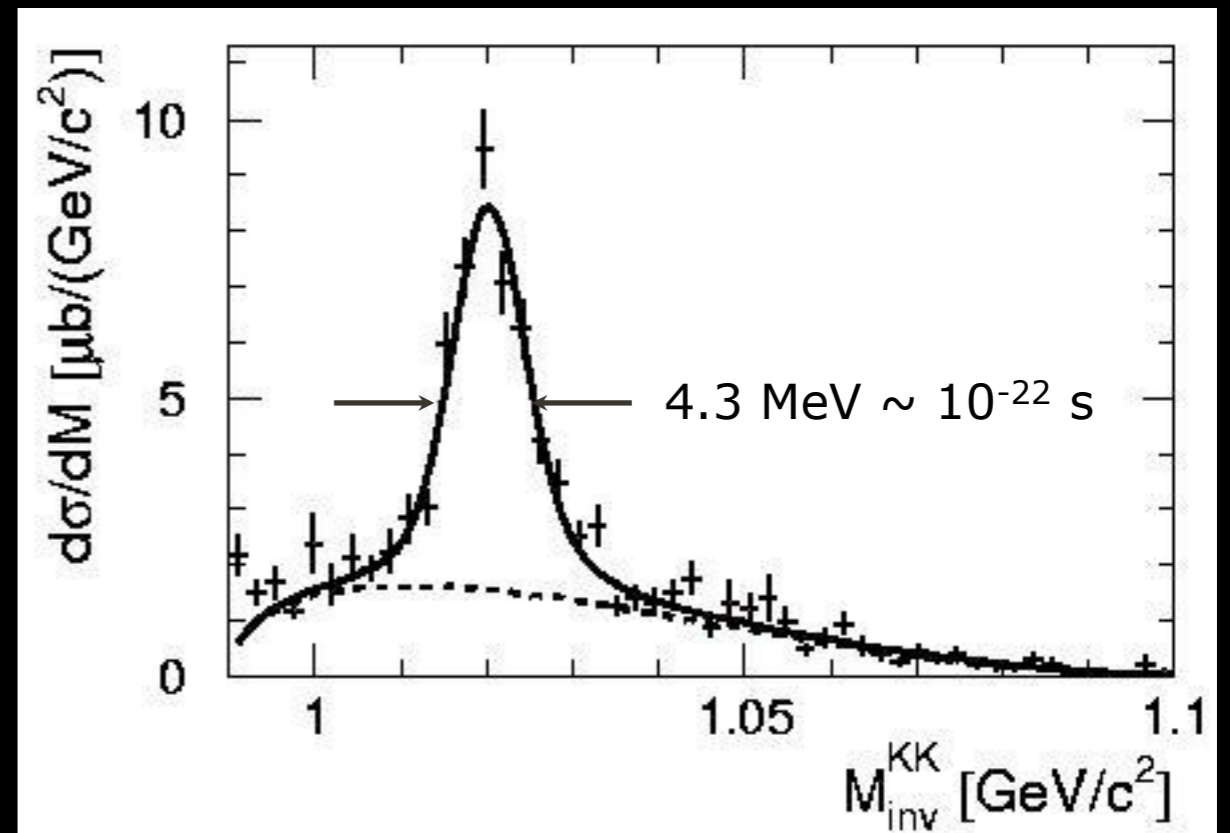
- invariante Masse M:

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

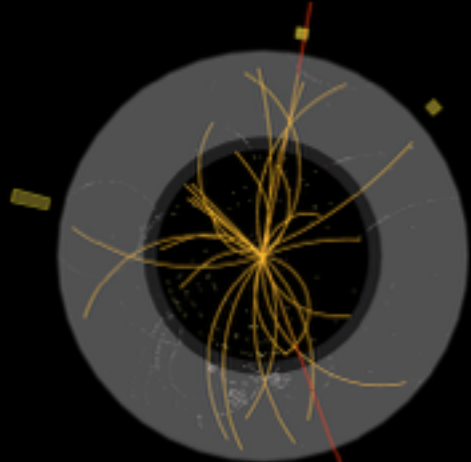
$$(mc^2)^2 = E^2 - \vec{p}^2 c^2$$

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

bleibt in Umwandlung erhalten!

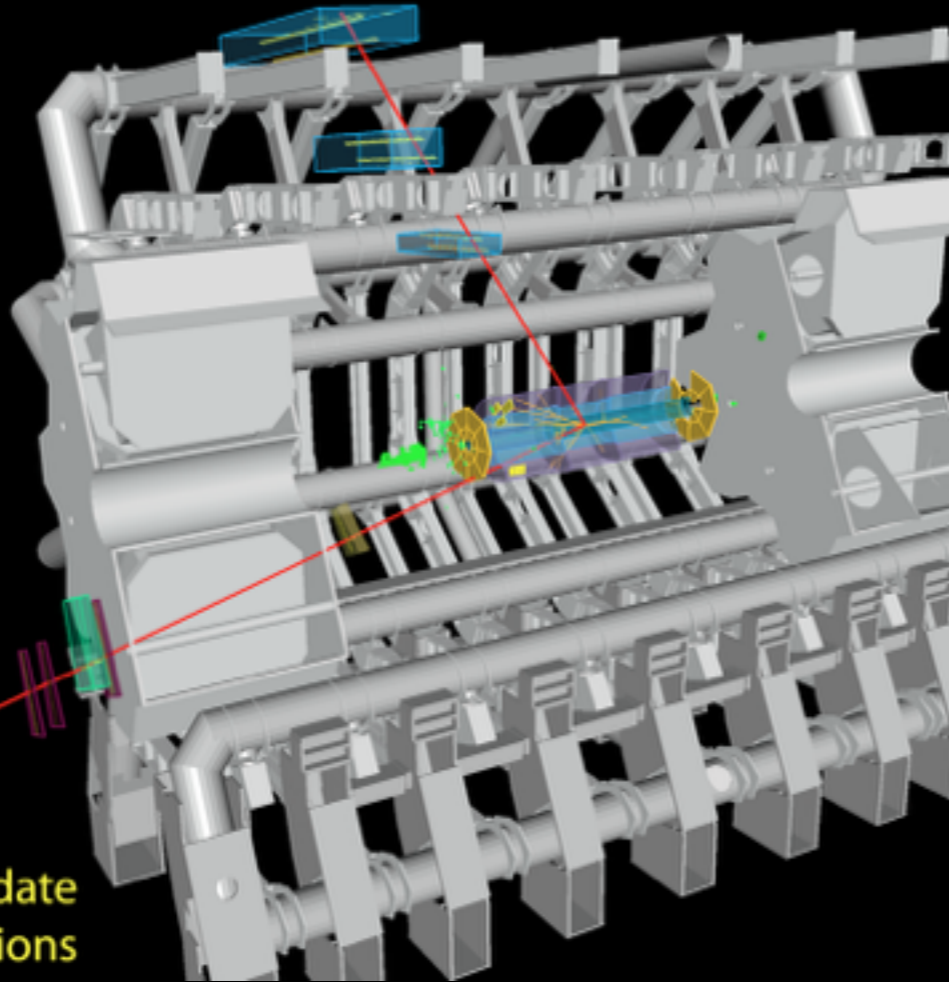


**ATLAS**  
EXPERIMENT  
Run: 154822, Event: 14321500  
Date: 2010-05-10 02:07:22 CEST



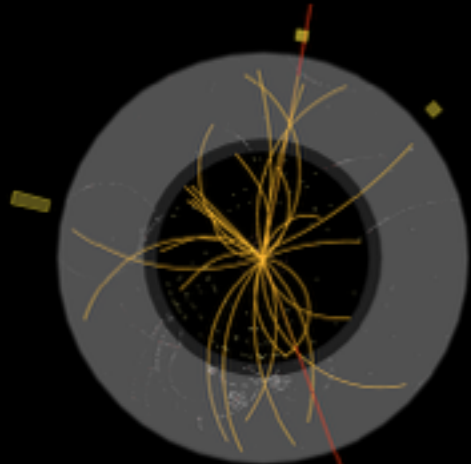
$p_T(\mu^-) = 27 \text{ GeV}$   $\eta(\mu^-) = 0.7$   
 $p_T(\mu^+) = 45 \text{ GeV}$   $\eta(\mu^+) = 2.2$   
 $M_{\mu\mu} = 87 \text{ GeV}$

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



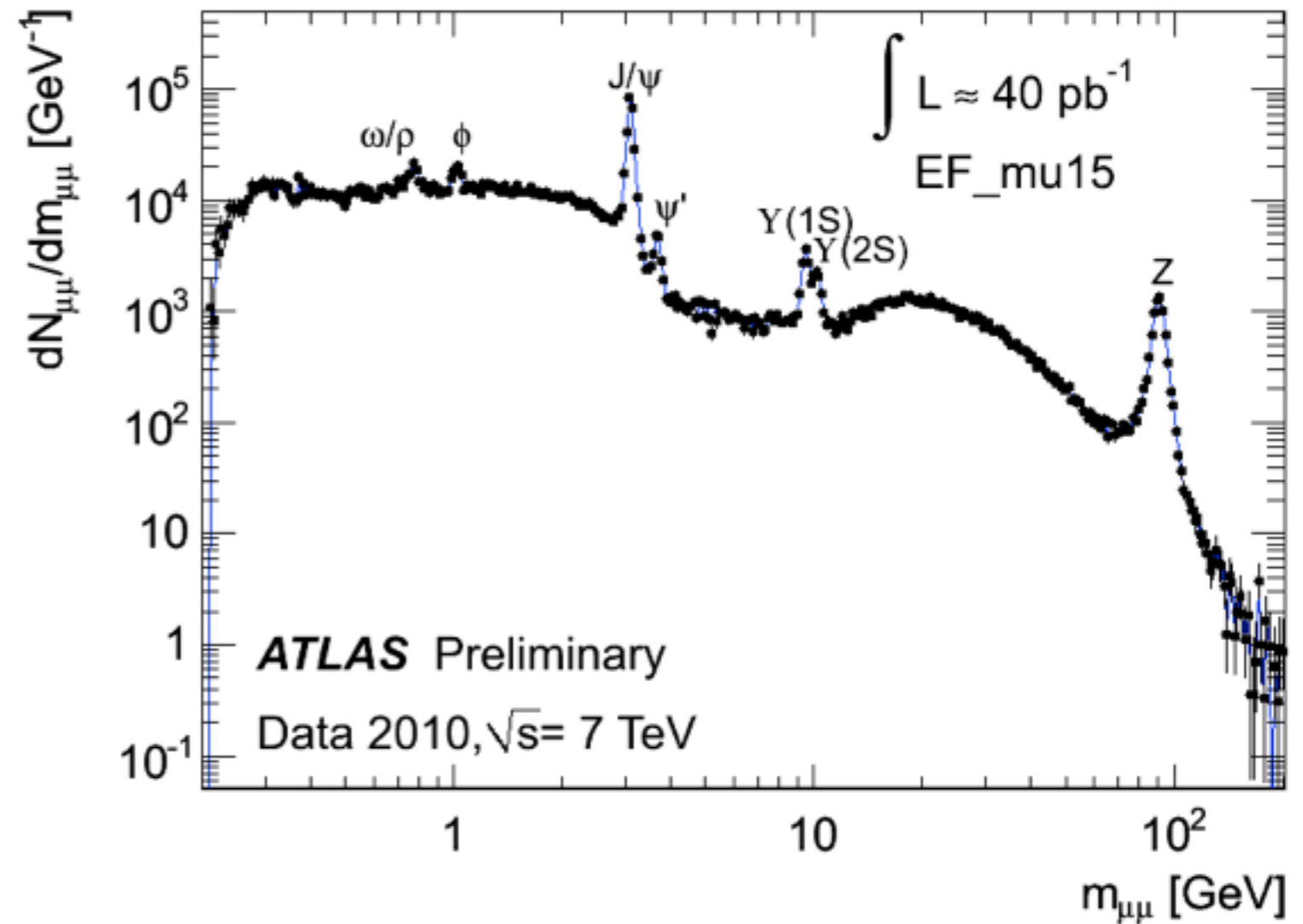
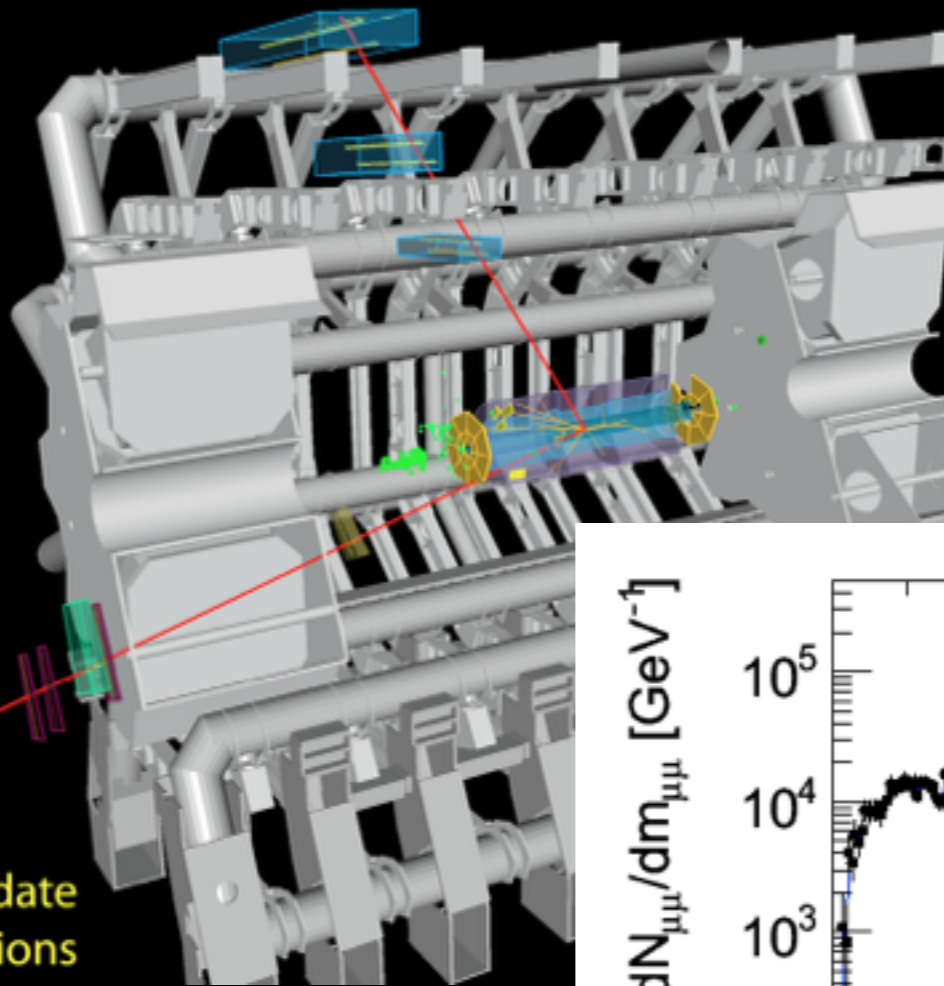
**ATLAS**  
EXPERIMENT

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**

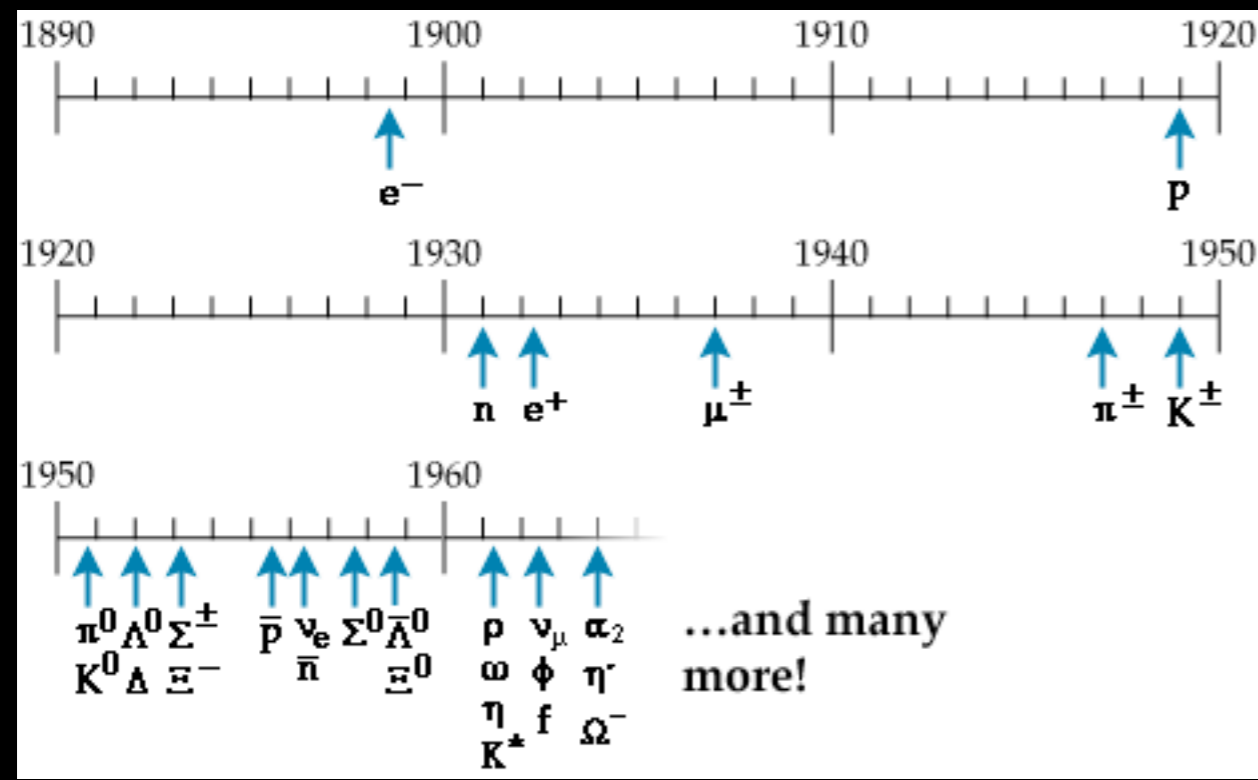


# Wer sucht - der findet ... mehr als gewollt



- 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

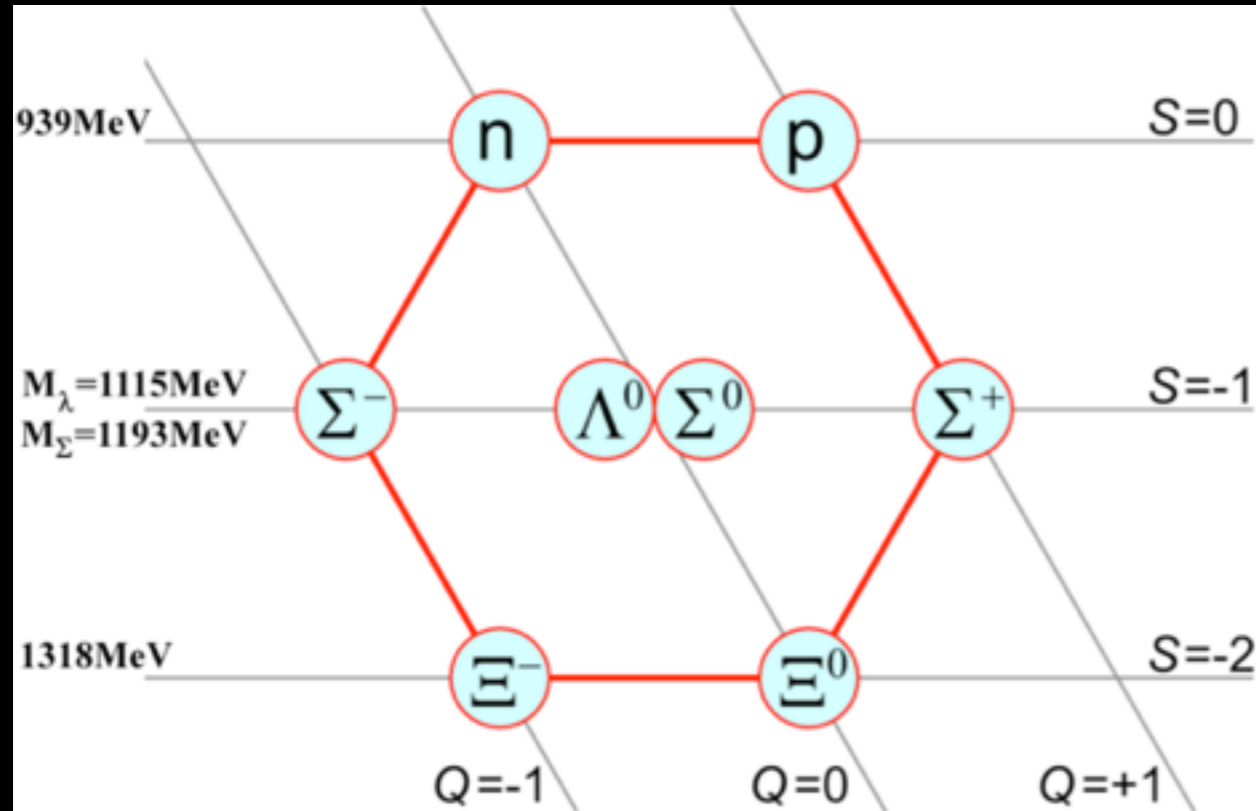
$\pi^\pm$  (139.6),  $\pi^0$  (135.0),  $\eta$  (547.9),  $\sigma$  (400-550),  $\rho$  (770),  $\omega$  (782.7),  $\eta'$  (957.8),  $f_0$  (990),  $a_0$  (980),  $\phi$  (1019),  $h_1$  (1170),  $b_1$  (1229),  $a_1$  (1230),  $f_2$  (1275),  $f_1$  (1282),  $\eta$  (1295),  $\pi$  (1300),  $a_2$  (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?

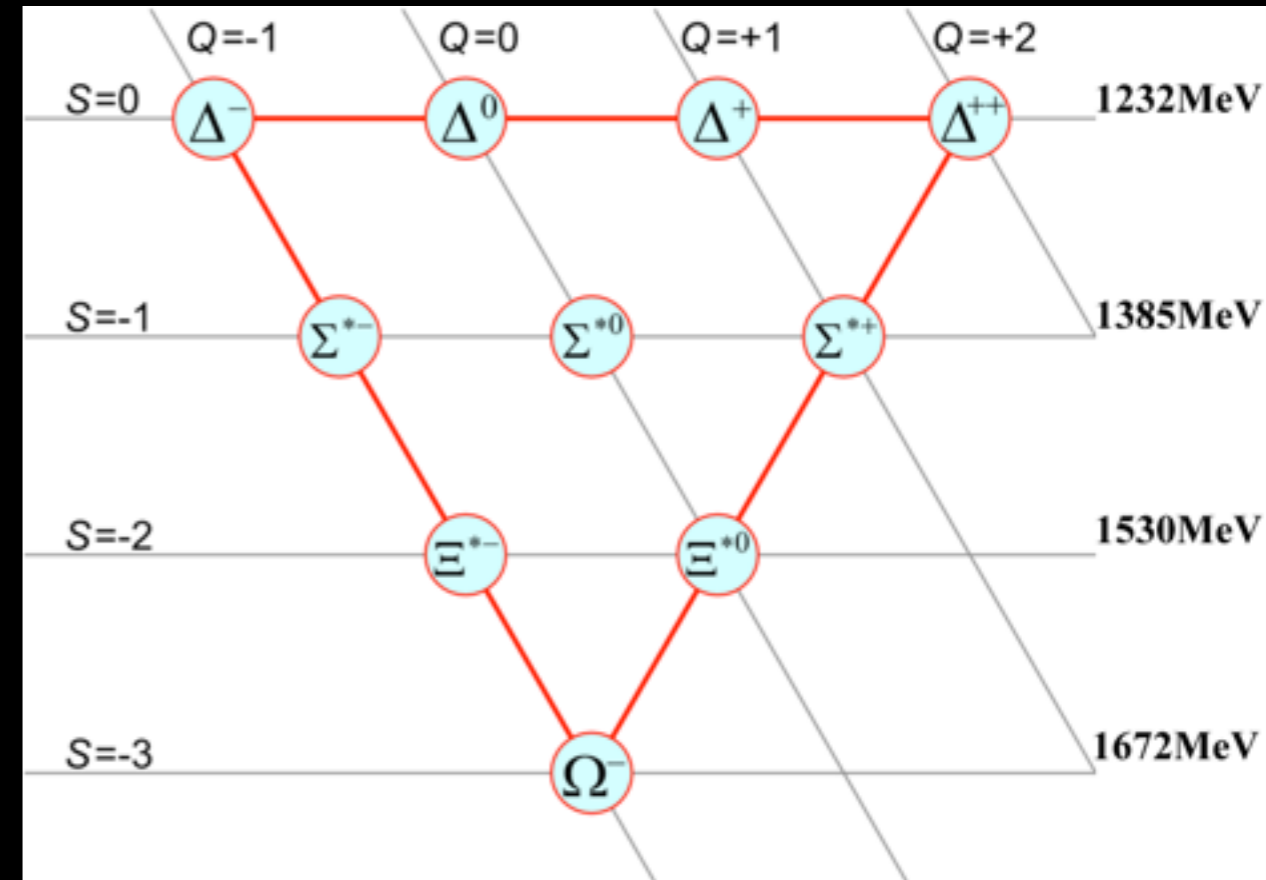
# Hadron - Multiplets

- Suche Nach Strukturen:

Spin = 1/2



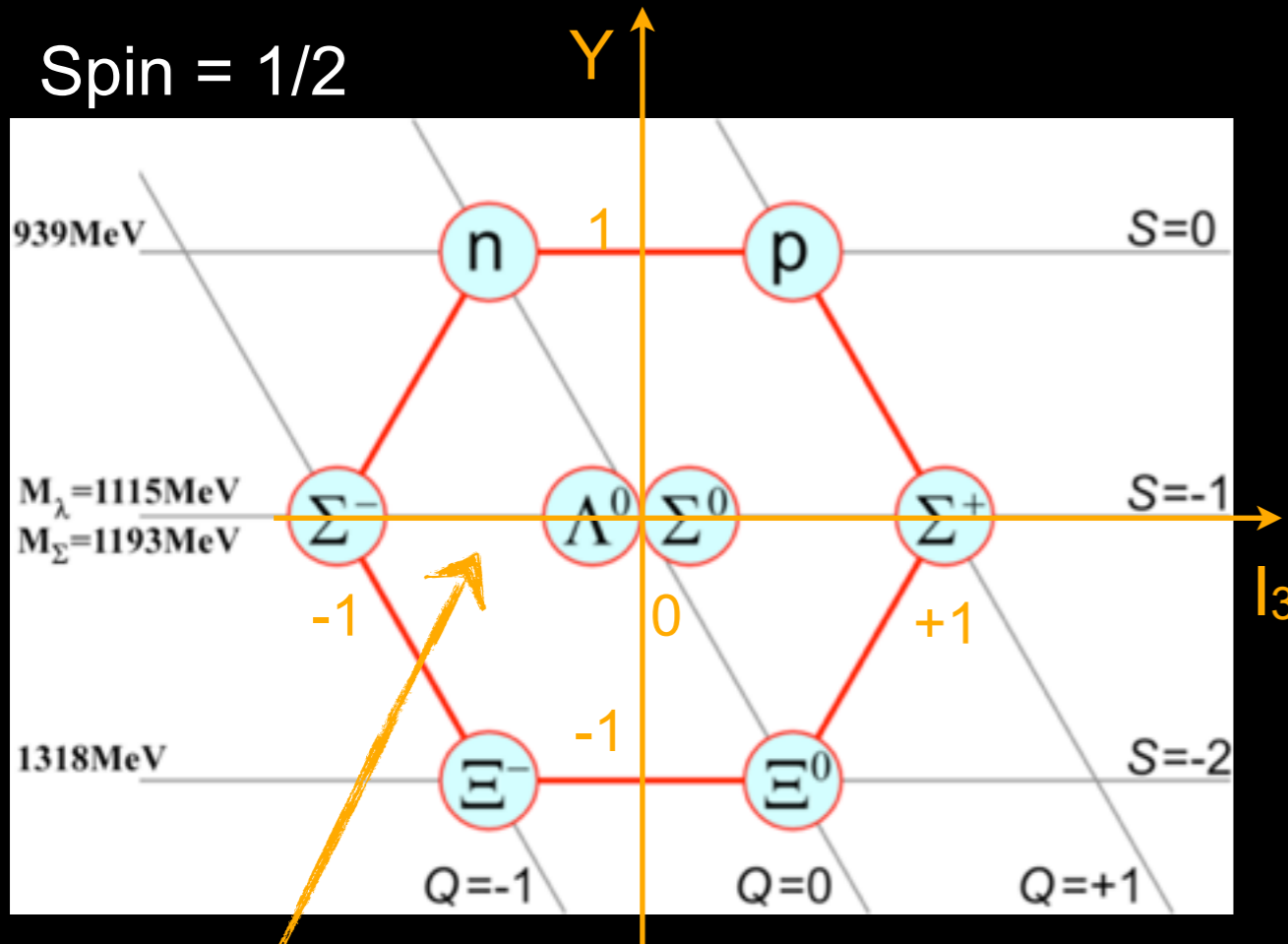
Spin = 3/2



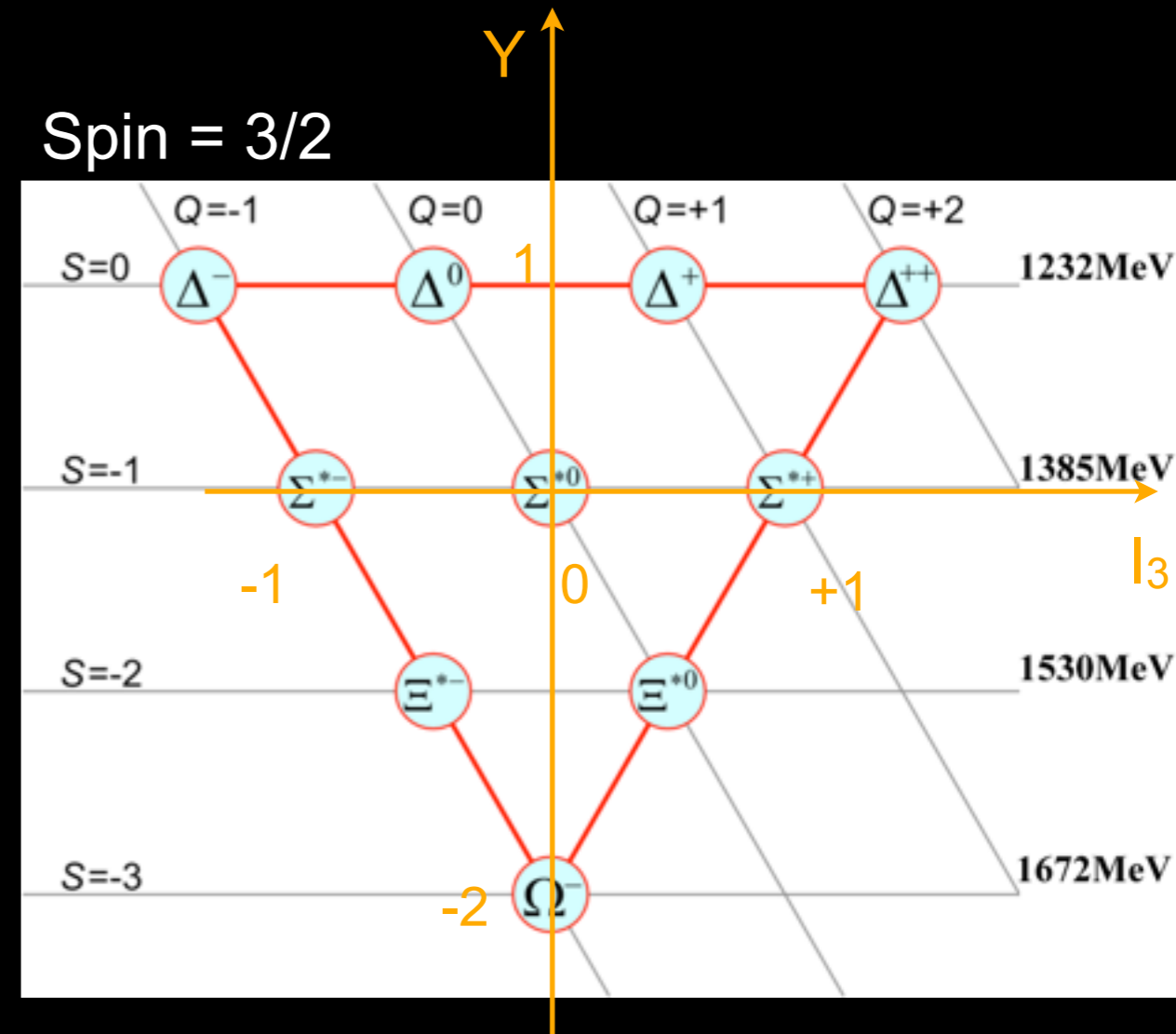
# Hadron - Multiplets

- Suche Nach Strukturen:

Spin = 1/2



Spin = 3/2



## Isospin:

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

Formal analog zum Spin

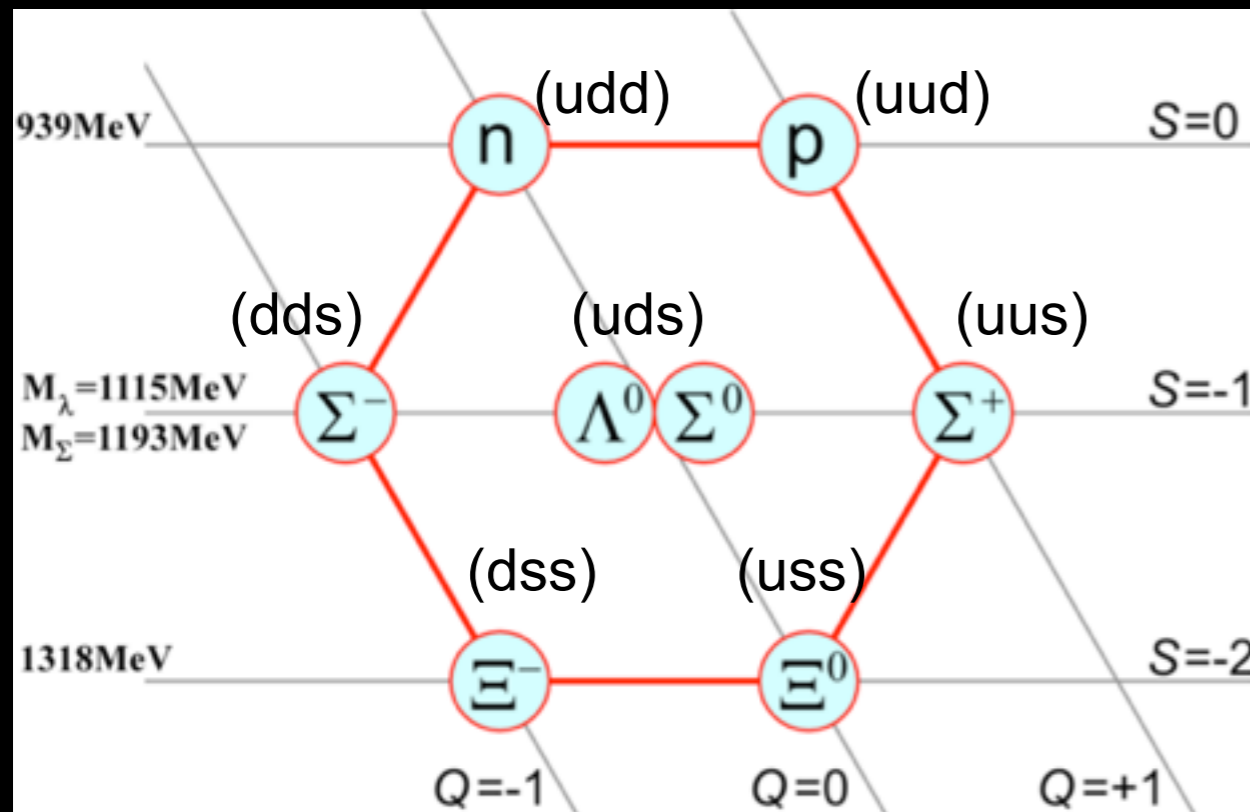


# Ordnung durch innere Struktur

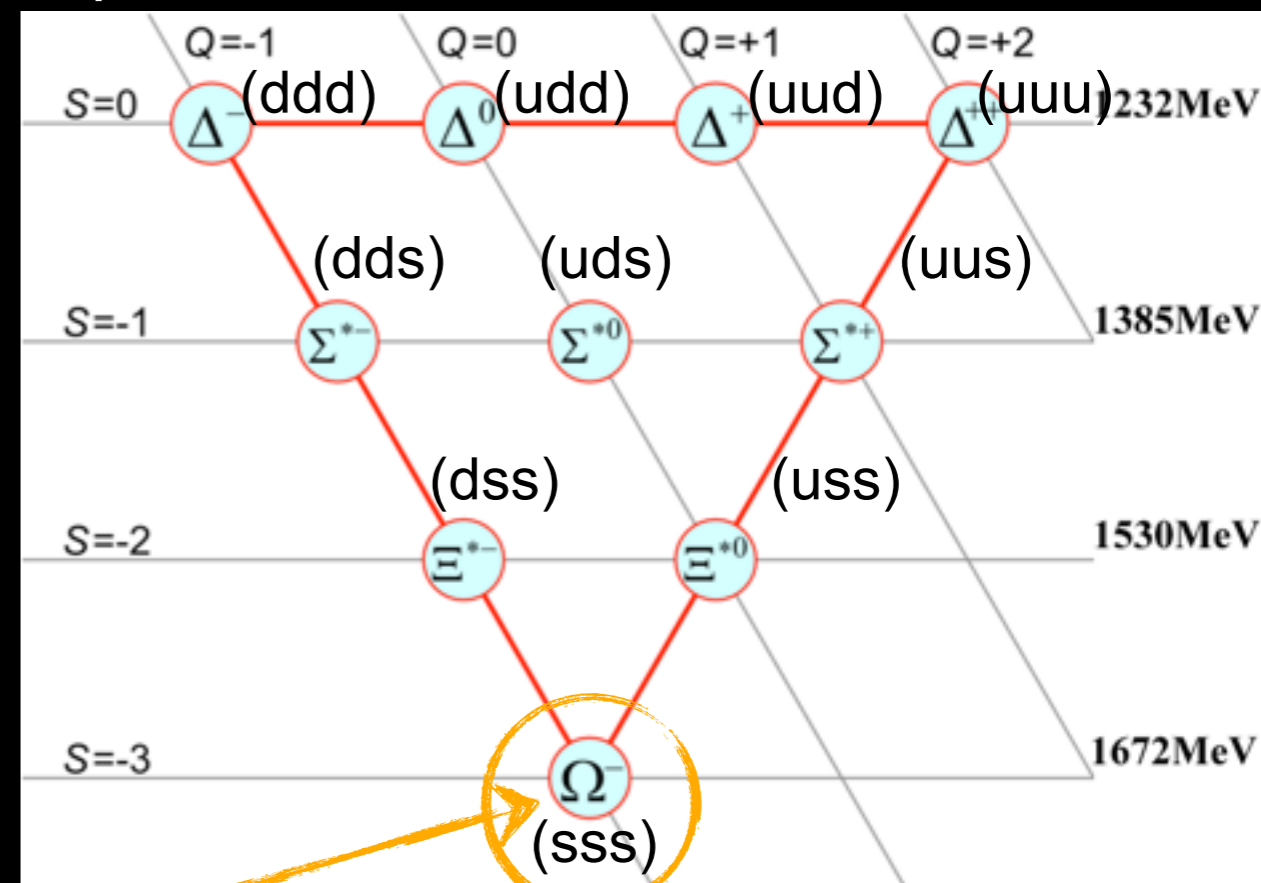
- Postulat:
  - Es gibt **3 fundamentale Teilchen** aus denen alle Hadronen aufgebaut sind (+ Antiteilchen)
  - **Quarks:** up, down, strange

Gell-Mann / Zweig: 1963

Spin = 1/2



Spin = 3/2



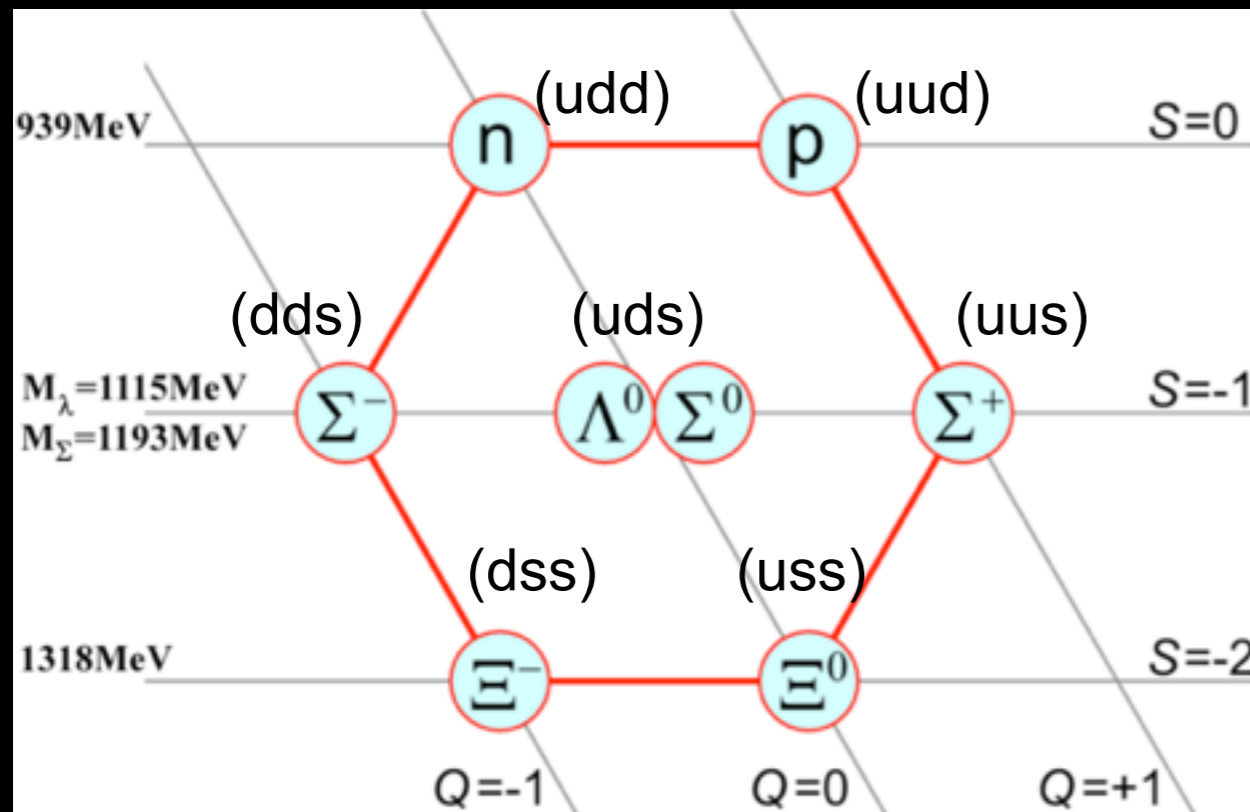
Vorhersage vor Experimenteller Entdeckung

# Ordnung durch innere Struktur

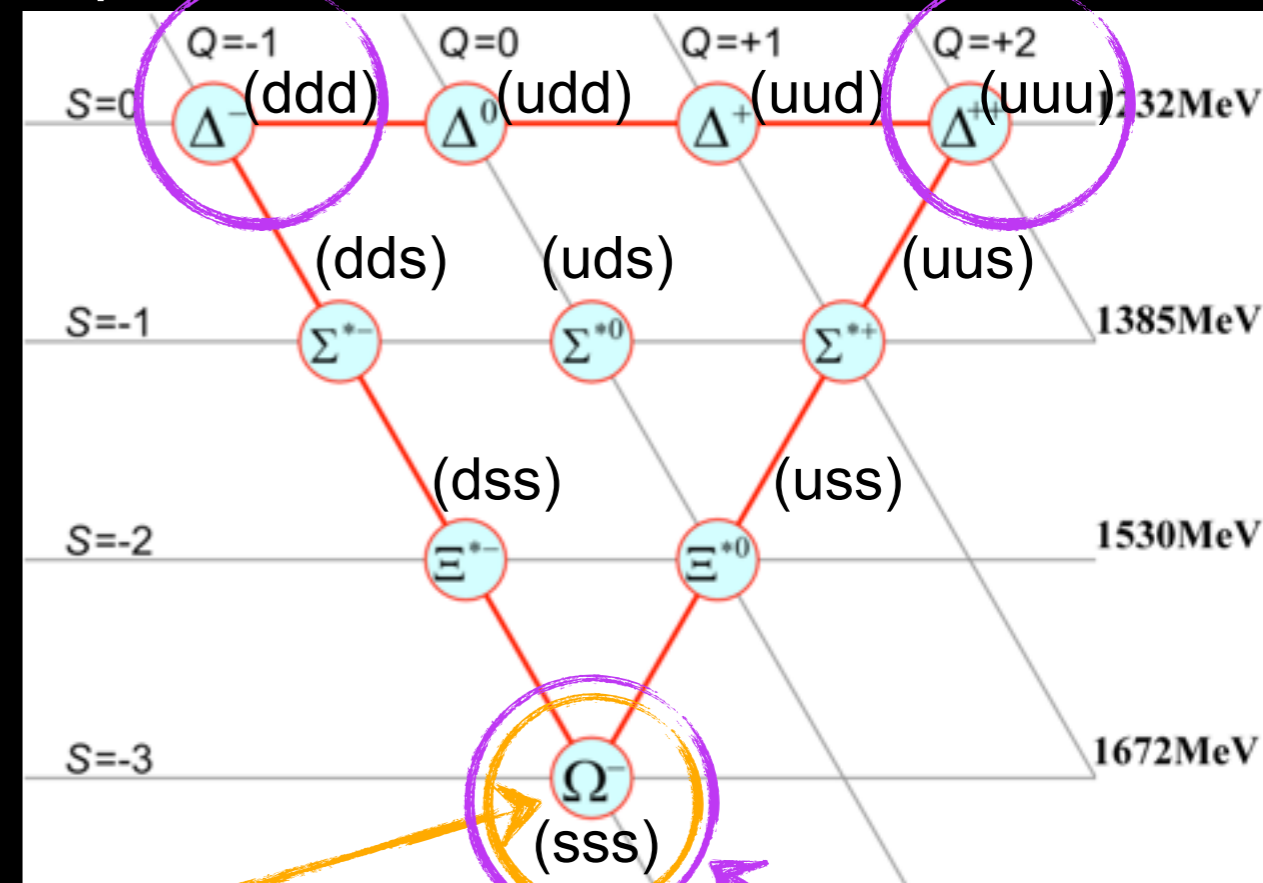
- Postulat:
  - Es gibt **3 fundamentale Teilchen** aus denen alle Hadronen aufgebaut sind (+ Antiteilchen)
  - **Quarks:** up, down, strange

Gell-Mann / Zweig: 1963

Spin = 1/2



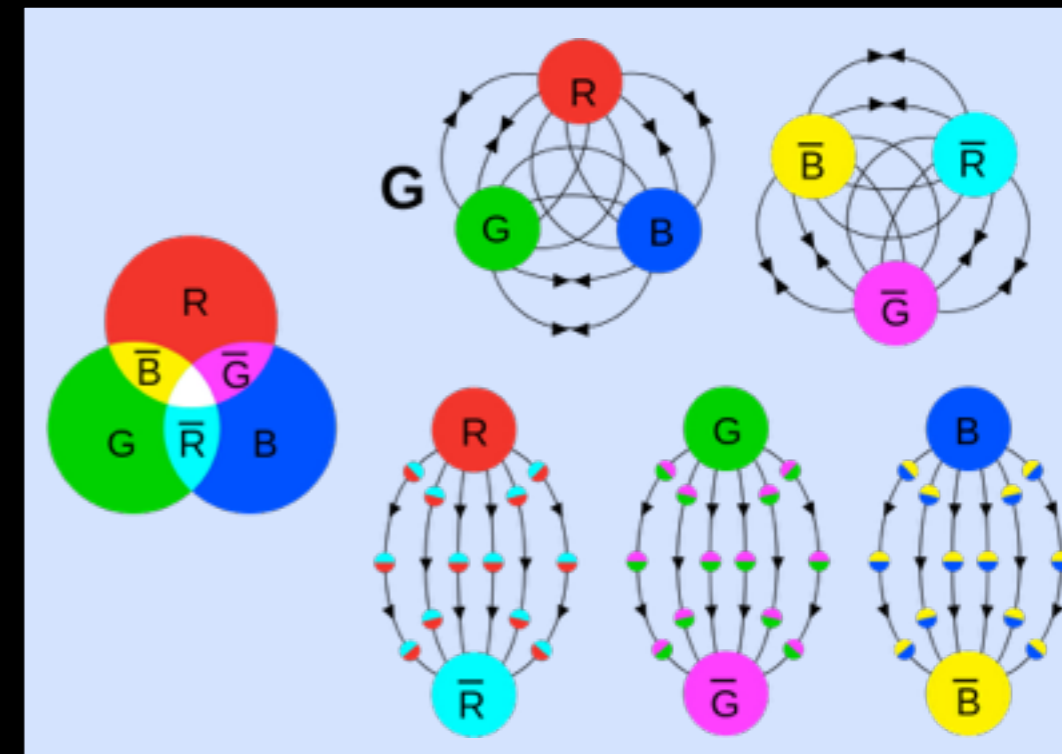
Spin = 3/2



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)

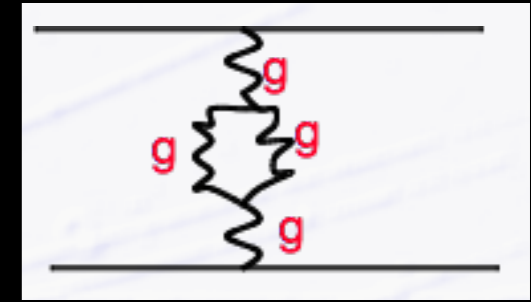


## • Dogma der QCD:

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

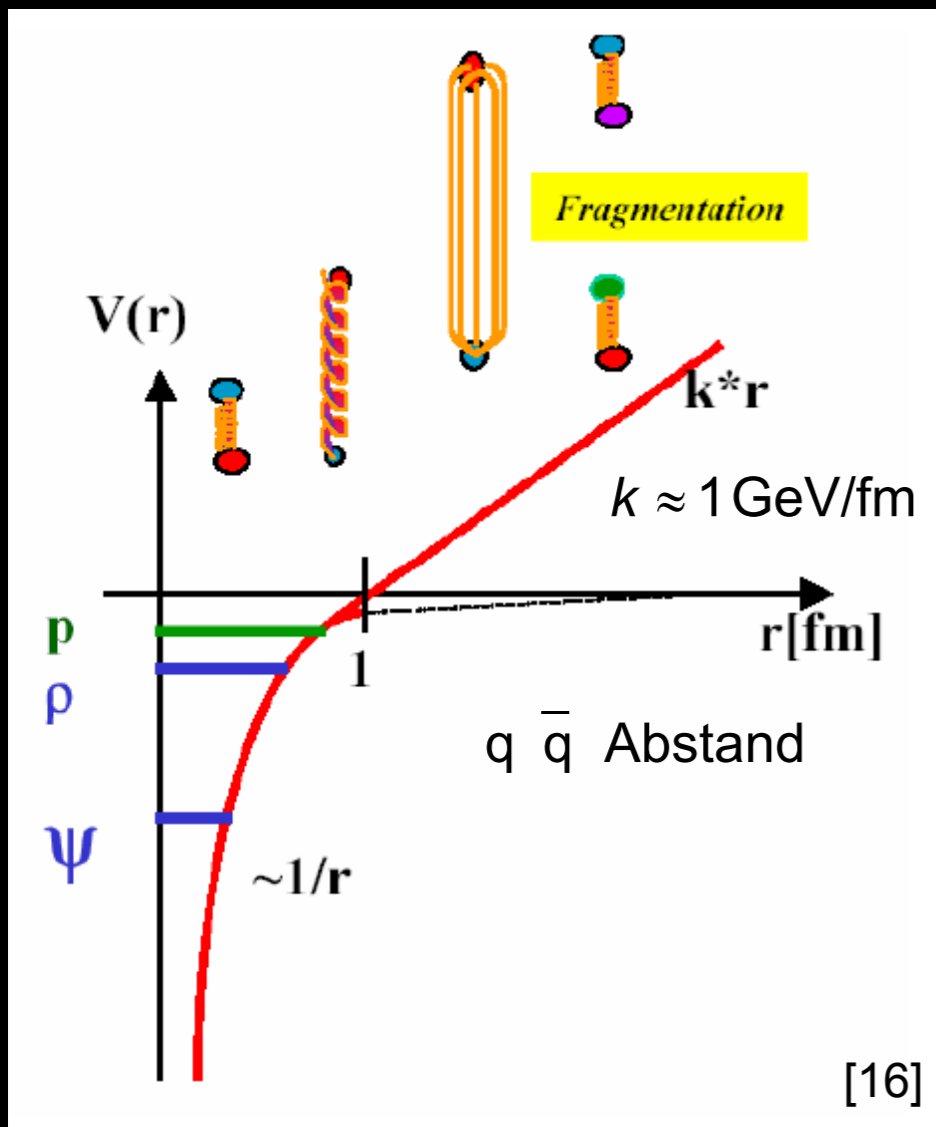
# Glukonen - verflixter Kleber

- Glukonen besitzen Farbe → können mit sich selbst Wechselwirken



- Fundamentaler Unterschied zur QED

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



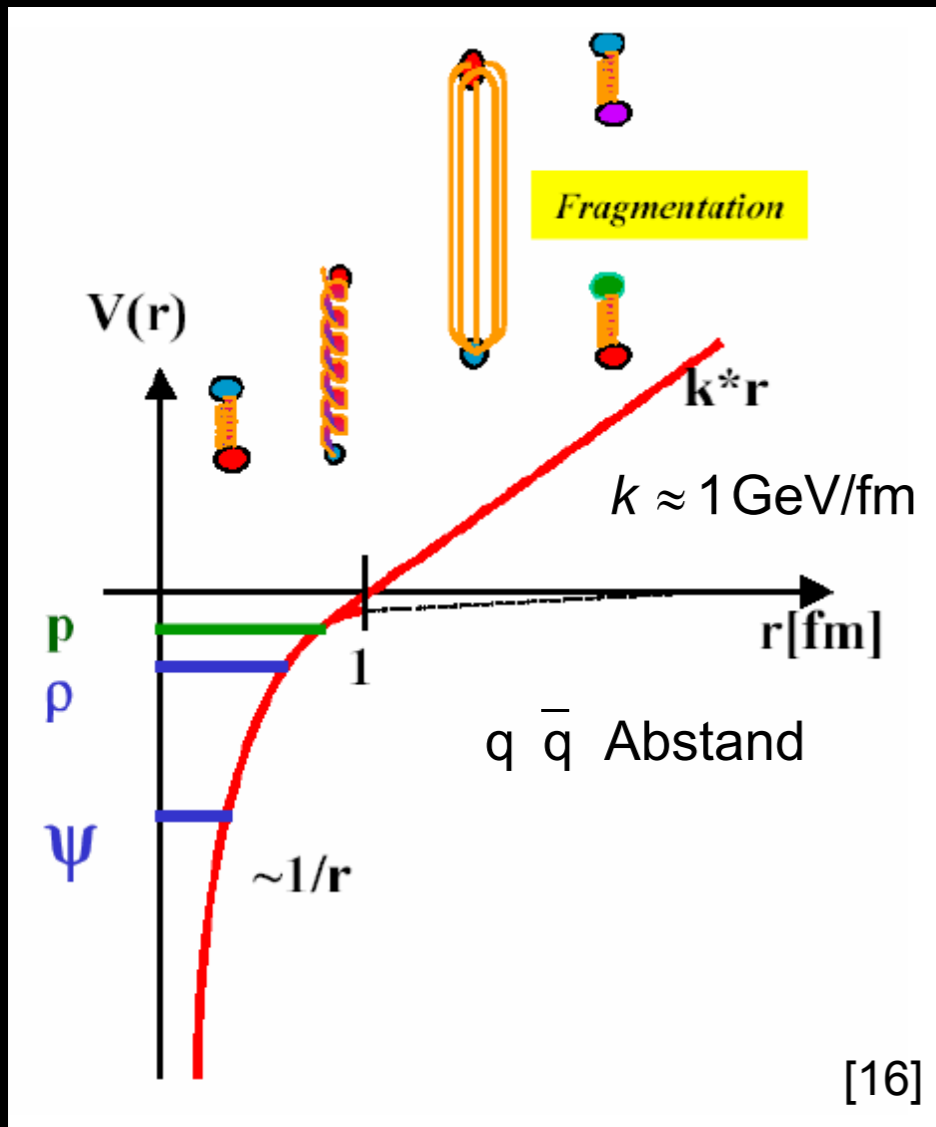
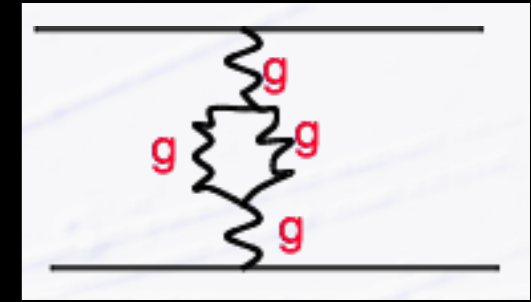
# Glukonen - verflixter Kleber

- Glukonen besitzen Farbe → können mit sich selbst Wechselwirken

- Fundamentaler Unterschied zur QED

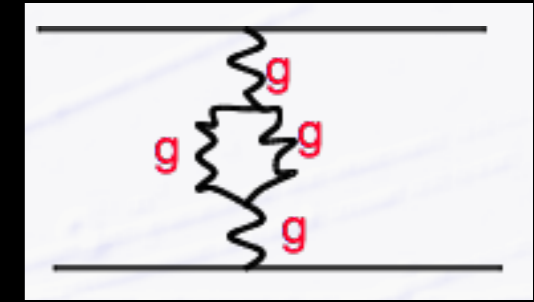
- Potential: 
$$V(r) = -\frac{4}{3} \frac{\alpha_s^{eff}}{r} + kr$$

„eff“ - Effektiv:  
Kopplung  
abhängig von r



# Glukonen - verflixter Kleber

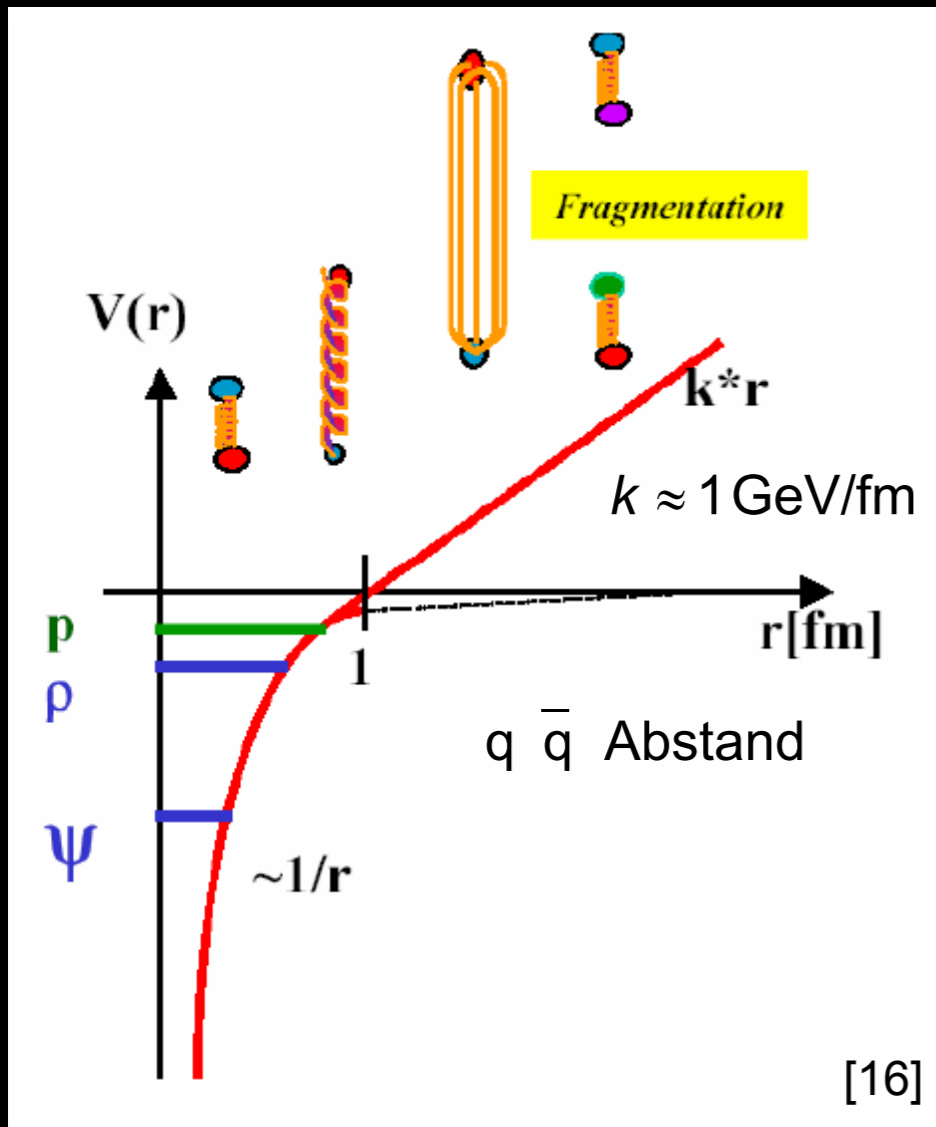
- Glukonen besitzen Farbe → können mit sich selbst Wechselwirken



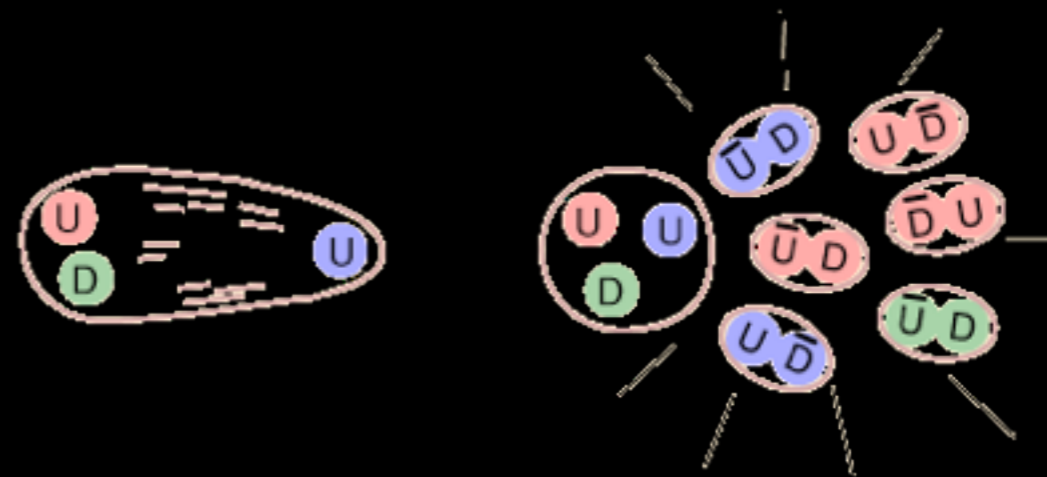
- Fundamentaler Unterschied zur QED

„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“**



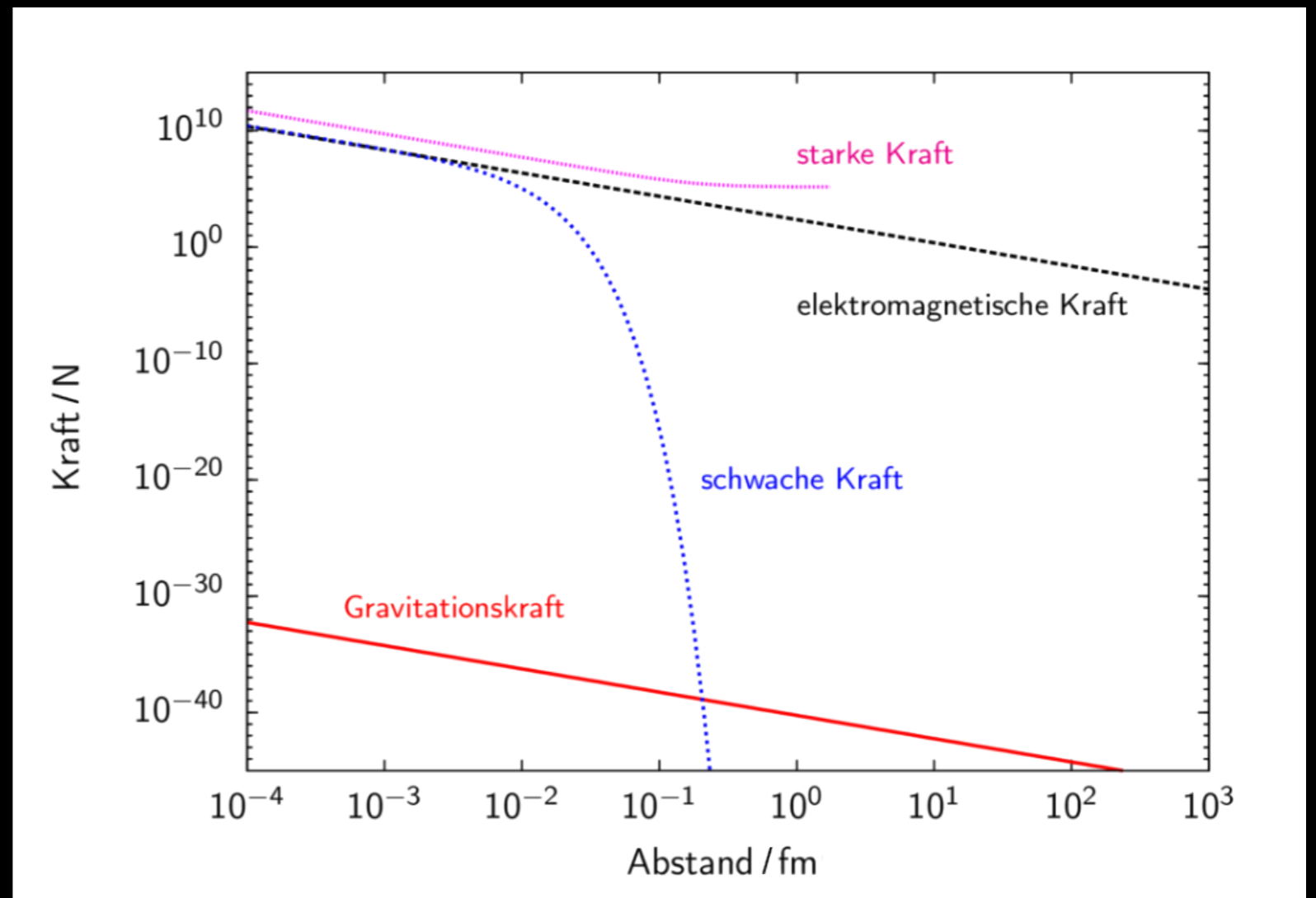
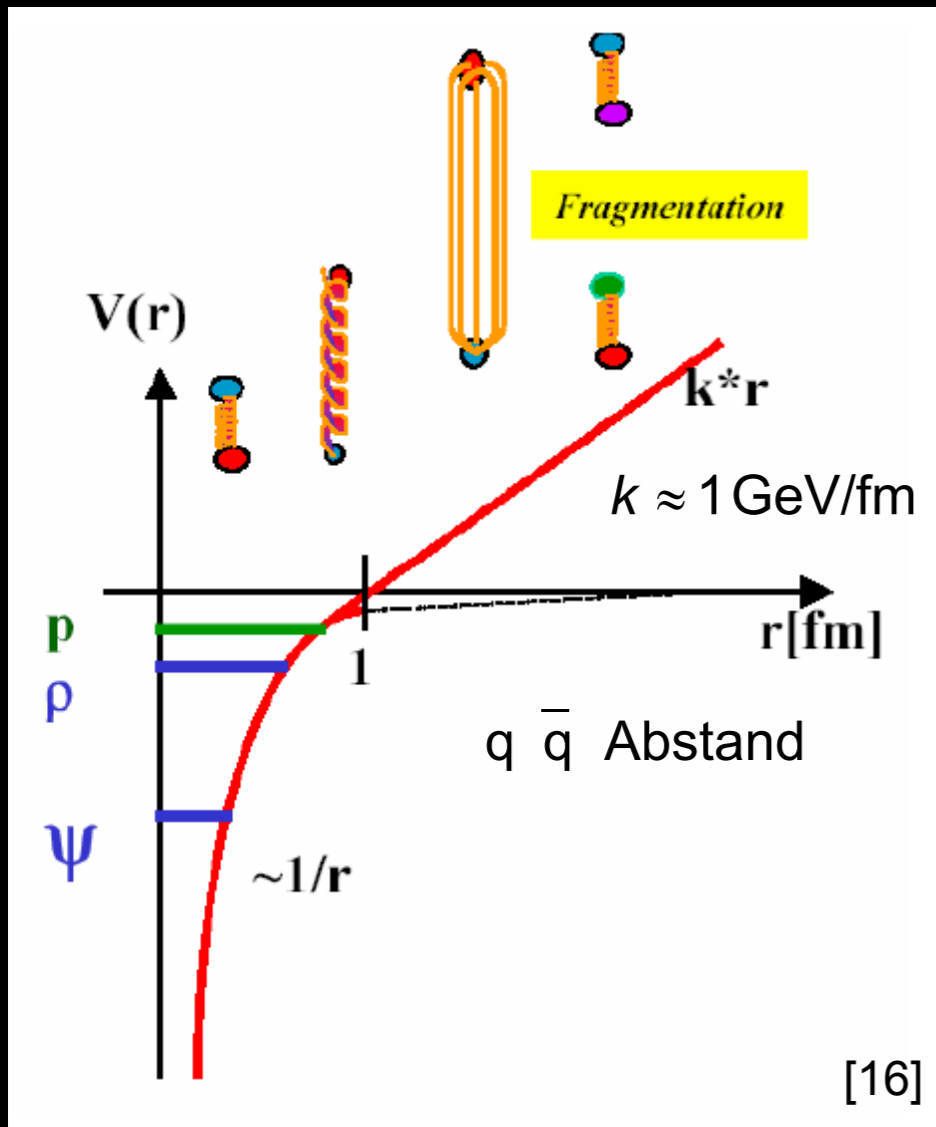
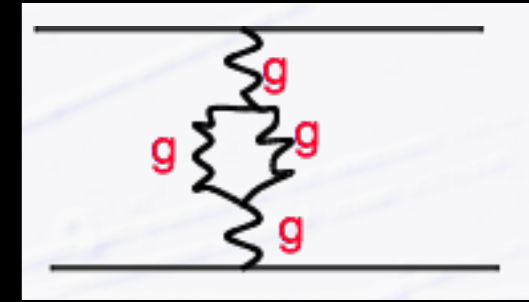
# Glukonen - verflixter Kleber

- 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

Unterrichtsmaterialien Netzwerk Teilchenwelt  
Philipp Lindenau - Mittwoch Mittag

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

Welchseiwirking	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

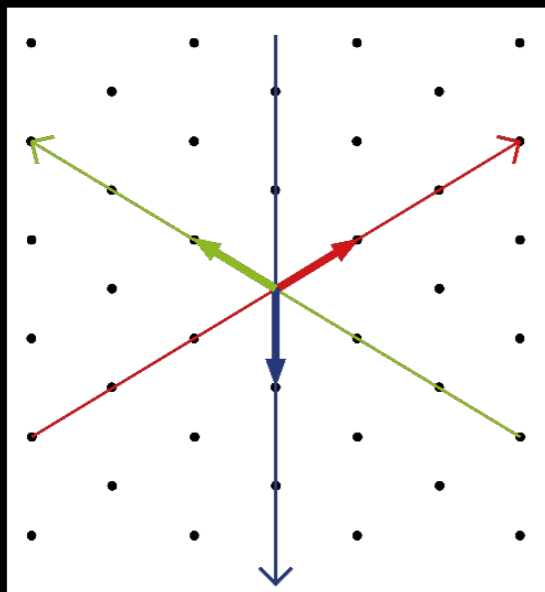
Unterrichtsmaterialien Netzwerk Teilchenwelt  
Philipp Lindenau - Mittwoch Mittag

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

Welchseiwirking	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 Proton Ladungen
- Gleiches für schwache Ladung
- Wie funktioniert das für die **Farb-Ladung**?



- 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

Unterrichtsmaterialien Netzwerk Teilchenwelt  
Philipp Lindenau - Mittwoch Mittag

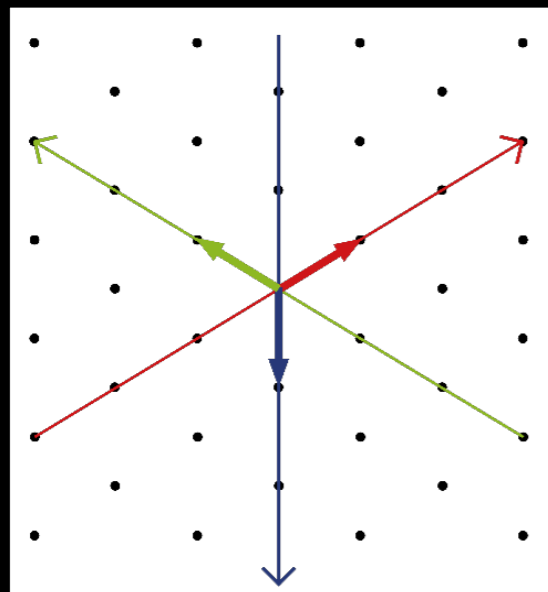
- Zu jeder Wechselwirkung gehört eine Ladung
  - Nur Teilchen die passende Ladung besitzen nehmen Teil

Welchseiwirking	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 Proton Ladungen
- Gleiches für schwache Ladung
- Wie funktioniert das für die **Farb-Ladung**?

- Ladungen sind erhalten**
  - In allen Reaktionen



- Farb-Ladung ist ein 2D Vektor

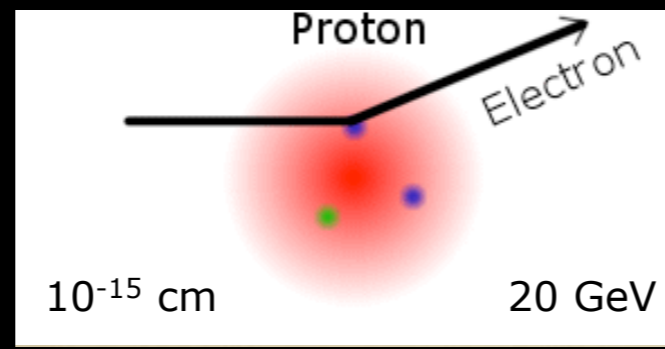
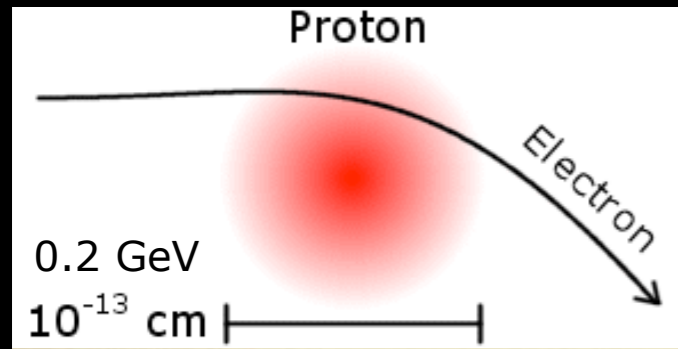


$$\vec{C}_u + \vec{C}_u + \vec{C}_d = \rightarrow + \leftarrow + \downarrow = \downarrow \rightarrow = \vec{0}$$

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

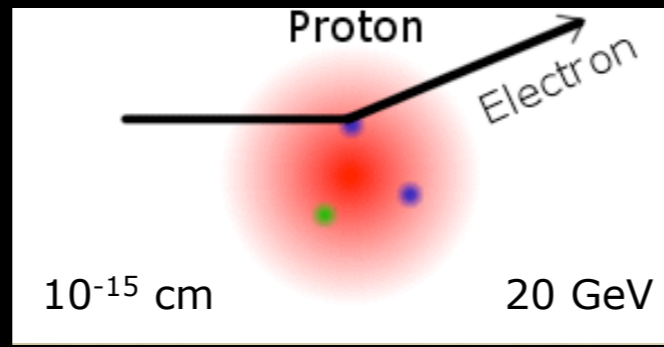
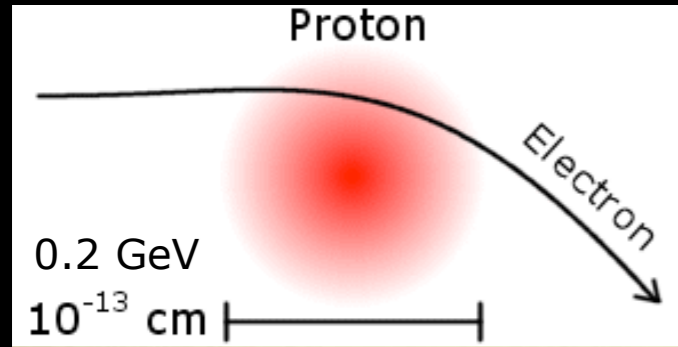
## Elektron-Streuung am Proton

Friedmann, Kendall,  
Taylor: 1969



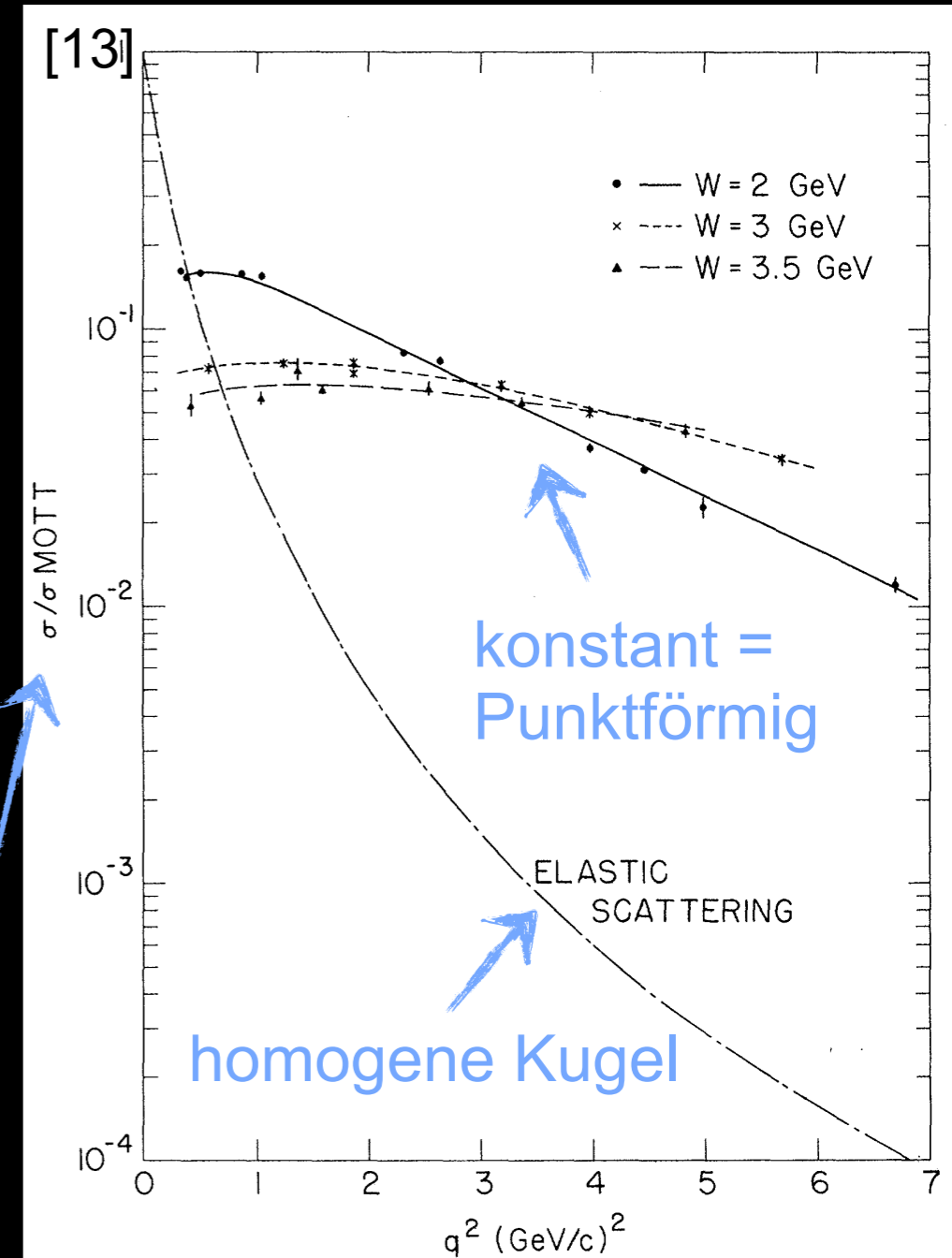
- **Elastische Streuung:**
  - Messung des Proton Radius
- **Inelastische Streuung:**
  - Streuung an Konstituenten
- **Relativistische Ereignisse**
  - Ereignisse charakterisiert durch Impulsübertrag<sup>2</sup> =  $q^2$ , Anstelle des Streuwinkels
  - $(\Delta E + m_p c^2)^2 = (\Delta \vec{p})^2 c^2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

## Elektron-Streuung am Proton



Friedmann, Kendall, Taylor: 1969

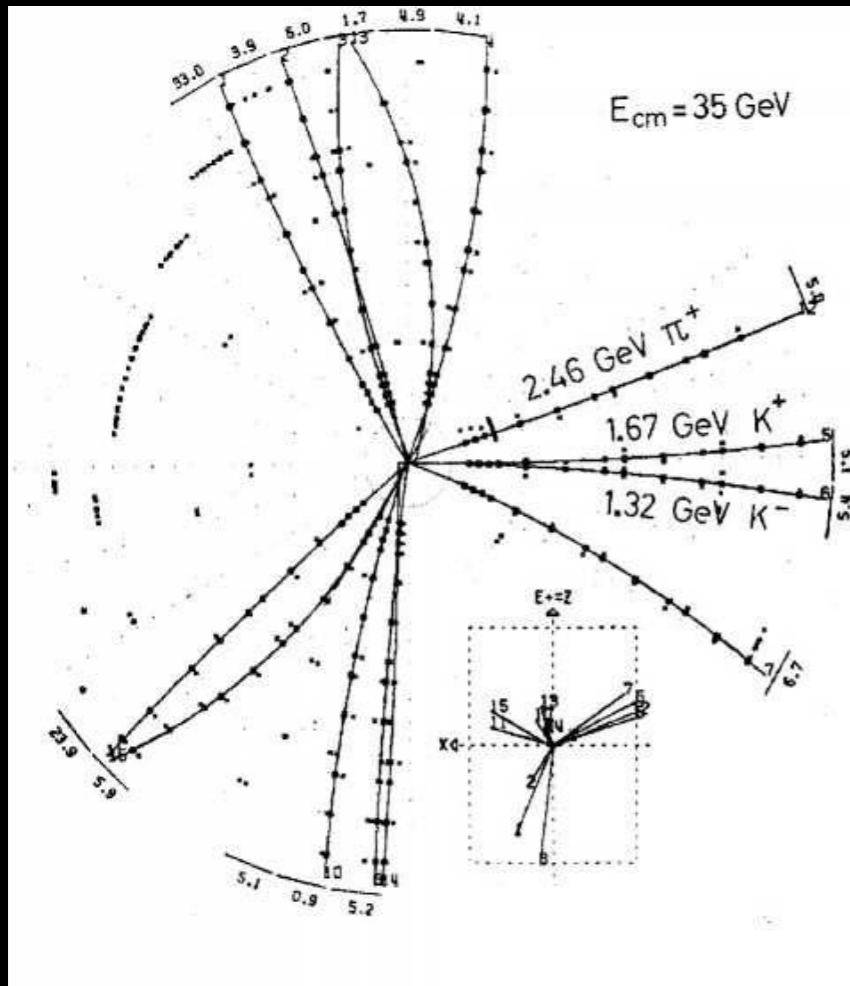
- **Elastische Streuung:**
  - Messung des Proton Radius
- **Inelastische Streuung:**
  - Streuung an Konstituenten
- **Relativistische Ereignisse**
  - Ereignisse charakterisiert durch Impulsübertrag<sup>2</sup> =  $q^2$ , Anstelle des Streuwinkels
  - $(\Delta E + m_p c^2)^2 = (\Delta \vec{p})^2 c^2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



Formfaktor F

Desy (Petra): 1979

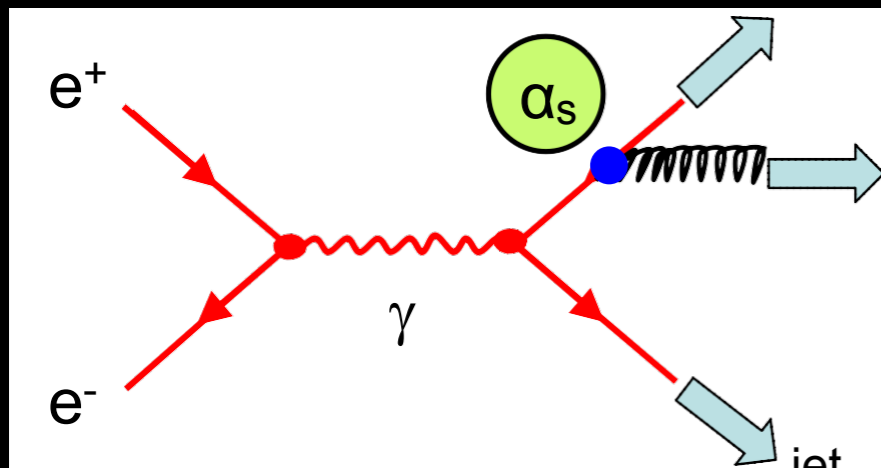
- Erzeugung von Quark - Antiquark Paaren
  - 3ter „jet“ durch Gluonstrahlung



- Bestimmung der Kopplungskonstanten:

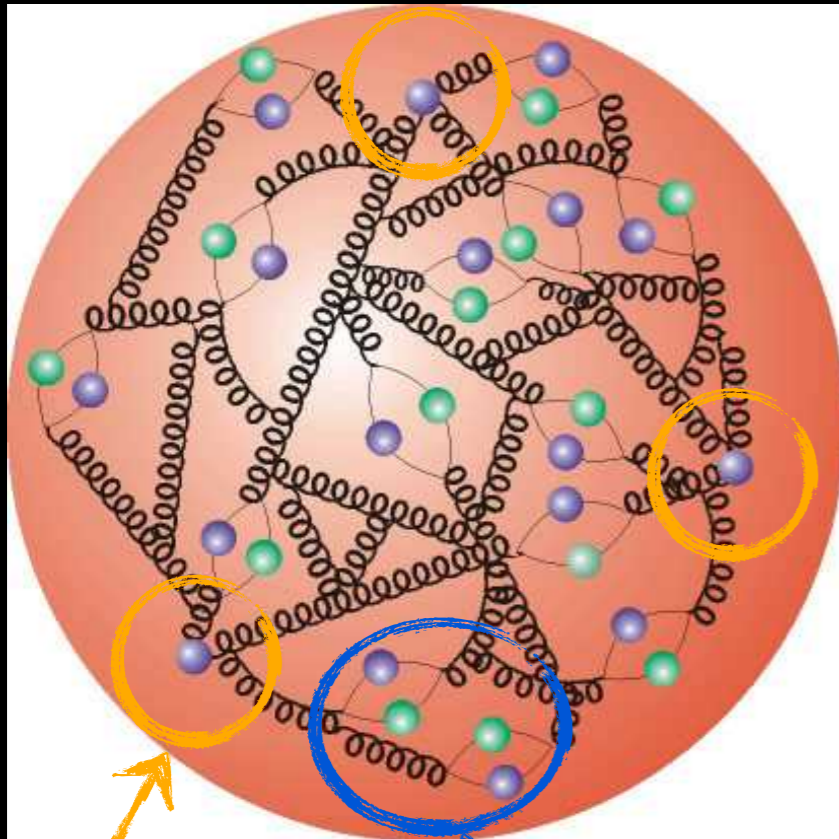
$$\alpha_s \sim \frac{\# \text{ 3 jet events}}{\# \text{ 2 jet events}}$$

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



# Das Proton - heute

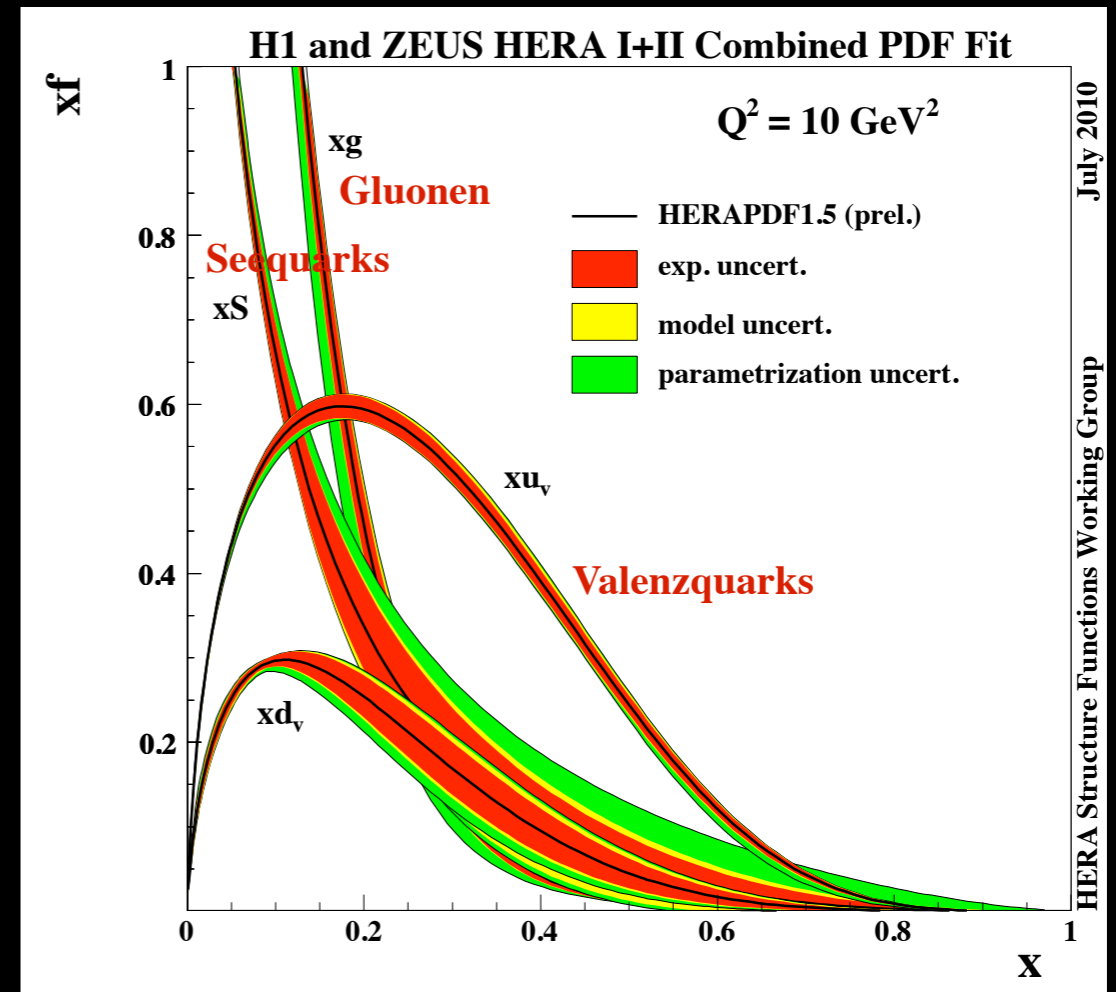
- Komplexes Viel-Teilchen System
  - Quarks, Antiquarks, Gluonen



Valenzquarks  
(uud)

Seequarks  
Quark-Antiquark Paare

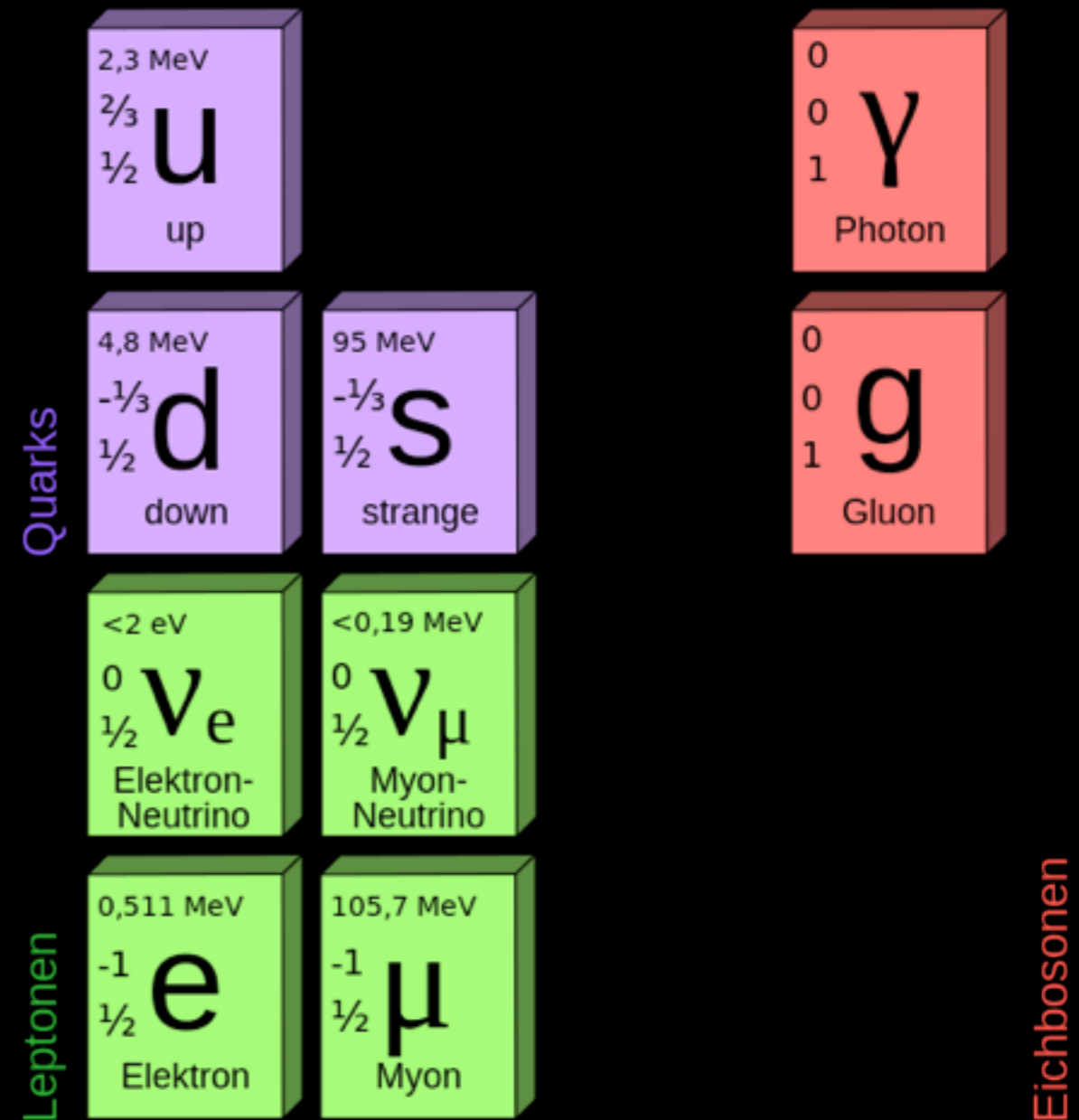
- Hochenergetische Kollisionen:
  - Kollision einzelner ‚Partonen‘
  - Welchen Impuls Tragen die Partonen?
    - ▶ PDFs (Parton density function)



x: Impulsanteil des Partons am Proton  
(Björken x)

## • Elementare Teilchen

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

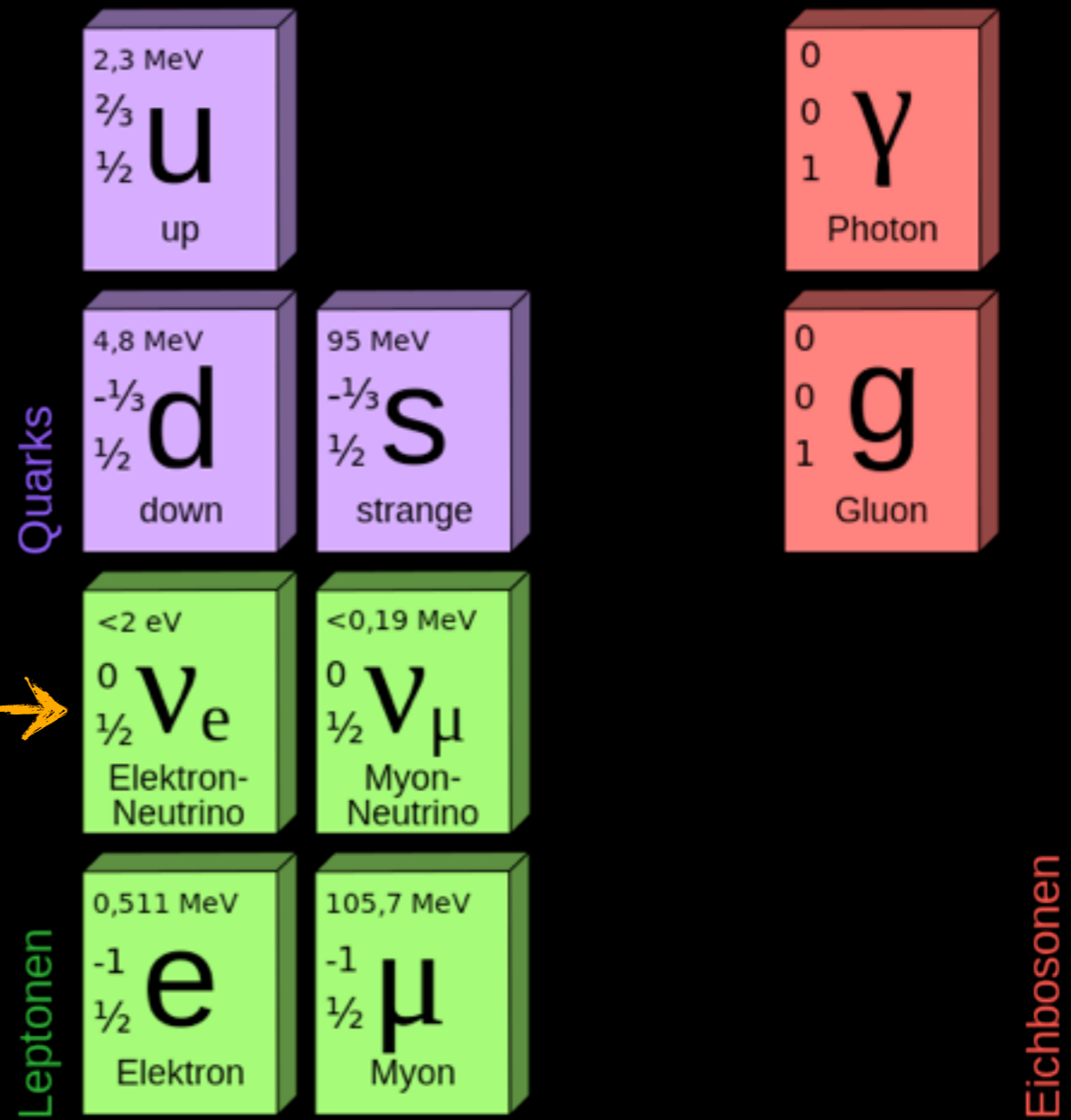


# Was wir bisher kennengelernt haben

## • Elementare Teilchen

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

Neutrinos bisher vernachlässigt →





# Schwache Wechselwirkung

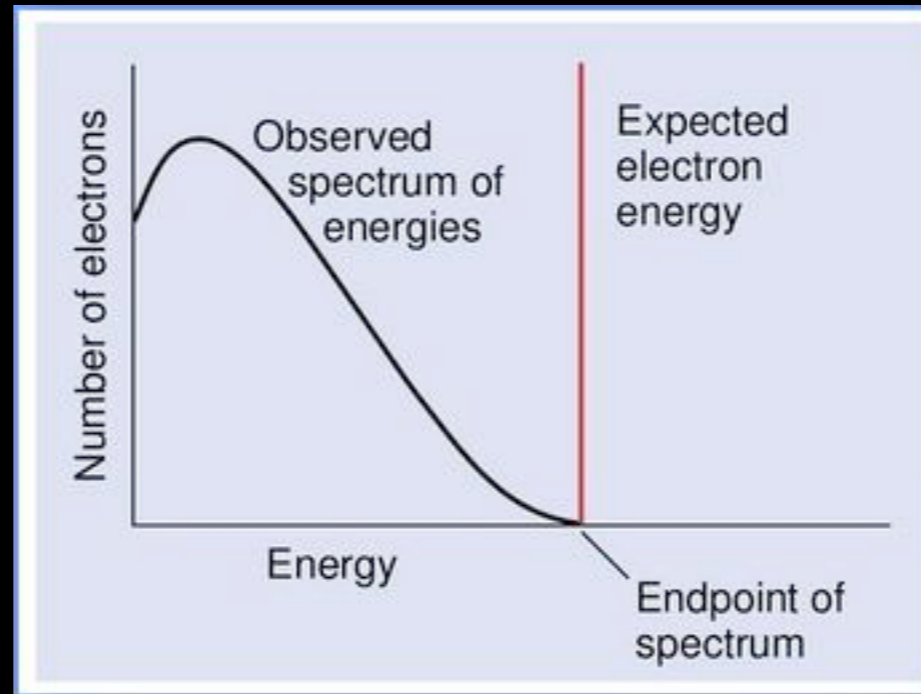
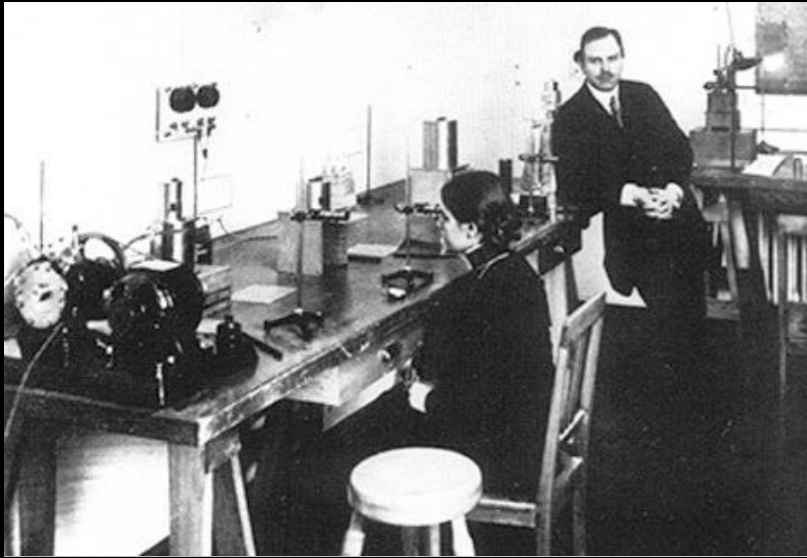
- **Zurück zum Anfang des 20. Jahrhunderts**
  - 1895: Wilhelm Röntgen entdeckt **Röntgenstrahlung**
  - 1896: Henri Becquerel entdeckt **Strahlung von Urankristallen**
  - 1898: Marie und Pierre Curie: **Strahlung von Pechblende (U + Polonium)**
- **Dauerte 35 Jahre um diese Phänomene grob zu Verstehen**

# $\beta$ -Zerfall

- $\beta$  - Zerfall von Atomkernen

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

Meitner, Hahn: 1911



- Verletzung der Energieerhaltung?

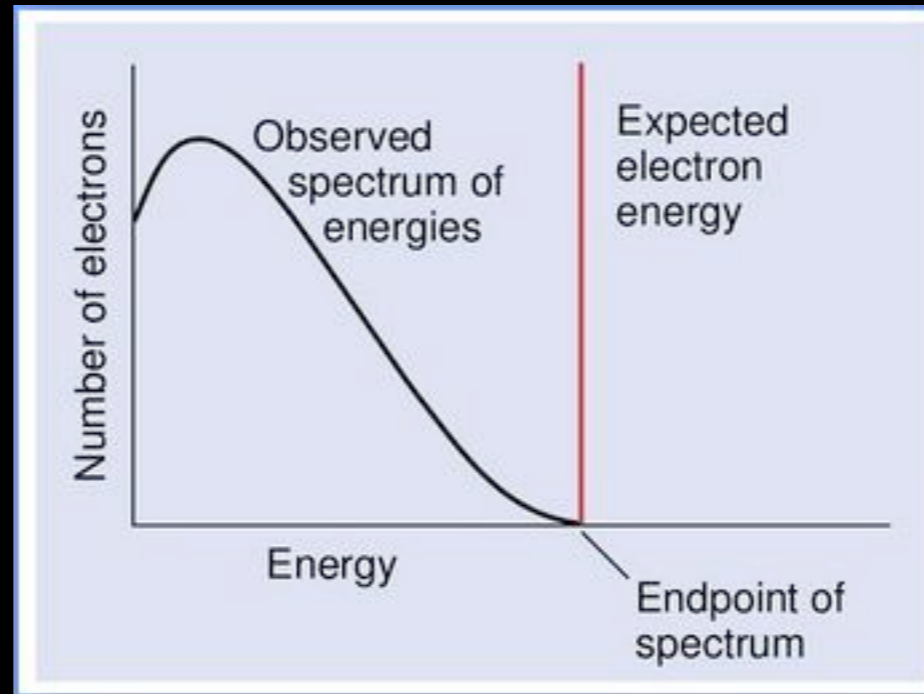
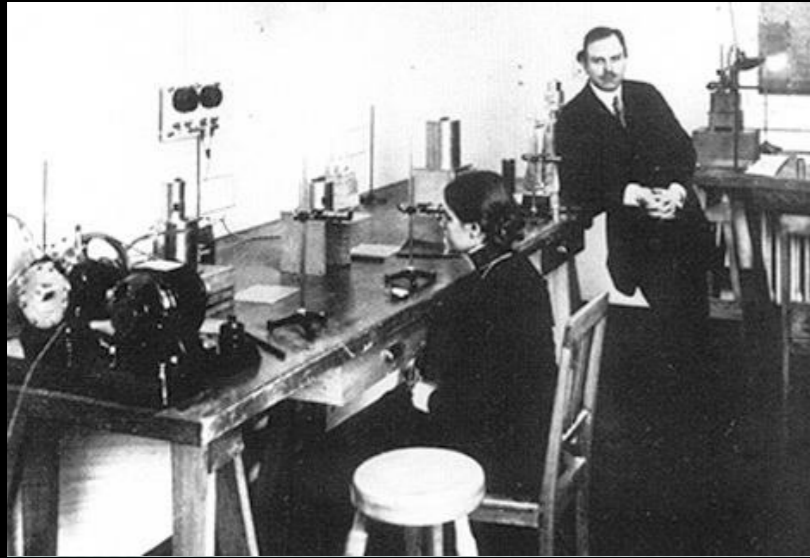
Pauli: 1930

# $\beta$ -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 in Zerfall erzeugt

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

**Neutrino (kleines Neutron)**  
Nachweis erst 1956.

- Beobachtungen:

Fermi: 1934

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

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

- Beobachtungen:

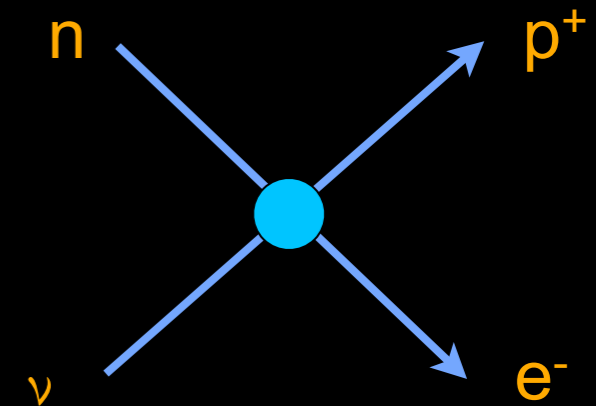
Fermi: 1934

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

⇒ **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:  $p, n / e, \nu$

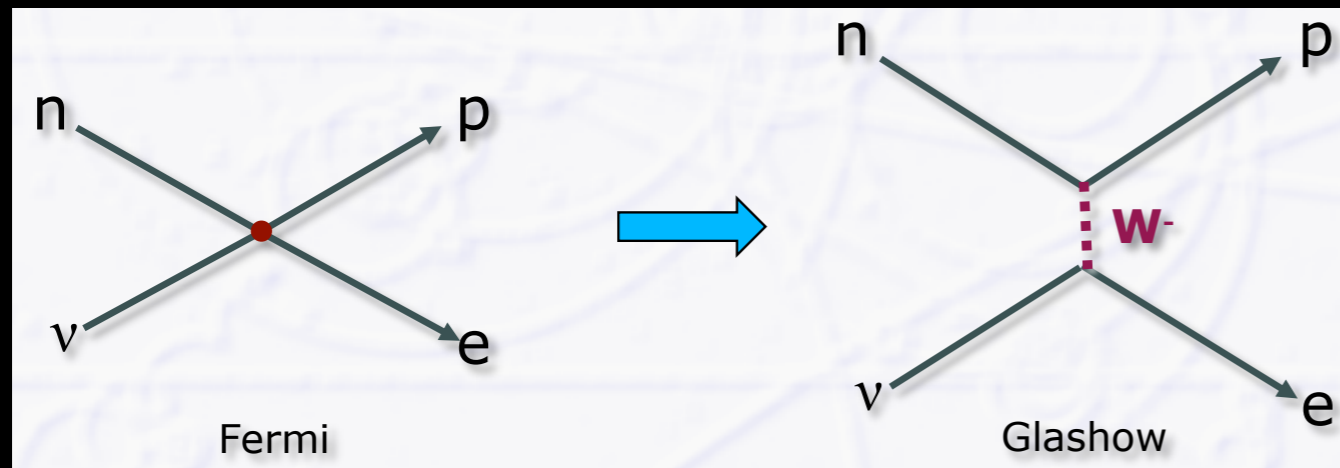


⇒ Berechnung von  $\beta$  - Zerfällen & Wechselwirkungswahrscheinlichkeiten möglich

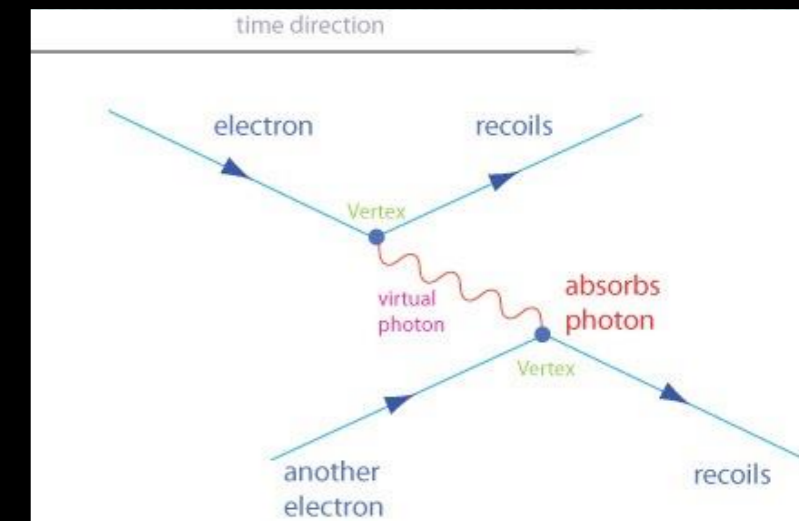
- Großes Problem in ~ 1950
  - Streuquerschnitt für  $p + \nu \sim (G_F E_\nu)$ 
    - **Verletzt Unitarität** für  $E > 300 \text{ GeV}$  (Wahrscheinlichkeit  $> 1$ )

Glashow: 1958

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



## Elektron Streuung

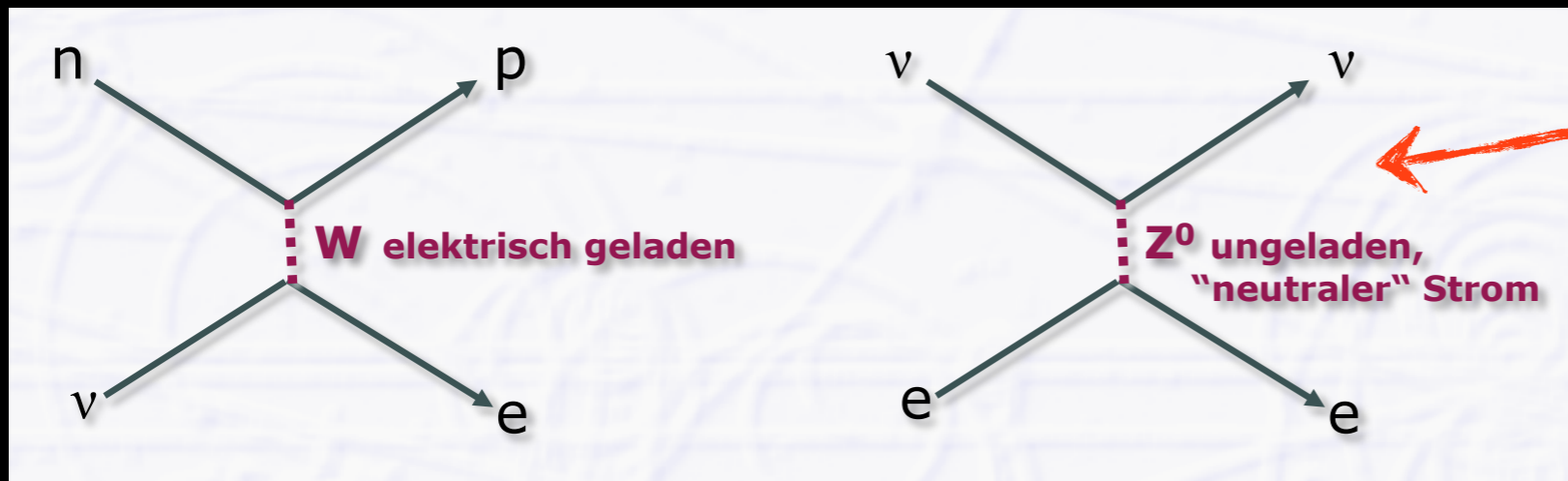


- Große Masse des  $W^-$  Teilchens erklärt kurze Reichweite ( $\sim 10^{-18} \text{ m}$ ) und kleine Wechselwirkungswahrscheinlichkeit

# 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

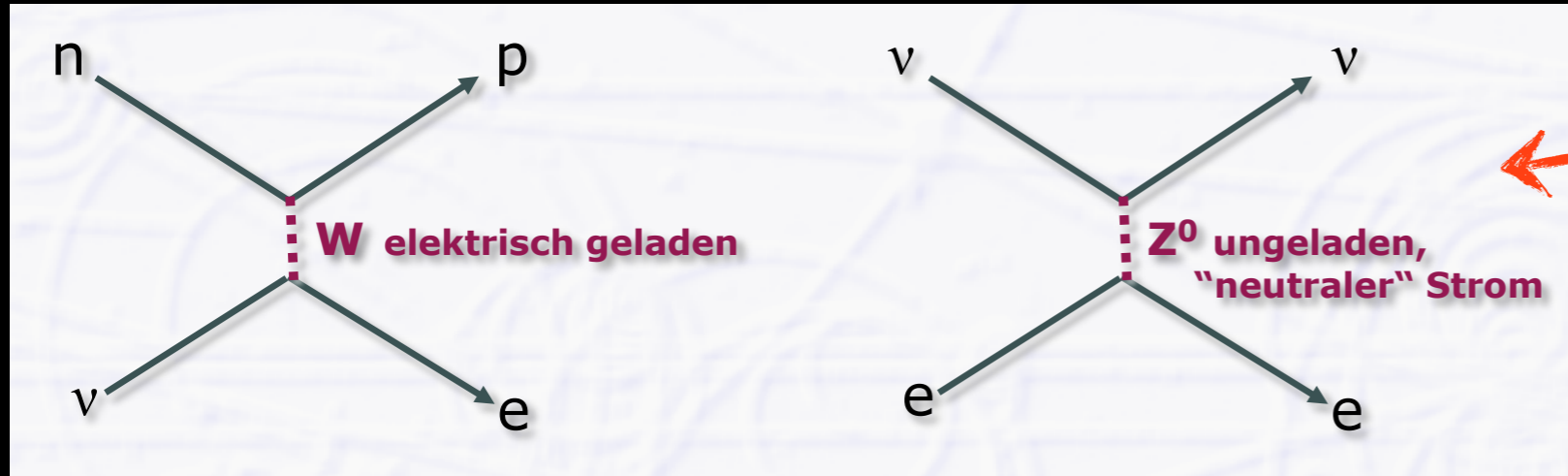
- 2 el. geladene Austauschteilchen:  $W^+$ ,  $W^-$  (massiv)
- 2 neutrale Austauschteilchen:  $\gamma$  (masselos),  $Z^0$  (massiv)



# 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)

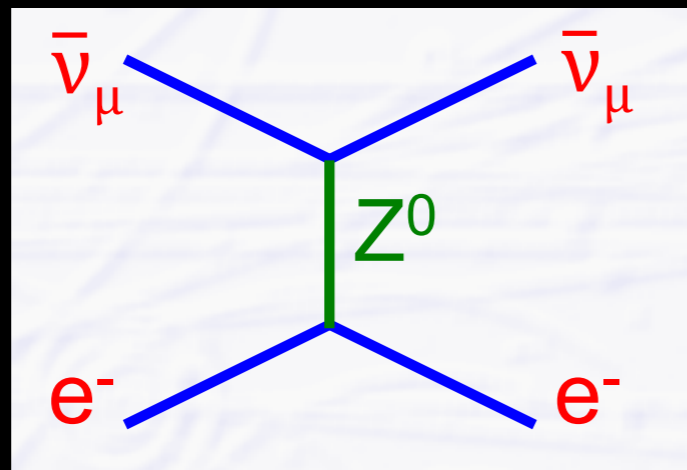
- Zu diesem Ansatz gehört eine neue Symmetrie (  $SU(2) \times U(1)$  )
  - Symmetrie nur bei großen Energien realisiert:
    - Wechselwirkungen haben gleiche Stärke!
  - Bei niedrigen Energien:
    - Symmetrie „spontan“ gebrochen
- $W$  &  $Z$  Bosonen erhalten **Masse** durch Interaktion mit **Higgs**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

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

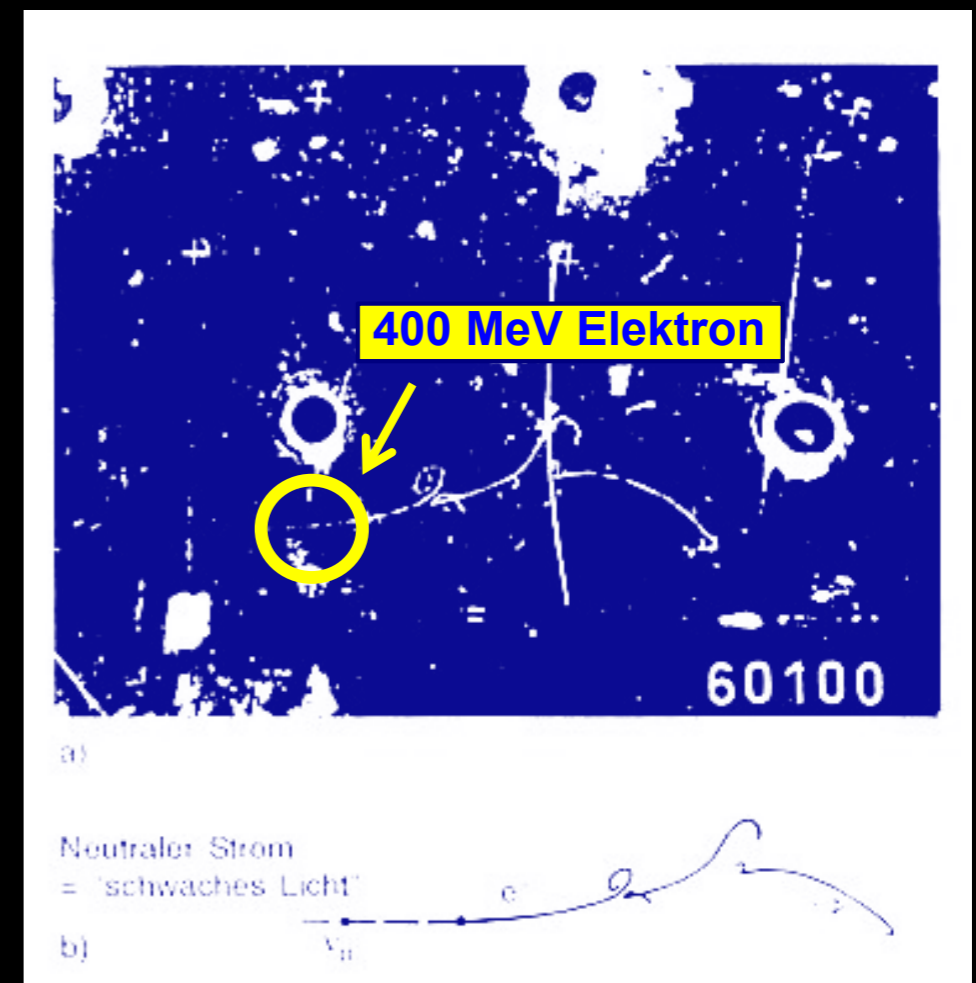
# Entdeckung des neutralen Stroms

CERN: 1973

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



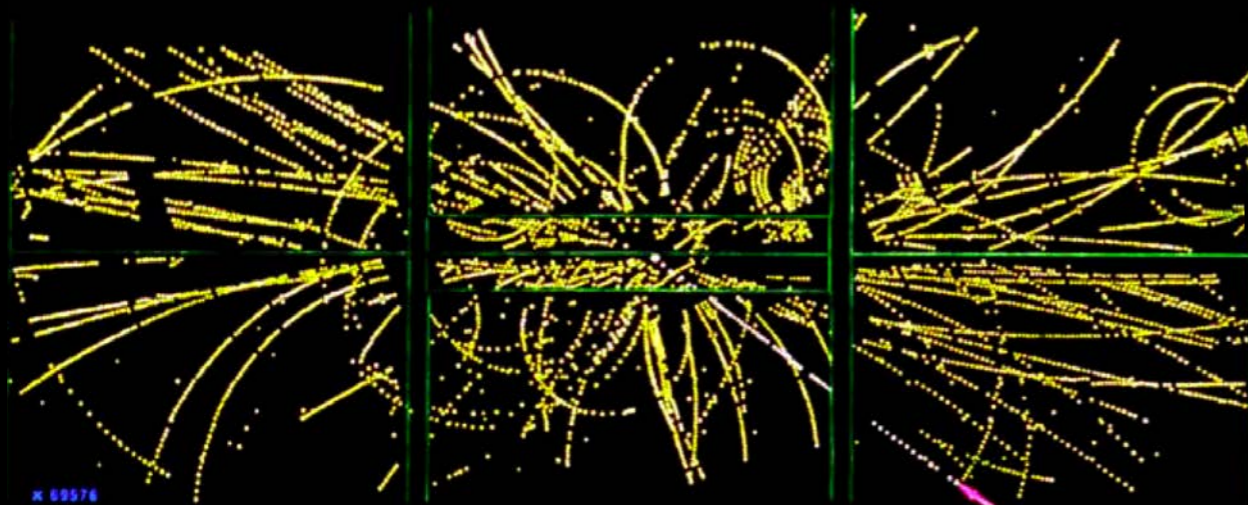
Gargamelle Blasen-kammer



# Experimenteller Nachweis von W & Z

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

CERN: 1983



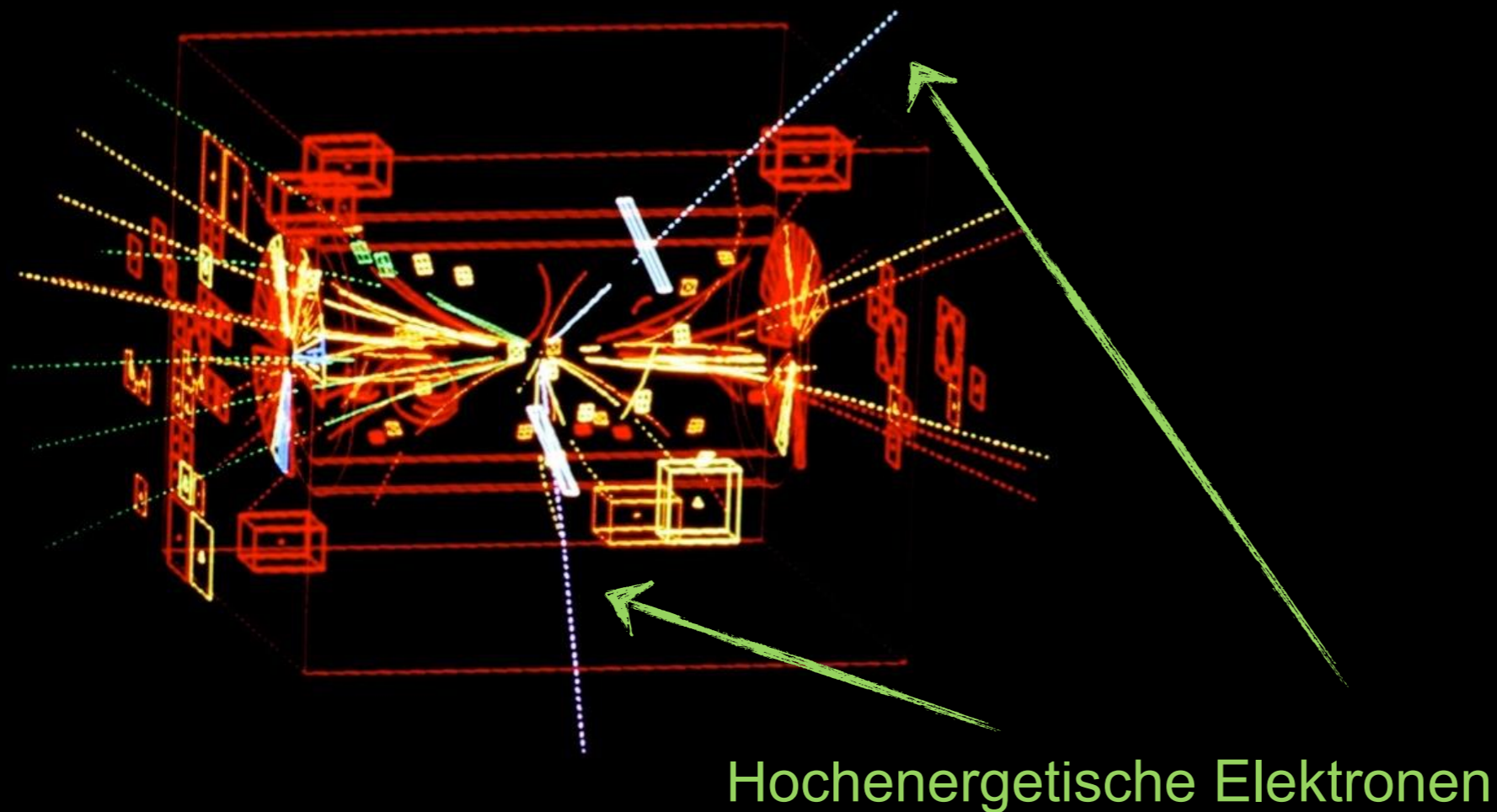
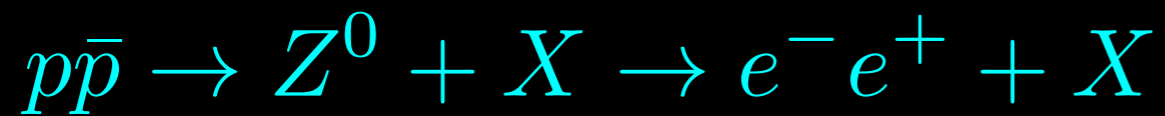
Hochenergetisches Elektron



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

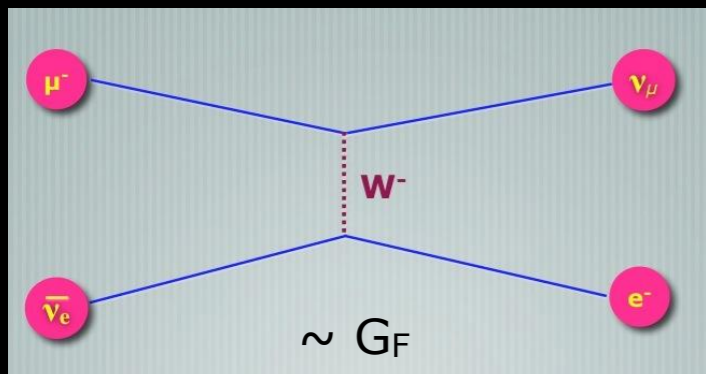
- **Quarks:** u, d, s

- **Leptonen:**  $e$   $\mu$   
 $\nu_e$   $\nu_\mu$

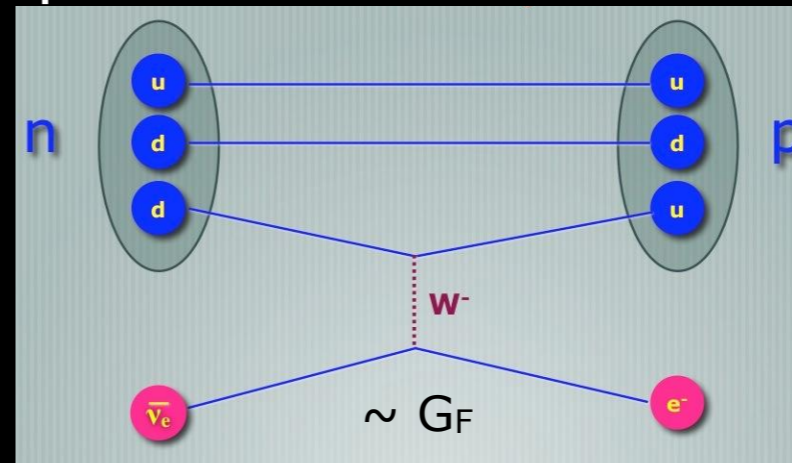
← schwache Isospin  
1/2 doublets!

- Reaktionen der schwachen Wechselwirkung

## Muon Zerfall



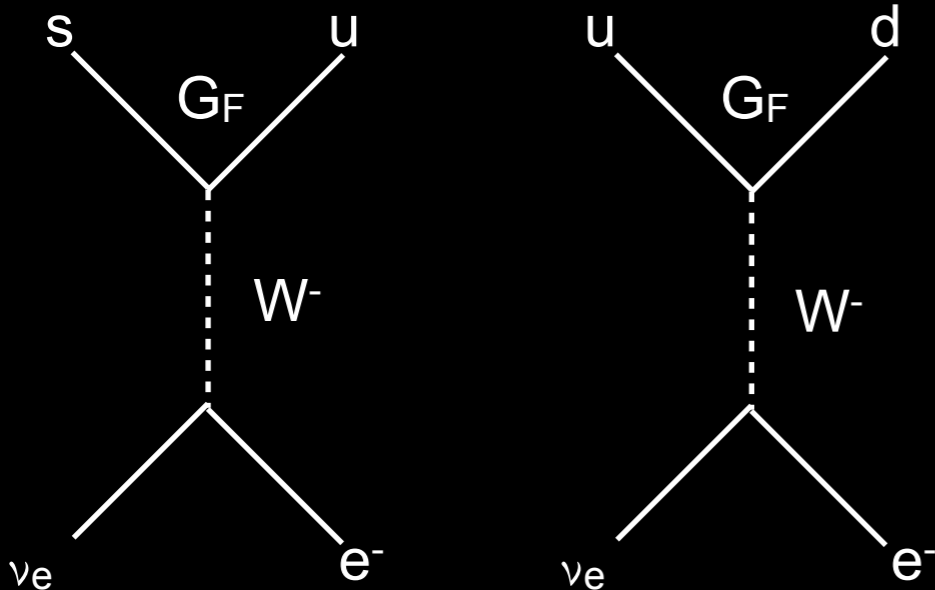
## $\beta$ -Zerfall



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

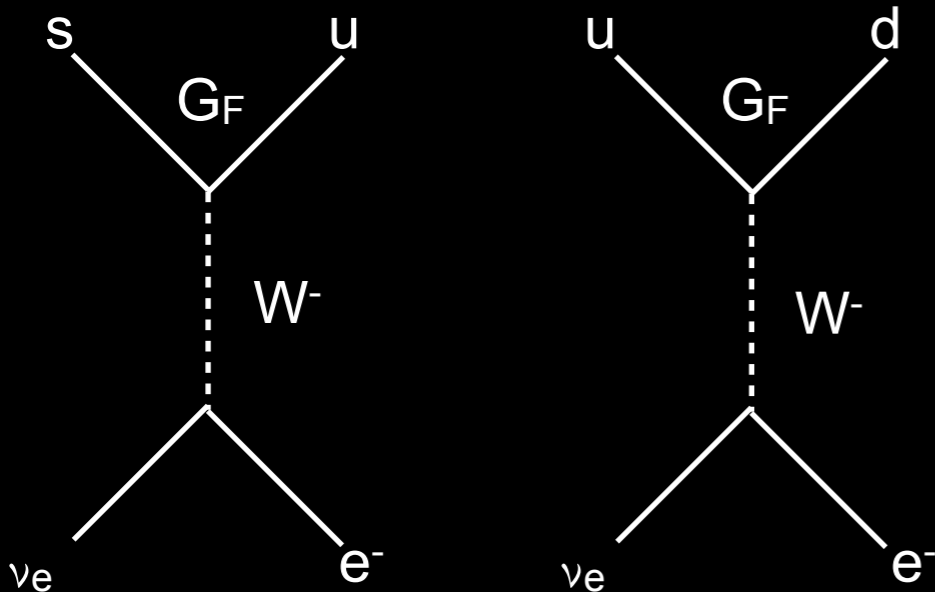
Beobachtung in Teilchenreaktionen:

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



Beobachtung in Teilchenreaktionen:

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



Beide Reaktionen sollten gleich häufig auftreten!

- Quarks:

$$\begin{pmatrix} u \\ d \cos \theta_C + s \sin \theta_C \end{pmatrix}$$

- Leptonen:

$$\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix}$$

schwacher Isospin doublets!

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



- **Quarks:**

$$\begin{pmatrix} u \\ d \cos \theta_C + s \sin \theta_C \end{pmatrix}$$

- **Leptonen:**

$$\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix}$$

schwacher Isospin doublets!

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

- Quarks (u,d,s) werden auch **Eigenzustände** der **starken WW** genannt!
  - Diese ‚Teilchen‘ interagieren miteinander durch starke WW
- Erinnerung: **Teilchen sind Wellen!**
  - Können sich überlagern, interferieren, mischen .... (vgl. Elektrotechnik!)
- An schwacher Wechselwirkung ist eine **Mischung obiger Quarks** beteiligt

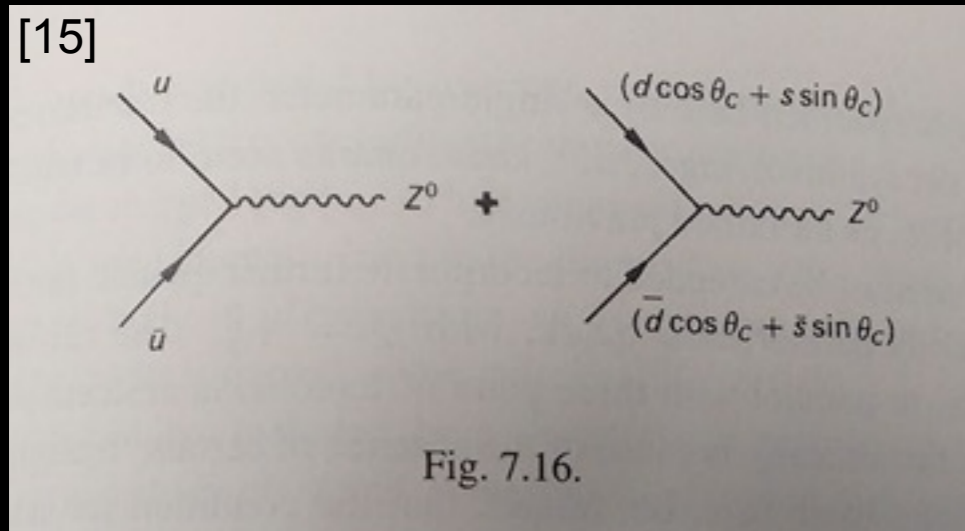
Eigenzustände der starken WW  $\neq$  Eigenzustände der schwachen WW

**Damit ist vorheriges Problem gelöst!**

# 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‘

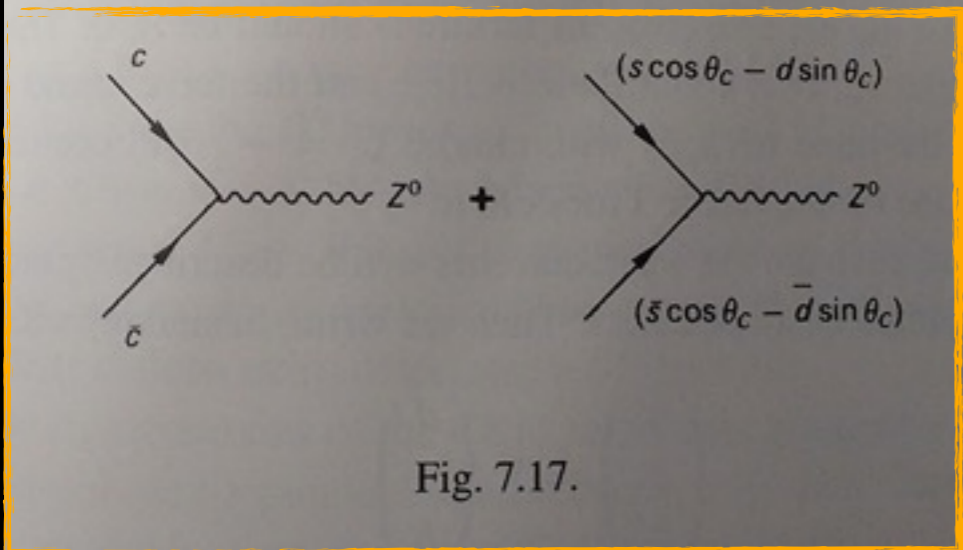
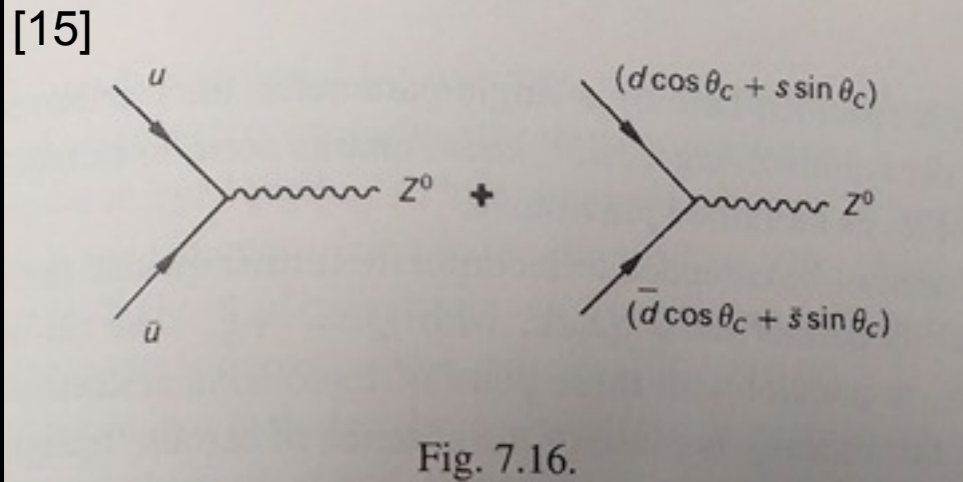
- Neutrale ströme ( $Z^0$ ) - keine flavour Änderung beobachtet

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“

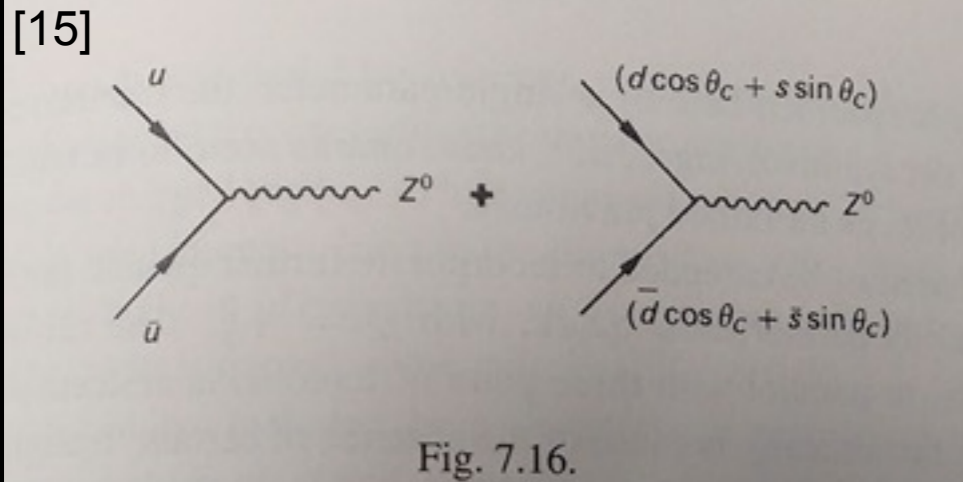
- Neutrale ströme ( $Z^0$ ) - keine flavour Änderung beobachtet

Glashow, Iliopoulos, Maiani: 1970

→ GIM Mechanismus

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

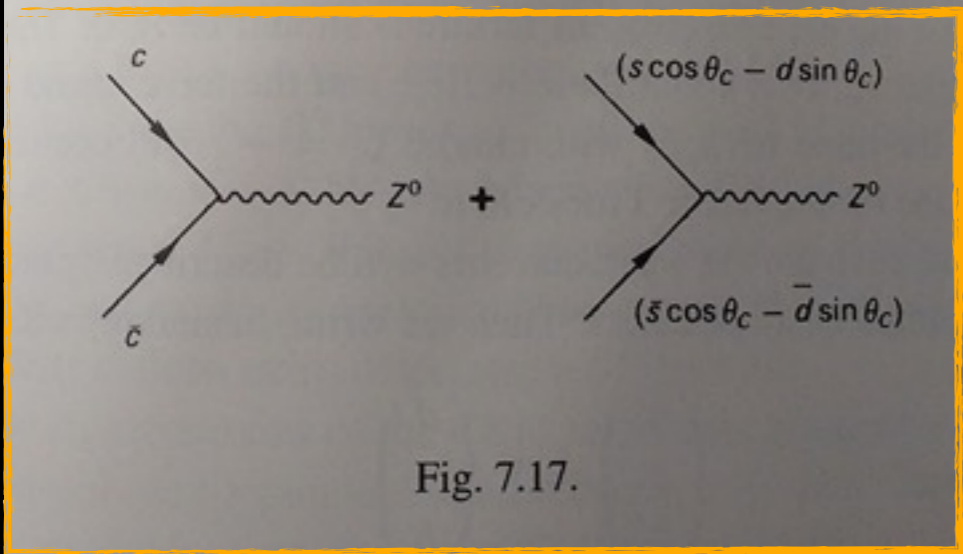
Neues Teilchen: „charm“ Quark



[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‘

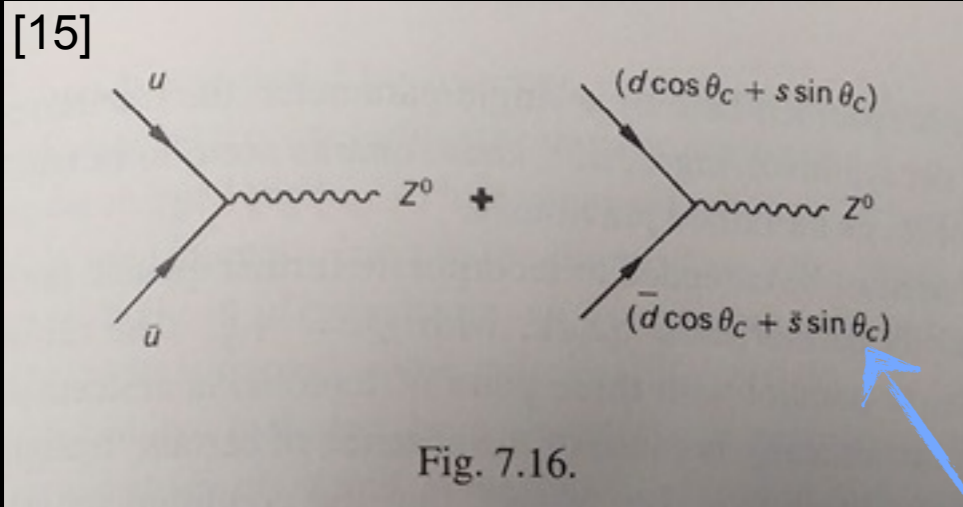
- Neutrale ströme ( $Z^0$ ) - keine flavour Änderung beobachtet

Glashow, Iliopoulos, Maiani: 1970

→ GIM Mechanismus

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

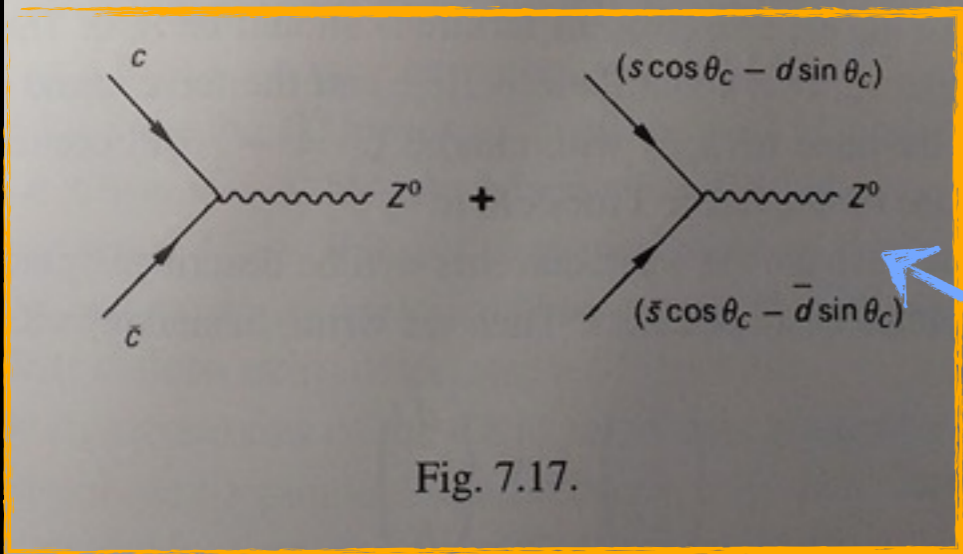
Neues Teilchen: „charm“ Quark



[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‘

EZ schwache WW

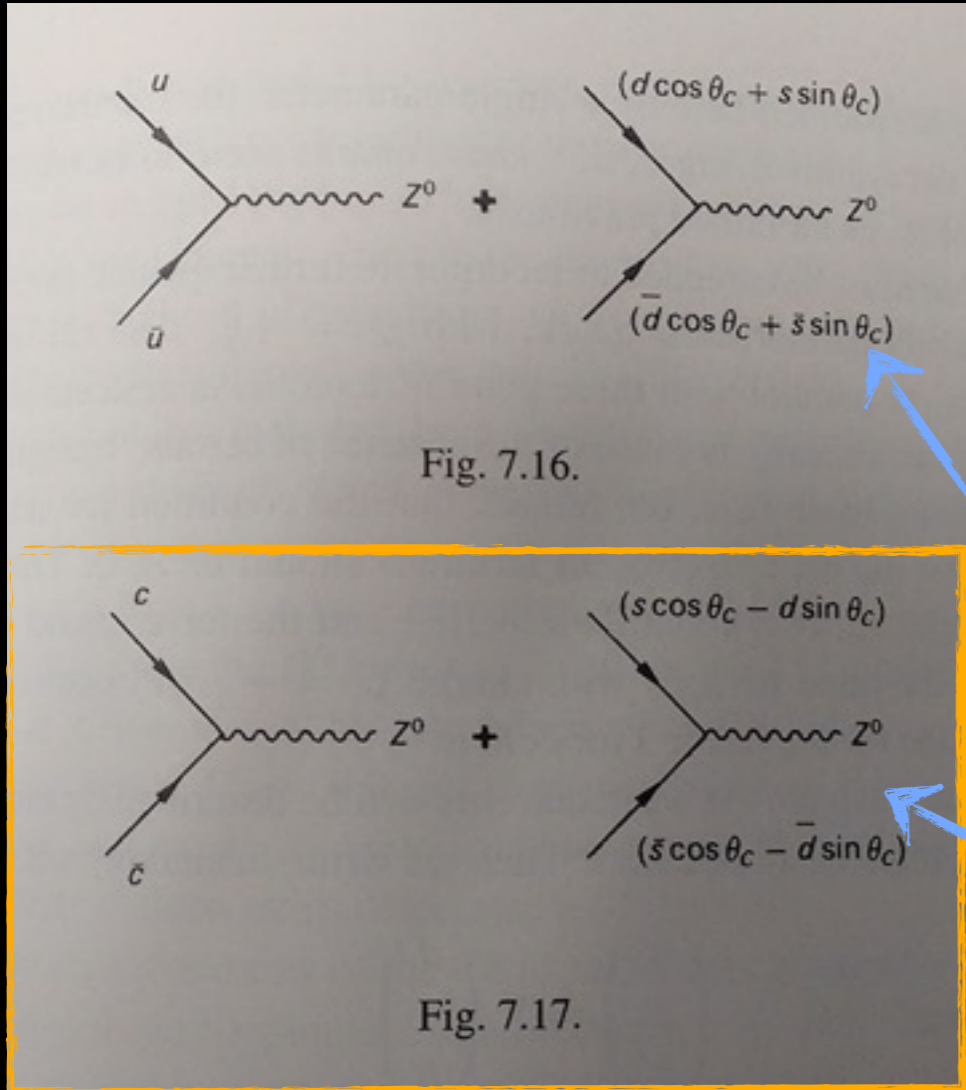
EZ starke WW

Glashow, Iliopolus, Maiani: 1970

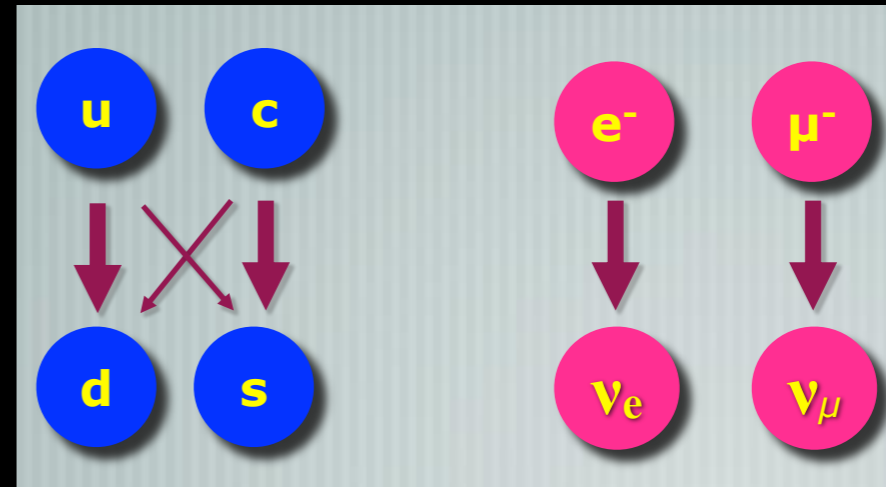
$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_C & \sin \theta_C \\ -\sin \theta_C & \cos \theta_C \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} d \\ s \end{pmatrix}$$

Drehung im ‚flavour‘ Raum

→ GIM Mechanismus



Neues Teilchen: „charm“ Quark



Quantenmechanisch: Interferenz dieser Diagramme

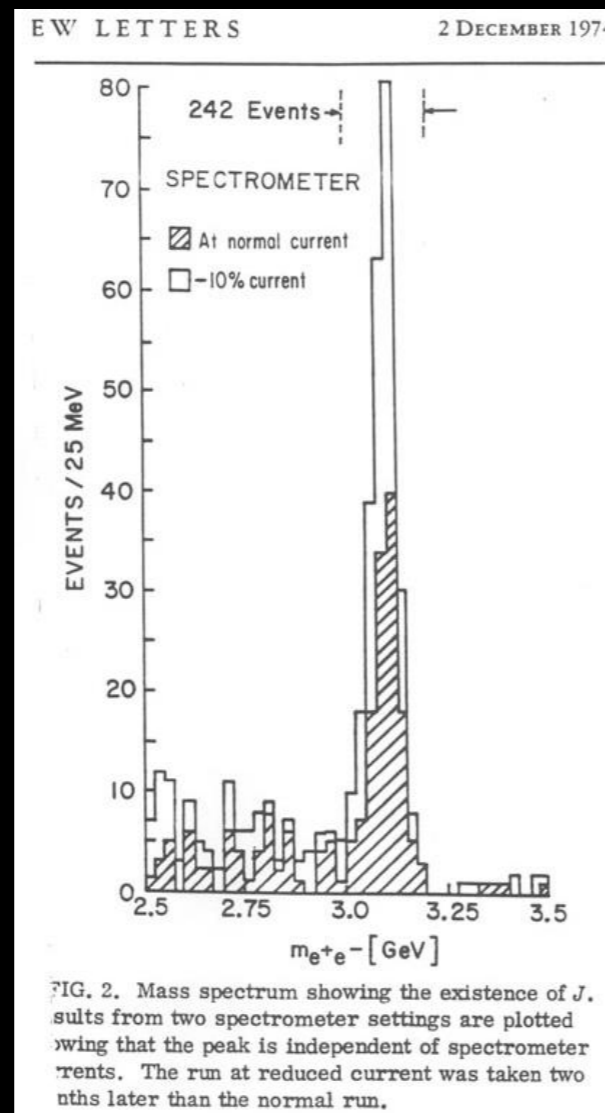
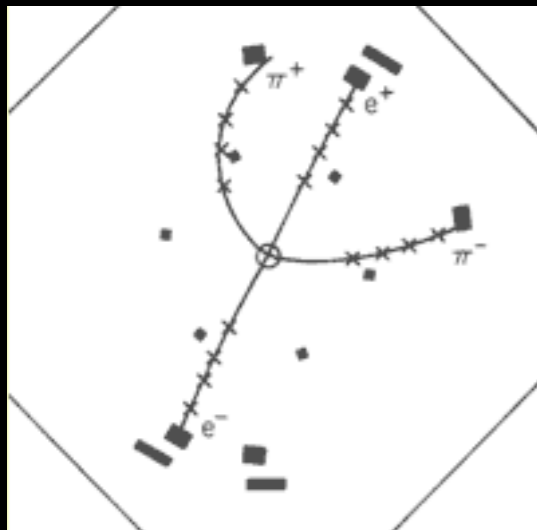
# Nachweis des charm - Quarks

- Entdeckt durch gezielte Experimente
  - Gleichzeitig von 2 unabhängigen Gruppen

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

Richter:  $\Psi$

Ting: J

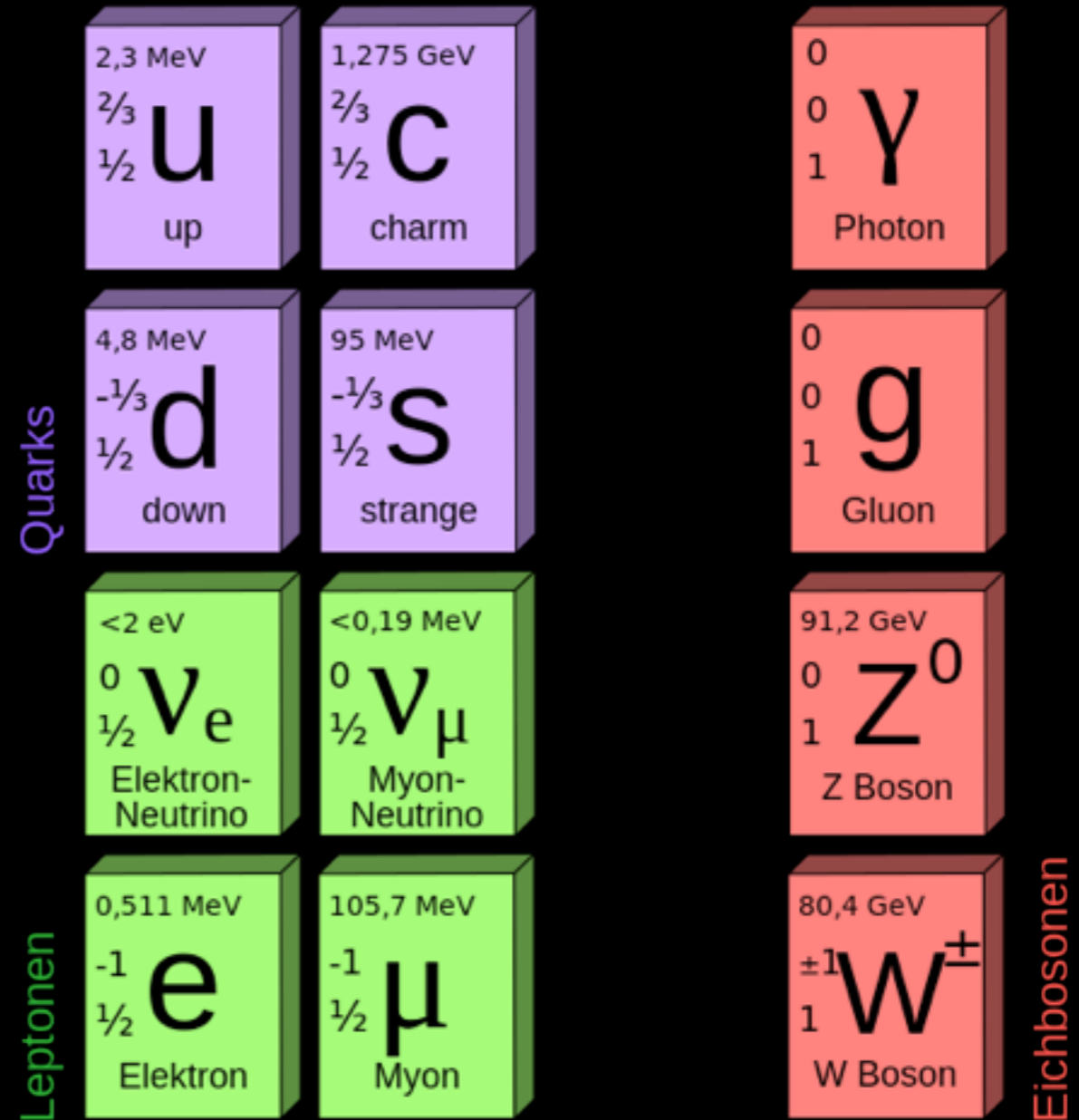


Teilchen wurde  $J/\Psi$  genannt!

- 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 ( $S=1$ )



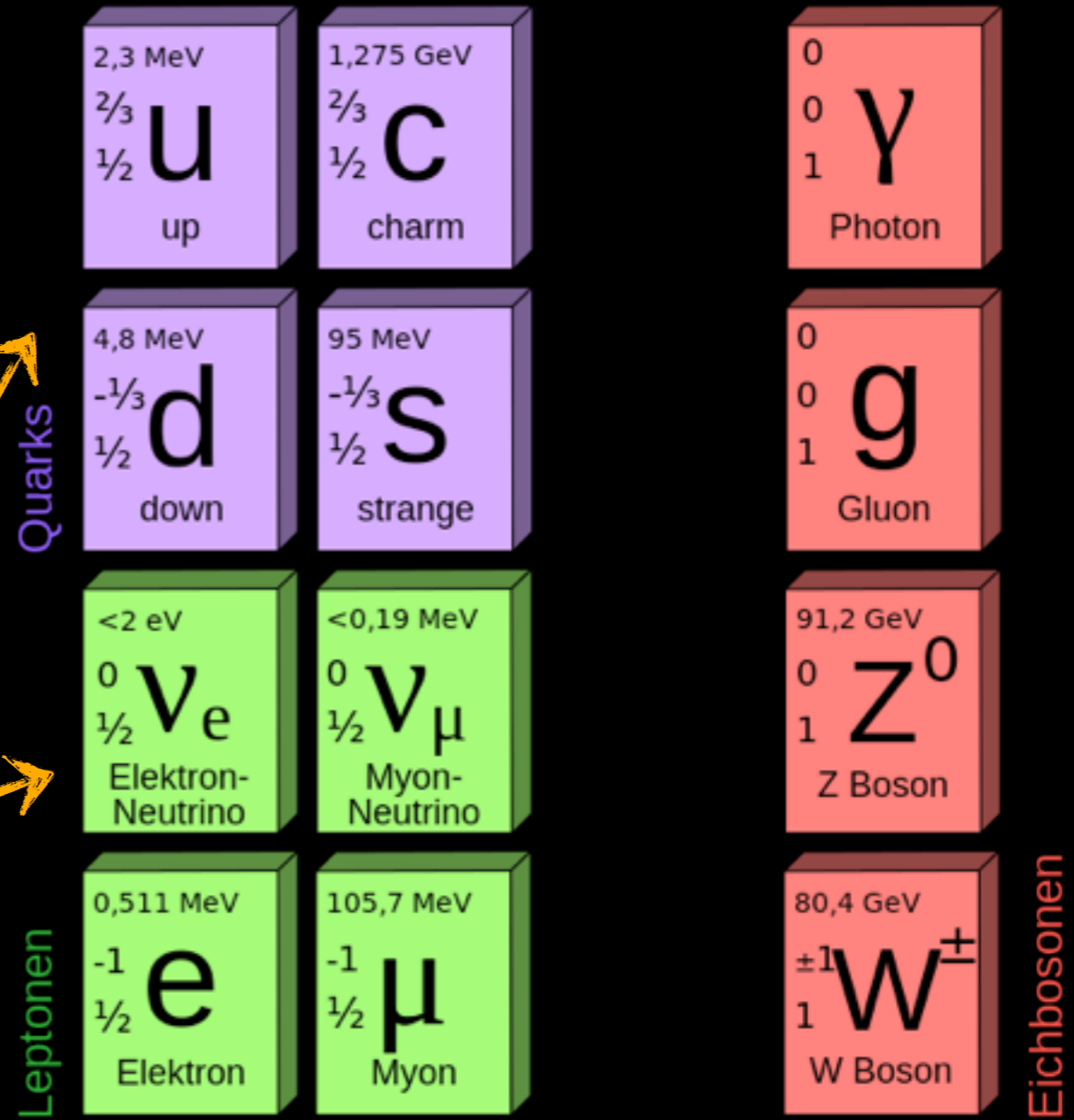


# Was wir bisher kennengelernt haben

## • Elementare Teilchen

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

Doublets der schwachen Ladung



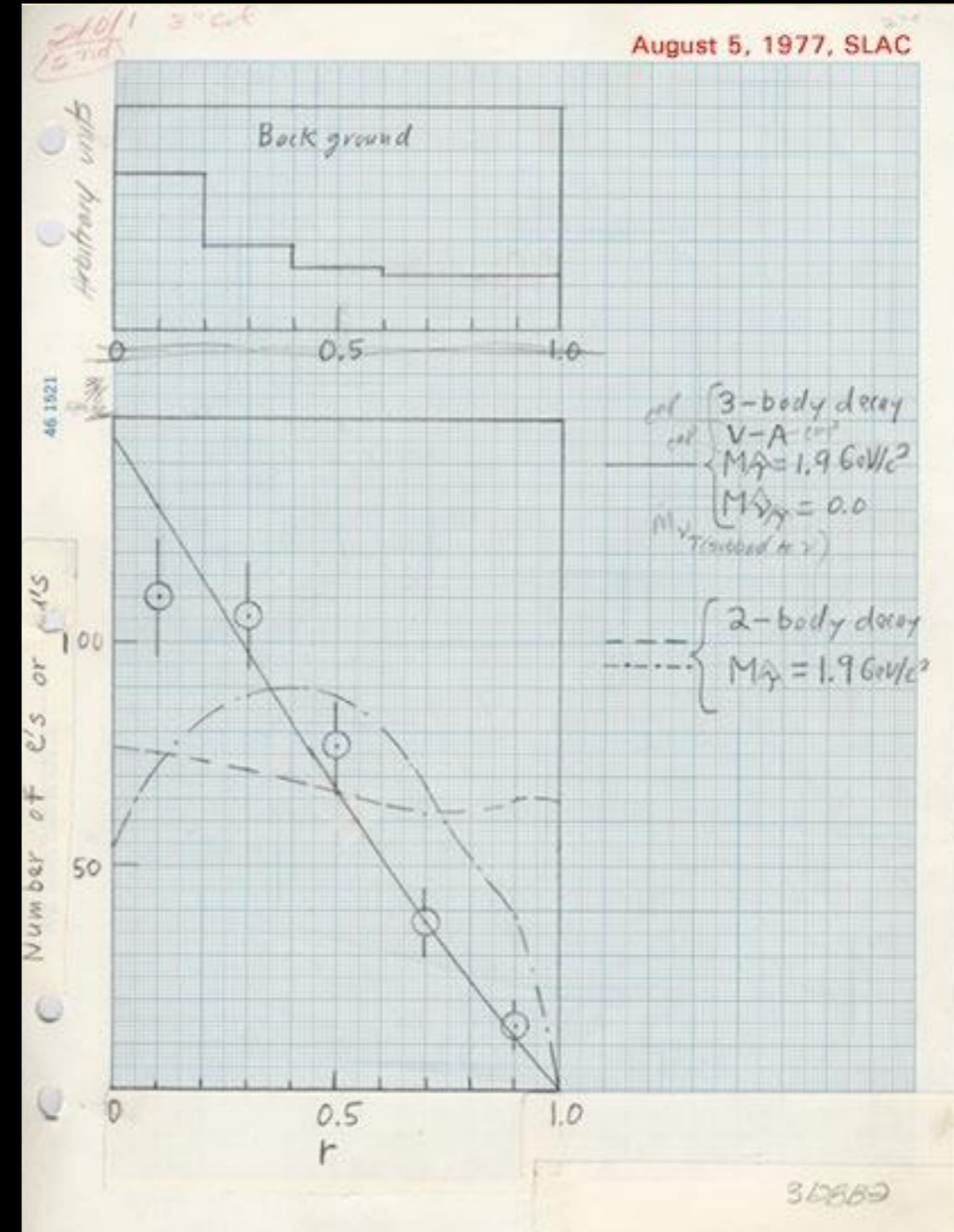
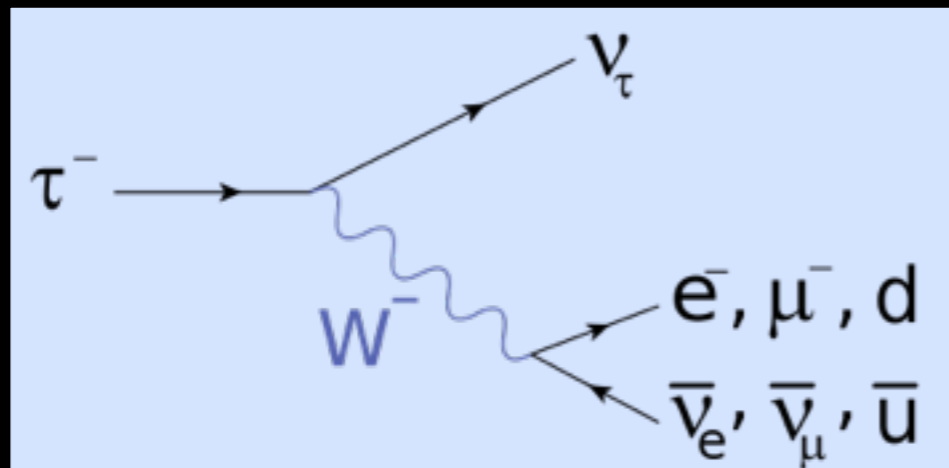
# Und was ist das jetzt?

- 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

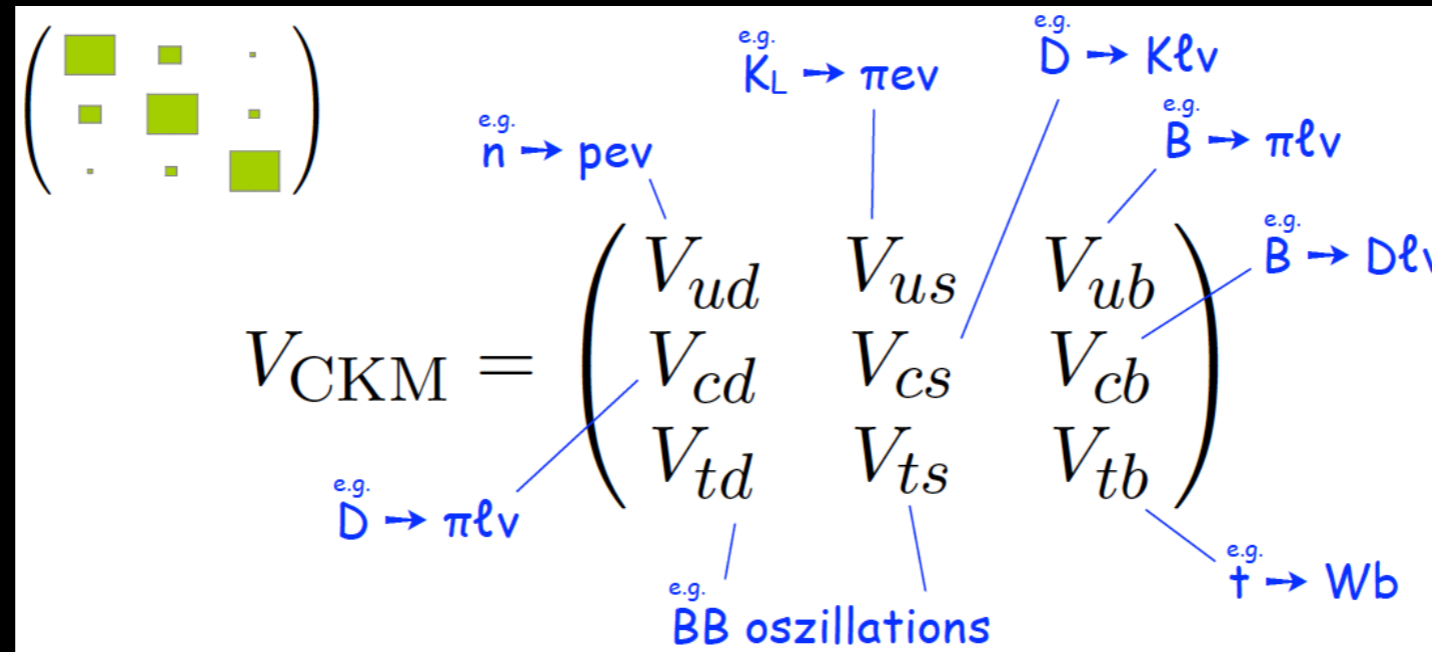
	1.	2.	3.	Familie / Generation
Quarks	2,3 MeV $\frac{2}{3}$ <b>u</b> up	1,275 GeV $\frac{2}{3}$ <b>c</b> charm	173,07 GeV $\frac{2}{3}$ <b>t</b> top	0 0 1 <b><math>\gamma</math></b> Photon
	4,8 MeV $-\frac{1}{3}$ <b>d</b> down	95 MeV $-\frac{1}{3}$ <b>s</b> strange	4,18 GeV $-\frac{1}{3}$ <b>b</b> bottom	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?

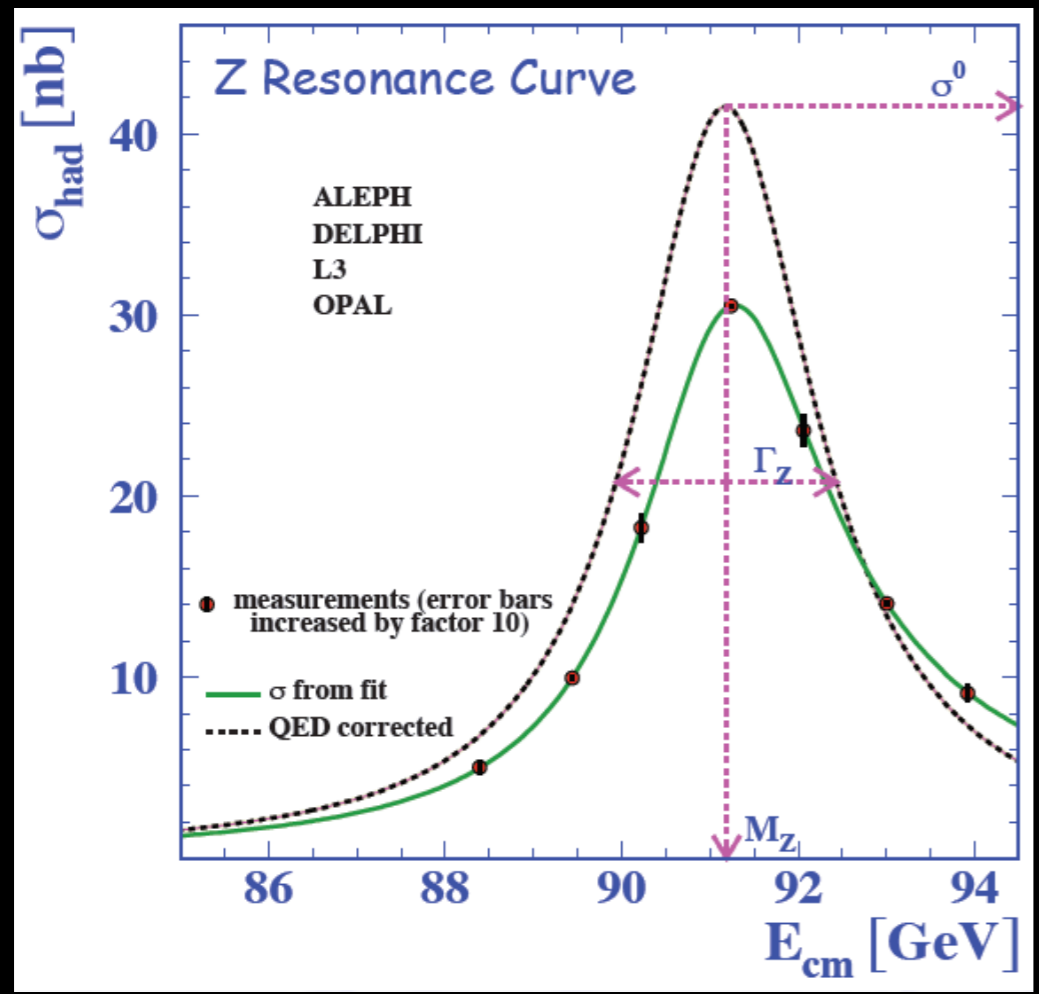
- Untersuchung des Z-Teilchens im Detail:

Breit-Wigner Kurve  
→ harmonischer Oszillator

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

Exakte Form abhängig von

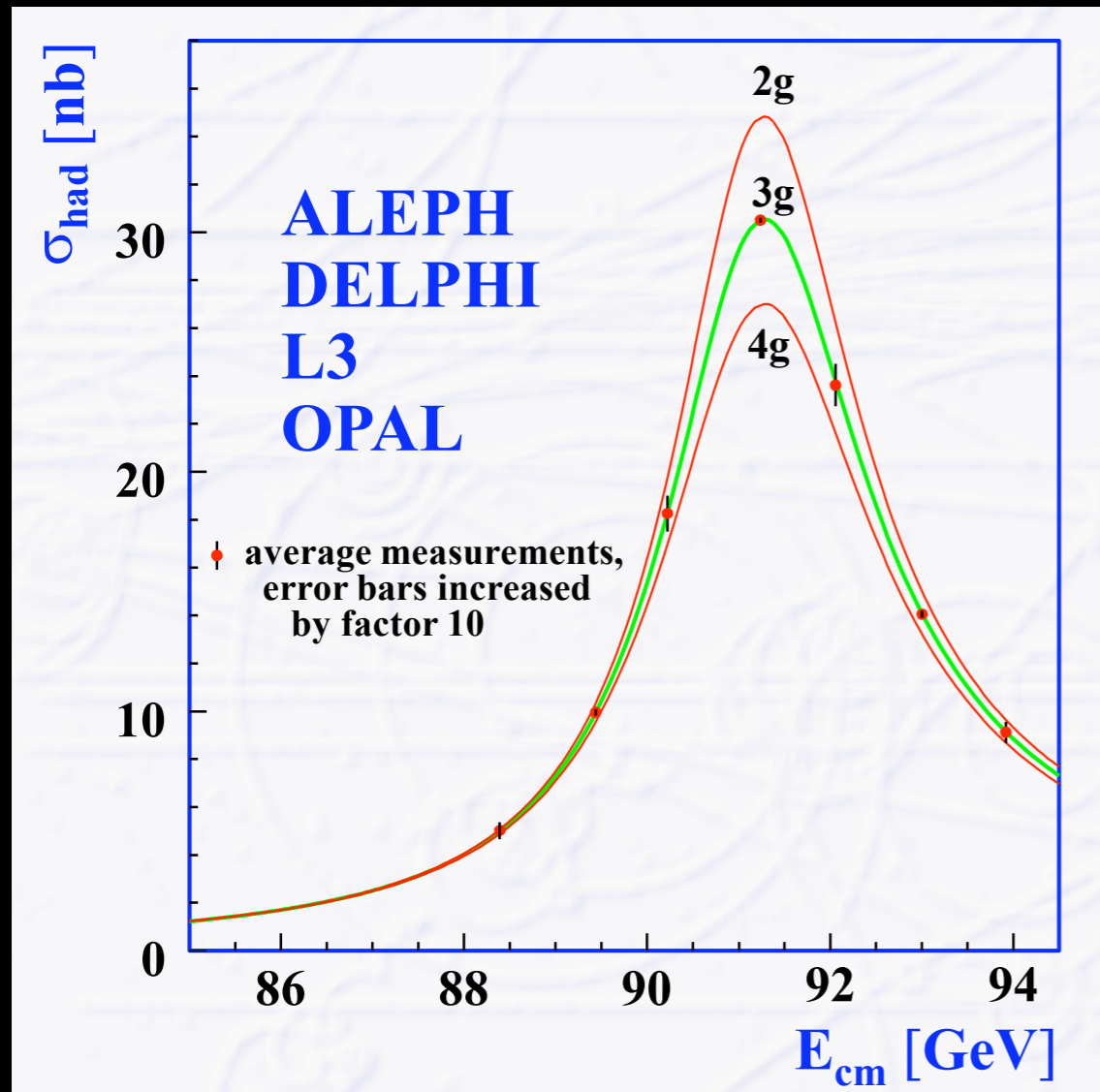
- Vakuumfluktuationen
- Abstrahlung von Photonen
- Virtuelle Photonen zwischen Leptonen



# 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 $\frac{2}{3}$ <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 1 <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 1 <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 1 <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 ist noch unklar?

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

# Frage - haben Bosonen Anti-Teilchen?

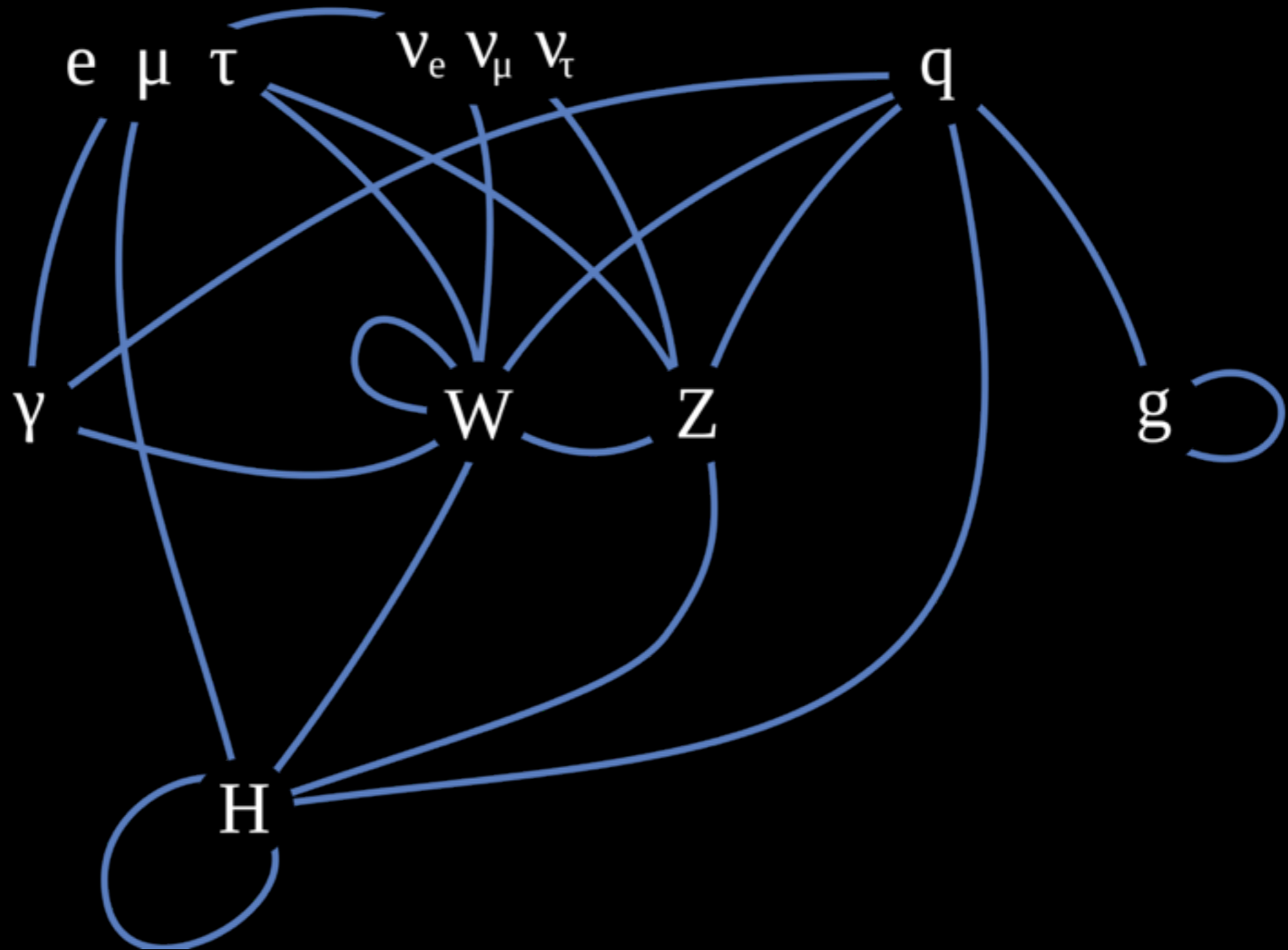


- Ja
- Allgemein: Teilchen die keine Ladung haben sind ihre eigenen Anti-teilchen
  - Ladungen: Elektrisch, Schwach, Farbe

# 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



- Text
  - Text
    - Text

