

Kinetische Gastheorie

Boltzmann

Maxwell

Elektromagnetismus

Newton

Teilchen

Felder

Universum

Technologien

Elektromagnetismus Schwache WW Starke WW

Detektor Beschleuniger

1895

e^-

Brownsche Bewegung

Photon

Radioaktivität

1900

Atom

1905

1910

Kern

Spezielle Relativität

1920

p^+

Quantenmechanik
Welle-Teilchen Dualismus
Spin/Fermion-Boson

Höhenstrahlung

Allgemeine Relativität

Geiger

Wolken

1930

e^+

n

Antimaterie

Fermi Theorie

Yukawa
 π Austausch

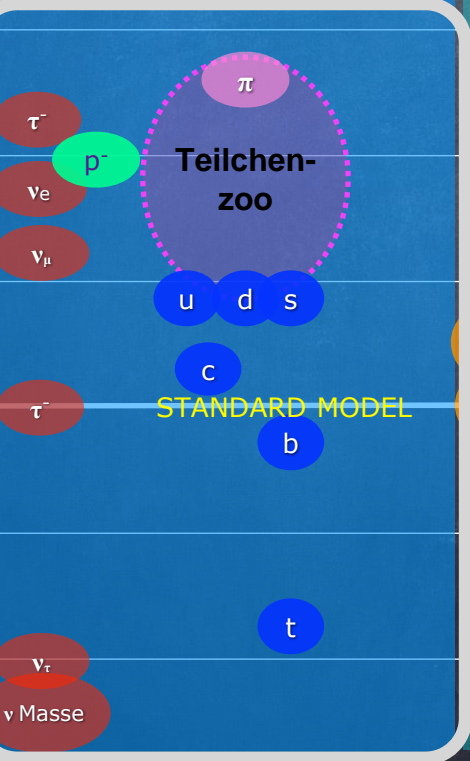
Galaxien;
Ausdehnung des Universums

Zyklotron

μ^-

Dunkle Materie

1940



1950

τ^-

p^-

π

Teilchenzoo

QED

P, C, CP Verletzung

Kernfusion

Big Bang Nukleosynthese

Blasenkammer

Synchrotron

1960

ν_e

ν_μ

Higgs

W Bosons

Kosmische Hintergrundstrahlung

e^+e^- Ring

1970

u d s

c

GUT

EW Vereinigung

QCD Farbladung

Vieldrahtkammer

Strahlkühlung

1975

τ^-

STANDARD MODEL

SUSY

Inflation

p^+p^- Ring

1980

b

Superstrings

W

Z

g

Inhomogenität der Hintergrundstrahlung (COBE, WMAP)



WWW

1990

t

3 Teilchenfamilien

Dunkle Energie

GRID

2000

ν_τ

ν Masse

2010

Felder

'Starke' Wechselwirkung

Was hält Protonen und Neutronen im Kern zusammen

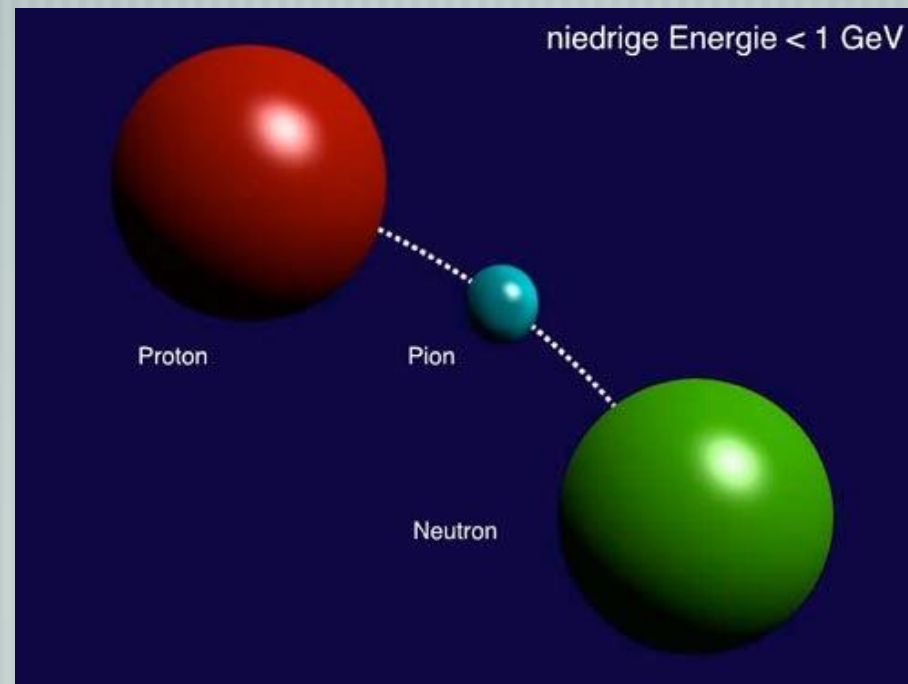
- 1) Die Kraft muss stärker als die elektromagnetische Kraft sein
- 2) Kurze Reichweite ($\sim 1-2$ fm), um die Grösse des Atomkerns zu erklären

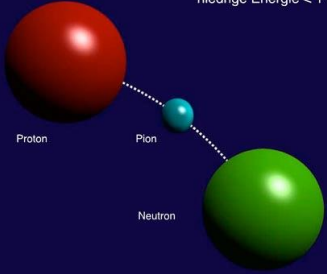
Yukawa's idea:

ein Teilchen mit einer 'mittelgrossen' Masse vermittelt diese
'starke' Kraft (das 'Pion')



Yukawa (1934)

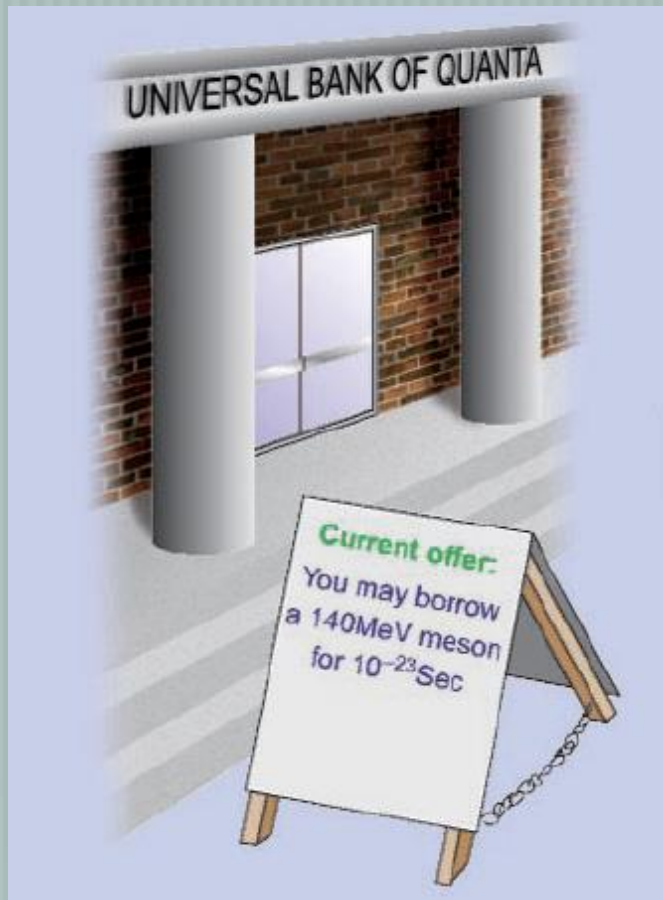




Felder

'Starke' Wechselwirkung

Austauschkräfte: die Unschärferelation in der Praxis

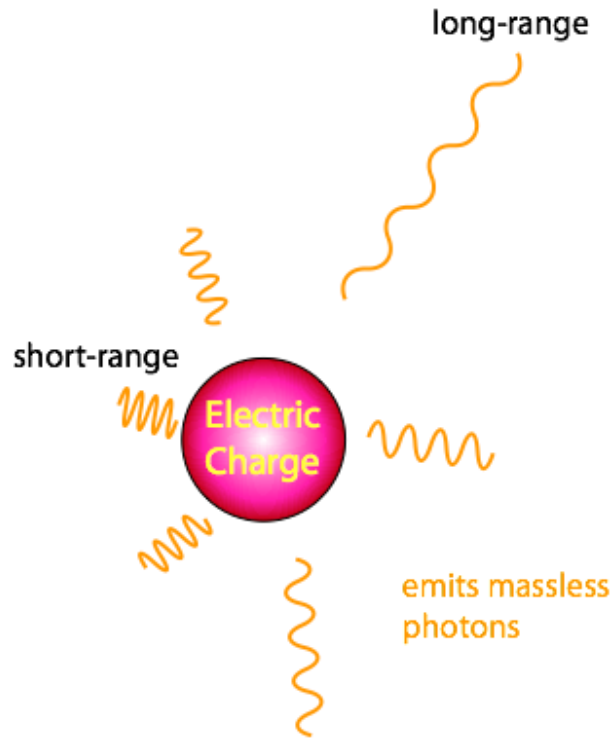


$$\Delta E \Delta t \geq \hbar$$



Unschärferelation:
1.4 fm ~ 140 MeV

Elektromagnetische vs 'Starke' WW



$$V(r) = -e^2 \frac{1}{r}$$

Coulomb law



emits massive pions

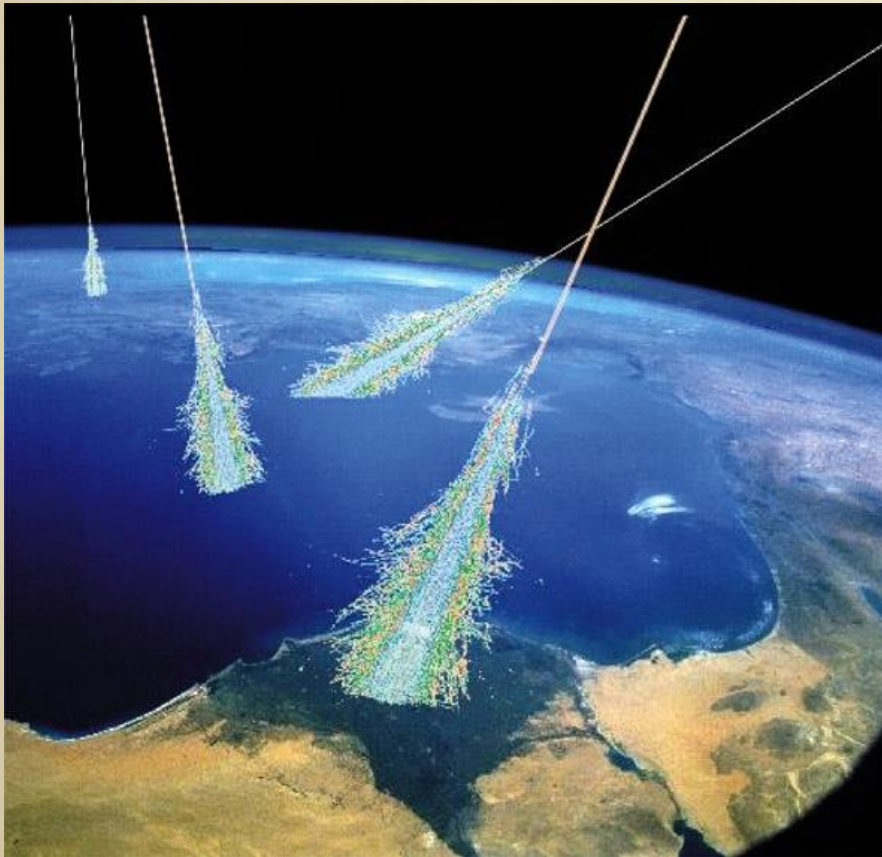
$$\Delta E \Delta t \geq \hbar \quad (\Delta E \sim m)$$

$$r = c \Delta t = \frac{\hbar c}{m} \sim \frac{200 \text{ MeV fm}}{m}$$

$$V(r) = -g^2 \frac{e^{-mr}}{r}$$

Yukawa potential ~ Modified "Coulomb" law

Yukawa's 'Pion' (1934): jeder suchte jetzt nach einem Teilchen mit Masse 100-200 MeV.
Es gab aber (noch) keine Beschleuniger mit hinreichender Energie.
Viktor Hess hatte aber 1913 die 'kosmische Höhenstrahlung' entdeckt.
Deshalb kletterten Teilchenphysiker auf Berggipfel mit ihren photographischen Emulsionen.



Ein neues Teilchen im richtigen Massenbereich wurde entdeckt

Aber: lange Reichweite in Materie !! ?

Das konnte nur bedeuten, dass dieses Teilchen nicht an der starken Wechselwirkung teilnahm - es konnte also kein Pion sein.

Muon = 'schweres Elektron' (206 x m_e)

I. Rabi: "WER HAT DAS BESTELLT?"

π

QCD

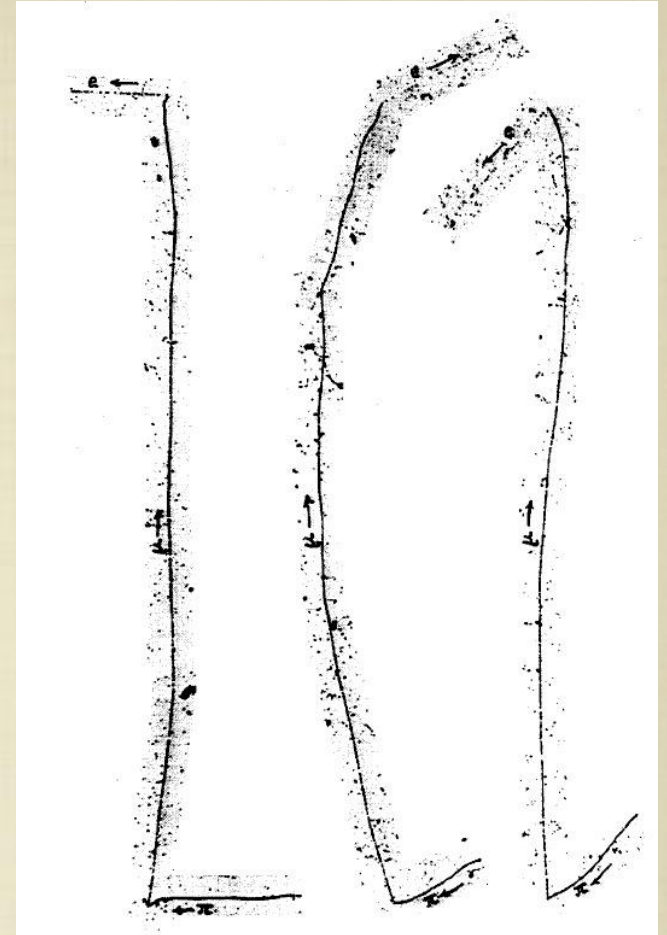
1947

1947: Entdeckung des (geladenen) Pions



Cecil Powell

Ouff!

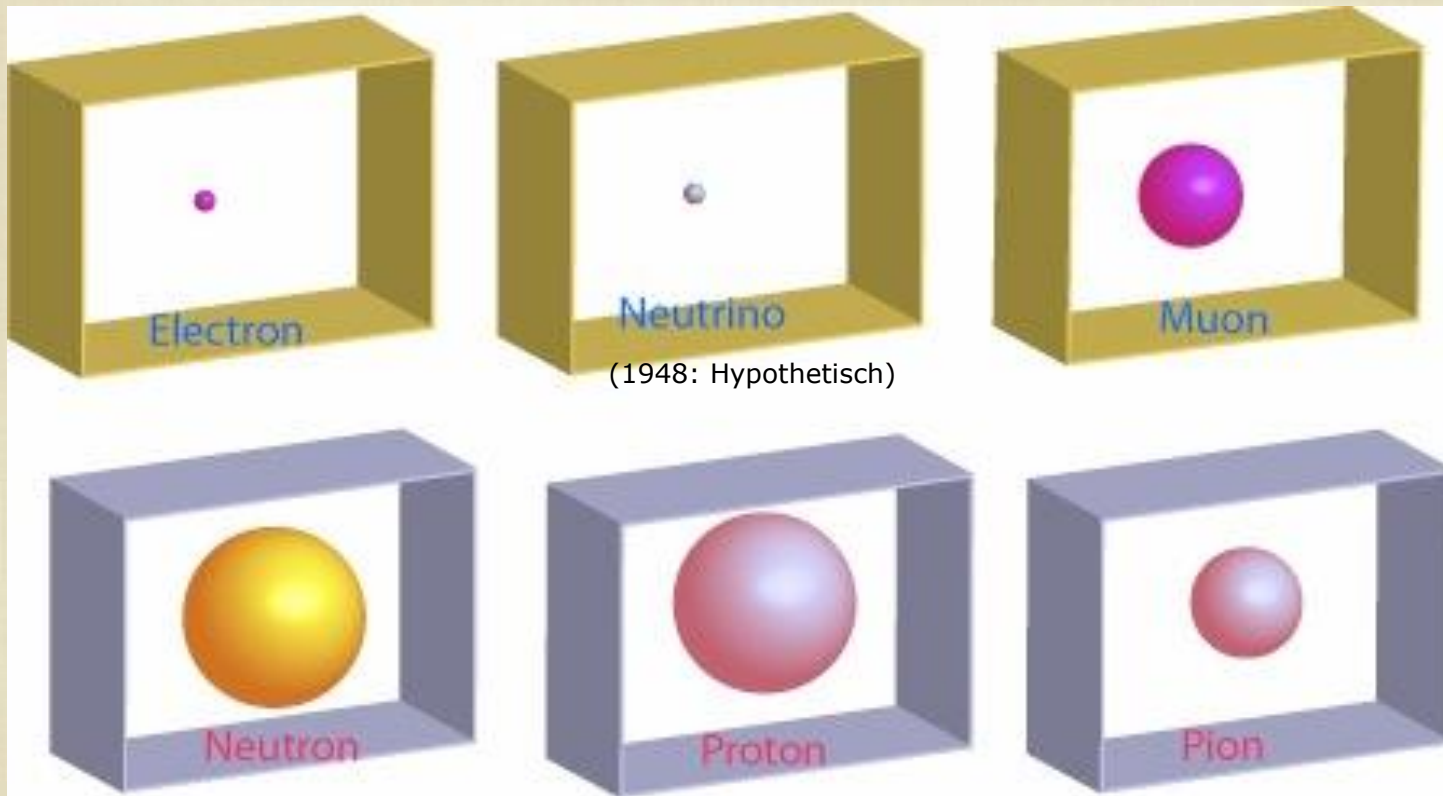


Photographische Emulsion

Kosmische Strahlen in **grosser Höhe** (Pic du Midi, Pyrenees)

Pionenspuren wurden im Mikroskop identifiziert

1948: Pionen am Berkeley Zyklotron produziert





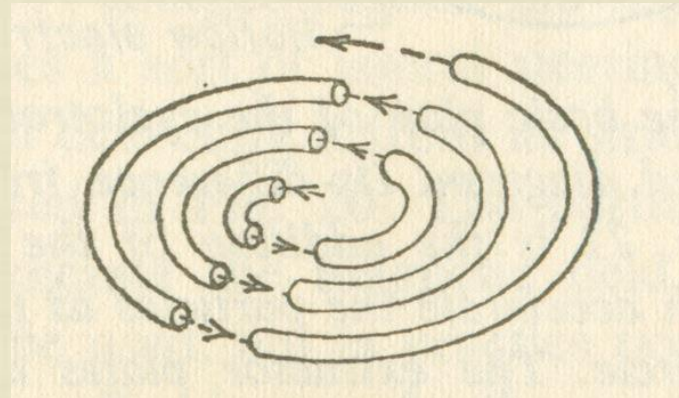
Rolf Wideroe, 1928

"Kosmische Strahlung aus Menschenhand"

Beschleuniger



Ernest Lawrence, 1931



Zyklotron

Ein Magnetfeld zwingt Teilchen auf eine Kreisbahn; Teilchen werden durch elektrische Felder in den Zwischenräumen beschleunigt

1931: 80 keV

1932: 1000 keV

1939: 19 MeV*

1946: 195 MeV ("synchrocyclotron")

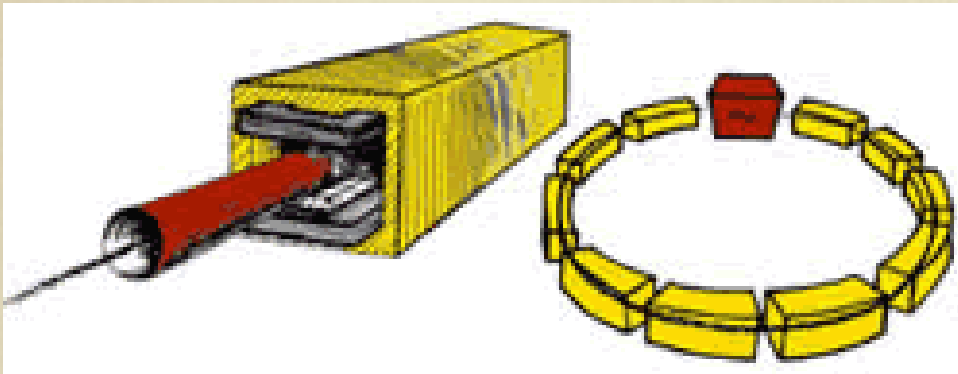
* erste Probleme mit relativistischer Massenvergrößerung



Linearbeschleuniger

Beschleunigung der Teilchen in den Räumen zwischen den Elektroden
Die Beschleunigungsfrequenz wird der Bewegung der Teilchen angepasst

Beschleuniger (2)



Synchrotron

Ähnlich dem Zyklotron, aber man ändert das magnetische Feld so dass die Teilchen auf einer Kreisbahn mit konstantem Radius bleiben (hilft auch bei der relativistischen Massenvergrößerung)

1947 (US) Synchrotron-Beschleuniger

Brookhaven (1952) - 3 GeV

Berkeley (1954) - 6.2 GeV (Antiproton!)

1954: Europa steigt ins Rennen ein

CERN (1959) - 24 GeV

Brookhaven (1960) - 30 GeV

Detektoren

Geigerzähler
Nebelkammern
Emulsionen
Blasenkammer

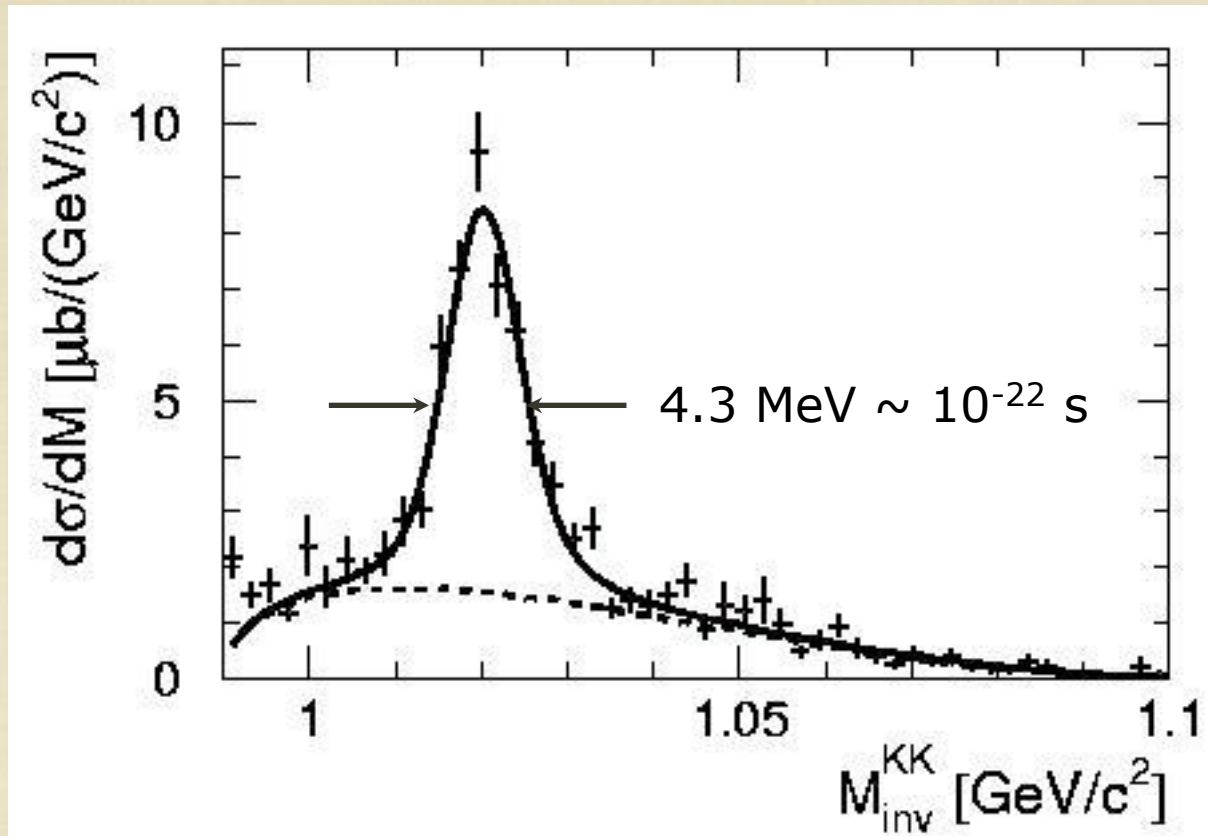
Cerenkov Detektoren
Photomultiplier
Funkenkammern

Nach 1967:

Drahtkammern
Driftkammern
Kalorimeter

QCD

Teilchenkollisionen produzieren **'Resonanzen'**



Resonanz = 'Peak' im invarianten Massen-Spektrum von zwei oder drei Teilchen

Lebensdauer der Resonanz $\sim 1 / \text{"Breite"}$ der Resonanz [$\sim 10^{-21} \dots 10^{-23} \text{ s}$]

Teilchen ZOO

Mit den neuen Beschleunigern und Detektoren wuchs die Zahl der bekannten 'Elementarteilchen' auf mehr als 200 an - der 'Teilchenzoo'

π^+ π^- π^0
 Pions
 η'
 Eta-Prime
 η
 Eta
 ρ^+ ρ^- ρ^0
 Rho
 K^+ K^- K^0
 Kaons
 ϕ
 Phi
Mesonen

Δ^{++} , Δ^+ , Δ^0 , Δ^-
 Delta
 Λ^0
 Lambda (strange!)
 Σ^+ , Σ^0 , Σ^-
 Sigma (strange!)
 Ξ^0 , Ξ^-
 Sigma(very strange!)
Baryonen

Gab es eine Sub-Struktur dieser Teilchen ?

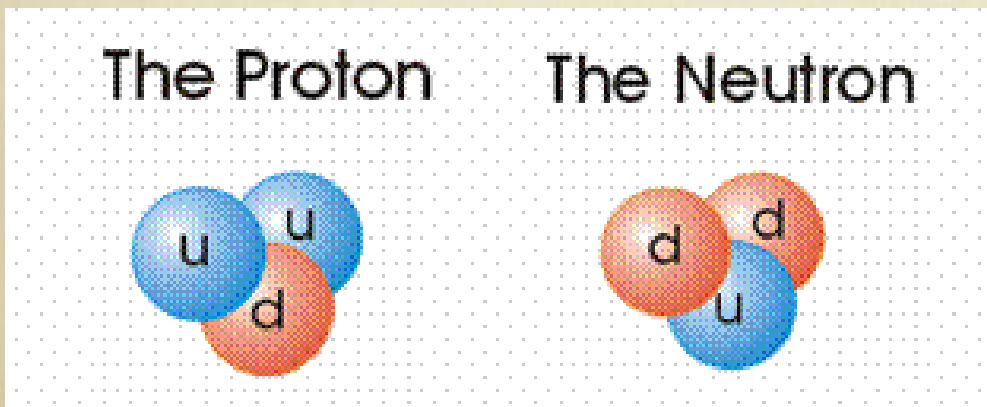
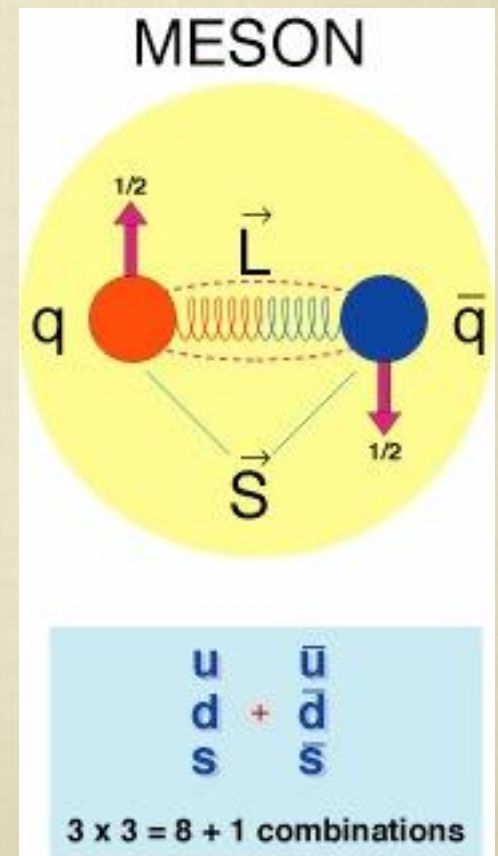
SU(3) - Ein Klassifizierungsschema mit 'quarks'



Fig. 6.35 Murray Gell-Mann (b.1929).

Gell-Mann, 1963
(G. Zweig, 1963, CERN)

- 1) 3 Arten von "quarks" : up, down, strange
- 2) Mit elektrischer Ladung: $+2/3$, $-1/3$, $-1/3$
- 3) Nur bestimmte Kombinationen möglich:
 Meson = quark+antiquark
 Baryon = quark(1) + quark(2) + quark(3)

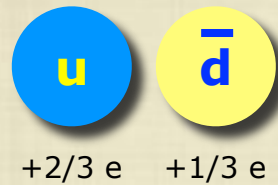


QCD

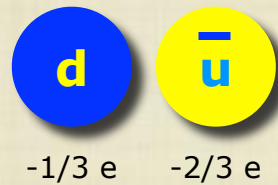
Einige der bekannteren Mesonen (quark+antiquark):



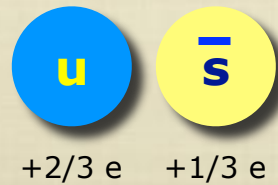
π^0



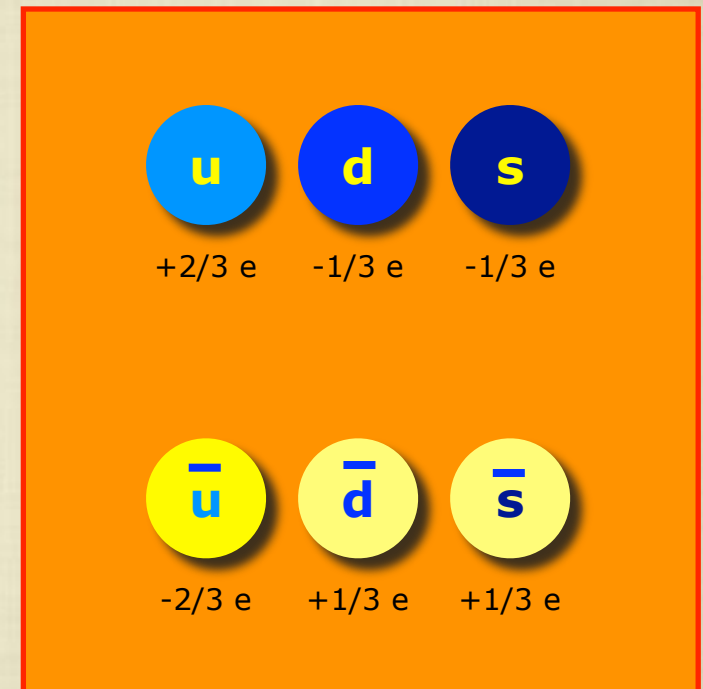
π^+



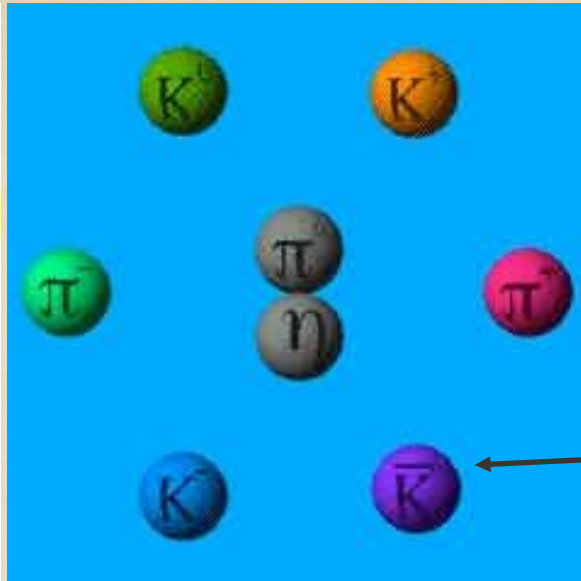
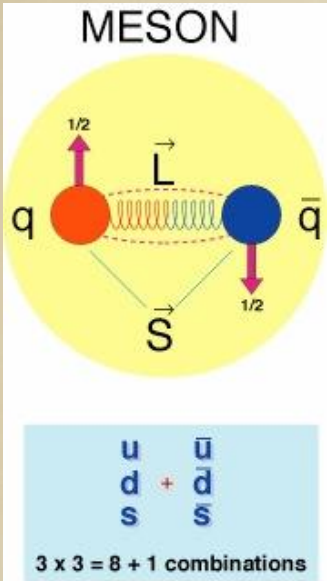
π^-



K^+



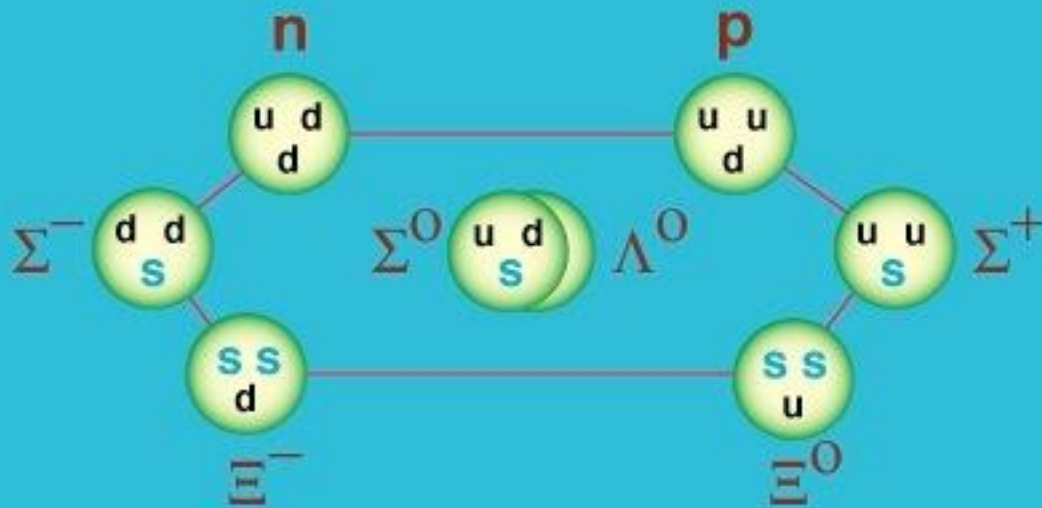
QCD



← Pion, Eta-meson

← Kaonen besitzen ein 'strange' Quark

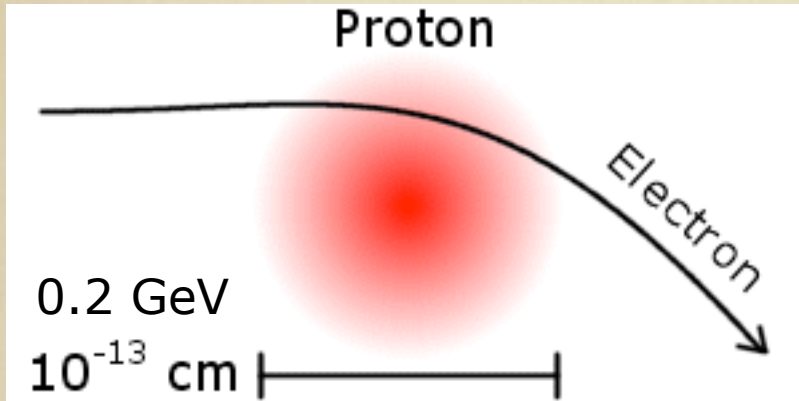
SPIN 1/2 BARYON OCTET



Die leichtesten Baryonen:
 Proton, Neutron;
 Lambda, Sigma, Xi

Entdeckung der Quarks

Elektronenstreuung an Protonen

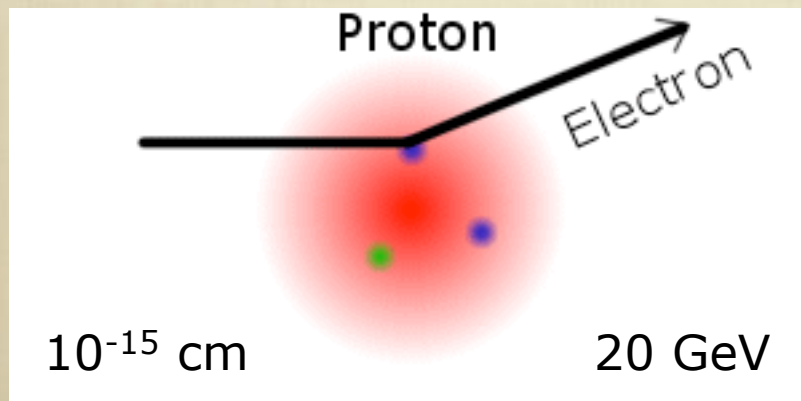


1956 Hofstadter: Messung des Protonenradius



Stanford Linear Accelerator Centre

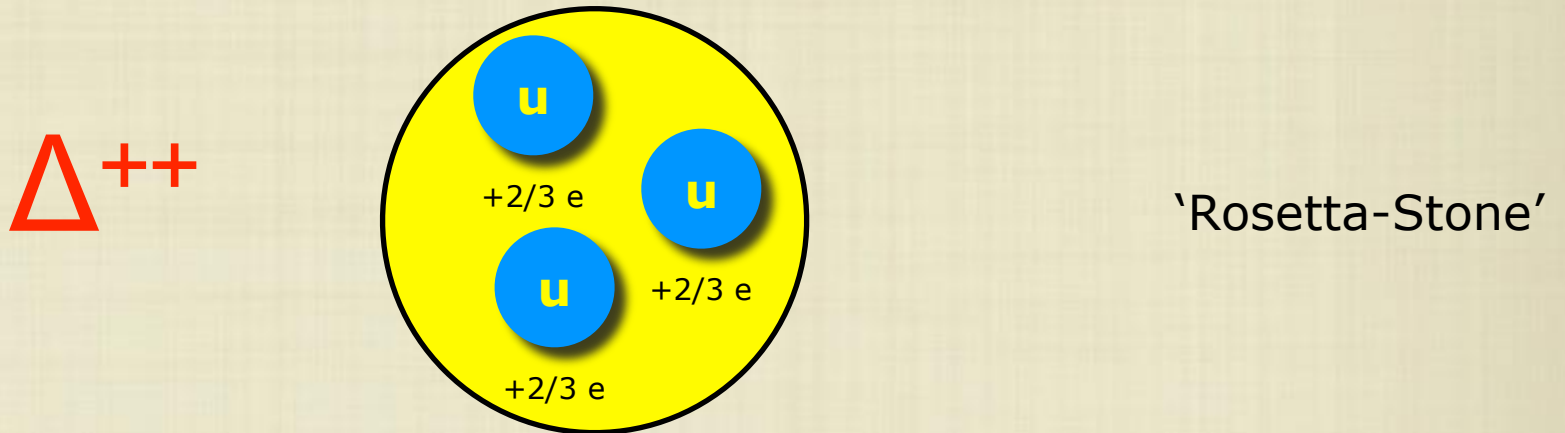
**1967 Friedmann, Kendall, Taylor (SLAC): ~ Rutherford experiment mit Elektronen
--> es gibt drei 'harte' (punktförmige) Streuzentren im Proton**



Die gemessenen Querschnitte waren perfekt mit der Anwesenheit von 2 up- und 1 down-quark im Proton erklärbar.

Was hält die Quarks im Proton zusammen? Konzept der 'Farbladung'

PROBLEM: 'Fermionen' (Spin 1/2 - Teilchen wie z.B. Quarks) können nicht im gleichen Quantenzustand koexistieren (Pauli Prinzip)



In diesem Baryon (Delta++) musste es drei identische Quarks (up) mit parallelem Spin in einem symmetrischen Zustand geben.

Die drei Quarks müssen sich zumindest in einer Quantenzahl unterscheiden:
"colour"

(Bardeen, Fritsch, Gell-Mann)

QCD

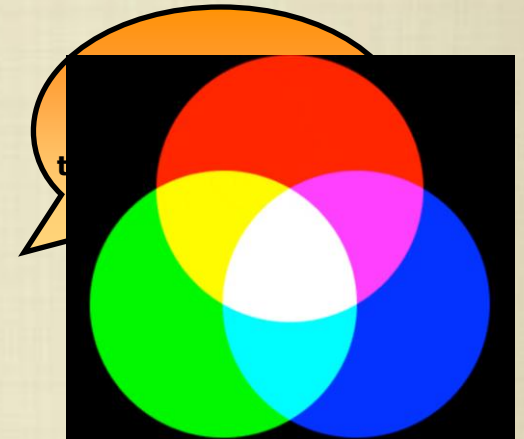
Quantum Chromo Dynamics

Theorie der starken 'Farb'wechselwirkung in Analogie zur QED

QCD: 3 verschiedene Ladungen ("colour") [rot, grün, blau]*

'Starke Ladung' zwischen Quarks wird von (8) Gluonen übertragen

- Träger der starken Wechselwirkung
- haben keine Masse
- $3 \times 3 - 1 = 8$ linear unabhängige Kombinationen (Gluonen)



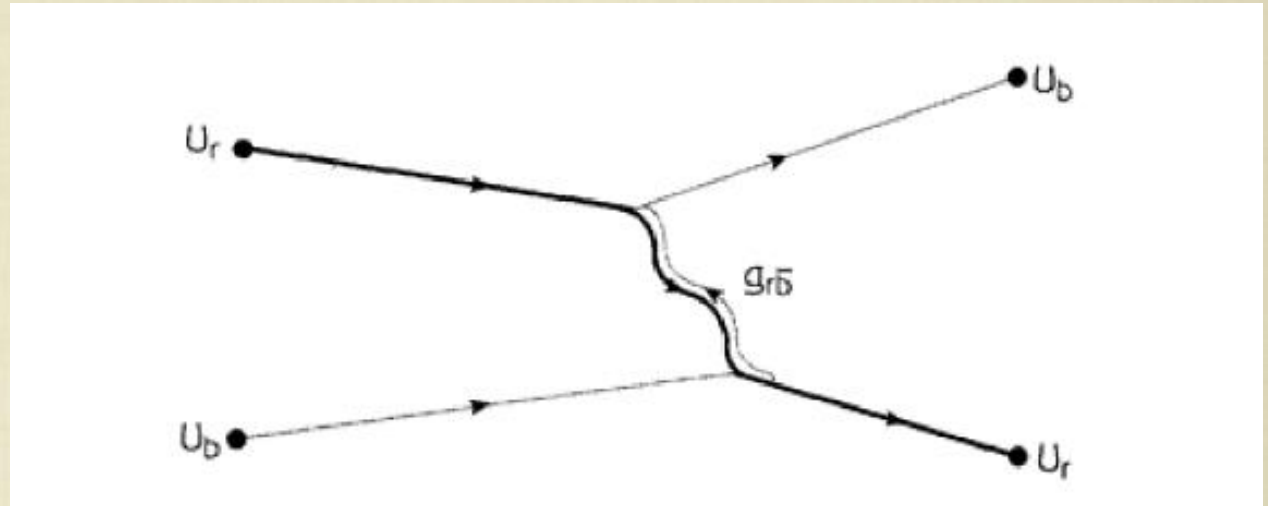
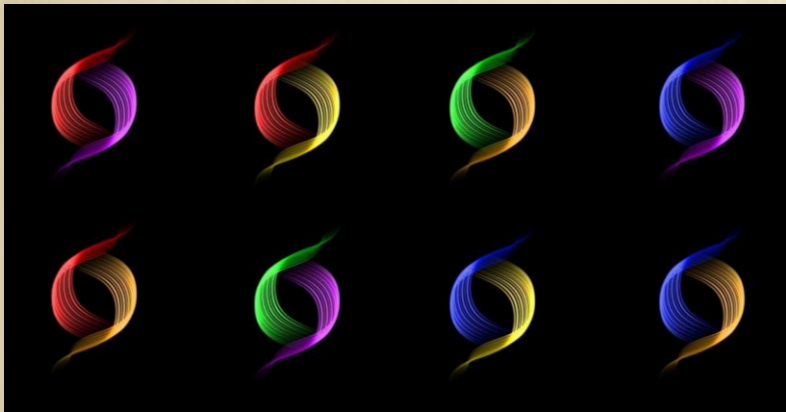
Dogma der QCD: Nur farb-neutrale Zustände können existieren

MESONS = Quark-Antiquark (z.B. "rot" + "anti-rot" = weiss)

BARYONS = 3-Quark Zustände (rot+grün+blau = weiss)

Gluonen verändern die “Farbladung” der Quarks

Gluonen-Farbladung = Doppel-Index



8 Gluonen mit ‘Farbladung’

$$G_1 \sim \frac{1}{\sqrt{2}} (r\bar{b} + b\bar{r})$$

$$G_2 \sim \frac{i}{\sqrt{2}} (r\bar{b} - b\bar{r})$$

$$G_3 \sim \frac{1}{\sqrt{2}} (r\bar{r} - b\bar{b})$$

$$G_4 \sim \frac{1}{\sqrt{2}} (b\bar{g} + g\bar{b})$$

$$G_5 \sim \frac{i}{\sqrt{2}} (b\bar{g} - g\bar{b})$$

$$G_8 \sim \frac{1}{\sqrt{6}} (r\bar{r} + b\bar{b} - 2g\bar{g})$$

$$G_6 \sim \frac{1}{\sqrt{2}} (g\bar{r} + r\bar{g})$$

$$G_7 \sim \frac{i}{\sqrt{2}} (g\bar{r} - r\bar{g})$$

1 “farbloses” Gluon

$$\frac{1}{\sqrt{3}} (r\bar{r} + b\bar{b} + g\bar{g})$$

Selbstwechselwirkung der Gluonen

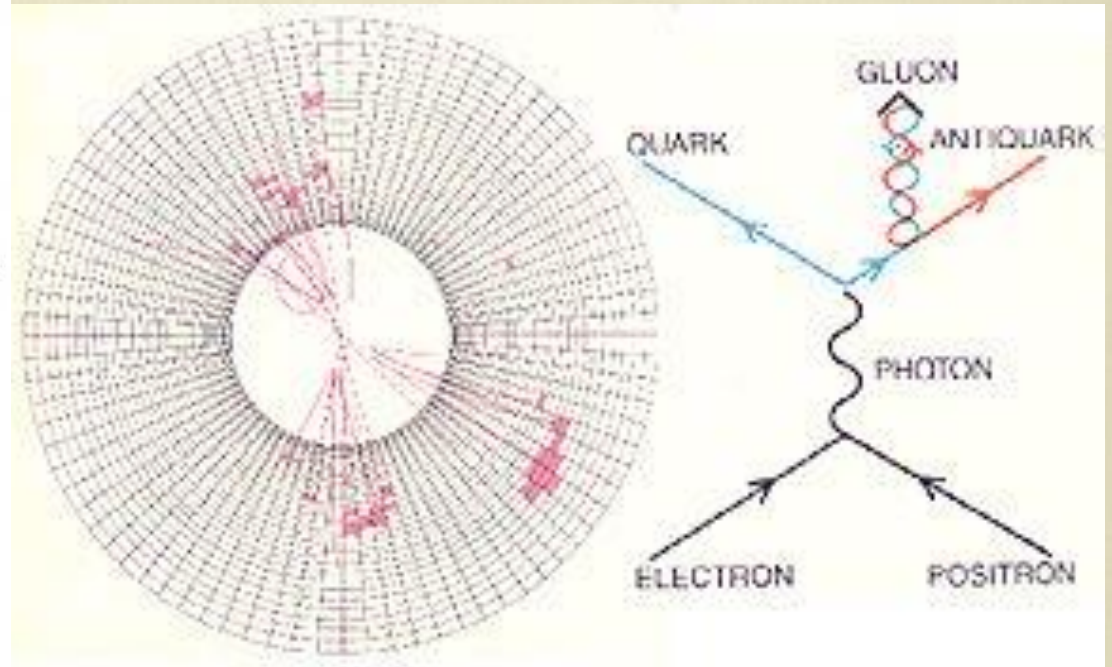
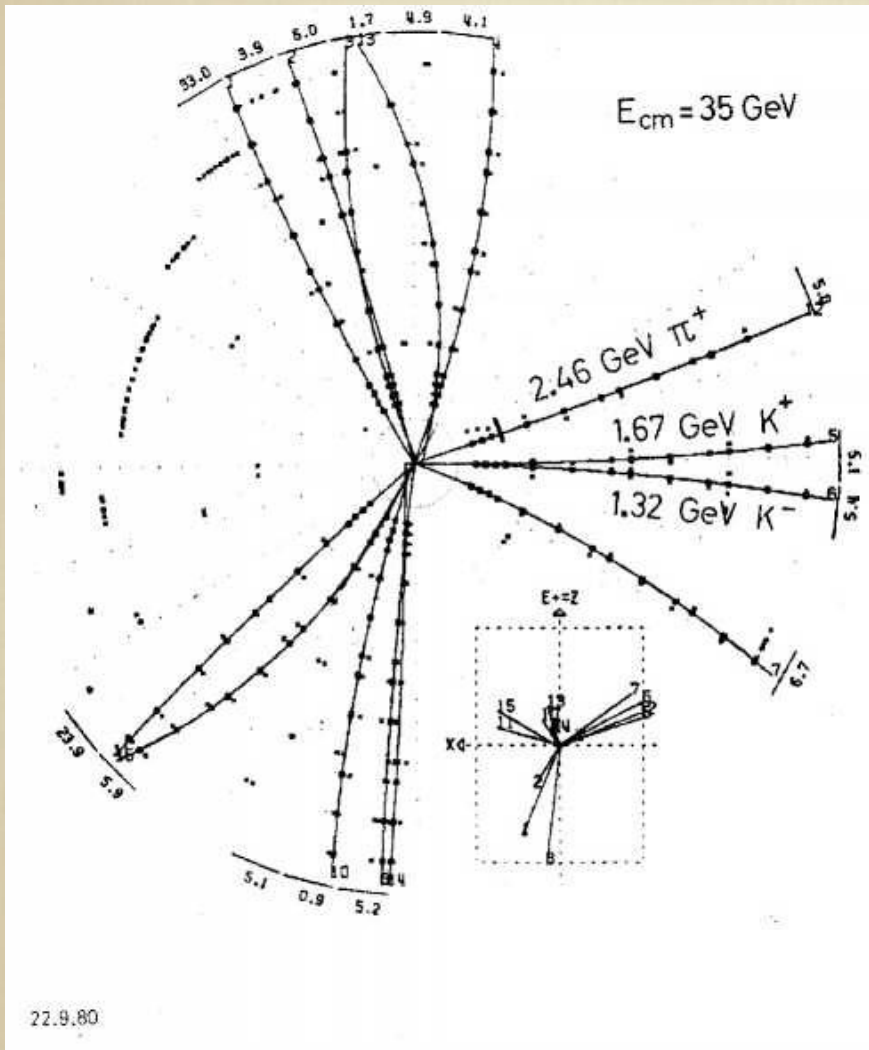
***GLUONEN sind selbst auch geladen
GLUON-GLUON WECHSELWIRKUNG !***



Bei großen Abständen wächst das Potential an (wegen der Selbstwechselwirkung der Gluonen)

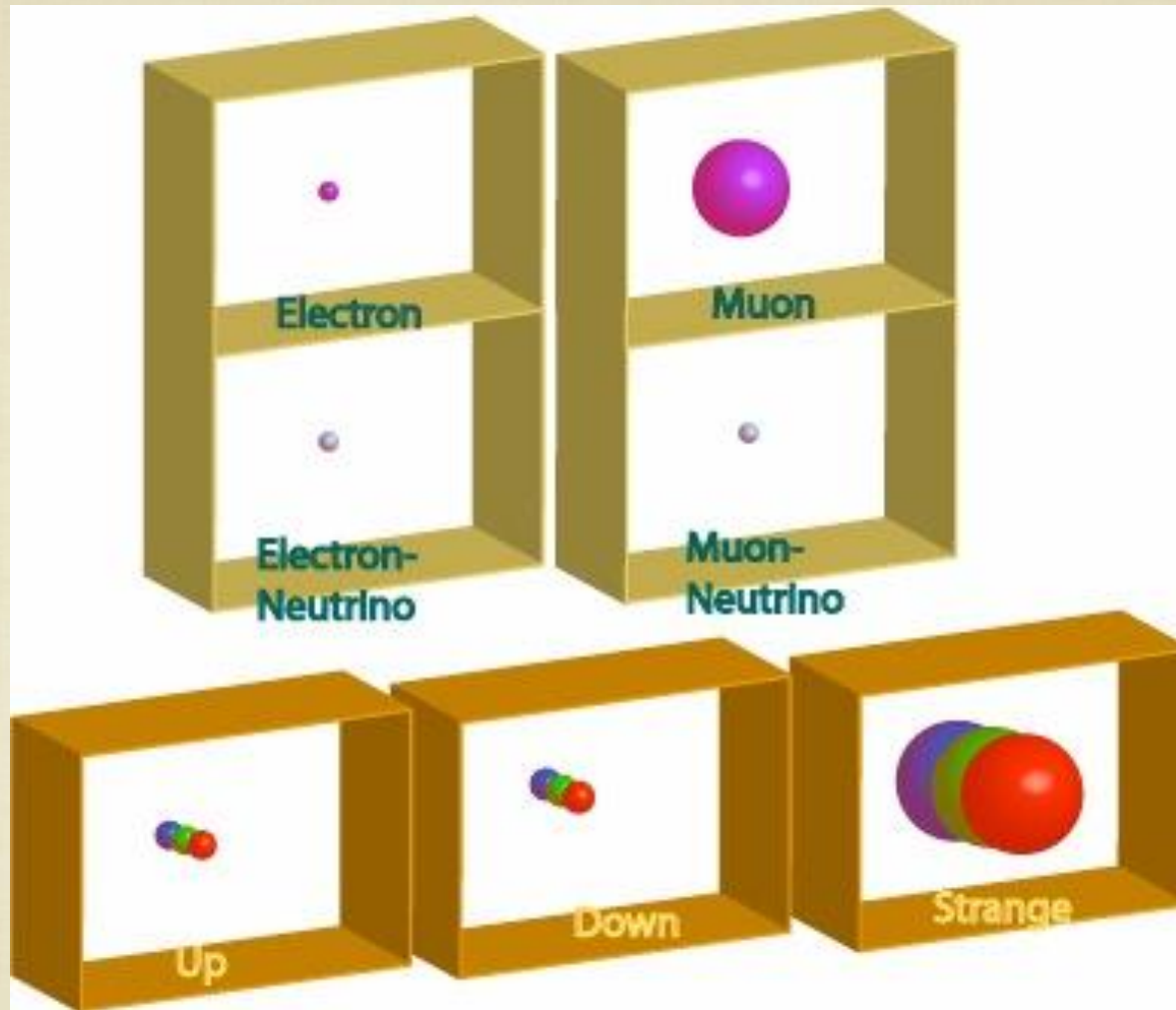
Bei kleinen Abständen (oder sehr hohen Energien) nimmt die Stärke der Wechselwirkung ab.

Entdeckung der Gluonen (DESY, 1979)



PETRA Storage Ring, 1979, DESY (Hamburg)

LEPTONS



QUARKS

**Gab es zwischen Elektronen/Muonen und Quarks einen Zusammenhang?
HINWEIS: 'elektroschwache' Wechselwirkung**

**Zurück zum Anfang des 20. Jahrhunderts:
eine andere Wechselwirkung war entdeckt worden**

Die "schwache Wechselwirkung"

1895: Wilhelm Röntgen entdeckt die 'Röntgenstrahlung'

1896: Henri Becquerel entdeckt Strahlung von Uran-Kristallen

1898: Marie and Pierre Curie : ionisierende Strahlung von 'Pechblende' (U + Polonium)

Radioaktivität

Es dauerte ca. 35 Jahre, um diese Phänomene grob zu verstehen

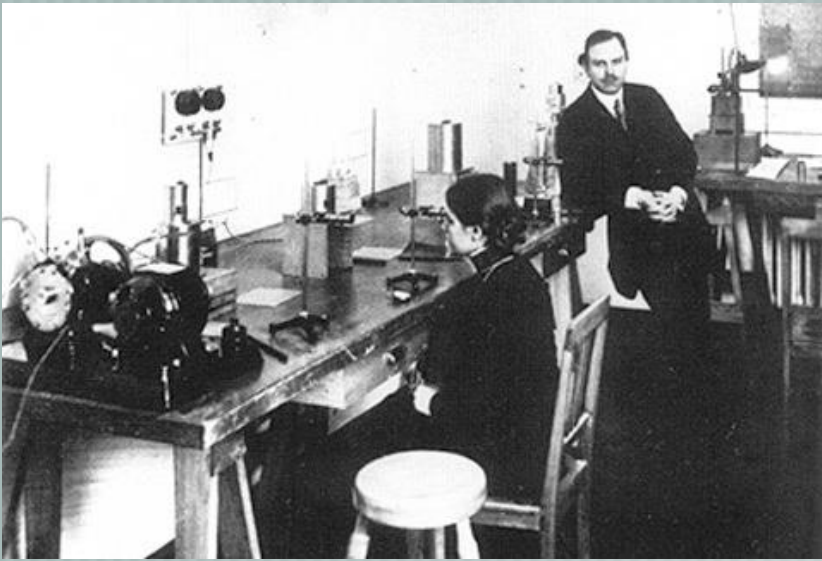
Felder

'Schwache' Wechselwirkung

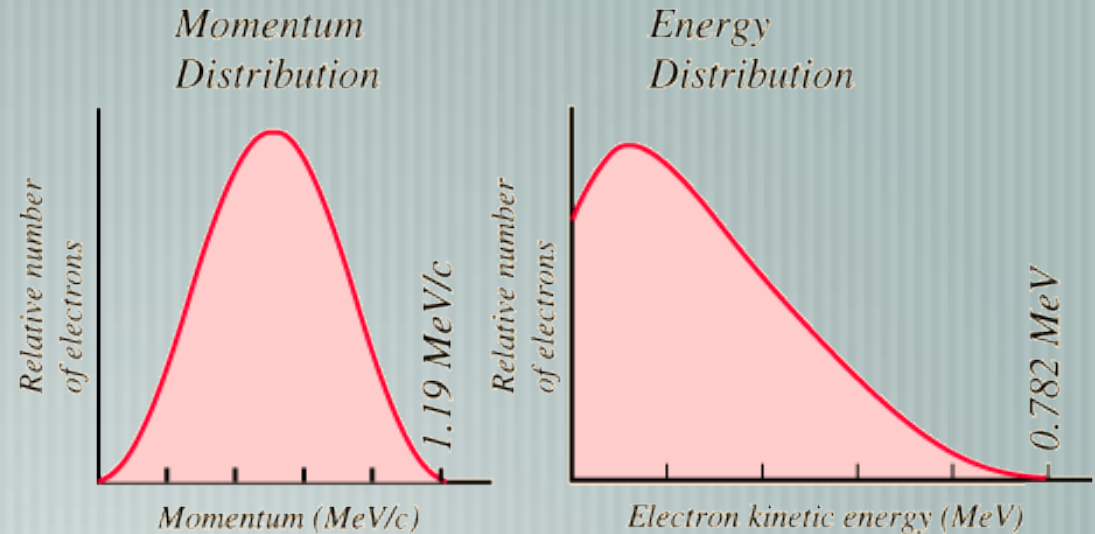
Beta-Zerfall von Atomkernen - warum wurden Elektronen mit einem kontinuierlichen Energiespektrum emittiert?

$Z \rightarrow (Z+1) + e$?

Verletzung der Energieerhaltung ?

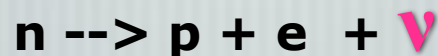


1911 Lise Meitner, Otto Hahn



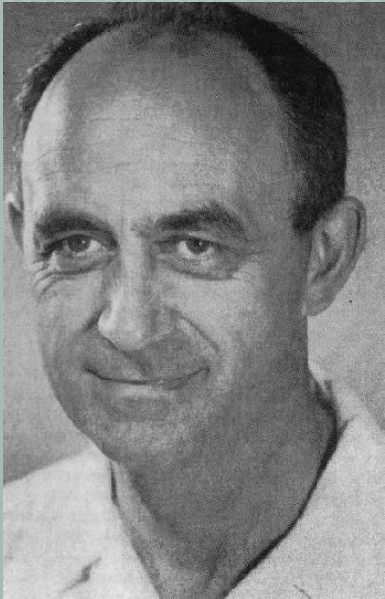
1930 Wolfgang Pauli: an **extremely light neutral particle*** is emitted in beta decay

*'neutron', but in 1931 Fermi called it "neutrino" (little neutron)

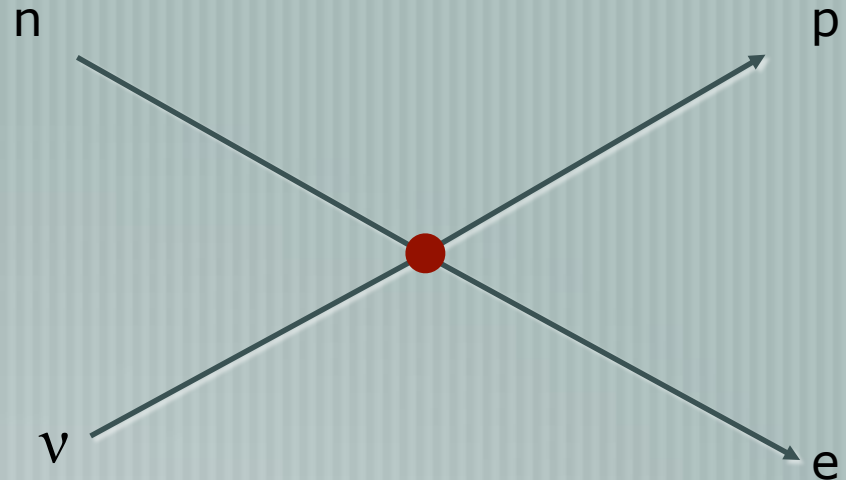
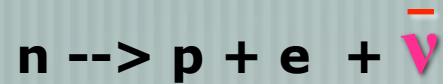


Felder

'Schwache' Wechselwirkung



Enrico Fermi
(1934)



'Phänomenologische' Beschreibung der schwachen Wechselwirkung

Wechselwirkung findet in einem Punkt statt

Stärke: $G_F \sim 10^{-5}$ relativ zur elektromagnetischen WW

Analogie zu zwei Teilchen'strömen' (Proton-Neutron / Elektron-Neutrino)

Ok bis ~1958

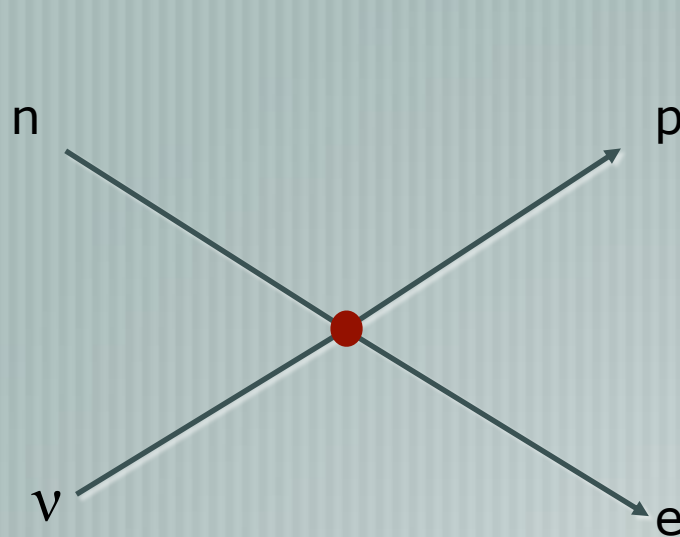
Elektroschwache WW

1958 Glashow

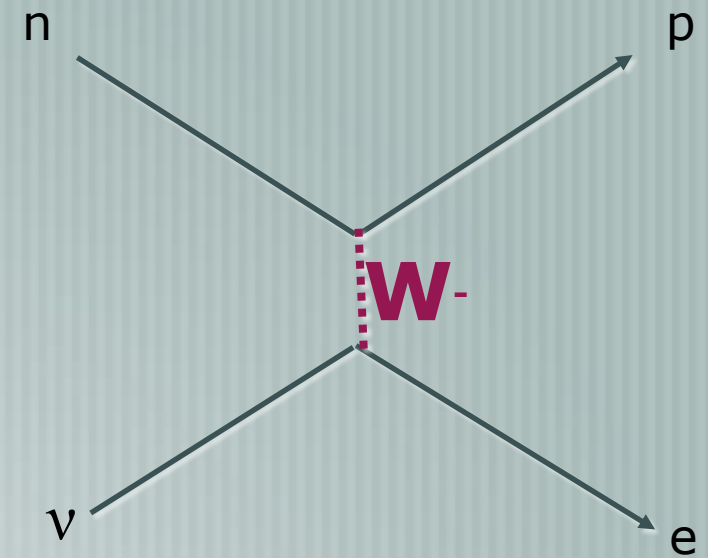
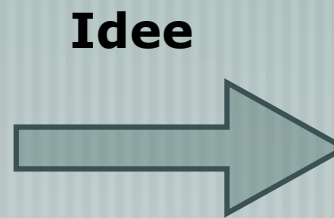
In den 50er gab es ein grosses (theoretisches) Problem

Neutrino-Proton Streuquerschnitt $\sim (G_F E_\nu)$
würde oberhalb 300 GeV die Unitarität verletzen*
(*Wahrscheinlichkeit > 100%)

$$G_F = (1/294 \text{ GeV})^2$$



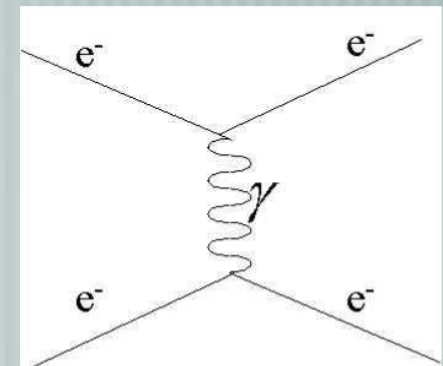
Fermi model



Glashow model

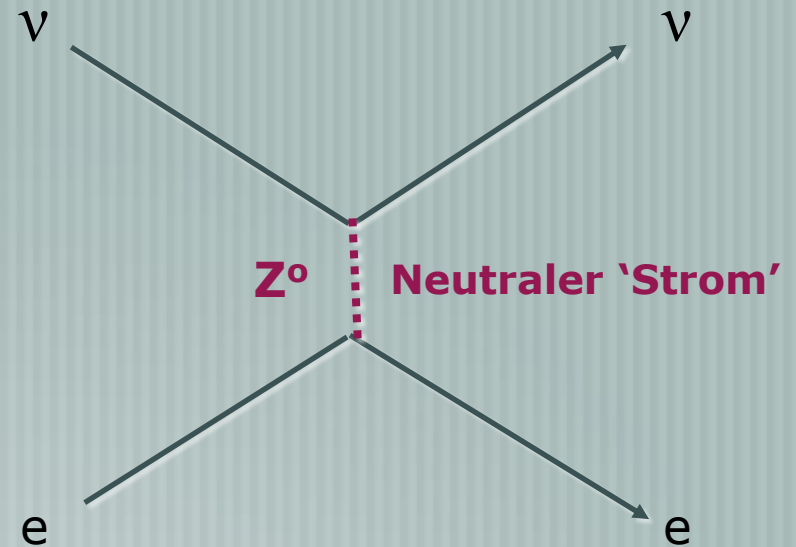
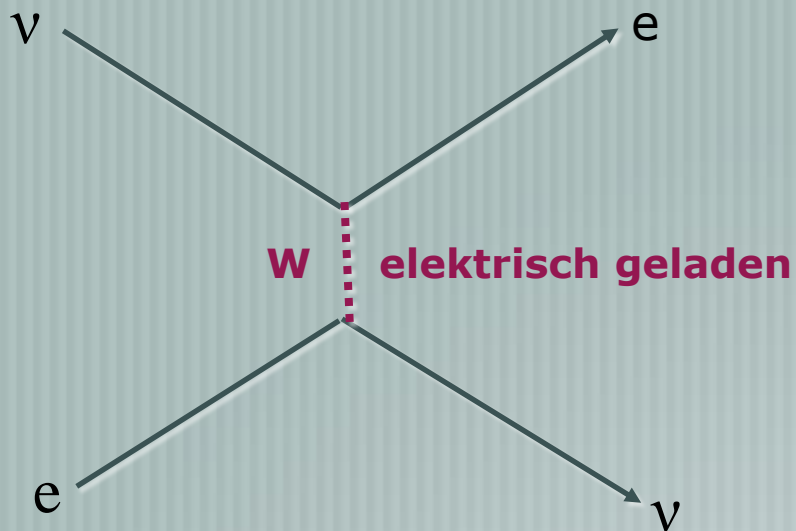
**Die schwache Wechselwirkung wird durch den Austausch
sehr massiver 'Vektorbosonen' übertragen
(Analog zum Photonenaustausch!)**

**Die grosse Masse (80 GeV) würde die kurze
Reichweite ($2 \cdot 10^{-18}$ m) und den kleinen Streuquerschnitt
erklären**



Elektroschwache WW

1968



Glashow, Salam, Weinberg (1968)

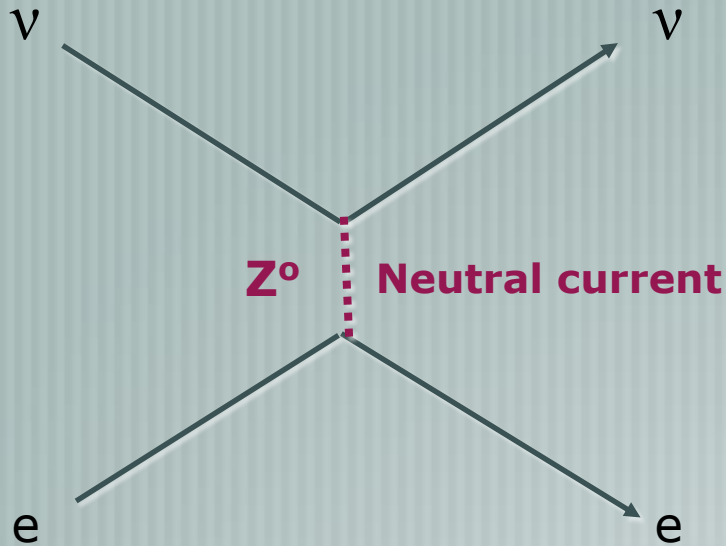
Vereinigung der schwachen und der elektromagnetischen Wechselwirkung

- Die e.m. und schwache WW sind zwei Aspekte der gleichen 'elektroschwachen' WW
- Sowohl Quarks als auch Leptonen besitzen eine 'schwache' Ladung (i.e. Aussendung von W, Z)
- **W, Z Bosonen bekommen ihre Masse durch das Higgs-Feld (1964)**

Elektroschwache WW

1973

Entdeckung "neutraler Ströme" am CERN (1973)



- Neutrino Strahl auf Blaskammer gerichtet
- Ein Elektron mit hoher Energie erscheint aus dem 'Nichts'

Nuclear Physics B73 (1974) 1–22 North-Holland Publishing Company

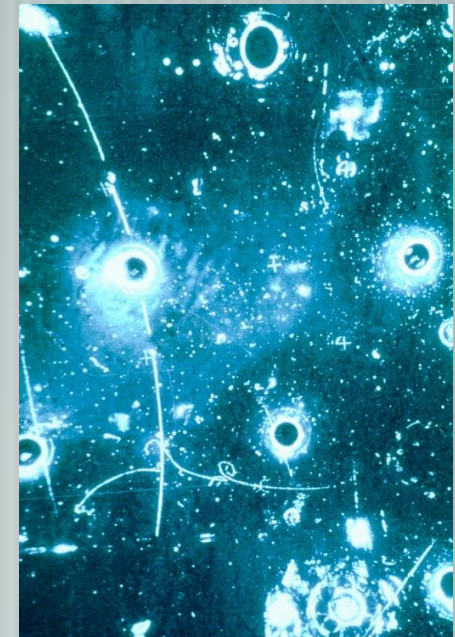
OBSERVATION OF NEUTRINO-LIKE INTERACTIONS WITHOUT MUON OR ELECTRON IN THE GARGAMELLE NEUTRINO EXPERIMENT

F.J. HASERT, S. KABE, W. KRENZ, J. VON KROGH, D. LANSKE, J. MORFIN, K. SCHULTZE and H. WEERTS
III. Physikalisches Institut der Technischen Hochschule, Aachen, Germany

G. BERTRAND-COREMANS, J. SACTON, W. VAN DONINCK and P. VILAIN*
Interuniversity Institute for High Energies, U.L.B., V.U.B., Brussels, Belgium

R. BALDI, U. CAMERINI**, D.C. CUNDY, I. DANILCHENKO***, W.F. FRY**
D. HAIDT, S. NATALI[†], P. MUSSET, B. OSCULATI, R. PALMER^{††},
J.B.M. PATTISON, D.H. PERKINS^{*}, A. PULLIA, A. ROUSSET,
W. VENUS^{†††} and H. WACHSMUTH
CERN, Geneva, Switzerland

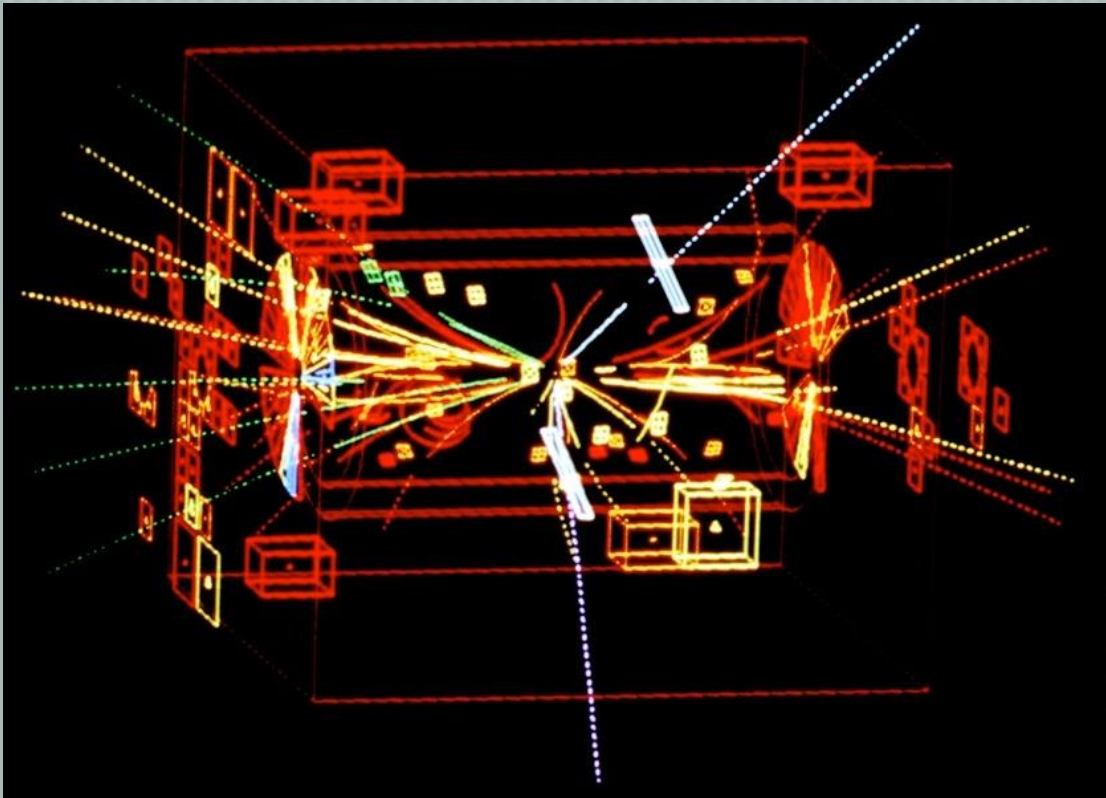
V. BRISSON, B. DEGRANGE, M. HAGUENAUER, L. KLUBERG,
U. Nguyen-KHAC and P. PETIAU
Laboratoire de Physique Nucleaire des Hautes Energies, Ecole Polytechnique, Paris France



Elektroschwache WW

1983

Entdeckung der W und Z Bosonen am CERN (1983)



W Ereignis im UA-1 Detektor

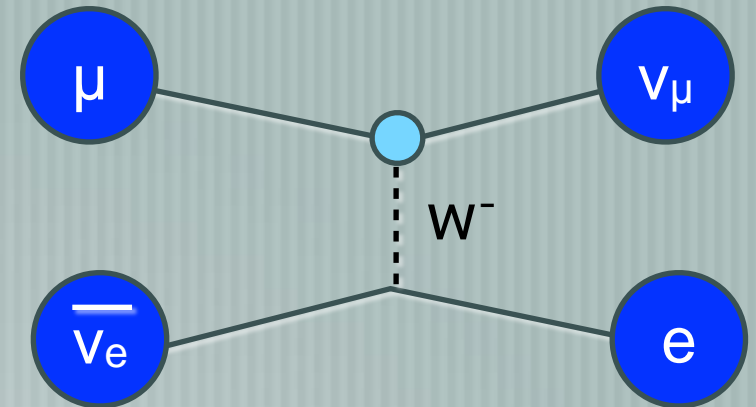
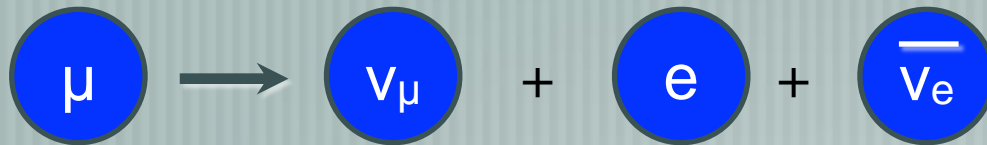


Carlo Rubbia, Simon van der Meer

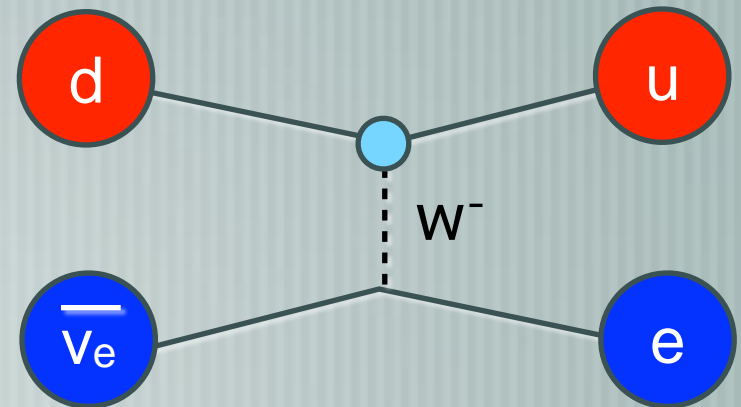
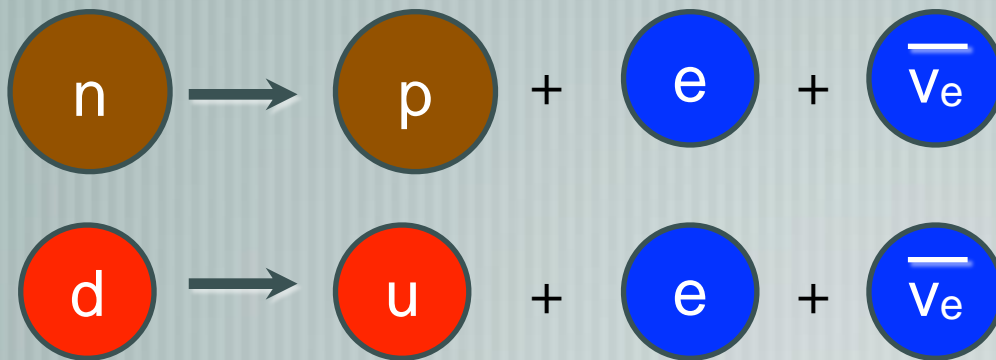
Elektroschwache Wechselwirkung

“Universalität” : Leptonen und Quarks

Müon-Zerfall:

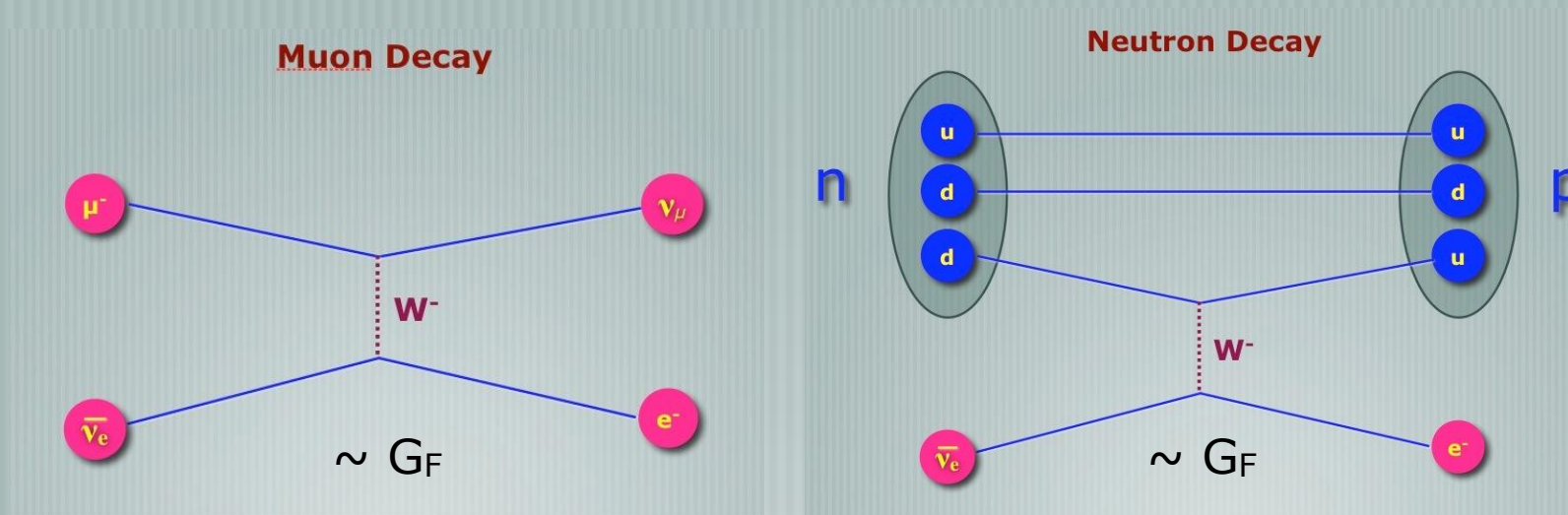


Neutron-Zerfall:



Elektroschwache Wechselwirkung

Zusammenhang zwischen Leptonen und Quarks



Konzept der elektroschwachen Ladung von Quarks und Leptonen
Übertragung durch Austausch von W und Z Bosonen

*Unter der Annahme das die verschiedenen Quark-Zustände etwas 'vermischt' sind

“Quark
mixing”

$$\begin{aligned}d' &= d \cos \theta_c + s \sin \theta_c \\s' &= -d \sin \theta_c + s \cos \theta_c\end{aligned}$$

θ_c = Cabbibo angle $\sim 20^\circ$

Leptonen und Quarks

1970

Eine der meistzitierten Publikationen (Glashow, Iliopoulos, Maiani)

PHYSICAL REVIEW D

VOLUME 2, NUMBER 7

1 OCTOBER 1970

Weak Interactions with Lepton-Hadron Symmetry*

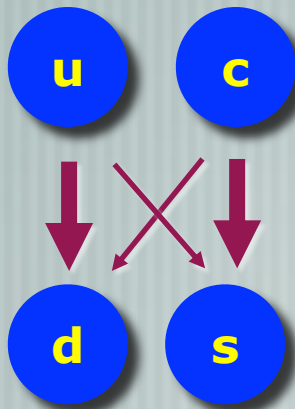
S. L. GLASHOW, J. ILIOPOULOS, AND L. MAIANI†

Lyman Laboratory of Physics, Harvard University, Cambridge, Massachusetts 02139

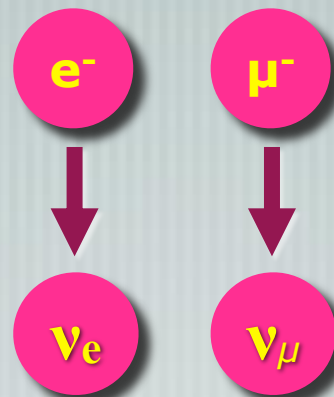
(Received 5 March 1970)

We propose a model of weak interactions in which the currents are constructed out of four basic quark fields and interact with a charged massive vector boson. We show, to all orders in perturbation theory, that the leading divergences do not violate any strong-interaction symmetry and the next to the leading divergences respect all observed weak-interaction selection rules. The model features a remarkable symmetry between leptons and quarks. The extension of our model to a complete Yang-Mills theory is discussed.

Quarks



Leptons

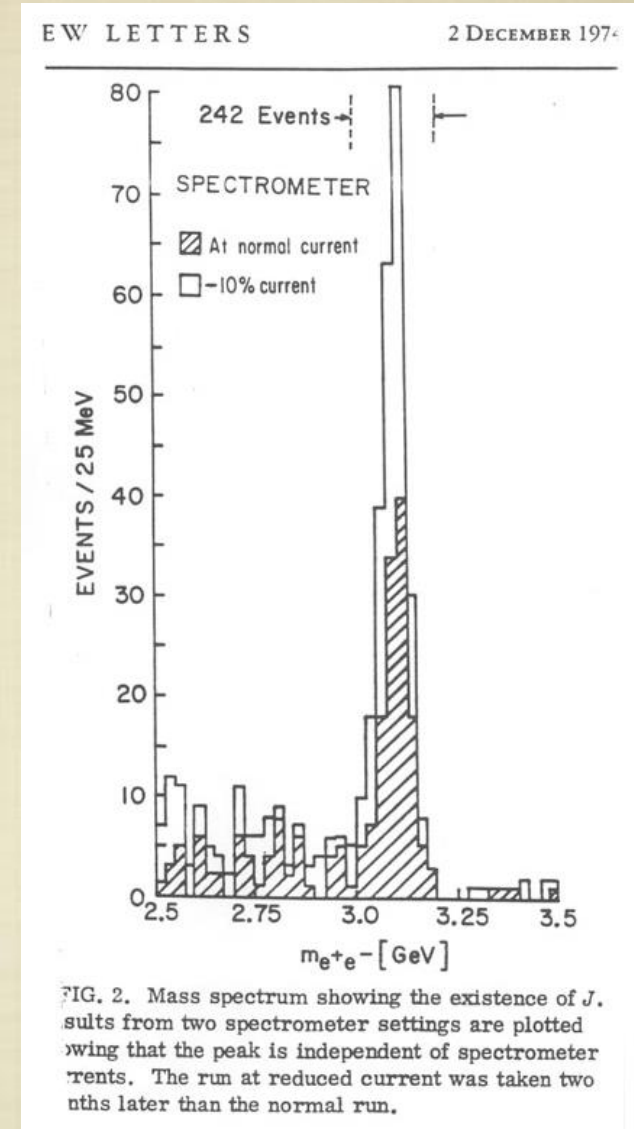
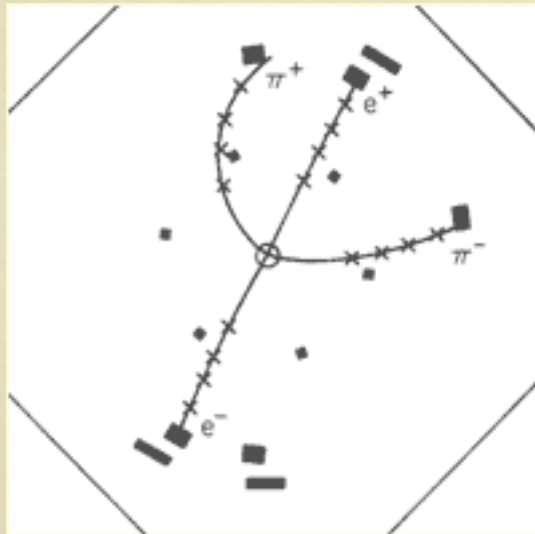


*Dies war das
theoretische 'Standard'-
Modell des Jahres 1970
(mit zwei Familien)*

Die Entdeckung des Charm-Quarks

NOVEMBER REVOLUTION (11 November 1974)

Zwei Gruppen entdeckten ~ simultan ein neues Teilchen. '**Psi**' am SLAC (Burt Richter) und '**J**' at Brookhaven (Sam Ting) - wurde dann J/Psi genannt.



Das J/psi Teilchen lebte 'sehr lange' ($\sim 10^{-20}$ sec). Es konnte nur über die elektroschwache Wechselwirkung zerfallen, meist in Zustände mit s-quarks. Seine lange Lebensdauer erklärt die schmale Resonanzlinie.

Gerade war das Standard-Modell mit zwei Familien von Leptonen und Quarks etabliert ...

...da fand man am SLAC ein drittes Lepton!

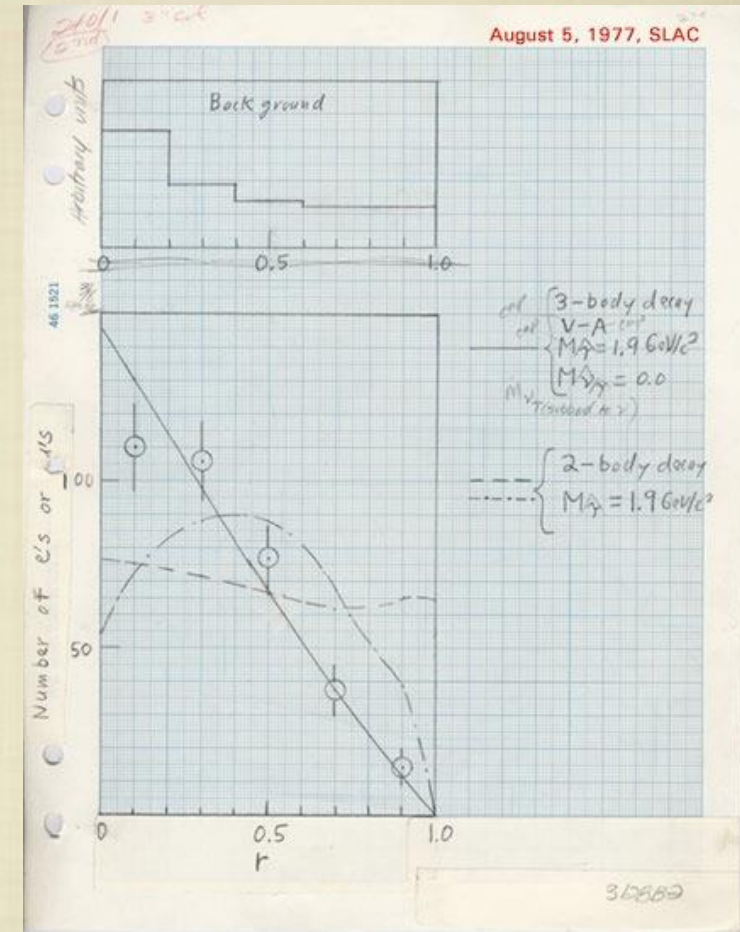
Ein neues 'schweres Elektron' mit $M = 3500 m_e$

... und wer hatte das bestellt?



MIT DER NEUEN LOGIK DER LEPTON-QUARK SYMMETRIE

ein weiteres Neutrino (the 'tau neutrino'),
und zwei weitere Quarks ('top' and 'bottom').



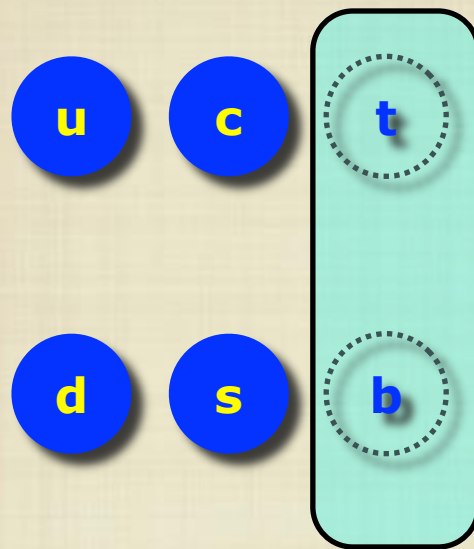
Marty Perl's Logbook

TEILCHENSPEKTRUM

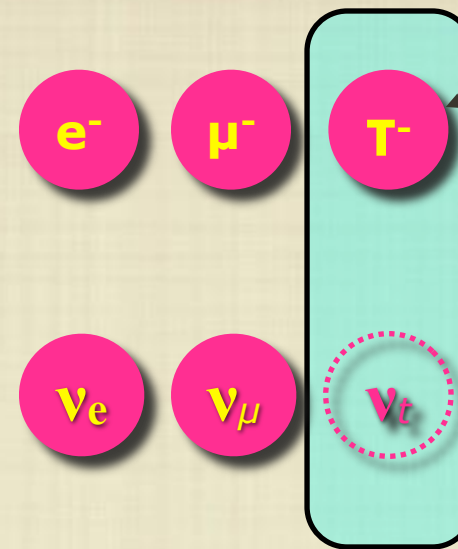
Quarks

1975

Die Suche nach den fehlenden Familienmitgliedern begann ...



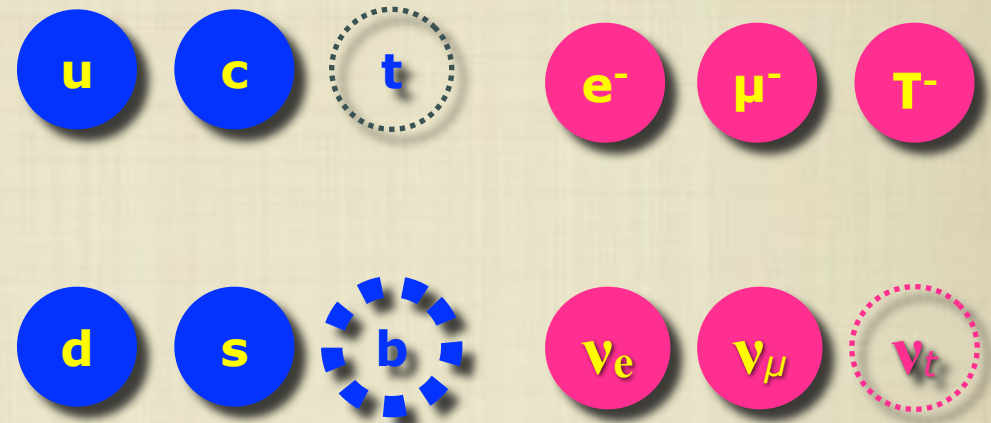
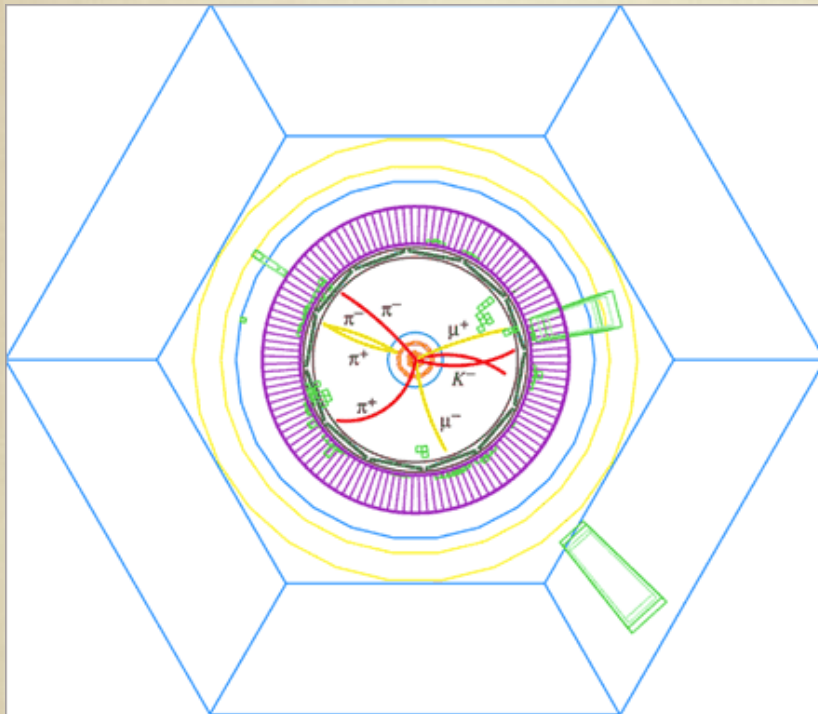
Quarks



Leptons

new

Entdeckung des 'Bottom' Quark (Fermilab)



Quarks

Leptons

1977 entdeckten Physiker am Fermilab (nahe Chicago) ein neues Meson (genannt 'Upsilon')

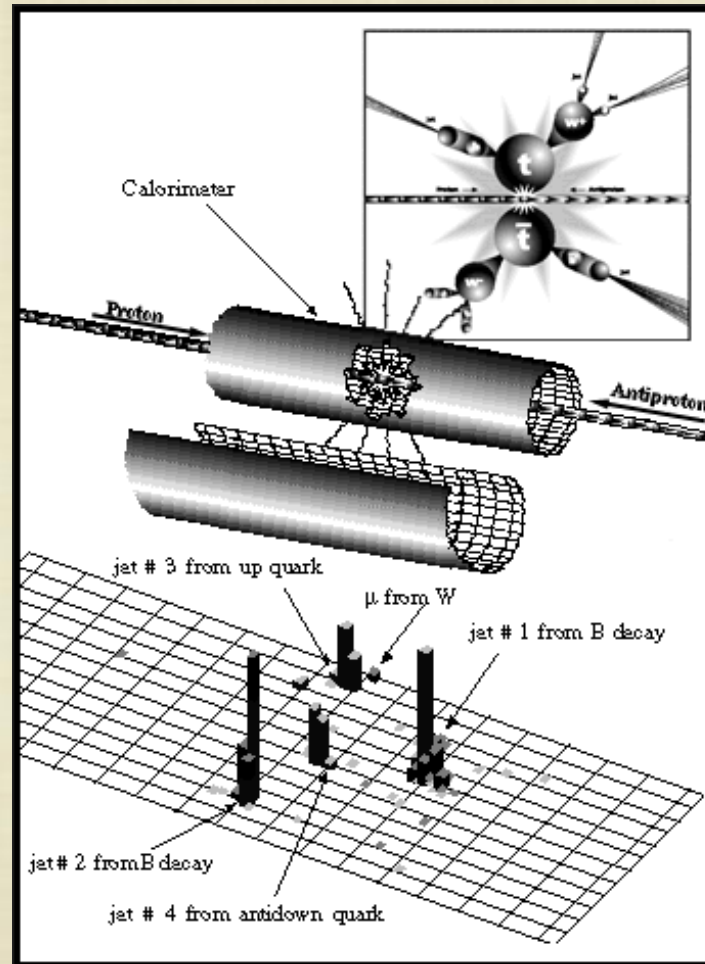
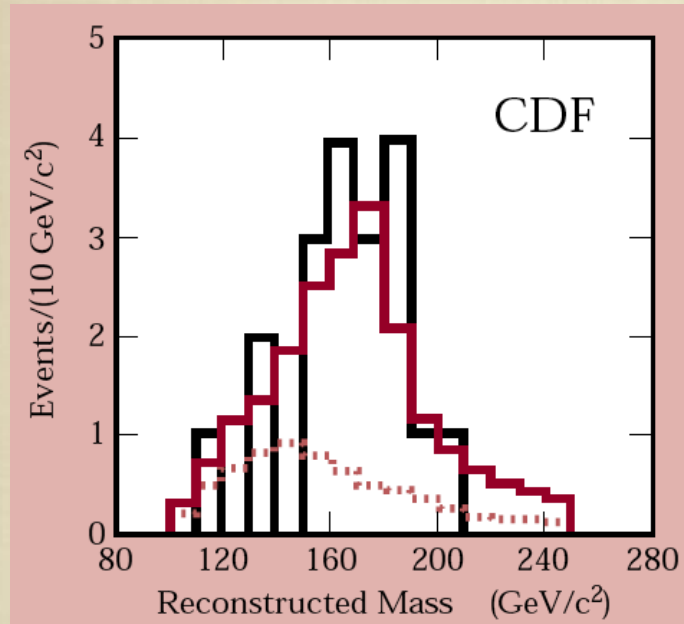
Seine Eigenschaften passten auf den 'Steckbrief' eines Mesons, das aus einem bottom/anti-bottom Quark Paar bestand.

Daraus folgte dass das Bottom quark die elektrische Ladung $-1/3$ und eine Masse von ca. 5 GeV hatte.

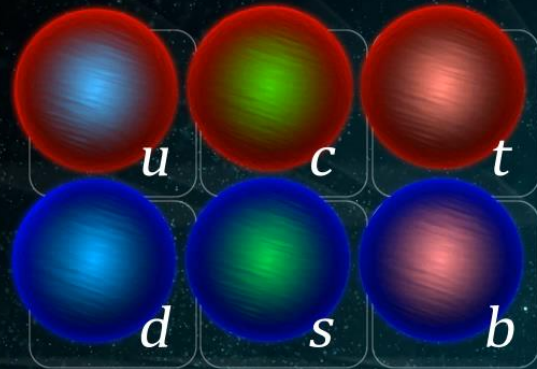


Quarks

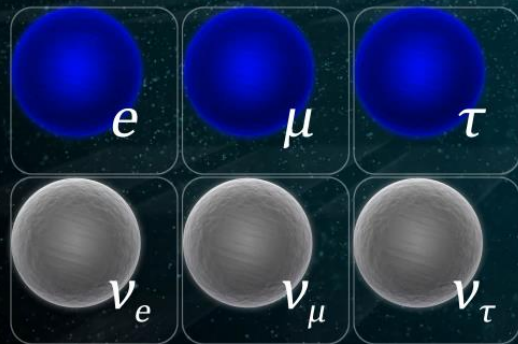
Entdeckung des 'Top' Quark (Fermilab)



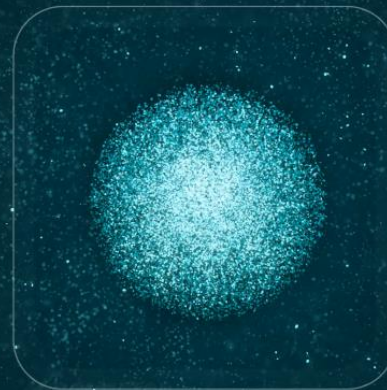
DAS STANDARD MODEL (heute)



Quarks



Leptons



Higgs boson



Forces