

Kinetische Gastheorie

Boltzmann

Maxwell

Elektromagnetismus

Newton

### Teilchen

### Felder

### Universum

### Technologien

1895

1900

1905

1910

1920

1930

1940

1950

1960

1970

1975

1980

1990

2000

2010

$e^-$

Atom

Kern

$p^+$

$n$

$\mu^-$

$e^+$

$\tau^-$

$\nu_e$

$\nu_\mu$

$\tau^-$

$\nu_\tau$

$\nu$  Masse

Brownsche Bewegung

Spezielle Relativität

Quantenmechanik  
Welle-Teilchen Dualismus  
Spin/Fermion-Boson

Antimaterie

Fermi Theorie

Yukawa  
 $\pi$  Austausch

QED

P, C, CP  
Verletzung

Higgs

W Bosons

GUT

EW Vereinigung

QCD  
Farbladung

SUSY

Superstrings

3 Teilchenfamilien

Elektro-  
magnetismus

Schwache  
WW

Starke  
WW

Photon

Radio-  
aktivität

Höhen-  
strahlung

Allgemeine  
Relativität

Galaxien;  
Ausdehnung des  
Universums

Dunkle Materie

Kernfusion

Big Bang  
Nukleosynthese

Kosmische  
Hintergrundstrahlung

Inflation

Inhomogenität der  
Hintergrundstrahlung(C  
OBE, WMAP)

Dunkle Energie

Detektor

Beschleuniger

Geiger

Wolken

Zyklotron

Synchrotron

Blasenkammer

$e^+e^-$  Ring

Vieldrahtkammer

Strahlkühlung

Prozessrechner

$p^+p^-$  Ring

Moderne  
Detektoren

WWW

GRID

Teilchen-  
zoo

STANDARD MODEL

$\pi$

$p^-$

$u$

$d$

$s$

$c$

$b$

$t$

$g$

$W$

$Z$

$g$

# Felder

'Starke' Wechselwirkung

## Was hält Protonen und Neutronen im Kern zusammen

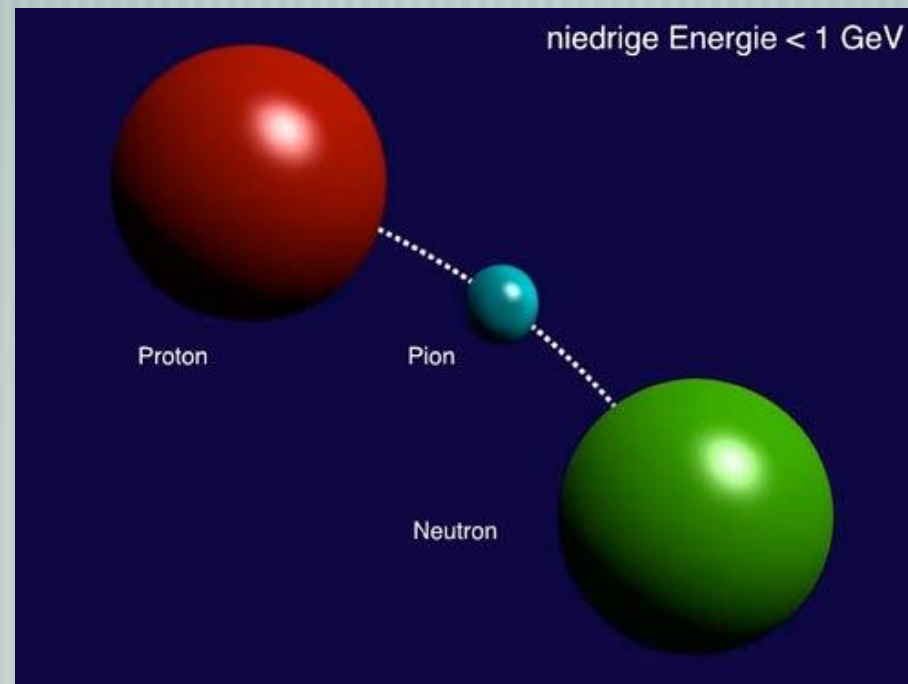
- 1) Die Kraft muss stärker als die elektromagnetische Kraft sein
- 2) Kurze Reichweite ( $\sim 1-2$  fm), um die Grösse des Atomkerns zu erklären

Yukawa's idea:

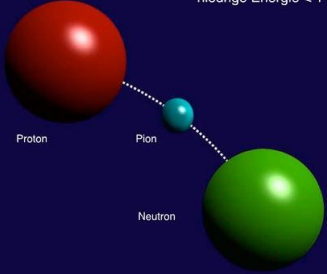
ein Teilchen mit einer 'mittelgrossen' Masse vermittelt diese  
'starke' Kraft (das 'Pion')



Yukawa (1934)



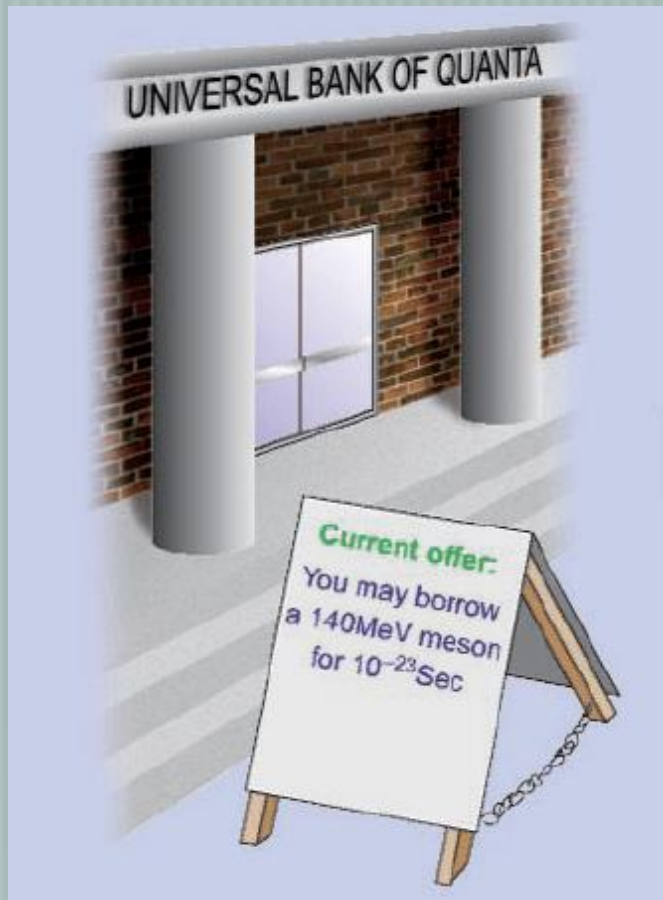




# Felder

'Starke' Wechselwirkung

Austauschkräfte: die Unschärferelation in der Praxis

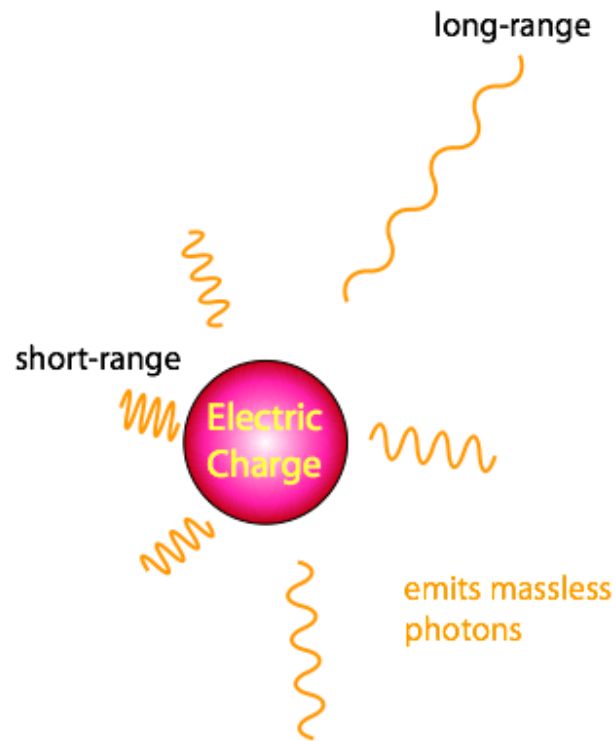


$$\Delta E \Delta t \geq \hbar$$



Unschärferelation:  
1.4 fm ~ 140 MeV

# Elektromagnetische vs 'Starke' WW



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

Coulomb law



emits massive pions

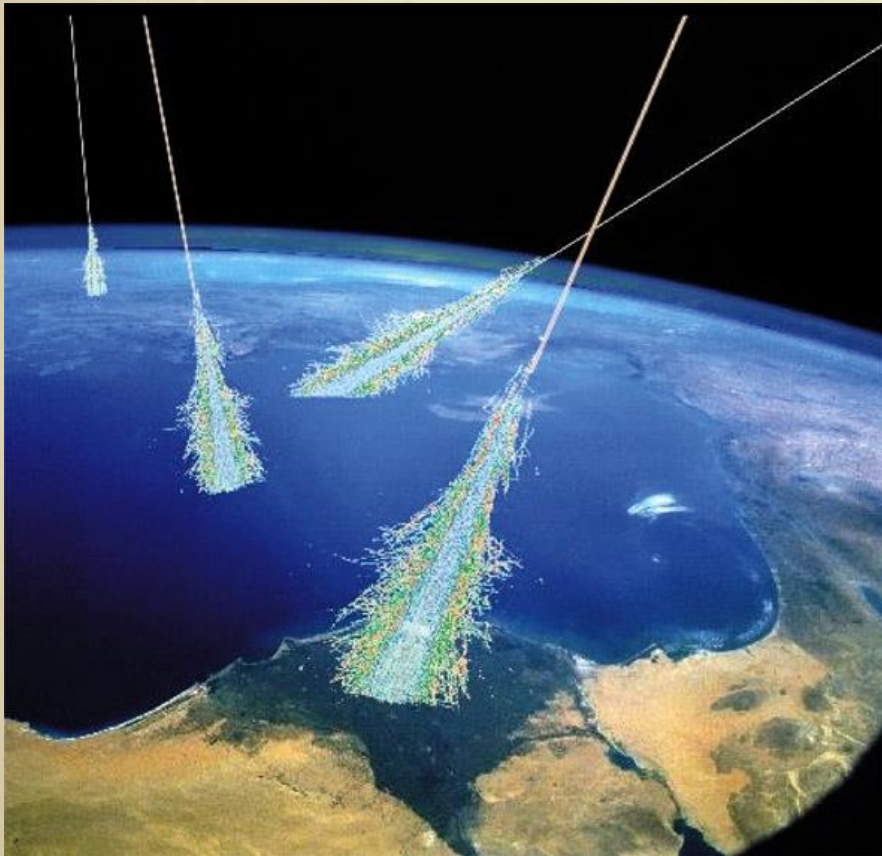
$$\Delta E \Delta t \geq \hbar \quad (\Delta E \sim m)$$

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

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

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?"**

$\pi$

QCD

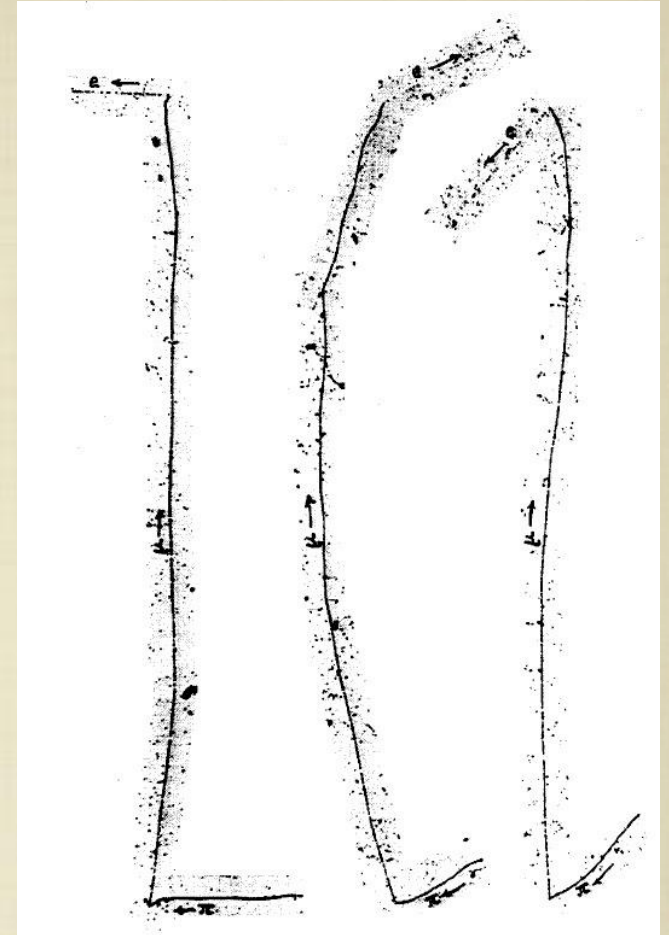
1947

## 1947: Entdeckung des (geladenen) Pions



Cecil Powell

**Ouff!**



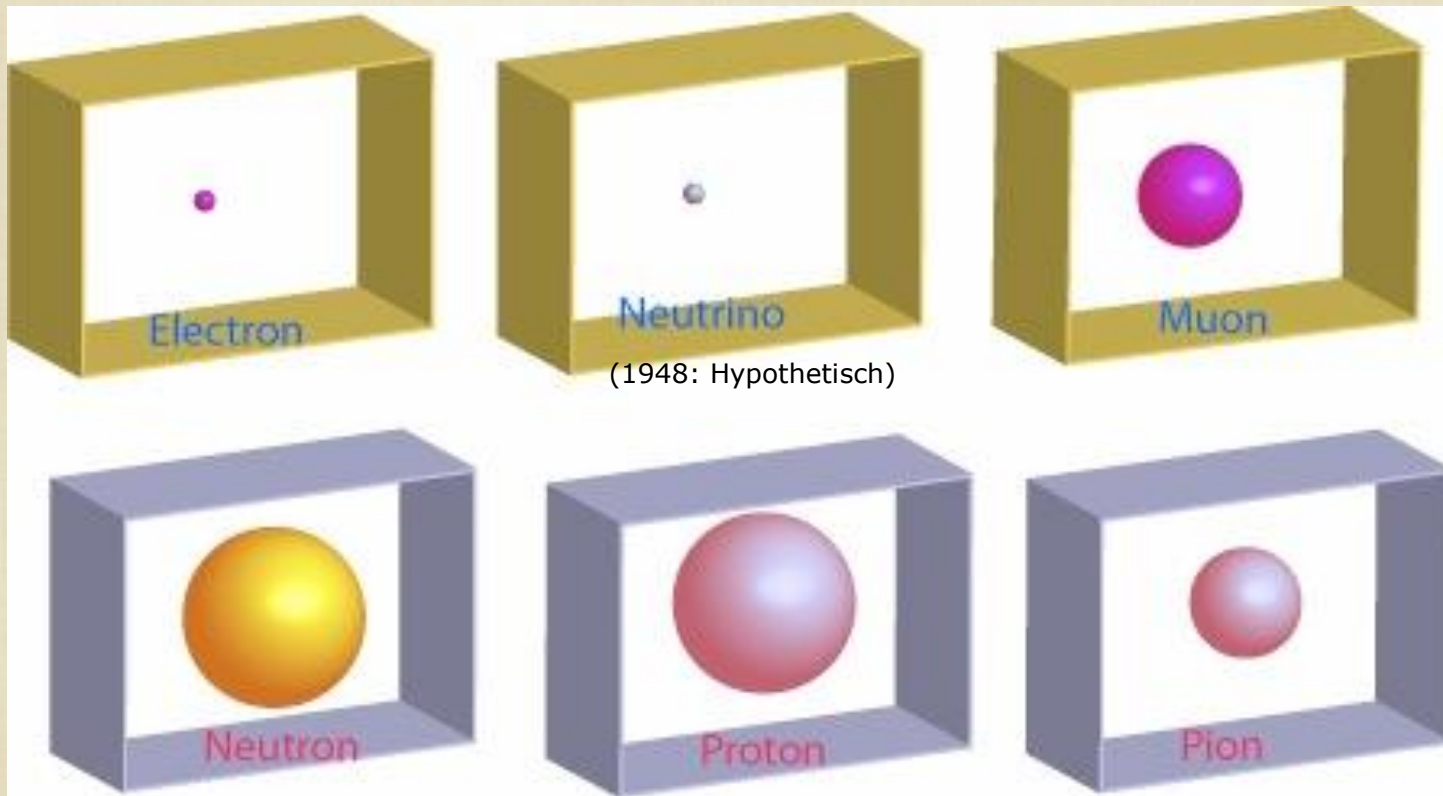
### Photographische Emulsion

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

Pionenspuren wurden im Mikroskop identifiziert

1948: Pionen am Berkeley Zyklotron produziert







Scanned at the American Institute of Physics

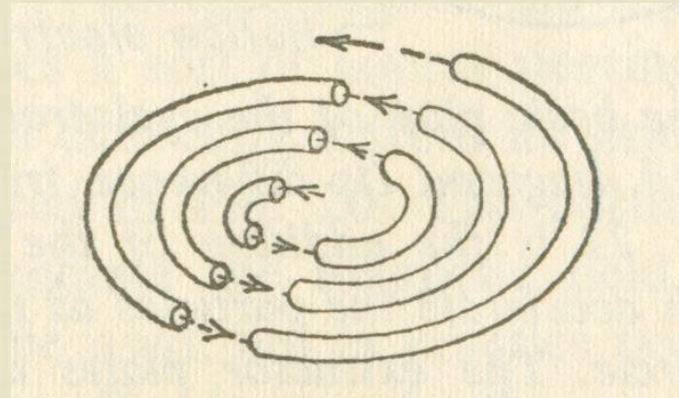
Rolf Wideroe, 1928

*"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

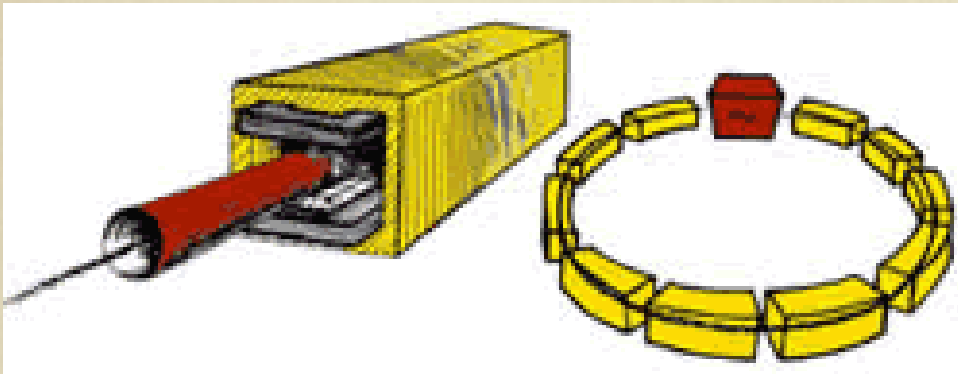


## Linearbeschleuniger

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

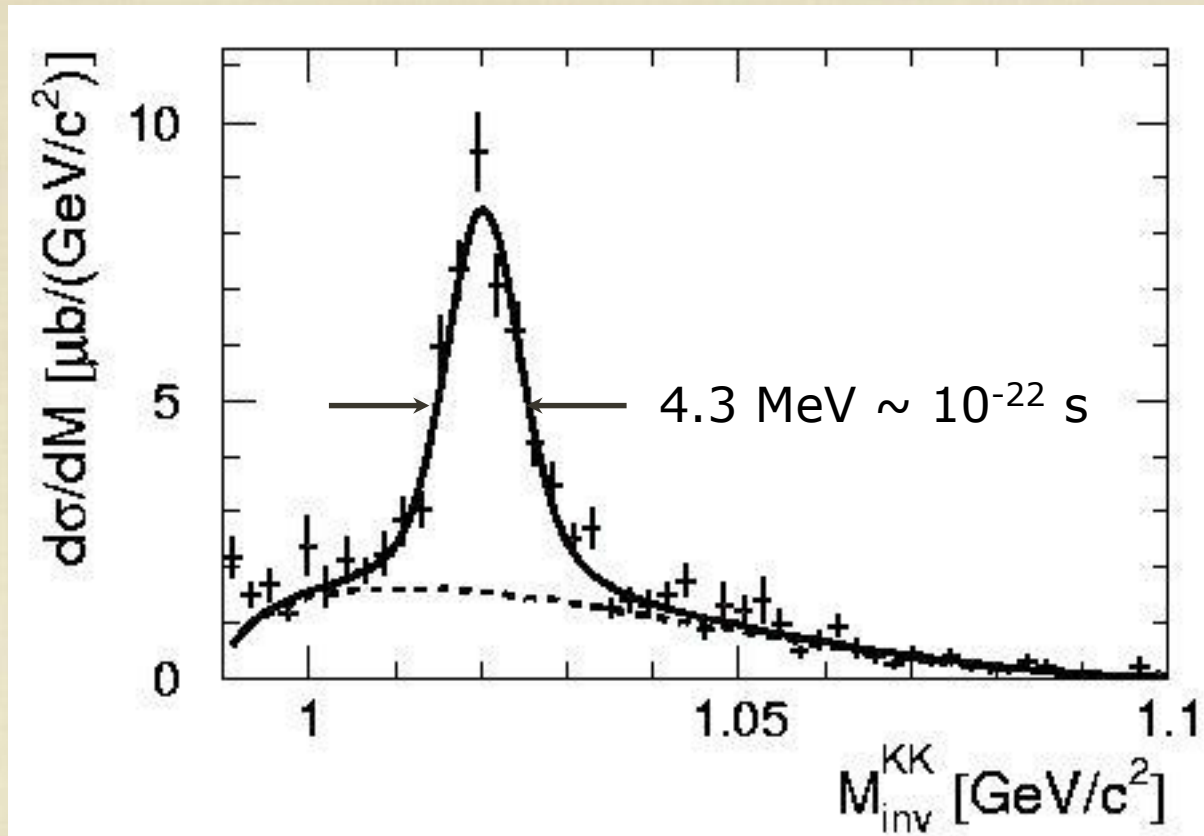
Cerenkov Detektoren  
Photomultiplier  
Funkenkammern

### 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'

$\pi^+$   $\pi^-$   $\pi^0$   
 Pions  
 $\eta'$   
 Eta-Prime  
 $\eta$   
 Eta  
 $\rho^+$   $\rho^-$   $\rho^0$   
 Rho  
 $K^+$   $K^-$   $K^0$   
 Kaons  
 $\phi$   
 Phi  
**Mesonen**

$\Delta^{++}$ ,  $\Delta^+$ ,  $\Delta^0$ ,  $\Delta^-$   
 Delta  
 $\Lambda^0$   
 Lambda (strange!)  
 $\Sigma^+$ ,  $\Sigma^0$ ,  $\Sigma^-$   
 Sigma (strange!)  
 $\Xi^0$ ,  $\Xi^-$   
 Sigma(very strange!)  
**Baryonen**

Gab es eine Sub-Struktur dieser Teilchen ?



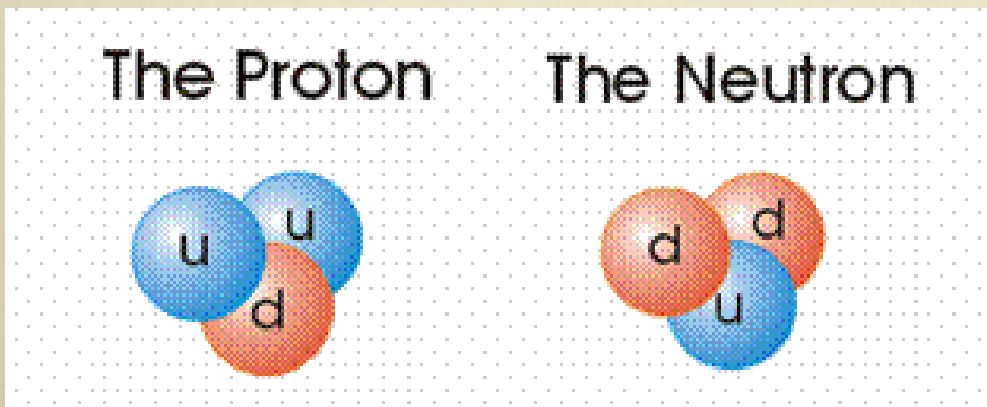
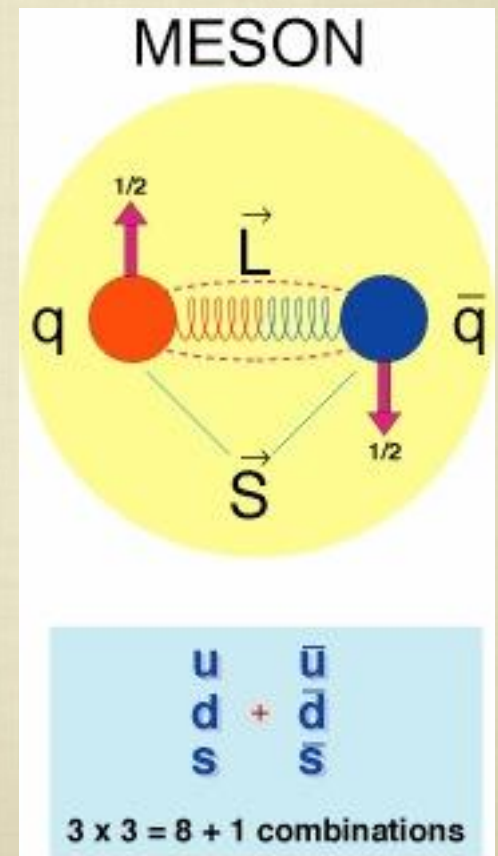
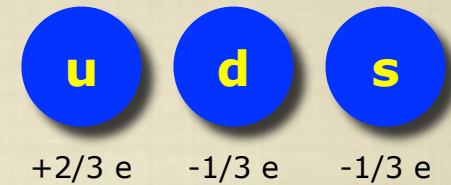
## SU(3) - Ein Klassifizierungsschema mit 'quarks'



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)

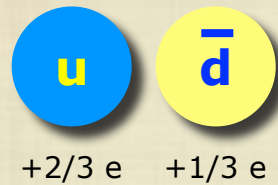


# QCD

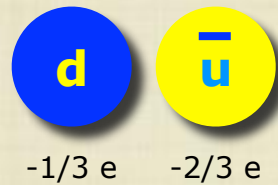
Einige der bekannteren Mesonen (quark+antiquark):



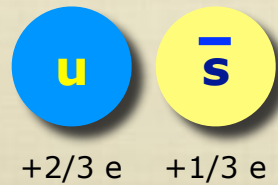
$\pi^0$



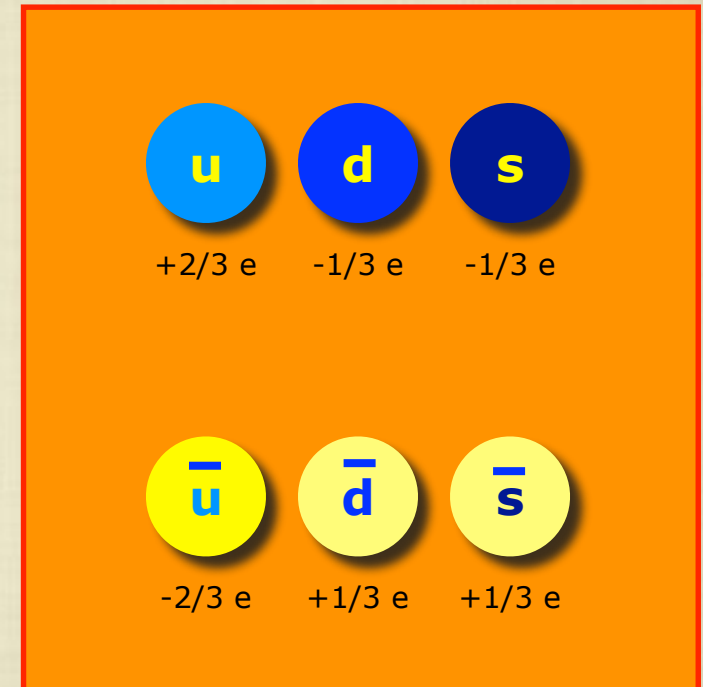
$\pi^+$



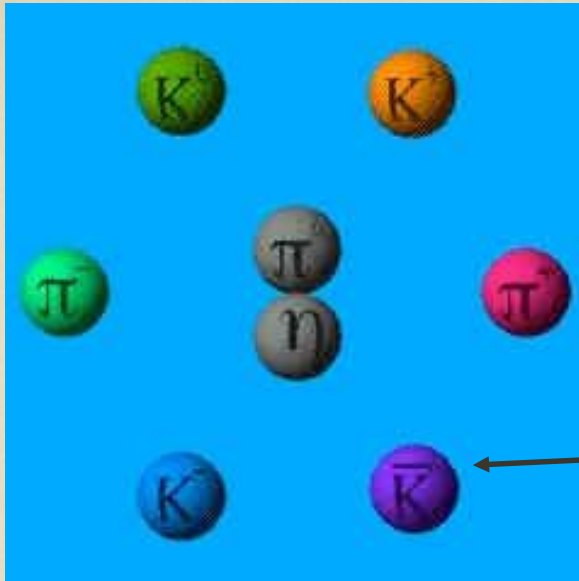
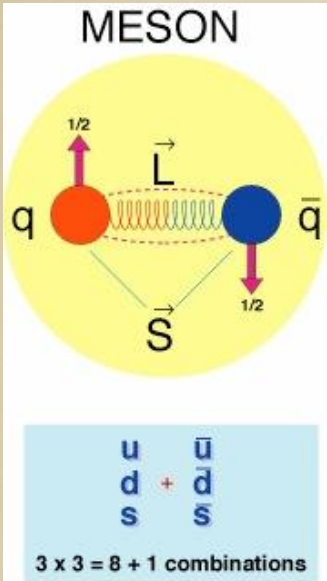
$\pi^-$



$K^+$



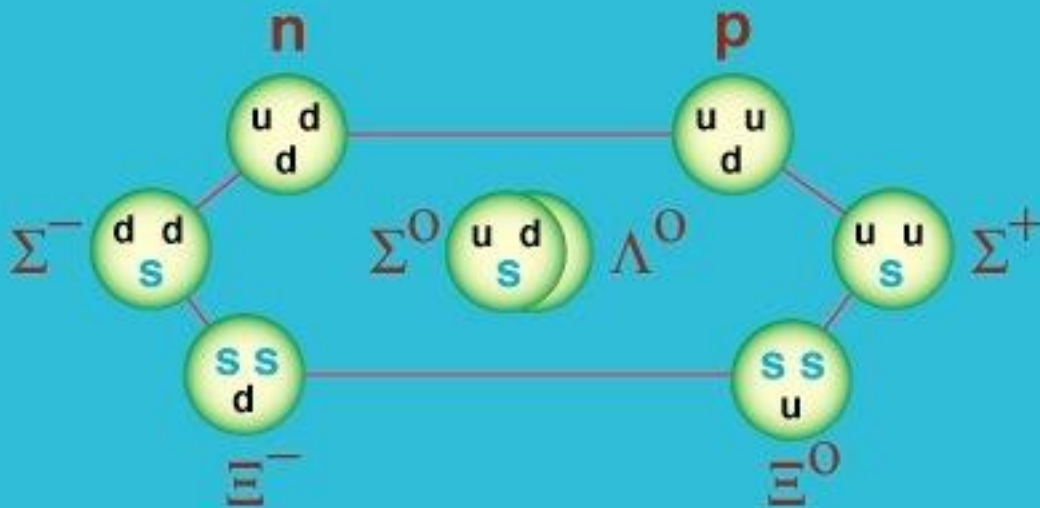
# QCD



← Pion, Eta-meson

← Kaonen besitzen ein 'strange' Quark

## SPIN 1/2 BARYON OCTET

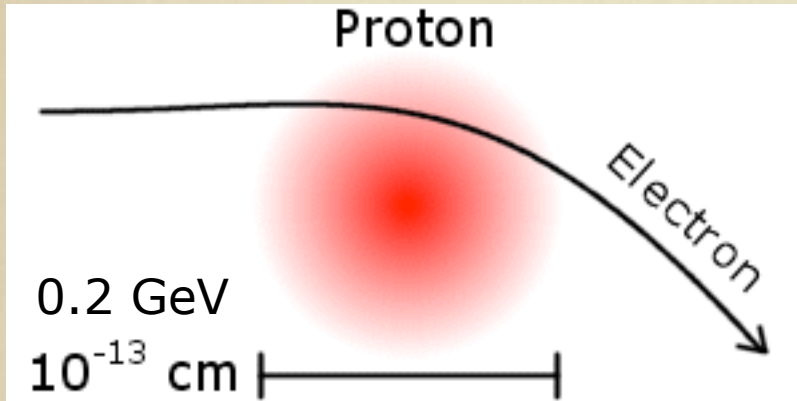


Die leichtesten Baryonen:  
 Proton, Neutron;  
 Lambda, Sigma, Xi



## Entdeckung der Quarks

Elektronenstreuung an Protonen

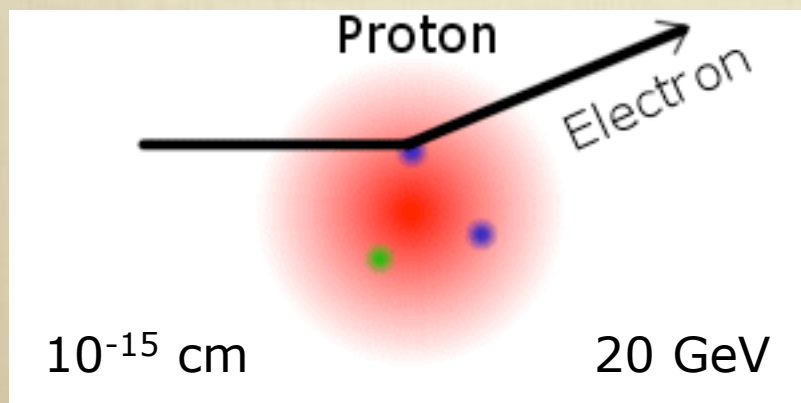


1956 Hofstadter: Messung des Protonenradius



Stanford Linear Accelerator Centre

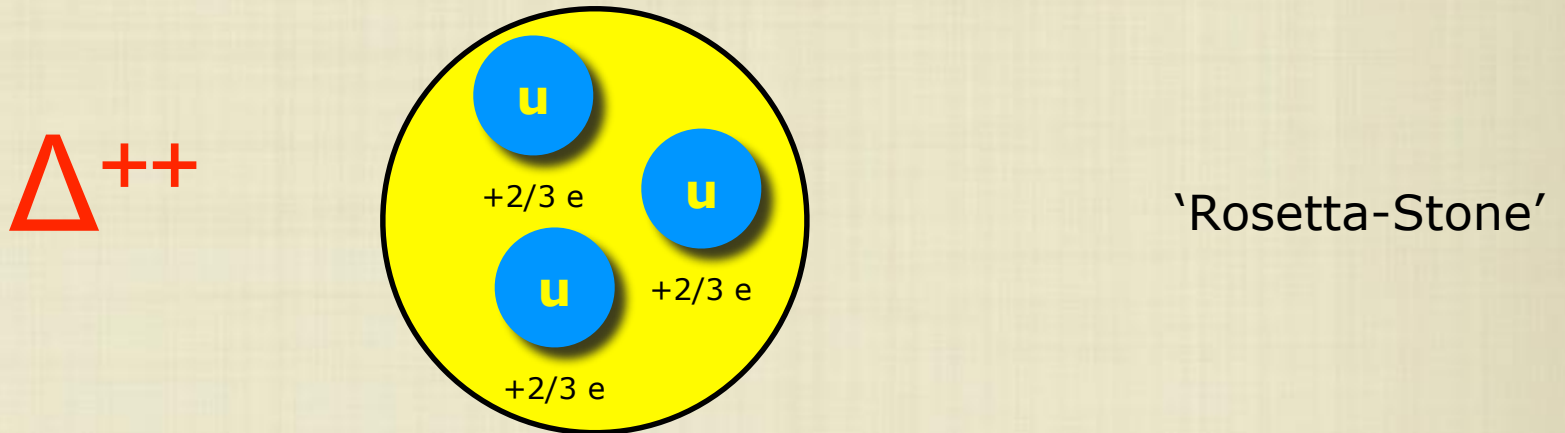
**1967 Friedmann, Kendall, Taylor (SLAC): ~ Rutherford experiment mit Elektronen  
--> es gibt drei 'harte' (punktförmige) Streuzentren im Proton**



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, Fritzsche, Gell-Mann)

# QCD

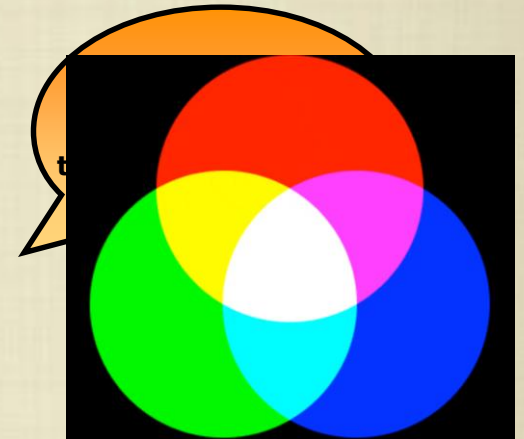
## Quantum Chromo Dynamics

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***

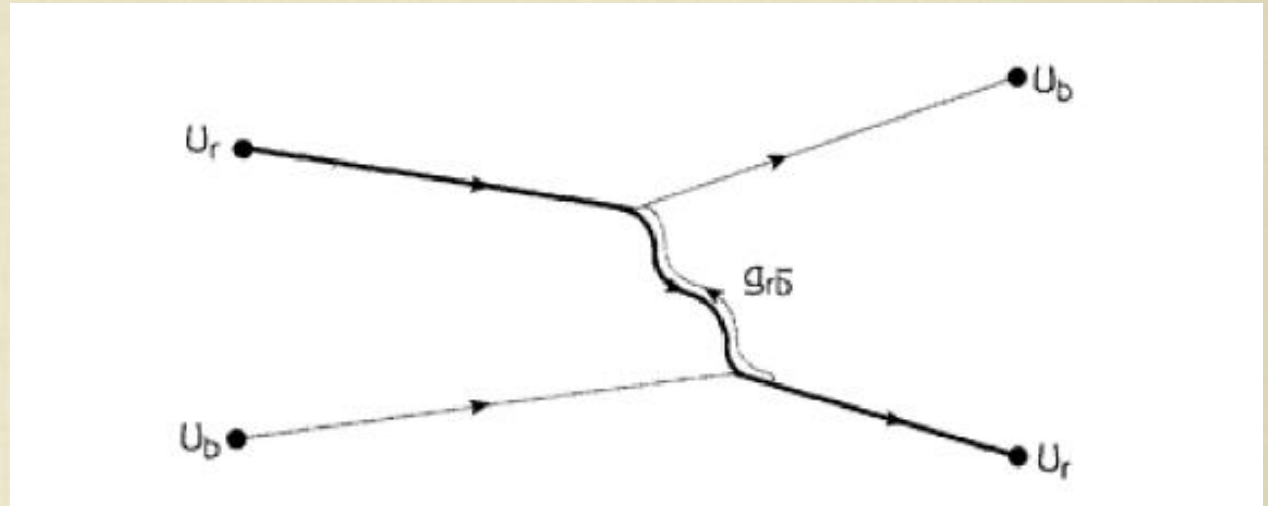
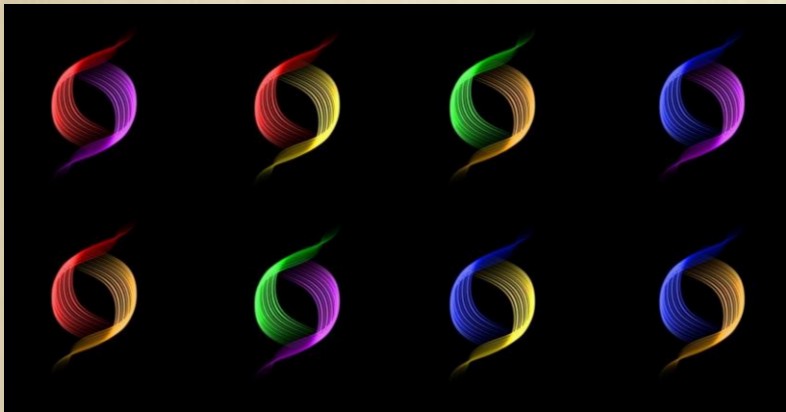
MESONS = Quark-Antiquark (z.B. "rot" + "anti-rot" = weiss)

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



## Gluonen verändern die “Farbladung” der Quarks

Gluonen-Farbladung = Doppel-Index



## 8 Gluonen mit ‘Farbladung’

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

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

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

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

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

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

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

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

1 “farbloser” Gluon

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

## Selbstwechselwirkung der Gluonen

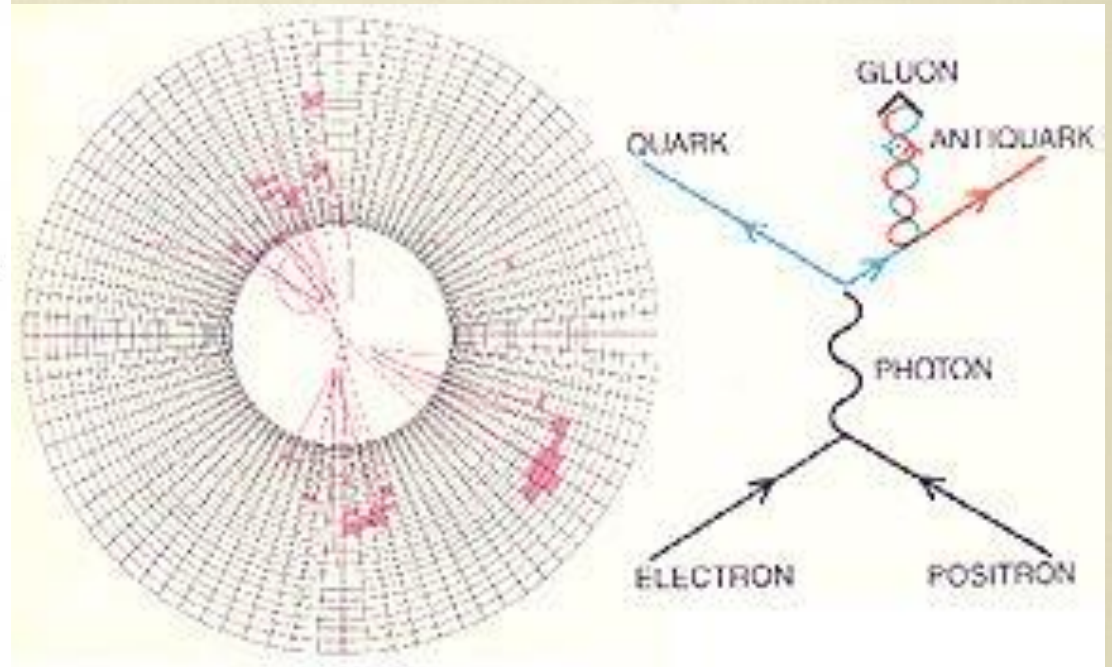
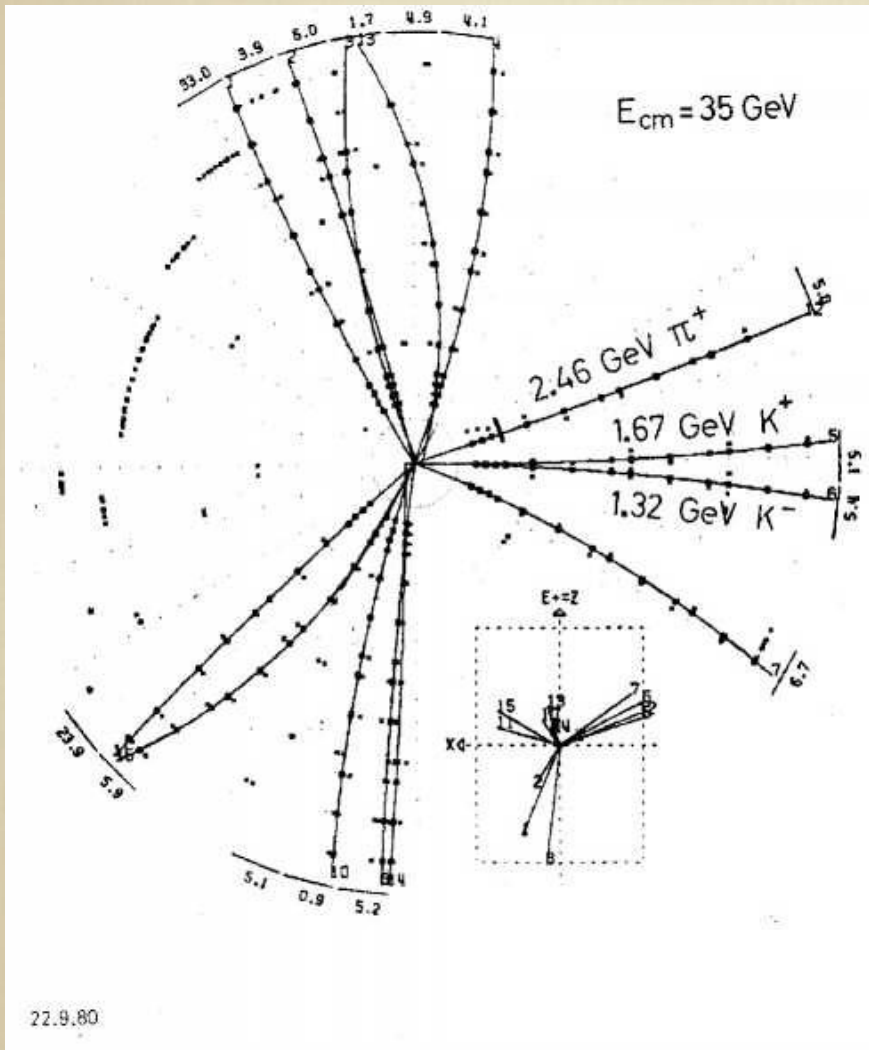
***GLUONEN sind selbst auch geladen  
GLUON-GLUON WECHSELWIRKUNG !***



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.

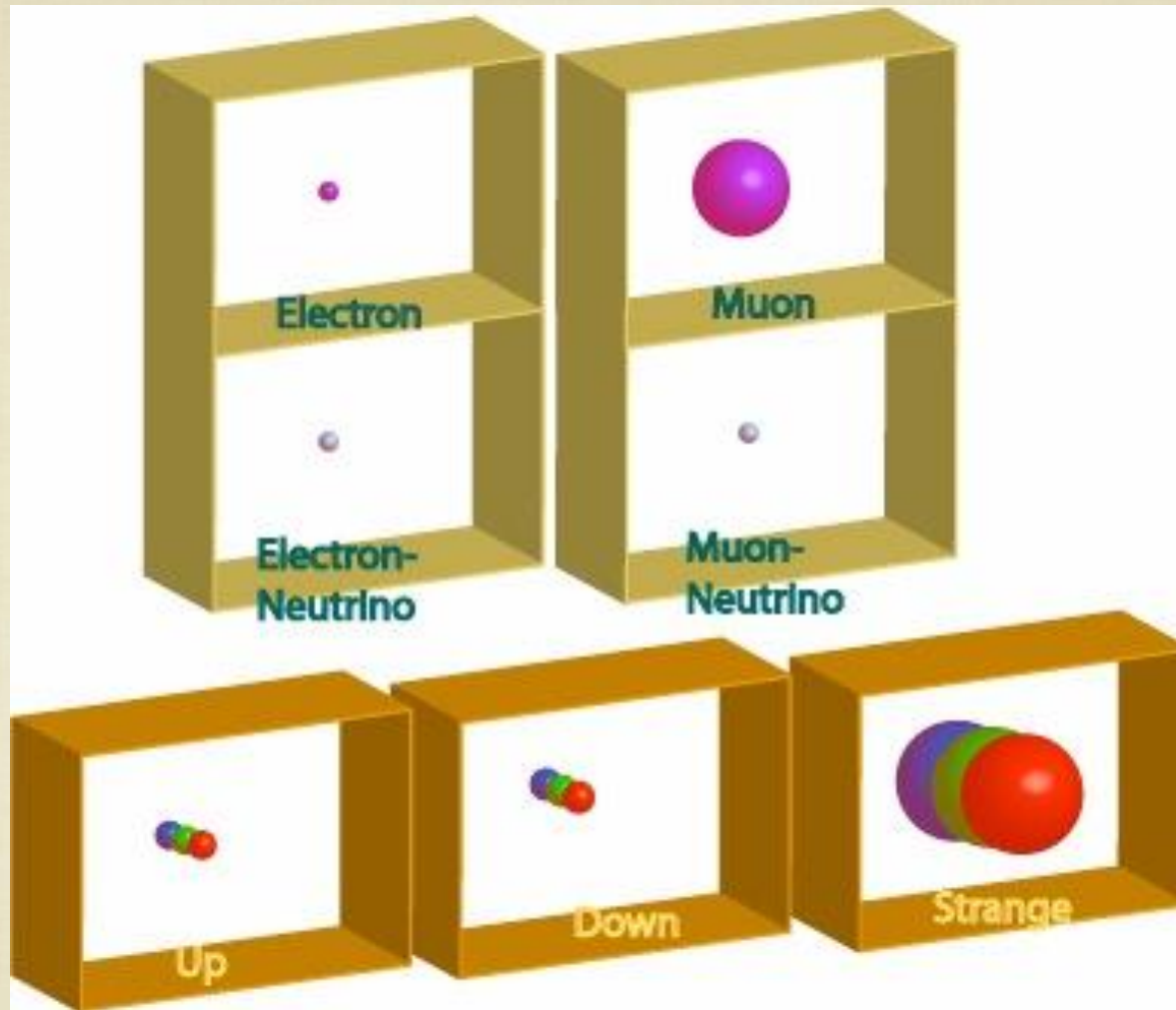
## Entdeckung der Gluonen (DESY, 1979)



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

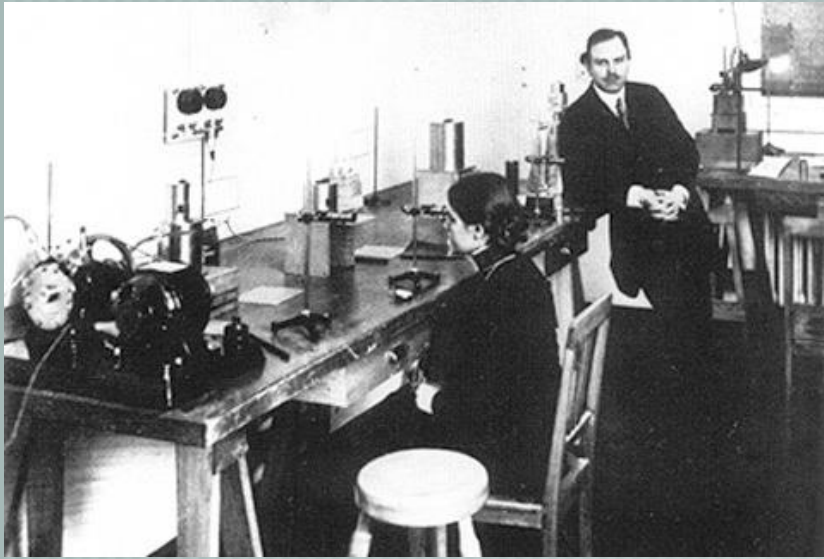
# Felder

'Schwache' Wechselwirkung

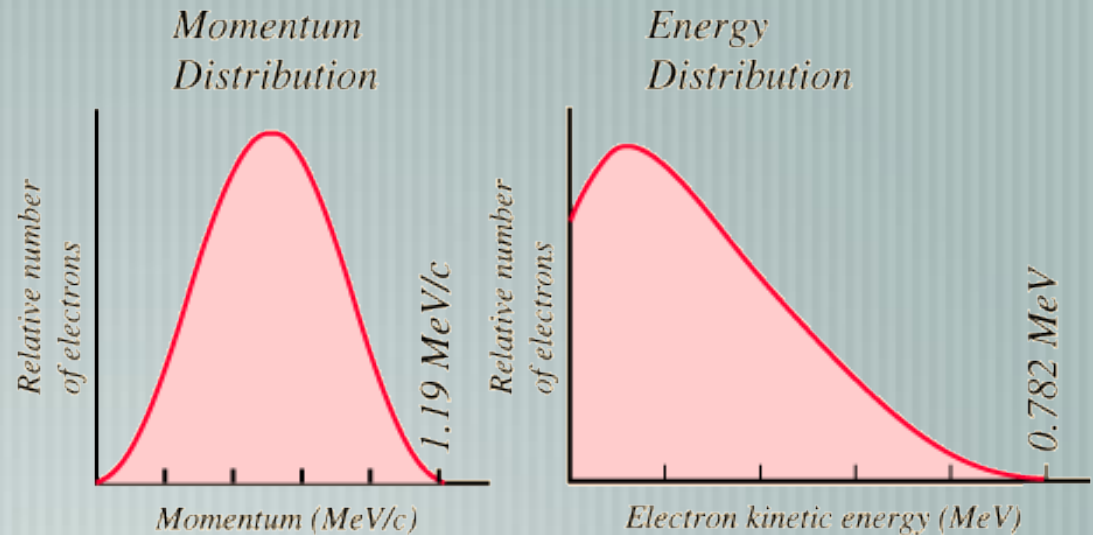
**Beta-Zerfall von Atomkernen - warum wurden Elektronen mit einem kontinuierlichen Energiespektrum emittiert?**

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

**Verletzung der Energieerhaltung ?**

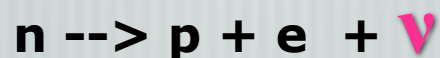


1911 Lise Meitner, Otto Hahn



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

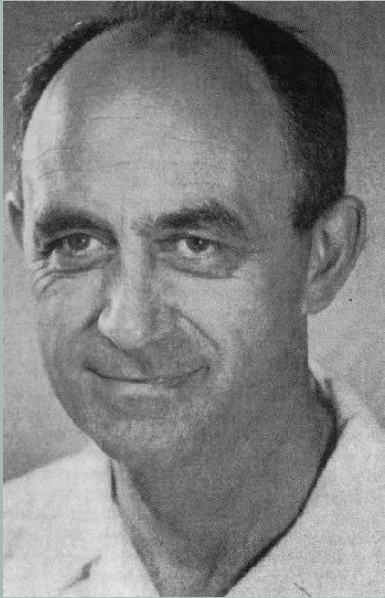
\*'neutron', but in 1931 Fermi called it "neutrino" (little neutron)



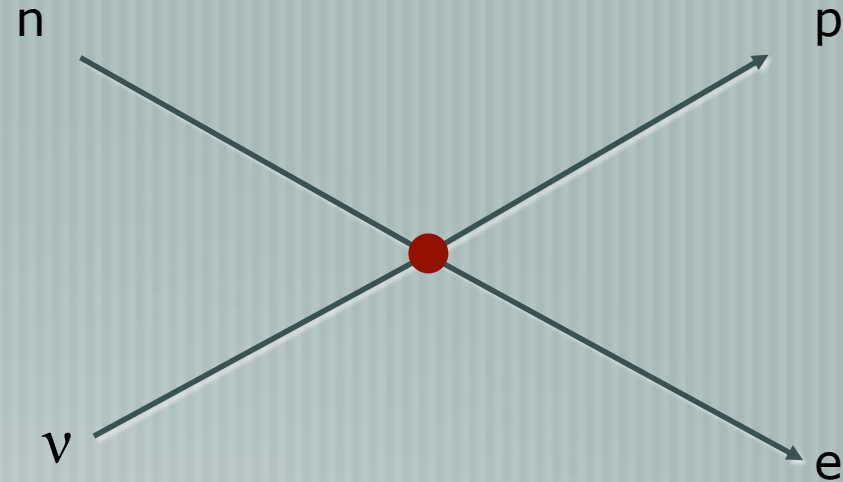


# Felder

'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**

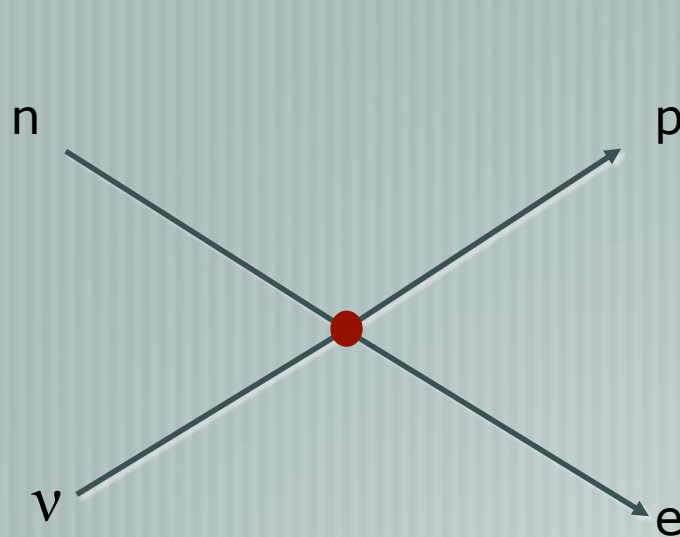
# Elektroschwache WW

1958 Glashow

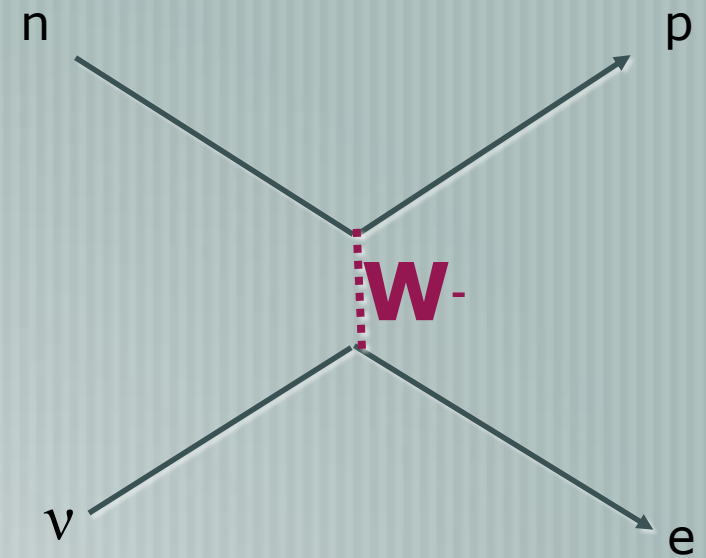
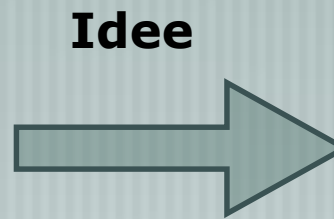
**In den 50er gab es ein grosses (theoretisches) Problem**

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

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



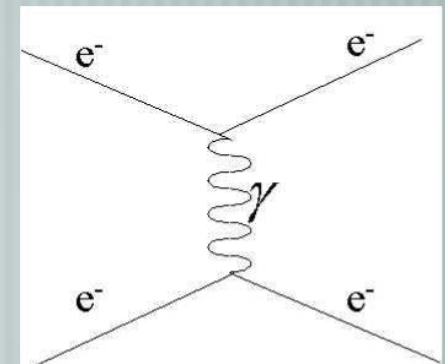
Fermi model



Glashow model

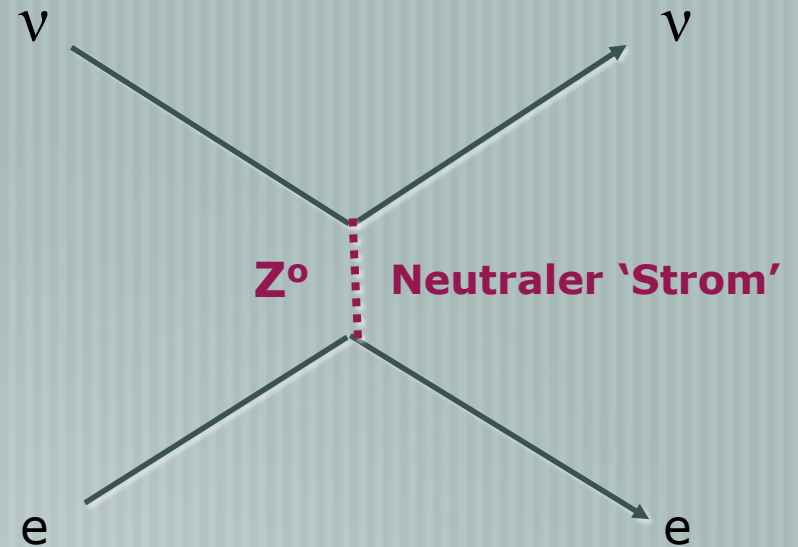
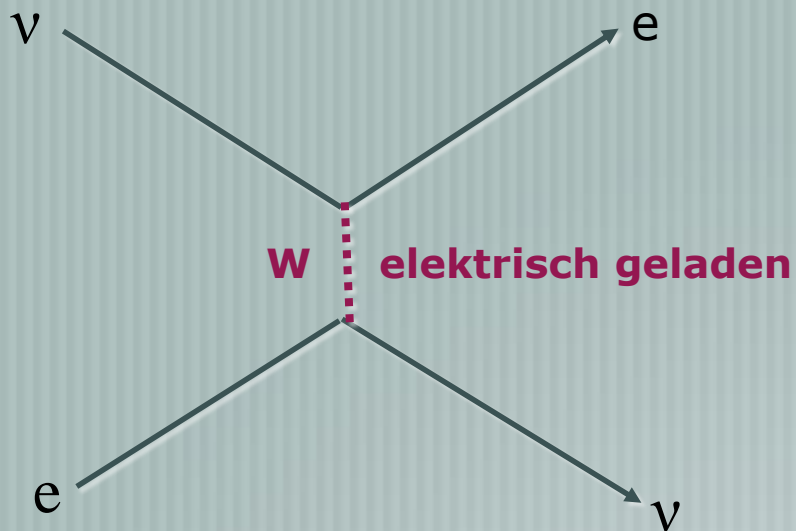
**Die schwache Wechselwirkung wird durch den Austausch sehr massiver 'Vektorbosonen' übertragen (Analog zum Photonenaustausch!)**

**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)**

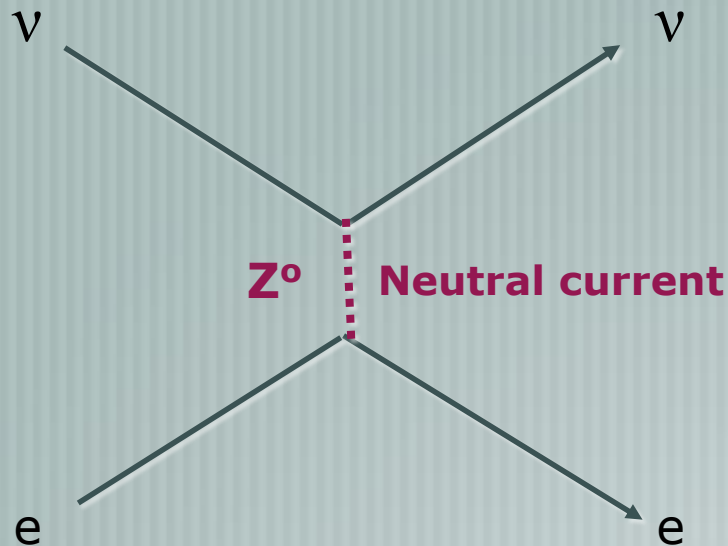
**Vereinigung der schwachen und der elektromagnetischen Wechselwirkung**

- 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

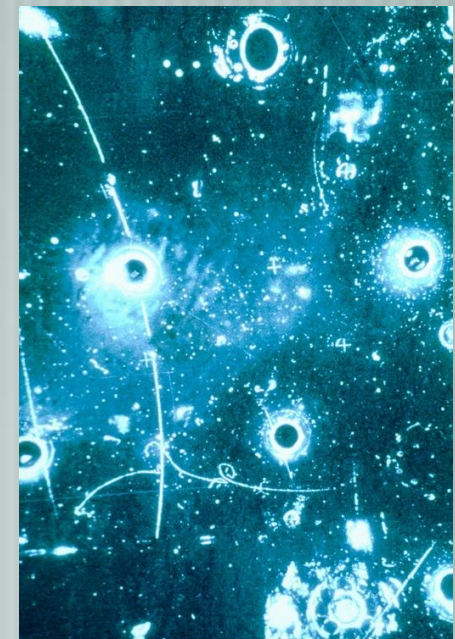
### OBSERVATION OF NEUTRINO-LIKE INTERACTIONS WITHOUT MUON OR ELECTRON IN THE GARGAMELLE NEUTRINO EXPERIMENT

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*

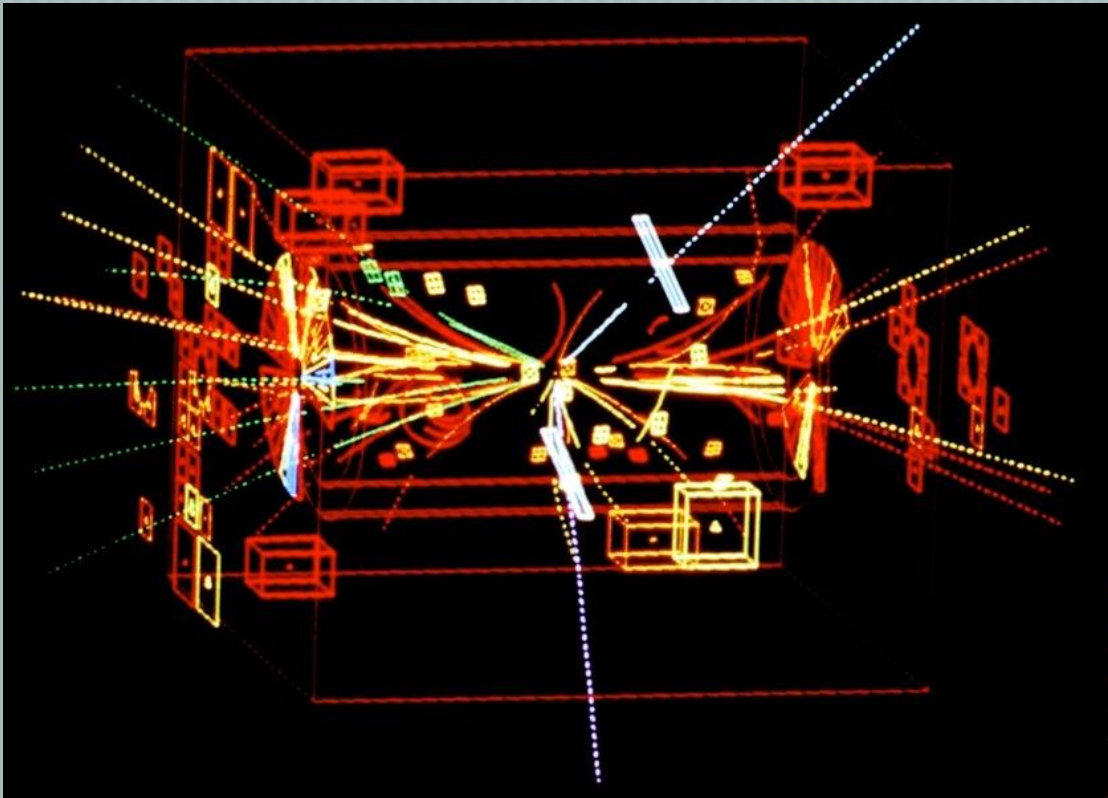




# Elektroschwache WW

1983

## Entdeckung der W und Z Bosonen am CERN (1983)



W Ereignis im UA-1 Detektor

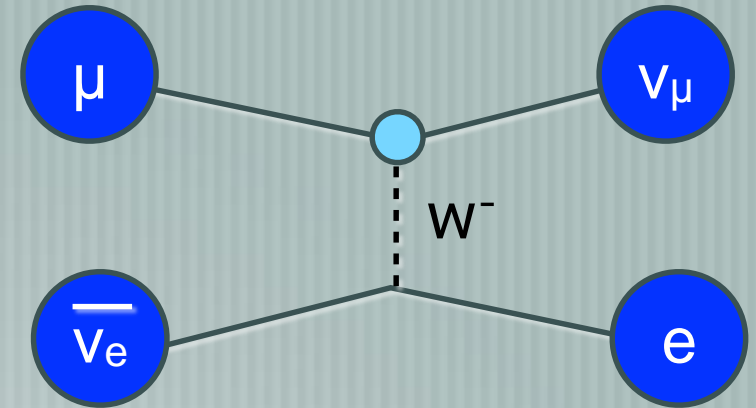
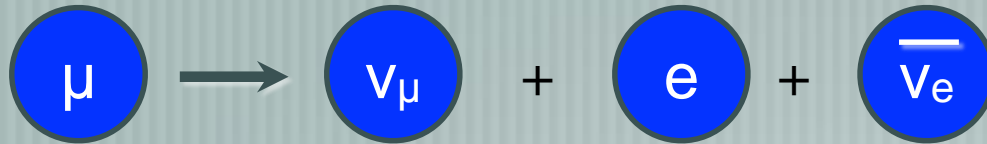


Carlo Rubbia, Simon van der Meer

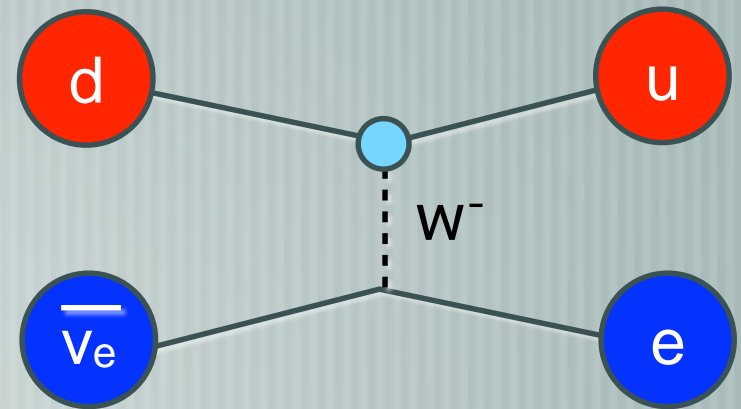
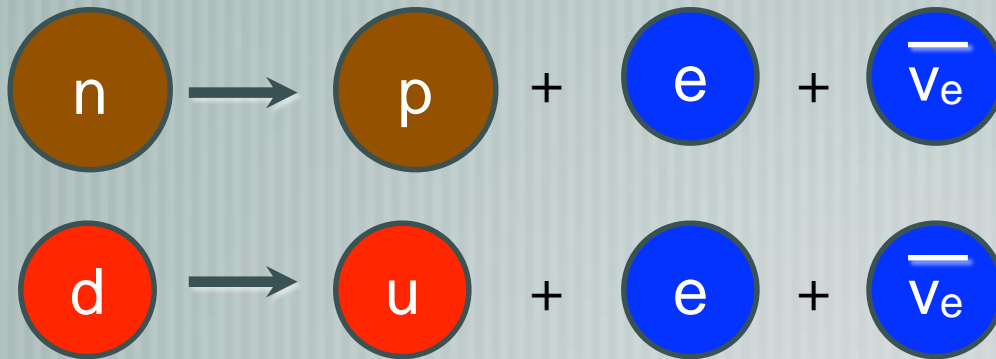
# Elektroschwache Wechselwirkung

“Universalität” : Leptonen und Quarks

Müon-Zerfall:

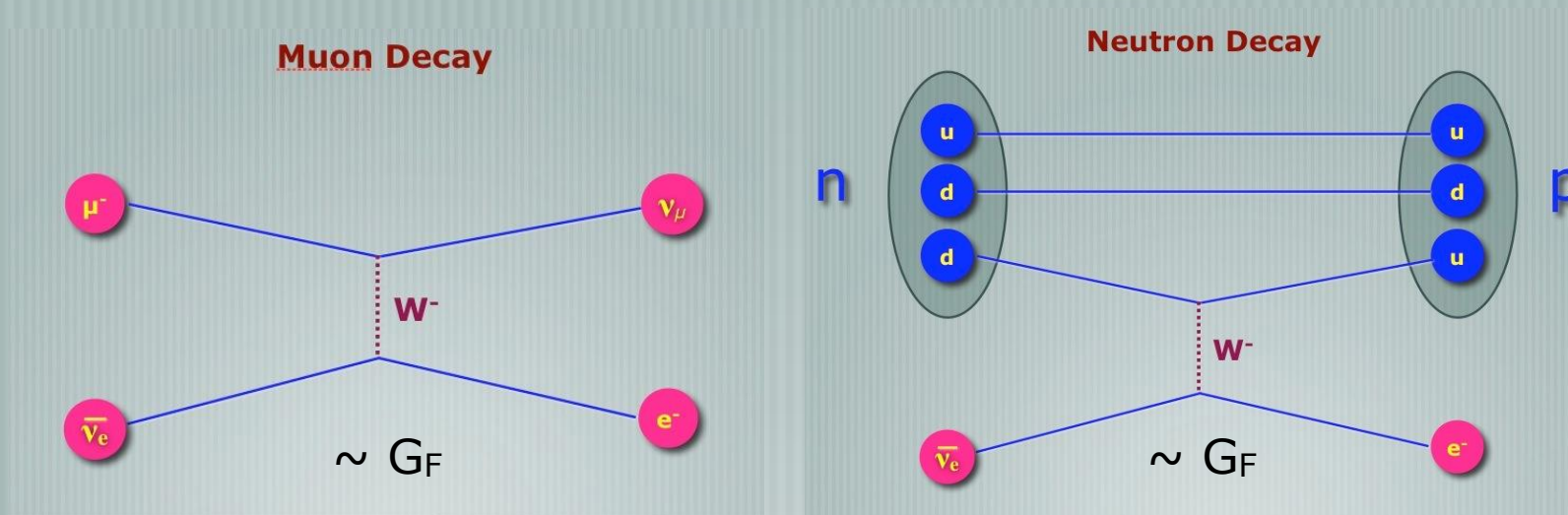


Neutron-Zerfall:



# 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”

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

$\theta_c = \text{Cabbibo angle} \sim 20^\circ$

# 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\*

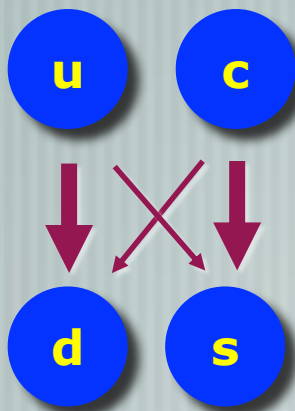
S. L. GLASHOW, J. ILIOPOULOS, AND L. MAIANI†

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

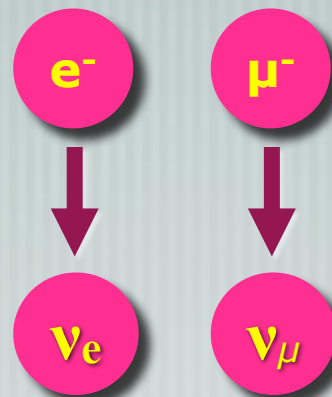
(Received 5 March 1970)

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



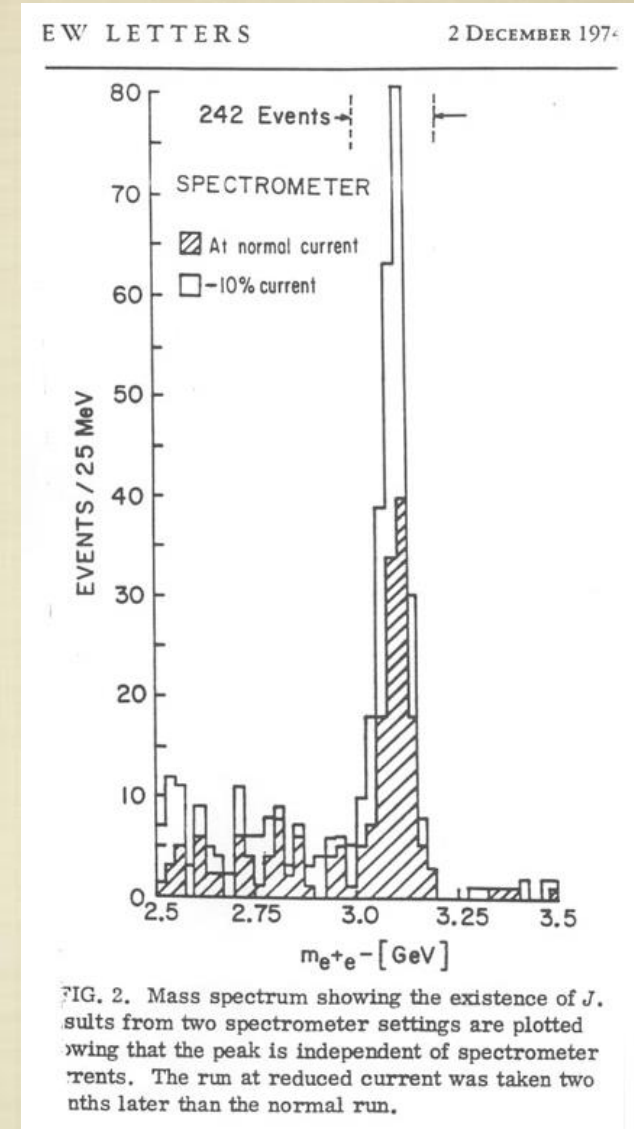
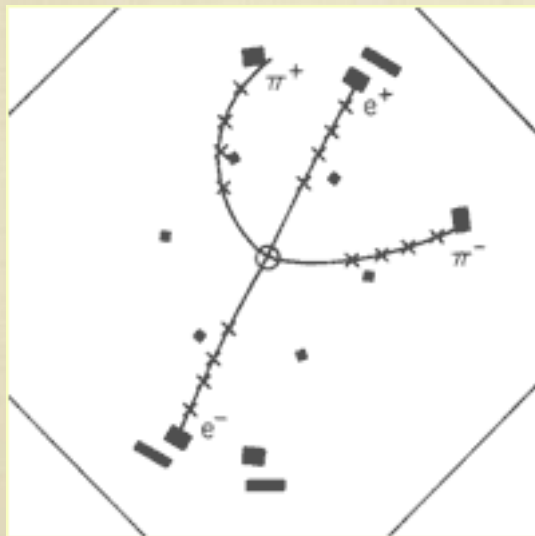
*Dies war das  
theoretische 'Standard'-  
Modell des Jahres 1970  
(mit zwei Familien)*



## 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!

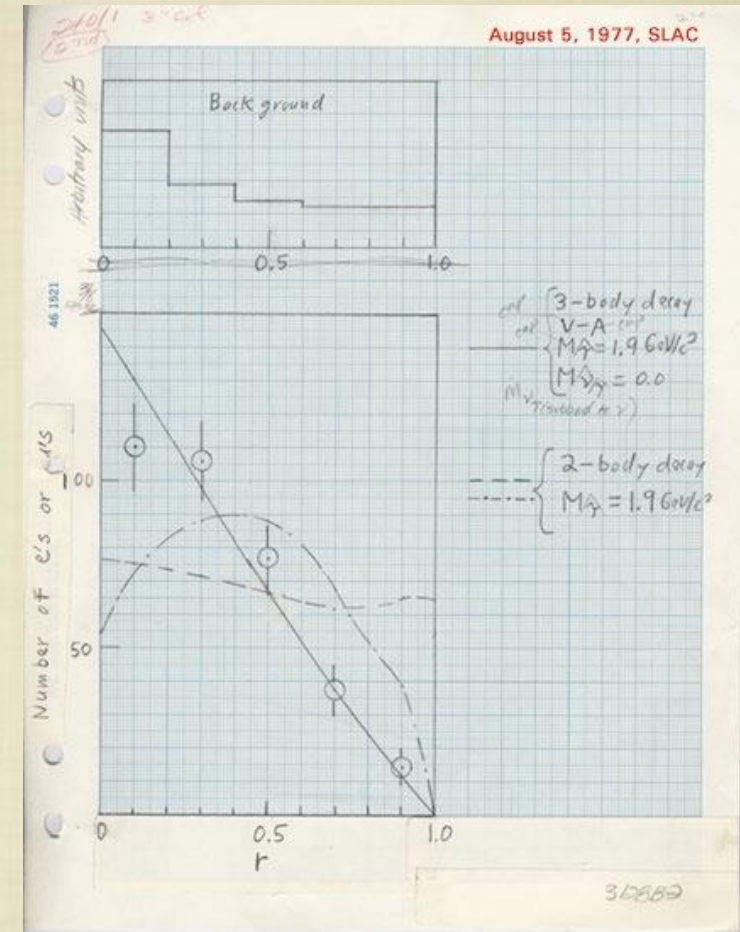
Ein neues 'schweres Elektron' mit  $M = 3500 m_e$

... 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').



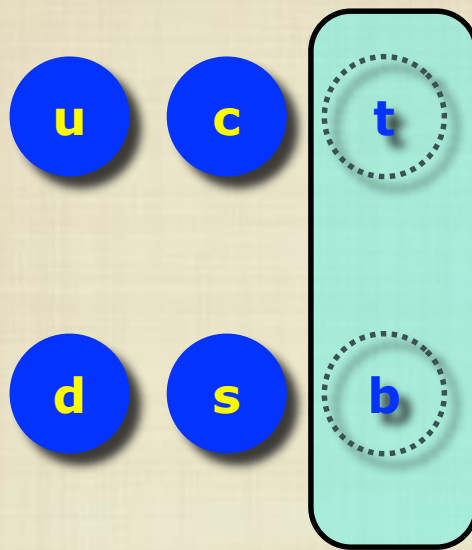
Marty Perl's Logbook

# TEILCHENSPEKTRUM

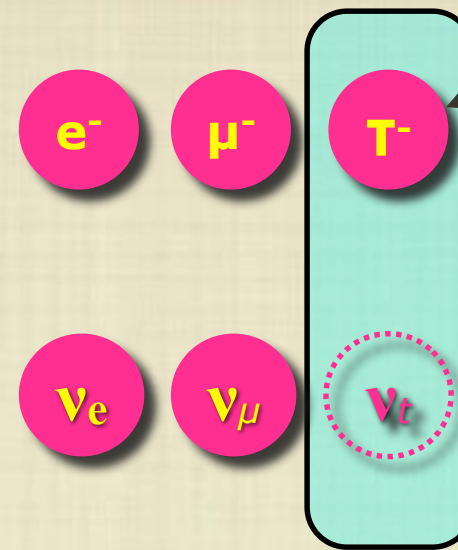
Quarks

1975

Die Suche nach den fehlenden Familienmitgliedern begann ...



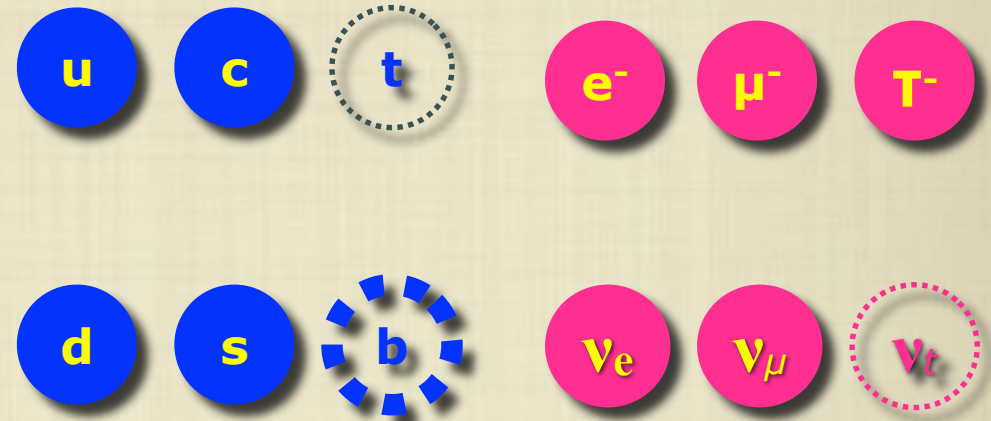
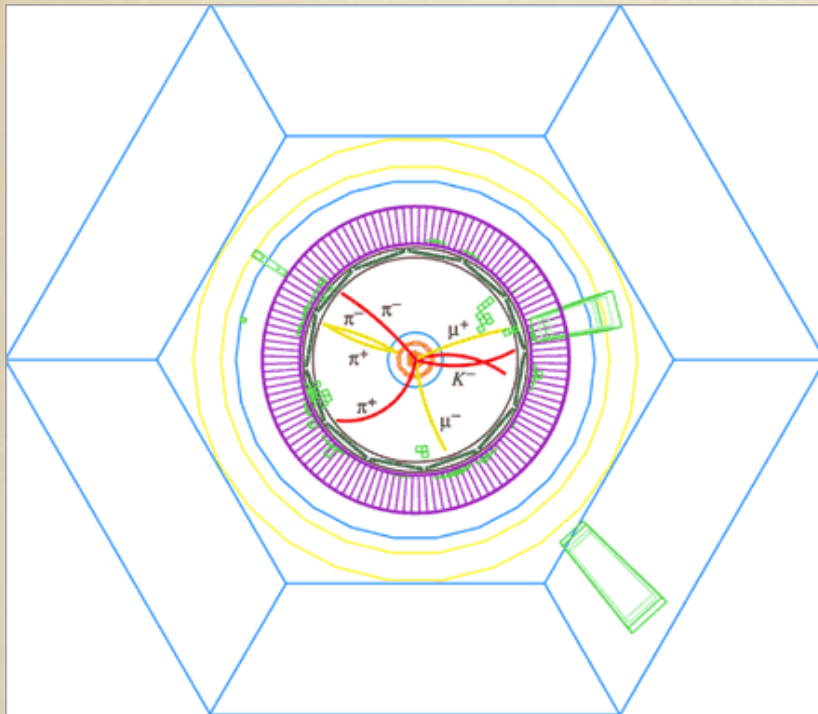
Quarks



Leptons

new

## Entdeckung des 'Bottom' Quark (Fermilab)



Quarks

Leptons

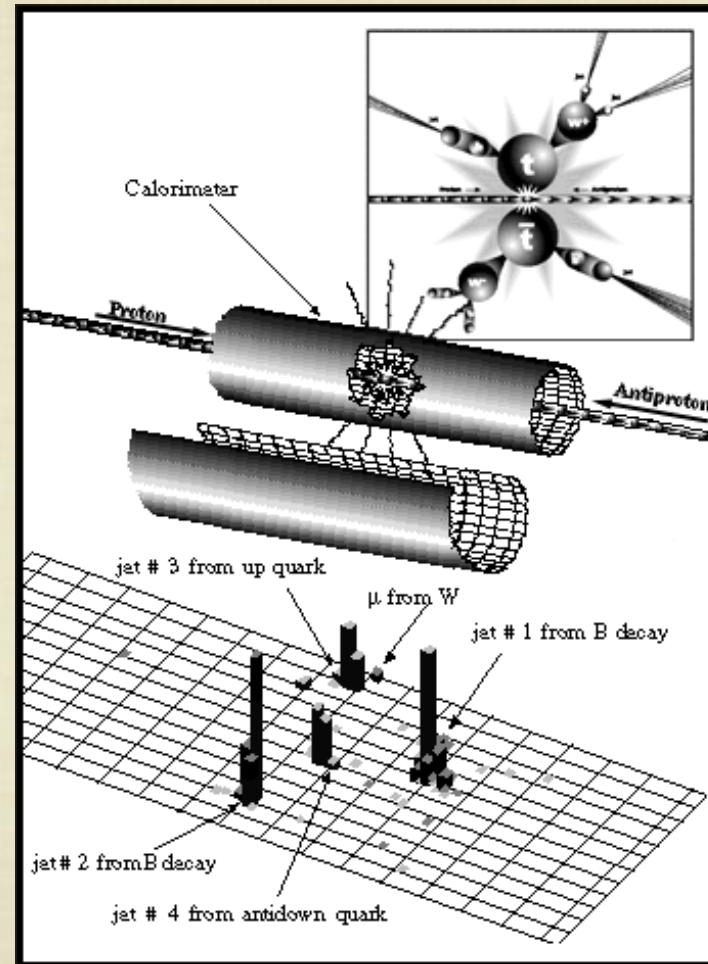
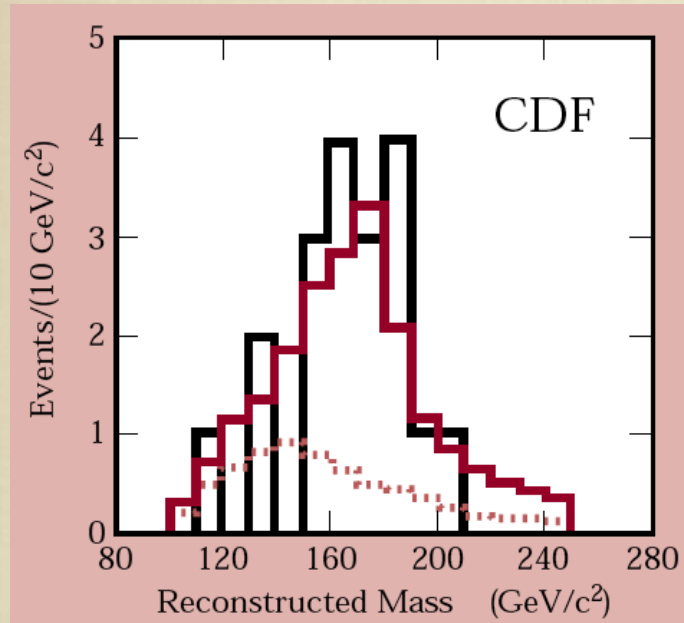
1977 entdeckten Physiker am Fermilab (nahe Chicago) ein neues Meson (genannt 'Upsilon')

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.

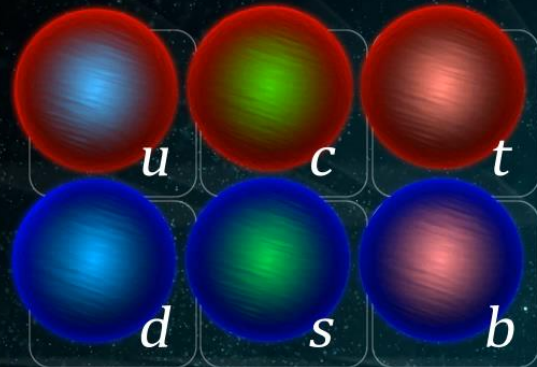


### Entdeckung des 'Top' Quark (Fermilab)

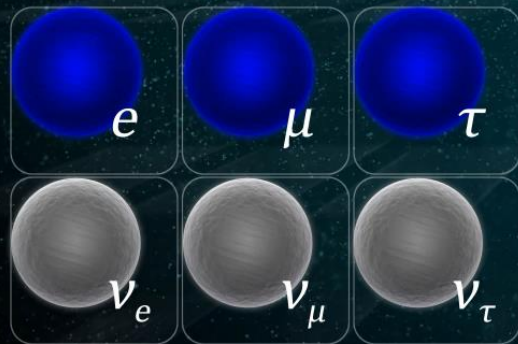


Quarks

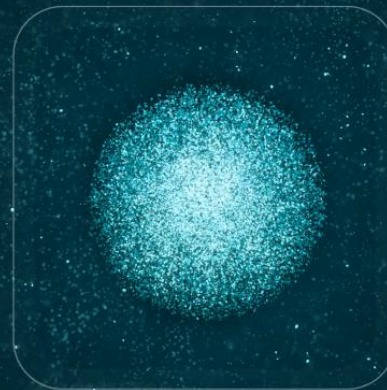
# DAS STANDARD MODEL (heute)



Quarks



Leptons



Higgs boson



Forces