

Kinetische Gastheorie

Boltzmann

Maxwell

Elektromagnetismus

Newton

### Teilchen

### Felder

### Universum

### Technologien

1895

$e^-$

Brownsche Bewegung

Photon

Radioaktivität

3

1900

Atom

Spezielle Relativität

1905

Kern

Quantenmechanik  
Welle-Teilchen Dualismus  
Spin/Fermion-Boson

Höhenstrahlung

Allgemeine Relativität

Geiger

Wolken

1910

$p^+$

1920

$n$

Antimaterie

Fermi Theorie

Yukawa  $\pi$  Austausch

Galaxien; Ausdehnung des Universums

Zyklotron

1930

$e^+$

$\mu^-$

Dunkle Materie

1940

Kernfusion

1950

$\tau^-$

$\nu_e$

$\nu_\mu$

$\pi$   
Teilchenzoo

QED

P, C, CP Verletzung

Big Bang Nukleosynthese

Synchrotron

Blasenkammer

1960

$\nu_e$

$\nu_\mu$

$u$   $d$   $s$

Higgs

W Bosons

Kosmische Hintergrundstrahlung

$e^+e^-$  Ring

Vieldrahtkammer

1970

$c$

GUT

EW Vereinigung

QCD Farbladung

Strahlkühlung

Prozessorchner

1975

$\tau^-$

STANDARD MODEL

SUSY

1980

$b$

Superstrings

W

Z

g

Inflation

$p^+p^-$  Ring

1990

3 Teilchenfamilien

Inhomogenität der Hintergrundstrahlung (COBE, WMAP)

Moderne Detektoren

WWW

2000

$\nu_\tau$

$\nu$  Masse

Dunkle Energie

GRID

2010

**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

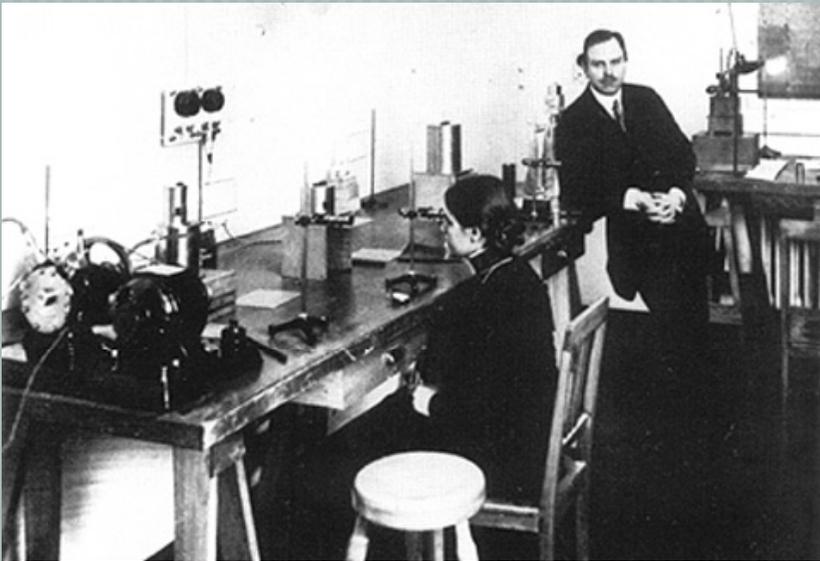
# Felder

'Schwache' Wechselwirkung

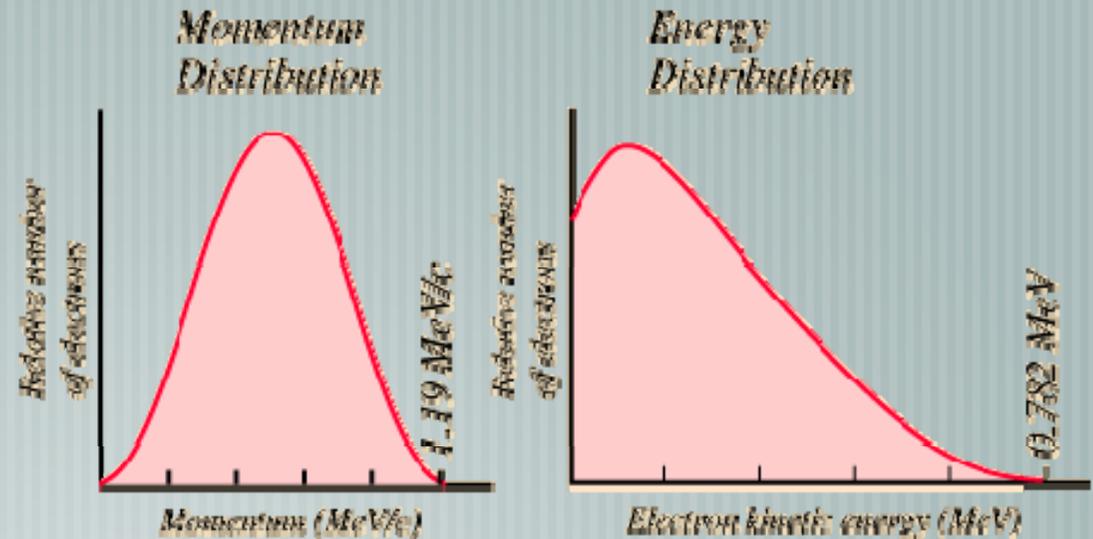
Beta-Zerfall von Atomkernen - warum wurden Elektronen mit einem kontinuierlichen Energiespektrum emittiert?

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

Verletzung der Energieerhaltung ?

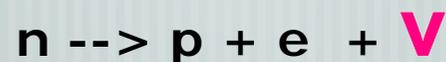


1911 Lise Meitner, Otto Hahn



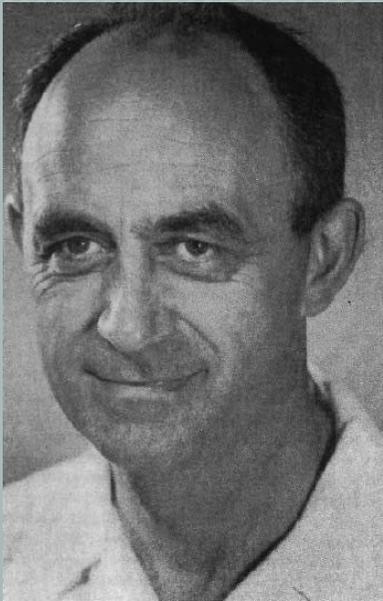
1930 Wolfgang Pauli: an **extremely light neutral particle\*** is emitted in beta decay

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

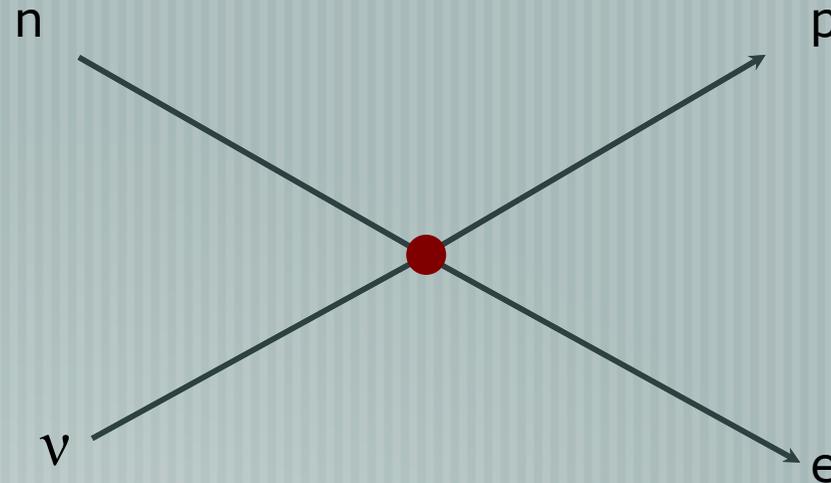


# Felder

'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**

# Felder

'Starke' Wechselwirkung

## Was hält Protonen und Neutronen im Kern zusammen

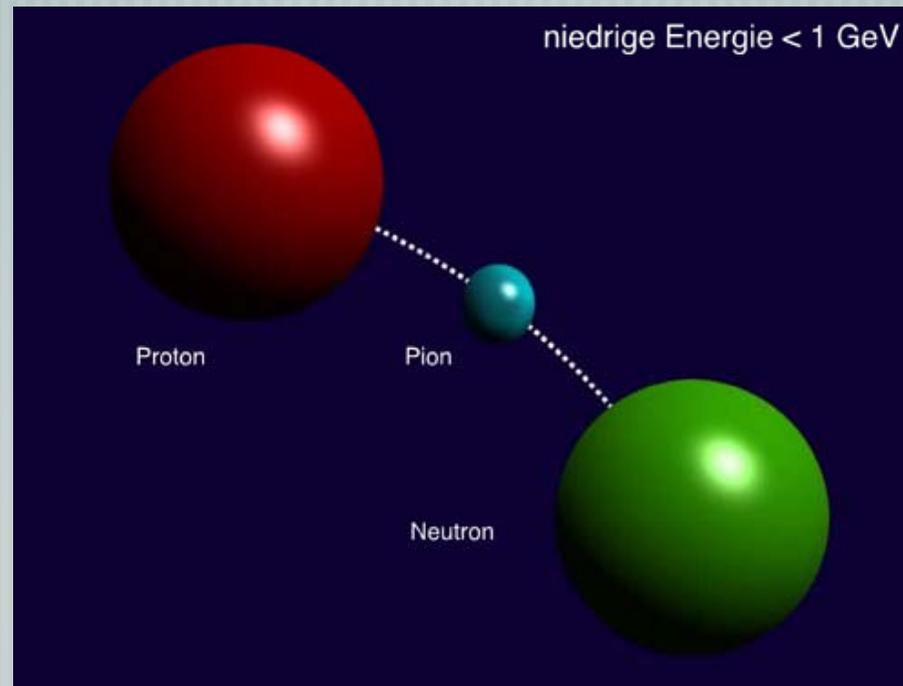


Yukawa (1934)

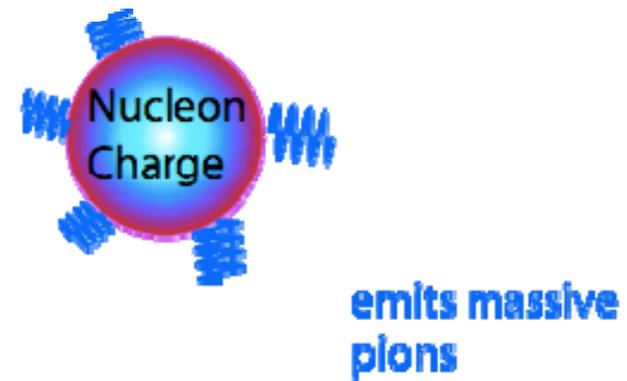
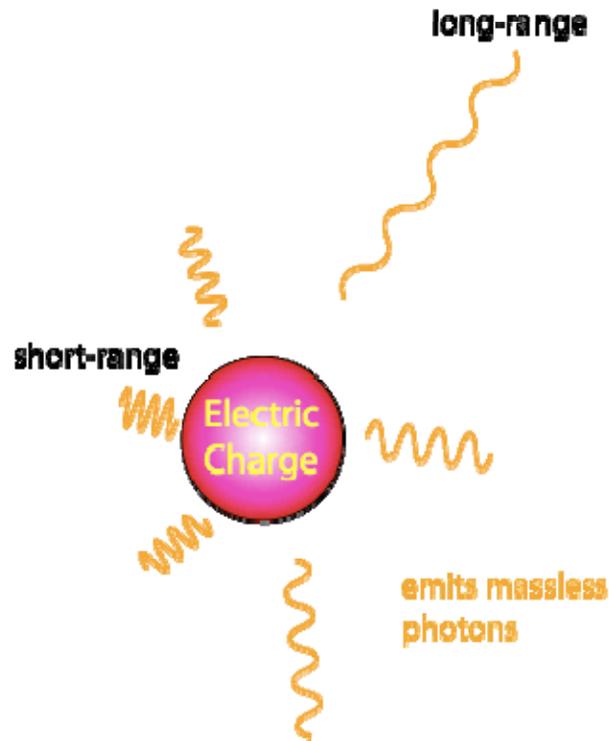
- 1) Die Kraft muss stärker als die elektromagnetische Kraft sein
- 2) Kurze Reichweite ( $\sim 1-2$  fm), um die Grösse des Atomkerns zu erklären

Yukawa's idea:

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



# Elektromagnetische vs 'Starke' WW



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

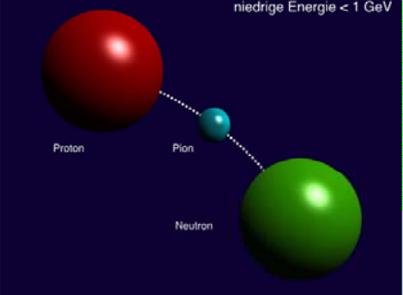
$$r = c \Delta t = \frac{\hbar c}{m} \sim \frac{200 \text{ MeV fm}}{m}$$

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

Coulomb law

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

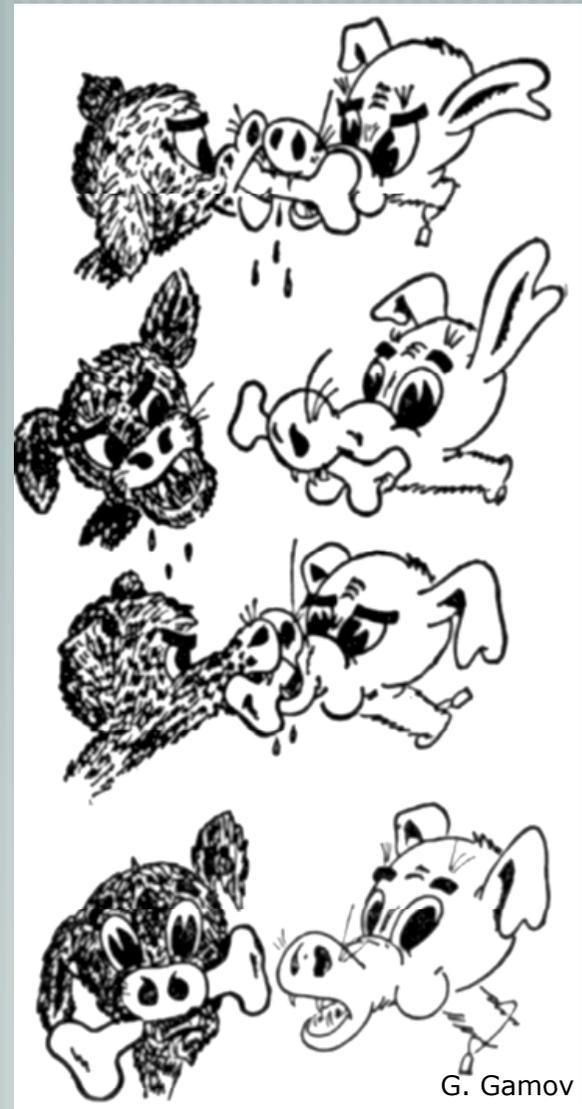
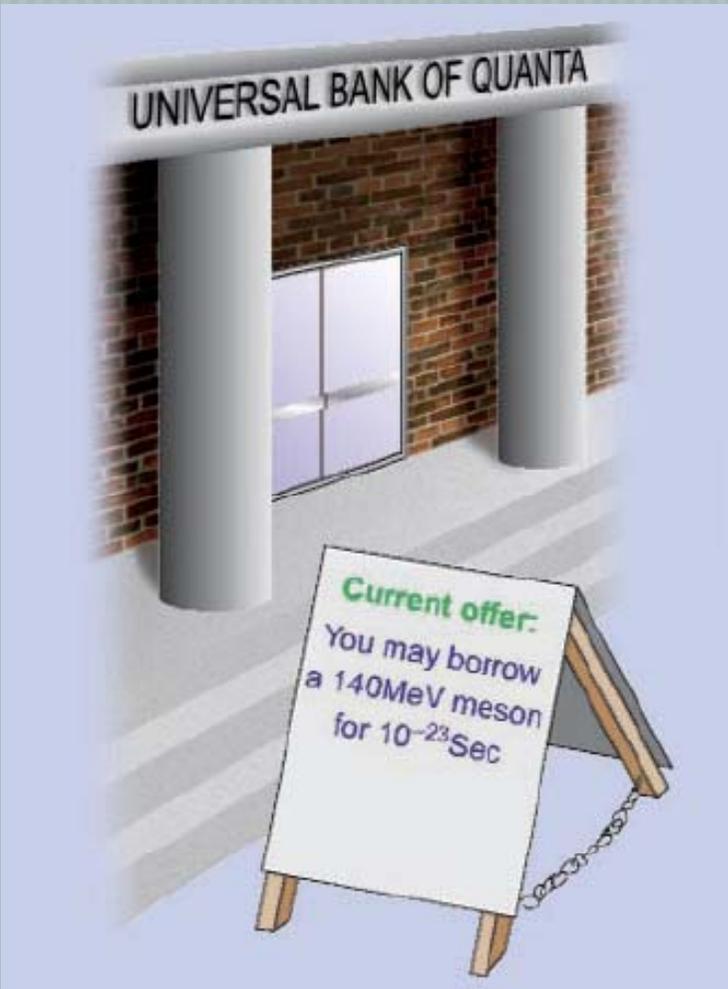
Yukawa potential ~ Modified "Coulomb" law



# Felder

'Starke' Wechselwirkung

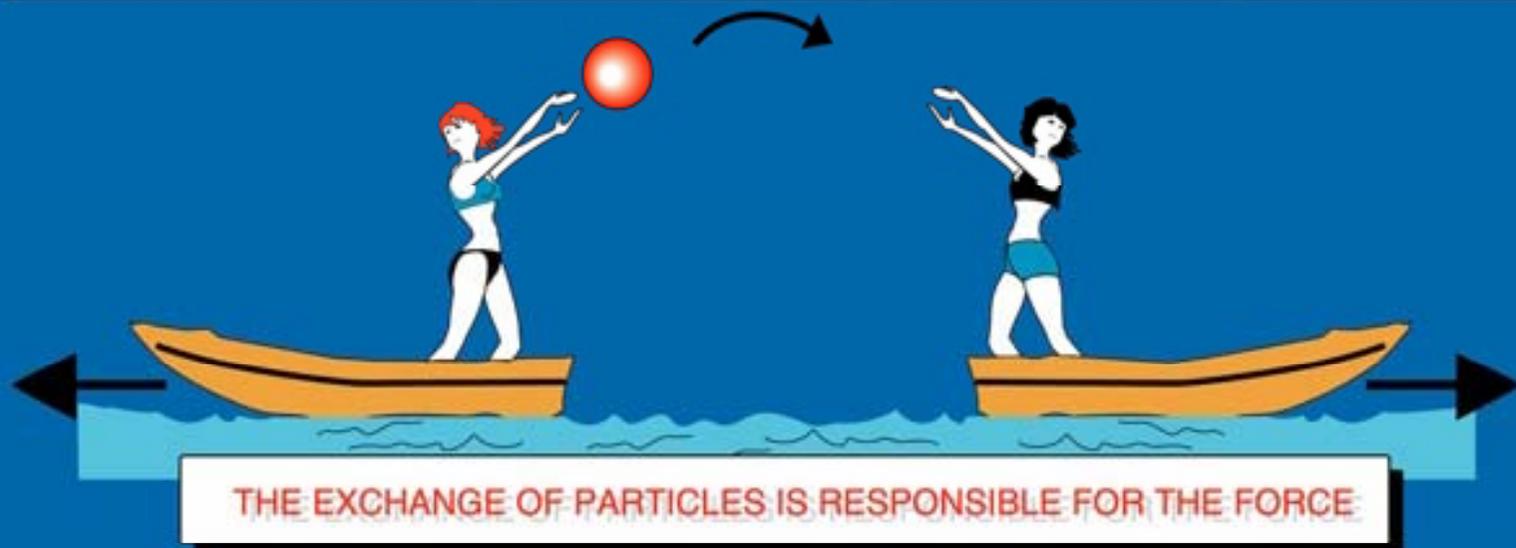
Analogien zum 'Austauschkraften'



Unschärferelation:  $1.4 \text{ fm} \sim 140 \text{ MeV}$

# The forces in Nature

TYPE	INTENSITY OF FORCES ( DECREASING ORDER )	BINDING PARTICLE ( FIELD QUANTUM )	OCCURS IN :
STRONG NUCLEAR FORCE	$\sim 1$	GLUONS ( NO MASS )	ATOMIC NUCLEUS
ELECTRO -MAGNETIC FORCE	$\sim 10^{-3}$	PHOTONS ( NO MASS )	ATOMIC SHELL ELECTROTECHNIQUE
WEAK NUCLEAR FORCE	$\sim 10^{-5}$	BOSONS $Z^0, W^+, W^-$ ( HEAVY )	RADIOACTIVE BETA DESINTEGRATION
GRAVITATION	$\sim 10^{-38}$	GRAVITONS ( ? )	HEAVENLY BODIES



Kinetische Gastheorie

Boltzmann

Maxwell

Elektromagnetismus

Newton

### Teilchen

### Felder

### Universum

### Technologien

Elektromagnetismus

Schwache WW

Starke WW

Detektor

Beschleuniger

1895

$e^-$

Brownsche Bewegung

Photon

Radioaktivität

1900

1905

Atom

Spezielle Relativität

1910

Kern

Quantenmechanik  
Welle-Teilchen Dualismus  
Spin/Fermion-Boson

Höhenstrahlung

Allgemeine Relativität

Geiger

Wolken

1920

$p^+$

1930

$e^+$

$n$

Antimaterie

Fermi Theorie

Yukawa  
 $\pi$  Austausch

Galaxien;  
Ausdehnung des Universums

Zyklotron

1940

5

Teilchen-zoo

$\tau^-$

$\nu_e$

$\nu_\mu$

$\pi$

$p$

$u$   $d$   $s$

$c$

$b$

$t$

6

QED

P, C, CP Verletzung

Higgs

W Bosons

EW Vereinigung

GUT

GUT

Superstrings

QCD Farbladung

Dunkle Materie

Kernfusion

Synchrotron

1950

Big Bang  
Nukleosynthese

Blasenkammer

1960

Kosmische Hintergrundstrahlung

$e^+e^-$  Ring

1970

Vieldrahtkammer

Strahlkühlung

1975

STANDARD MODEL

GUT

QCD Farbladung

Prozessrechner

1980

Superstrings

W

Z

g

Inflation

$p^+p^-$  Ring

1990

3 Teilchenfamilien

Inhomogenität der Hintergrundstrahlung (COBE, WMAP)

Moderne Detektoren

WWW

2000

$\nu_\tau$   
 $\nu$  Masse

Dunkle Energie

GRID

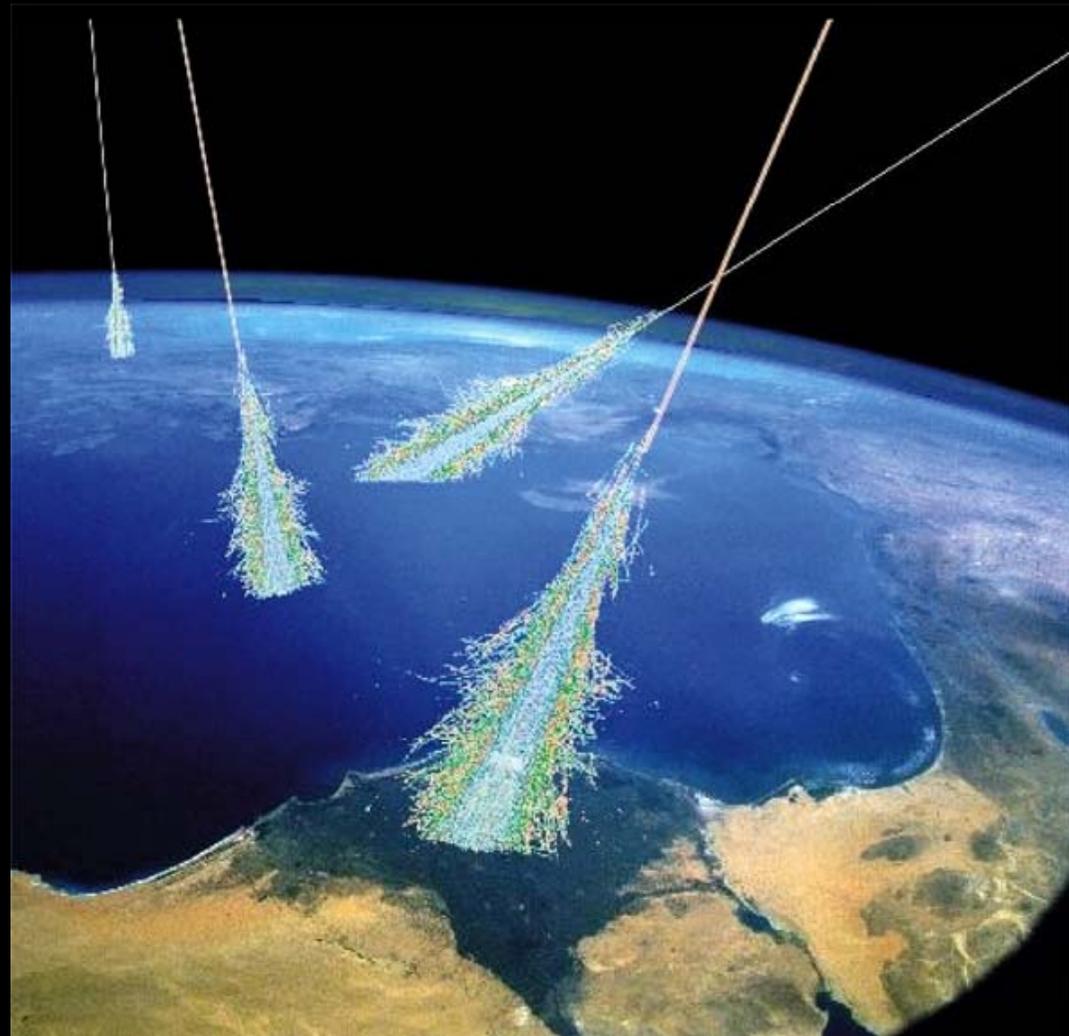
2010

Im Jahr 1913 gab es die ersten Hinweise auf ein nicht ganz so ruhiges Universum

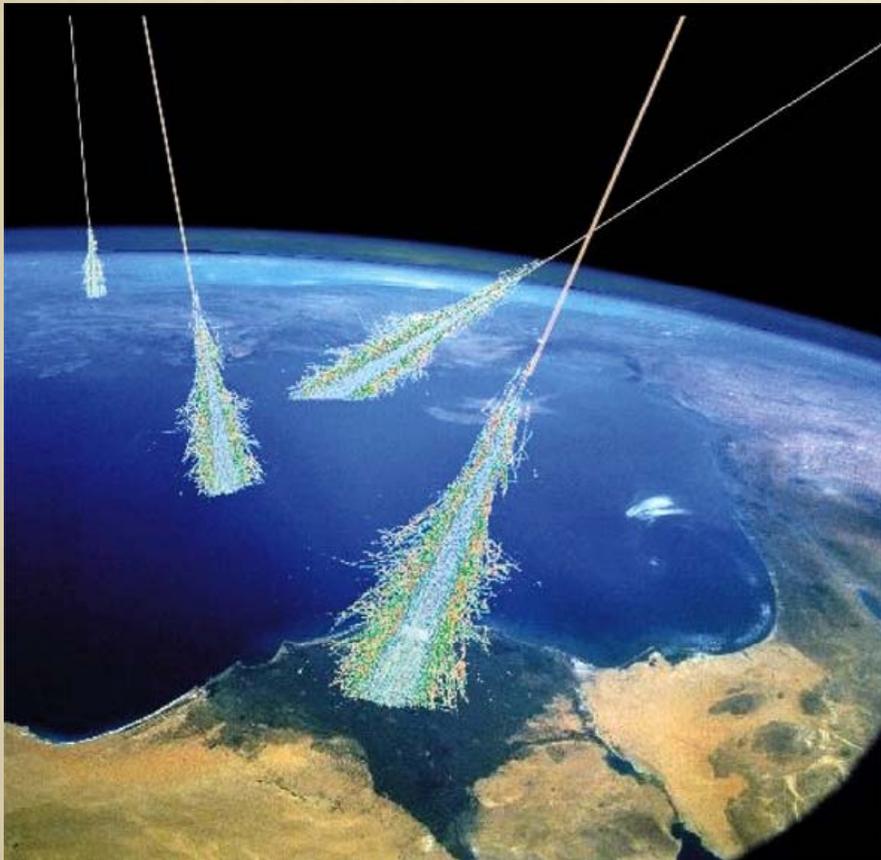
## Entdeckung der kosmischen Strahlung



Victor Hess



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



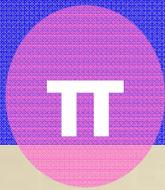
**Ein neues Teilchen im richtigen Massenbereich wurde entdeckt**

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' ( $206 \times m_e$ )**

**I. Rabi: "WER HAT DAS BESTELLT?"**



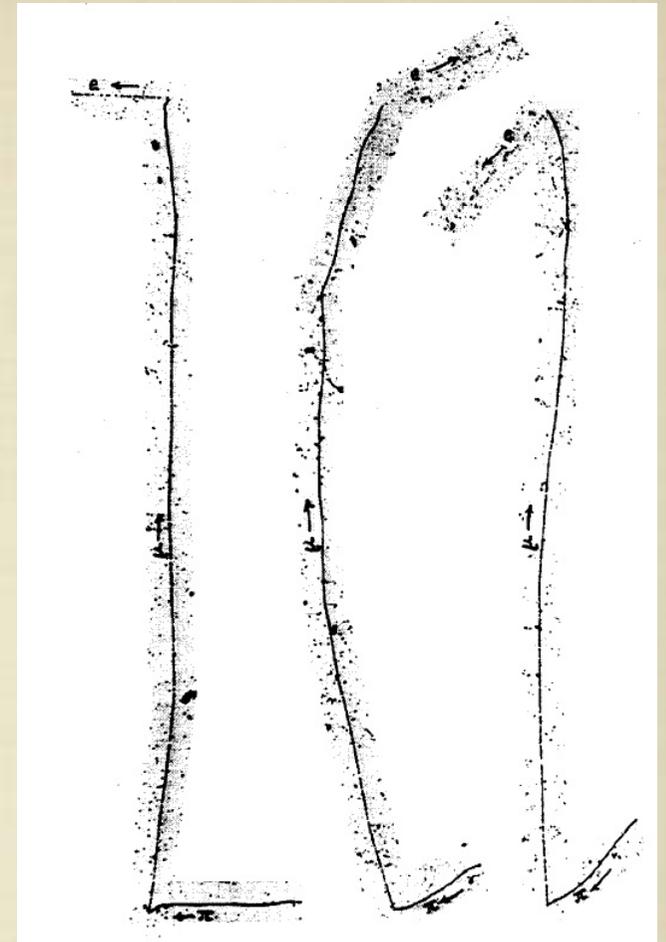
## 1947: Entdeckung des (geladenen) Pions



Scanned at the American Institute of Physics

Cecil Powell

Ouff!



## Photographische Emulsion

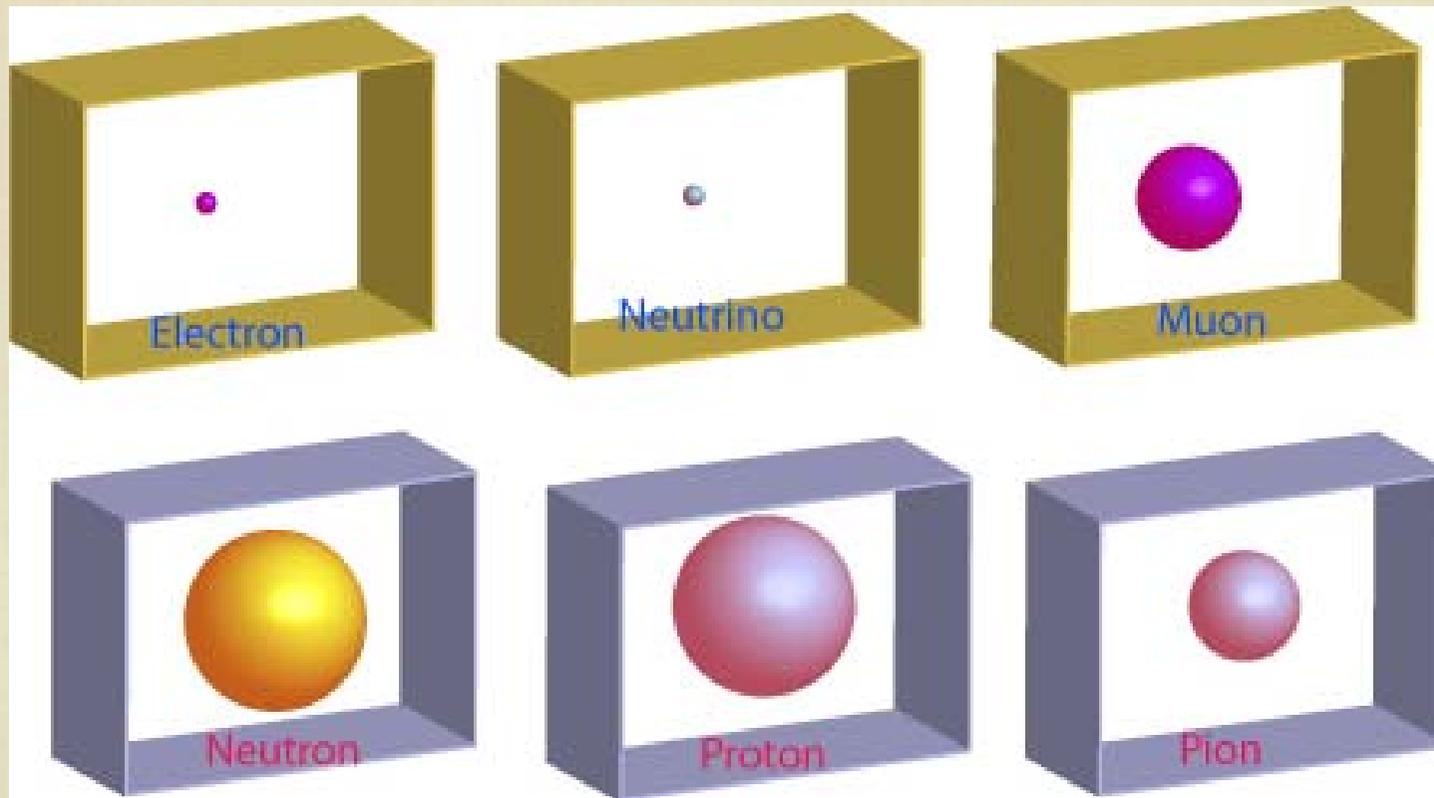
Kosmische Strahlen in **grosser Höhe** (Pic du Midi, Pyrenees)

Pionenspuren wurden im Mikroskop identifiziert

1948: Pionen am Berkeley Zyklotron produziert

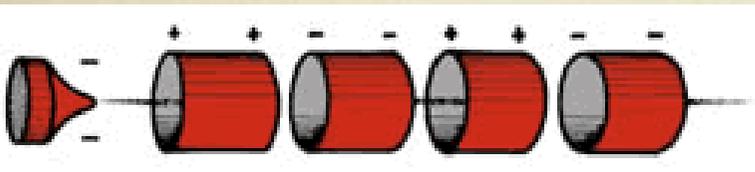
# TEILCHENSPEKTRUM

1948





Rolf Wideroe, 1928



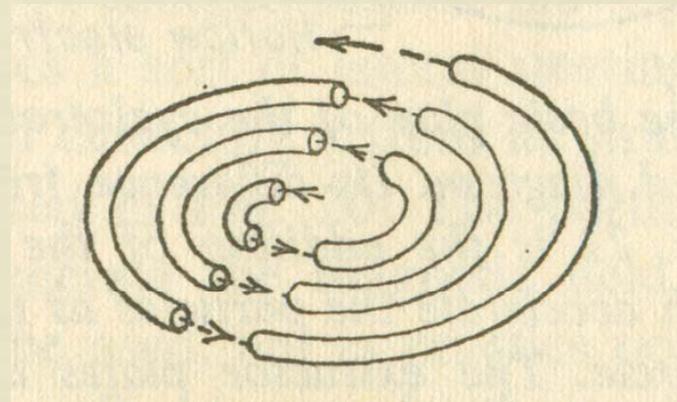
## Linearbeschleuniger

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

## Beschleuniger

*"Kosmische Strahlung aus Menschenhand"*

Ernest Lawrence, 1931



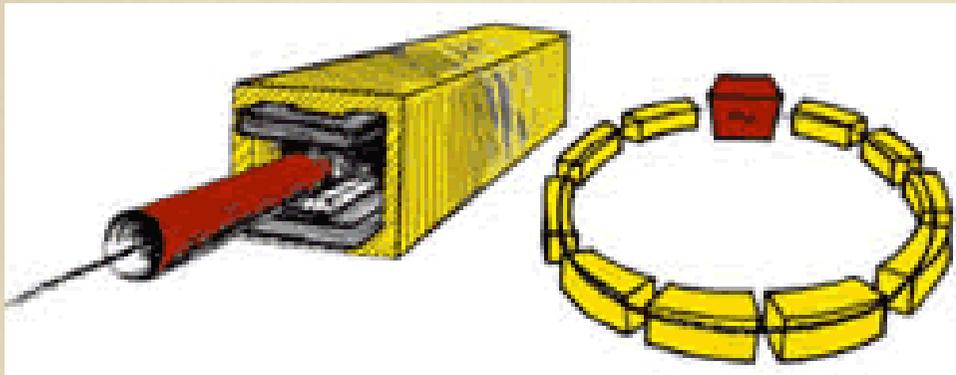
## Zyklotron

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

## 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

## 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

$K^+$   $K^-$   $K^0$

$\eta'$

Kaons

Eta-Prime

$\eta$

Eta

$\phi$

$\rho^+$   $\rho^-$   $\rho^0$

Rho

Phi

### Mesonen

$\Delta^{++}$ ,  $\Delta^+$ ,  $\Delta^0$ ,  $\Delta^-$

Delta

$\Lambda^0$

$\Sigma^+$ ,  $\Sigma^0$ ,  $\Sigma^-$

Lambda (strange!)

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)

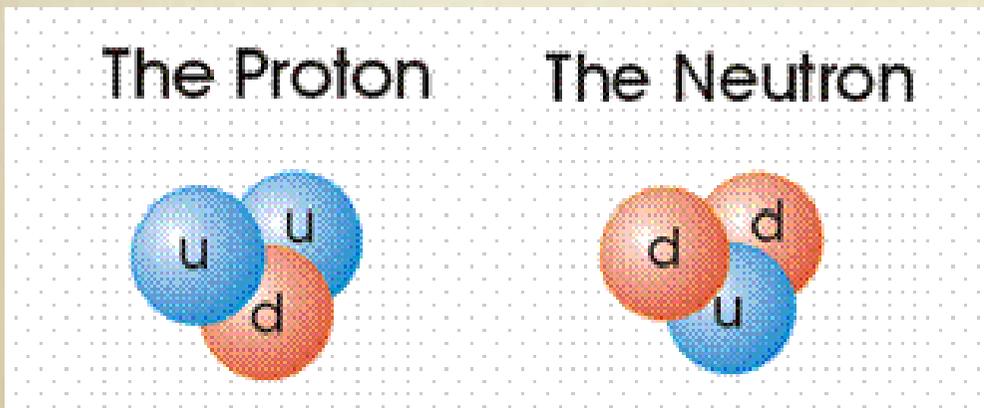
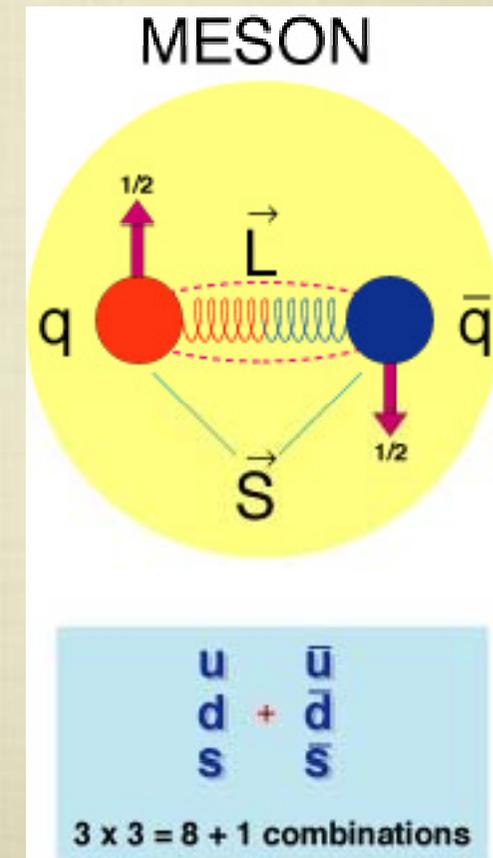
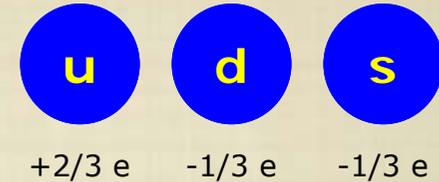
1) 3 Arten von "quarks" : up, down, strange

2) Mit elektrischer Ladung:  $+2/3$ ,  $-1/3$ ,  $-1/3$

3) Nur bestimmte Kombinationen möglich:

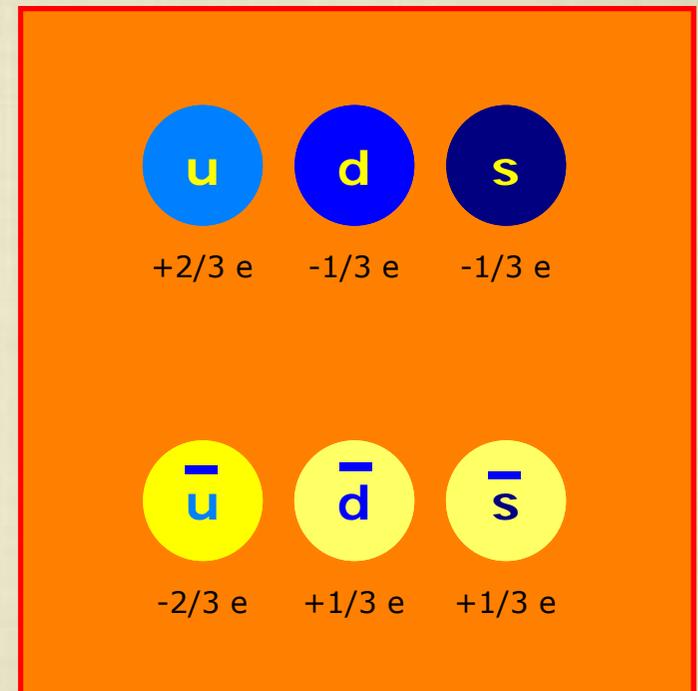
Meson = quark+antiquark

Baryon = quark(1) + quark(2) + quark(3)

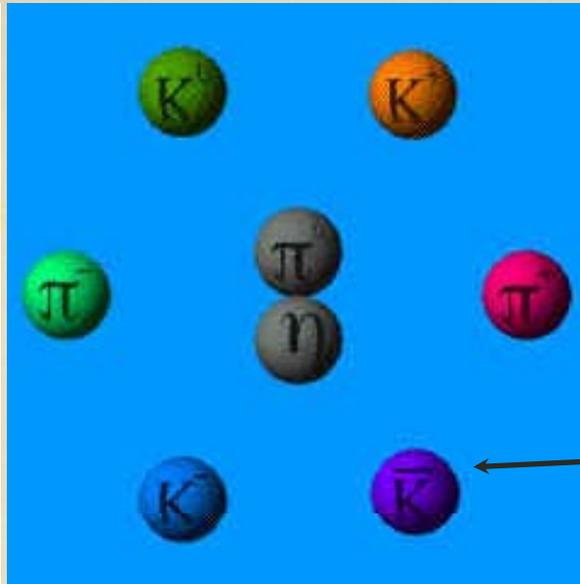
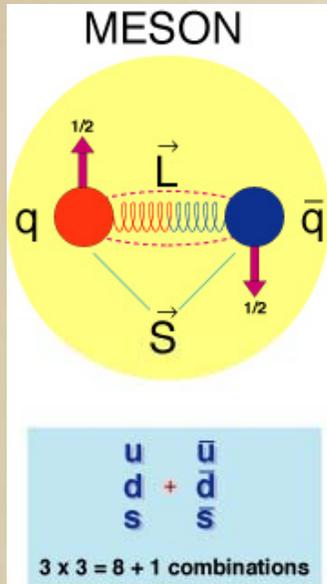


# TEILCHENSPEKTRUM

Einige der bekannteren Mesonen (quark+antiquark):



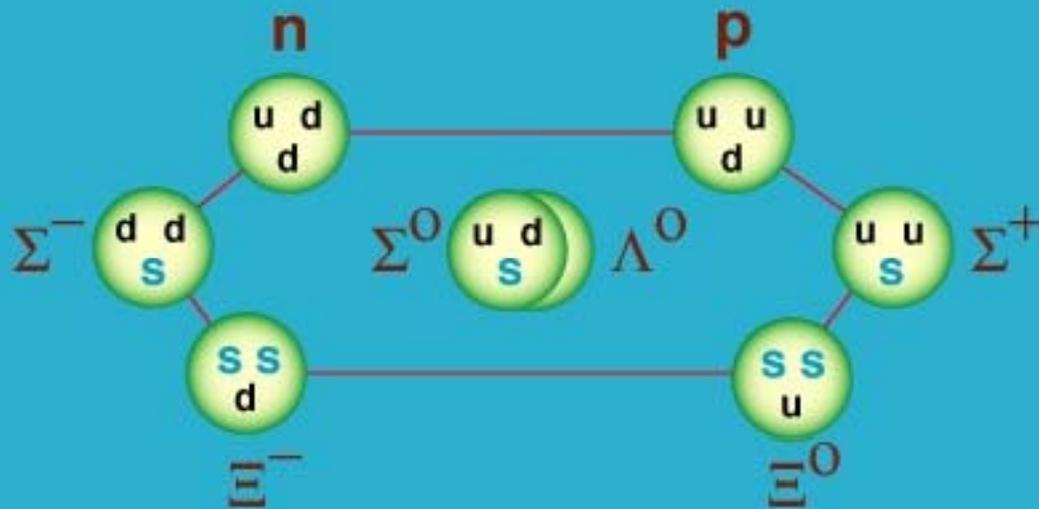
# TEILCHENSPEKTRUM



← Pion, Eta-meson

← Kaonen besitzen ein 'strange' Quark

## SPIN 1/2 BARYON OCTET

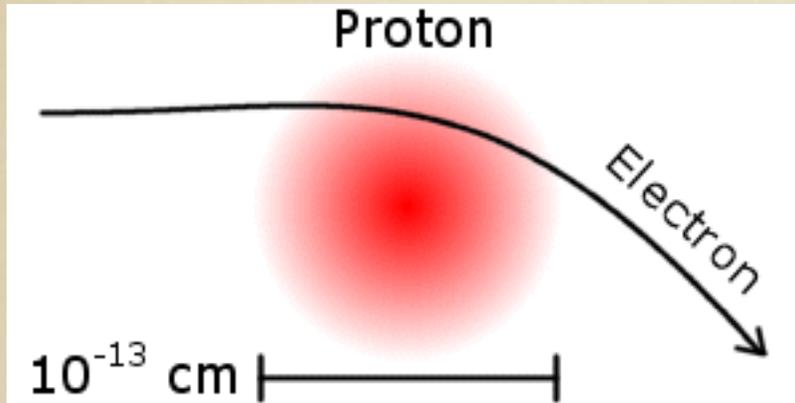


Die leichtesten Baryonen:  
 Proton, Neutron;  
 Lambda, Sigma, Xi

# TEILCHENSPEKTRUM

## Entdeckung der Quarks

Elektronenstreuung an Protonen

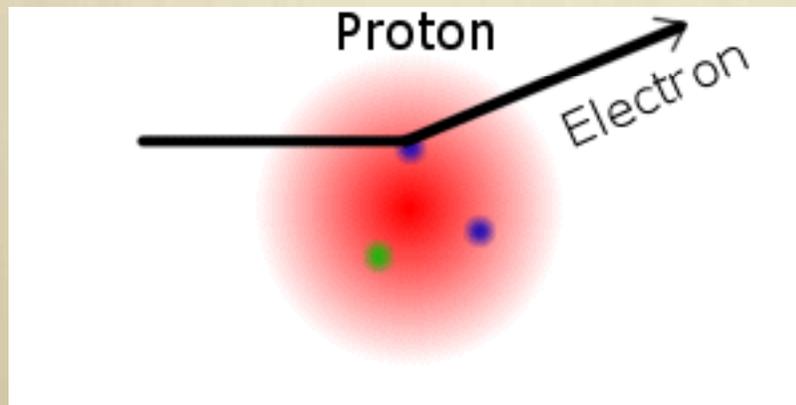


1956 Hofstadter: Messung des Protonenradius



Stanford Linear Accelerator Centre

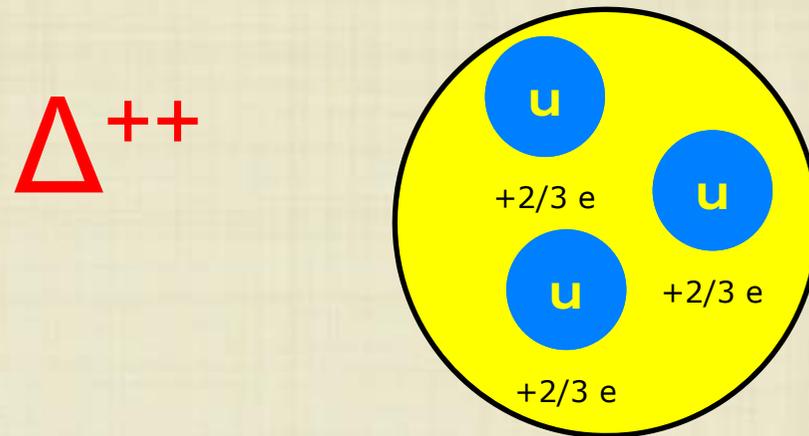
1967 Friedmann, Kendall, Taylor (SLAC): ~ Rutherford experiment mit Elektronen  
--> es gibt drei 'harte' (punktförmige) Streuzentren im Proton



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? Das 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)

# TEILCHENSPEKTRUM

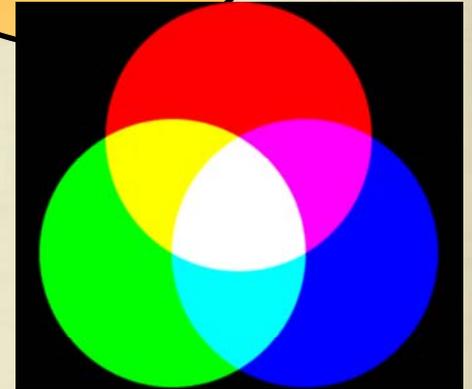
## Quantum Chromo Dynamics

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

hat nichts mit den  
Farben des Lichts zu  
tun; nur eine Analogie



***Dogma der QCD: Nur farb-neutrale Zustände können existieren***

MESONS = Quark-Antiquark

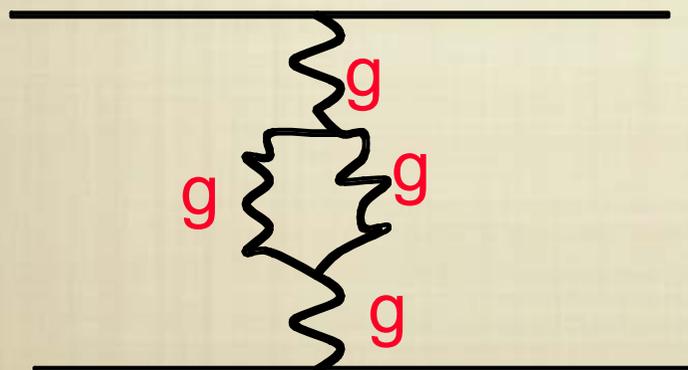
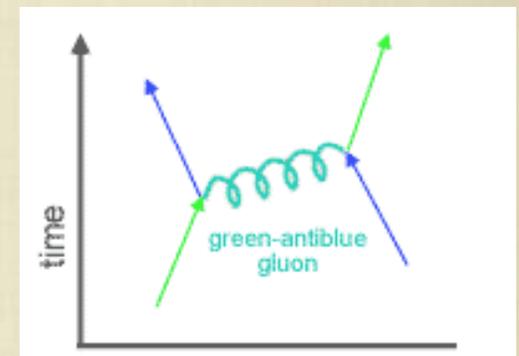
BARYONS = 3-Quark Zustände

## Gluonen

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



- Träger der starken Wechselwirkung
- haben keine Masse
- $3 \times 3 - 1 = 8$  verschiedene Gluonen



### Selbstwechselwirkung der Gluonen

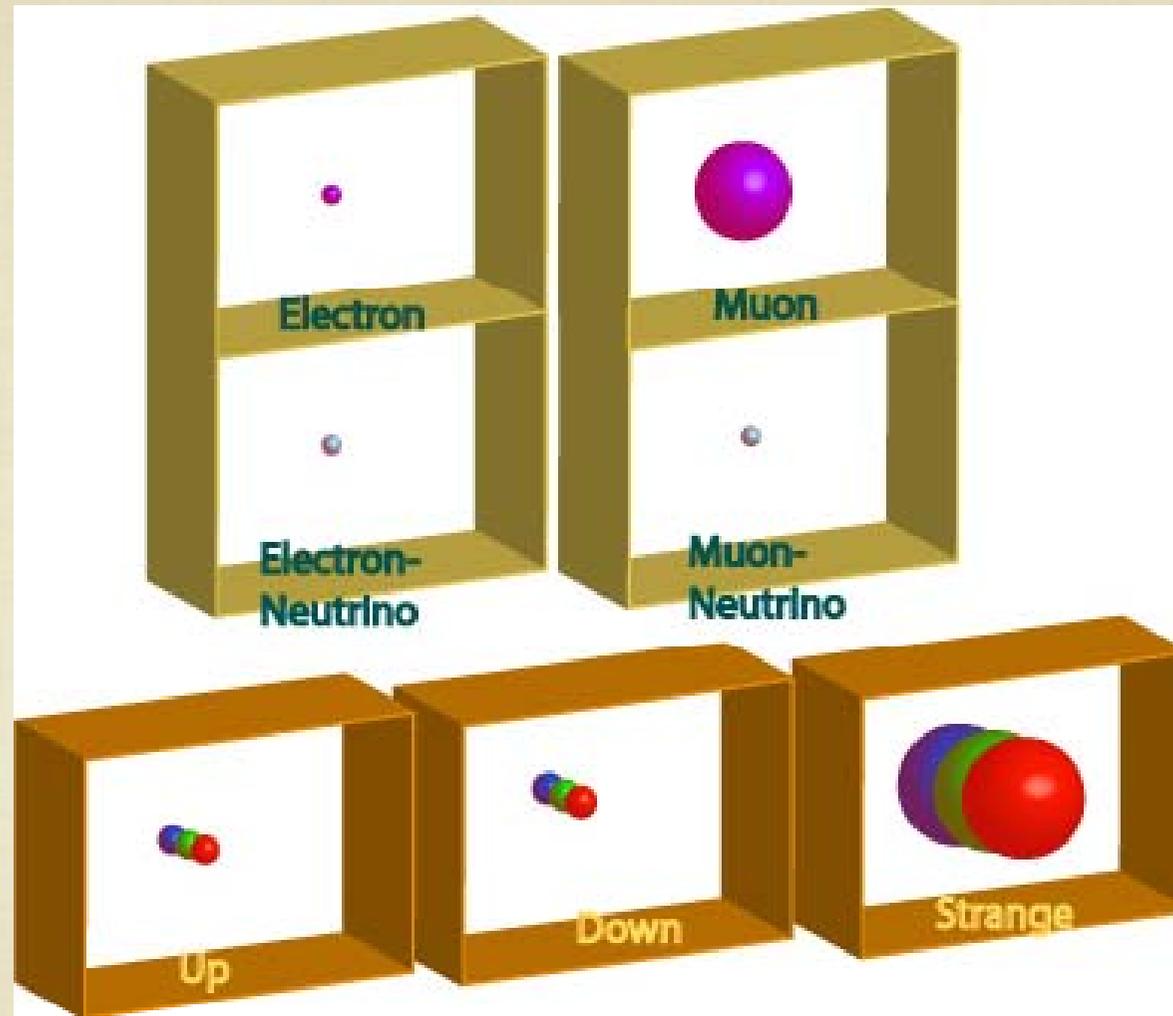
produziert ~ mit dem Abstand anwachsendes Potential

$$V_{QCD} = -\frac{4}{3} \frac{\alpha_s}{r} + kr$$

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



LEPTONS



QUARKS

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

# Felder

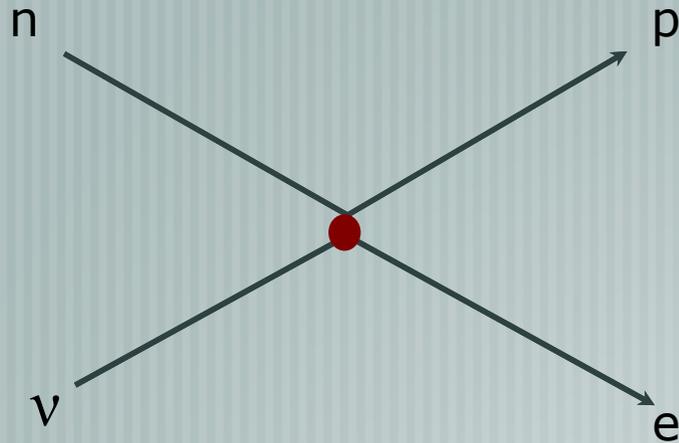
Elektroschwache WW

1958 Glashow

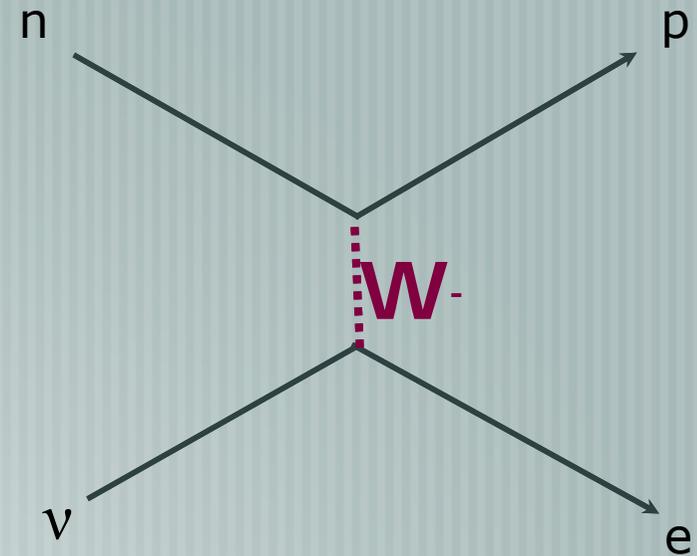
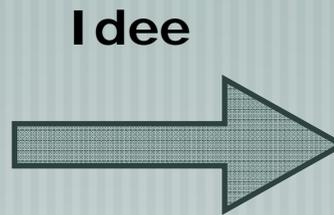
In den 50er gab es ein grosses (theoretisches) Problem

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

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



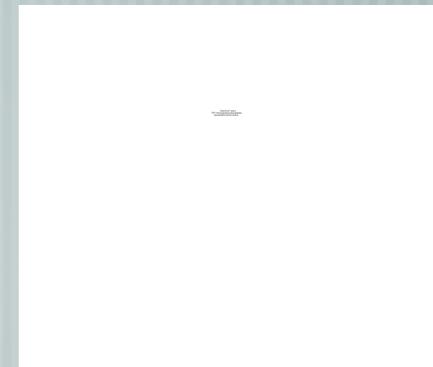
Fermi model



Glashow model

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

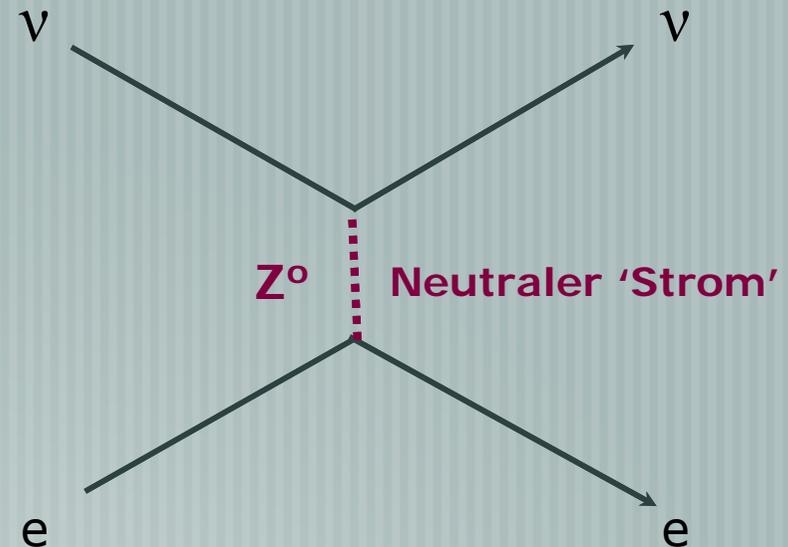
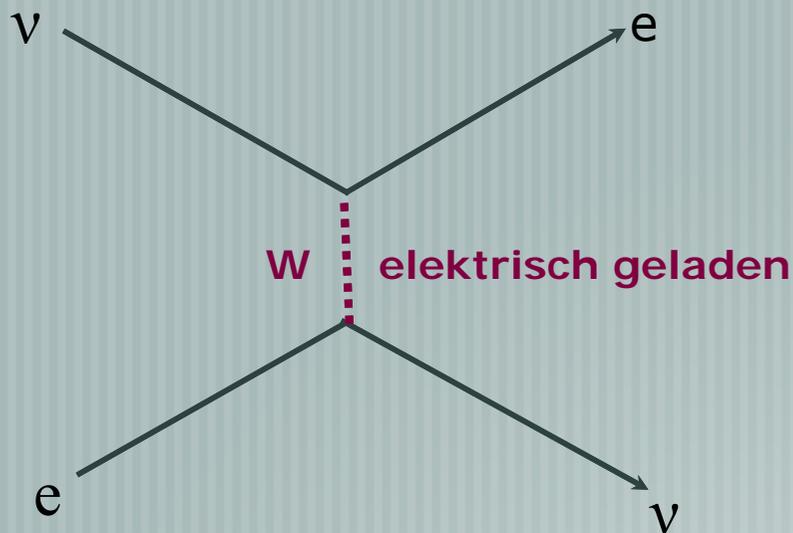
Die grosse Masse (80 GeV) würde die kurze  
Reichweite ( $2 \cdot 10^{-18}$  m) und den kleinen Streuquerschnitt  
erklären



# Felder

Elektroschwache WW

1968

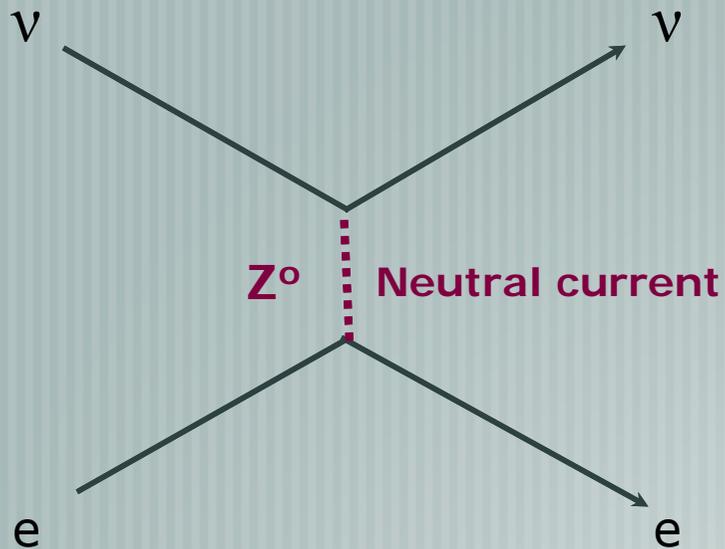


Glashow, Salam, Weinberg (1968)

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)**

## 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*

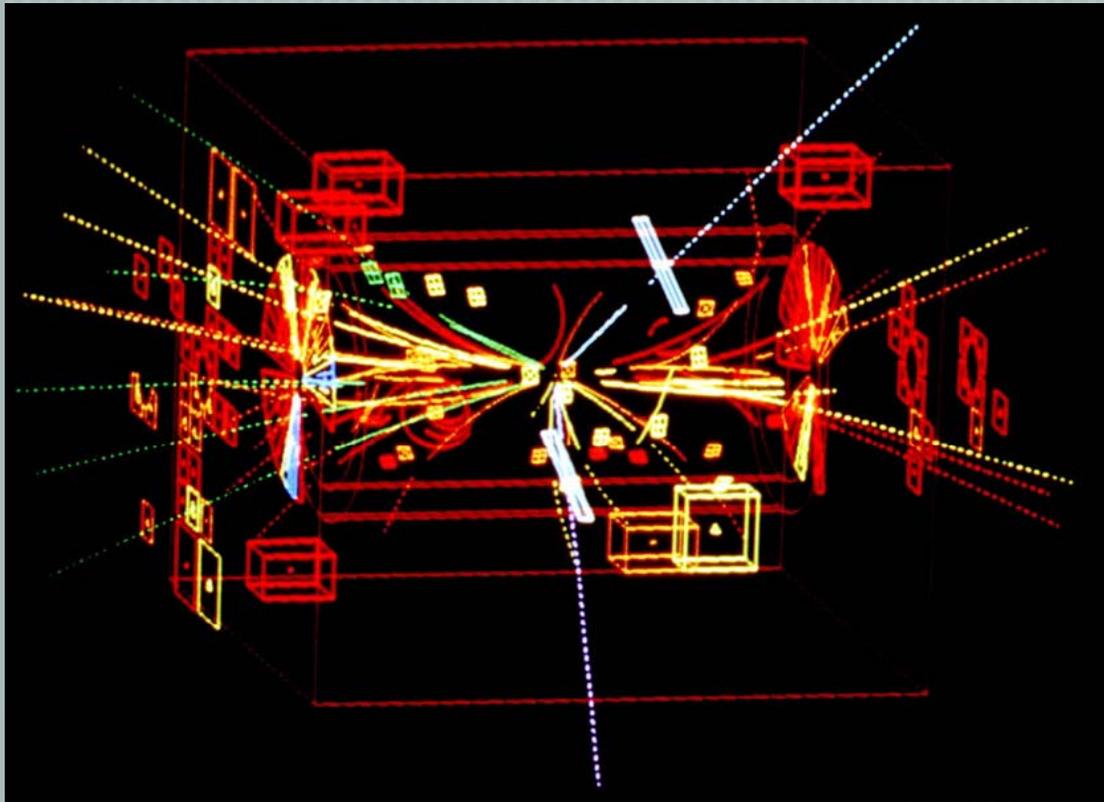
G. BERTRAND-COREMANS, J. SACTON, W. VAN DONINCK and P. VILAIN\*  
*Interuniversity Institute for High Energies, U.L.B., V.U.B., Brussels, Belgium*

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 Nucléaire des Hautes Energies, Ecole Polytechnique, Paris France*



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



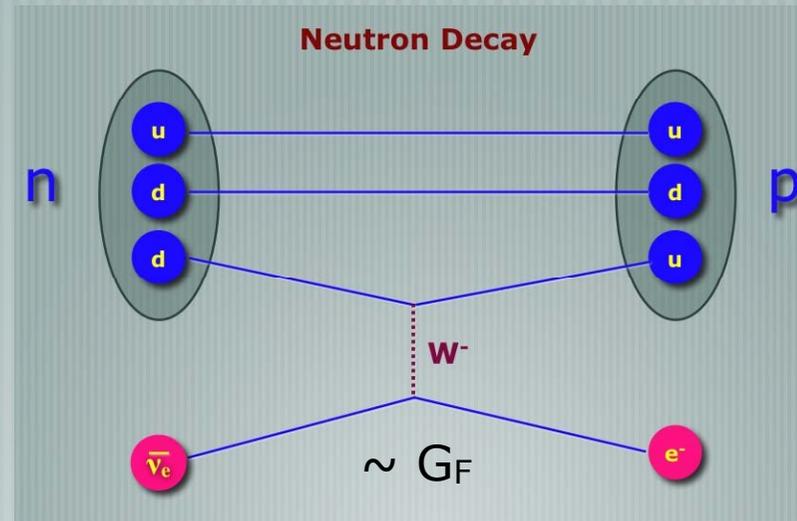
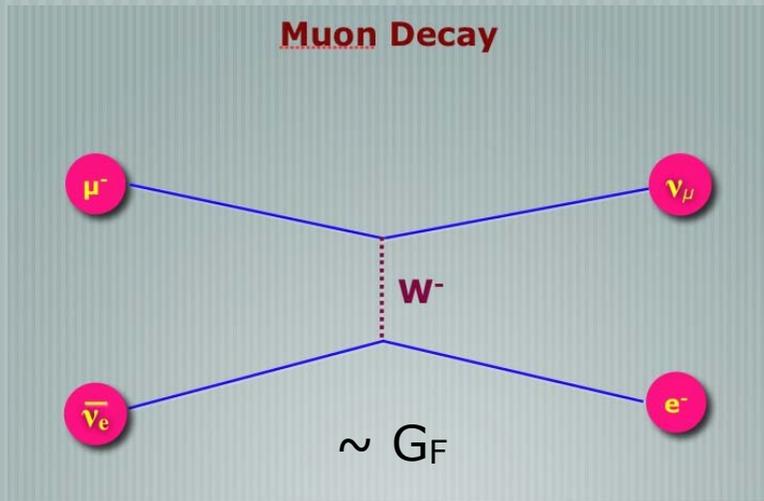
W Ereignis im UA-1 Detektor



Carlo Rubbia, Simon van der Meer

# Fields

Die elektroschwache WW brachte auch einen Zusammenhang zwischen Leptonen und Quarks: sie haben die gleiche Wechselwirkungsstärke\*



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

$$d' = d \cos \theta_c + s \sin \theta_c$$

$$s' = -d \sin \theta_c + s \cos \theta_c$$

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

# Fields

1970

Eine der meistzitierten Publikationen (Glashow, Iliopoulos, Maiani)

PHYSICAL REVIEW D

VOLUME 2, NUMBER 7

1 OCTOBER 1970

## Weak Interactions with Lepton-Hadron Symmetry\*

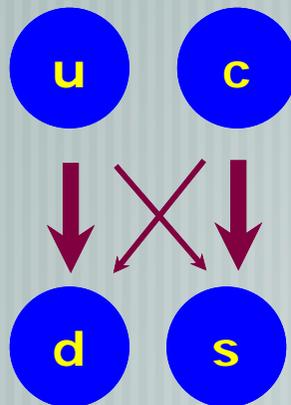
S. L. GLASHOW, J. ILIOPOULOS, AND L. MAIANI†

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

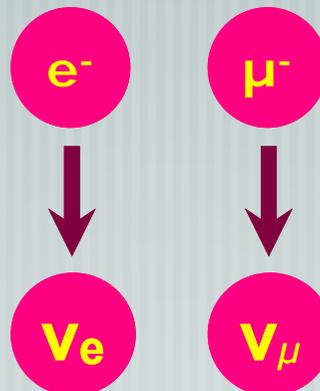
(Received 5 March 1970)

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

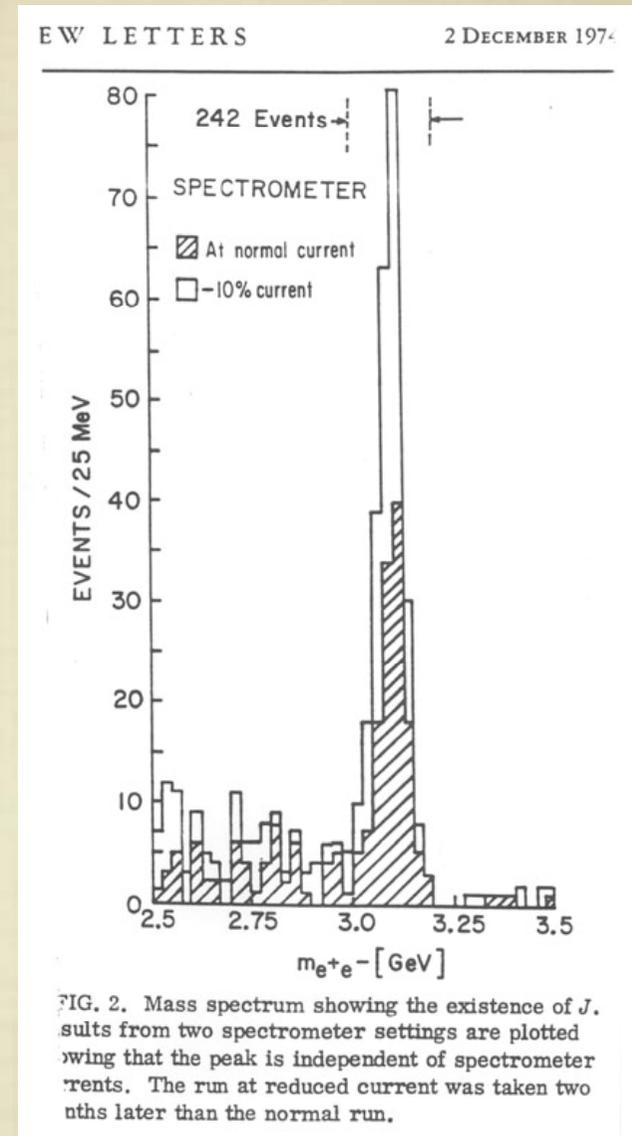
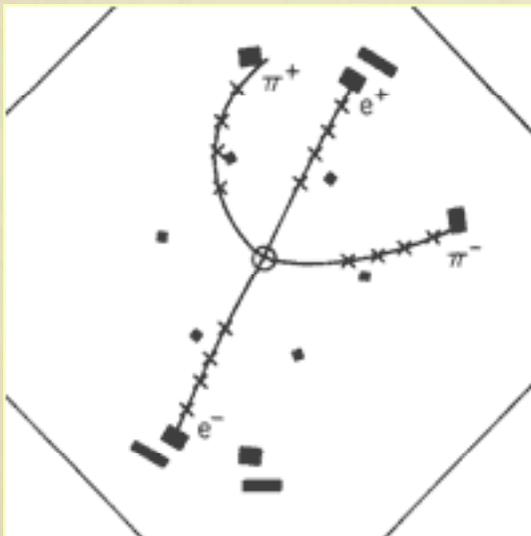


*Dies war das theoretische  
'Standard'-Modell des  
Jahres 1970 (mit zwei  
Familien)*

## 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.