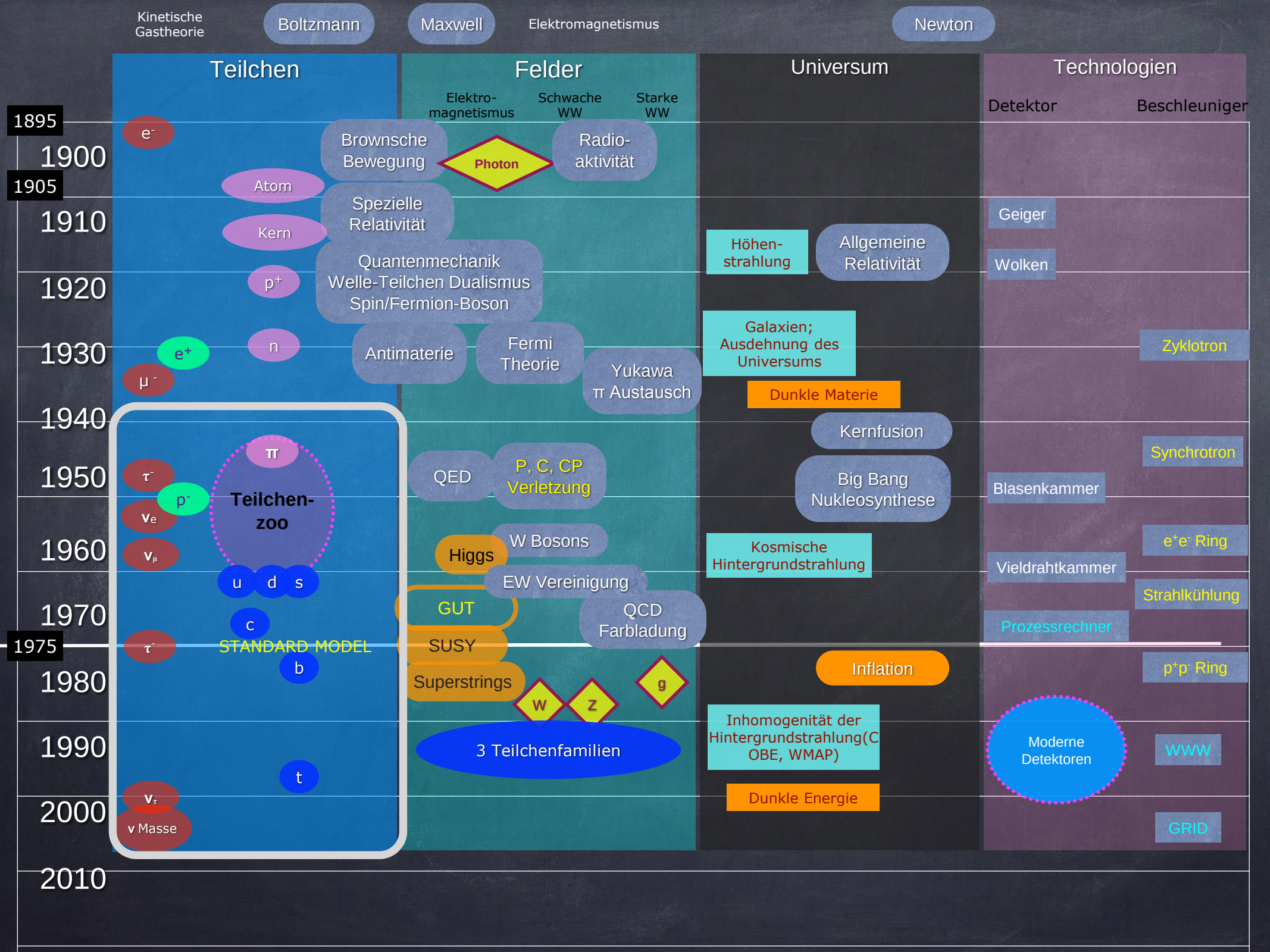

Kinetische Gastheorie
Boltzmann
Maxwell
Elektromagnetismus
Newton
Teilchen
Felder
Universum
Technologien
Elektro-magnetismus
Schwache WW
Starke WW
Detektor
Beschleuniger
1895
1900
1905
1910
1920
1930
1940
1950
1960
1970
1975
1980
1990
2000
2010
e⁻
Brownsche Bewegung
Photon
Radio-aktivität
Atom
Spezielle Relativität
Kern
Quantenmechanik Welle-Teilchen Dualismus Spin/Fermion-Boson
p⁺
n
e⁺
μ⁻
Antimaterie
Fermi Theorie
Yukawa π Austausch
Höhen-strahlung
Allgemeine Relativität
Galaxien; Ausdehnung des Universums
Dunkle Materie
Kernfusion
Big Bang Nukleosynthese
Kosmische Hintergrundstrahlung
Geiger
Wolken
Zyklotron
Synchrotron
Blasenkammer
e⁺e⁻ Ring
Vieldrahtkammer
Strahlkühlung
Prozessrechner
p⁺p⁻ Ring
Moderne Detektoren
WWW
GRID
π
τ⁻
p⁻
Teilchen-zoo
νe
νμ
u
d
s
c
b
t
ντ
ν Masse
STANDARD MODEL
QED
P, C, CP Verletzung
W Bosons
Higgs
EW Vereinigung
GUT
QCD Farbladung
SUSY
Superstrings
W
Z
g
3 Teilchenfamilien
Inflation
Inhomogenität der Hintergrundstrahlung(COBE, WMAP)
Dunkle Energie

Felder

‘Starke’ Wechselwirkung

Was hält Protonen und Neutronen im Kern zusammen

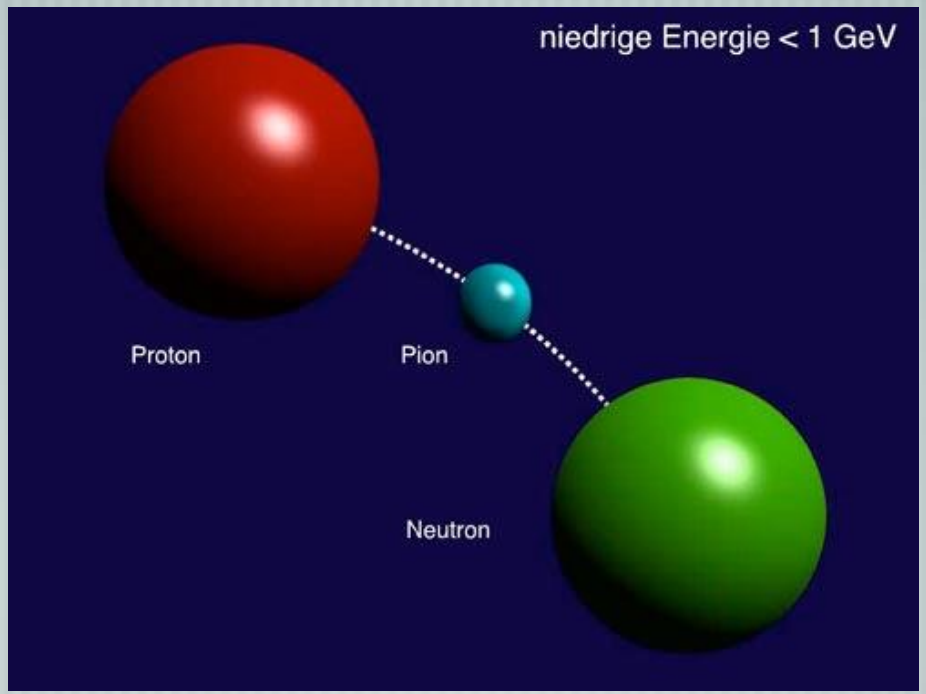
Yukawa (1934)

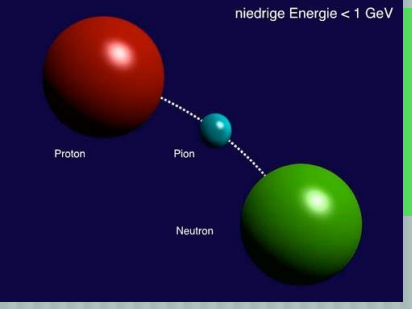
1) Die Kraft muss stärker als die elektromagnetische Kraft sein

2) Kurze Reichweite (~ 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’)

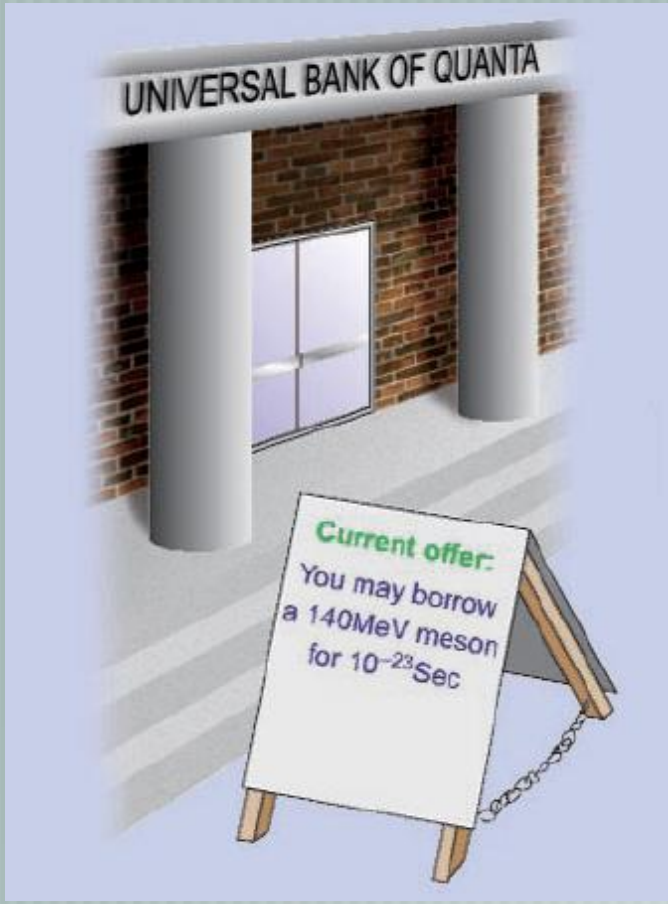




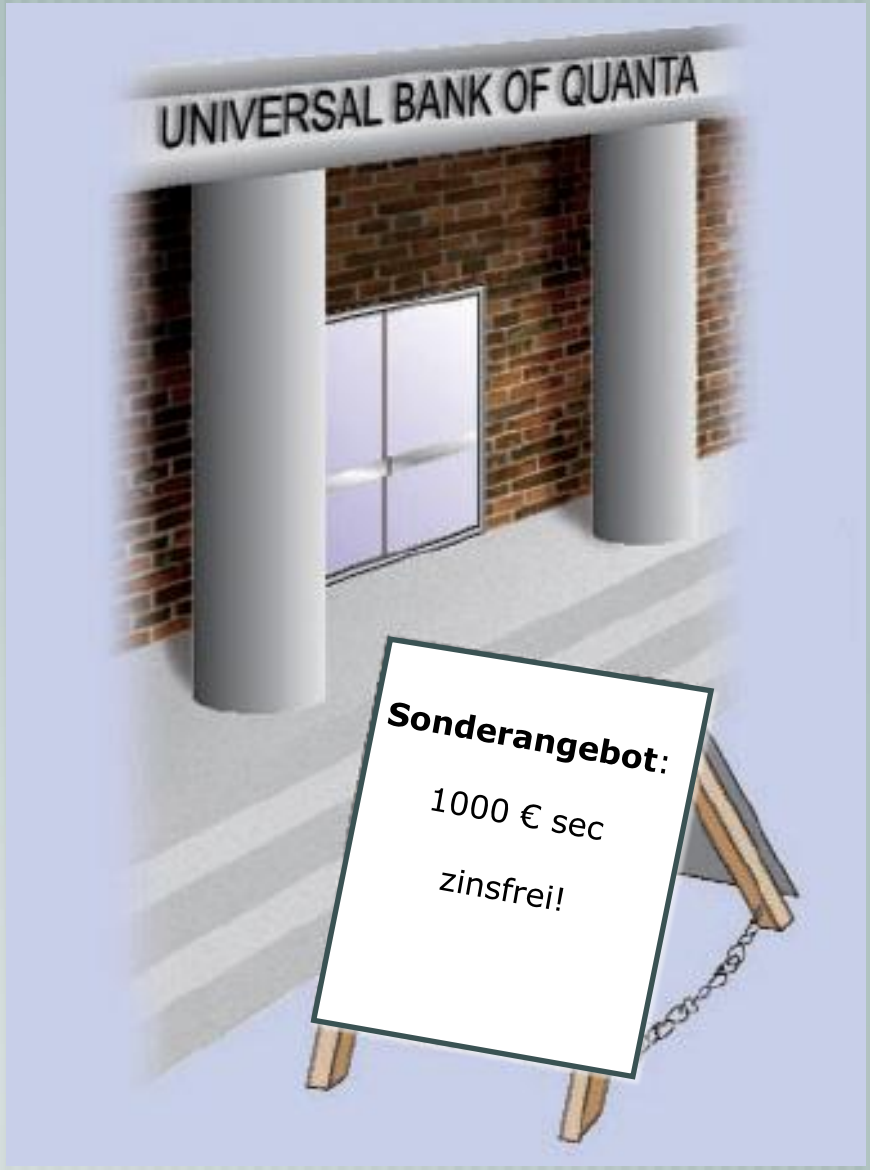
Felder

'Starke' Wechselwirkung

Austauschkräfte: die Unschärferelation in der Praxis

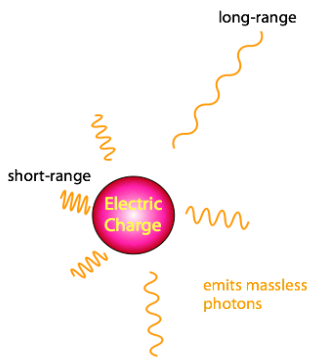


$$\Delta E \Delta t \geq \hbar$$



Unschärferelation:
1.4 fm ~ 140 MeV

Elektromagnetische vs ‘Starke’ WW



emits massive pions

$\Delta E\, \Delta t \geq \hbar \qquad (\Delta E \sim m)$

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

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

Coulomb law

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

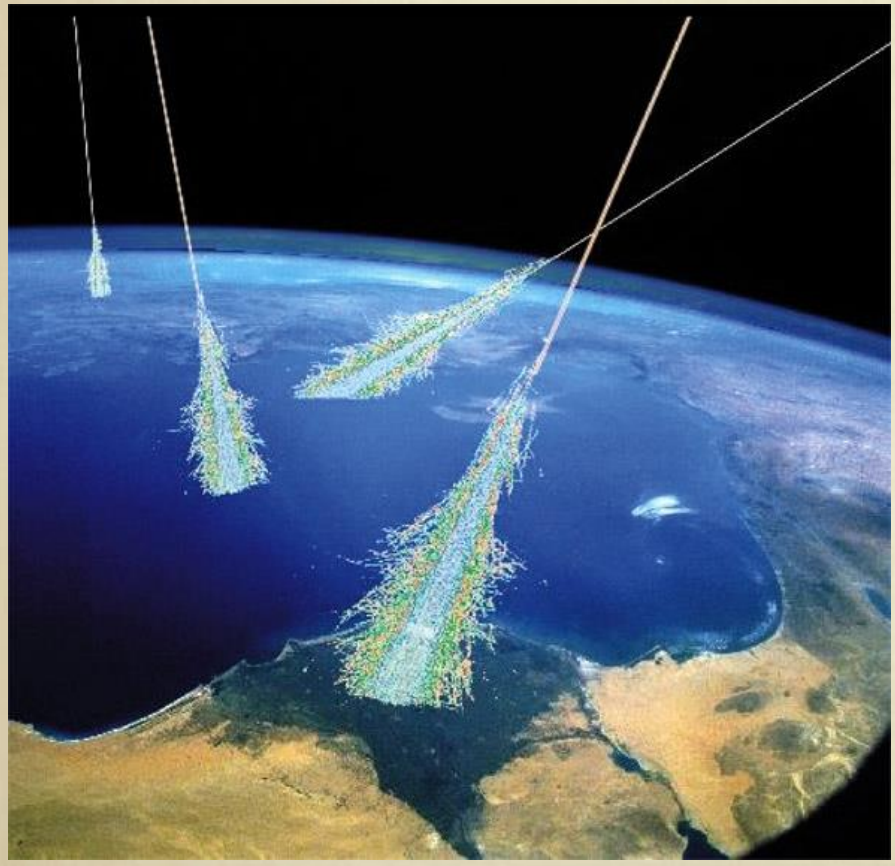
Yukawa potential ~ Modified “Coulomb” law

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.

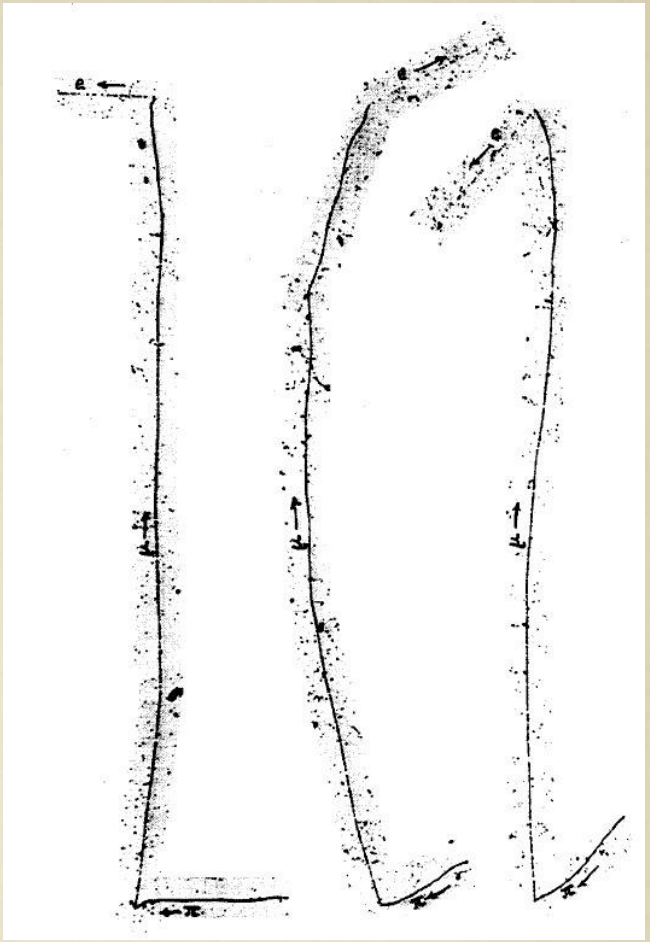
Muon = 'schweres Elektron' (206 x m_e)

I. Rabi: "WER HAT DAS BESTELLT?"

1947: Entdeckung des (geladenen) Pions

Cecil Powell

Ouff!



Photographische Emulsion

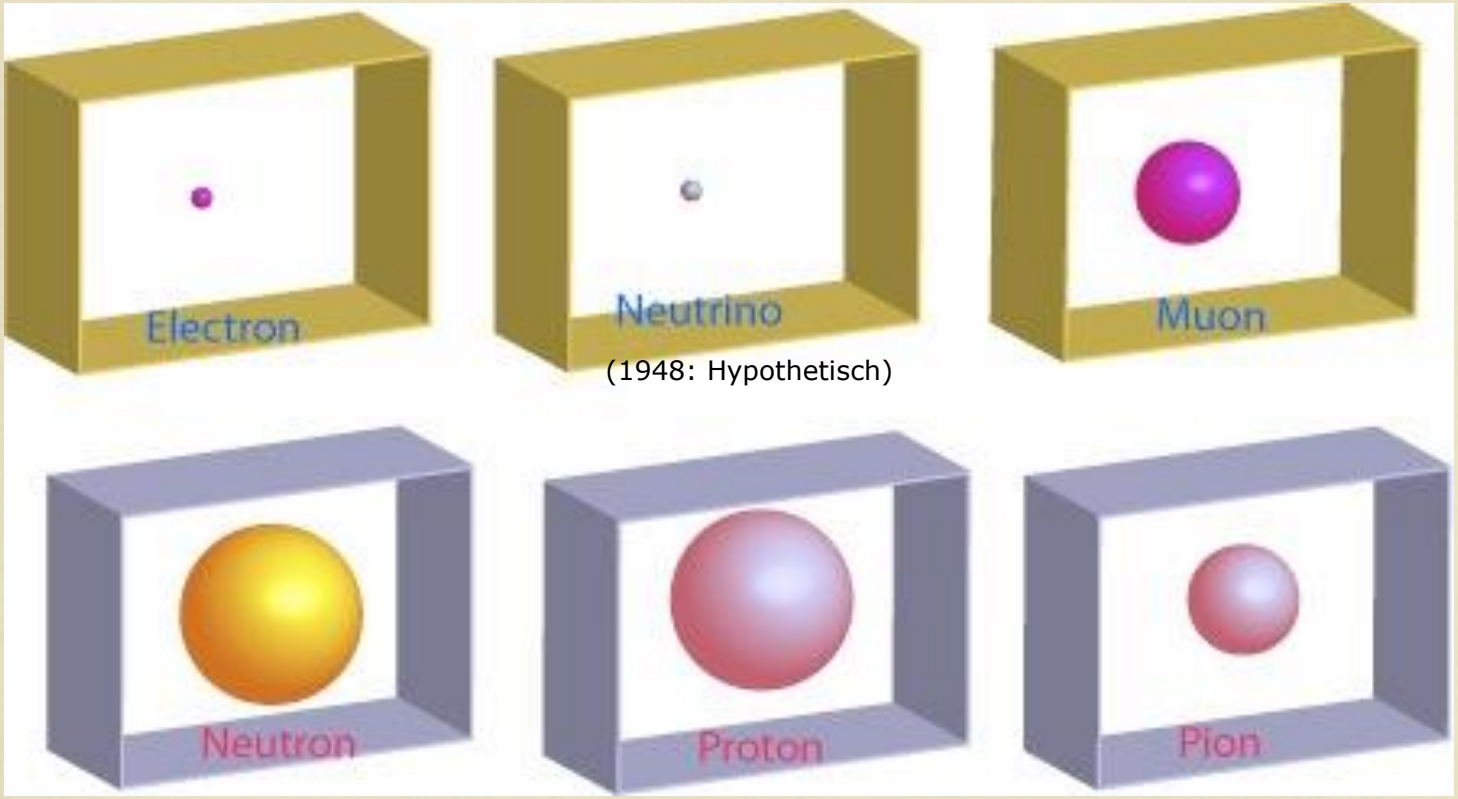
Kosmische Strahlen in **grosser Höhe** (Pic du Midi, Pyrenees)

Pionenspuren wurden im Mikroskop identifiziert

1948: Pionen am Berkeley Zyklotron produziert

QCD

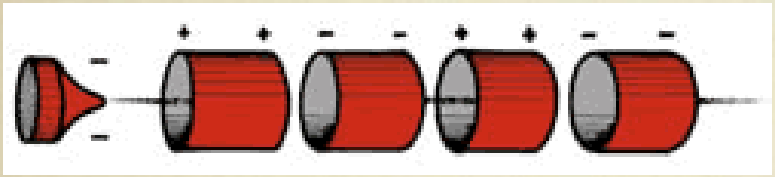
1948


Electron
Neutrino
Muon
(1948: Hypothetisch)
Neutron
Proton
Pion

Beschleuniger

"Kosmische Strahlung aus Menschenhand"

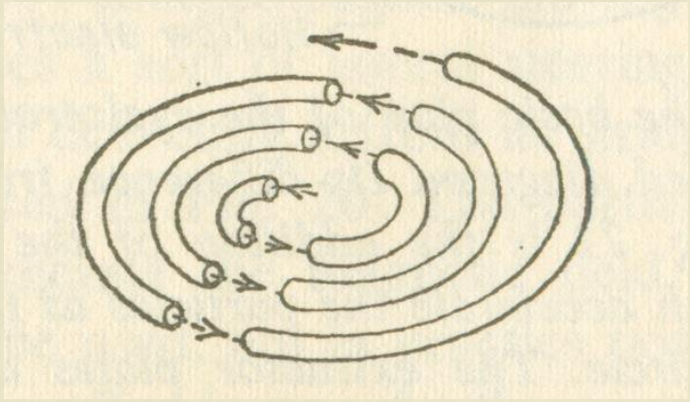
Rolf Wideroe, 1928



Linearbeschleuniger

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

Ernest Lawrence, 1931



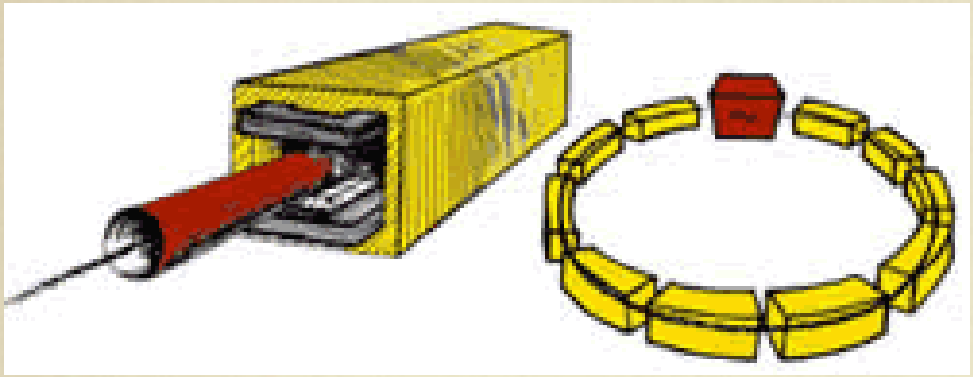
Zyklotron

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

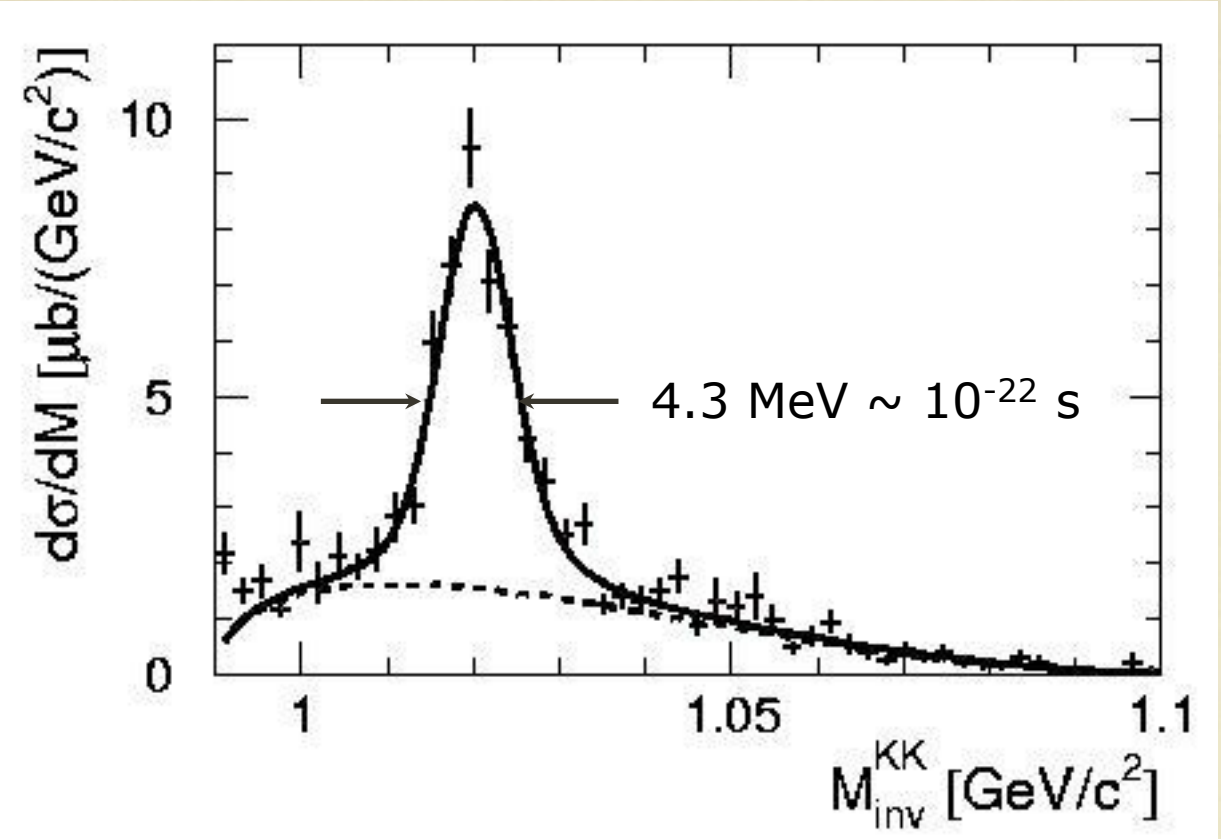
Cerenkov Detektoren
Photomultipliers
Funkenkammern

Nach 1967:

Drahtkammern
Driftkammern
Kalorimeter

QCD

Teilchenkollisionen produzieren '**Resonanzen**'



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

Lebensdauer der Resonanz ~ 1 / "Breite" der Resonanz [~ 10^{-21} .. 10^{-23} s]

Teilchen zoo

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

Mesonen

$\pi^+ \pi^- \pi^0$

Pions

$K^+ \quad K^- \quad K^0$

Kaons

η'

Eta-Prime

η

Eta

φ

Phi

$\rho^+ \quad \rho^- \quad \rho^o$

Rho

Baryonen

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

Delta

Λ^0

Lambda (strange!)

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

Sigma (strange!)

Ξ^0, Ξ^-

Sigma(very strange!)

Gab es eine Sub-Struktur dieser Teilchen ?

QCD

1963

SU(3) - Ein Klassifizierungsschema mit ‘quarks’

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

Gell-Mann, 1963

(G. Zweig, 1963, CERN)

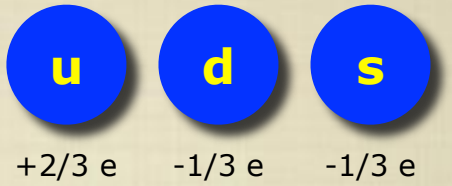
1) 3 Arten von “quarks” : up, down, strange

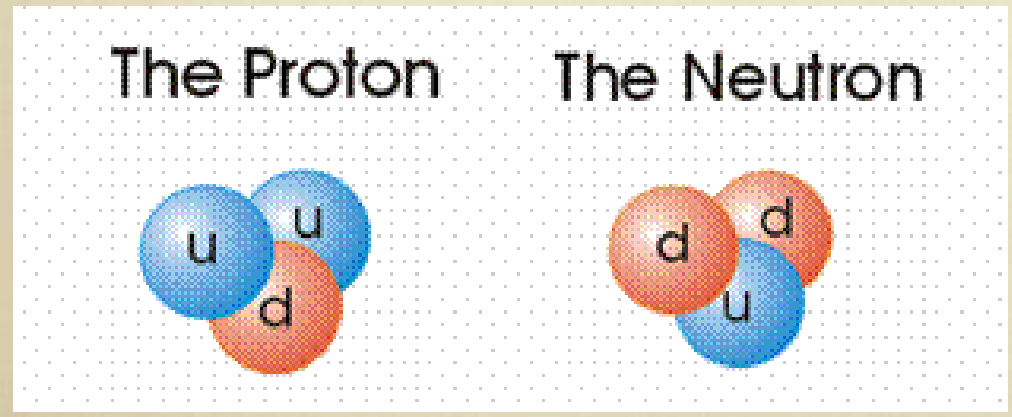
2) Mit elektrischer Ladung: +2/3, -1/3, -1/3

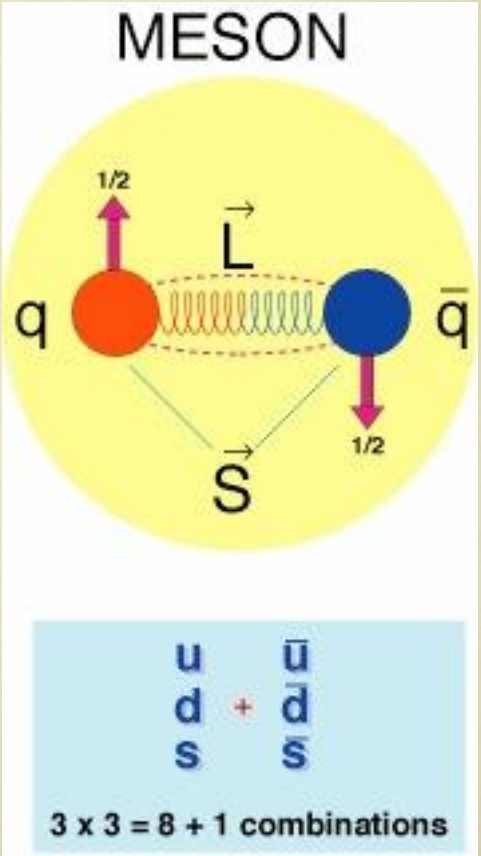
3) Nur bestimmte Kombinationen möglich:

Meson = quark+antiquark

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



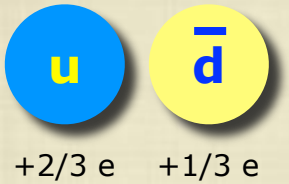




QCD

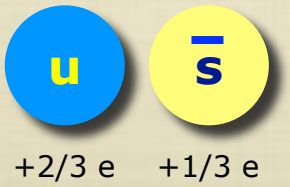
Einige der bekannteren Mesonen (quark+antiquark):

π^0

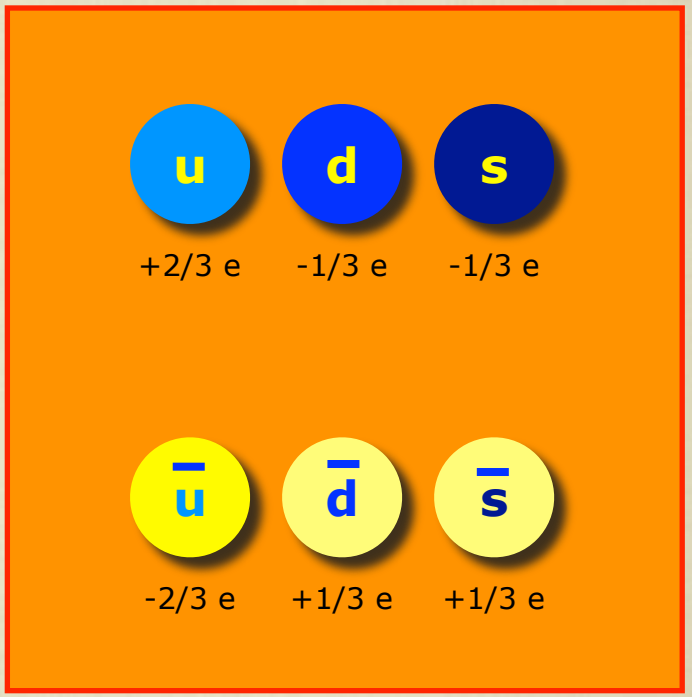


π^+

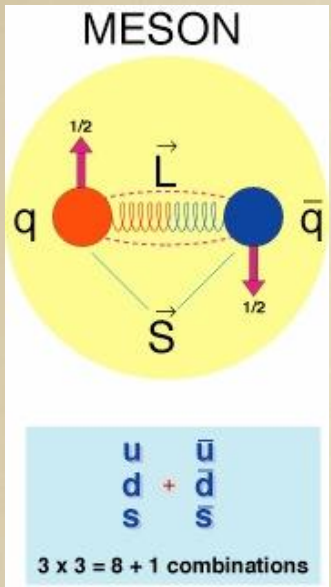
π^-

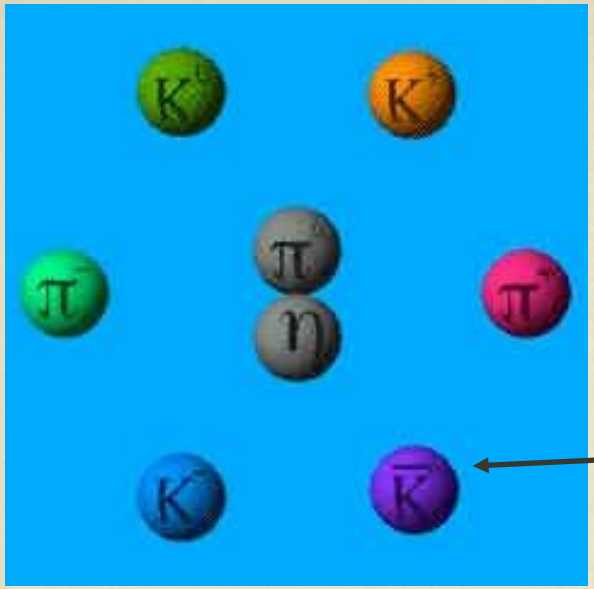


K^+



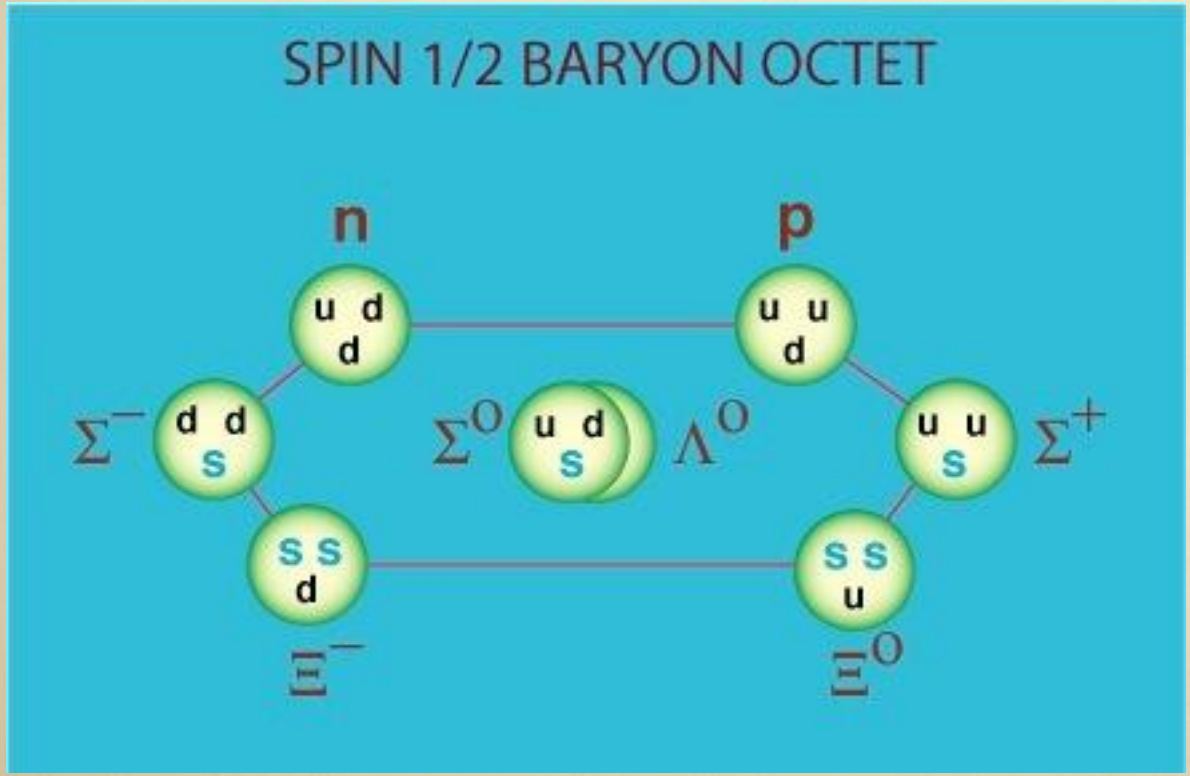
QCD





Pion, Eta-meson

Kaonen besitzen ein ‘strange’ Quark

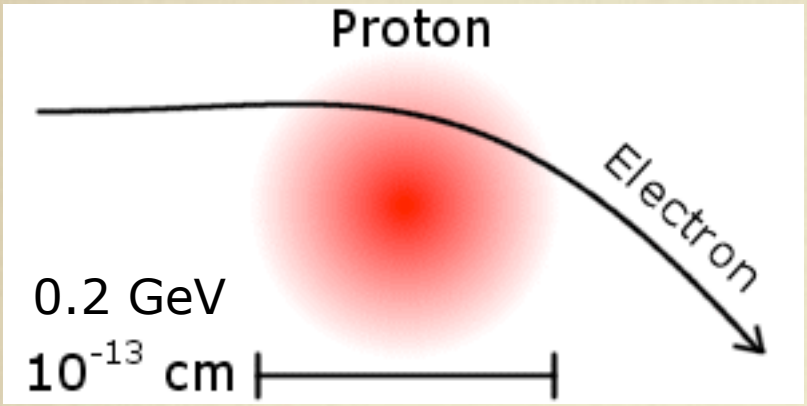


Die leichtesten Baryonen:
Proton, Neutron;
Lambda, Sigma, Xi

QCD

Entdeckung der Quarks

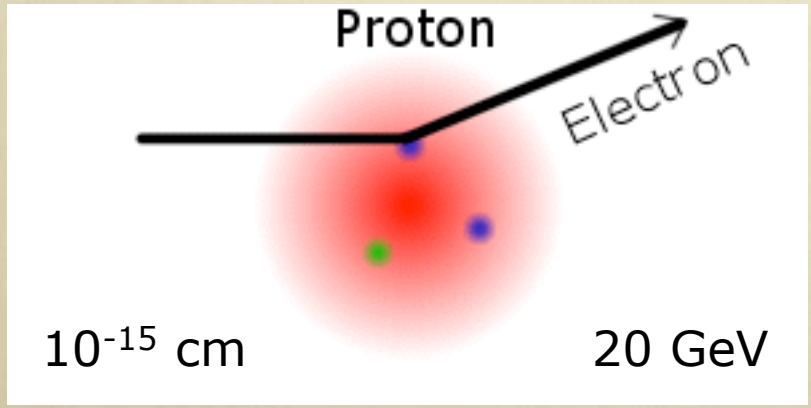
Elektronenstreuung an Protonen



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.

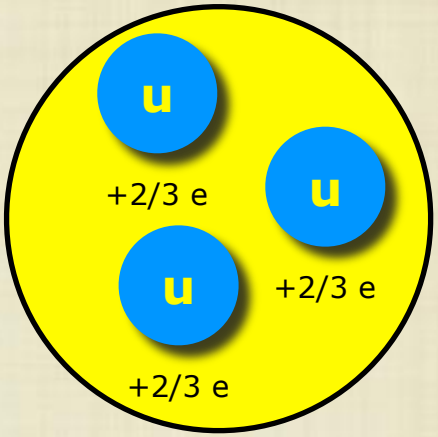
QCD

1973

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)

Δ^{++}



‘Rosetta-Stone’

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, Fritzsch, Gell-Mann)

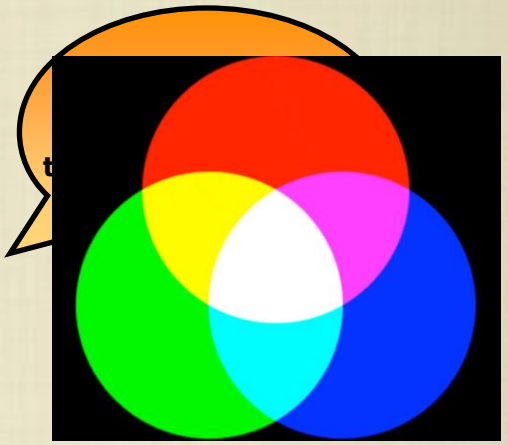
QCD

Quantum **C**hromo **D**ynamics

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 x 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)

QCD

1973

Gluons represent the flow of colour charge between quarks

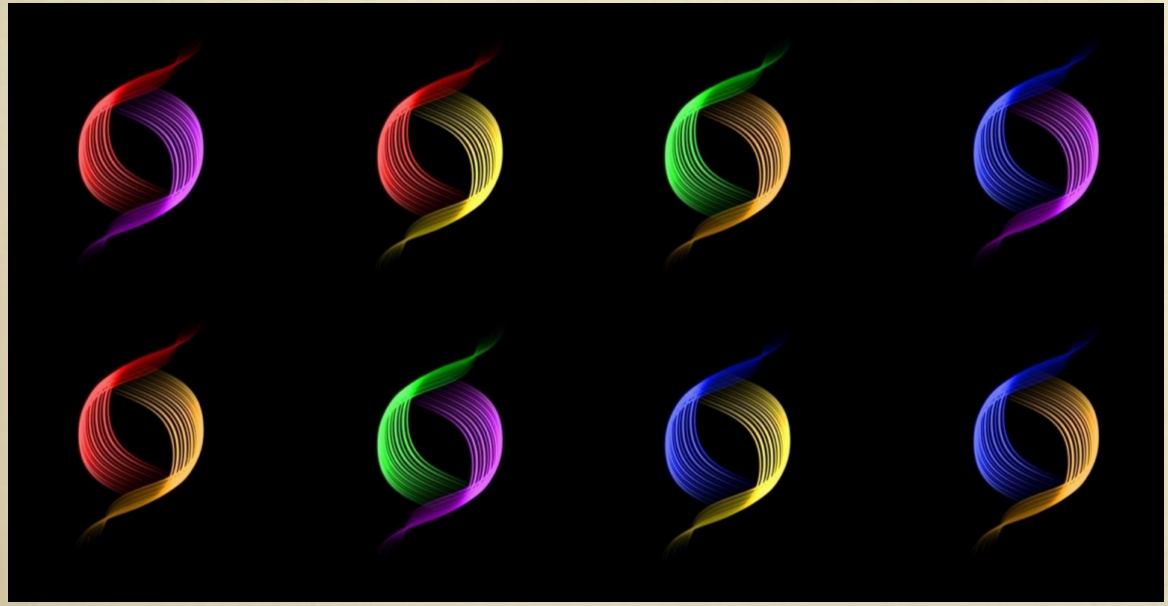
GLUONEN:
Farbe + Anti-Farbe

8 coloured gluons

$$G_1 \sim \frac{1}{\sqrt{2}}(r\bar{b} + b\bar{r}) \qquad G_2 \sim \frac{i}{\sqrt{2}}(r\bar{b} - b\bar{r}) \qquad G_3 \sim \frac{1}{\sqrt{2}}(r\bar{r} - b\bar{b})$$

$$G_4 \sim \frac{1}{\sqrt{2}}(b\bar{g} + g\bar{b}) \qquad G_5 \sim \frac{i}{\sqrt{2}}(b\bar{g} - g\bar{b})$$

$$G_6 \sim \frac{1}{\sqrt{2}}(g\bar{r} + r\bar{g}) \qquad G_7 \sim \frac{i}{\sqrt{2}}(g\bar{r} - r\bar{g}) \qquad G_8 \sim \frac{1}{\sqrt{6}}(r\bar{r} + b\bar{b} - 2g\bar{g})$$

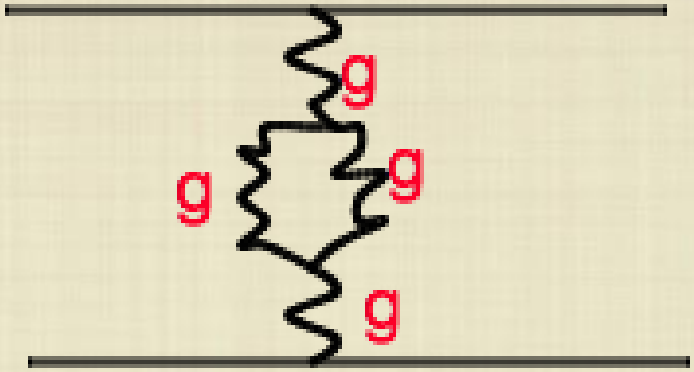


1 colourless (“neutral”) gluon

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

Selbstwechselwirkung der Gluonen

GLUONEN sind selbst auch geladen
GLUON-GLUON WECHSELWIRKUNG !



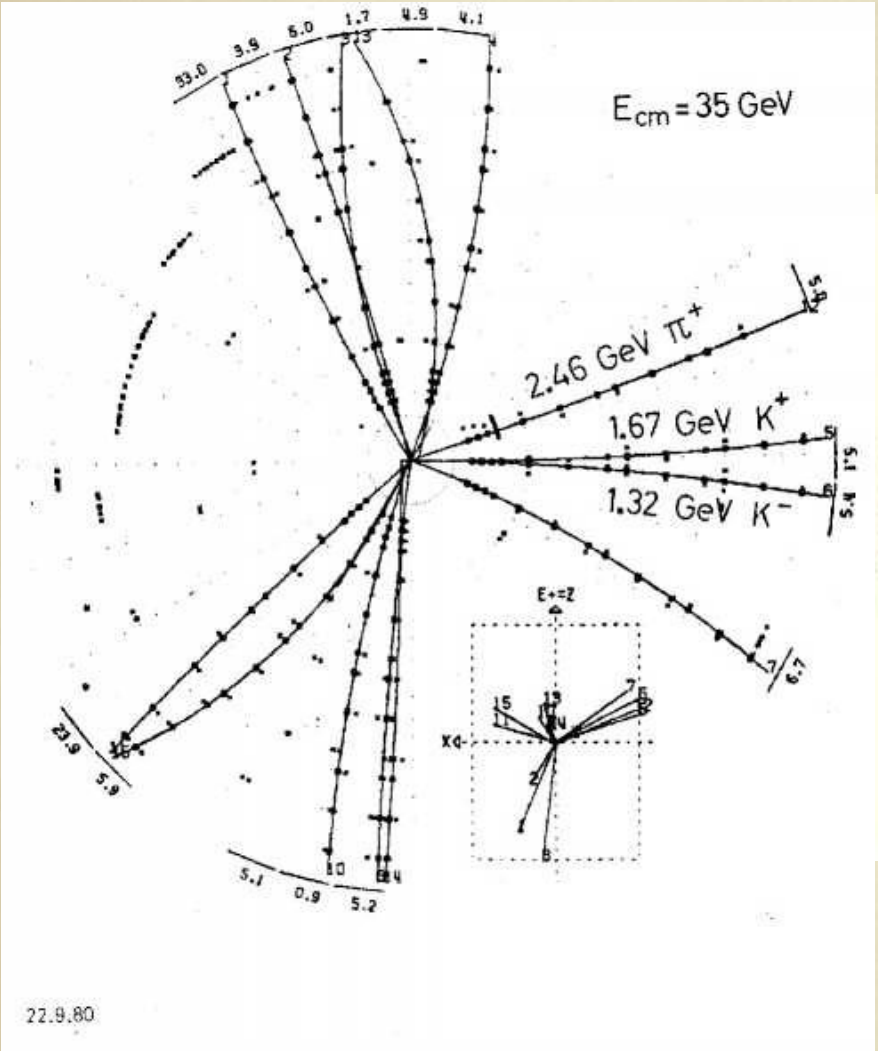
Bei großen Abständen wächst das Potential an (wegen der Selbstwechselwirkung der Gluonen)

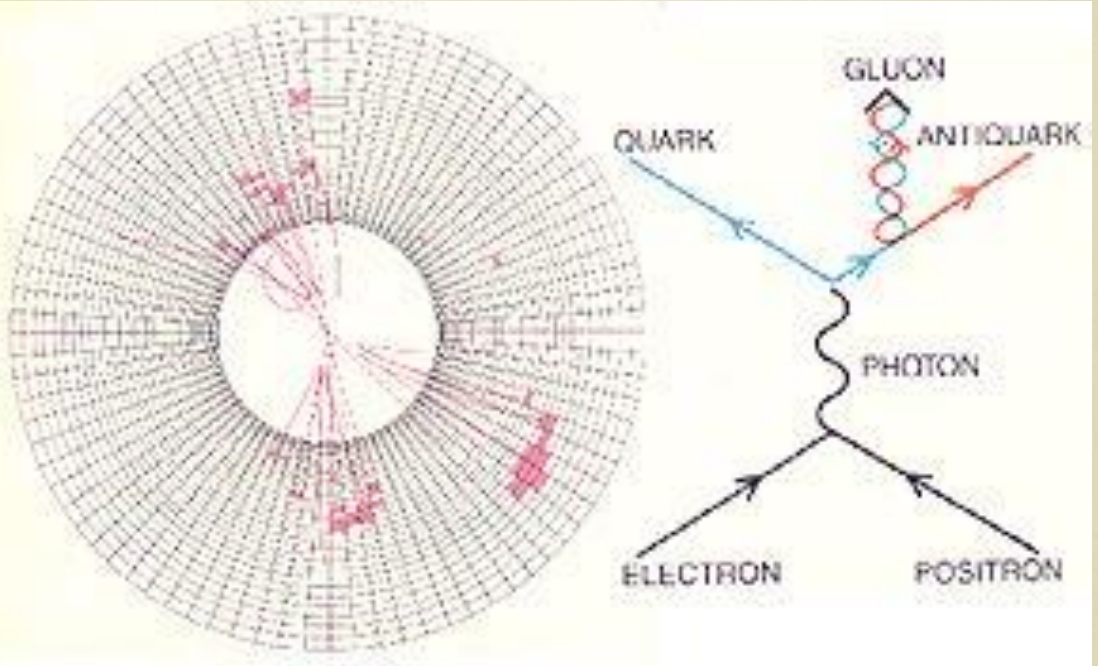
Bei kleinen Abständen (oder sehr hohen Energien) nimmt die Stärke der Wechselwirkung ab.

QCD

1979

Entdeckung der Gluonen (DESY, 1979)





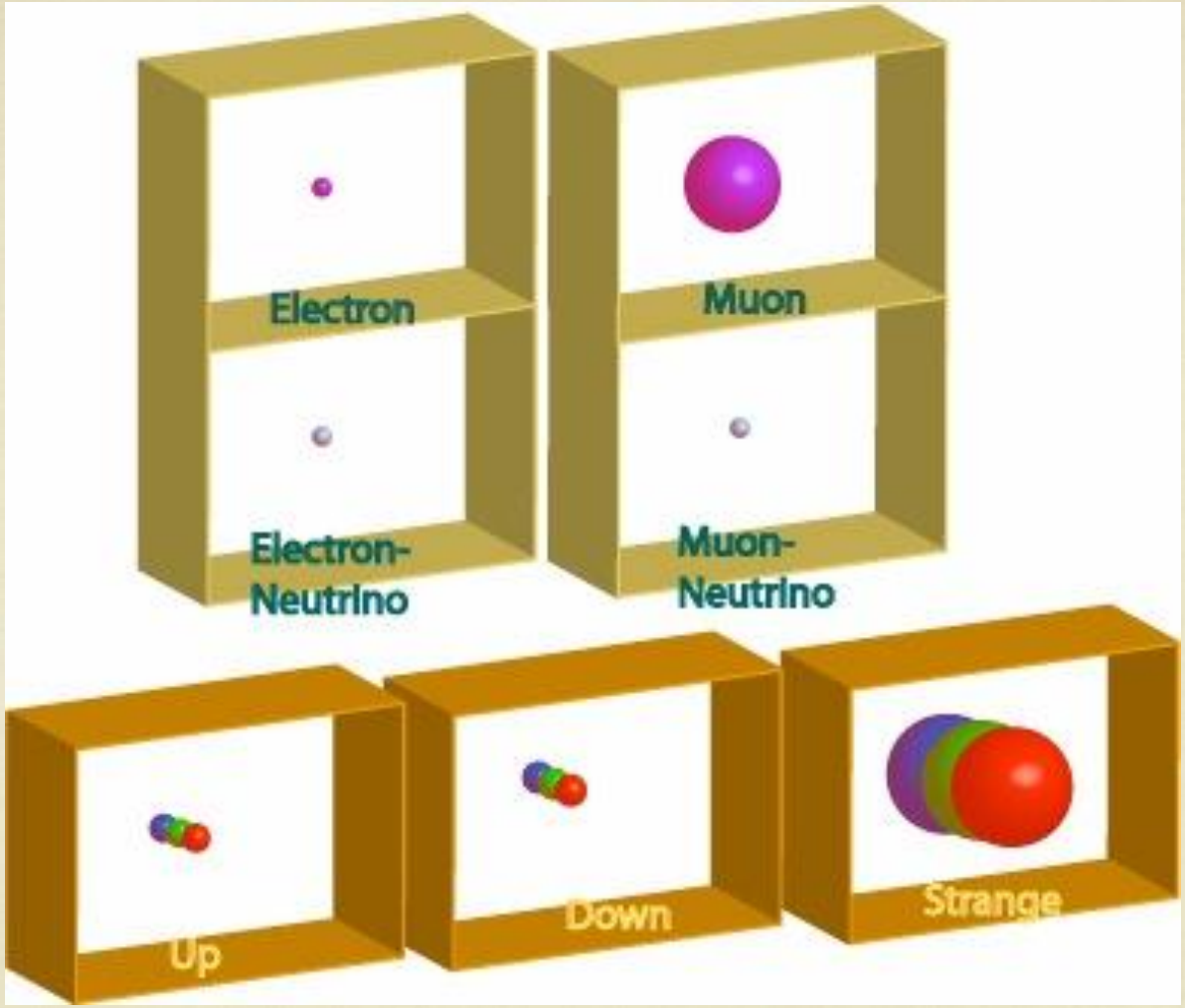
PETRA Storage Ring, 1979, DESY (Hamburg)

QCD

1972/3

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

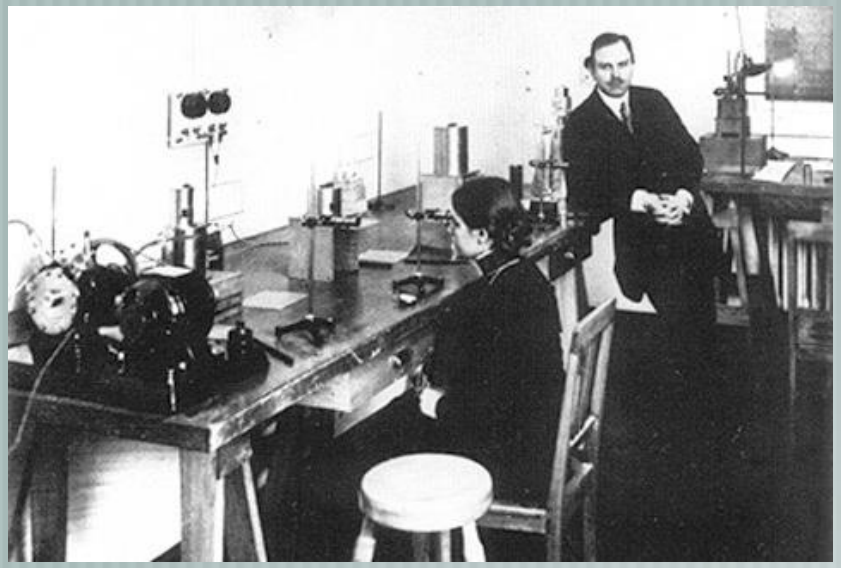
Es dauerte ca. 35 Jahre, um diese Phänomene grob zu verstehen

Felder

'Schwache' Wechselwirkung

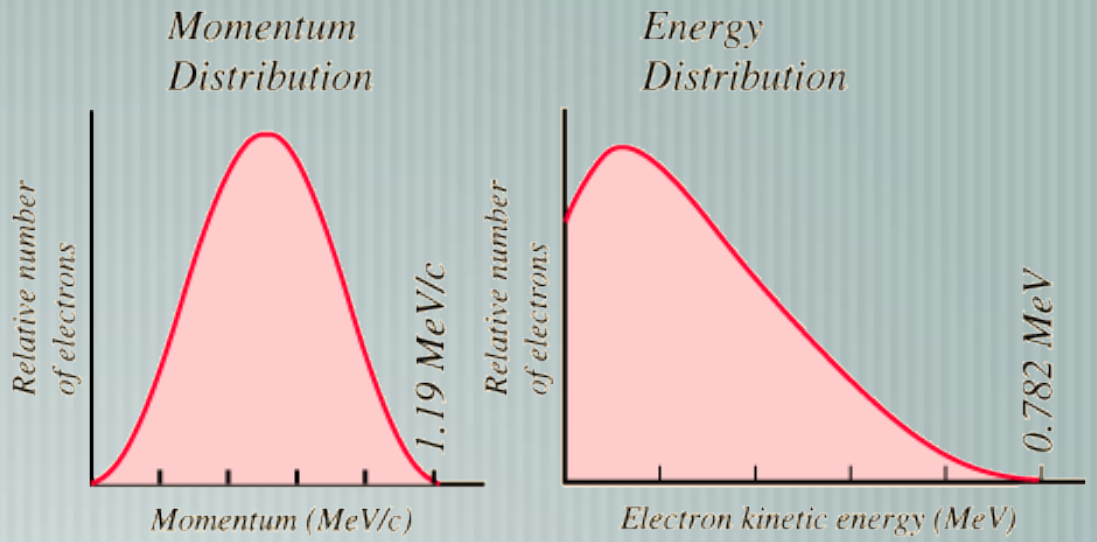
Beta-Zerfall von Atomkernen - warum wurden Elektronen mit einem kontinuierlichen Energiespektrum emittiert?

Z --> (Z+1) + e ?



1911 Lise Meitner, Otto Hahn

Verletzung der Energieerhaltung ?



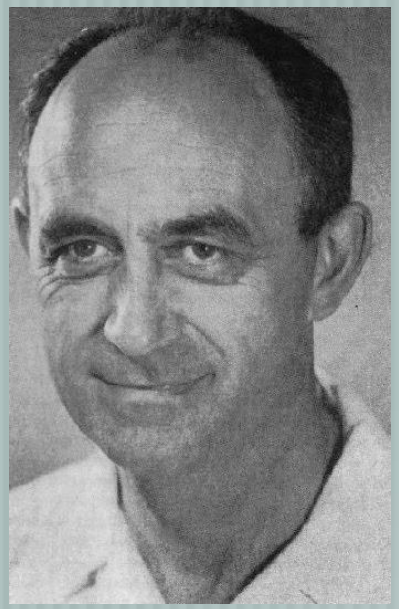
1930 Wolfgang Pauli: an **extremely light neutral particle*** is emitted in beta decay

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

n --> p + e + ν

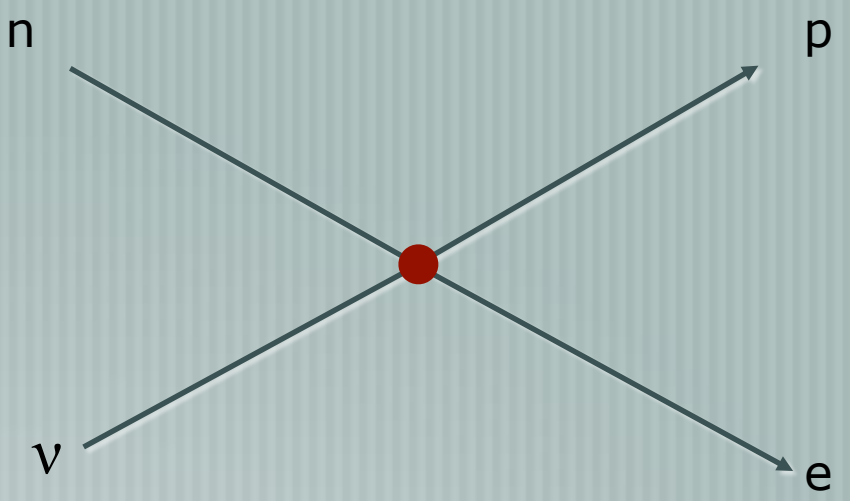
Felder

'Schwache' Wechselwirkung



Enrico Fermi
(1934)

n --> p + e + $\bar{\nu}$



'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)

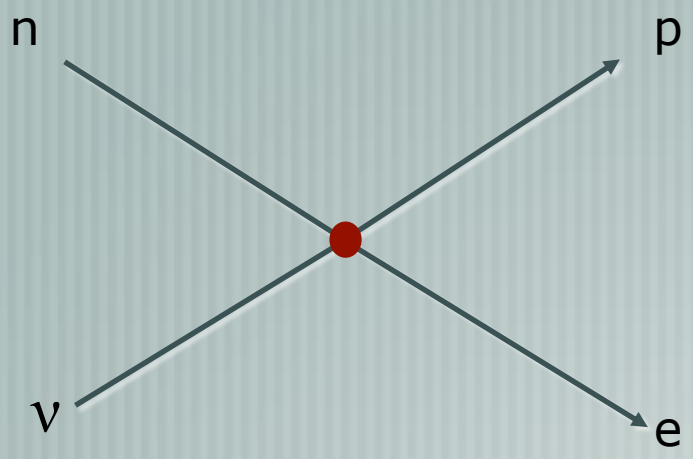
Ok bis ~1958

Elektroschwache WW

1958 Glashow

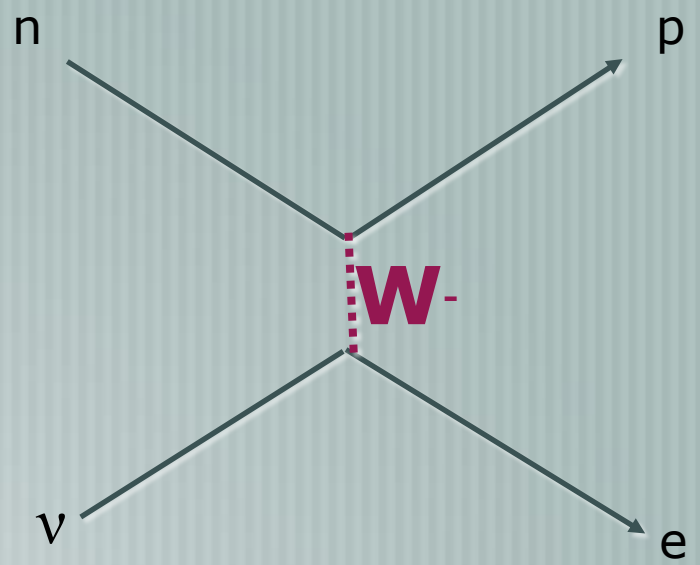
In den 50er gab es ein grosses (theoretisches) Problem
Neutrino-Proton Streuquerschnitt ~ (G_F E_ν)
würde oberhalb 300 GeV die Unitarität verletzen*
(*Wahrscheinlichkeit > 100%)

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



Fermi model

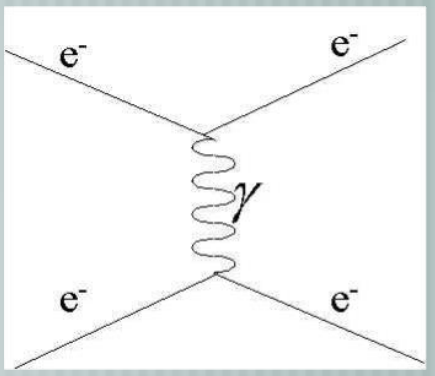
Idee



Glashow model

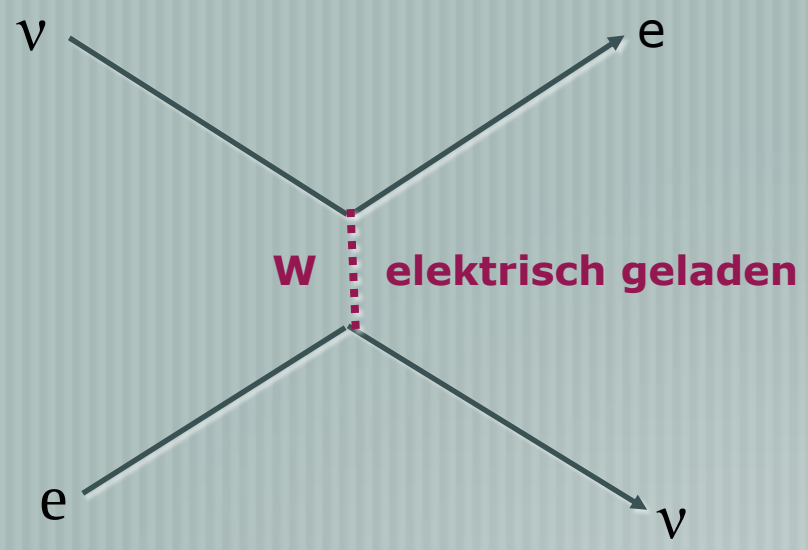
Die schwache Wechselwirkung wird durch den Austausch sehr massiver 'Vektorbosonen' übertragen (Analog zum Photonenaustausch!)

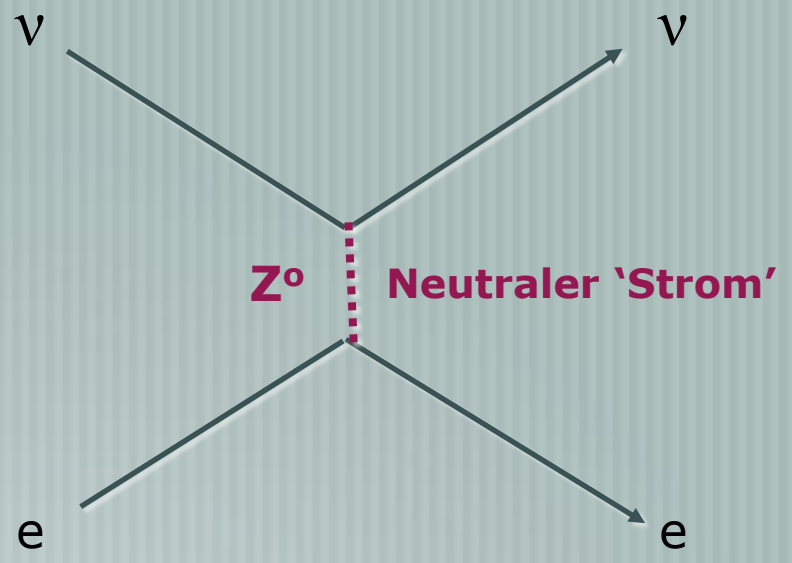
Die grosse Masse (80 GeV) würde die kurze Reichweite ($2 \cdot 10^{-18}$ m) und den kleinen Streuquerschnitt erklären



Elektroschwache WW

1968





Glashow, Salam, Weinberg (1968)

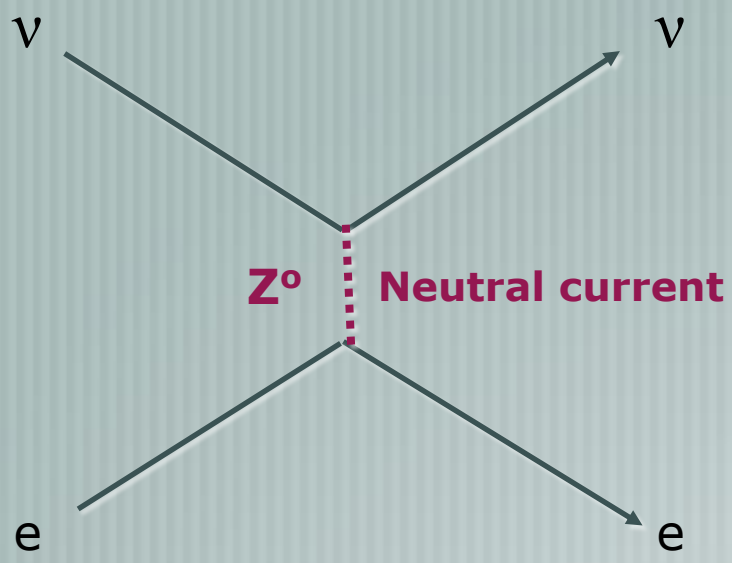
Vereinigung der schwachen und der elektromagnetischen Wechselwirkung

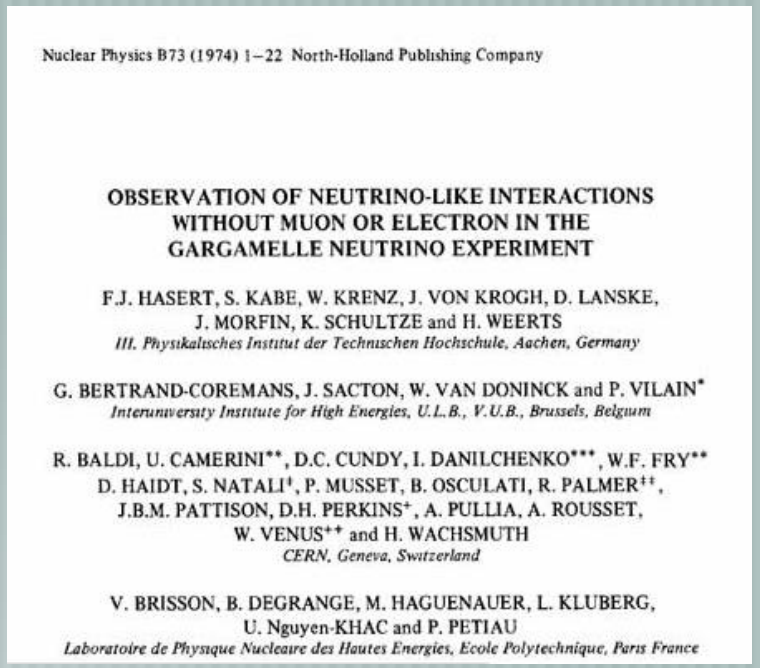
- Die e.m. und schwache WW sind zwei Aspekte der gleichen 'elektroschwachen' WW
- Sowohl Quarks als auch Leptonen besitzen eine 'schwache' Ladung (i.e. Aussendung von W,Z)
- **W,Z Bosonen bekommen ihre Masse durch das Higgs-Feld (1964)**

Elektroschwache WW

1973

Entdeckung "neutraler Ströme" am CERN (1973)





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

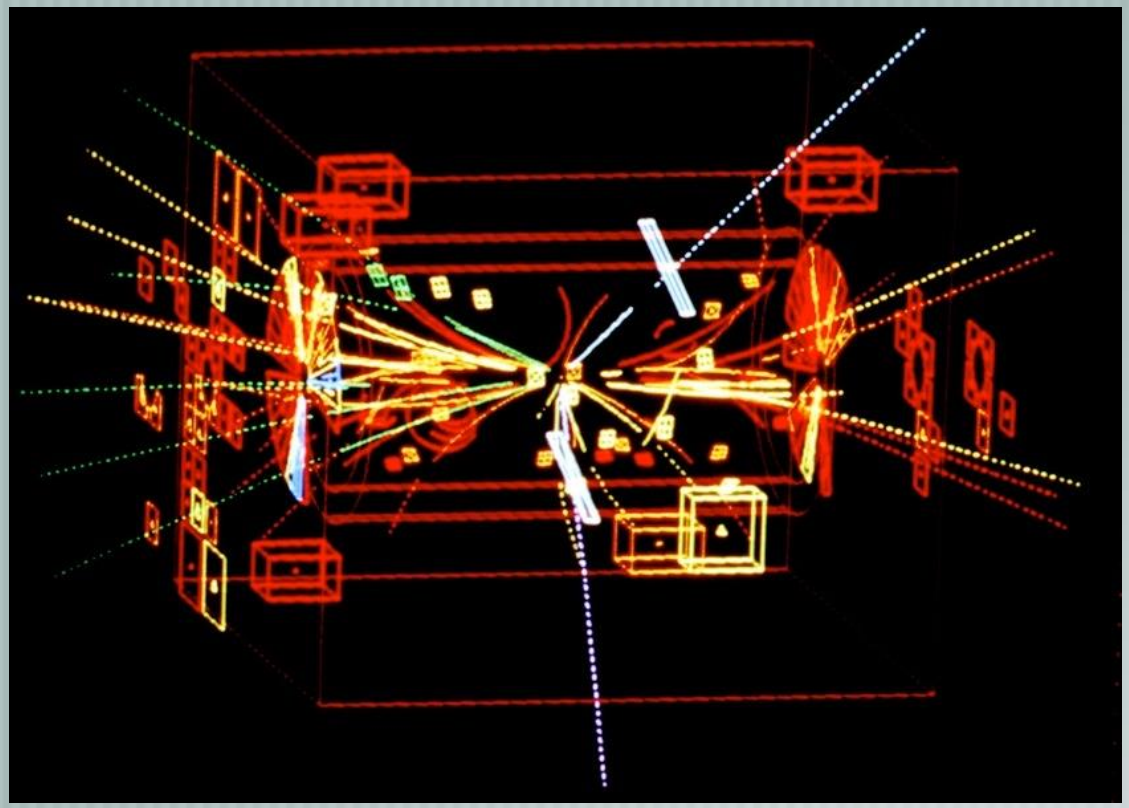
V. BRISSON, B. DEGRANGE, M. HAGUENAUER, L. KLUBERG, U. Nguyen-KHAC and P. PETIAU
Laboratoire de Physique Nucleaire des Hautes Energies, Ecole Polytechnique, Paris France

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

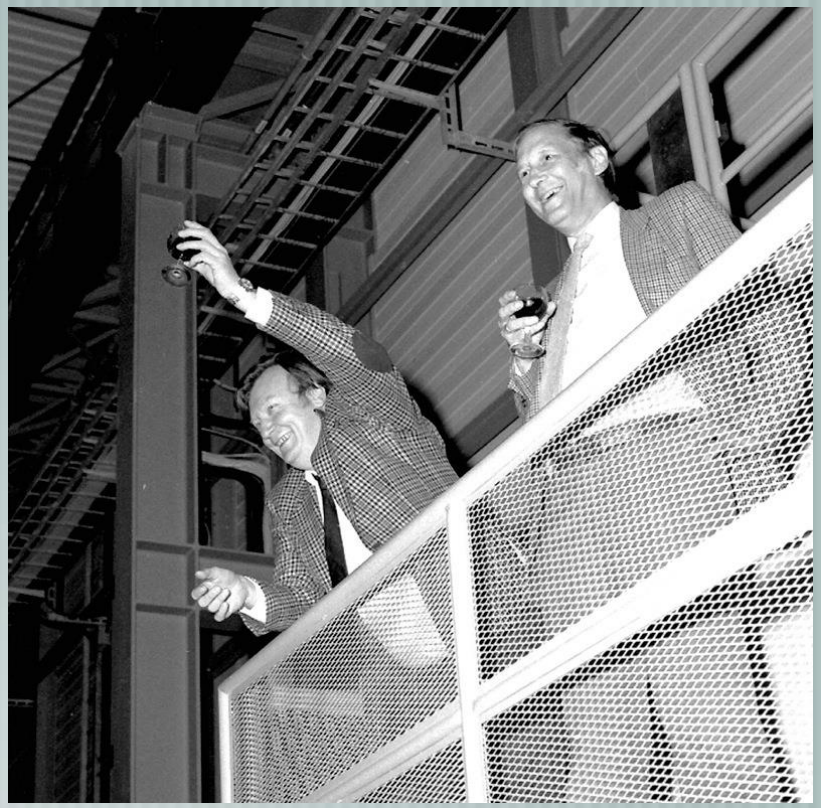
Elektroschwache WW

1983

Entdeckung der W und Z Bosonen am CERN (1983)



W Ereignis im UA-1 Detektor

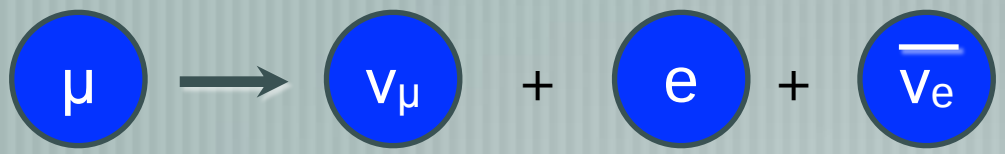


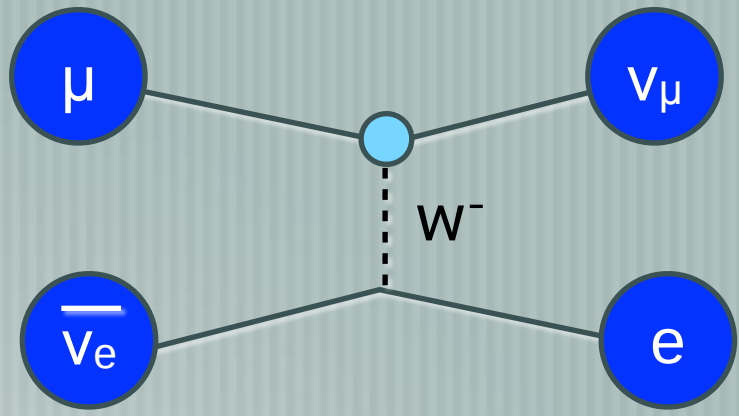
Carlo Rubbia, Simon van der Meer

Elektroschwache Wechselwirkung

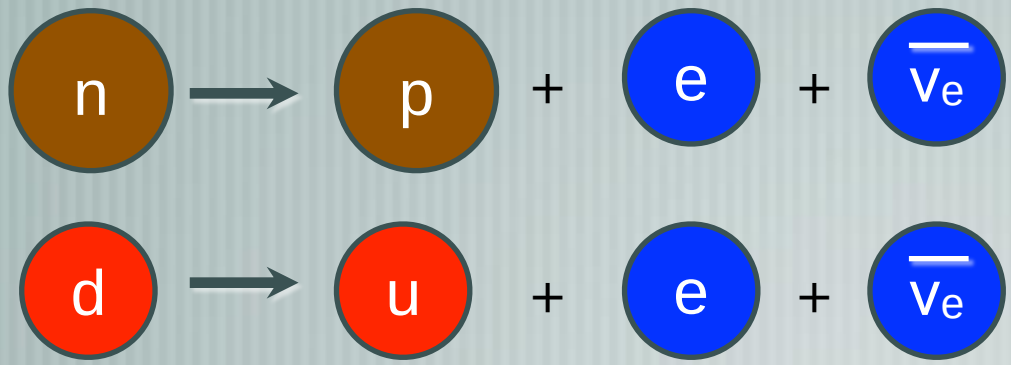
"Universalität" : Leptonen und Quarks

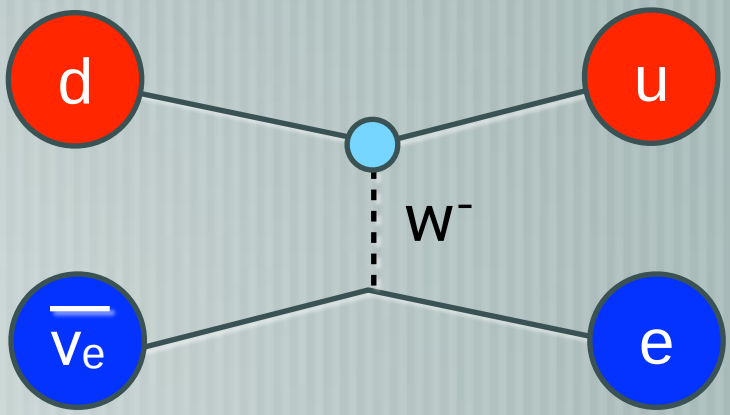
Müon-Zerfall:





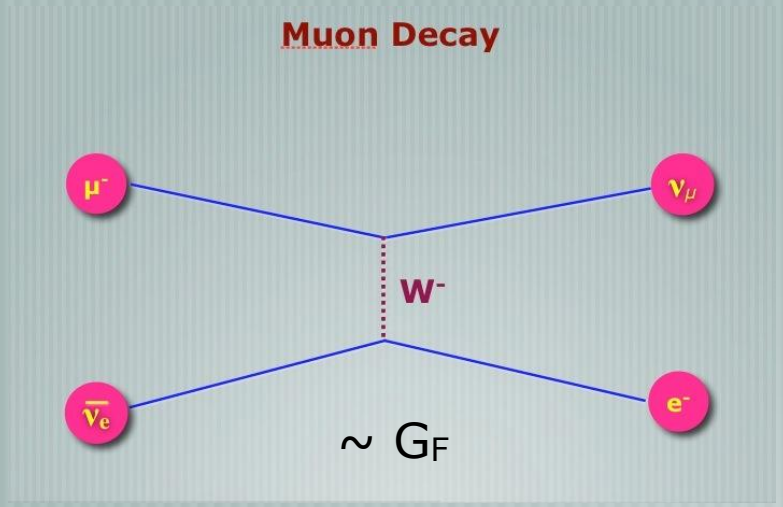
Neutron-Zerfall:

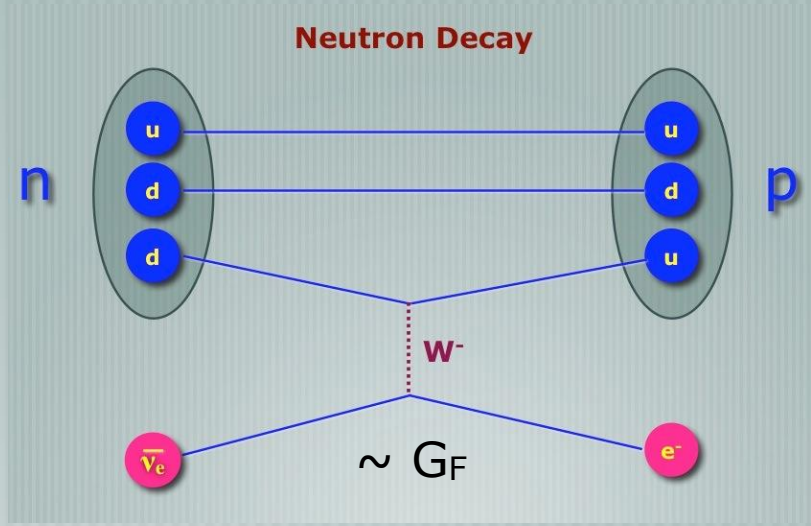




Elektroschwache Wechselwirkung

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”

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

θ_c = Cabbibo angle ~ 20°

Leptonen und Quarks

1970

Eine der meistzitierten Publikationen (Glashow, Iliopoulos, Maiani)

PHYSICAL REVIEW D VOLUME 2, NUMBER 7 1 OCTOBER 1970

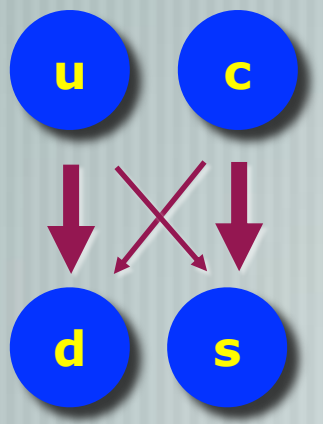
Weak Interactions with Lepton-Hadron Symmetry*

S. L. GLASHOW, J. ILIOPOULOS, AND L. MAIANI†
Lyman Laboratory of Physics, Harvard University, Cambridge, Massachusetts 02139

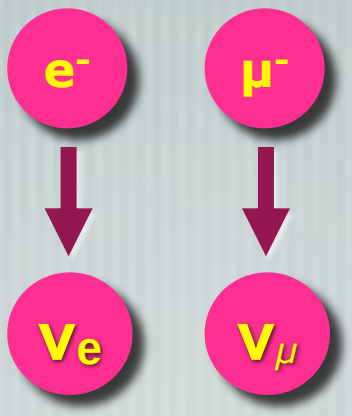
(Received 5 March 1970)

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-Milis theory is discussed.

Quarks



Leptons

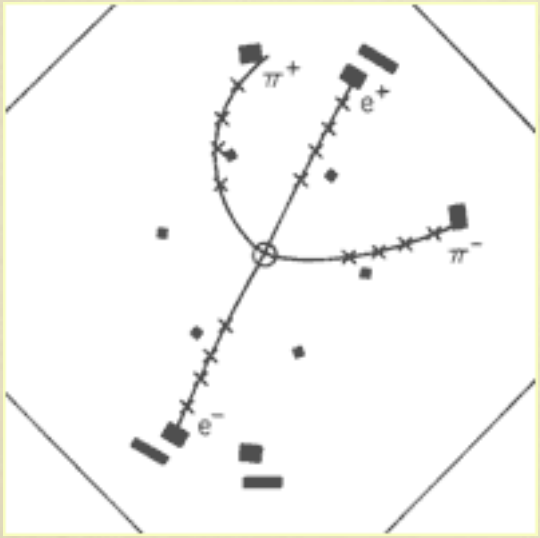


Dies war das theoretische 'Standard'-Modell des Jahres 1970 (mit zwei Familien)

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.



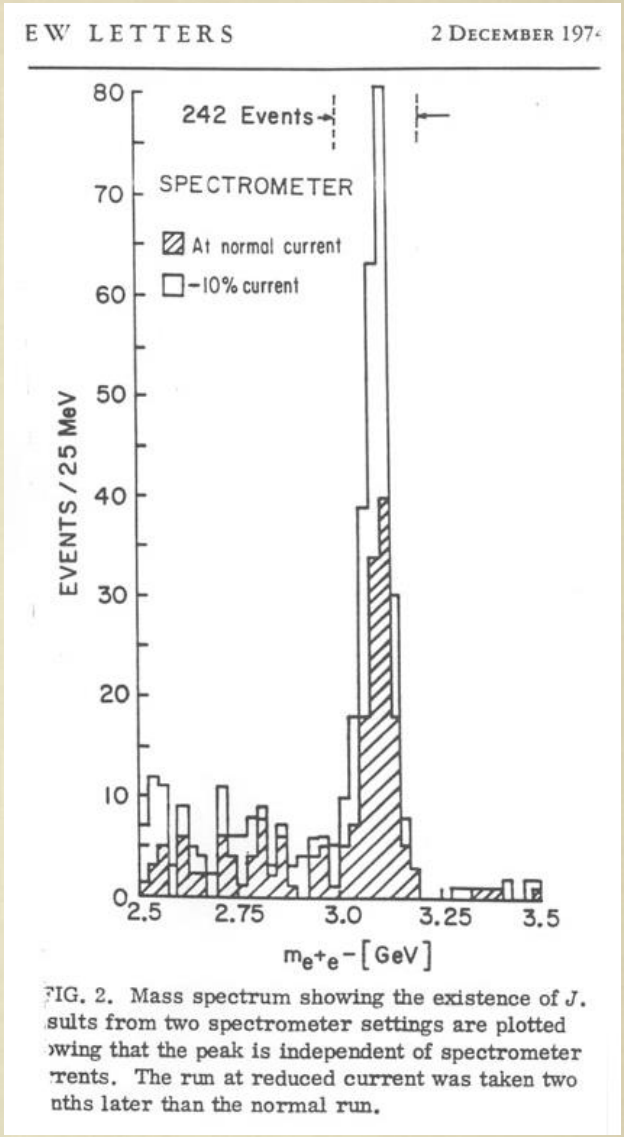


FIG. 2. Mass spectrum showing the existence of *J*. sults from two spectrometer settings are plotted owing that the peak is independent of spectrometer rents. The run at reduced current was taken two nths later than the normal run.

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

TEILCHENSPEKTRUM

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

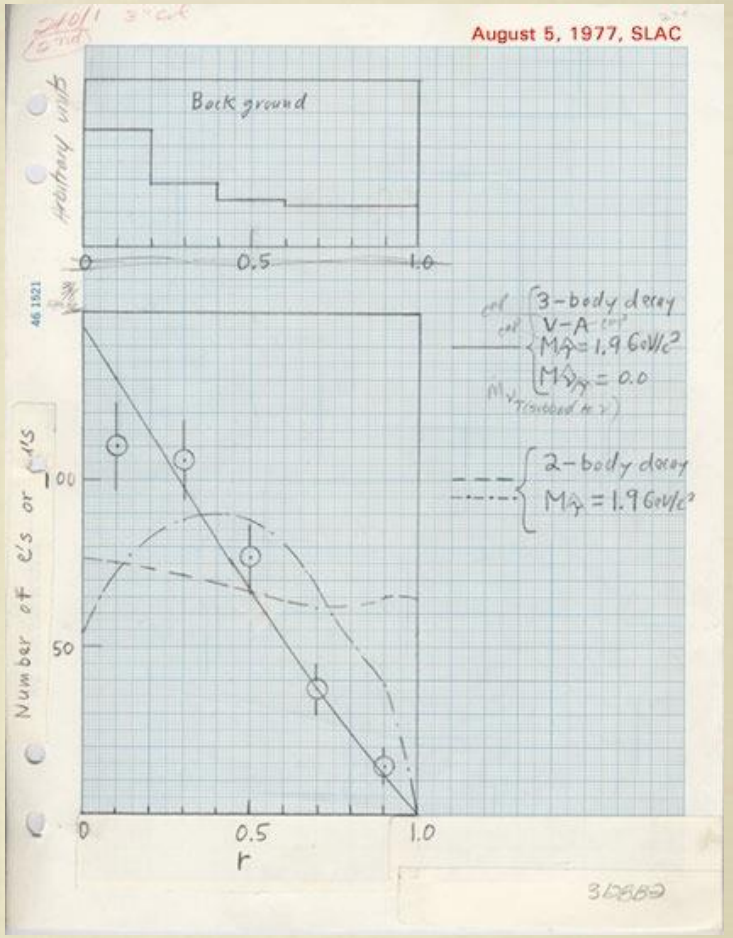
…da fand man am SLAC ein drittes Lepton!

Ein neues ‘schweres Elektron’ mit M= 3500 m_e

… und wer hatte das bestellt?

MIT DER NEUEN LOGIK DER LEPTON-QUARK SYMMETRIE

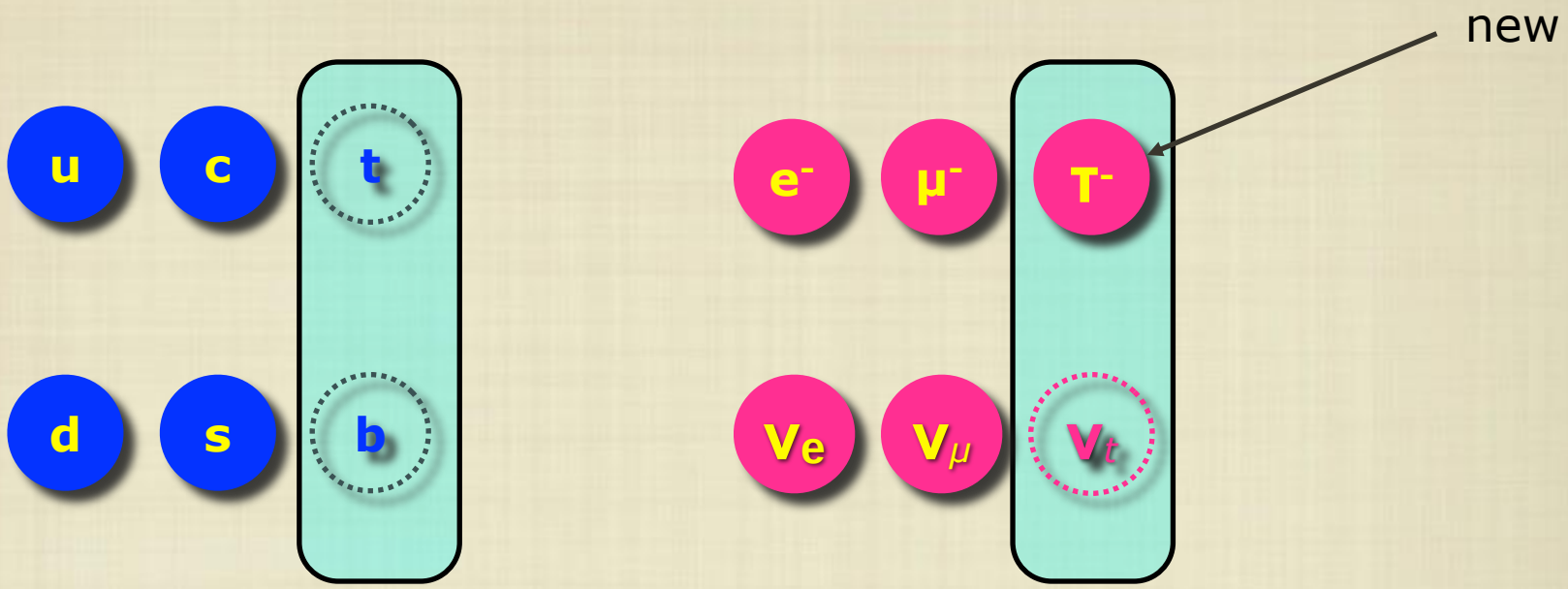
ein weiteres Neutrino (the ‘tau neutrino’),
und zwei weitere Quarks (‘top’ and ‘bottom’).



Marty Perl's Logbook

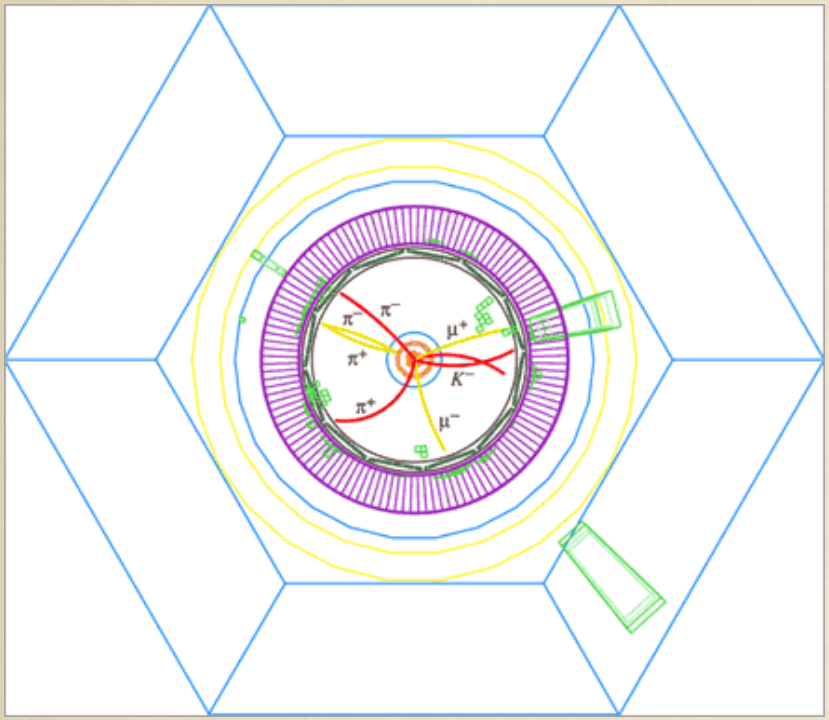
TEILCHENSPEKTRUM

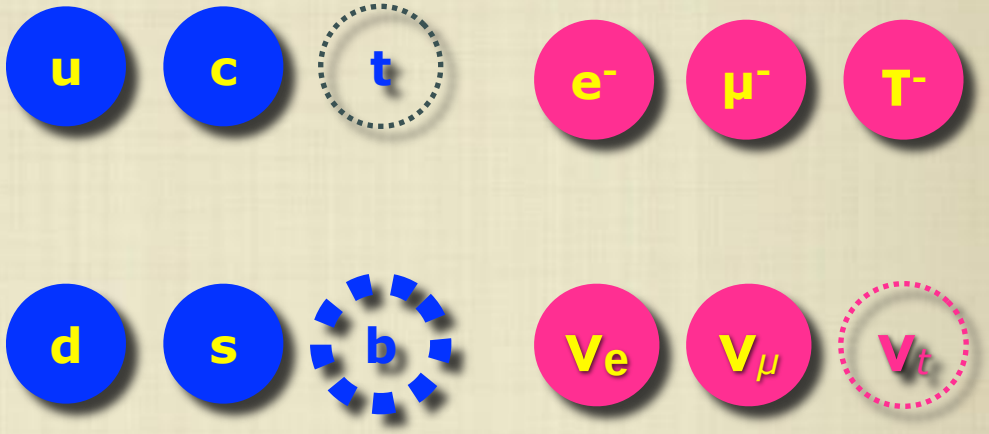
Die Suche nach den fehlenden Familienmitgliedern begann ...



TEILCHENSPEKTRUM

Entdeckung des **'Bottom' Quark (Fermilab)**





Quarks Leptons

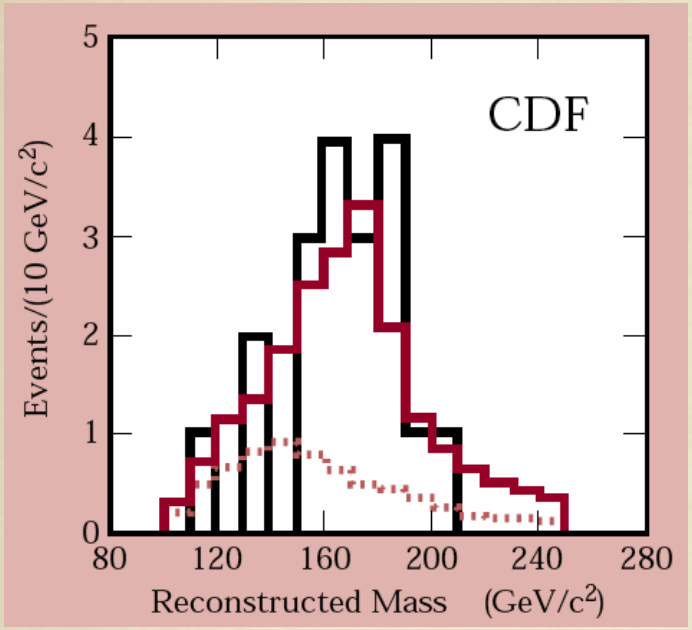
1977 entdeckten Physiker am Fermilab (nahe Chicago) ein neues Meson (genannt 'Upsilon')

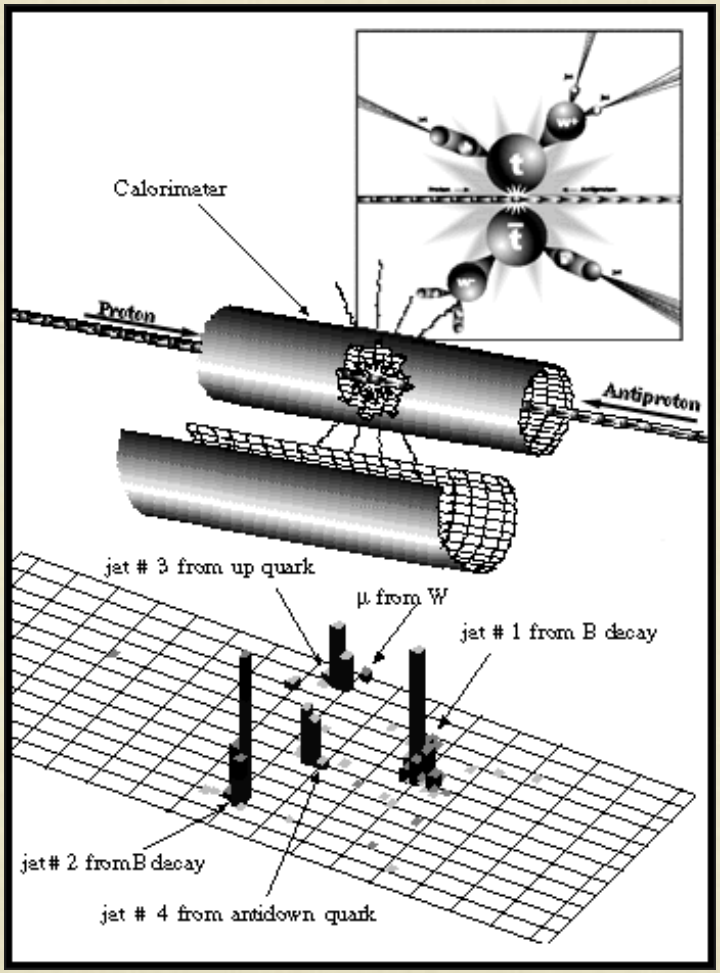
Seine Eigenschaften passten auf den 'Steckbrief' eines Mesons, das aus einem bottom/anti-bottom Quark Paar bestand.

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

TEILCHENSPEKTRUM

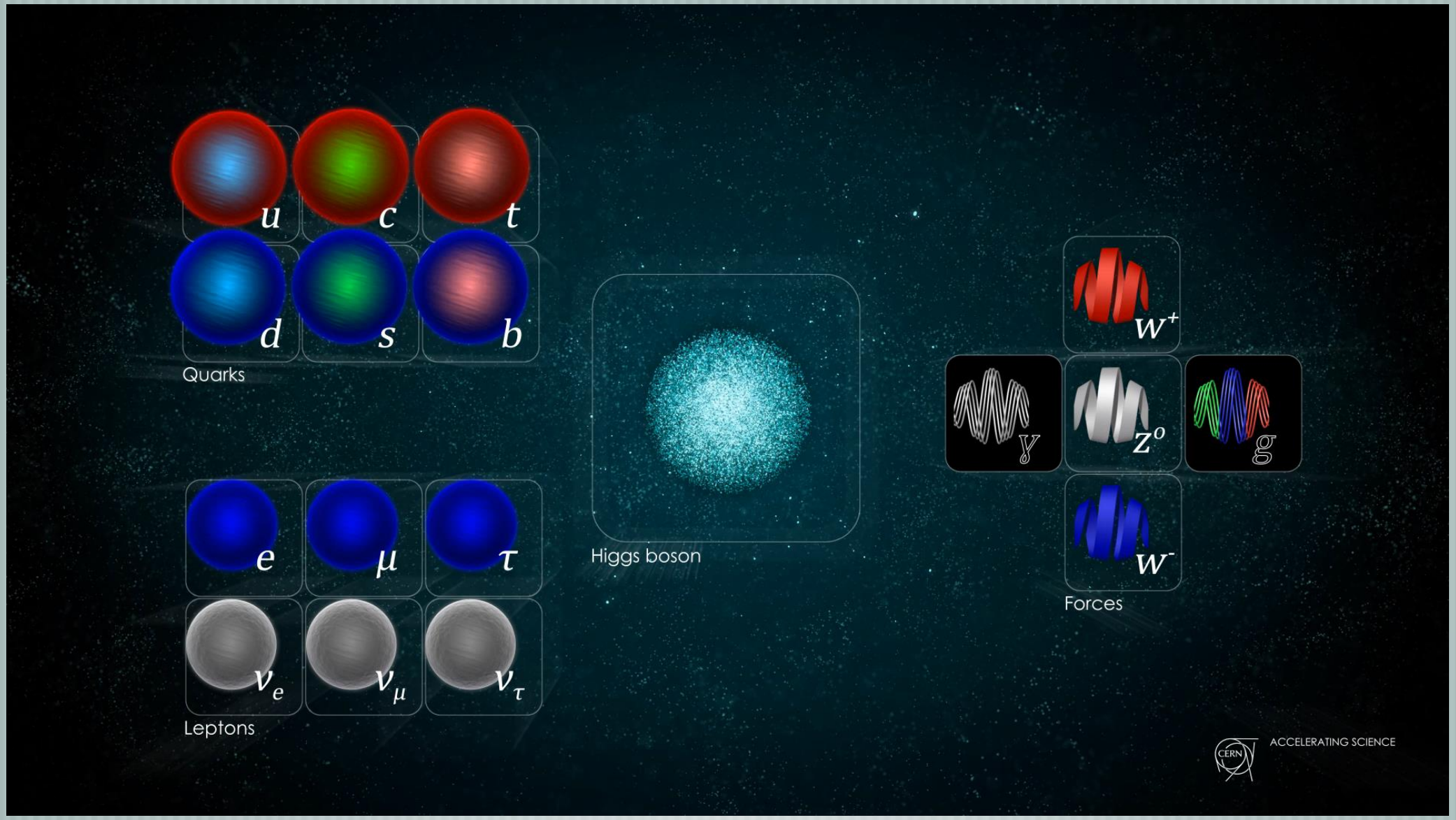
Entdeckung des **'Top' Quark (Fermilab)**





u c t

d s b

Quarks

DAS STANDARD MODEL (heute)