

Kinetische Gastheorie

Boltzmann

Maxwell

Elektromagnetismus

Newton

### Teilchen

### Felder

### Universum

### Technologien

1895

$e^-$

Brownsche Bewegung



Radioaktivität 3

4

1900

Atom

Spezielle Relativität

1905

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

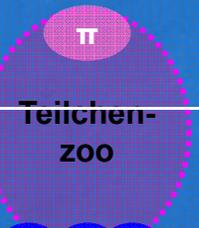
Zyklotron

1940

1950

$\tau^-$

$\rho$



QED

P, C, CP Verletzung

Big Bang Nukleosynthese

Blasenkammer

Synchrotron

1960

$\nu_e$

$\nu_\mu$

u d s

Higgs

W Bosons

Kosmische Hintergrundstrahlung

$e^+e^-$  Ring

1970

c

GUT

EW Vereinigung

QCD Farbladung

Prozessrechner

Strahlkühlung

1975

$t$

STANDARD MODEL

SUSY

1980

b

Superstrings



Inflation

$p^+p^-$  Ring

1990

t

3 Teilchenfamilien

Inhomogenität der Hintergrundstrahlung (COBE, WMAP)



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)

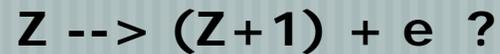
## Radioaktivität

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

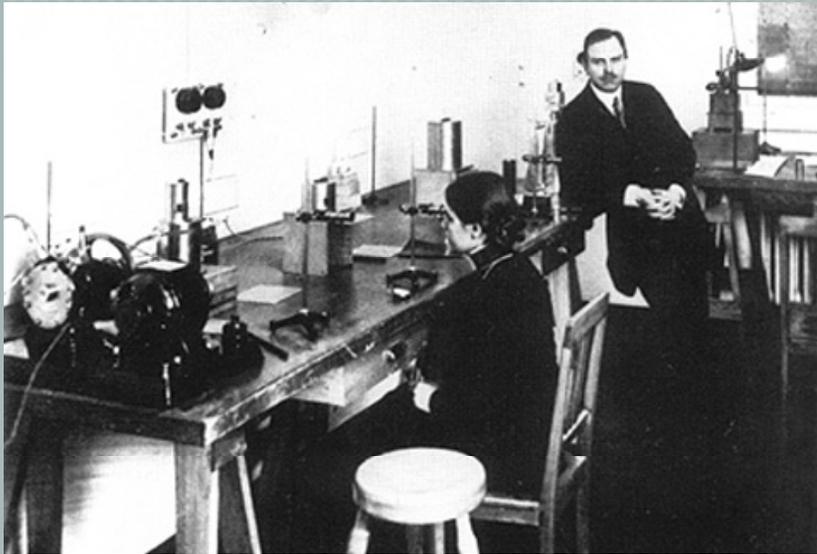
# Felder

'Schwache' Wechselwirkung

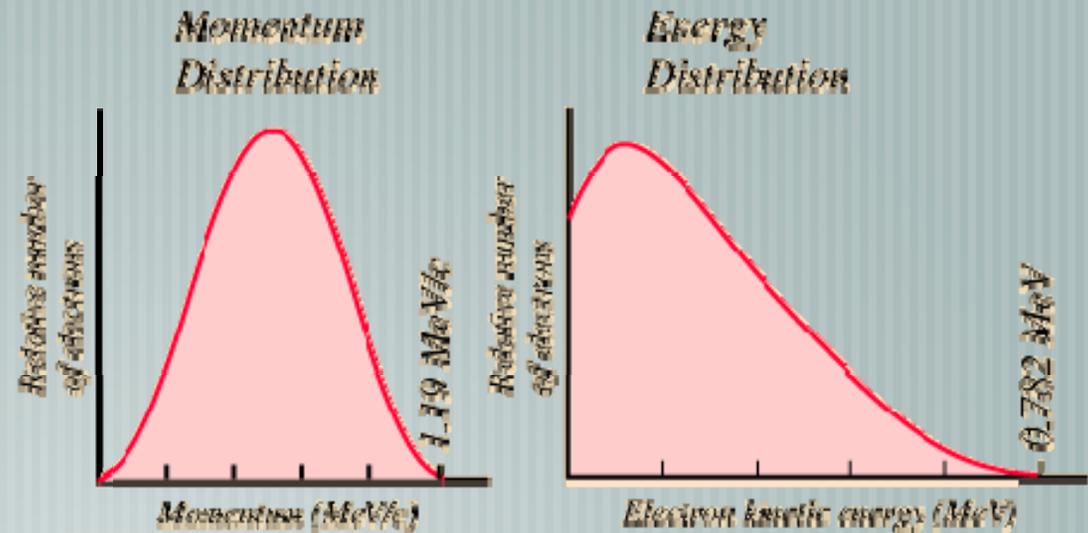
Beta-Zerfall von Atomkernen - warum wurden Elektronen mit einem kontinuierlichen Energiespektrum emittiert?



Verletzung der Energieerhaltung ?



1911 Lise Meitner, Otto Hahn



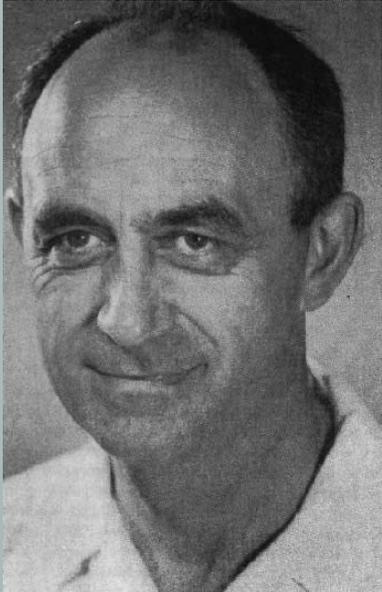
1930 Wolfgang Pauli: an **extremely light neutral particle\*** is emitted in beta decay

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

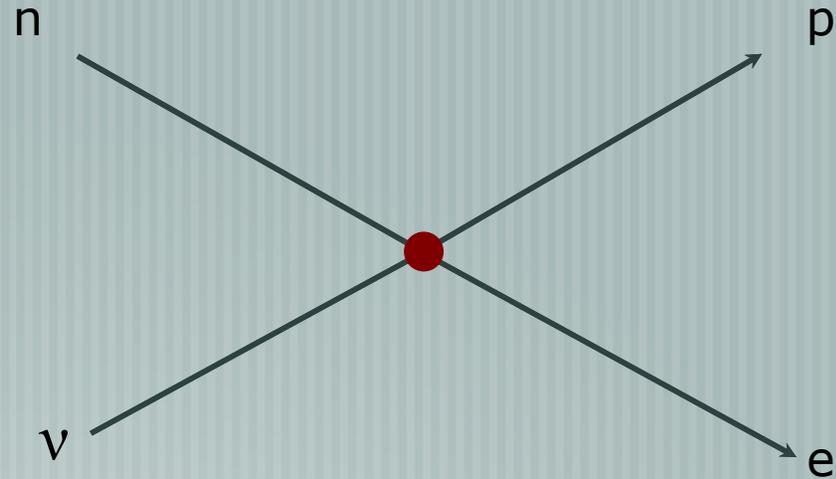


# Felder

'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

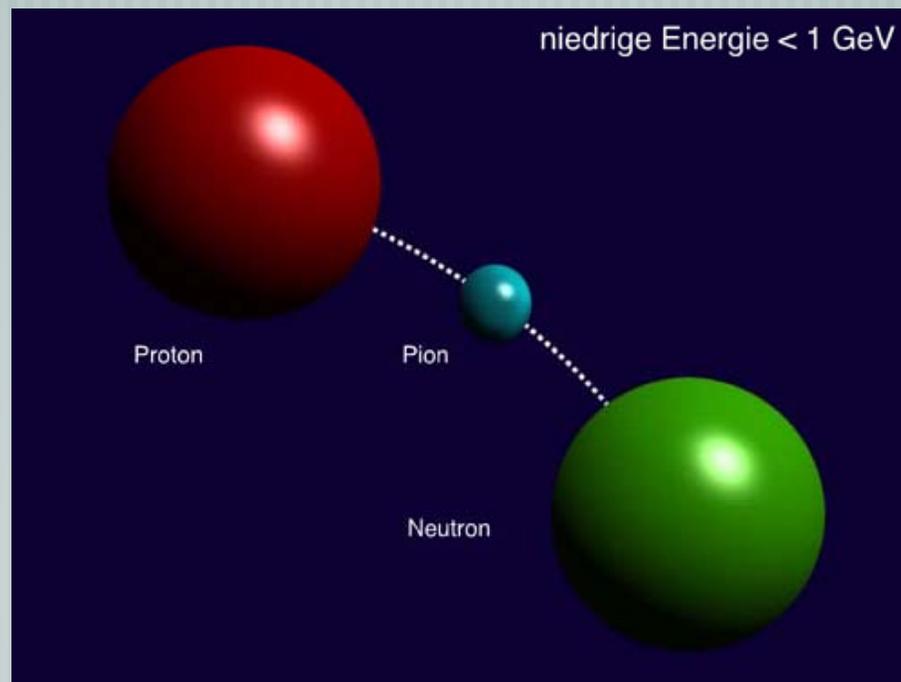
'Starke' Wechselwirkung

Was hält Protonen und Neutronen im Kern zusammen

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

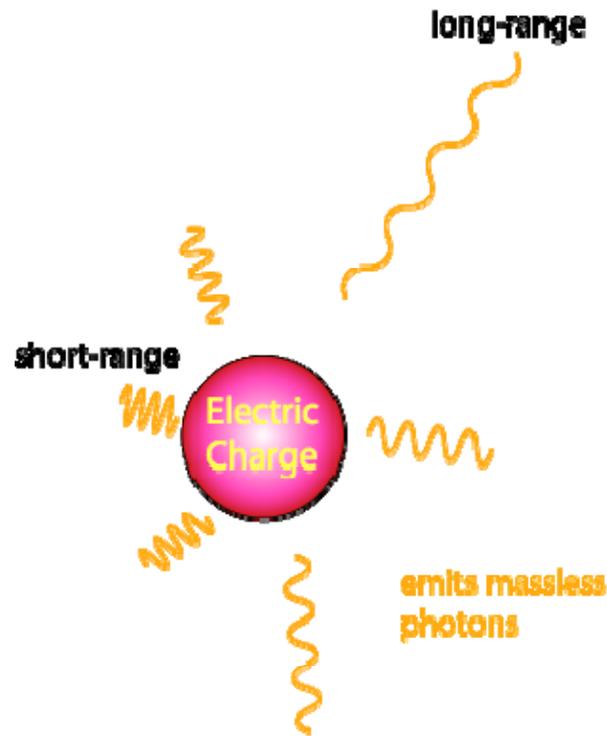
Yukawa's idea:

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



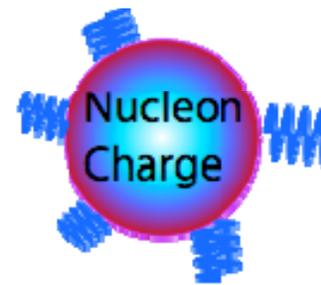
Yukawa (1934)

# Elektromagnetische vs 'Starke' WW



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

Coulomb law



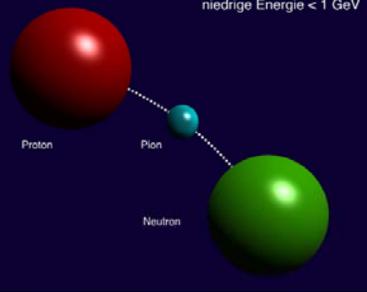
emits massive pions

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

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

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

Yukawa potential ~ Modified "Coulomb" law



# Felder

'Starke' Wechselwirkung

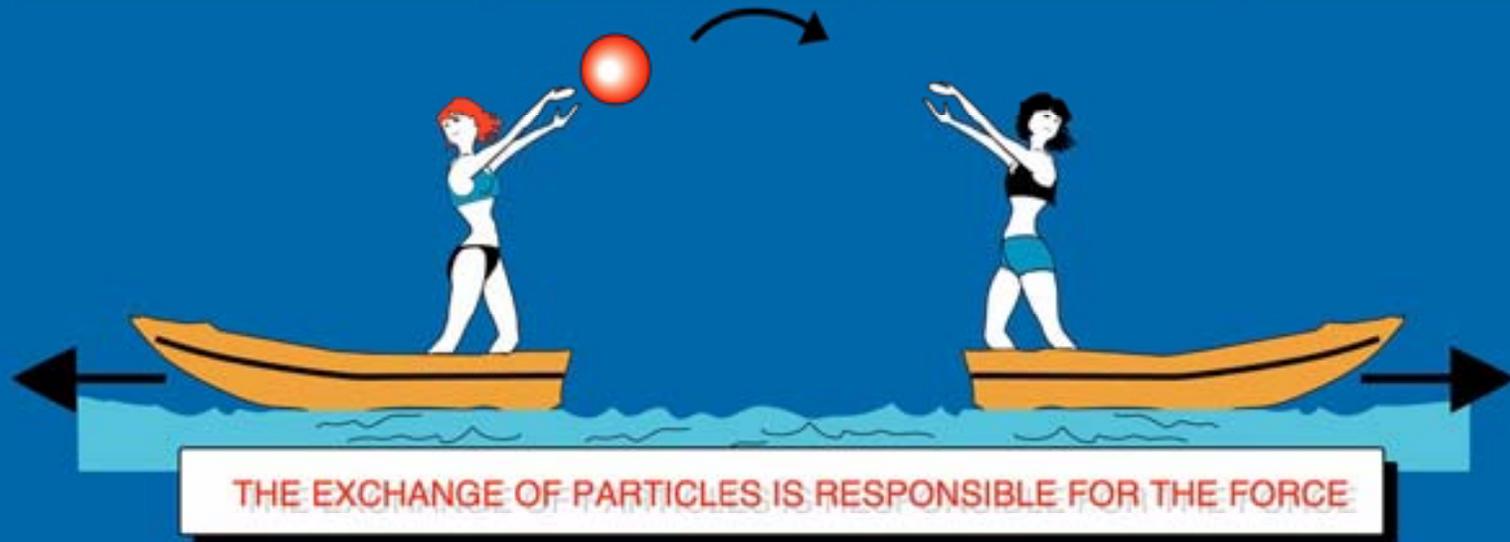
Analogien zum 'Austauschkraften'



Unschärferelation: 1.4 fm ~ 140 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



# 4

## Das Universum

Vor dem 20. Jahrhundert schien das Universum ein ruhiger Platz zu sein.  
Es war da nicht viel los.

Die meisten Physiker glaubten das Universum sei unendlich in Raum und Zeit.

Aber es gab da eine merkwürdige Beobachtung

### Nachts ist es dunkel

Das konnte nicht mit einem unendlichen grossen und unendlich alten Universum  
erklärt werden

## Olber's "Paradox"

Heinrich Wilhelm Olbers (1823)

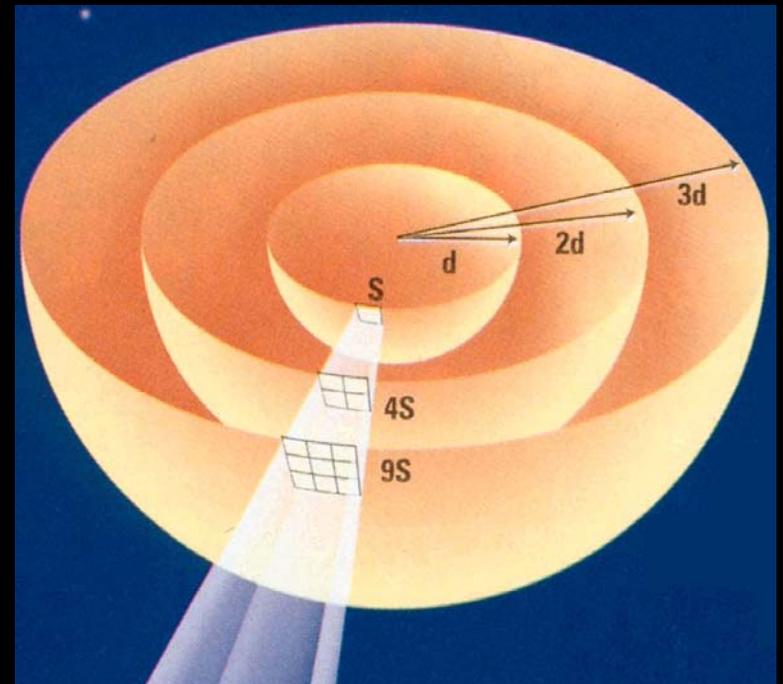
Wenn das Universum unendlich gross und gleichförmig mit leuchtenden Sternen gefüllt ist, dann wird man in jeder möglichen Blickrichtung irgendwo auf die Oberfläche eines Sterns blicken.

Quantitativ:

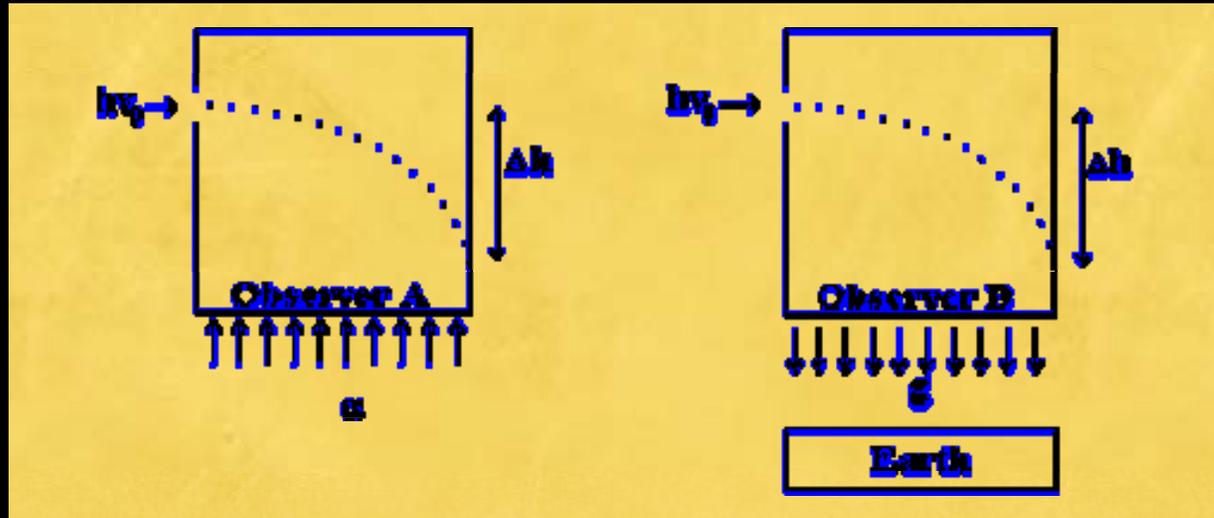
Jede Schale trägt mit ihrer Oberfläche bei  $\sim r^2$   
Die Lichtintensität nimmt ab mit  $\sim 1/r^2$   
Beitrag jeder Schale zur Gesamtintensität = constant

Konsequenz:

Das Universum ist nicht unendlich alt, oder ...  
Das Universum ist nicht unendlich gross, oder...  
Beides



## Äquivalenzprinzip (Einstein, 1907)



Beschleunigung (träge Masse) ist ununterscheidbar von  
Gravitation (schwere Masse)

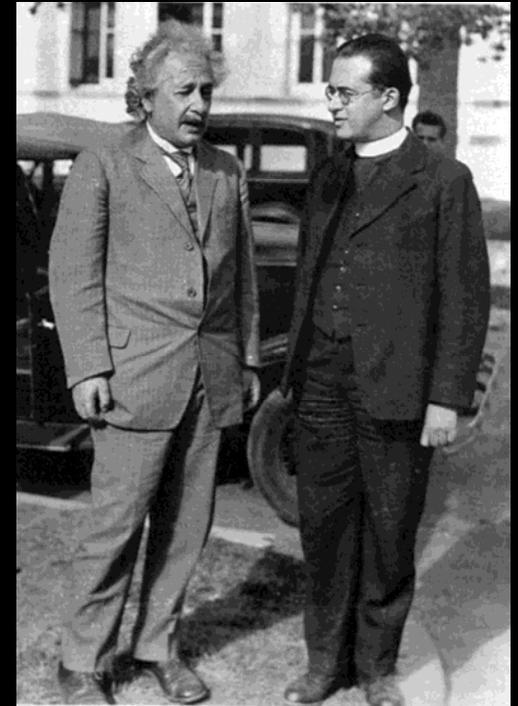
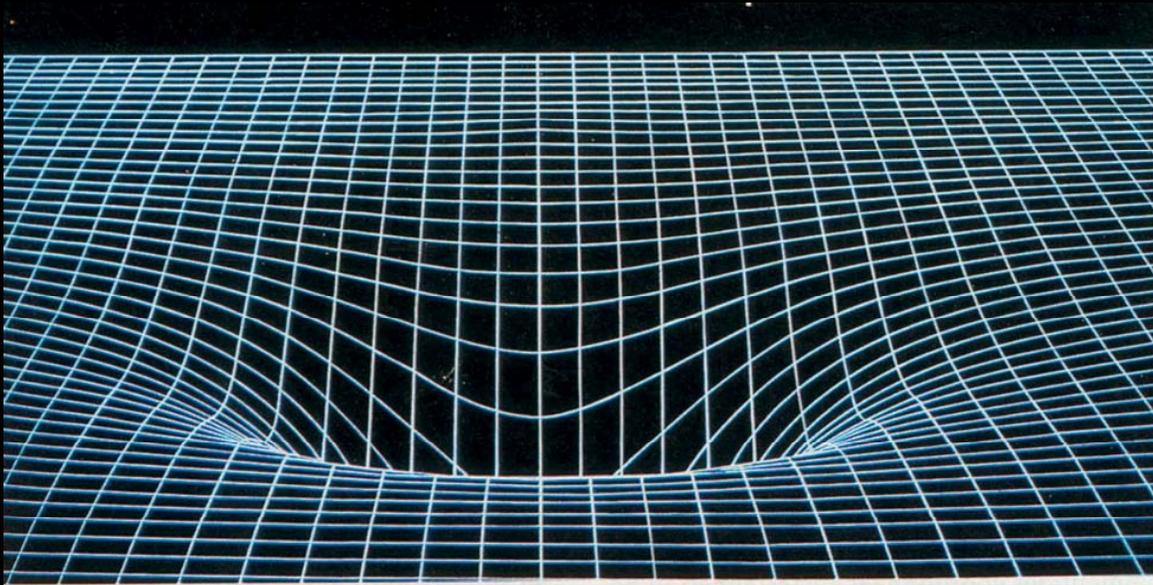
"Der glücklichste Gedanke meines Lebens" (Albert Einstein)

Aufzugbeispiel: Licht breitet sich auf einer parabolischen Kurve aus.  
Äquivalenzprinzip: in einem Gravitationsfeld wird Licht auch abgelenkt.

Da Lichtstrahlen den kürzest-möglichen Weg im Raum definieren -->  
Raum (und Zeit) werden durch Gravitationsfelder gekrümmt

Albert Einstein (1912-15) :  
Allgemeine Relativitätstheorie

Die Materie bewirkt die Krümmung des Raums  
Der Raum bestimmt die Bewegung der Materie



George Lemaitre (1927)

# Expandierendes Universum ?

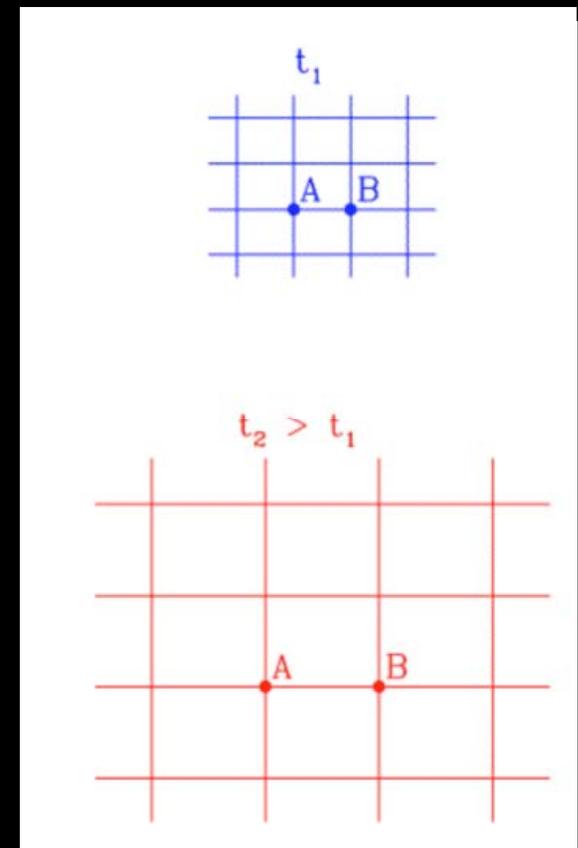
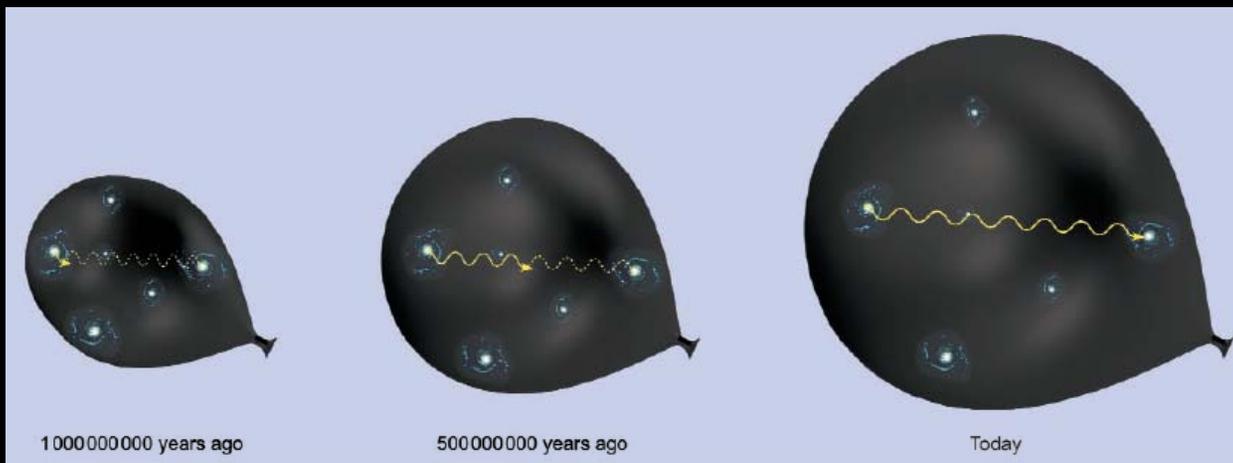
1915

Friedmann beschrieb eine mögliche Lösung der Einstein-Gleichungen - ein expandierendes Universum

$$r_{AB}(t) = a(t)x_{AB}$$

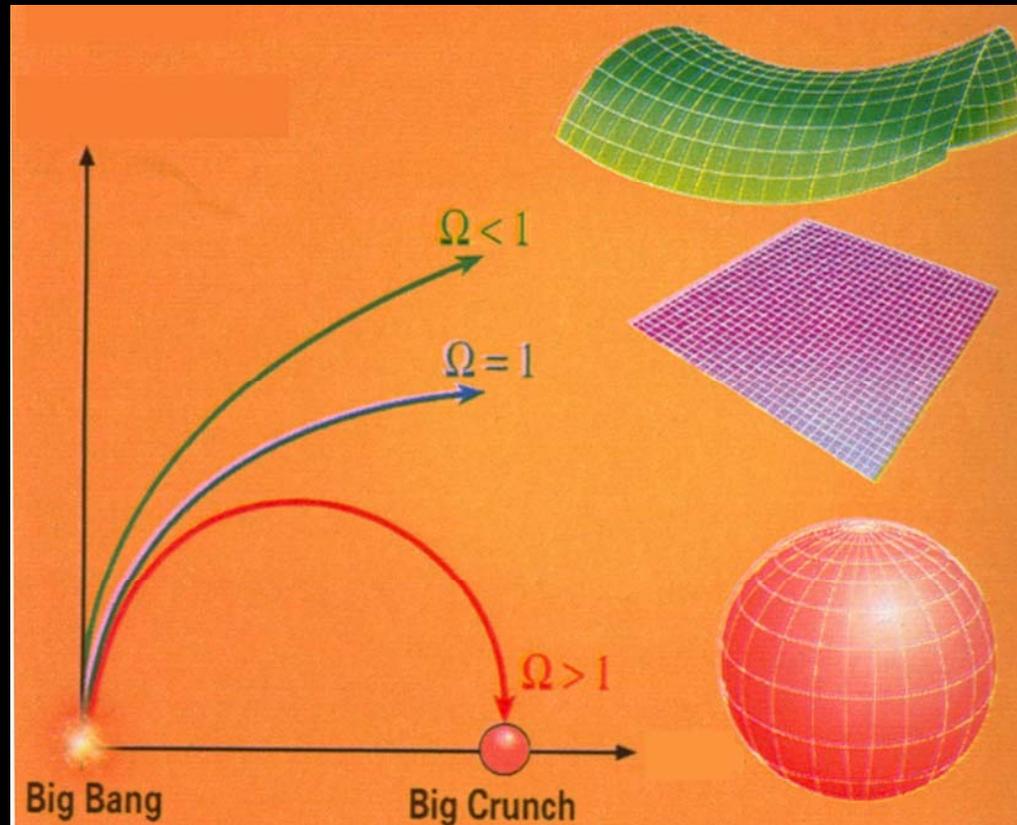
Seine Gleichung verbindet die durchschnittliche Energiedichte " $\rho$ " und den Krümmungsfaktor  $K$  mit der Expansionsrate  $a(t)$

$$\left(\frac{1}{a} \frac{da}{dt}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \bar{\rho} - \frac{K}{a^2}$$



# Universum

Eine Frage war die Gesamtmasse des Universums. Im Prinzip kann das irgendeine Zahl sein. Entscheidend ist aber die 'kritische Energiedichte'. Falls die durchschnittliche Energiedichte im Universum kleiner ist, wird das Universum für immer expandieren. Ist sie aber grösser, dann wird das Universum eines Tages wieder in sich zusammenfallen ('big crunch').



# Universum

Einstein mochte die Idee eines 'dynamischen' Universums überhaupt nicht.

Er glaubte an ein ewiges und statisches Universum.

Aber seine eigenen Gleichungen sagten etwas anderes voraus.

Deshalb entschied er sich, an seiner Gleichung herumzupfuschen, und fügte eine sogenannte 'kosmologische Konstante' ein.

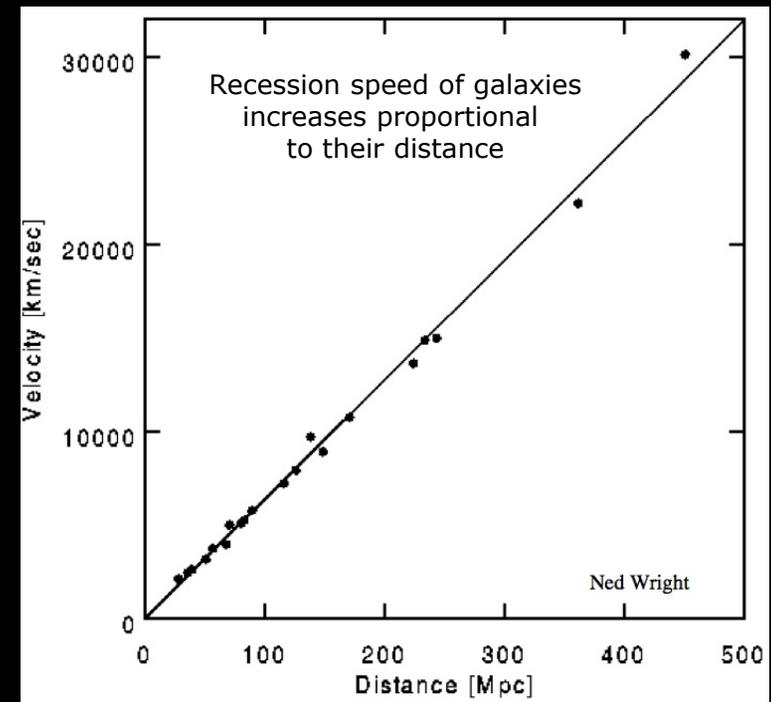
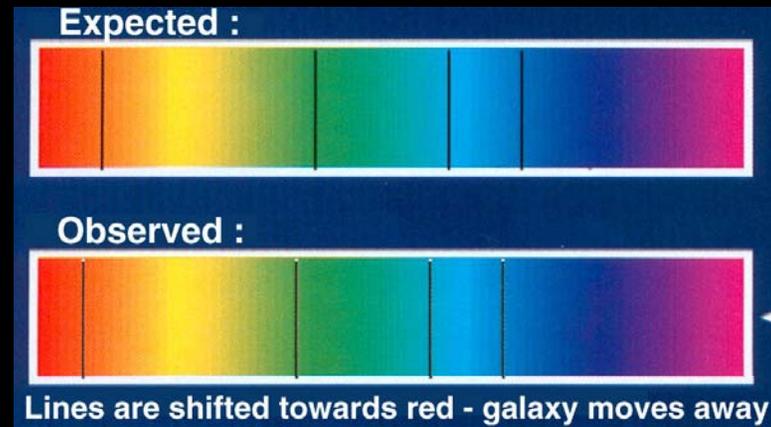

$$\left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 - \frac{8}{3}\pi G\rho - \frac{1}{3}\Lambda c^2 = -\frac{kc^2}{R^2}$$

# Das Universum expandiert !

1929



Edwin Hubble (1929)  
Mt. Palomar telescope



**Einstein gibt zu: die kosmologische Konstante war 'seine grösste Eselei'**

# Universum

Die systematische Beobachtung von vielen Sternen in anderen Galaxien enthüllte eine erstaunliche Tatsache:

Das Universum sieht in **allen Richtungen und allen Entfernungen genau gleich** aus:

Hydrogen ~ 75 %

Helium-4 ~ 25 %

He-3 ~ 0.003 %

Deuterium ~ 0.003 %

Li-7 ~ 0.00000002 %

Dafür musste es einen Grund geben ....

## 1948: Das 'Big Bang' Modell\* vom Anfang des Universums



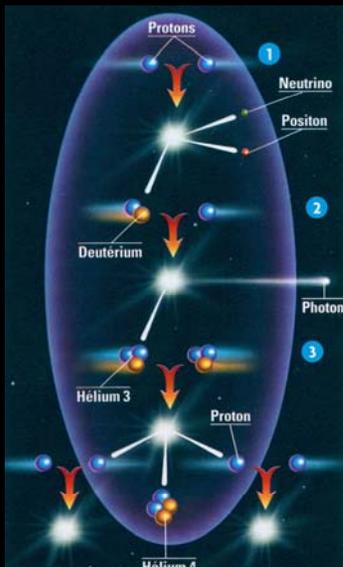
George Gamov

Das Universum entstand aus einem extrem heißen Anfangszustand

Es dehnte sich dann schnell aus, wobei es abkühlte

In der Anfangsphase war das Universum mit Strahlung gefüllt

Aus dieser Strahlung materialisierten die Elementarteilchen



- In den ersten drei Minuten war nur Zeit für die Fusion der leichtesten Atomkerne
- Es sollte ein 'Echo' des Urknalls geben: eine homogene Hohlraumstrahlung mit einer Temperatur von ca. 5 K

\* The name 'Big Bang' was used by Fred Hoyle to ridicule Gamov's idea. Later Fred Hoyle was ridiculed.

Kinetische Gastheorie

Boltzmann

Maxwell

Elektromagnetismus

Newton

### Teilchen

### Felder

### Universum

### Technologien

1895

$e^-$

Brownsche Bewegung

Photon

Radioaktivität

Detektor

Beschleuniger

1900

Atom

Spezielle Relativität

1905

1910

Kern

Quantenmechanik  
Welle-Teilchen Dualismus  
Spin/Fermion-Boson

Höhenstrahlung

Allgemeine Relativität

Geiger

Wolken

1920

$p^+$

1930

$e^+$

n

Antimaterie

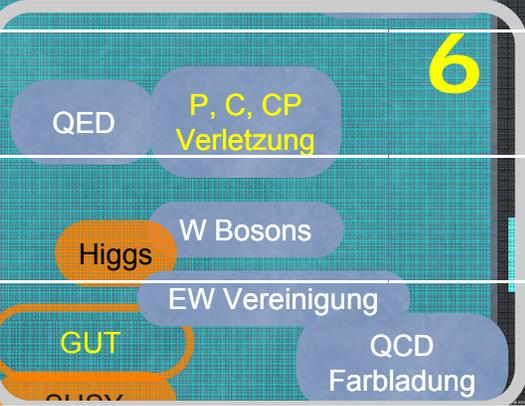
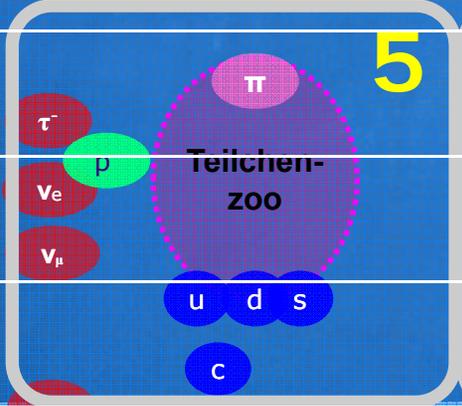
Fermi Theorie

Yukawa  
 $\pi$  Austausch

Galaxien;  
Ausdehnung des Universums

Zyklotron

1940



Dunkle Materie

Kernfusion

Synchrotron

1950

$\tau^-$

$\nu_e$

Teilchen-zoo

QED

P, C, CP  
Verletzung

Big Bang  
Nukleosynthese

Blasenkammer

1960

$\nu_\mu$

Higgs

W Bosons

Kosmische  
Hintergrundstrahlung

$e^+e^-$  Ring

1970

u d s

c

GUT

EW Vereinigung

QCD  
Farbladung

Kosmische  
Hintergrundstrahlung

Vieldrahtkammer

Strahlkühlung

1975

t

STANDARD MODEL

SUSY

Superstrings

W

Z

g

Inflation

$p^+p^-$  Ring

1980

b

3 Teilchenfamilien

Inhomogenität der  
Hintergrundstrahlung(COBE, WMAP)



WWW

1990

$\nu_\tau$

$\nu$  Masse

t

Dunkle Energie

GRID

2000

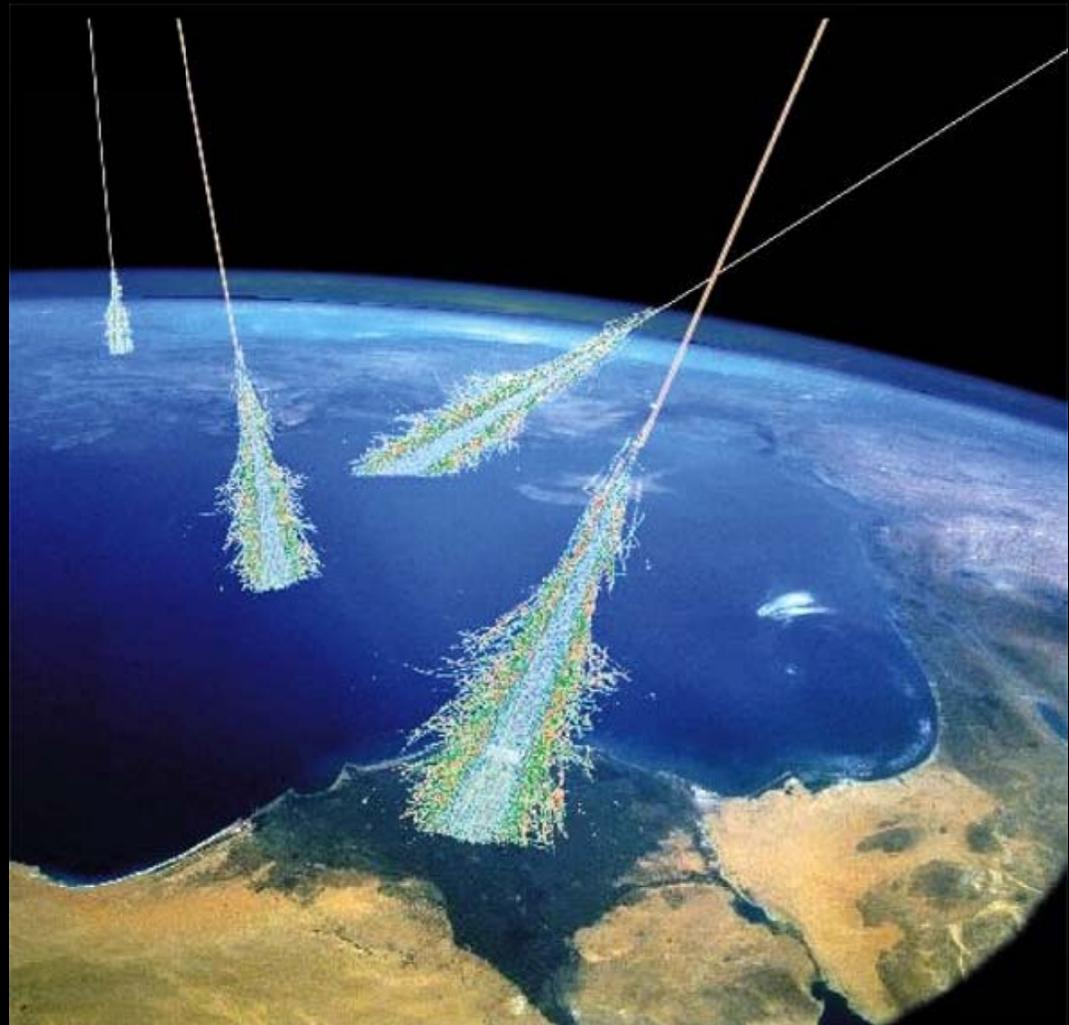
2010

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

## Entdeckung der kosmischen Strahlung



Victor Hess

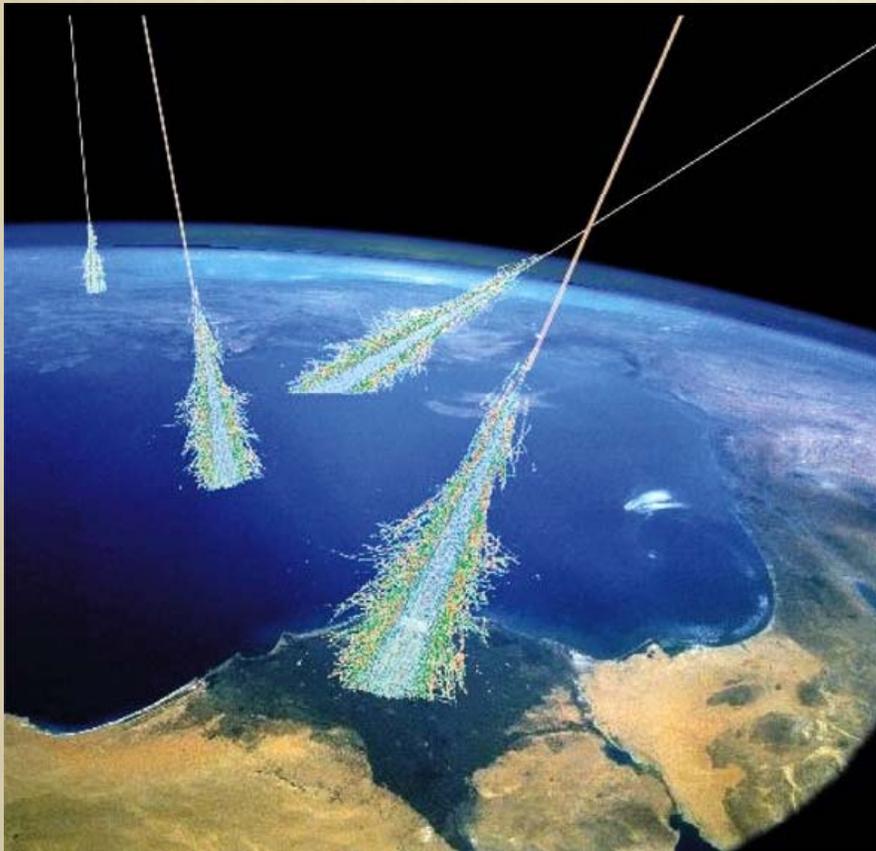


$\mu^-$

# TEILCHENSPEKTRUM

1937

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.



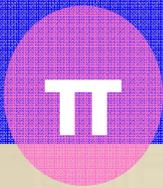
**Ein neues Teilchen im richtigen Massenbereich wurde entdeckt**

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?"**

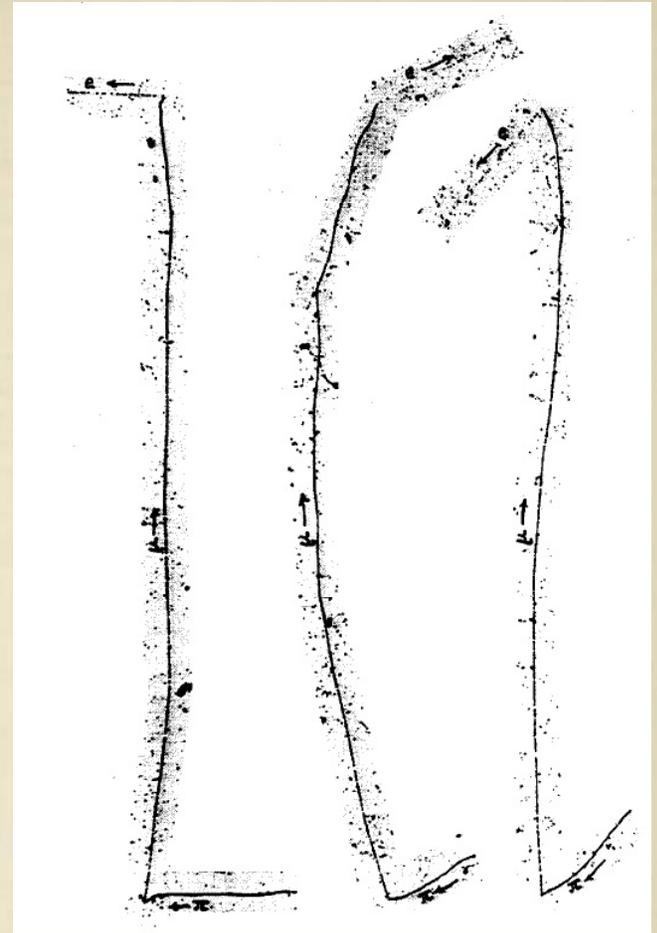


1947: Entdeckung des (geladenen) Pions



Cecil Powell

Ouff!



## Photographische Emulsion

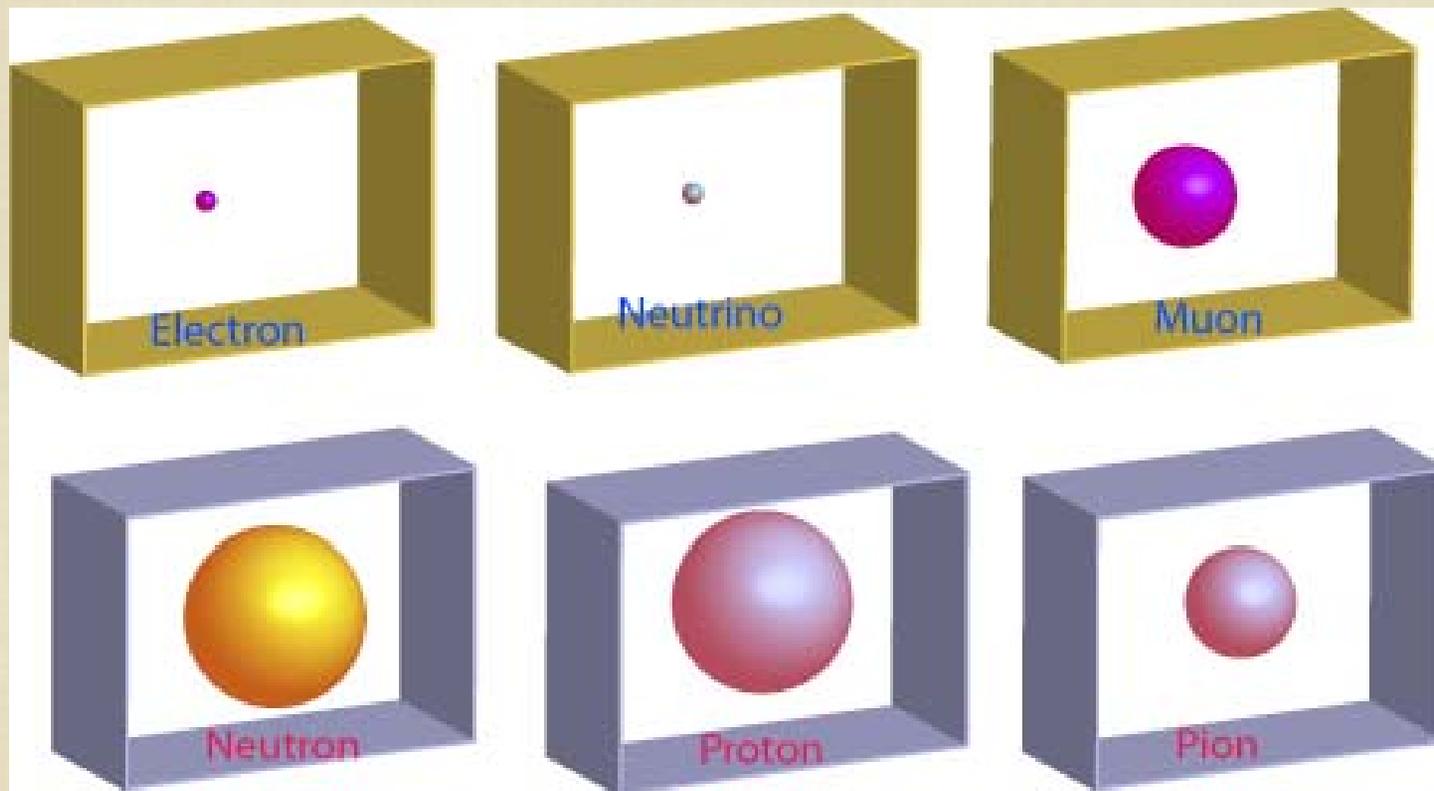
Kosmische Strahlen in **grosser Höhe** (Pic du Midi, Pyrenees)

Pionenspuren wurden im Mikroskop identifiziert

1948: Pionen am Berkeley Zyklotron produziert

# TEILCHENSPEKTRUM

1948





Scanned at the American Institute of Physics

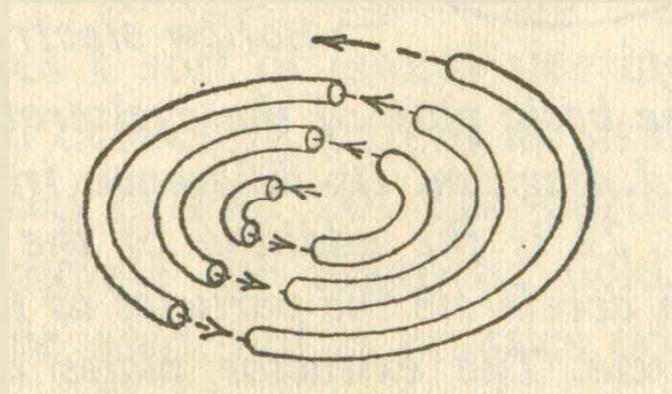
Rolf Wideroe, 1928

## Beschleuniger

*"Kosmische Strahlung aus Menschenhand"*

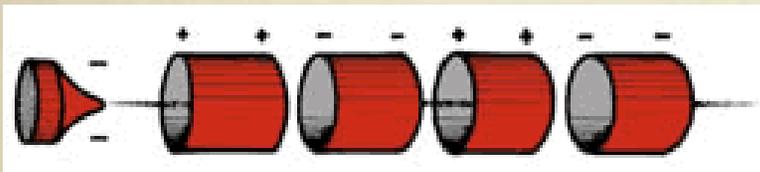


Ernest Lawrence, 1931



Zyklotron

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



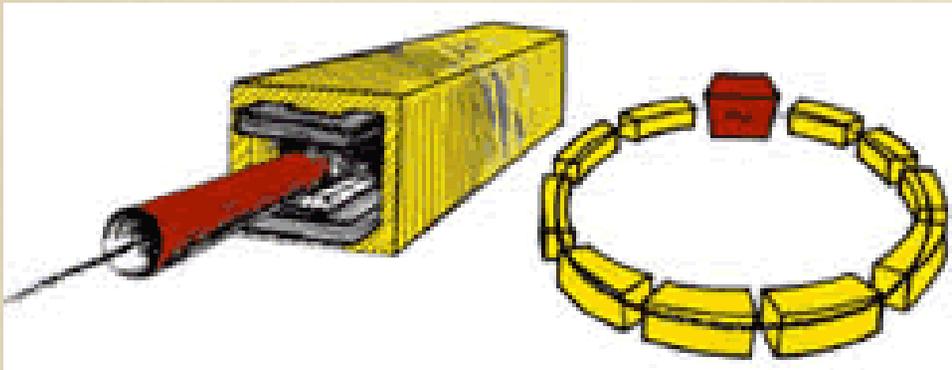
Linearbeschleuniger

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

- 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)

### Detektoren

Geigerzähler  
Nebelkammern  
Emulsionen  
Blasenammer

Cerenkov Detektoren  
Photomultiplier  
Funkenkammern

### Nach 1967:

Drahtkammern  
Driftkammern  
Kalorimeter

### 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

## 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  
 $\psi$   
 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'

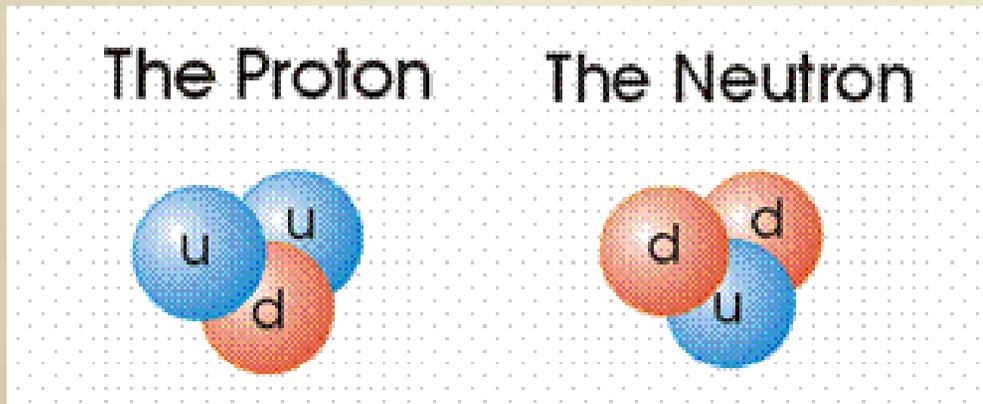
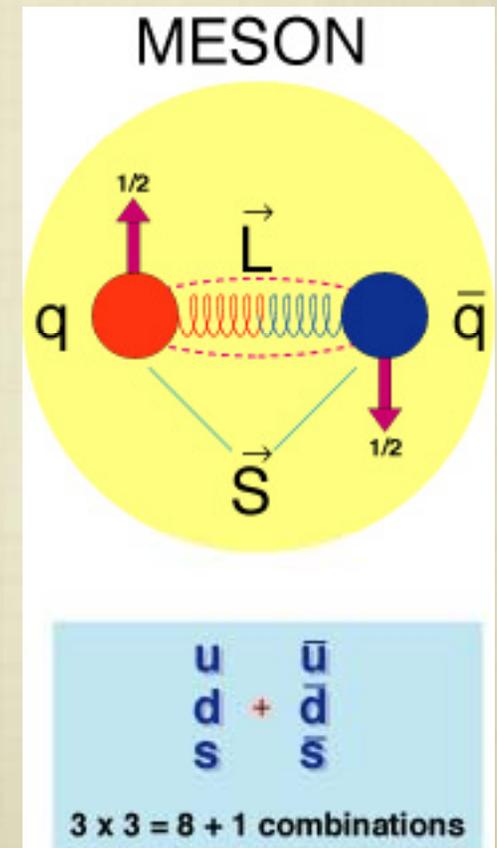
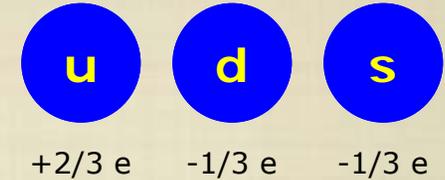


Fig. 6.35 Murray Gell-Mann (b.1929).

Gell-Mann, 1963

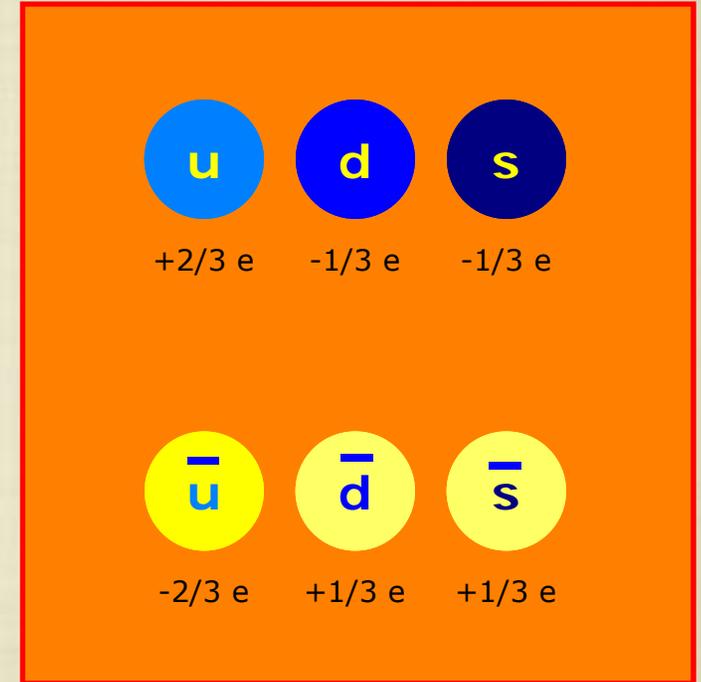
(G. Zweig, 1963, CERN)

- 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)

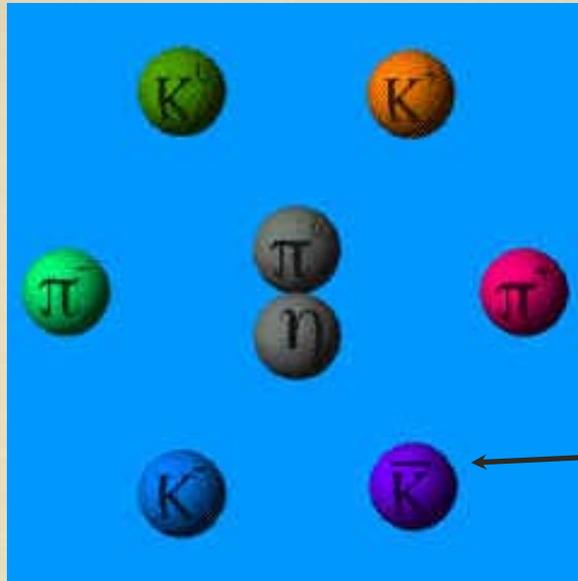
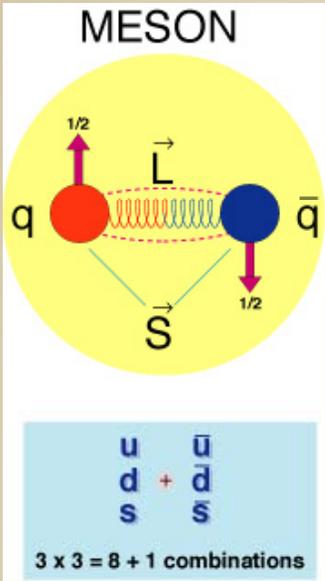


# TEILCHENSPEKTRUM

Einige der bekannteren Mesonen (quark+antiquark):



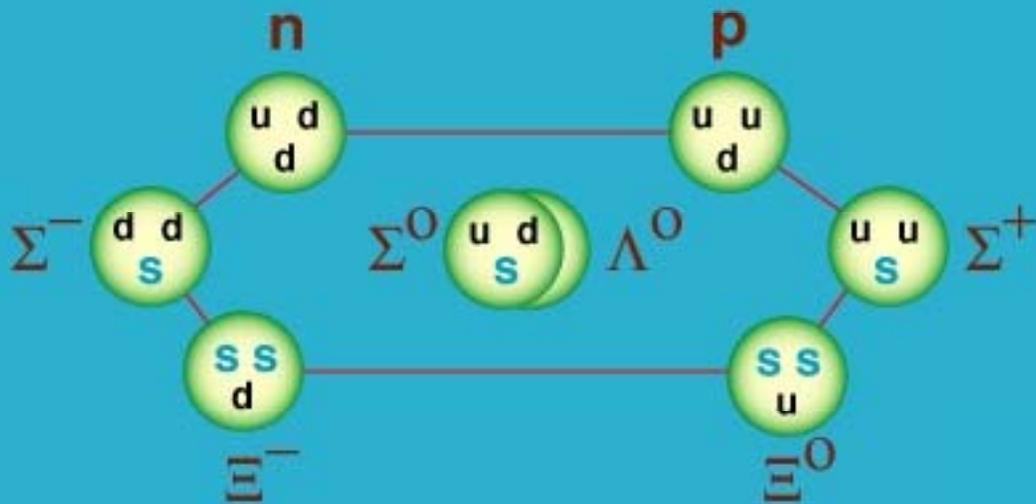
# TEILCHENSPEKTRUM



← Pion, Eta-meson

← Kaonen besitzen ein 'strange' Quark

## SPIN 1/2 BARYON OCTET

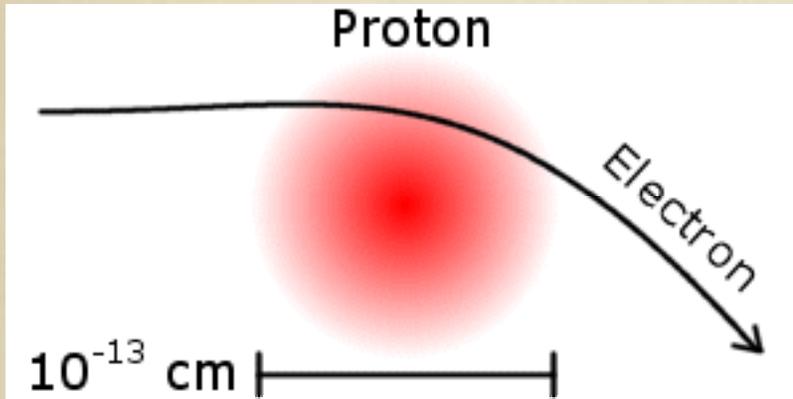


Die leichtesten Baryonen:  
Proton, Neutron;  
Lambda, Sigma, Xi

# TEILCHENSPEKTRUM

## Entdeckung der Quarks

Elektronenstreuung an Protonen

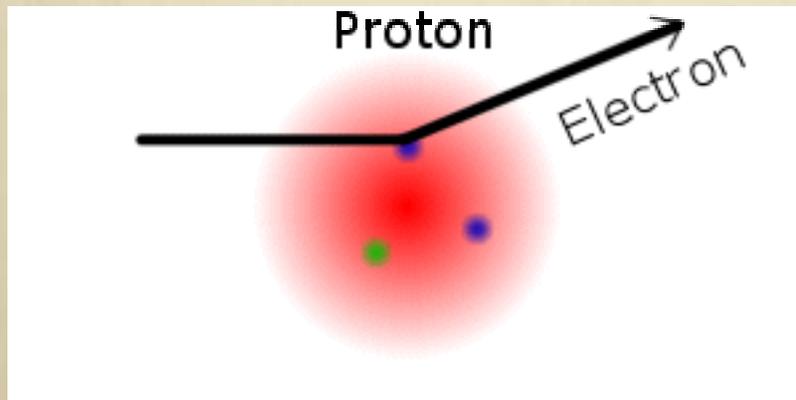


1956 Hofstadter: Messung des Protonenradius



Stanford Linear Accelerator Centre

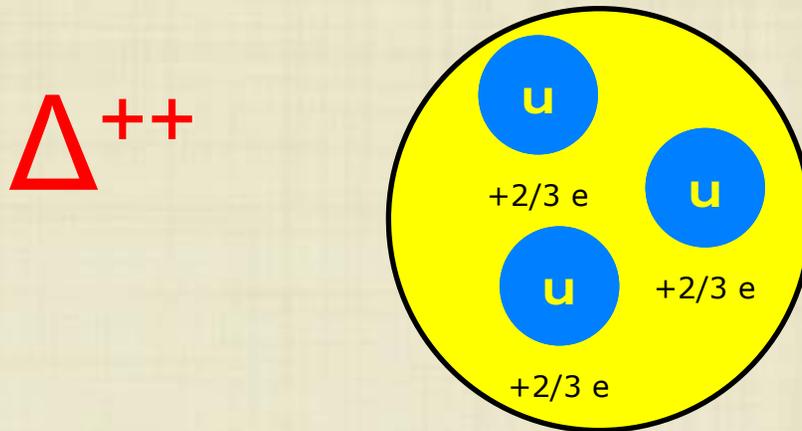
1967 Friedmann, Kendall, Taylor (SLAC): ~ Rutherford experiment mit Elektronen  
--> es gibt drei 'harte' (punktförmige) Streuzentren im Proton



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

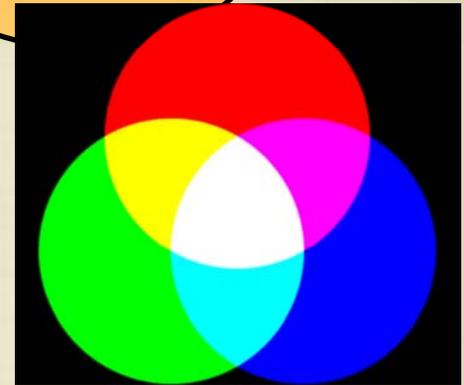
## Quantum Chromo Dynamics

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

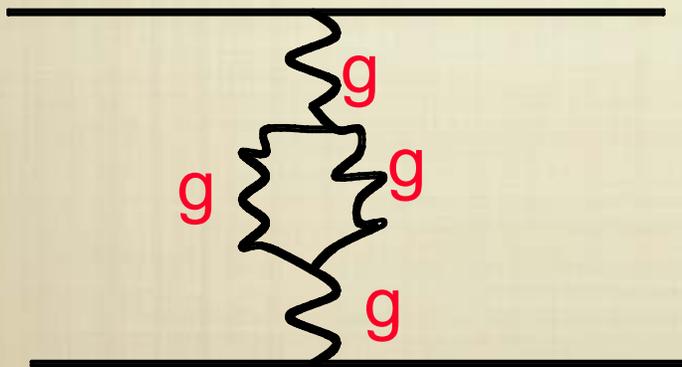
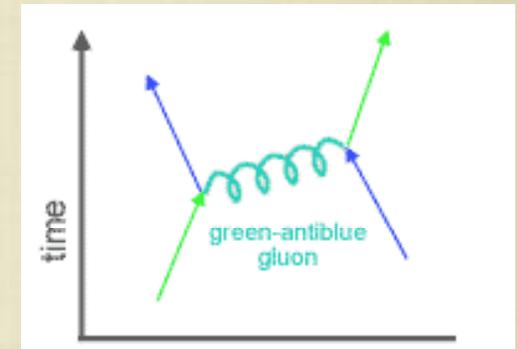
BARYONS = 3-Quark Zustände

## 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

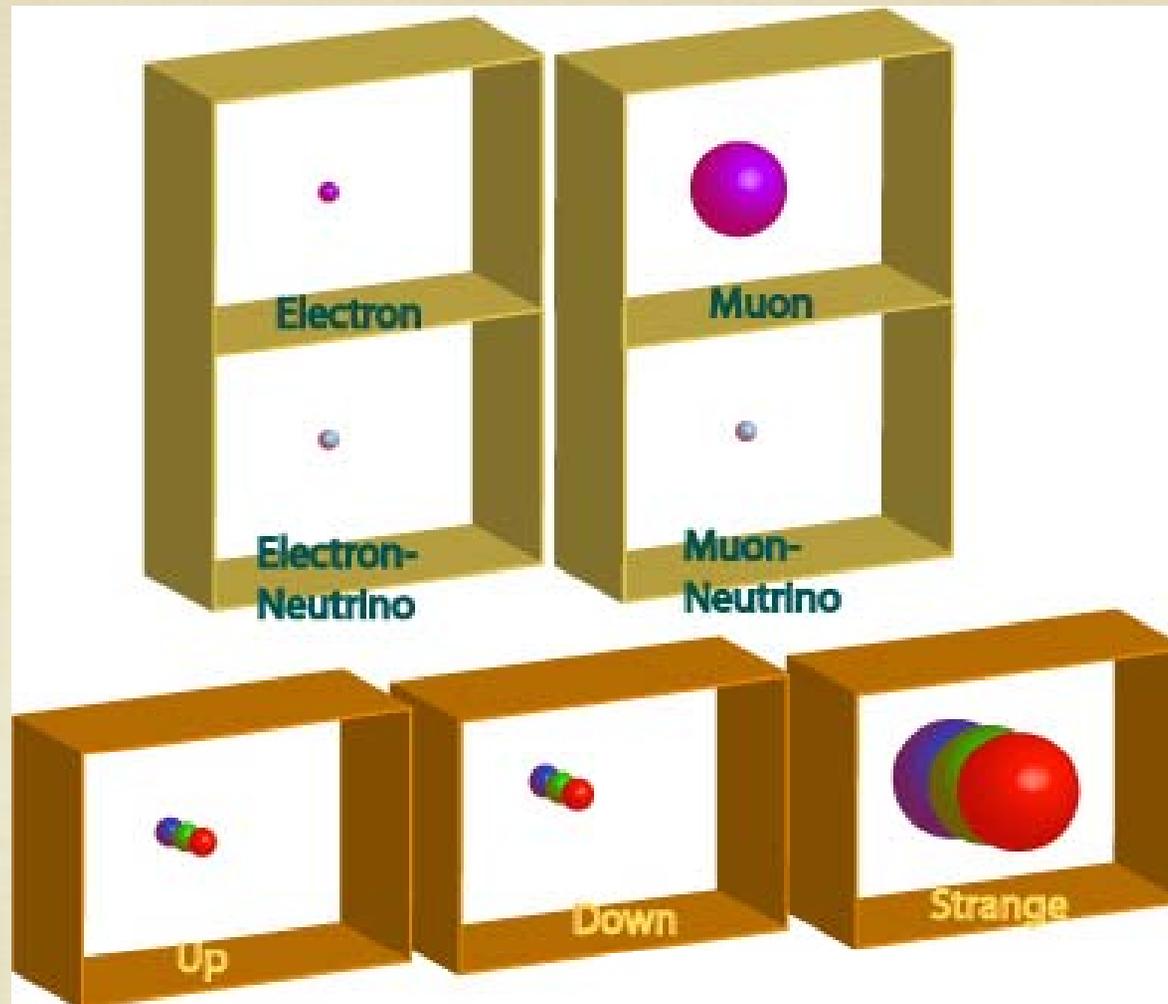
produziert  $\sim$  mit dem Abstand anwachsendes Potential

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

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

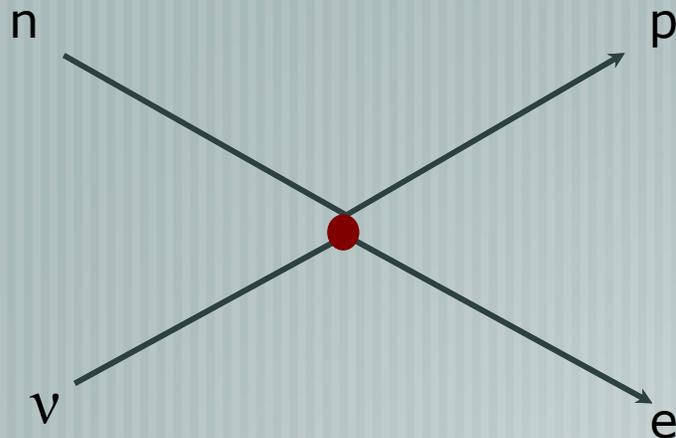
## Elektroschwache WW

1958 Glashow

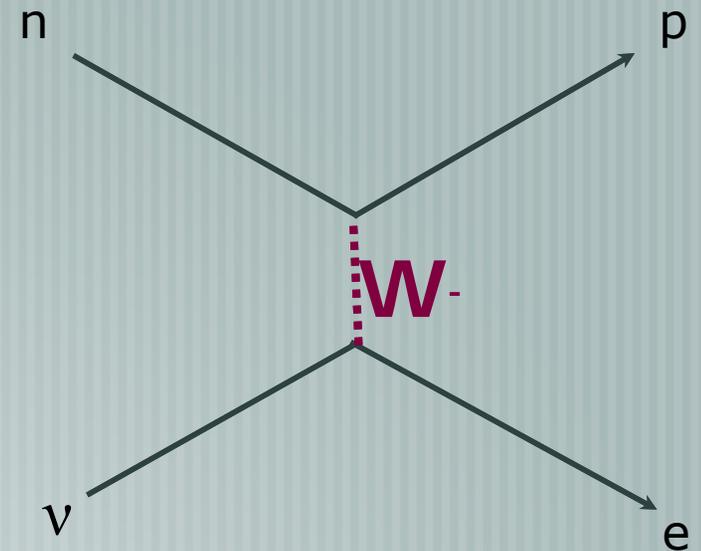
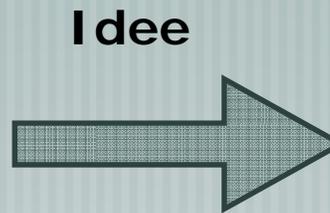
In den 50er gab es ein grosses (theoretisches) Problem

Neutrino-Proton Streuquerschnitt  $\sim (G_F E_\nu)^2$   
würde oberhalb 300 GeV die Unitarität verletzen\*  
(\*Wahrscheinlichkeit > 100%)

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



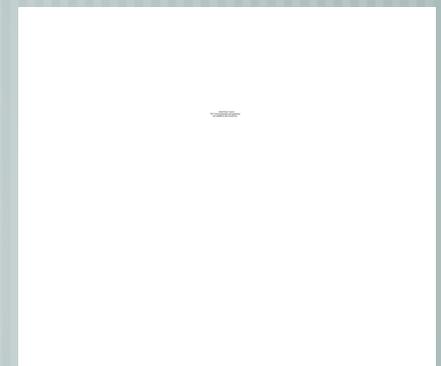
Fermi model



Glashow model

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

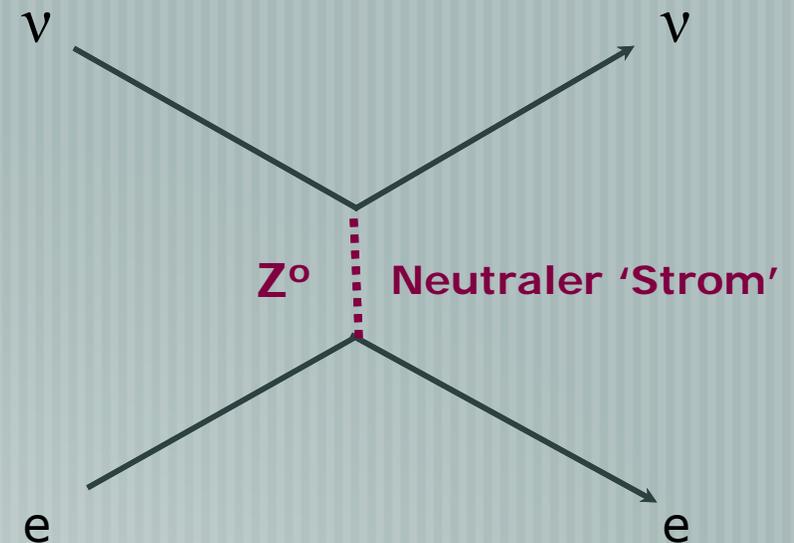
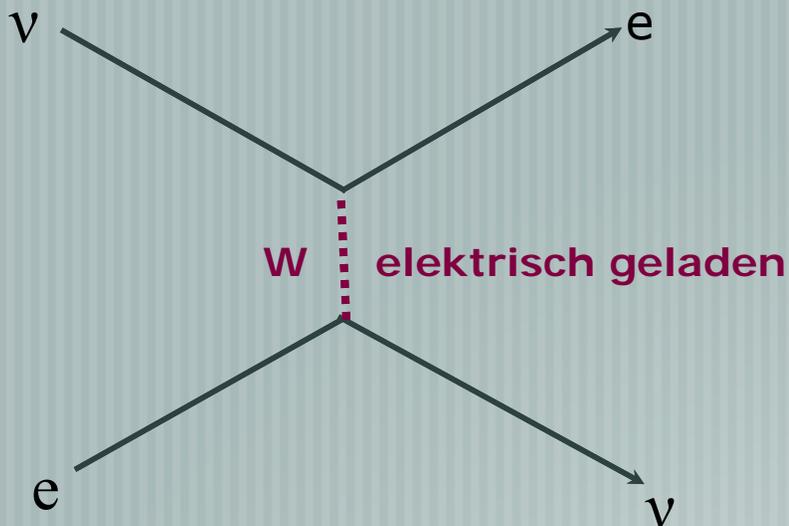
Die grosse Masse (80 GeV) würde die kurze  
Reichweite ( $2 \cdot 10^{-18}$  m) und den kleinen Streuquerschnitt  
erklären



# Felder

Elektroschwache WW

1968



Glashow, Salam, Weinberg (1968)

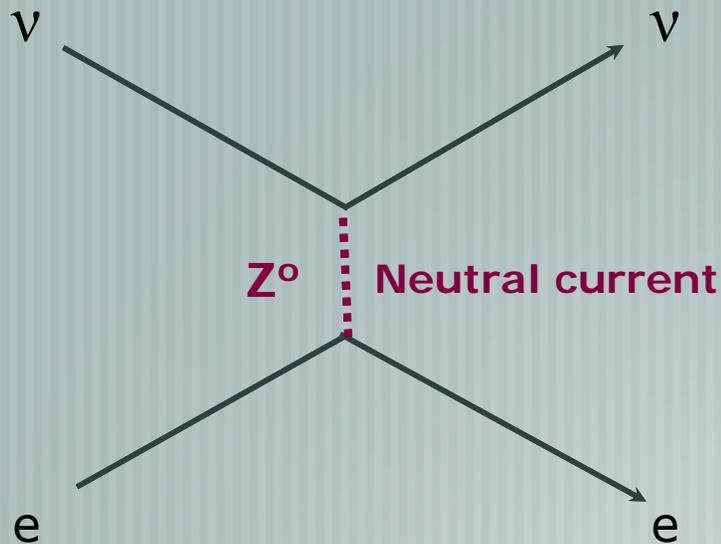
Vereinigung der schwachen und der elektromagnetischen Wechselwirkung

- 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)**

# Felder

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

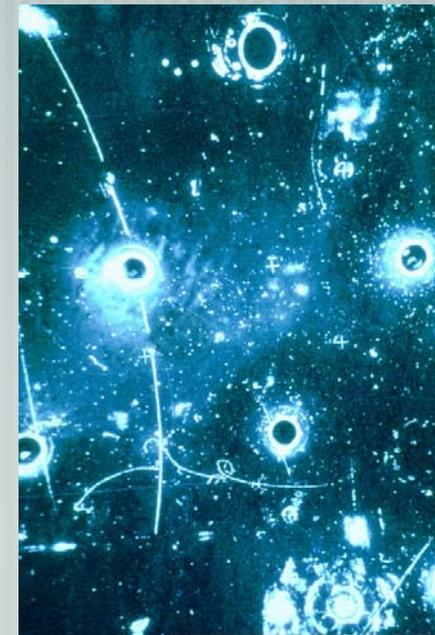
### OBSERVATION OF NEUTRINO-LIKE INTERACTIONS WITHOUT MUON OR ELECTRON IN THE GARGAMELLE NEUTRINO EXPERIMENT

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*

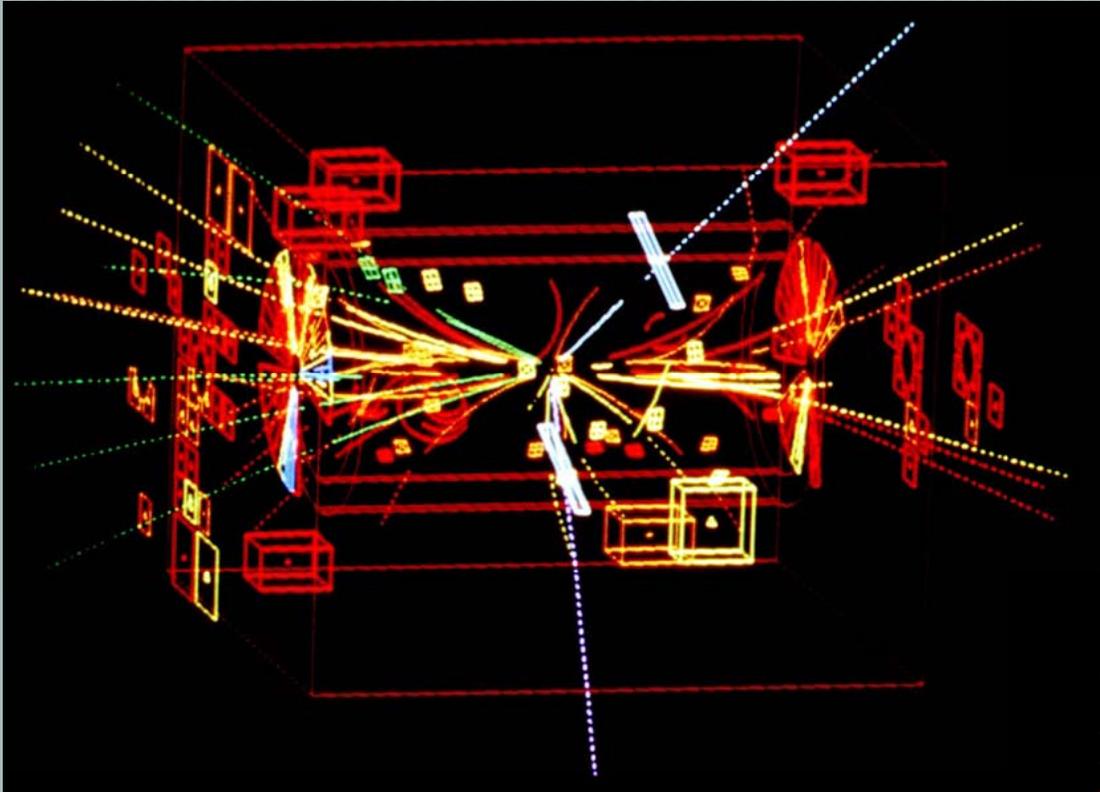
V. BRISSON, B. DEGRANGE, M. HAGUENAUER, L. KLUBERG,  
U. Nguyen-KHAC and P. PETIAU  
*Laboratoire de Physique Nucleaire des Hautes Energies, Ecole Polytechnique, Paris France*



# Fields

1983

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



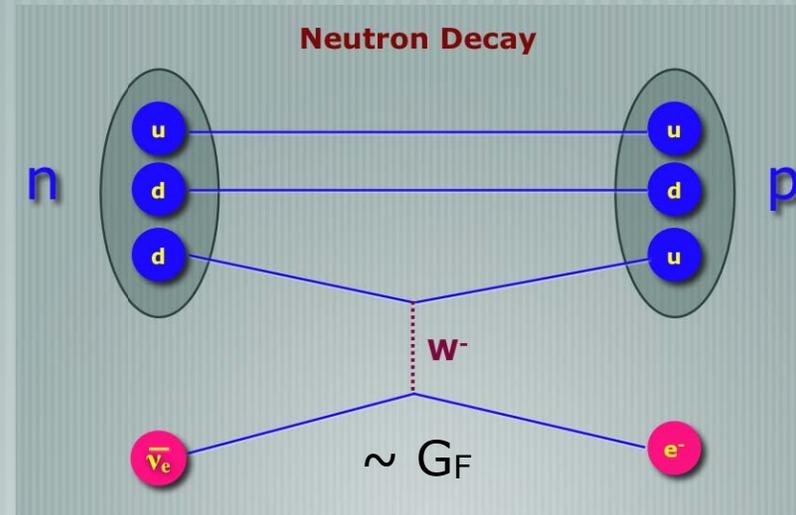
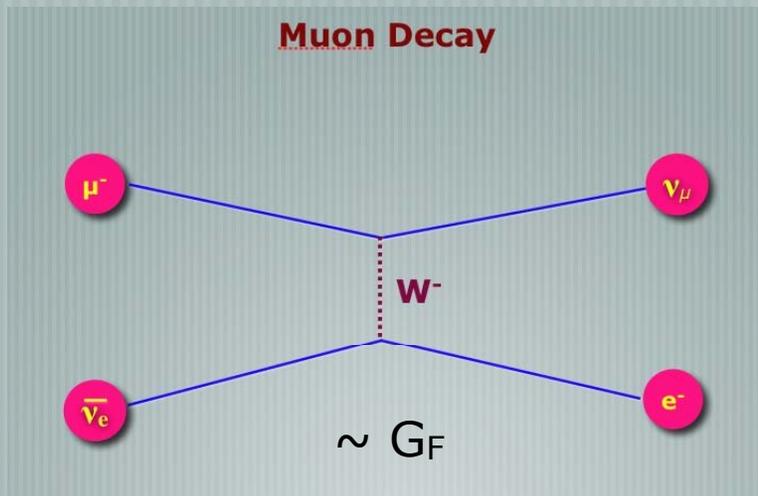
W Ereignis im UA-1 Detektor



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

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

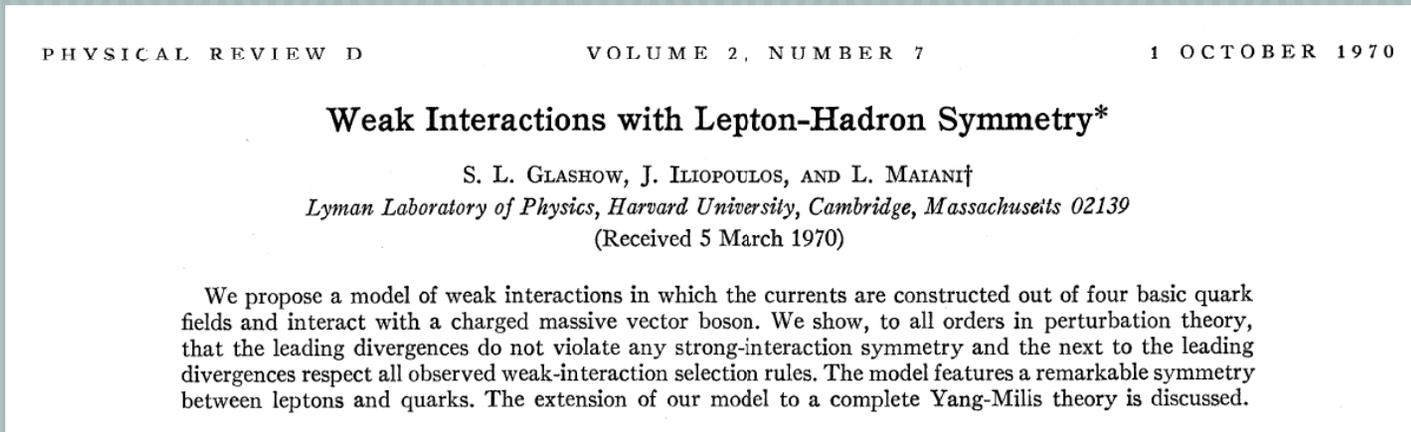
$$s' = -d \sin \theta_c + s \cos \theta_c$$

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

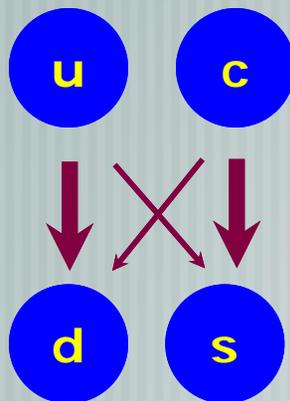
# Fields

1970

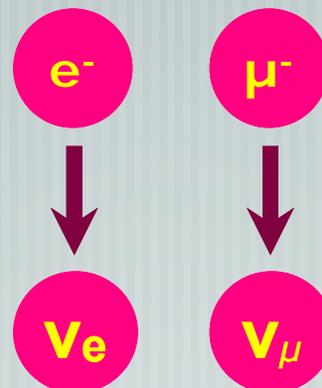
Eine der meistzitierten Publikationen (Glashow, Iliopoulos, Maiani)



Quarks



Leptons

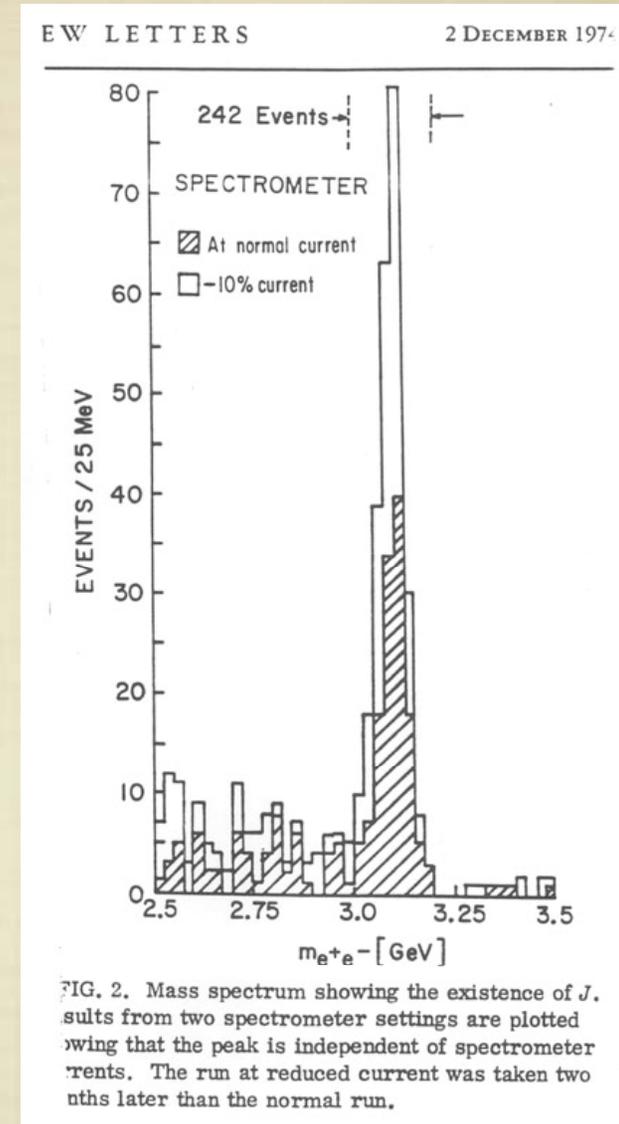
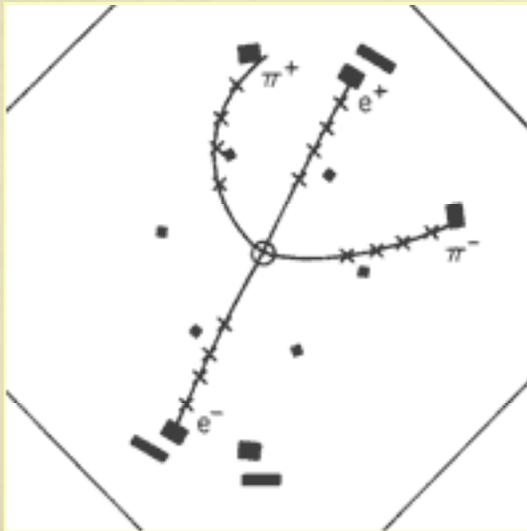


*Dies war das theoretische  
'Standard'-Modell des  
Jahres 1970 (mit zwei  
Familien)*

## 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.