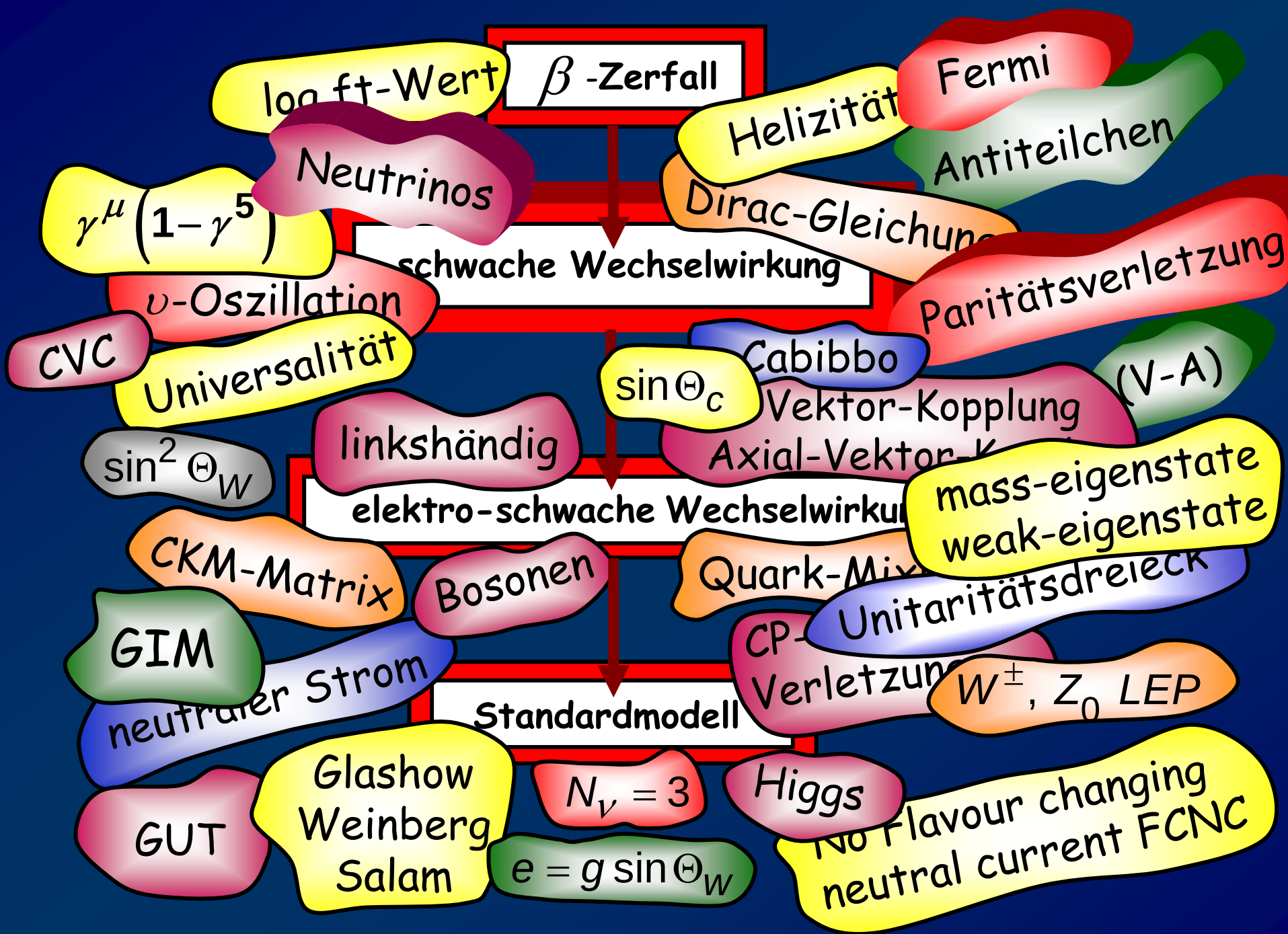




Geschichtlicher Abriss

1896

Henri Becquerel, P. Curie, M. Curie
Filmschwärzung durch Urankristalle

NP: 1903

NP: 1911 Chemie

Ra, Po

~1900

H. Becquerel, W. Kaufmann, E. Rutherford
elektrisch geladene β -Strahlen

NP: 1908 Chemie

1914

J. Chadwick (geb. 1891)

(Nobelpreis: 1935-Neutron)

● β -Zerfall ändert Kernladungszahl um 1: ${}_Z^A \rightarrow {}_{Z+1}^A$

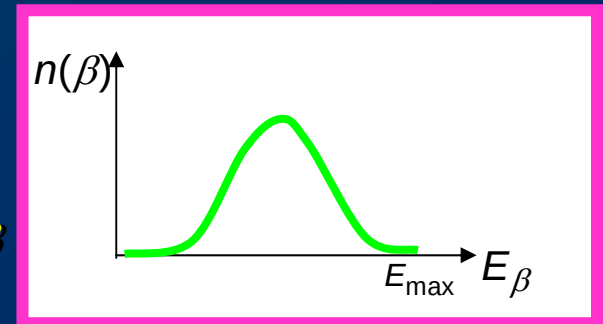
● β -Teilchen sind Elektronen

● β -Spektrum ist kontinuierlich

bis 1930

● wegen $M(A, Z) \rightarrow M(A, Z+1) + E_\beta$

→ Energiesatz ist verletzt !!



1928

P. Dirac

Nobelpreis: 1933 Dirac-Theorie

Dirac-Gleichung

31-jährig mit Schrödinger

negative Energie → Anti-Teilchen

Häresie

1930

W. Pauli

NP: 1946: Pauliprinzip

postuliert das ungeladene nicht beobachtbare Neutrino zur Rettung des Energiesatzes

(heute : $\lambda_{mfp} (1 \text{ MeV } \nu) \sim 10^3 \text{ ly}$)

$${}_Z A \rightarrow {}_{Z+1} A + \beta^- + \nu \quad E_0 = E_\beta + E_\nu$$

„Das kontinuierliche β -Spektrum würde verständlich, wenn man annimmt, daß...“

1934

E. Fermi

NP 1938: künstliche radioaktive Elemente

Formulierung des β -Zerfalls in Anlehnung an die Strom-Strom-WW der E-Dynamik

$$H_W = \frac{G}{\sqrt{2}} \frac{1}{c^2} \int J_W(\vec{x}) \cdot J_W^+(\vec{x}') f(|\vec{x} - \vec{x}'|) d^3x d^3x'$$

1934

F. Joliot, I. Curie

NP: 1935 Chemie

Entdeckung des β -Zerfalls „Anti-Teilchen“ !!

1956

T. D. Lee, C. N. Yang

NP: 1957

Diskussion einer Paritätsverletzung

Beobachtung:

$${}^{\prime\prime}\tau^{+}{}^{\prime\prime} \rightarrow \pi^{+}\pi^{+}\pi^{-}$$

$${}^{\prime\prime}\varrho^{+}{}^{\prime\prime} \rightarrow \pi^{+}\pi^{0}$$

$$m(\tau^{+}) = m(\varrho^{+})$$

heute:

$$\tau^{+} = \varrho^{+} = K^{+}$$

1957

C. S. Wu

Paritätsverletzung beim β -Zerfall (^{60}Co) zunächst Untergang der Fermi-Theorie, dann Rettung der Fermi-Theorie:

Wechselwirkung wird erweitert durch axiale Kopplung:

$$\text{Fermi} \longrightarrow (V - A) \sim \gamma^\mu (1 - \gamma^5)$$

1958

M. Goldhaber et al.



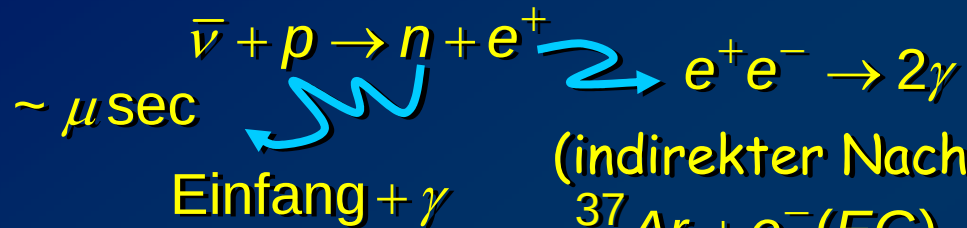
Bestimmung der „Helizität“ des Neutrinos

*Neutrinos
sind also
linkshändig!*

1959

F. Reines, C. L. Cowan

Entdeckung des Neutrinos (Reaktor- ν 's)



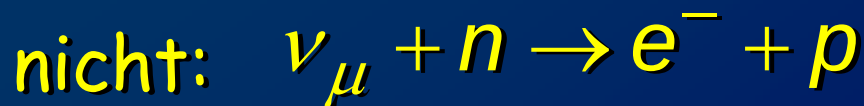
(indirekter Nachweis über Rückstoß bei
 $^{37}\text{Ar} + e^- (\text{EC}) \rightarrow ^{37}\text{Cl} + \nu + 0,8 \text{ MeV}$
 1952, G. Rodeback, J. S. Allen)

1962

L. Ledermann, J. Steinberger, M. Schwarz

NP: 1988

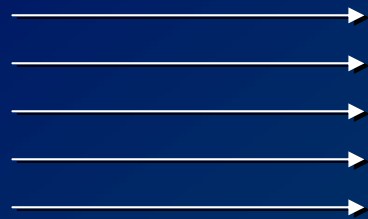
Entdeckung des Myon-Neutrinos, Brookhaven



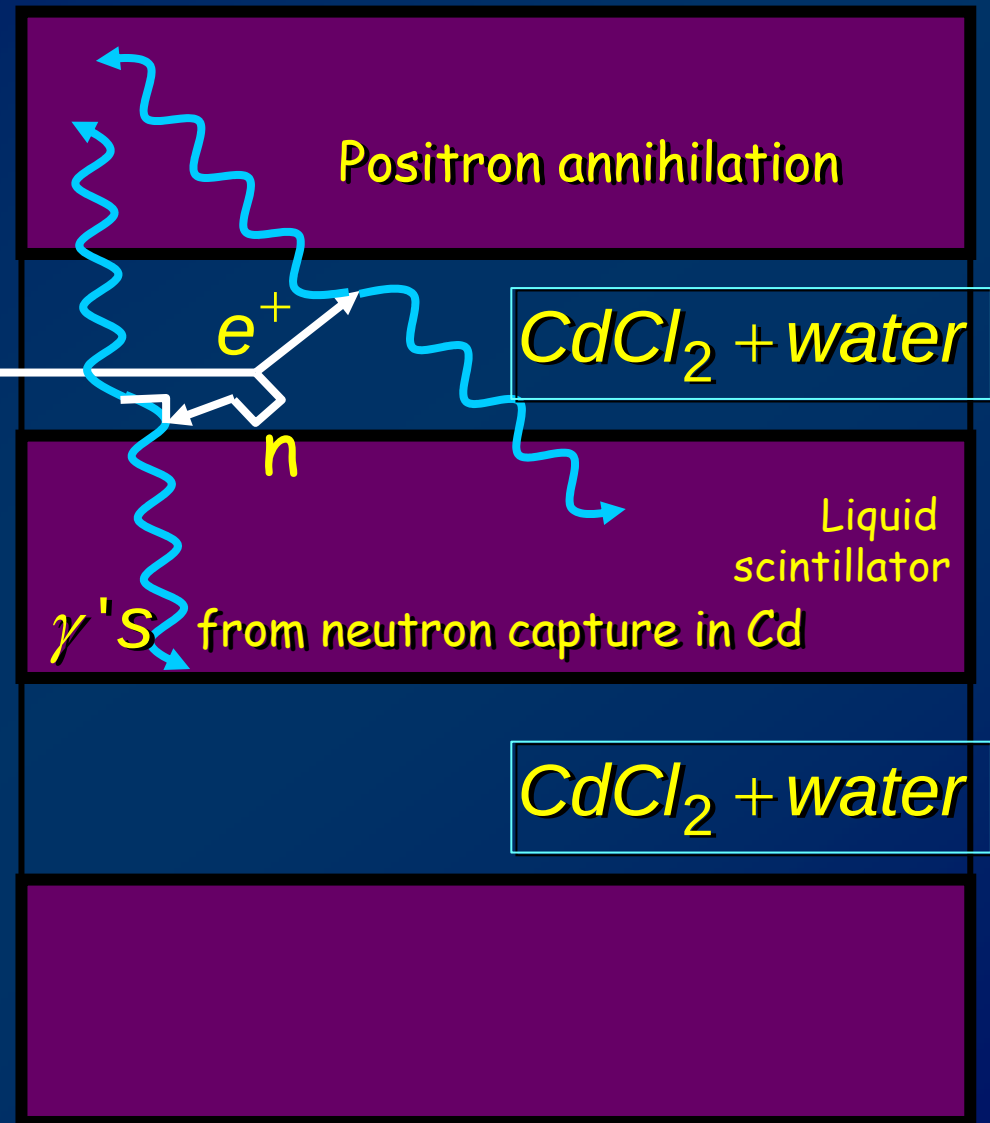
Leptonenzahl-verletzt

Reines & Cowan 1959

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$$



$\bar{\nu}$ – beam
from reactor



Schematic diagram of the experiment by Reines and Cowan (1959), detecting the interactions of free antineutrinos from a reactor.

1963

N. Cabibbo

Vor-Quark-Zeitalter

Erste Formulierung der Universalität
(d.h. schwache W.W. ist innerhalb jeder
Familie (Generation) dieselbe.

heute:

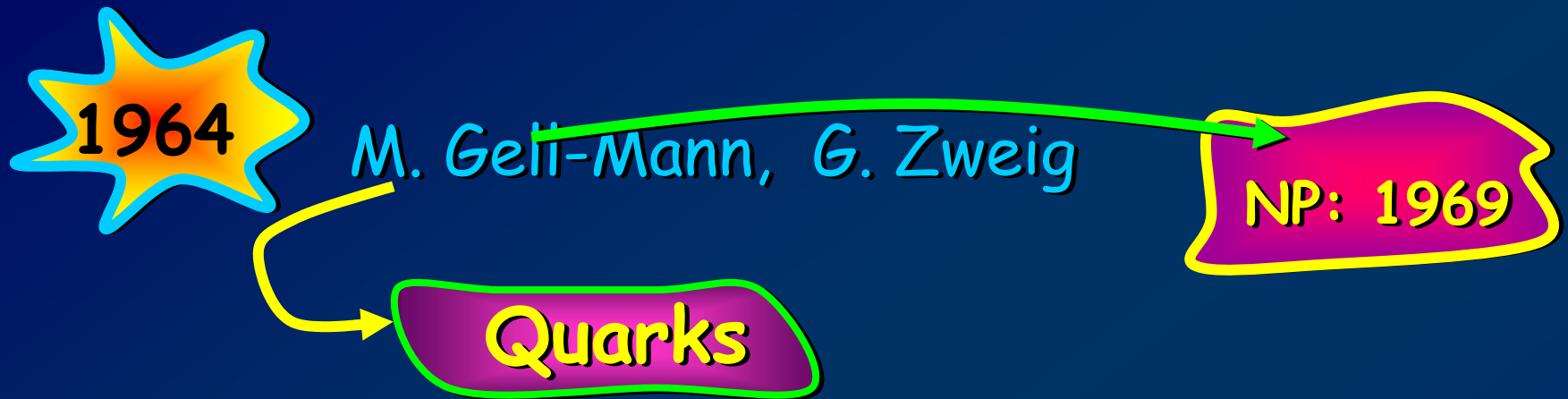
$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \Theta_C & \sin \Theta_C \\ \sin \Theta_C & \cos \Theta_C \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \end{pmatrix}$$

allgemein: $\left. \begin{aligned} \vec{u}' &= u \\ \vec{d}' &= V_{CKM} \vec{d} \end{aligned} \right\} \text{Eigenzustände} \\ \text{der schwachen W.W.}$

$$\vec{u} = (u, c, t)$$

$$\vec{d} = (d, s, b)$$

V_{CKM} ist unitäre 3x3 Matrix (Cabibbo-Kobayashi-Maskawa),
die die Eigenzustände der starken WW auf die der schwachen
WW transformiert (Dreh-Matrix !!)



Auch: erster Hinweis auf die Baryon-Antibaryon-Asymmetrie im Universum

1967-68

S. L. Glashow, S. Weinberg, A. Salam

NP: 1979

Vereinheitlichung der schwachen & elektromagnetischen W.W.

→ Standardmodell

∃ 3 Bosonen: W^+, Z^0, W^- $M = 81, 91, 81 \text{ GeV}$

∃ neutrale Ströme, die in der Fermi-Theorie
NICHT! enthalten sind

Beispiel:

$$NC: \nu_\mu + e^- \rightarrow \nu_\mu + e^-$$

$$CC: \bar{\nu}_\mu + p \rightarrow \mu^+ + n$$

1970

Glashow, Iliopolus, Maiani

G

I

M

charm-Quark wird gefordert zur Erklärung der geringen
Zerfallsstärke von:

$$BR (K_L^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) \sim 9 \cdot 10^{-9}$$

$$BR (K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) \sim 10^{-10}$$

1973

Gargamelle - Kollaboration, CERN

experimenteller Nachweis des neutralen Stroms

$$\nu_\mu + h_{\text{adron}} \longrightarrow \nu_\mu' + X \cdot h_{\text{adron}} \qquad \nu_\mu + e^- \longrightarrow \nu_\mu' + e^{-'}$$

1974

S. Ting, J.B. Richter

NP: ~1976

Entdeckung des „charm“

SLAC (Stanford): Ψ (e^+, e^- – *Spear* – *Ring*)

Brookhaven AGS: J ($p + \text{Be} \rightarrow J + \dots$)

heute:

J/ψ

$c\bar{c}$ – charmonium

Breite: 63 keV

Masse: 3.097 GeV

Gargamelle 1977

P. Musset and J.P. Vialle,
Neutrino Physics with
Gargamelle

ELECTRON-NEUTRINO REACTION

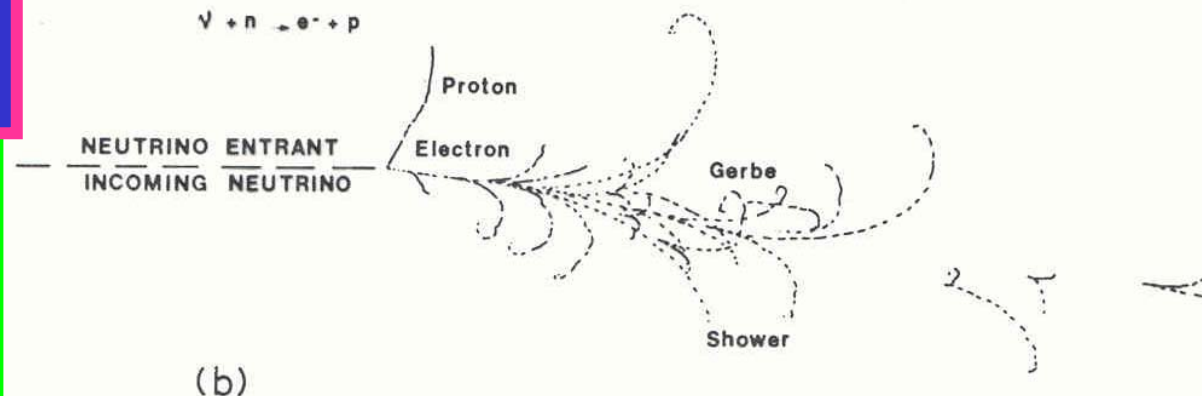
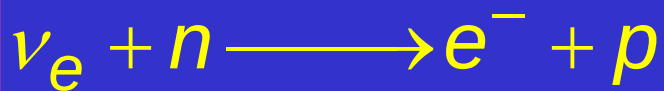
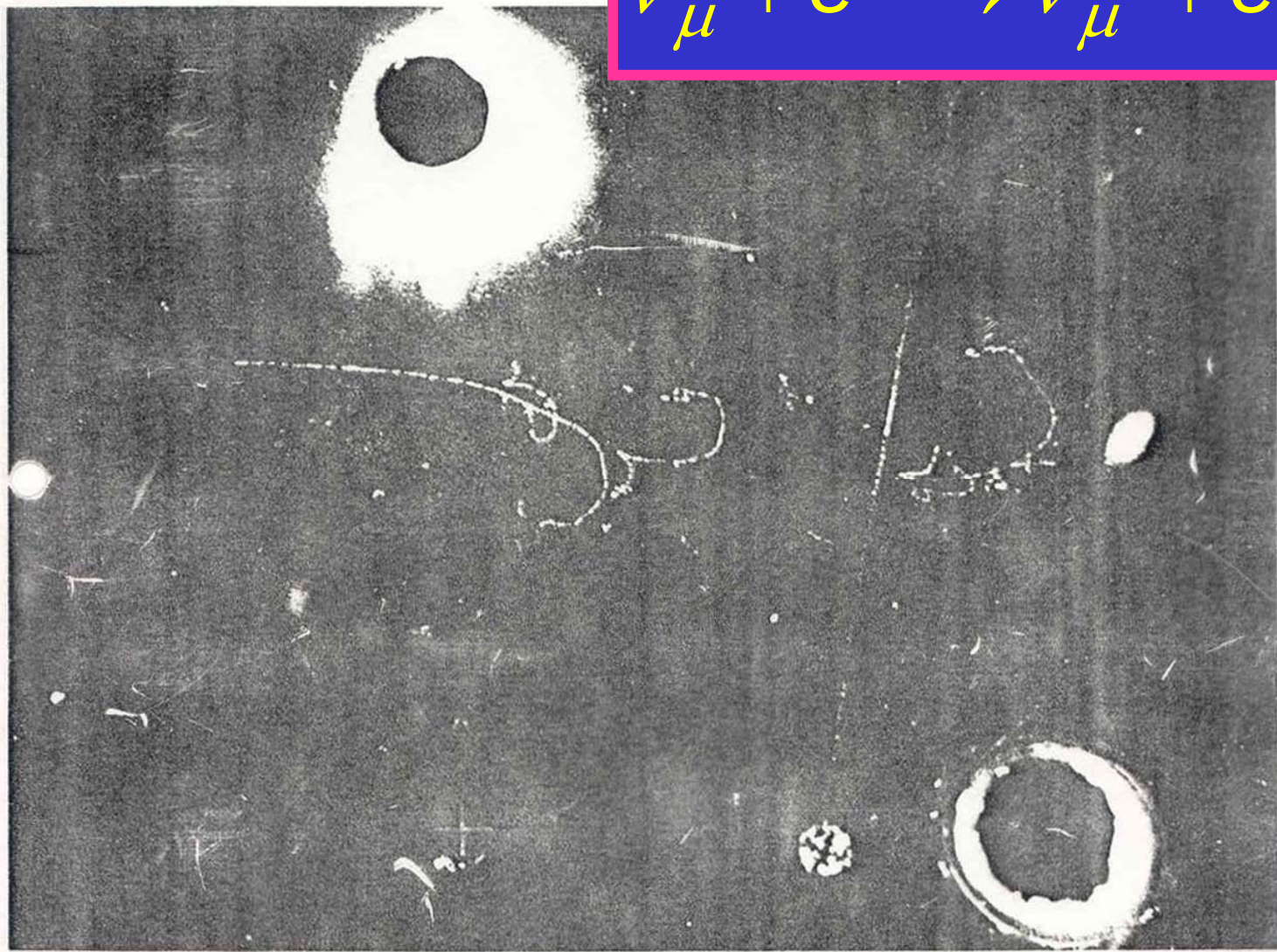


Fig. 2-12. An electronic neutrino (ν_e) interaction $\nu_e + n \rightarrow e^- + p$.

publ. 1977 erstes „neutrale-Strom“ - Ereignis

Gargamelle - B.C.

$$\nu_{\mu} + e^{-} \rightarrow \nu_{\mu}' + e^{-}$$



A candidate for the reaction $\bar{\nu}_{\mu} + e^{-} \rightarrow \bar{\nu}_{\mu} + e^{-}$

1975

M. Perl (Stanford)

Entdeckung des τ -Leptons

$$e^+ + e^- \rightarrow \tau^+ + \tau^-$$

$$\begin{array}{l} \searrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu + \nu_\tau \\ \searrow e^+ + \nu_e + \nu_\tau \end{array}$$

NP: 1995

tau – charm
–factory
 $\sim 10^8 / y$

24 events dieser
Art beobachtet

heute:

$$m(\tau) = 1,784 \text{ GeV}$$

$$\tau_\tau = 3,14 \cdot 10^{-13} \text{ sec}$$

$$(\gamma c \cdot \tau_\tau \sim 94 \mu m)$$

$$BR(\tau \rightarrow \mu \nu \bar{\nu}) = 17,5\%$$

$$BR(\tau \rightarrow e \nu \bar{\nu}) = 17,9\%$$

1977

S. W. Herb et al. (Fermilab)

Entdeckung des „b“-quarks durch Erzeugung von $(b\bar{b})$ -Bottonium

hier:

Υ und Υ'

1978

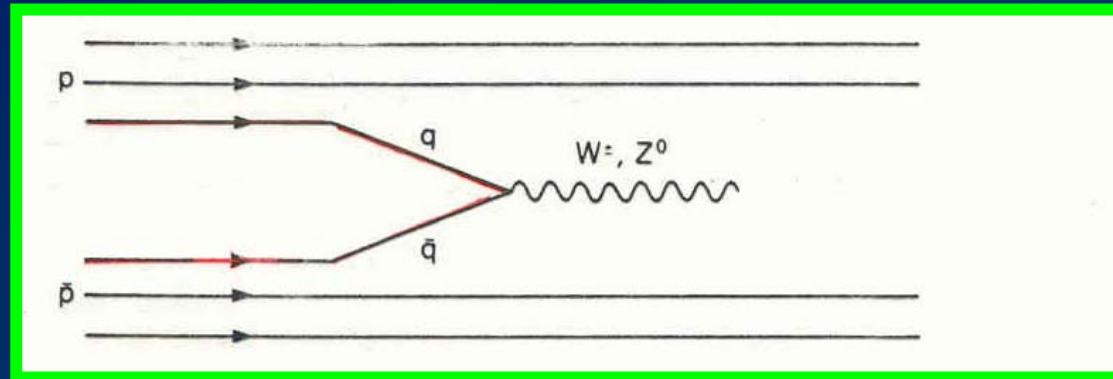
Bestätigung und Entdeckung weiterer $(b\bar{b})$ -Zustände Υ'', Υ'''
am DORIS-Ring (Hamburg)
Bestimmung der Massen und Breiten

1983

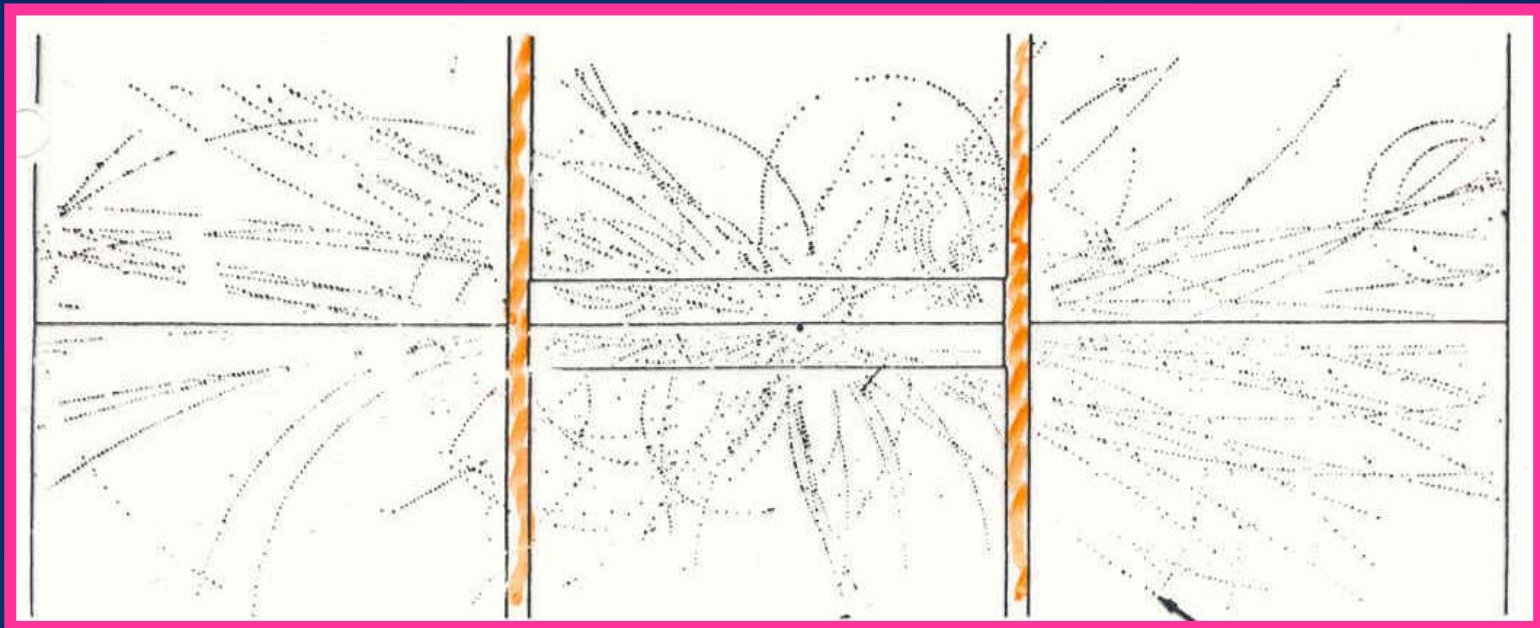
C. Rubbia

NP: 1984

Entdeckung des W-Bosons am $Spp\bar{S}$ -Collider (UA1-Kollab.) 43 events !



W or Z formation in $p\bar{p}$ collisions via the Drell-Yan mechanism.

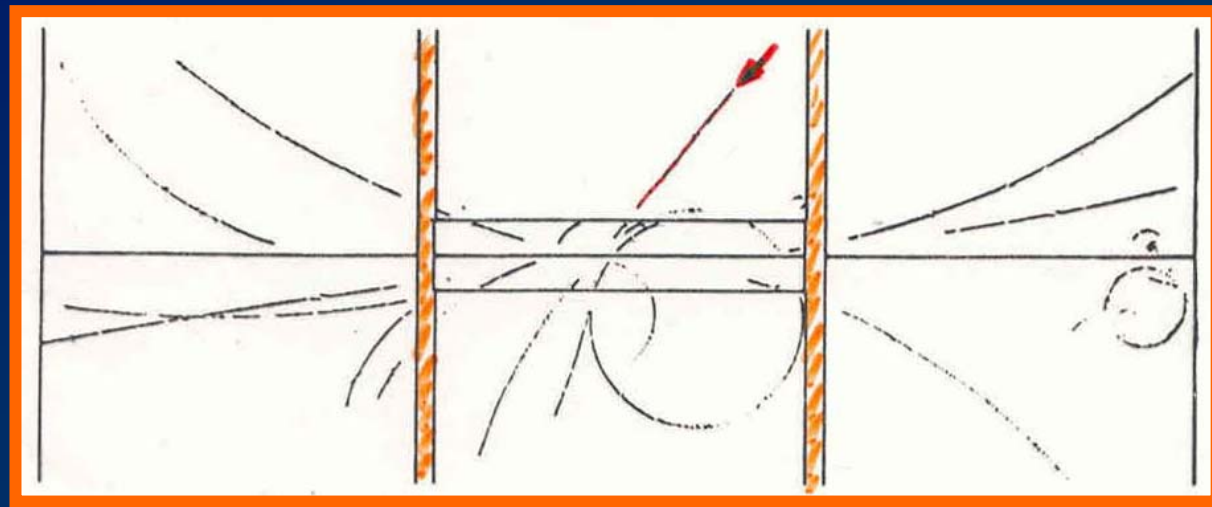


$p\bar{p}$ event in the UA1 detector at CERN showing the typical high multiplicity.

W - Kandidat

A W candidate-event from the UA1 detector. The arrow shows the isolated high- p_T , identified electron.

$$W \longrightarrow e + \nu$$



Verteilung der transversalen Masse

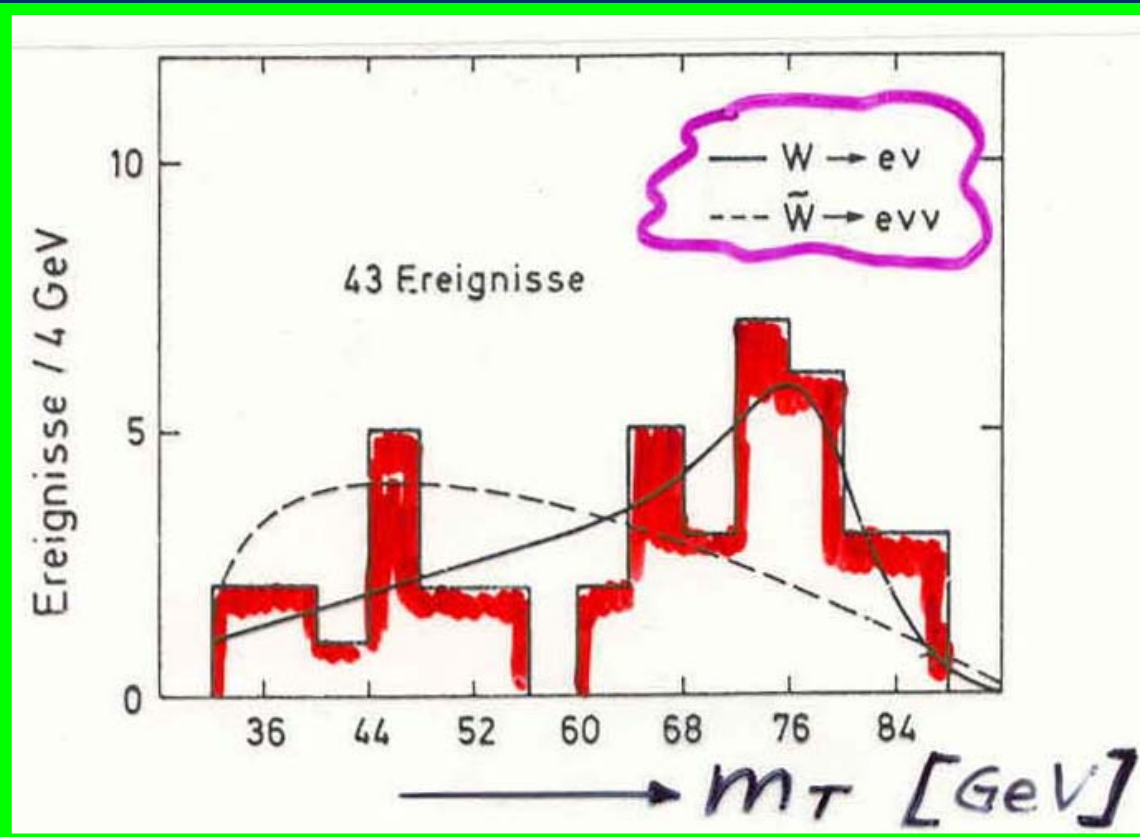
$$m_T = (2(|p_T^e| |p_T^\nu| - p_T^e \cdot p_T^\nu))^{1/2}$$

des Elektron

-Neutrino-Paares vom W-Zerfall.

Die volle Kurve ist die theoretische Erwartung mit einer angepaßten W-Masse $m_W = 80,3 \text{ GeV}$.

Die gestrichelte Kurve zeigt zum Vergleich die theoretische Erwartung für die Produktion eines hypothetischen Teilchens $\tilde{W}$, das einen 3-Körper-Zerfall erleidet



1983-84

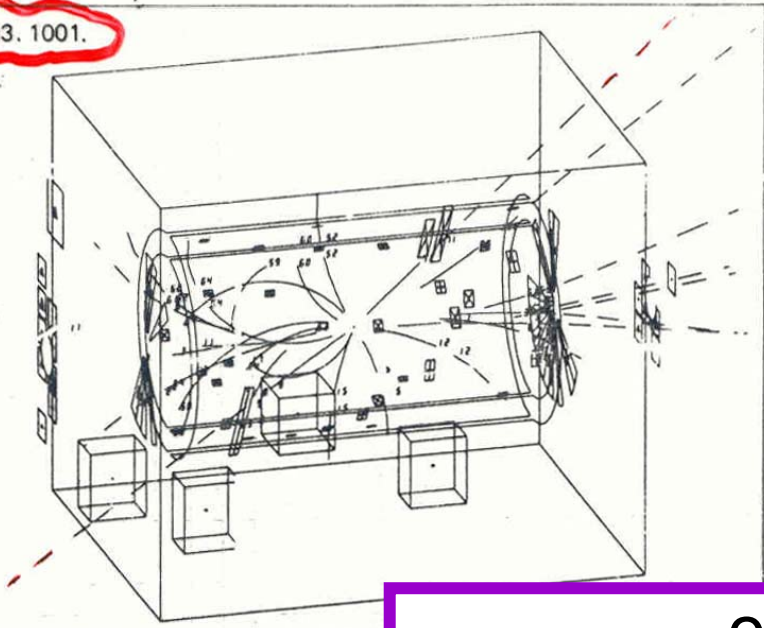
Entdeckung des Z^0 -Bosons (UA2)

Anschließend Bau des LEP mit
 e^+ (50 GeV) + e^- (50 GeV)

bis 1992

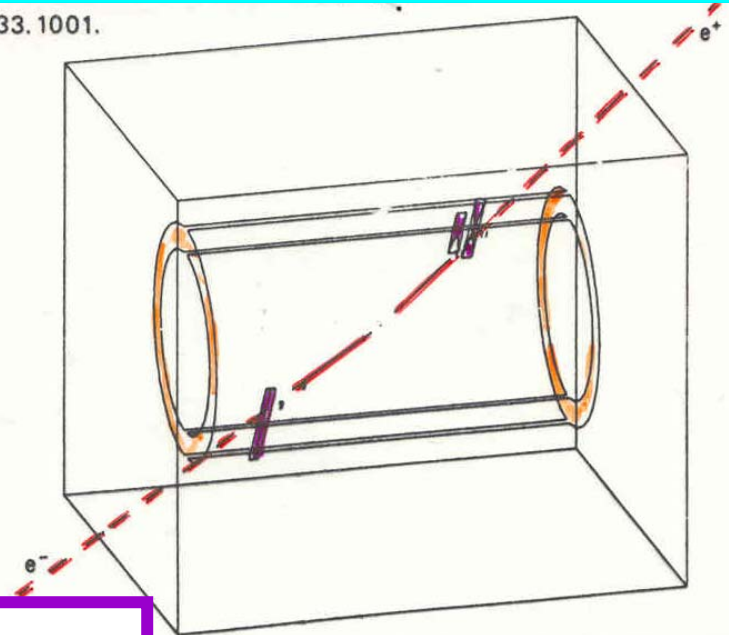
Nach $\sim 3 \cdot 10^6$ Z^0 Etablierung des Standard-Modells der
„elektro-schwachen Wechselwirkung“

Event 7433. 1001.



Event 7433. 1001.

(b)

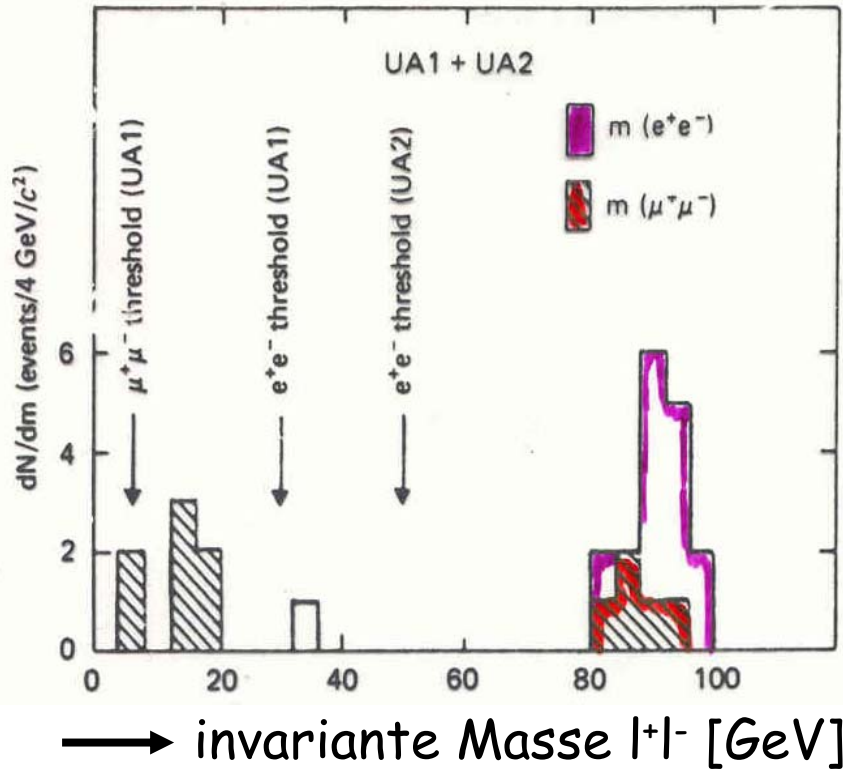
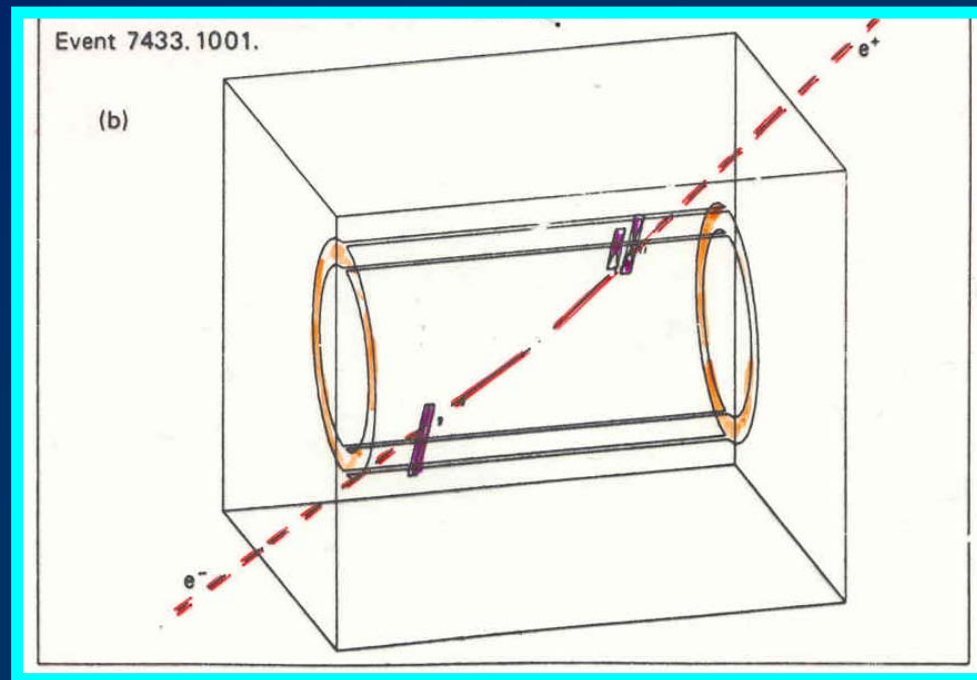


event $Z^0 \rightarrow e^+ e^-$

An e^+e^- , Z^0 event from UA1. (a) shows all reconstructed vertex associated tracks while (b) shows the same event but including only tracks with $p_T > 2$ GeV/c and calorimeter hits with $E_T > 2$ GeV. Only the e^+e^- pair survives the cuts.

Z_0 -event
7433.1001

$E_T\text{-cut} > 2 \text{ GeV}$



heute:

$$M_{Z^0} = 91,181 \text{ GeV}$$

Mass distribution for e^+e^- and $\mu^+\mu^-$ events from the UA1 and UA2 experiments at the CERN pp collider showing the Z^0 peak.



1998

Super-Kamioka-NDE



R. Davis, M. Koshiba (SK), R. Giacconi



NP: 2002

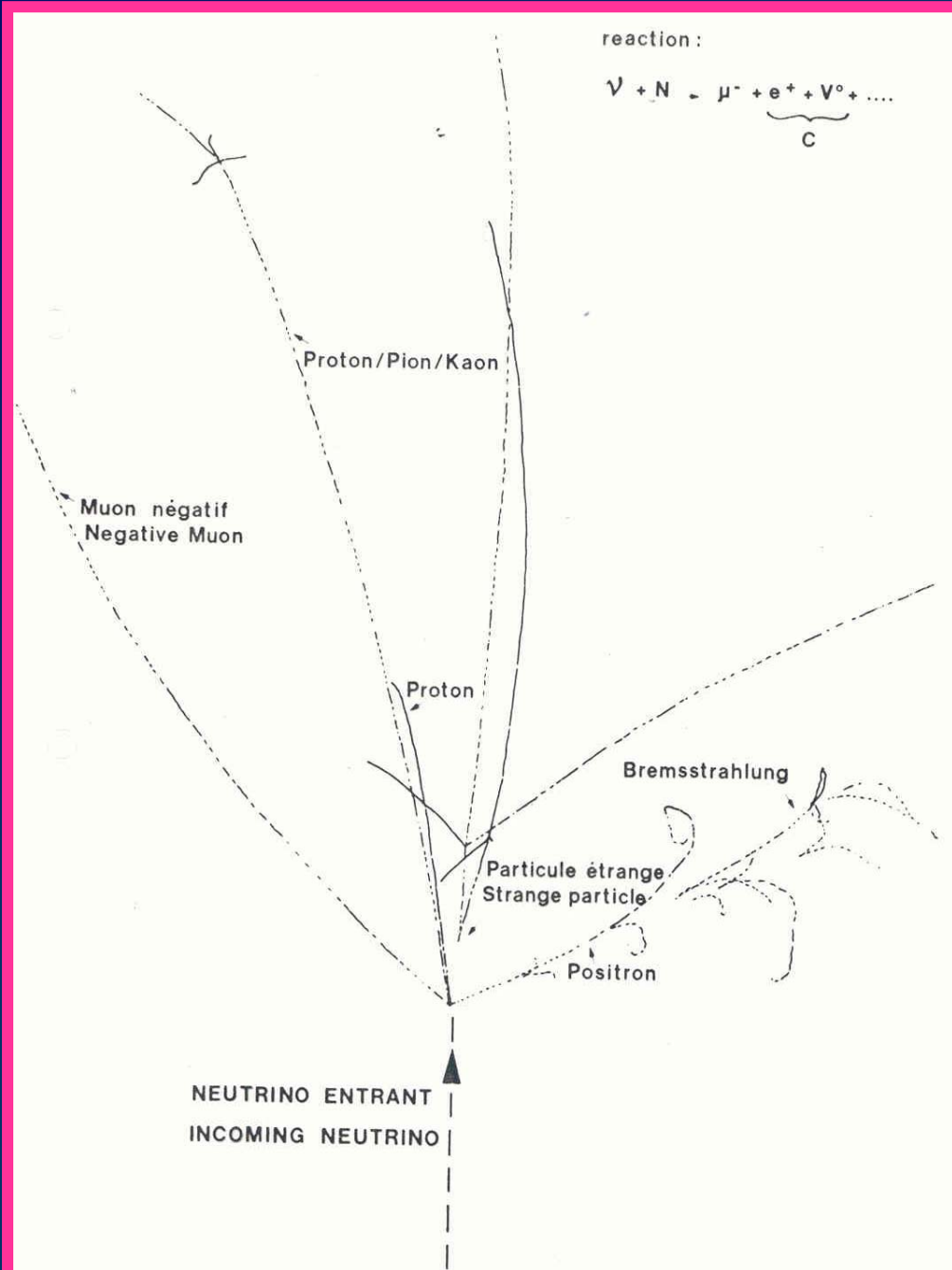
Neutrinos sind massive Teilchen

$$|\Delta m(\nu)_{\mu\tau}|^2 \sim 2.5 \times 10^{-2} \text{ eV}$$

„Charme“

P. Musset and J.P. Vialle,
Neutrino Physics with
Gargamelle





„CHARME“

Bitte beschäftigen Sie sich mit folgenden Begriffen aus dem Gebiet „Schwache Wechselwirkung“:

- 1) Universalität
- 2) Helizität eines Teilchens und Helizitätsunterdrückung
- 3) Cabibbo-Winkel
- 4) Neutraler Strom / geladener Strom (mit Beispielen)
- 5) Antiteilchen
- 6) Leptonenzahl
- 7) Flavour-ändernde neutrale Ströme (wie sähen möglich Zerfälle aus)
- 8) Entdeckung des tau-Leptons - was war die Idee?
- 9) Messung der Polarisation einer γ -Strahlung (Goldhaber-Experiment)