

Die Entdeckung der neutralen Ströme  
&  
Die Entdeckung der W- und Z-Bosonen

Sabine Blatt

Betreuer: Prof. Dr. J. Mnich

28. Januar 2003

# Inhalt

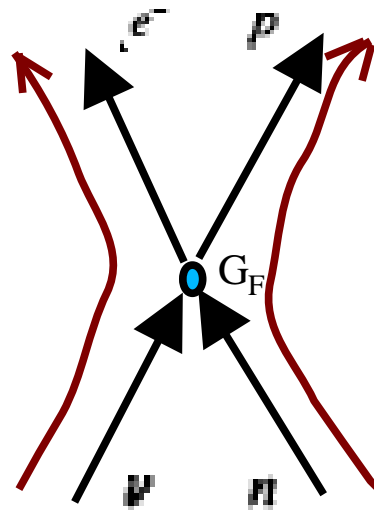
## I. Theorie der schwachen Wechselwirkung

- Fermis Strom-Strom-Theorie
- geladene Ströme
- neutrale Ströme
- die elektroschwache Vereinheitlichung

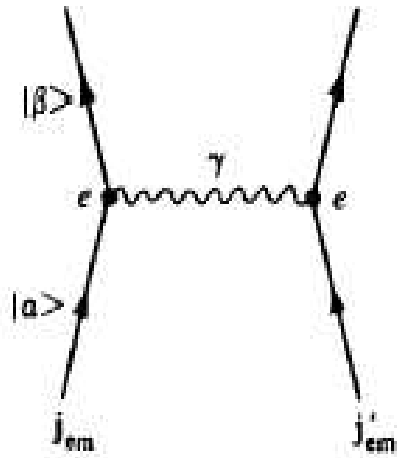
## II. Nachweis der neutralen Ströme

## III. Nachweis der W- und Z-Bosonen

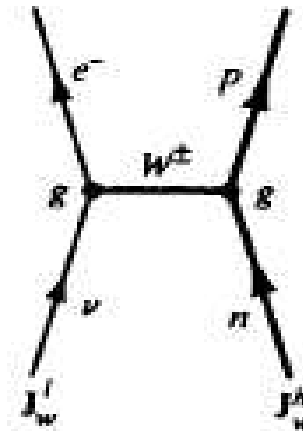
# Theorie der schwachen WW: Fermis Theorie



4-Teilchen-WW



Elektromagnetische WW



Schwache WW mit Austausch-  
teilchen

# Theorie der schwachen WW: Fermis Theorie

- Strom-Strom-Theorie
- punktförmige 4-Teilchen-WW
- Näherung für geringe Energien

Die Stärke der WW wird durch die Fermikonstante  $G_F$  beschrieben:  $G_F \approx 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$ .

Der Wirkungsquerschnitt der Neutrinostreuung ergibt sich zu:  $\sigma (v_\mu + e^- \rightarrow v_e + \mu^-) \sim G_F^2 \cdot s$ .

“Problem”: - Kopplungskonstante sollte dimensionslos sein  
- Wirkungsquerschnitt für hohe Energien unphysikalisch, korrekt wäre:  $\sigma \sim 1/s$ .

# Theorie der schwachen WW: Fermis Theorie

Diese “Probleme” werden durch die **Einführung schwerer Austauschteilchen**, der Vektorbosonen behoben.

Theorie liefert erste Vorhersage für Reichweite der WW und damit Masse der Austauschteilchen:

aus  $G_F \sim 1/m_W^2$  folgt  $m_W \sim 10^2 \text{ GeV}/c^2$ .

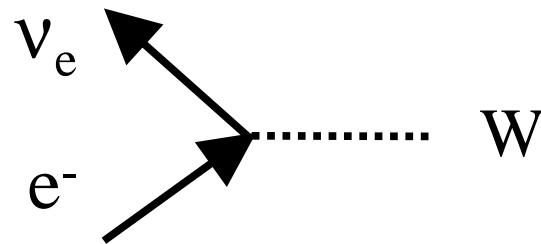
Genauere Rechnung liefert:  $m_W \approx 80 \text{ GeV}$ .

Statt durch  $G_F$  wird die WW durch die **schwache Kopplungsstärke  $g$**  bestimmt, die in derselben Größenordnung wie  $e$  liegt.

$\Rightarrow$  Die schwache WW ist nur bei kleinen Energien schwach!

# Theorie der schwachen WW: geladene Ströme

## Geladene Ströme – Klassifizierung



•Leptonische Prozesse, z.B. Myon-Zerfall:



•Semileptonische Prozesse, z.B.  $\beta$ -Zerfall:



•Hadronische Prozesse, z.B. Kaon-Zerfall:



# Theorie der schwachen WW: geladene Ströme

Die schwache WW von Leptonen

- Leptonfamilien:

$$\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \tau \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$$

- In einer Familie ist Übergang von Lepton zu Lepton-neutrino durch **Austausch von W-Bosonen** möglich.
- Die schwache WW koppelt an alle drei Familien mit gleicher Stärke: „**Universalität der schwachen WW**“.

# Theorie der schwachen WW: geladene Ströme

Die schwache WW von Quarks:

- Die Kopplung der W-Bosonen an die Quarkfamilien (u,d), (c,s) und (t,b) ist nicht gleich stark.
- Durch die Einführung von **Mischzuständen**  $d'$ ,  $s'$  und  $b'$  kann die Universalität der schwachen WW gewahrt werden:

$$\begin{pmatrix} |d'\rangle \\ |s'\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_c & \sin\theta_c \\ -\sin\theta_c & \cos\theta_c \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} |d\rangle \\ |s\rangle \end{pmatrix}$$

- Mit der dritten Quarkfamilie erhält man die Cabibbo-Kobayashi-Maskawa-Matrix, daher auch der Name „**CKM-Mischung**“.

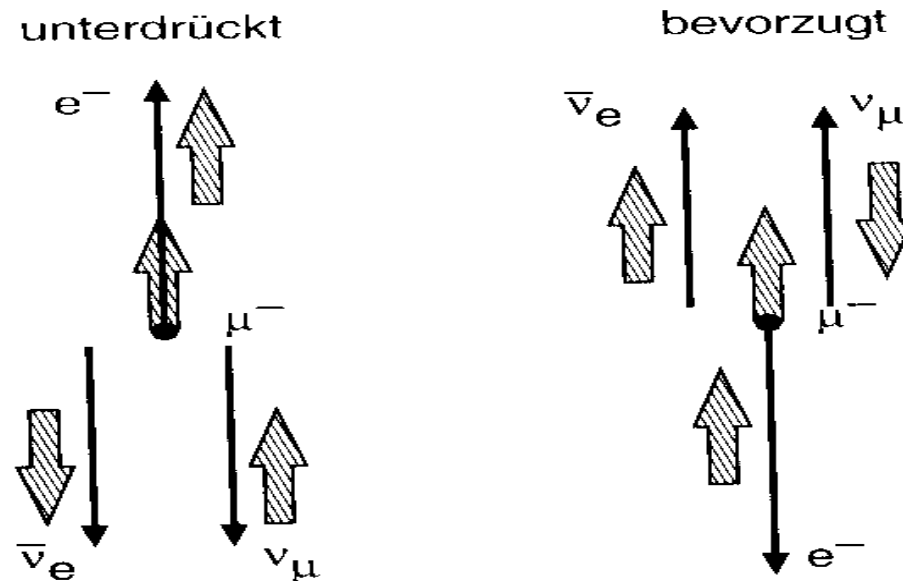


# Theorie der schwachen WW: geladene Ströme

Paritätsverletzung:

Die schwache WW ist **maximal paritätsverletzend**, d.h. die W-Bosonen koppeln nur an linkshändige Fermionen und rechthändige Antifermionen.

Dies wurde experimentell z.B. beim Myon-Zerfall bestätigt:



# Theorie der schwachen WW: neutrale Ströme

1967 postulierten Weinberg, Salam und Glashow die Existenz eines neutralen Austauschteilchens: das  $Z^0$ .

Es sollten u.a. elastische Neutrino-Streungen möglich sein:

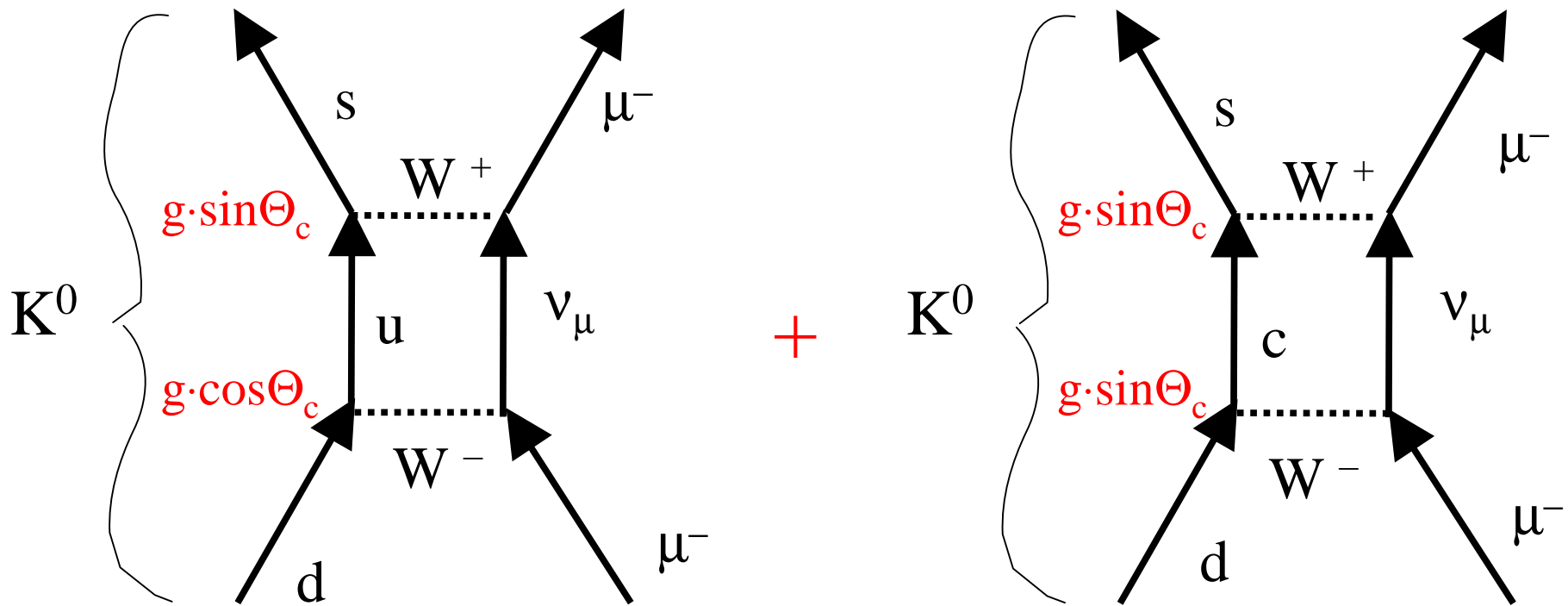
$$\nu_{\mu} + e^{-} \rightarrow \nu_{\mu} + e^{-}$$

Diese Theorie konnte zunächst nicht überzeugen, da noch keine neutralen Ströme beobachtet worden waren.

Ein Problem bei der Akzeptanz der neutralen Ströme war der Zerfall  $K^0 \rightarrow \mu^+ + \mu^-$ , der mittels neutraler Ströme möglich sein müßte, allerdings in der Praxis unterdrückt ist.

# Theorie der schwachen WW: neutrale Ströme

1970 erklärten Glashow, Iliopoulos und Maiani das Fehlen des  $K^0$ -Zerfalls mit der CKM-Mischung (GIM-Theorie).



Der Übergang  $K^0 \left\{ \begin{array}{l} s \\ d \end{array} \right. \rightarrow Z^0$  ist verboten.

# Die elektroschwache Vereinheitlichung

In der GWS-Theorie wird der **schwache Isospin T** eingeführt. Man erhält ein Isospintriplett ( $W^-$ ,  $W^0$ ,  $W^+$ ) und einen Singulettzustand  $B^0$ .

Die **schwache Ladung** des Singulettzustands ist  $g'$ .

Die bekannten neutralen Vektorbosonen ergeben sich wiederum als **Mischzustände**:

$$\begin{aligned} |\gamma\rangle &= \cos\theta_W |B^0\rangle + \sin\theta_W |W^0\rangle \\ |Z^0\rangle &= -\sin\theta_W |B^0\rangle + \cos\theta_W |W^0\rangle \end{aligned}$$

Der Mischungswinkel wird Weinberg-Winkel oder schwacher Mischungswinkel genannt.

# Die elektroschwache Vereinheitlichung

Es ergeben sich folgende Relationen:

$$\tan \Theta_W = \frac{g'}{g}, \quad \sin \Theta_W = \frac{g'}{\sqrt{g^2 + g'^2}} \quad \text{und} \quad e = g \cdot \sin \Theta_W$$

$$m_W^2 c^4 = \frac{4\pi\alpha}{8 \sin^2 \Theta_W} \cdot \frac{\sqrt{2}(\hbar c)^3}{G_F} = \left( \frac{38,5}{\sin \Theta_W} \text{GeV} \right)^2.$$

$$\frac{m_W}{m_Z} = \cos \Theta_W$$

1979 erhielten Weinberg, Salam und Glashow den Nobelpreis für ihre Theorie.

# Theorie $\Rightarrow$ Experiment

Damit die vereinheitlichte Theorie von Glashow, Salam und Weinberg allgemein anerkannt werden würde, mußten die zwei wichtigsten Vorhersagen nachgewiesen werden:

- die neutralen Ströme
- die W- und Z-Bosonen

# Nachweis der neutralen Ströme

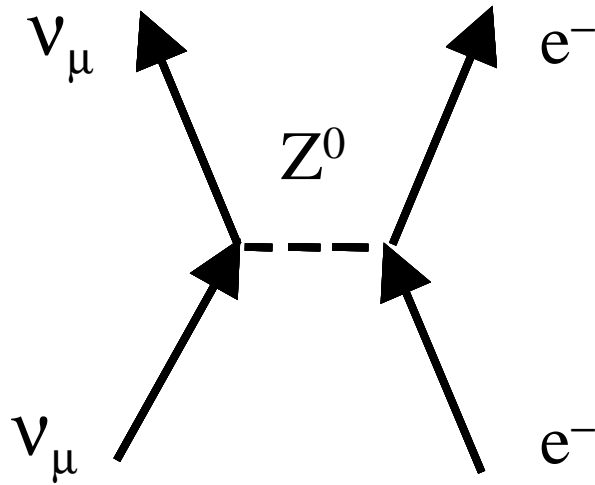
1973 wurde in der Blasenkammer Gargamelle am CERN nach folgenden Reaktionen gesucht:

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

$$\bar{\nu}_{\mu} + e^{-} \rightarrow \bar{\nu}_{\mu} + e^{-}.$$

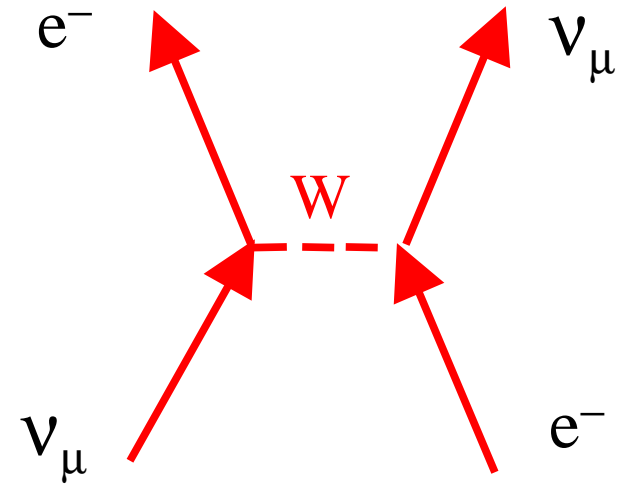
Für die Nachweis-Reaktion können keine Elektroneneutrinos verwendet werden, da man dann Reaktionen mit geladenen und neutralen Strömen nicht unterscheiden könnte.

# Nachweis der neutralen Ströme

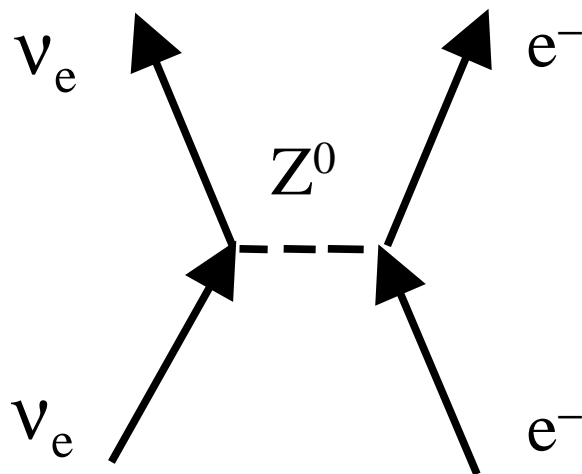


erlaubt

Reaktionen mit Myon-  
neutrinos

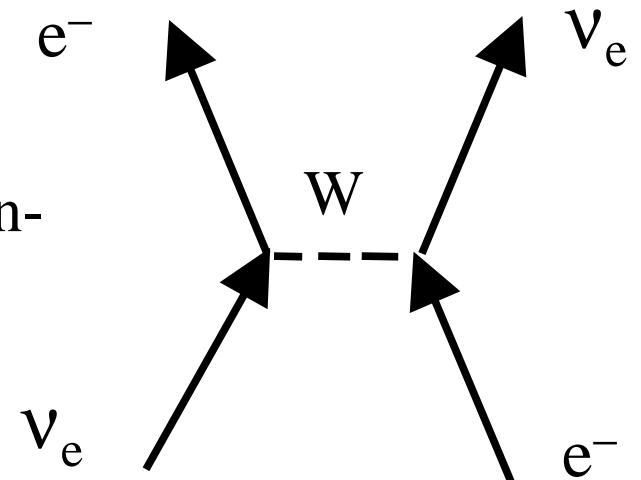


verboten



erlaubt

Reaktionen mit Elektron-  
neutrinos

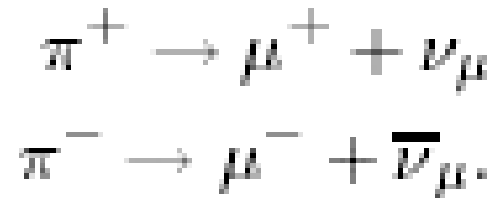


erlaubt

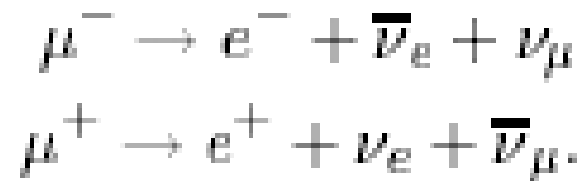


# Nachweis der neutralen Ströme

Erzeugung der Myon-Neutrinos:



Falls Myonen in der Blasenkammer vorhanden sind:



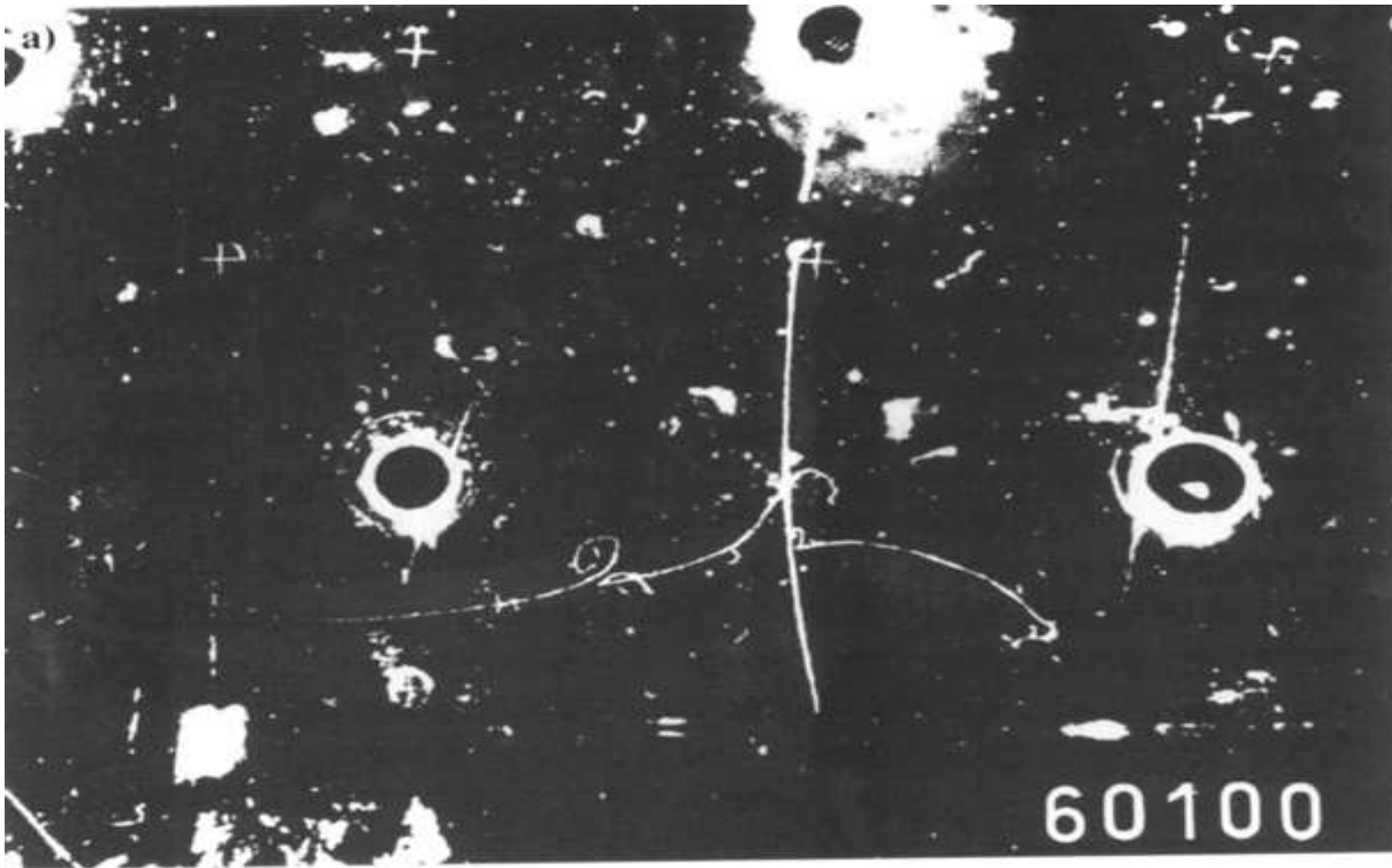
Die obere Reaktion kann mit einem neutralen Strom verwechselt werden. Daher sind Myon-Antineutrinos besser zum Nachweis geeignet.

# Nachweis der neutralen Ströme

Kinematik der Reaktion:

- **Myon-(Anti-)Neutrino** wird im Protonensynchrotron erzeugt,  
• läuft mit ca. 1-2 GeV in Blaskammer ein, „unsichtbar“,  
aber mit bekannter Richtung,  
• trifft auf ruhendes Elektron, überträgt im Mittel 1/3 seiner Energie.
- **Elektron** erscheint mit mindestens 300 MeV (Energie-offset)  
plötzlich „aus dem Nichts“ unter einem **charakteristischen Winkel**  $\Theta_e < 5^\circ$  zur Neutrinobahn.

# Nachweis der neutralen Ströme



Erstes  
beobachtetes  
myonloses  
Neutrinoereignis  
(Juli 1973)



## → Nachweis der W- und Z-Bosonen

Anhand dieser ersten Beobachtungen von neutralen Strömen wurde der Weinberg-Winkel bestimmt:

$$\sin^2 \Theta_W = 0,35 \pm 0,08.$$

Spätere Messungen am LEP ergaben folgenden Wert:

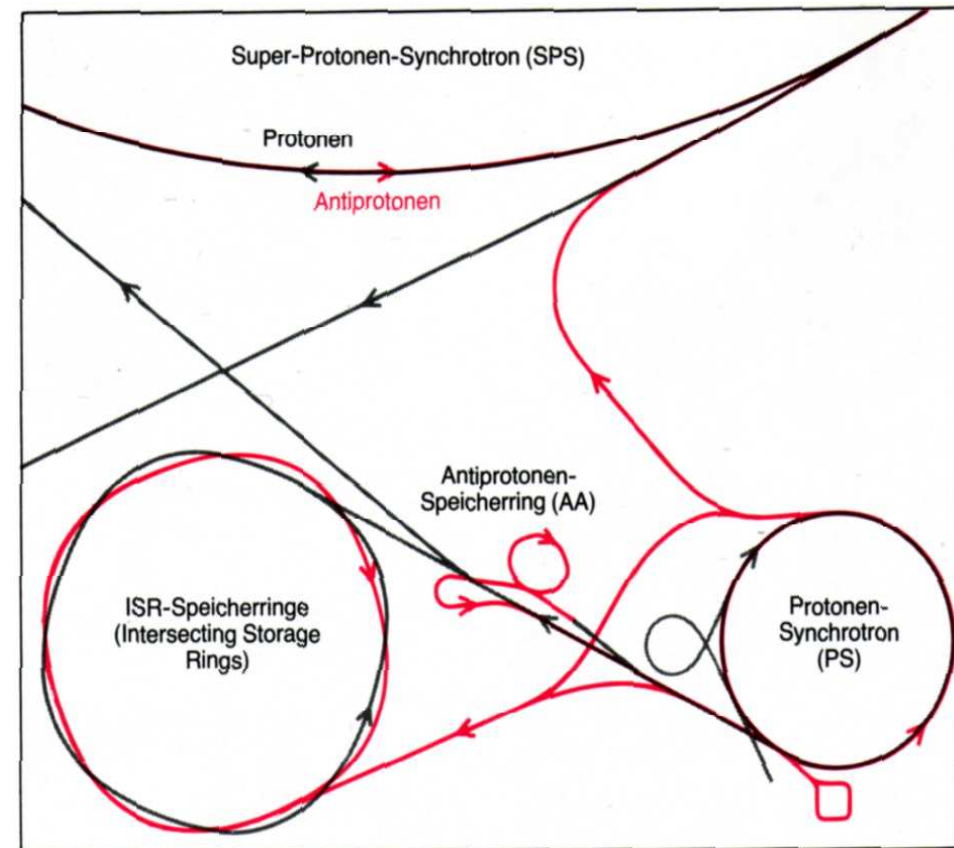
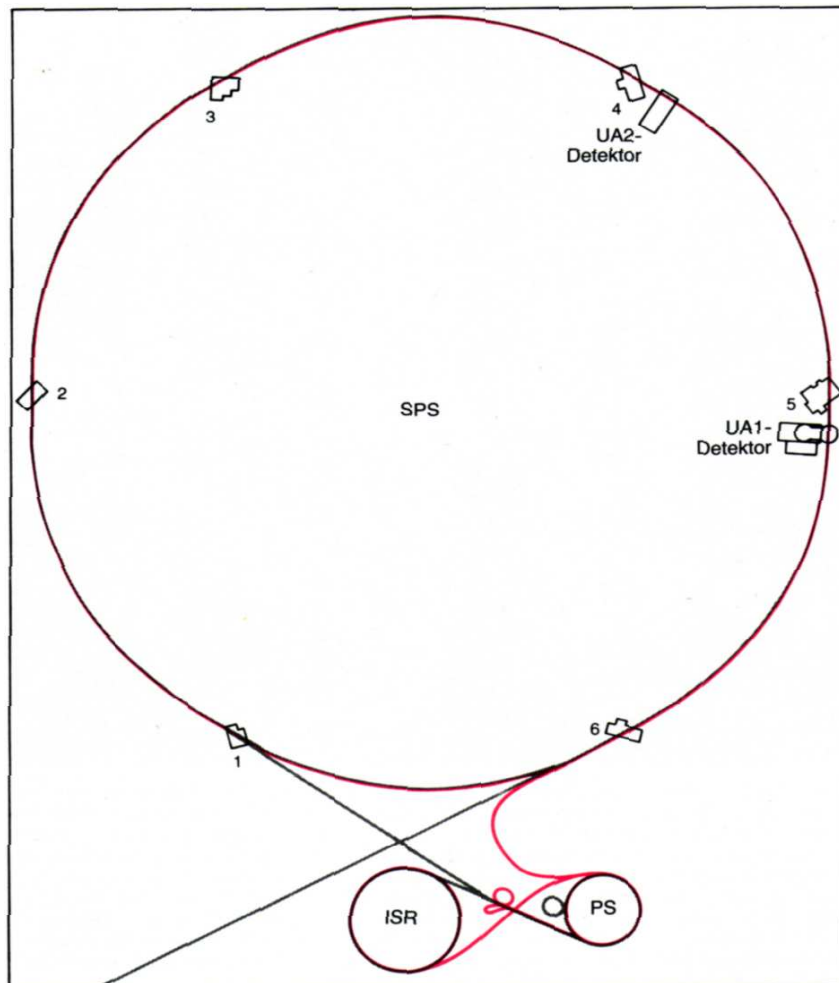
$$\sin^2 \Theta_W = 0,23124 \pm 0,00024$$

Mit Hilfe des Weinberg-Winkels ließen sich die Massen der W- und Z-Bosonen voraussagen:

$$m_W \approx 80\text{GeV} \text{ und } m_Z \approx 90\text{GeV}$$

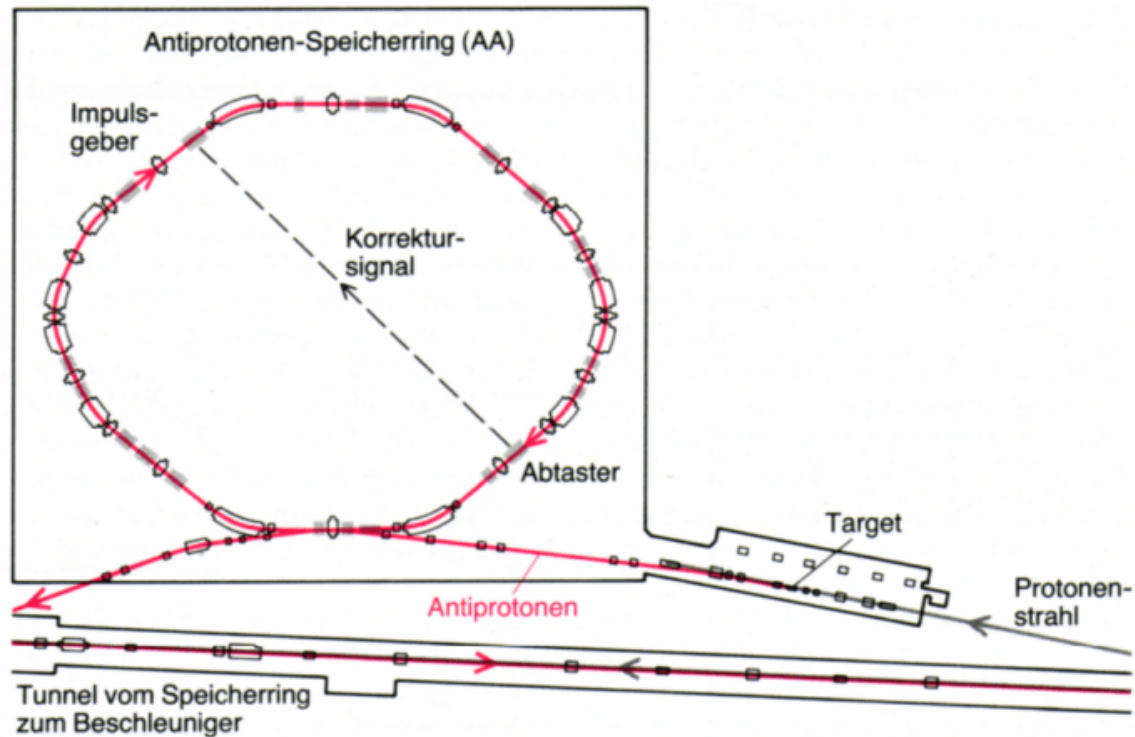
# Nachweis der W- und Z-Bosonen

Wegen der hohen Masse der Vektorbosonen konnte man diese nicht in den vorhandenen Beschleunigern erzeugen.



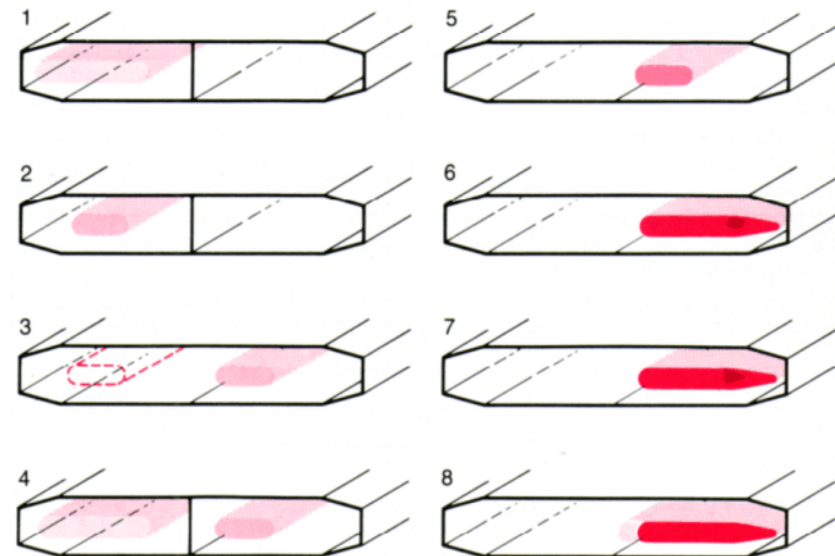
Protonen-Antiprotonen-Kollider am CERN

# Nachweis der W- und Z-Bosonen

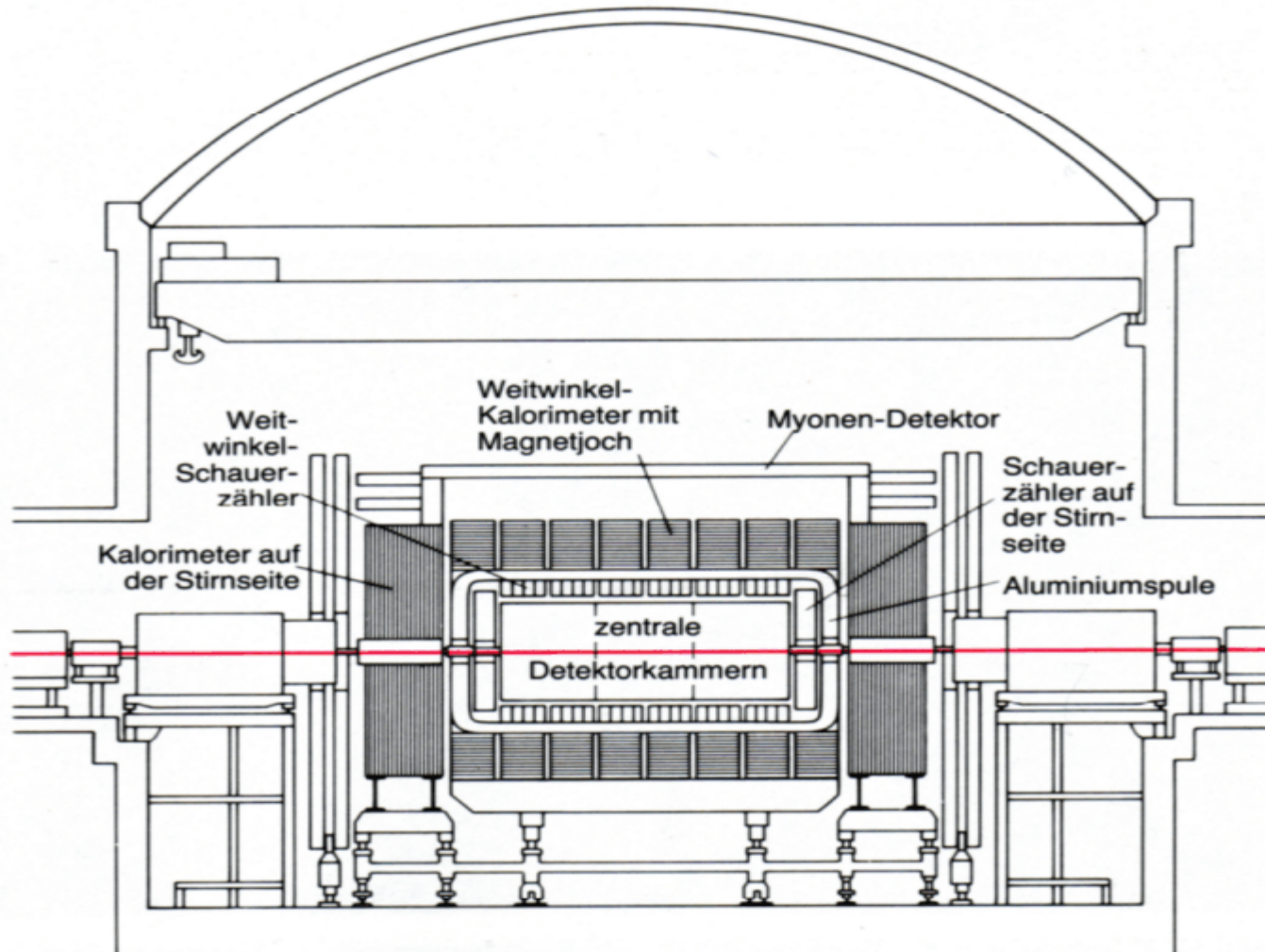


Der Antiprotonen-Speicherring am CERN

Das Prinzip der stochastischen Kühlung

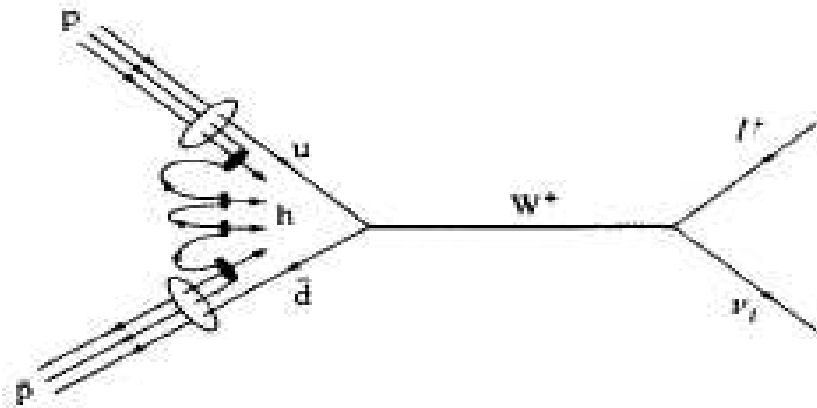


# Nachweis der W- und Z-Bosonen



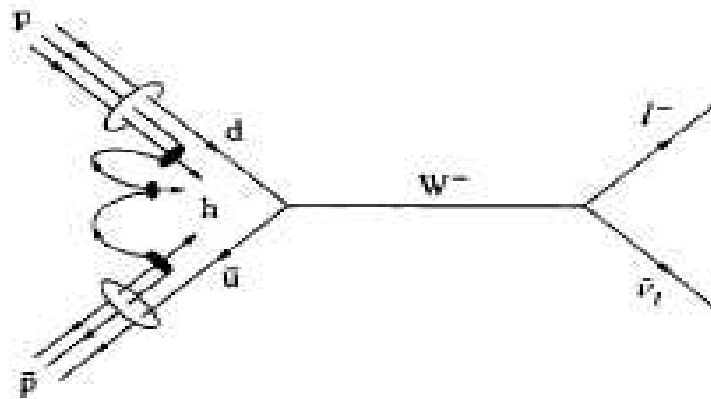
Der Detektor UA1 in Seitenansicht

# Nachweis der W- und Z-Bosonen

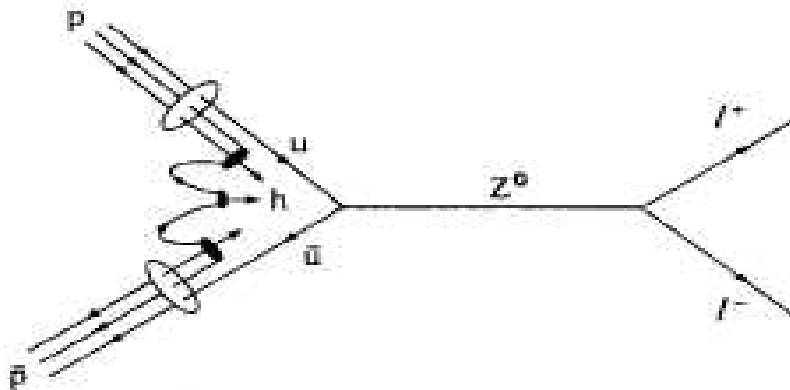


Die Vektorbosonen entstehen in Proton-Antiproton-Kollisionen.

Sie zerfallen nach sehr kurzer Zeit ( $< 10^{-24}$  s) in Leptonen und Hadronen.



Von experimentellem Interesse sind nur die leptonischen Zerfälle.





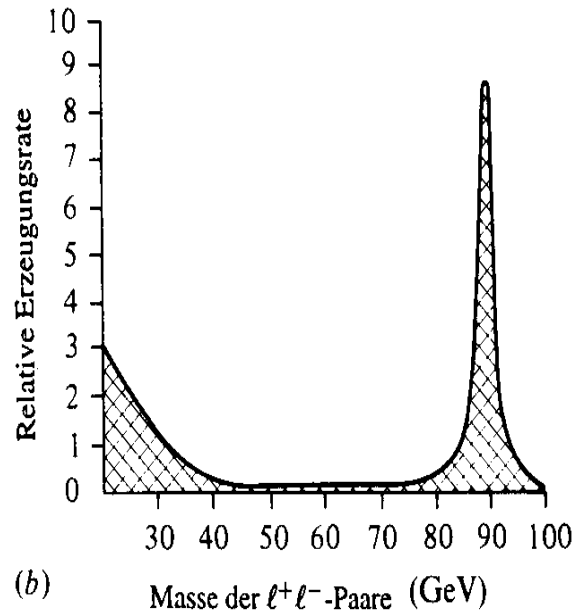
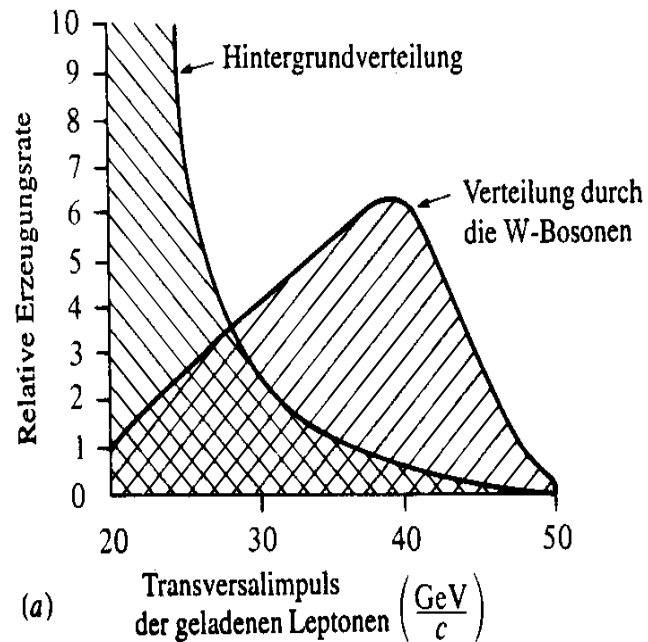
# Nachweis der W- und Z-Bosonen

Da bei hohen Energien die Quarks eine breite Impulsverteilung besitzen, kann man das Schwerpunktsystem und den Gesamtimpuls nicht bestimmen. Die Summe der transversalen Impuls-komponenten verschwindet jedoch:  $\Sigma p_T = 0$ .

Dadurch kann beim W-Zerfall der Transversalimpuls des Neutrinos bestimmt werden:  $p_T^{\nu} = p_T^{\text{miss}}$ .

Bei der Proton-Antiproton-Kollision entstehen viele Hadronen, die ebenfalls in Leptonen zerfallen. Ein Problem beim Nachweis der Vektorbosonen ist, diese Leptonen von den beim W- und Z-Zerfall entstehenden zu unterscheiden.

# Nachweis der W- und Z-Bosonen



Erwartete Signaturen der W- und Z-Bosonen (aus Simulationen, (a) gilt ähnlich auch für Z-Bosonen)

Wegen der hohen Massen der Vektorbosonen sind die Transversalimpulse der Leptonen im Mittel deutlich größer als die der Leptonen aus hadronischen Zerfällen.

Beim Z-Zerfall kann man direkt die Masse bestimmen.

# Nachweis der W- und Z-Bosonen

Im Fall vernachlässigbarer Ruhemassen (der Leptonen) gilt:

$$\begin{aligned} m_Z^2 &= (E_{e^+} + E_{e^-})^2 - (\vec{p}_{e^+} + \vec{p}_{e^-})^2 \\ &= 2p_{e^+}p_{e^-}(1 - \cos \Theta) \end{aligned}$$

Hierbei ist  $\Theta$  der Winkel zwischen Elektron und Positron.

Da beim W-Zerfall nur die Transversalimpulse bekannt sind, kann man nur die transversale Masse  $m_T$  als Maß für die Masse  $m_W$  bestimmen. Es gilt:  $m_T \leq m_W$ .

# Nachweis der W-Bosonen am CERN

Ende 1982 wurden am SPS mehrere Bosonen pro Tag produziert. Im Februar bzw. März 1983 veröffentlichten die UA1- und die UA2-Gruppe ihre Ergebnisse. Der Nachweis beruhte auf Reaktionen des Typs:  $W^\pm \rightarrow e^\pm + \nu_e$  (ca. 1 Million Ereignisse).

UA1:

- Elektronen: charakteristische Spur in der Driftkammer und Deponierung der gesamten Energie im ECAL
- Neutrinos: werden anhand der fehlenden Energie nachgewiesen (vektorielle Summe ungleich Null)
- Myonen: Nachweis in Myon-Kammern (sonst mögliche Verfälschung der Energiebilanz)

# Nachweis der W-Bosonen am CERN

Man suchte zwei Klassen von Ereignissen:

1.) Ereignisse mit einem **isolierten Elektron** mit hohem **Transversalimpuls**, wobei...

- die Spur des Elektron aus der **zentralen Kammer** kommt,
- alle **anderen Spuren** geringen **Transversalimpuls** haben,
- nicht mehr als **600 MeV** im **HCAL** deponiert werden,
- **keine Jet-Bildung** vorliegt.

=> Die verbleibenden fünf Ereignisse haben fehlende Energien in der Größenordnung der transversalen Energie des Elektrons.

# Nachweis der W-Bosonen am CERN

2.) Ereignisse mit **großen fehlenden Transversalimpuls**  
(Neutrinoereignisse)

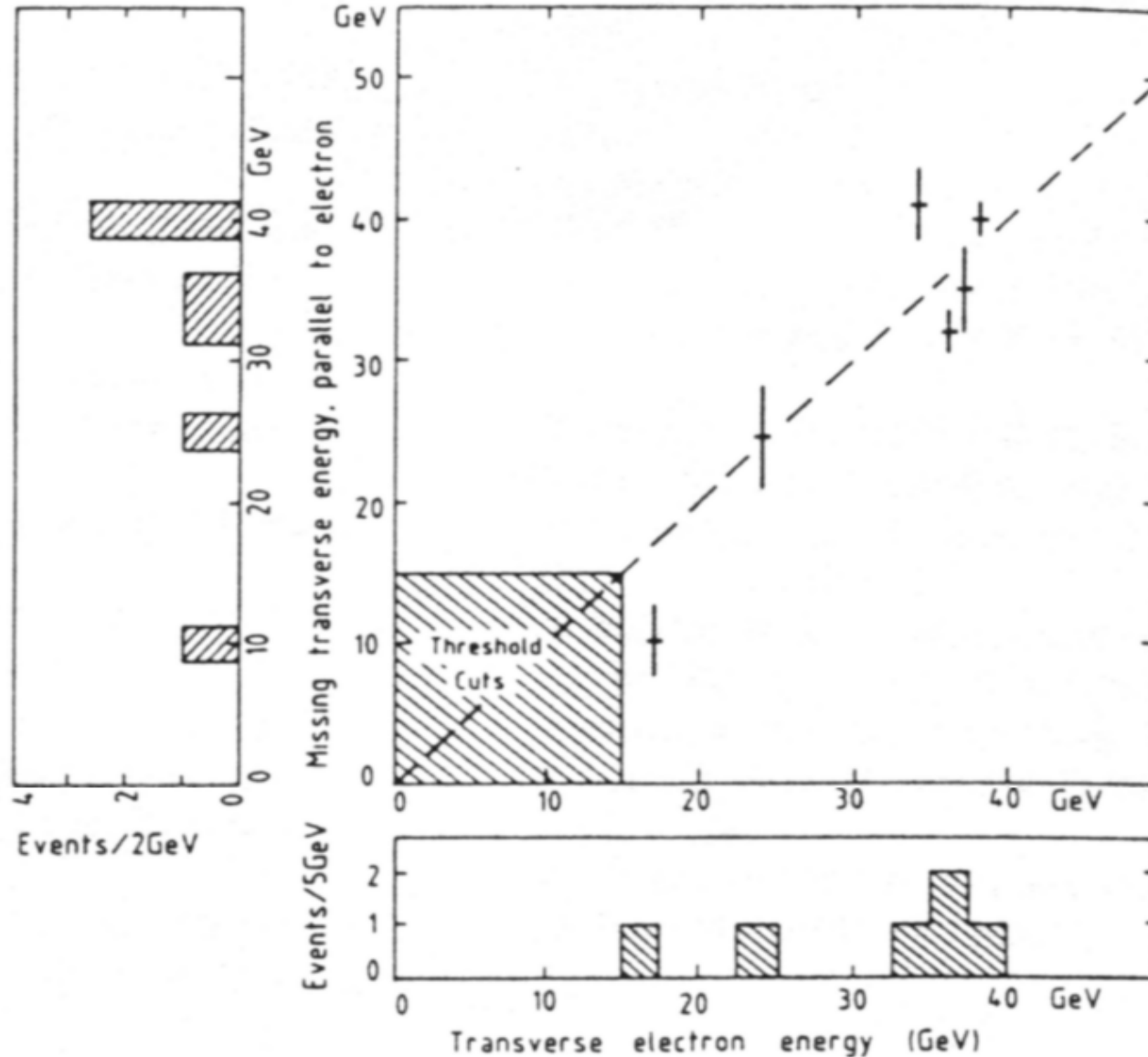
=> Durch diverse Bedingungen werden sieben Ereignisse ausgewählt, die die fünf aus 1.) enthalten.

Aus diesen Messungen ergab sich folgende Masse des W-Bosons:

$$m_W = (81 \pm 5) \text{ GeV}/c^2$$

# Nachweis der W-Bosonen am CERN

EVENTS WITHOUT JETS



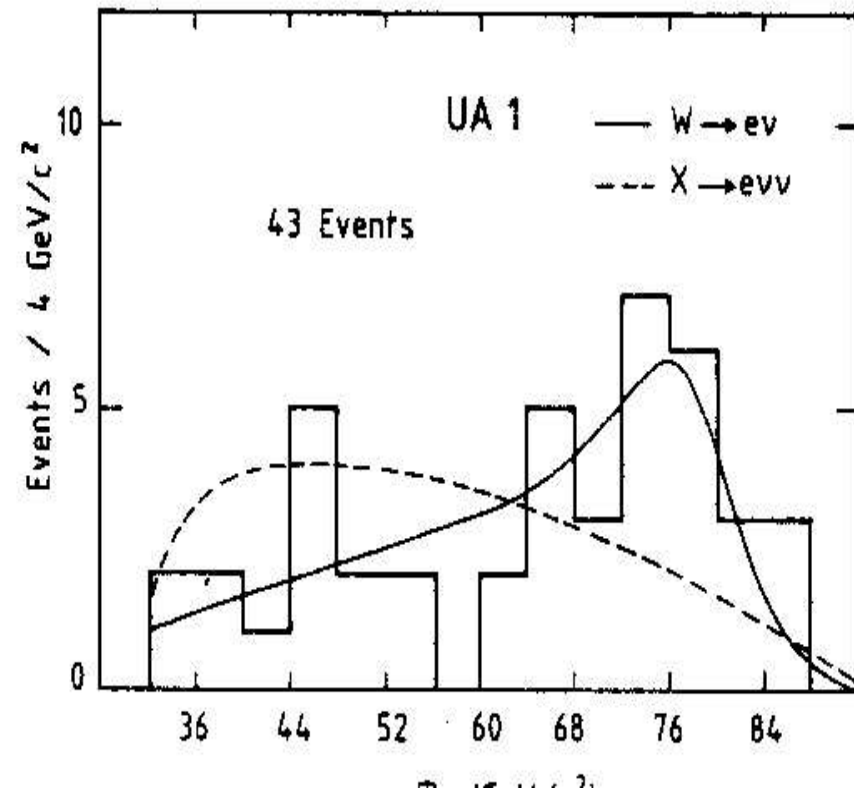
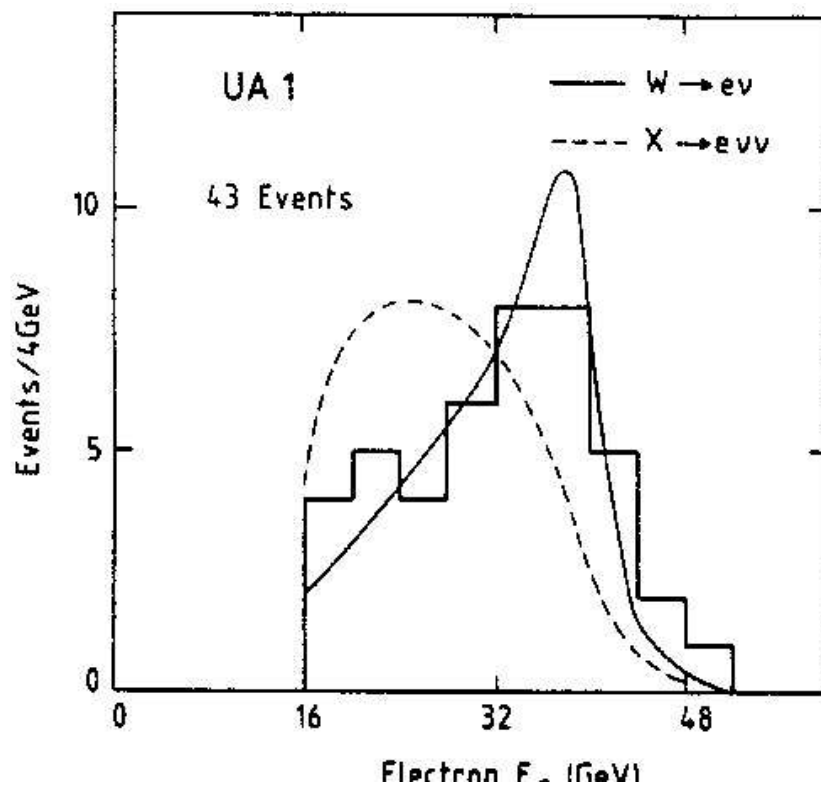
„Clearly the same physical process that provides us with the large- $p_T$  electron delivers also high-energy neutrinos.“

(Phys.Lett., 1983, 122B, S.111)

# Nachweis der W-Bosonen am CERN

Im September 1983 wurde von der UA1-Gruppe anhand besserer Statistik (43 Ereignisse) folgende Masse bestimmt:

$$m_W = (80,9 \pm 1,5) \text{ GeV}/c^2$$



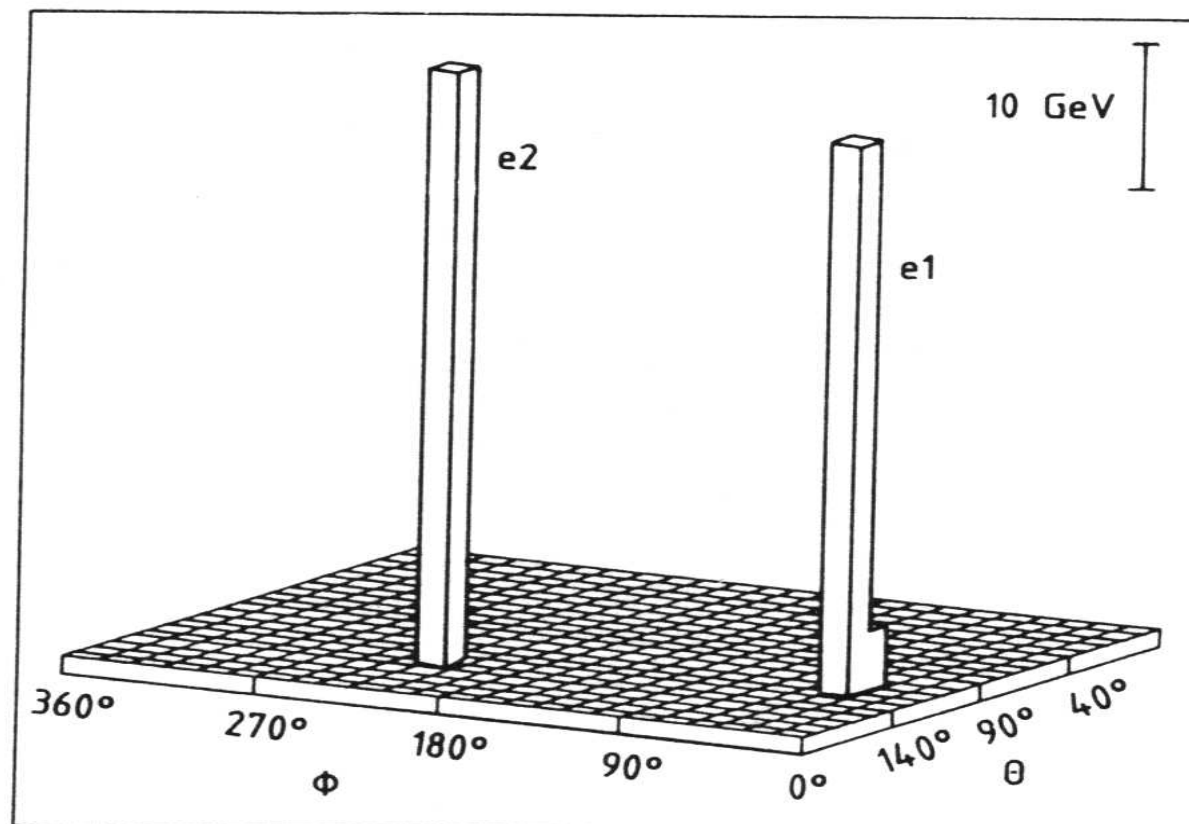


# Nachweis der Z-Bosonen am CERN

Man suchte nach Reaktionen des Typs:

$$Z \rightarrow e^+ + e^- \text{ bzw. } Z \rightarrow \mu^+ + \mu^-$$

Es wurde gefordert, dass Lepton und Antilepton mit **gleichem, hohem Transversalimpuls in entgegengesetzte Richtungen** flogen.



# Nachweis der Z-Bosonen am CERN

Anhand von vier  $(e^+,e^-)$ - und einem  $(\mu^+,\mu^-)$ -Ereignis bestimmte die UA1-Gruppe für die Masse des Z-Bosons und den Weinberg-Winkel folgende Werte (Juli 1983):

$$m_Z = (95,2 \pm 2,5)\text{GeV}/c^2$$

$$\sin^2 \Theta_W = 0,226 \pm 0,011$$

Die UA2-Gruppe erhielt aus vier  $(e^+,e^-)$ -Ereignissen folgende Ergebnisse (September 1983):

$$m_Z = (91,9 \pm 1,3)\text{GeV}/c^2$$

$$\sin^2 \Theta_W = 0,227 \pm 0,009.$$

# Nachweis der W- und Z-Bosonen

1984 erhielten Carlo Rubbia und Simon van der Meer gemeinsam den Nobelpreis in Anerkennung ihrer herausragenden Rolle bei diesen Entdeckungen.

Seit 1989 können am LEP Z-Bosonen und seit 1996 W-Bosonen in großer Zahl hergestellt werden. Dies ermöglicht eine genaue Bestimmung der Massen.

Die genauesten Werte sind heute (Berger, E-Teilchenphysik, 2002):

$$m_W = 80,41 \pm 0,056 \text{ GeV}$$

$$m_Z = 91,1882 \pm 0,0022 \text{ GeV}$$