

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

Sabine Blatt

Betreuer: Prof. Dr. J. Mnich

28. Januar 2003

Inhalt

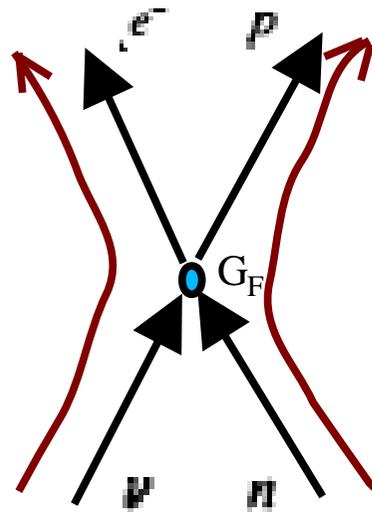
I. Theorie der schwachen Wechselwirkung

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

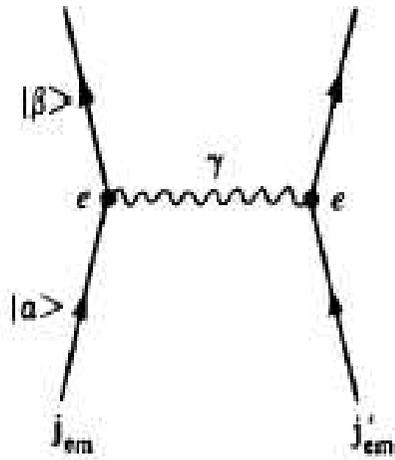
II. Nachweis der neutralen Ströme

III. Nachweis der W- und Z-Bosonen

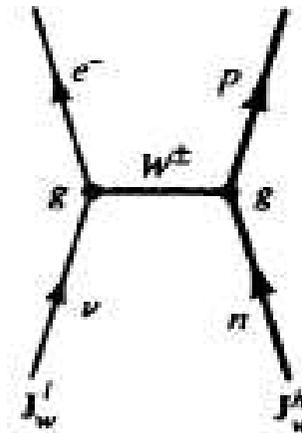
Theorie der schwachen WW: Fermis Theorie



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 $m_W \sim 10^2 \text{ GeV}/c^2$.

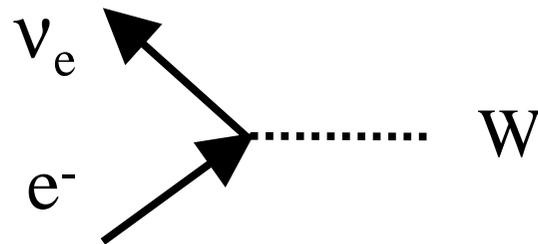
Genauere Rechnung liefert: $m_W \approx 80 \text{ GeV}$.

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:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

•Semileptonische Prozesse, z.B. β -Zerfall:

$$d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$$

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

$$K^+ \rightarrow \pi^0 + \pi^+$$

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:

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

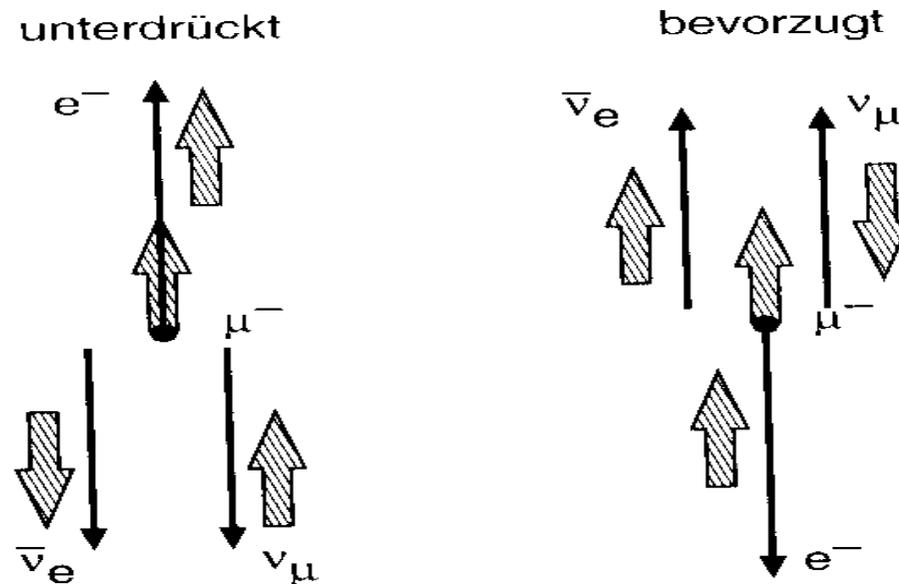
- Mit der dritten Quarkfamilie erhält man die Cabibbo-Kobayashi-Maskawa-Matrix, daher auch der Name „**CKM-Mischung**“.

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:

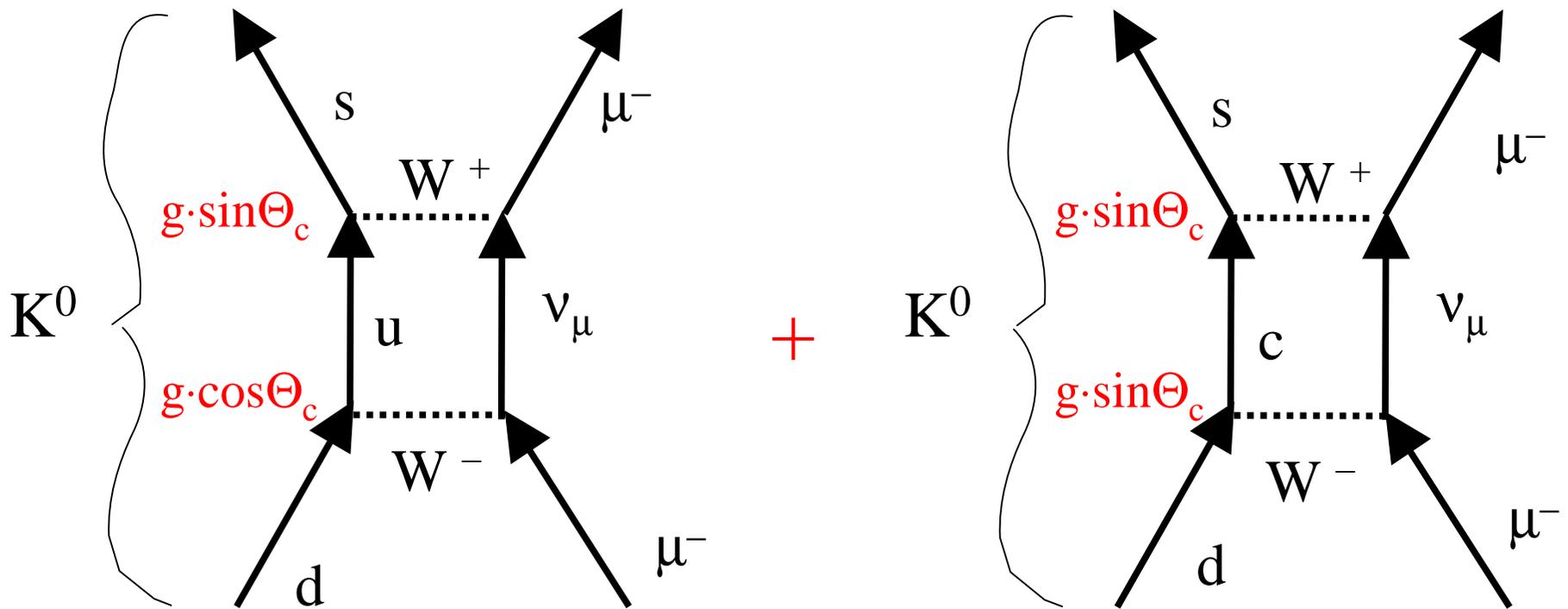
$$\nu_{\mu} + e^{-} \rightarrow \nu_{\mu} + e^{-}$$

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

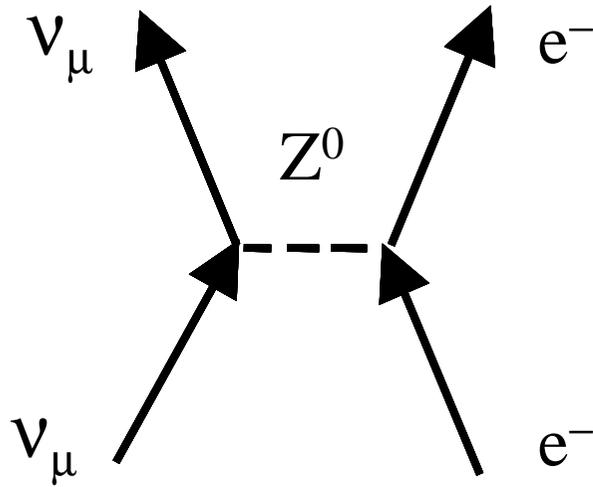
1973 wurde in der Blasenkammer Gargamelle am CERN nach folgenden Reaktionen gesucht:

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

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

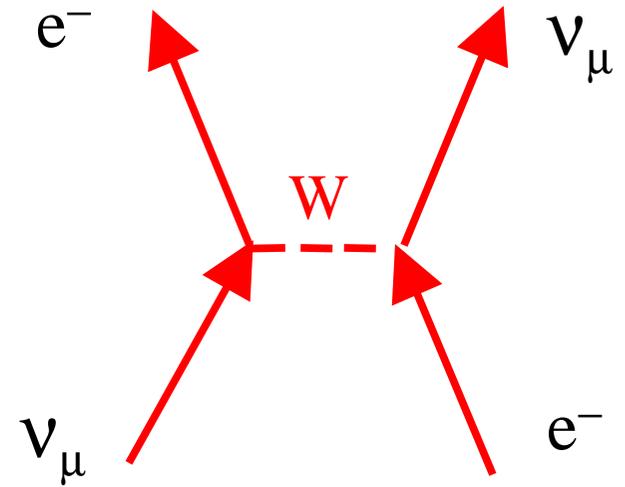
Für die Nachweis-Reaktion können keine Elektroneneutrinos verwendet werden, da man dann Reaktionen mit geladenen und neutralen Strömen nicht unterscheiden könnte.

Nachweis der neutralen Ströme

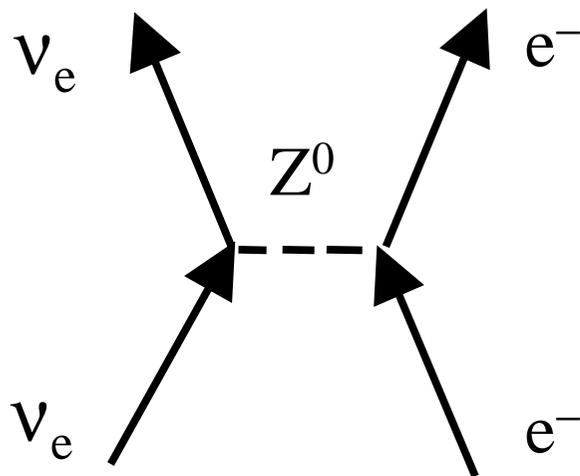


erlaubt

Reaktionen mit Myon-
neutrinos

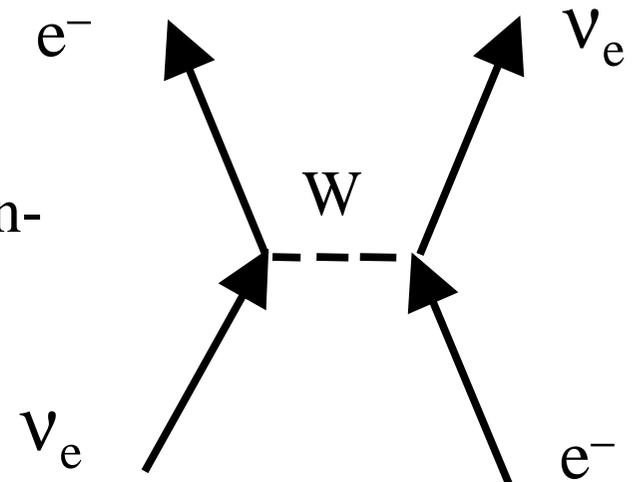


verboten



erlaubt

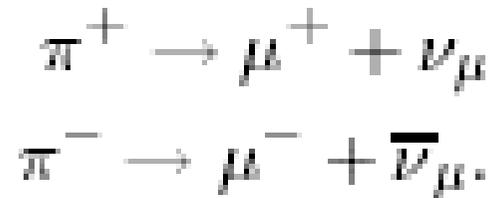
Reaktionen mit Elektron-
neutrinos



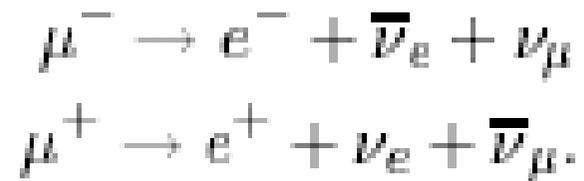
erlaubt

Nachweis der neutralen Ströme

Erzeugung der Myon-Neutrinos:



Falls Myonen in der Blasenkammer vorhanden sind:



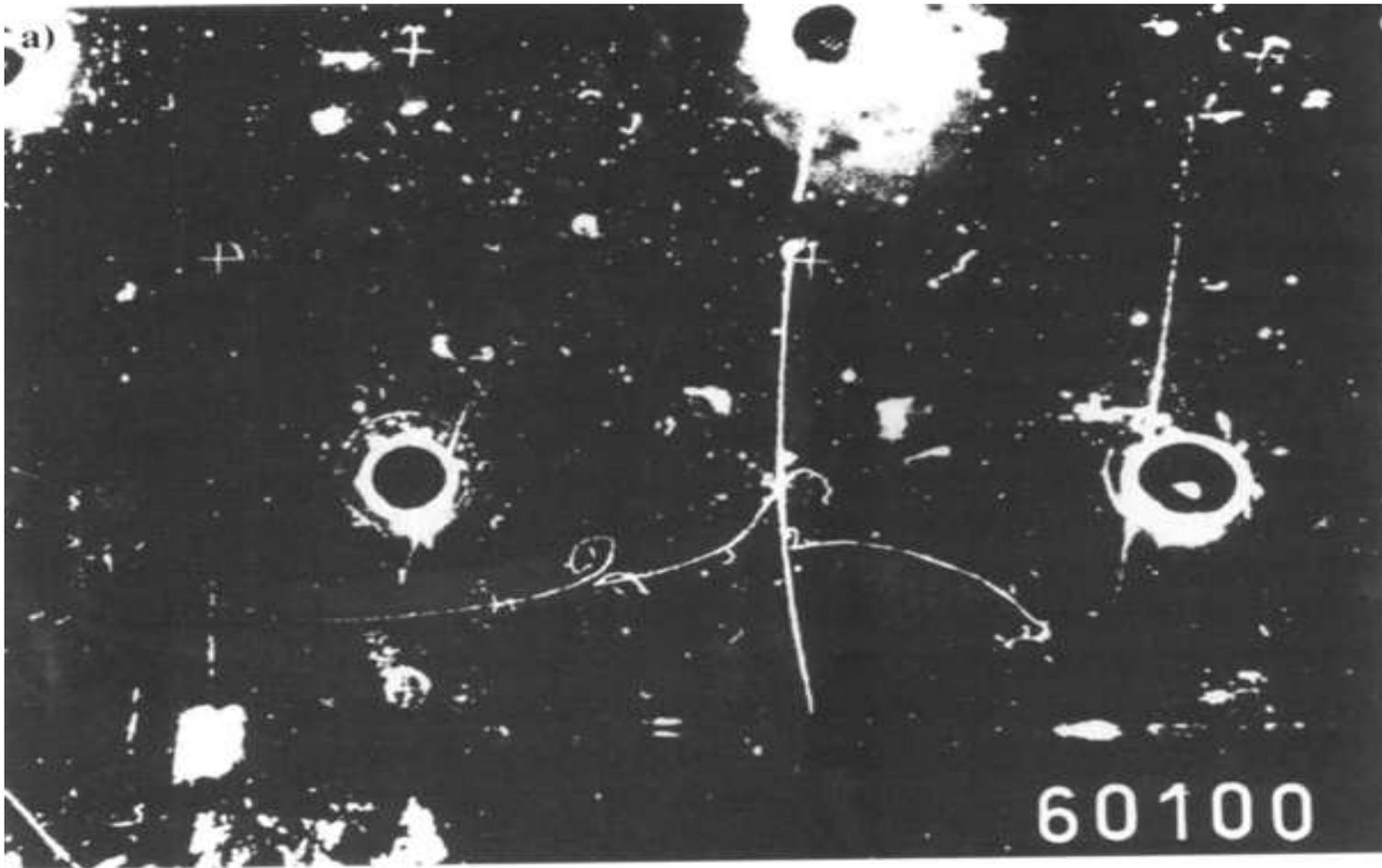
Die obere Reaktion kann mit einem neutralen Strom verwechselt werden. Daher sind Myon-Antineutrinos besser zum Nachweis geeignet.

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:

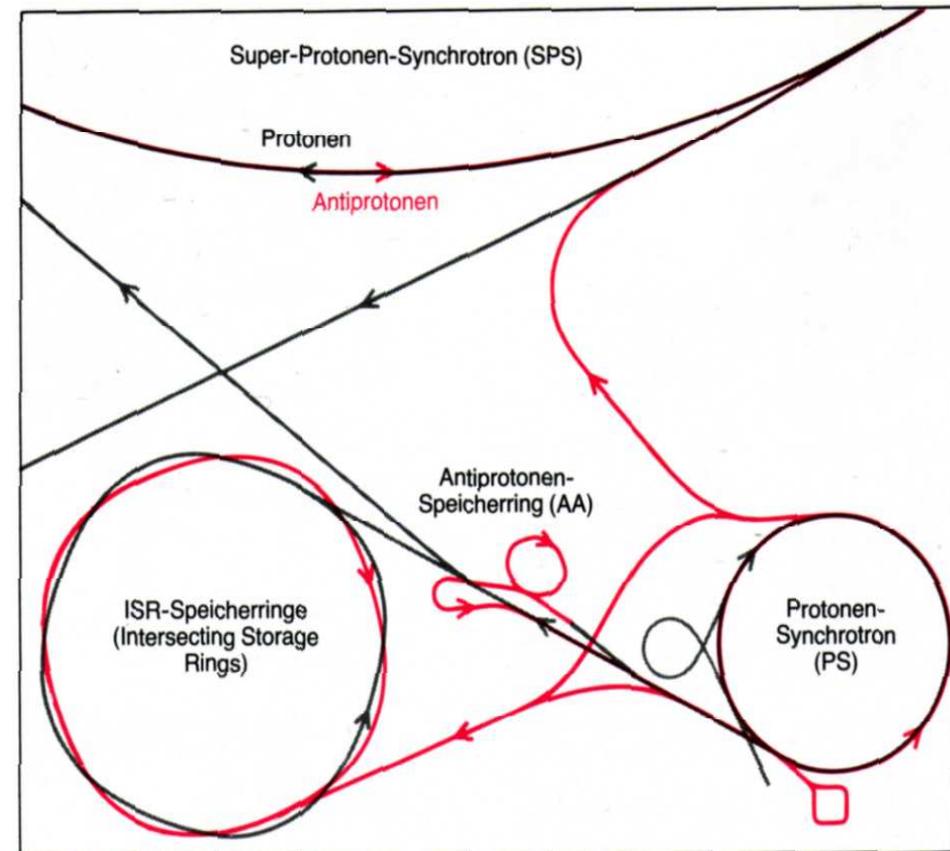
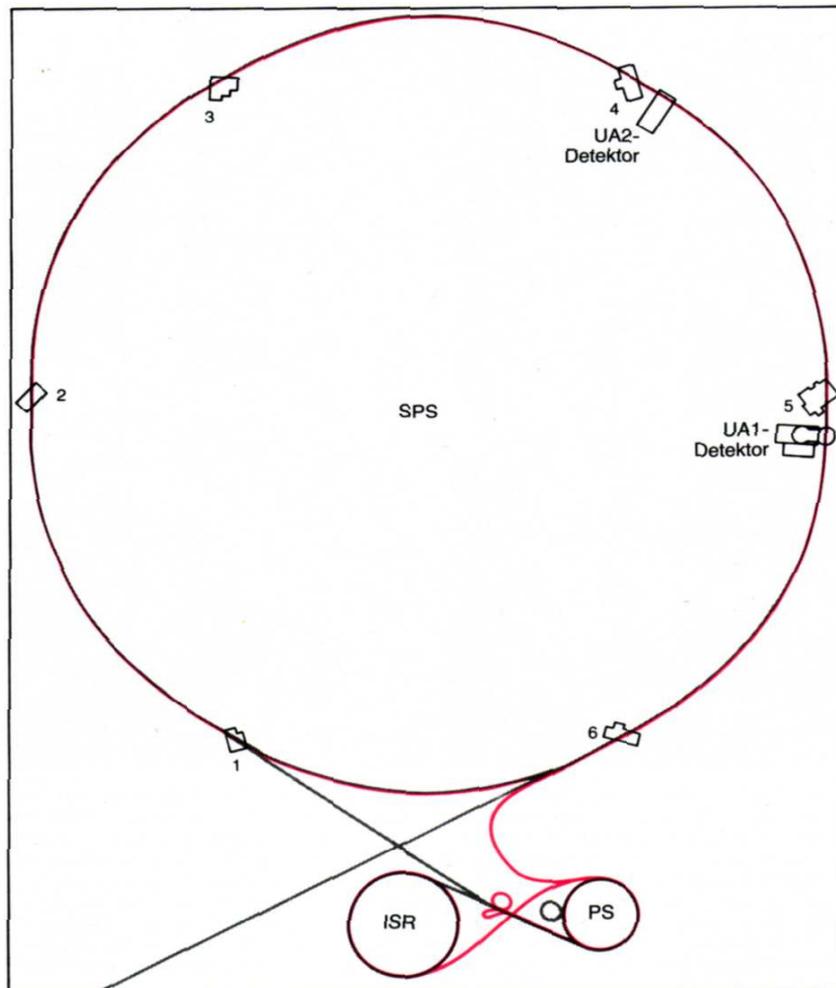
$$\sin^2 \Theta_W = 0,23124 \pm 0,00024$$

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

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

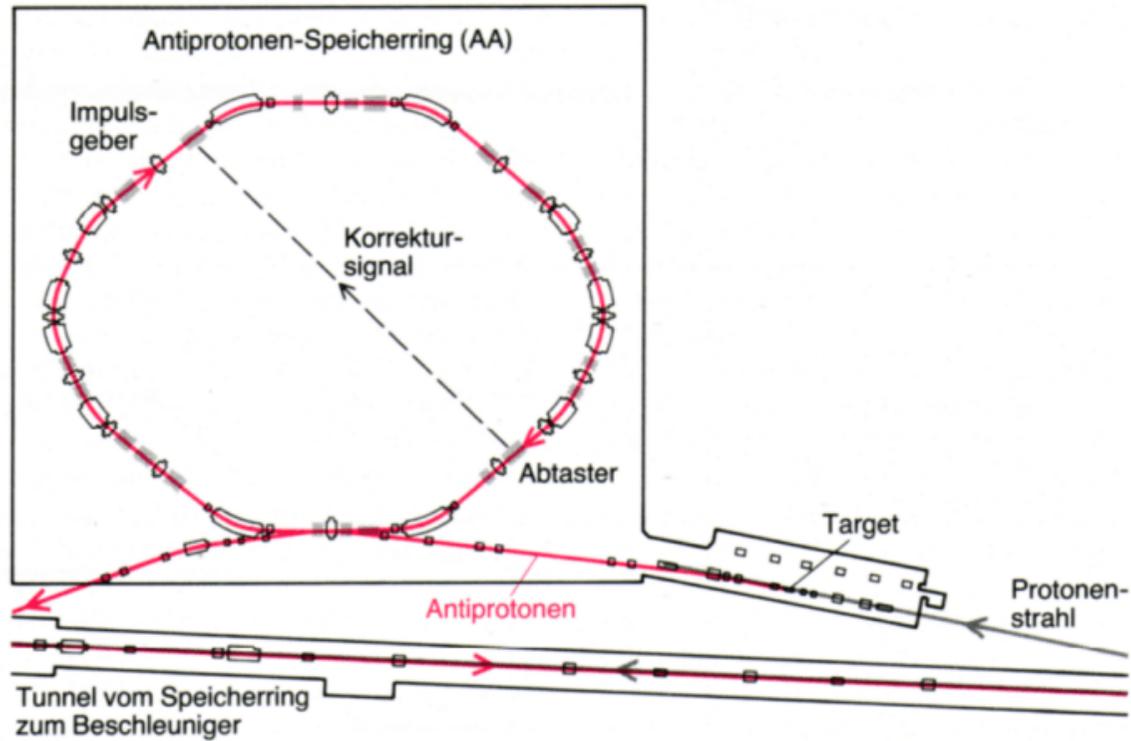
Nachweis der W- und Z-Bosonen

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



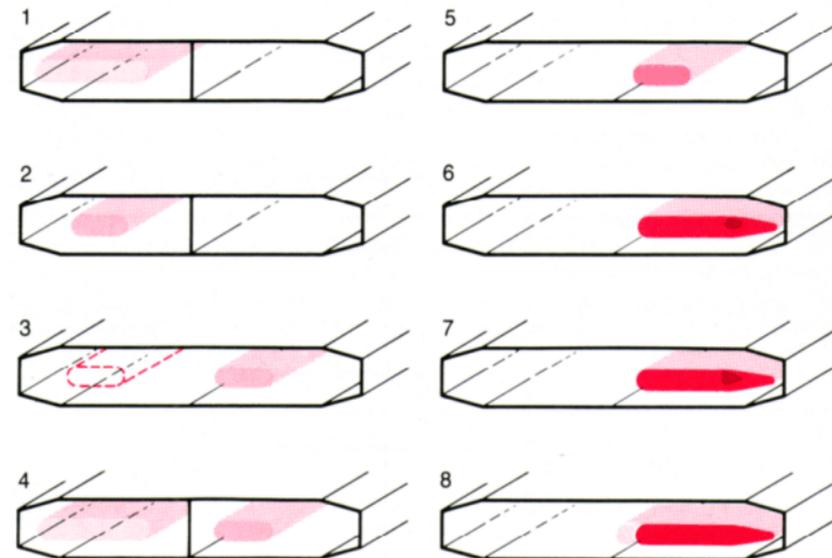
Protonen-Antiprotonen-Kollider am CERN

Nachweis der W- und Z-Bosonen

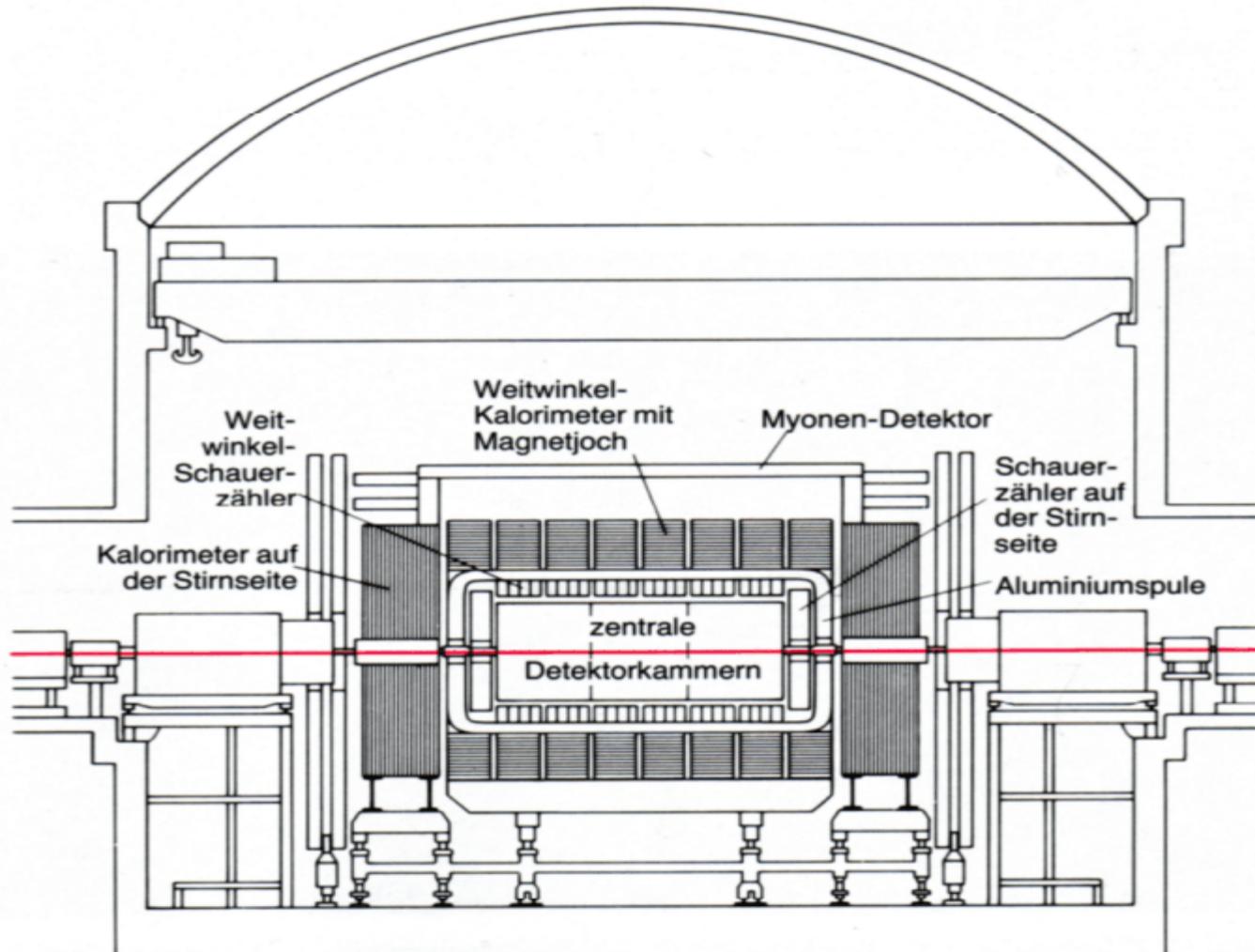


Der Antiprotonen-Speicherring am CERN

Das Prinzip der stochastischen Kühlung

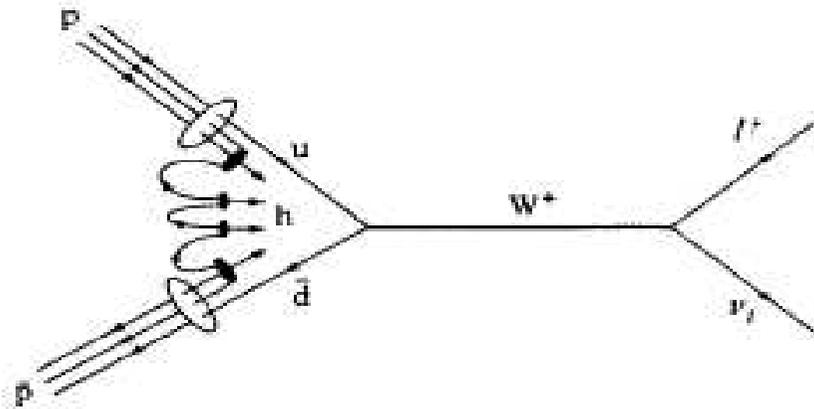


Nachweis der W- und Z-Bosonen



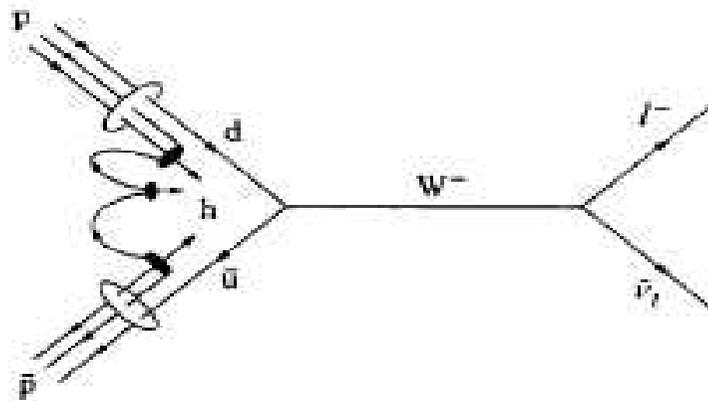
Der Detektor UA1 in Seitenansicht

Nachweis der W- und Z-Bosonen

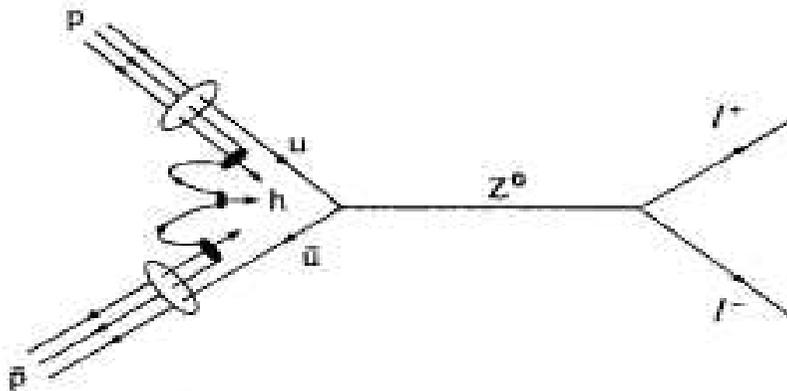


Die Vektorbosonen entstehen in Proton-Antiproton-Kollisionen.

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



Von experimentellem Interesse sind nur die leptonischen Zerfälle.



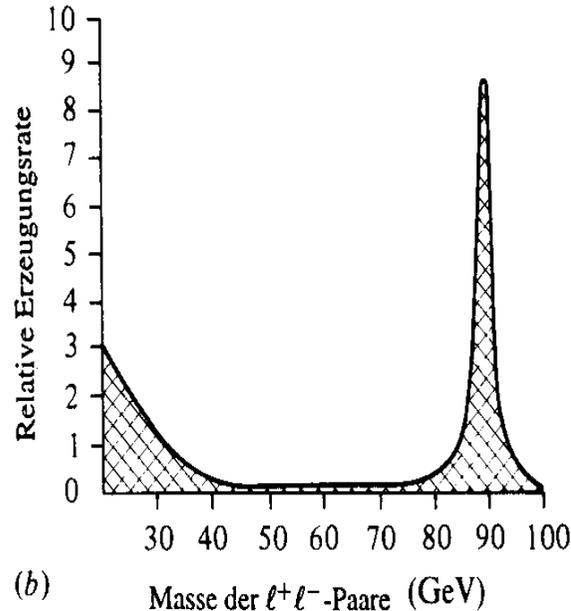
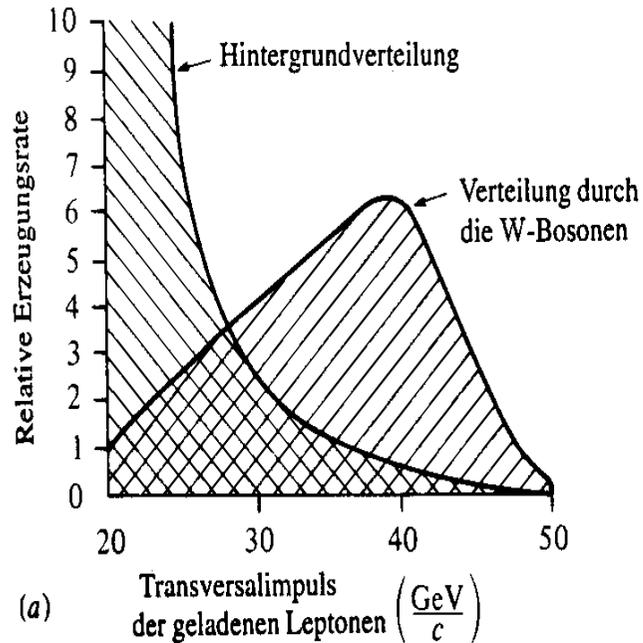
Nachweis der W- und Z-Bosonen

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 Θ 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)

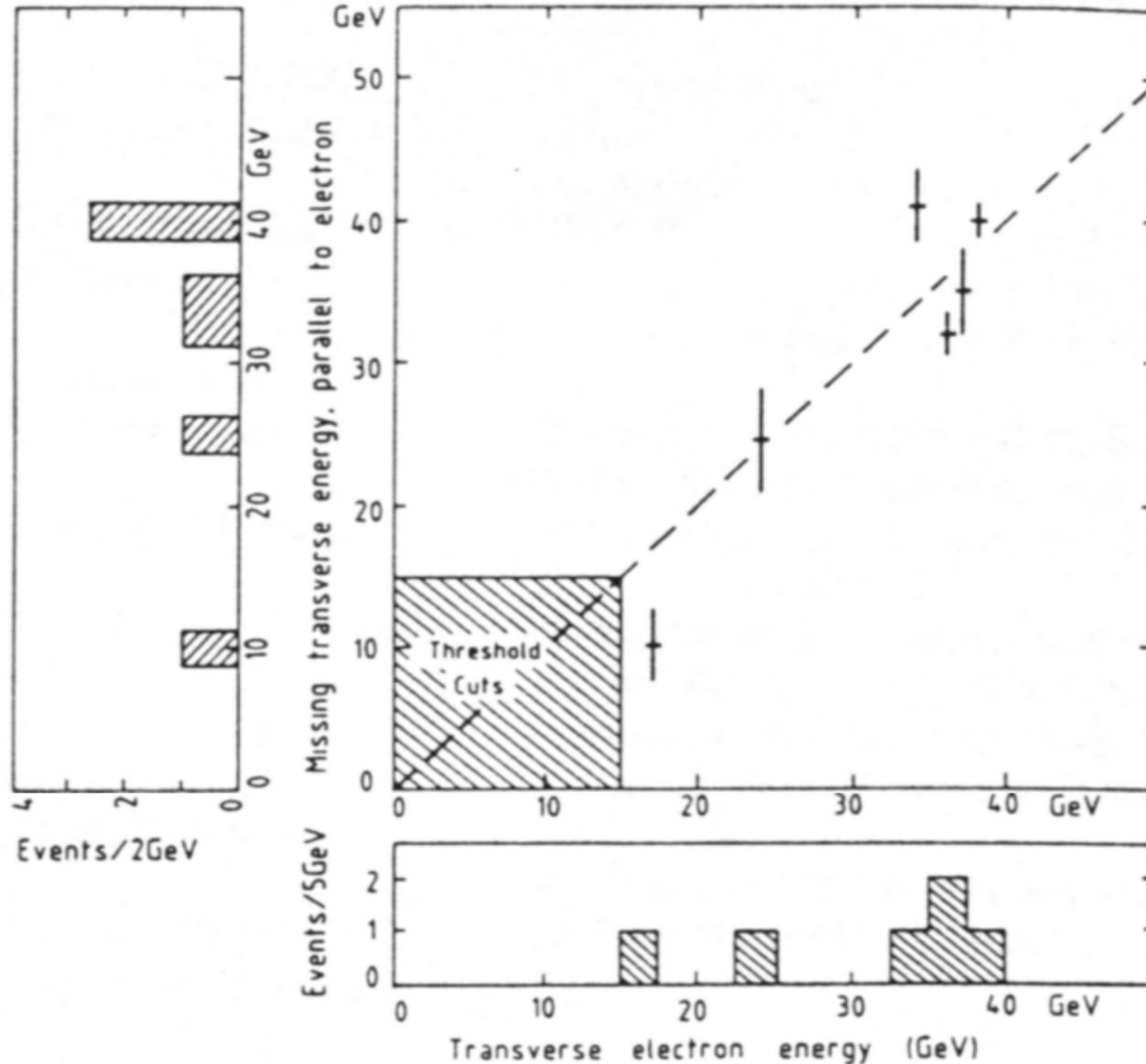
=> Durch diverse Bedingungen werden sieben Ereignisse ausgewählt, die die fünf aus 1.) enthalten.

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



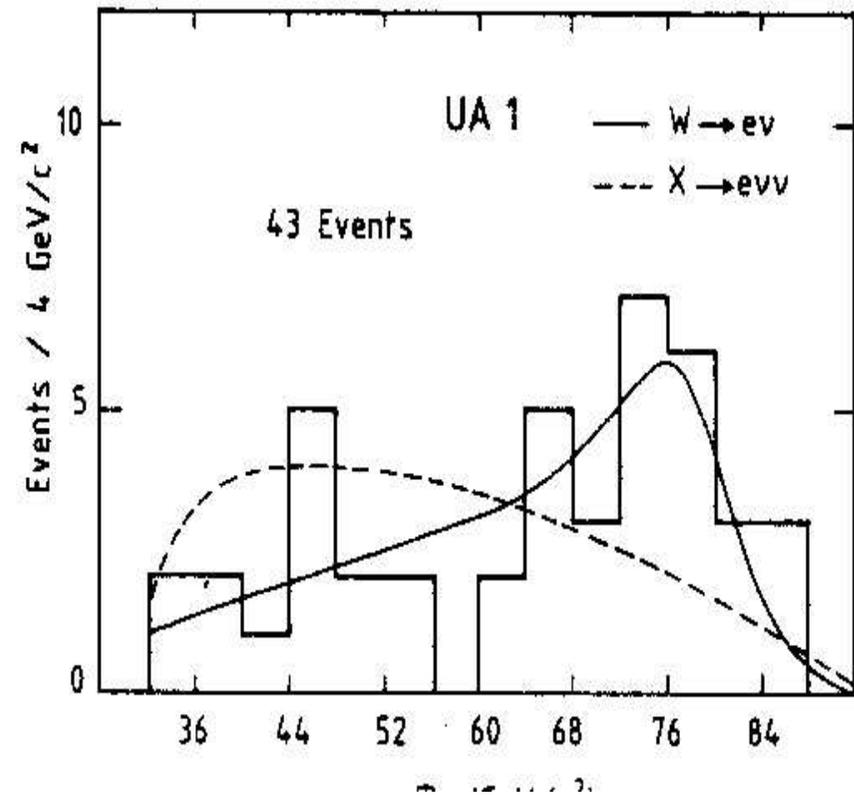
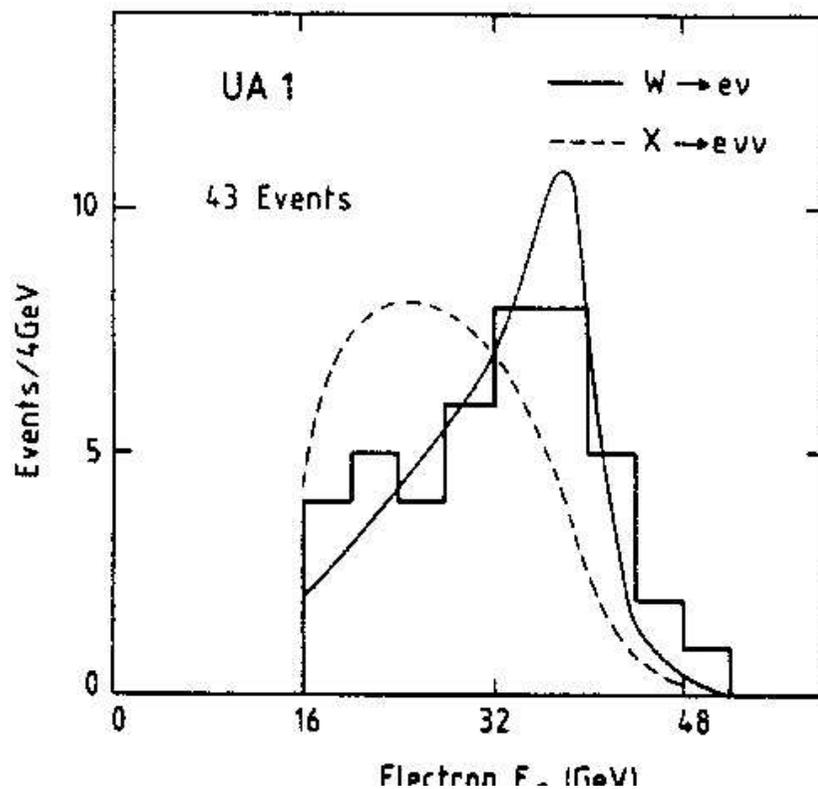
„Clearly the same physical process that provides us with the large- p_T electron delivers also high-energy neutrinos.“

(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:

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

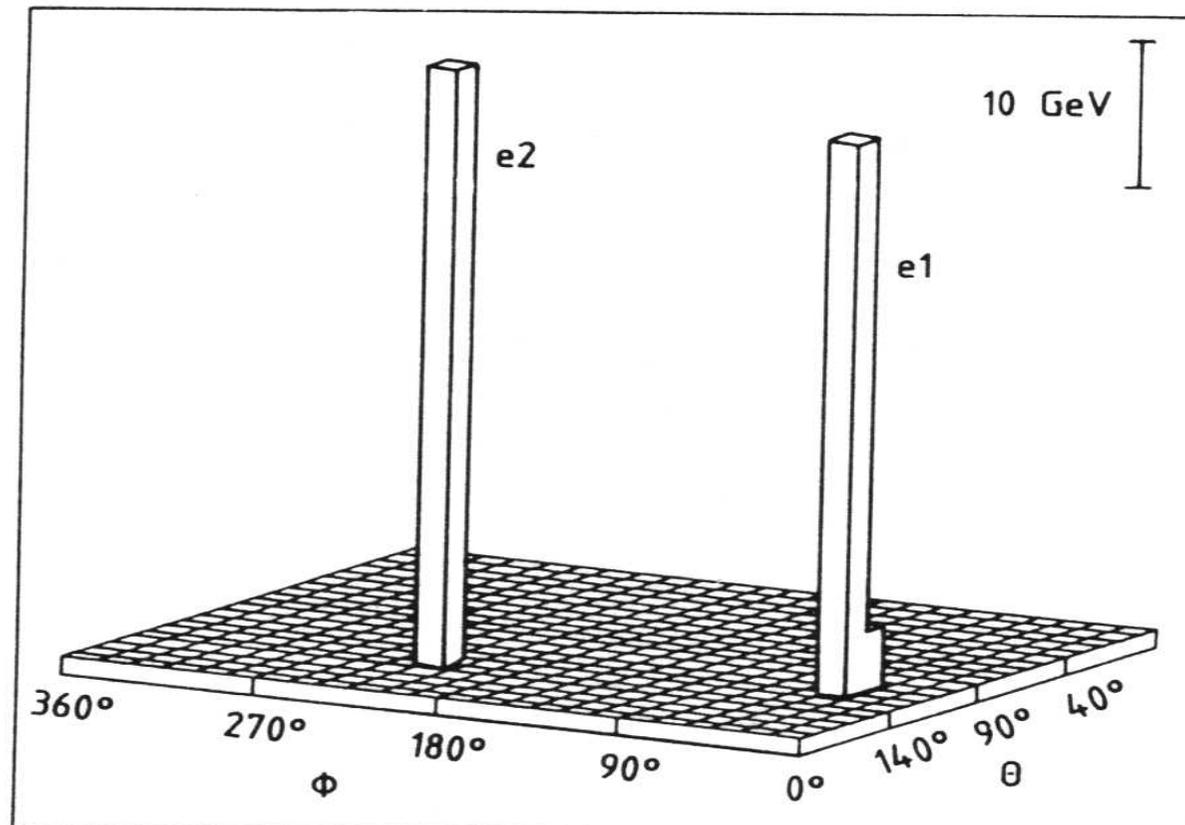


Nachweis der Z-Bosonen am CERN

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 (μ^+,μ^-) -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):

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

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