

12. Rubbia, van der Meer, Glashow, Salam, Weinberg und die **Vektorbosonen W und Z⁰**

Jede der **vier** bekannten **Wechselwirkungen** (Kräfte) beschreibt man als ständigen **Austausch von Bosonen**: die Gravitation 'entsteht' in dieser Vorstellung durch den Austausch von **'Gravitonen'** (noch nicht nachgewiesen, Spin = 2); die elektromagnetische Wechselwirkung wird durch die masselosen **Photonen** (Spin = 1) vermittelt, die starke Wechselwirkung durch 'farbgeladene' **Gluonen** (Spin = 1). **Welche Austauschbosonen** aber sind für die **schwache Wechselwirkung** 'zuständig'? Nun gibt es einen elementaren **Zusammenhang**, der einfach auf der Unschärferelation beruht, zwischen der **Ruheenergie** (m_0c^2) der Austauscheteilchen und ihrer 'Reichweite' R. Die Ruheenergie kann man ('virtuell') für eine Zeit $\Delta t = R/c$ aufbringen (hier ist impliziert, dass die Austauscheteilchen sich höchstens mit Lichtgeschwindigkeit c bewegen), gemäß der Unschärferelation:

$$m_0c^2 \Delta t = m_0c^2 R/c \approx h/2\pi \quad \rightarrow \quad R \approx hc / (2\pi m_0c^2) \quad (12.1)$$

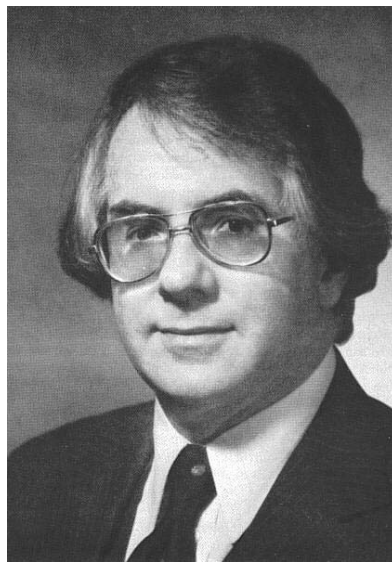
Da **Photonen und Gravitonen keine Ruheenergie** besitzen (sollen), ist ihre **Reichweite R** gemäß (12.1) **'unendlich'** (bei den Gluonen, deren Ruheenergie ebenfalls = 0 ist, ist die Lage komplizierter, da bei der starken Wechselwirkung (WW) die Kraft mit dem Abstand zunimmt, was zum 'confinement' führt). In der allerersten theoretischen Behandlung der **schwachen WW** (β -Zerfall) in den dreißiger Jahren nahm **Fermi** an, dass diese 'punktförmig' ist, also eine **Reichweite R = 0** hat. Dann müsste das Austauscheteilchen der schwachen WW die **Ruheenergie ∞** haben.



Enrico Fermi, Nobelpreis 1938, an der Konsole 'seines' weltweit ersten Kernreaktors in Chicago. Fermi war bisher wahrscheinlich **der einzige Physiker, der in Experiment und Theorie Spitzenleistungen erbrachte.**

12.1 Die drei Austauschteilchen der schwachen WW: W^- , W^+ , Z^0

Da Fermis Annahme einer unendlichen Ruheenergie der Austauschbosonen der schwachen WW natürlich letzten Endes unphysikalisch ist, machten sich etwa vierzig Jahre später **Glashow, Salam und Weinberg** daran, Fermis Theorie in eine realistischere Form zu bringen mit kleiner Reichweite R und demzufolge einer großen, aber **nicht unendlichen Ruheenergie** der Austauschteilchen. Gleichzeitig gelang es ihnen, die **elektromagnetische und schwache WW** in der '**elektro-schwachen**' WW zu **vereinigen**, womit zum ersten Mal eines der großen Ziele der Physik partiell erreicht war, nämlich die Vereinheitlichung der vier bekannten Wechselwirkungen.



Sheldon Lee Glashow, Harvard, Nobelpreis 1979



Abdus Salam, Triest, Nobelpreis 1979



Steven Weinberg, Harvard / Texas A & M, Nobelpreis 1979

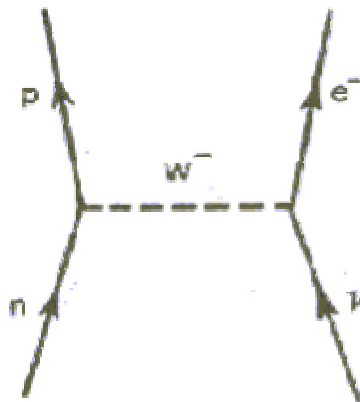
Die Konzepte der 'elektroschwachen' Vereinheitlichung von Glashow, Salam und Weinberg können hier nur in den Grundzügen dargestellt werden. Alle Details darzulegen kostete sehr viel Zeit, zumal sie auch mathematisch sehr anspruchsvoll sind; außerdem wollen wir auch hier den Schwerpunkt auf die Experimente legen.

Die schwache WW kennt man z.B. in den Formen des β^- und des β^+ -Zerfalls:

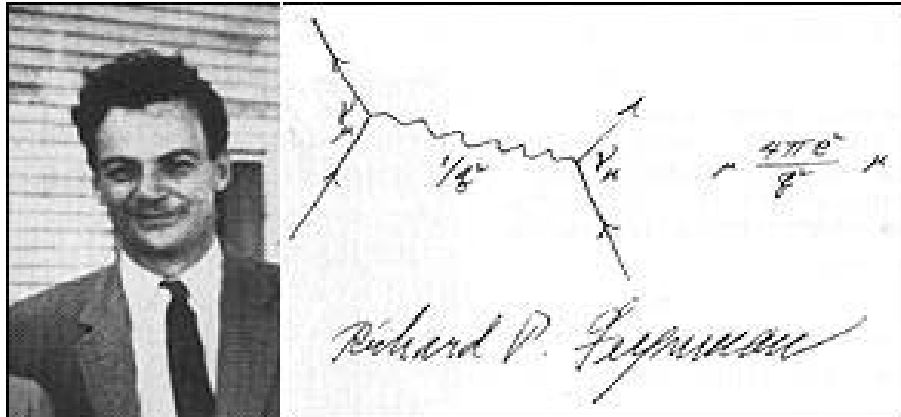
$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e \text{ (Antineutrino) oder } n + \nu_e \rightarrow p + e^- \quad (\beta^-)$$

$$p \rightarrow n + e^+ + \bar{\nu}_e \quad \text{oder} \quad p + e^- \rightarrow n + \nu_e \quad (\beta^+) \quad (12.2)$$

Diese beiden Zerfallsarten lassen sich als **Feynmandiagramme** (FD) darstellen, wobei hier nur die für den β^- -Zerfall gezeigt ist (nicht im Quarkbild):



Die Zeit läuft von unten nach oben. Ein Neutron (n) emittiert ein **negatives** Austauschboson (**W⁻**) der schwachen WW und wird dadurch zum Proton. Das W⁻ wird eine winzige Zeit später von einem **Elektron-Neutrino absorbiert**, das sich in ein Elektron (**e⁻**) umwandelt. Für den **β⁺-Zerfall** braucht man entsprechend ein **W⁺**. Diese WW nennt man den '**Austausch geladener Ströme**'.

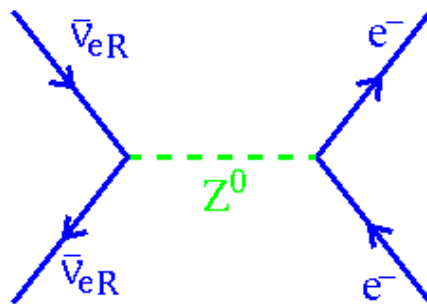


Richard P. Feynman 1918-1988, CALTEC, Nobelpreis 1965

Man braucht also für die Beschreibung von β⁻ und β⁺-Zerfall schon einmal **zwei geladene Austauschteilchen, W⁻ und W⁺**. Die Ruheenergie der W⁻-Bosonen hängt davon ab, was man für die Reichweite R der schwachen WW aus der Theorie ableitet oder vermutet. Im Modell von Glashow, Salam und Weinberg ergibt sich für **R eine Größenordnung von 10⁻³ fm**, woraus gemäß (12.1) für die **Ruheenergie der W⁻-Bosonen, m_Wc²**, die Größenordnung folgt:

$$m_{W}c^2 \approx \hbar c/R = 2 \times 10^8 \text{ [eV fm]} / (10^{-3} \text{ [fm]}) \approx 100 \text{ GeV} \quad (12.3)$$

Glashow, Salam und Weinberg postulierten nun aus Gründen, die später einsichtig werden, noch ein **drittes, neutrales** (ungeladenes) **Austauschteilchen**, das sie aber nicht W⁰, sondern **Z⁰** 'tauften' (s. später). Dann musste es aber auch einen '**Austausch neutraler Ströme**' geben, z.B. das folgende Feynmandiagramm:



Streuung eines Elektrons an einem ('Rechtshändigen')
Elektron-Antineutrino **durch Austausch eines Z⁰**

Diese Vorhersage 'neutraler Ströme' blieb lange Zeit ziemlich unbeachtet, bis man **1973 am CERN** tatsächlich **neutrale Ströme** in der Form der **Streuung von Myon-Neutrinos an Elektronen** (dasselbe, was später auch am **SNO** beobachtet wurde, s. Kapitel 11!) entdeckte, gemäß:

$$\nu_{\mu} + e^{-} \rightarrow \nu_{\mu} + e^{-} \quad (12.4)$$

Dies war zur damaligen Zeit eine echte Sensation. Ab sofort nahm man die Glashow-Salam-Weinberg Theorie 'ernst' und versuchte fieberhaft, die vorhergesagten **drei Austauscheteilchen zu entdecken**.

12.2. Die Entdeckung des W- Bosons 1983 am CERN durch Carlo Rubbia und Simon van der Meer

Es ist des Nachdenkens wert, zu fragen, ob die **'Austauschteilchen'** der fundamentalen Wechselwirkungen nicht etwa nur Gedankenbilde unserer physikalischen Theorie sind, oder aber **'real'**, d.h. mit Eigenschaften versehen, die man messen kann, wie **Masse, Lebensdauer** etc.

Die mit einer Ruhemasse von ca. $100 \text{ GeV}/c^2$ vorhergesagten W -Bosonen direkt im β -Zerfall zu 'sehen', ist ganz sicher ein hoffnungsloses Unterfangen. Da im β -Zerfall typischerweise **nur wenige MeV** frei werden, kann ein Teilchen mit einer Ruheenergie $m_0c^2 \approx 100 \text{ GeV}$ **nicht 'real'**, sondern nur 'virtuell' gemäß der Unschärferelation für eine Zeit

$$\begin{aligned} \Delta t \times m_0c^2 &\approx h/2\pi \rightarrow \Delta t \approx hc / (2\pi m_0c^2) 1/c \\ \rightarrow \Delta t &= 2 \times 10^8 / 10^{11} \text{ [fm]} \times \{3 \times 10^{23}\}^{-1} \text{ [s/fm]} \approx 10^{-26} \text{ s} \end{aligned} \quad (12.5)$$

erzeugt werden. Die einzige Möglichkeit, die bleibt, ist diese 100 GeV 'real' in einem **Stoß hochenergetischer Teilchen** bereitzustellen. Das 'einfachste' und sauberste Experiment dazu wäre, die erforderliche Energie in einem **e^+e^- Stoß** in einem **Elektron-Positron-Collider** zur Verfügung zu stellen. Dazu bräuchte man **etwa 100 GeV zur Erzeugung des Z^0** , aber **$2 \times 100 \text{ GeV}$ zur Erzeugung der geladenen W -Bosonen**, da sich diese an einem e^+e^- Collider wegen der Ladungserhaltung nur in 'ladungsneutralen' **W^+/W^- -Paaren** herstellen lassen.

Da es zu dieser Zeit am CERN den $e^+ - e^-$ Collider **LEP** (Large Electron- Positron-, oder Lepton-Collider) **noch nicht** gab (dieser außerdem 'nur' eine Maximalenergie von 118 GeV hatte), musste **Rubbia** nach einer anderen Möglichkeit suchen, ein W^- -Boson zu erzeugen.



Carlo Rubbia 1934*, CERN, Nobelpreis 1984

Schaut man auf die **Quark-Substruktur eines Protons (uud)** bzw. eines **Antiprotons (uud)_{anti}**, sieht man, dass in einem **Proton-Antiproton-Stoß** z. B. ein **u-Quark** (Ladung = $+ 2/3$) und ein **Anti- d-Quark** (Ladung = $+ 1/3$) zusammen die **Ladung +1** haben, bzw. ein **Anti- u-Quark** zusammen mit einem **d-Quark** die **Ladung -1**. In **hochenergetischen Proton-Antiproton-Stößen** müsste es also möglich sein, ein (positiv oder negativ) **geladenes W^- -Boson** zu erzeugen, seine Masse und seine Zerfallskanäle zu bestimmen.

Die große Frage war aber, wie sich ein Proton-Antiproton-Collider mit **energiescharfen Antiprotonen** herstellen ließ. Antiprotonen gibt es nicht in einer 'Ionenquelle', -sie werden in hochenergetischen Stößen produziert und haben danach eine breite Energie- und Winkelverteilung. Es war der am CERN tätige Physik-Ingenieur **Simon van der Meer**, der mit seiner **'stochastischen Kühlung'** Carlo Rubbia einen **'kalten' Antiprotonenstrahl** zur Verfügung stellte. Ohne diese geniale Erfindung van der Meers hätte es das Experiment, das 1983 zur Entdeckung des W^- -Bosons führte, nicht gegeben.

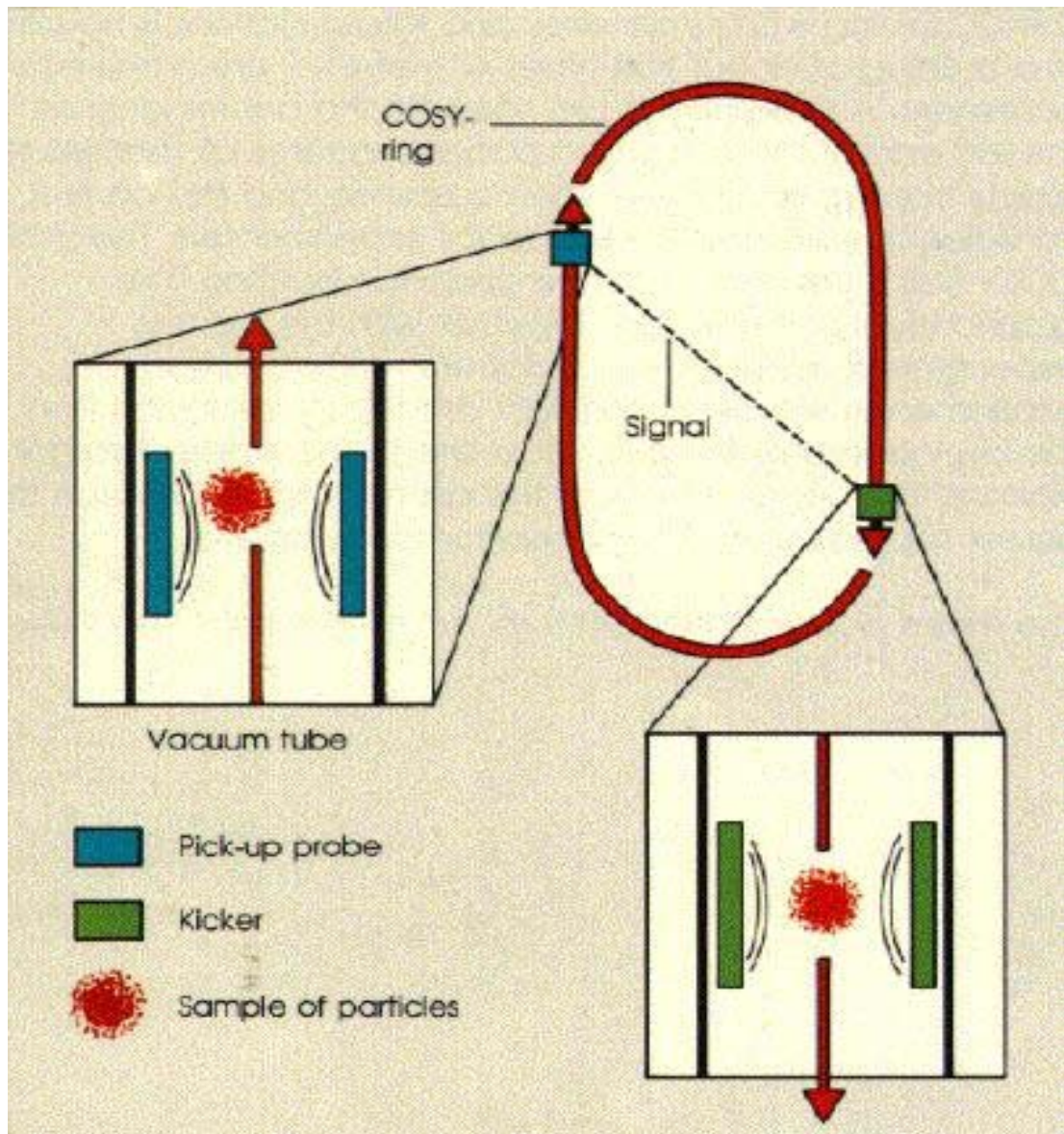
12.2.1 Simon van der Meers Herstellung eines 'gekühlten' Antiprotonenstrahls



Simon van der Meer 1925*, CERN, Nobelpreis 1984

Einen Teilchenstrahl **'kühlen'** heißt, seine Energiebreite, seine Winkeldivergenz und seinen Durchmesser ($\text{Winkeldivergenz} \times \text{Durchmesser} = \text{'Emittanz'}$) zu verkleinern, d.h. seine **'Phasenraumdichte' zu erhöhen**. Nach dem **Theorem von Liouville** ist aber die **Emittanz eines Strahls konstant**; d.h. man kann zwar seinen **Durchmesser verkleinern**, ihn 'fokussieren', wodurch man aber **notwendigerweise seine Winkeldivergenz vergrößert**. Entsprechendes gilt auch umgekehrt.

Man kann daher die Emittanz (und Energieschärfe) eines Teilchenstrahls nur durch eine **zusätzliche 'äußere' Wechselwirkung** mit einem dritten Medium, z.B. **Elektronen** ('Elektronenkühlung') oder **Laserstrahlen** ('Laserkühlung') verändern. Simon van der Meer erfand seine eigene Kühlmethode, die **'stochastische'**, die sich insbesondere für die **energiebreiten Antiprotonen** als **ideal** herausstellte.



Prinzip der 'stochastischen' Kühlung

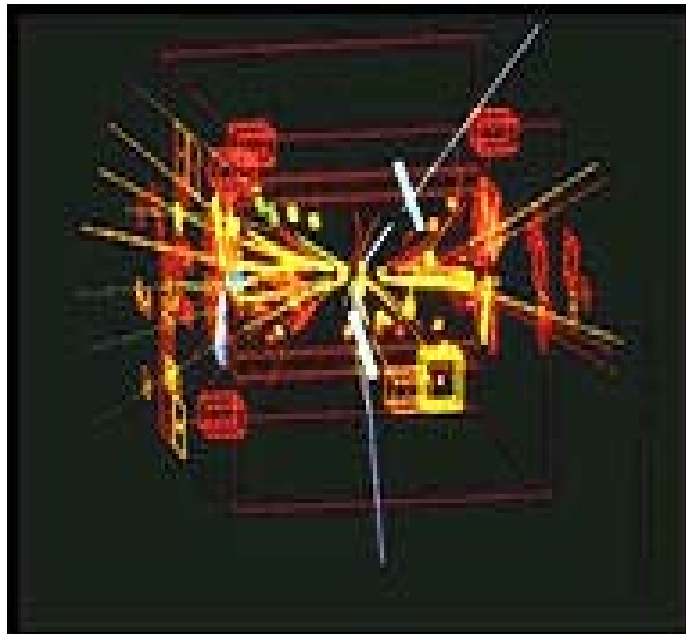
Mit einem Plattenpaar (Pick-up probe) misst man die **Strahlposition** im Speicherring. Weicht die Bahn von der 'Sollbahn' (im obigen Bild = Mitte der Apertur) ab, gibt man das **verstärkte Differenzsignal** von linker und rechter Platte noch im gleichen Umlauf an geeigneter Stelle (Kicker), nämlich $(n + 1/4) \lambda_B$ entfernt (λ_B = 'Betatron-Wellenlänge'), **als Korrektursignal** auf ein zweites Plattenpaar. Die Teilchen, die am pick-up 'falsch' lagen, werden dadurch auf die richtige Position gebracht (aber es werden dadurch auch die, die 'richtig' lagen, falsch 'korrigiert'). Van der Meer konnte nun zeigen, dass nach einer **mittleren Zeit** $\tau \propto N/B$ (N = Teilchenzahl, B = Bandbreite des Verstärkers) eine Strahlkühlung mit einer relativen Impulsunschärfe $\Delta p/p \approx 10^{-3}$ eintritt. Dies erlaubte es, Antiprotonen für viele Minuten, ja Stunden, in einem **Proton-Antiproton-Collider** zu speichern.

12.2.2. Rubbias Nachweis der W -Bosonen am Sp`pS des CERN

Am Super-Proton-Synchrotron SPS des CERN, das nach erfolgreicher Kühlung und Speicherung von Antiprotonen in Sp`pS (Super-Proton-Antiproton-Synchrotron) umgetauft wurde, gelang 1983 **Carlo Rubbia** und seiner Gruppe, sowie einer weiteren Gruppe, an den Detektoren UA1 bzw. UA2 die **Erzeugung**, der **Nachweis** und die erste **Massenbestimmung eines W -Bosons** über den Zerfall:



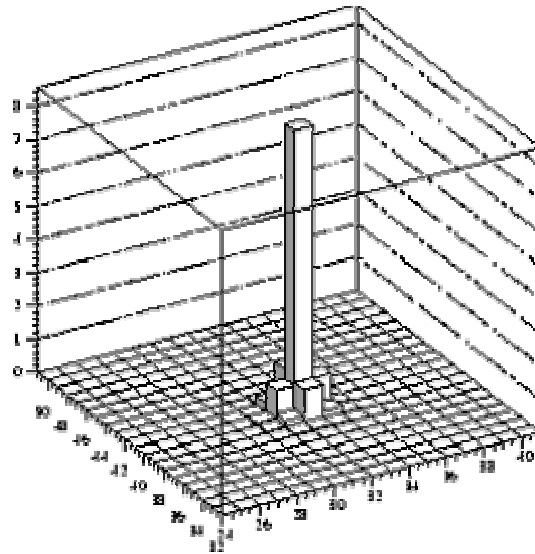
Die **Erzeugung** erfolgte, wie oben erläutert, in **frontalen Stößen von Protonen und Antiprotonen** über die dort vorhandenen **Quarks bzw. Antiquarks** ($u + \text{Anti-d} \rightarrow W^+$) Da die Quarks aber nur einen Bruchteil des Protonen- bzw. Antiprotonenimpulses 'tragen' (den Rest tragen die 'Gluonen' bzw. 'Seequarks'), musste man die Energie des (Anti)-Protonstrahls **erheblich höher** als die erwartete halbe Ruheenergie des W-Bosons ($1/2 M_W c^2 \approx 40 \text{ GeV}$) wählen; die Energie, die zum Erfolg führte, lag bei etwa **300 GeV** für die Protonen und die gegenläufig zirkulierenden Antiprotonen.



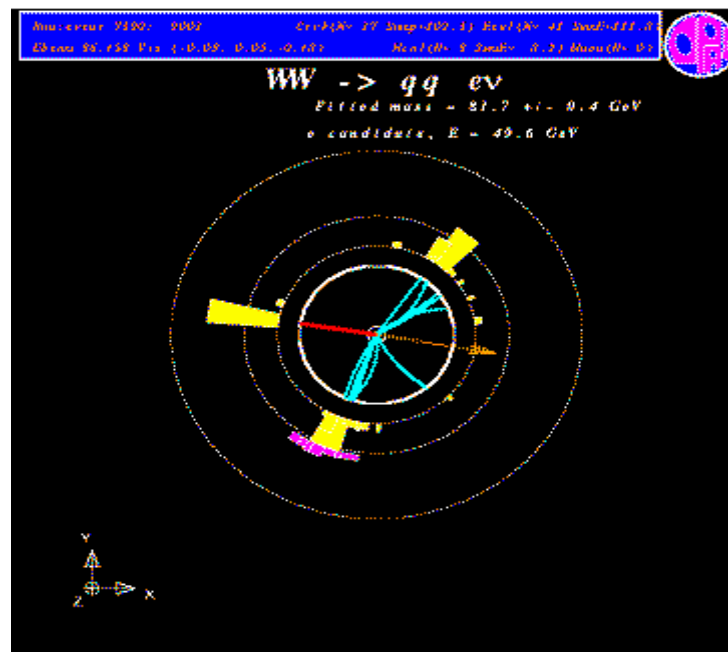
Simulation eines **W -Zerfalls** im Detektor UA1

Prinzipiell kann ein W -Boson in ein **Lepton-Antilepton- oder ein Hadron-Antihadron-Paar** zerfallen. Um solche Zerfälle eindeutig zu identifizieren, baut man zylindersymmetrisch um den Kollisionspunkt der Protonen und Antiprotonen große Detektoren, mit denen man die in einem starken Magnetfeld gekrümmten **Spuren der Zerfallsteilchen** (\rightarrow **Impuls, Ladung**) sowie ihre **Energie** messen kann. Der am 'leichtesten' zu identifizierende Zerfallsmodus des W ⁽⁺⁾ ist:

$W^+ \rightarrow e^+ + \nu_e$ (s. Gl. 12.6). Da das Neutrino dem Nachweis entgeht, misst man hier einen **großen Transversalimpuls** (den des Positrons e^+) **ohne entsprechendes 'Gegenstück'**. Der **maximal mögliche Transversalimpuls** eines Positrons e^+ , das aus obigem Zerfall eines W^+ stammt, ist $1/2 M_W c$ (Impuls- bzw. Energiesatz). Damit lässt sich aus solchen 'partnerlosen' transversalen Positronen (im Fachjargon: 'Lego-Soliton') schließlich die **Masse M_W des W^+ -Bosons** bestimmen.



'Lego-Diagramm' eines 'partnerlosen' Positrons aus dem W -Zerfall mit Transversalimpuls $\approx 1/2 M_W c$

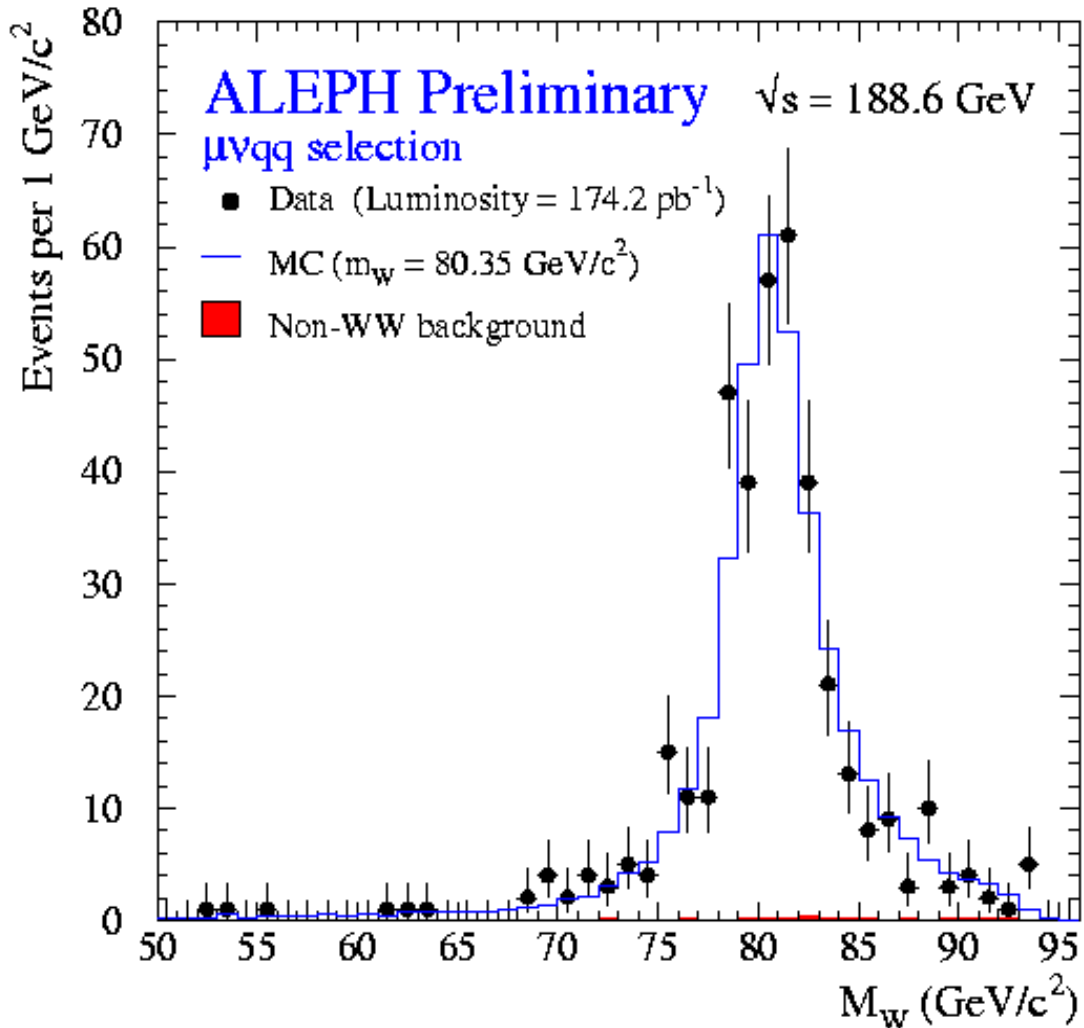


Zerfall eines $W^+ W^-$ -Paares in Quark/Antiquark (qq), e^+ und ν_e

Aus solchen Messungen ergab sich für die **Masse M_W** und die **Zerfallsbreite Γ_W** :

$$M_W c^2 = (80,22 \pm 0,26) \text{ GeV}$$

$$\Gamma_W = (2,12 \pm 0,11) \text{ GeV} \quad (12.7)$$



Bestimmung von M_W mit dem ALEPH -Detektor am CERN

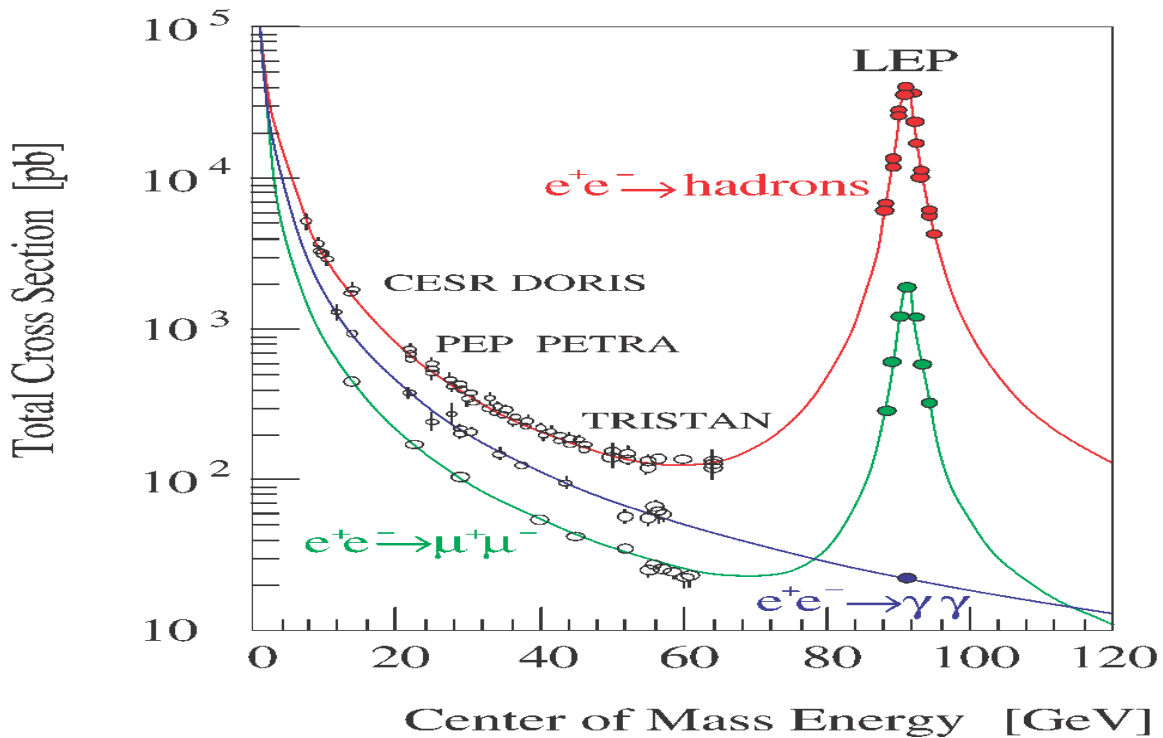
Einige Jahre später, als man **LEP** (Large Electron-Positron Ring) mit Energien bis zu **110 GeV für Elektronen und Positronen** zur Verfügung hatte, konnte man dort auch das dritte vorhergesagte Vektorboson, **Z^0** , erzeugen und genauestens vermessen. Hier gibt es u.a. den 'einfach' nachzuweisenden Bildungs- und Zerfallskanal:

$$e^+ + e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow e^+ + e^- \quad (12.8)$$

unterscheiden ?? Nun, wenn die **Gesamtenergie von einlaufendem Elektron und Positron** gerade **gleich der Ruheenergie $M_Z c^2$ des Z^0** ist, ist der **Reaktions** (Streu)-**querschnitt um viele Größenordnungen höher** als bei benachbarten Werten ('Resonanzmaximum').

Das Z^0 kann in alle **fundamentalen Fermion/Antifermion -Paare** (Elektron/Positron, Neutrino/Antineutrino, Quark/Antiquark) **zerfallen**. Daher war die genaue Bestimmung seiner **Masse $M_{Z^0} c^2 = (91,173 \pm 0,02)$ GeV**, **Zerfallsbreite $\Gamma_{Z^0} = (2,487 \pm 0,01)$ GeV** und seinen **Zerfallskanälen** die wichtigste Aufgabe der Elementarteilchenphysik im letzten Jahrzehnt. Insbesondere erkannte man aus der totalen Zerfallsbreite Γ_{Z^0} , dass es **genau drei fundamentale 'Familien'** (und die entspr. drei 'Antifamilien') gibt:

1. ν_e, e^-, u^-, d -Quark
2. ν_μ, μ^-, c^-, s -Quark
3. ν_τ, τ^-, t^-, b -Quark

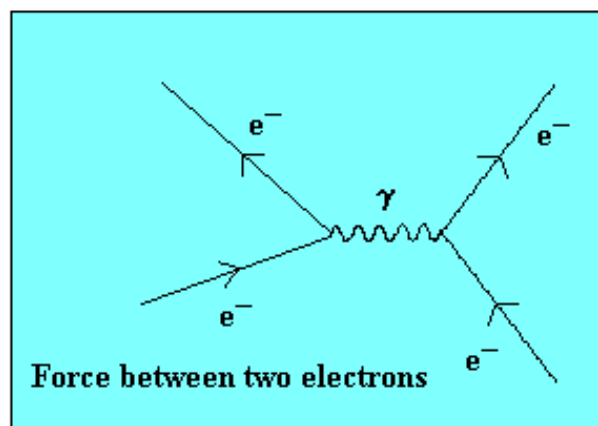
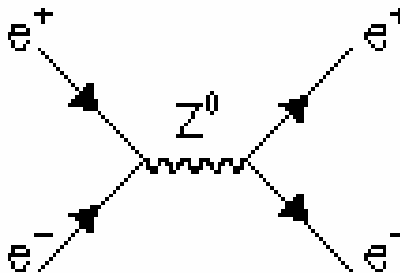


Bildung der Z^0 -Resonanz in e^+e^- -Kollisionen und Zerfall in **Hadronen** bzw. in **Leptonpaare** (z.B. $\mu^+\mu^-$). Daraus lässt sich die **Masse und totale Zerfallsbreite Γ des Z^0 Bosons** bestimmen.

12.3 Die 'elektroschwache Vereinheitlichung' von Glashow, Salam und Weinberg

Unser schneller Gang durch die 'Schlüsselexperimente' erlaubt es nicht, hier die Theorie der 'elektroschwachen Vereinheitlichung', die durch den Nachweis der drei Vektorbosonen W und Z^0 so glänzend bestätigt wurde, auch nur in groben Zügen darzulegen. Wir können hier aber erläutern, **wie und warum Glashow, Salam und Weinberg überhaupt darauf gekommen sind**, dass die **elektromagnetische und die schwache WW** eine **gemeinsame**, beide übergreifende **Grundlage** haben könnten.

Wenn man alle Typen der schwachen WW betrachtet, kann man den beteiligten Fermionen neue Quantenzahlen, den '**schwachen Isospin T_3** ' und die '**schwache Ladung g** ' zuordnen, die in allen schwachen WW erhalten bleiben. Man kann dann dem W^+ die '**schwache Isospinkomponente**' $T_3 = +1$, dem W^- $T_3 = -1$ und einem dritten Austauscheteilchen, W^0 , $T_3 = 0$ zuordnen. Nun sahen die Feynmangraphen für unser Z^0 einerseits und das Photon (γ) verblüffend ähnlich aus:



Feynmangraphen für **Photon (γ)** und **Z^0**

Jetzt kann man zwei Fragen stellen:

1. Was ist eigentlich der **Unterschied von Z^0 und dem Photon γ** ? Müssen sie nicht irgendetwas miteinander 'zu tun' haben ?
2. Warum nennen wir unser neutrales Vektorboson eigentlich ' **Z^0** ' und **nicht**, was doch naheläge, ' **W^0** ' ?

Die Antworten auf Frage (1) sind relativ naheliegend: das **Z^0** hat eine **große Ruhemasse**, das **Photon** dagegen **keine**; das **Z^0** ist das Austauscheteilchen der **paritätsverletzenden schwachen WW**, das **Photon** dasjenige der **elektro-magnetischen WW**, in der die **Parität nicht verletzt** ist. Andererseits sind ihre Feynmangraphen '**ununterscheidbar**'!! Eine tiefe Analyse dieser Paradoxie war für Glashow, Salam und Weinberg der Startpunkt, schwache und elektromagnetische WW zu 'vereinigen' und damit schließlich auch die Frage (2) zu beantworten:

a) **zusätzlich zum Triplett** [($T_3 = +1$ (W^+), $T_3 = -1$ (W^-), $T_3 = 0$ (W^0)] des 'schwachen Isospins' **$T = 1$** postuliert man ein weiteres Teilchen, **B^0** , einen **Singulettzustand** (**$T = 0$** , **$T_3 = 0$**) **des schwachen Isospins** mit einer '**schwachen Ladung**' **g'** .

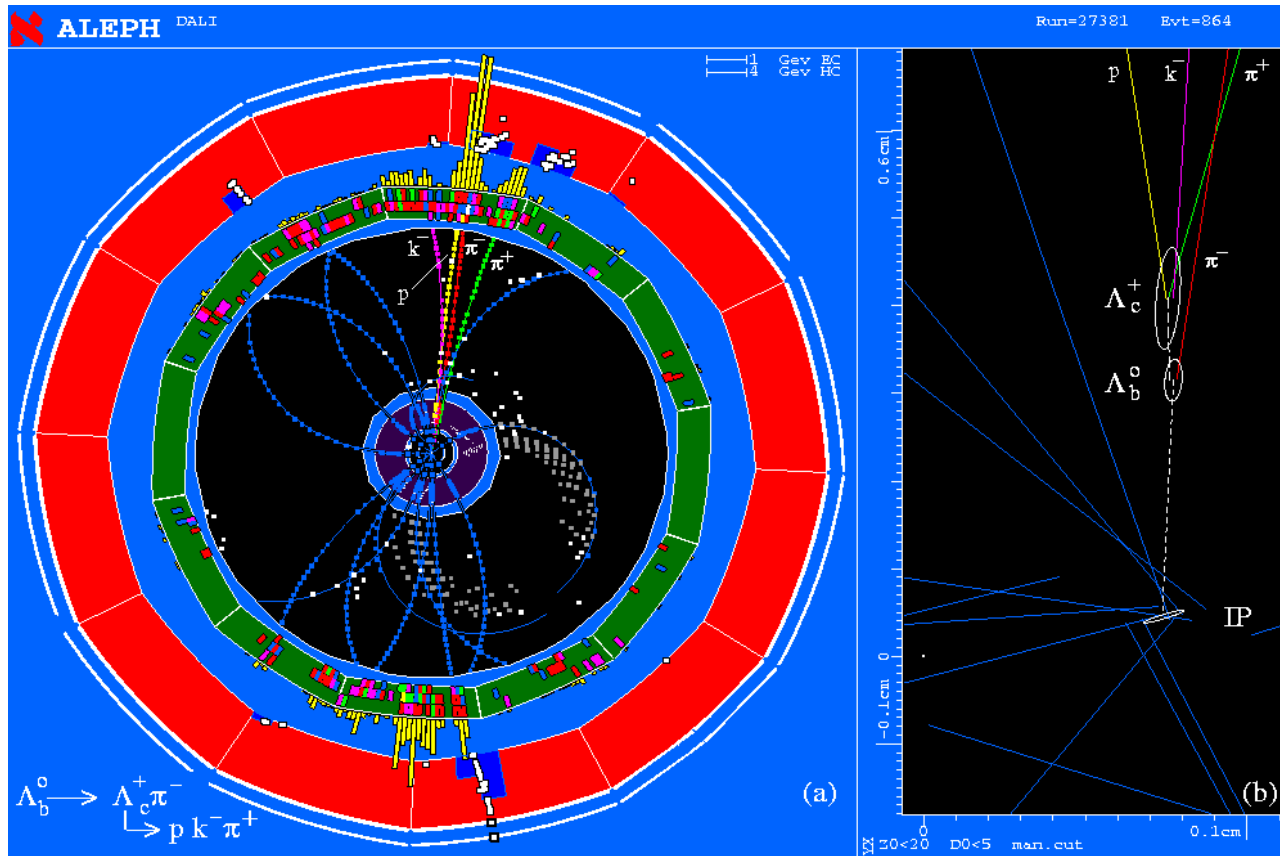
b) in der 'Wirklichkeit' kennen wir aber **weder B^0 , noch W^0** , sondern das **Photon γ** und **Z^0** . Der kühne Schritt der 'elektroschwachen Vereinheitlichung' war nun: **Photon** einerseits und **Z^0** andererseits als **unterschiedliche Linearkombinationen von W^0 und B^0** zu betrachten, aber so, dass das **Photon nur an die elektrische**, aber **nicht** an die schwachen Ladungen g, g' koppelt. Macht man das 'richtig', dann kann man das **Photon (γ)** bzw. das **Z^0** schreiben als:

$$|\gamma\rangle = A [g |B^0\rangle + g' |W^0\rangle]; \quad |Z^0\rangle = A [-g' |B^0\rangle + g |W^0\rangle]$$

$$\begin{array}{rcc} & & \text{bzw. als Matrix} \\ |\gamma\rangle & = & \begin{array}{cc} \cos \vartheta_w & \sin \vartheta_w \\ -\sin \vartheta_w & \cos \vartheta_w \end{array} \begin{array}{l} |B^0\rangle \\ |W^0\rangle \end{array} \\ |Z^0\rangle & & \end{array} \quad (12.9)$$

$$A = (g^2 + g'^2)^{-1/2}; \quad e = gg' (g^2 + g'^2)^{-1/2}; \quad = g \sin \vartheta_w; \quad \tan \vartheta_w = g'/g \approx 0,55$$

ϑ_w ist der 'Weinberg-Winkel'. Mit diesen Definitionen bzw. Normierungen erreicht man, dass das **Photon nur an die elektrische Ladung ' $e = g \sin \vartheta_w$ '** koppelt -wie gewünscht- und **masselos** bleibt, während das **Z^0 eine große Masse** erhält. Warum dies so ist ('**spontane Symmetriebrechung**' durch vier skalare '**Higgs-Bosonen**'; drei davon werden durch die W und das Z^0 'absorbiert'; nach dem **4., 'dem' Higgs-Boson**, wird an den Beschleunigern der Zukunft (LHC) gesucht werden), kann hier leider wegen der üblichen 'Zeitgründe' (schade!!) nicht näher erörtert werden.



Zerfall eines Z^0 , gebildet am Kollisionspunkt (IP) der e^+ - und e^- Strahlen im LEP, in ein Λ_0 - **Anti- Λ_0** - Paar. Die weiteren Zerfälle des $\Lambda_0 \rightarrow \Lambda^+ + \pi^-$, gefolgt vom Zerfall des $\Lambda^+ \rightarrow p + K^+ + \pi^+$ sind schematisch im rechten Teil und als Spuren im linken Teil des Bilds (oben) zu sehen. Unter 180° dazu (unten) erscheinen die **analoge Zerfälle des Anti- Λ_0** .