

1. Begrüßung
2. Thema

2018-11-30

Z⁰ Resonanz
└ Gliederung

└ Gliederung

Gliederung

Historischer Überblick

Theorie

Experimentelle Untersuchung

Zusammenfassung

1. Historie
2. Theorie
3. Messung/Experiment
4. Zusammenfassung

2018-11-30

Z⁰ Resonanz

└ Historischer Überblick

Historischer Überblick

Theorie

Experimentelle Untersuchung

Zusammenfassung

Zunächst Historie

1. Vereinheitlichung von elektr.magn. + schwache WW. Kräfteaustausch durch Photon, W^\pm , Z^0
2. 1979 Nobelpreis für GWS



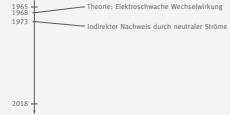
1979 Nobelpreis an Steven Weinberg,
Sheldon Glashow und Abdus Salam
[GWS]

Z⁰ Resonanz

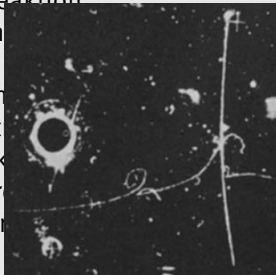
└ Historischer Überblick

└ Historischer Überblick

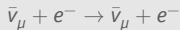
Historischer Überblick



1. Gargamelle-Blasenkammer am CERN
2. Striche und Kreise sind Lamben und Spiegel Reflexionen
3. Myonlose Neutrinoreaktion
4. Neutrale Ströme von Neutrinostrahl in Blasenkammer.
5. Neutronenstrahl durch Ladungsfilter
6. Photon nur bei elektromagnetischer Wechselwirkung (Strom, Z)
7. Vorhergesagter Winkel impliziert elektroschwache Wechselwirkung durch Z⁰
8. 700000 - Bilder über die Neutrinoreaktion.



Blasenkammer:



[HASERT1973121]

Z^0 Resonanz

└ Historischer Überblick

└ Historischer Überblick

Historischer Überblick



1. Am Large Electron Positron Collider
2. Nobelpreis für Carlo Rubbia and Simon van der Meer für experimentelle Beitrag Proton-Antiproton-Kollisionen
3. Mehr später
4. Weil führte mit zum Nachweis der Z und W Bosonen

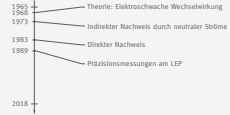
2018-11-30

Z^0 Resonanz

└ Historischer Überblick

└ Historischer Überblick

Historischer Überblick



1. Large Electron Positron Ring (CERN) Präzessionsmessungen
2. weiter Bestätigung der Theorie/Standardmodell und W-Z-Bosonen
3. bis 2000

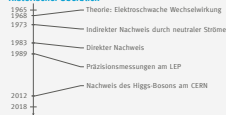
2018-11-30

Z^0 Resonanz

└ Historischer Überblick

└ Historischer Überblick

Historischer Überblick



1. Higgs Theorie in 60er-Jahren
2. 2013 Francois Englert und Peter Higgs Nobelpreis
3. Alle Nachweise am CERN!
4. Randnotiz

Das Standardmodell der Teilchenphysik

Generation	Quarks	Leptonen
1. Generation	u (up), d (down)	e (electron), ν _e (electron neutrino)
2. Generation	c (charm), s (strange)	μ (muon), ν _μ (muon neutrino)
3. Generation	t (top), b (bottom)	τ (tau), ν _τ (tau neutrino)

Eichbosonen: γ (Photon), g (Gluon), W[±], Z⁰

Higgs-Boson: H

Standardmodell (Standardmodel)

- lila(Quarks), grün(Leptonen), rot(Eichbosonen), gelb(Higgs)
- Generationen, Fermion , $s=1/2$
- Boson $s=1$
- Ladung Fermionen $2/3 -1/3 0 1$ Bosonen 0 außer $W \pm 1$
- Antiteilchen invers
-
- Masse steigt mit Generation
- schwache WW
- $W^{+-} \Rightarrow$ elek. Teilchen WW (beta Zerfall)
- $Z^0 \Rightarrow$ auch neutral Teilchen WW (Neutrino)
- Z^0 eigenes Antiteilchen
-
- Higgs aus Vollständigkeit

1. Warum? Weil Divergenzen in höherer Ordnung/Energien auftreten
2. Vereint QED mit schwacher WW.
3. Kräfte durch Austauschteilchen
4. Photon elektro magn. beispielweise Elektron-Elektron-Streuung, Rutherford Streuung
5. W,Z bsplw. Beta-Zerfall, Elektron-Positron-Streuung (Energieabhängig)
6. Gluon Kernzusammenhalt, Farbladung, 8 (n-p-Anziehung), Quarkanziehung

	Fermionenzustände		
Leptonen	$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}_L$
Quarks	$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}_L$

Schwacher Isospin (Quelle)

1. Einführung von schwachem Isospin, analogon zu starkem Isospin
2. Chiralität Index R/L formal: Zerlegung von Dirac-Spinoren in orthogonale Zustände die unter Paritätsoperationen ineinander übergehen. Eigenzustände ± 1
3. Rechtshändige e, μ, τ Singulett Zustand.
4. Chiralität (l/r), Spinor Symmetrie
5. Rechtshändige Neutrinos $T_3 = z = 0$, keine WW, Auftreten in Natur unbekannt
6. Der ' bedeutet \neq Masseneigenzustände, sondern Quarkmisch-Matrix CKM

2018-11-30 Z^0 Resonanz
 Theorie
 Elektroschwache Vereinheitlichung
 Elektroschwache Vereinheitlichung

Elektroschwache Vereinheitlichung
 Schwacher Isospin

	Fermionmultipletts			T
Leptonen	$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}_L$	$1/2$
	e_R	μ_R	τ_R	0
Quarks	$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} s \\ c \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} b \\ t \end{pmatrix}_L$	$1/2$
	u_R	c_R	t_R	0
	d_R	s_R	b_R	0

Schwacher Isospin $[SU(2)]$

1. Nur linkshändige Fermionmultipletts haben $T \neq 0$

2018-11-30 Z^0 Resonanz

- └ Theorie
 - └ Elektroschwache Vereinheitlichung
 - └ Elektroschwache Vereinheitlichung

Elektroschwache Vereinheitlichung
Schwacher Isospin

	Fermionenzugabe				T	T_3
Leptonen	$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}_L$		$1/2$	$+1/2$ $-1/2$
	ν_e	μ	τ		0	0
Quarks	$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} s \\ c \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}_L$		$1/2$	$+1/2$ $-1/2$
	u	s	b		0	0

Schwacher Isospin (gewalt)

1. T_3 Werte Bereich analog zu anderen Spins

	Fermionensingulett				T	T ₃	u _c
Leptonen	$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}_L$		1/2	0	+1/2
	e_R	μ_R	τ_R		0	0	-1/2
Quarks	$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}_L$		1/2	0	+2/3
	u_R	c_R	t_R		0	0	+2/3
	d_R	s_R	b_R		0	0	-1/3

Schwacher Isospin (gewalt)

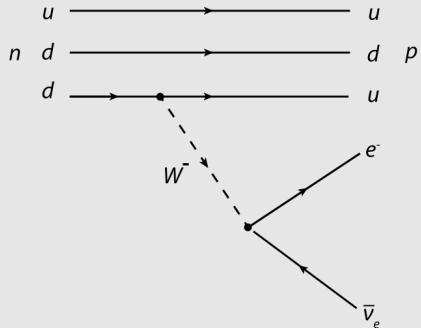
1. z_f beschreibt Ladung
2. invers für Antiteilchen: rechshändige Fermionen (linkshändige Antifermionen) Singulett ($T = 0 = T_3$)
3. Umwandlung durch Absorption von W^\pm -Boson innerhalb Multipllett (darin Ladungsdifferenz = 1)

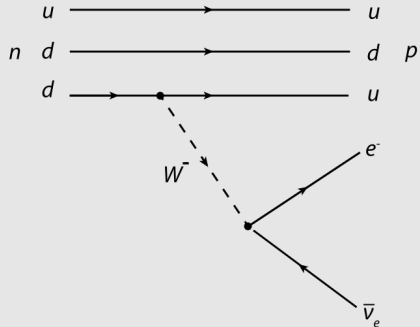
└ Theorie

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

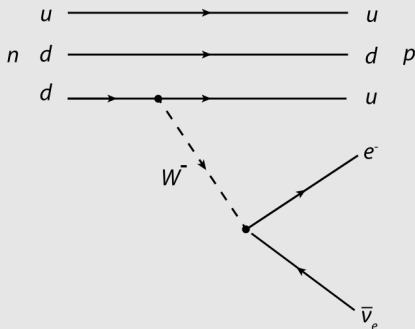
1. Bekannt aus schwacher WW

2. $d \rightarrow u + W^-$  β^- -Zerfall[beta]

1. T_3 Erhaltungsgröße β^- -Zerfall[beta]

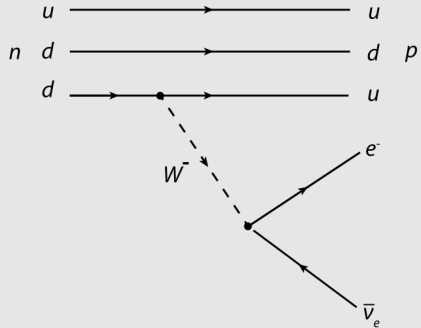
1. T: $d(-1/2) = W(?) + u(1/2)$

2. T: $W(?) = e(-1/2) + \bar{\nu}_e(-1/2)$

 β^- -Zerfall[**beta**]

- ▶ T_3 soll erhalten bleiben
- ▶ W^- : $T_3 \rightarrow -1$
- ▶ W^+ : $T_3 \rightarrow 1$

1. analog $u \rightarrow d + W^+$

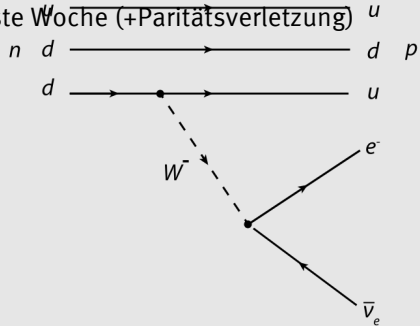


β^- -Zerfall[**beta**]

- ▶ T_3 soll erhalten bleiben
- ▶ W^{\pm} : $T_3 = \pm 1$
- ▶ W^0 : $T_3 = 0$
- ▶ W^0 : $(T = 1, T_3 = 0)$
- ▶ B^0 : $(T = 0, T_3 = 0)$

1. B^0 postuliert

2. Mehr zum Beta-Zerfall nächste Woche (+Paritätsverletzung)



β^- -Zerfall[beta]

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

1. Drehung um Weinberg-Winkel/elektroschwachen Mischungswinkel ,
Naturkonstante
2. spontane Symmetriebrechung, diagonalisierung der Massematrix
führt zu diesen.
3. orthogonal + linear Kombination

Z⁰ Resonanz

└ Theorie

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

Elektroschwache Vereinheitlichung

► Photon und Z⁰ als orthogonale Linearkombination von B⁰ und W⁰:

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

► Weinbergwinkel:

$$\cos\theta_W = \frac{M_W}{M_Z} \approx 0.88$$

1. experimentelle Bestimmung, später mehr
2. Masse für Z⁰ leichter zu Bestimmen, da W-Boson in Neutrino zerfällt.
 => bestimmung über fehlenden Transversalimpuls

Elektroschwache Vereinheitlichung

► Photon und Z⁰ als orthogonale Linearkombination von B⁰ und W⁰:

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

► Weinbergwinkel:

$$\cos\theta_W = \frac{M_W}{M_Z} \approx 0.88$$

► Gekoppelte Ladungen:

$$e = g \cdot \sin\theta_W$$

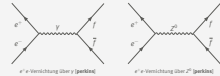
1. schwache Ladung g (Analogon zu e) aus schwache WW. aus QFT
2. beschreibbar durch elektrische und schwache Ladung
3. Umformung zu e/g und M/M

Z⁰ Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└└ Erzeugung

└└└ Erzeugung

Erzeugung
Feynman-Diagramme

- W/Z-Boson durch Antilepton+Lepton/AntiQuark+Quark Reaktion
- kollidierende Teilchenstrahlen
- feynman diagram
- Zeit nach rechts
- Antiteilchen Zeitlich invers (Aus Dirac-Gleichung (Schrödinger gleichung mit eingesetzter Impuls/Energie Relation wirkt auf vier komponentigen Dirac Spinor) ergeben sich positive und negative Lösungen für die Energie) (bzw. Klein Gordon Gleichung (entkoppelt)) nach Stückelberg-Feynman-Interpretation, bsplw. E-Feld e^- vs e^+ mit anderer Richtung ist gleich. (Dirac sagte Antiteilchen vorher/definierte, wobei negative Energien besetzt sind und Löcher sich ausbreiten basierend auf Pauli-Ausschlussprinzip, da Bosonen nicht gehorchen \Rightarrow reverse Zeit Interpretation)
- über yoder Z zu Fermion und Antifermion paar.
- bei passender Energie approx M_Z dominiert Z^0 , aus QFT+Feynmanregeln

2018-11-30

Z^0 Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Erzeugung

└ Erzeugung

Erzeugung

► $e^- + e^- \rightarrow Z^0$; Schwerpunktsenergie $\sqrt{s} = 2E_e \geq M_Z c^2 \approx 91.6 \text{ GeV}$

1. 1989 am Stanford Linear Collider und LEP

2018-11-30

Z^0 Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Erzeugung

└ Erzeugung

Erzeugung

- ▶ $e^- + e^- \rightarrow Z^0$: Schwerpunktsenergie $\sqrt{s} = 2E_e \geq M_Z c^2 \approx 91.6 \text{ GeV}$
- ▶ $u + \bar{u} \rightarrow Z^0$: pp-Kollision benötigt $E_p \gtrsim 600 \text{ GeV}$

1. Energie muss in Quarks enthalten sein \rightarrow sehr viel mehr Energie auf Protonen (analog mit d) \Rightarrow e-e+ Kollision einfacher

Z⁰ Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

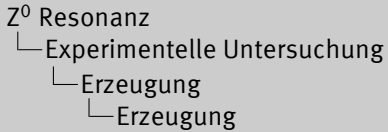
└ Erzeugung

└ Erzeugung

Erzeugung

▶ $e^+ + e^- \rightarrow Z^0$: Schwerpunktsenergie $\sqrt{s} = 2E_e \geq M_Z c^2 \approx 91.6 \text{ GeV}$ ▶ $u + \bar{u} \rightarrow Z^0$: pp -Kollision benötigt $E_p \gtrsim 600 \text{ GeV}$ ▶ $u + \bar{u} \rightarrow Z^0$: $p\bar{p}$ -Kollision benötigt $E_p \gtrsim 300 \text{ GeV}$

1. Besser Proton-Antiproton, da weniger Energie notwendig.
2. in Beschleuniger inverse Rotation

Z⁰ Resonanz

Erzeugung

- ▶ $e^+ + e^- \rightarrow Z^0$: Schwerpunktsenergie $\sqrt{s} = 2E_e \geq M_Z c^2 \approx 91.6 \text{ GeV}$
- ▶ $u + \bar{u} \rightarrow Z^0$: pp -Kollision benötigt $E_p \gtrsim 600 \text{ GeV}$
- ▶ $d + \bar{d} \rightarrow Z^0$: $p\bar{p}$ -Kollision benötigt $E_p \gtrsim 300 \text{ GeV}$
- ▶ $e^+ + e^- \rightarrow W^+ + W^-$: benötigt $2E_e \geq 2M_W c^2 \approx 160.8 \text{ GeV}$

1. Tritt nicht auf bei Energien $\approx 100 \text{ GeV}$
2. 1996 am LEP, $50 \rightarrow 86 \rightarrow 104,6 \text{ GeV}$

2018-11-30

Z⁰ Resonanz

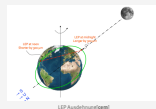
└ Experimentelle Untersuchung

└ Erzeugung

└ Erzeugung

Erzeugung

Einfluss auf Beschleuniger durch Gezeiten



1. weiter relevanter Effekt
2. Energie schwankt im Tagesverlauf
3. Grüne Linie ist grob Erddrotation

2018-11-30

Z⁰ Resonanz

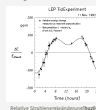
└ Experimentelle Untersuchung

└ Erzeugung

└ Erzeugung

Erzeugung

Einfluss auf Beschleuniger durch Gezeiten



1. Resonante depolarisation genaue Energiemessung (notwendig)
2. Über Verhalten des Spins der beschleunigten Elektronen
3. Größe primär relevant für Energie (+Synchrotron strahlung)

2018-11-30

Z^0 Resonanz

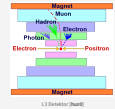
└ Experimentelle Untersuchung

└└ Nachweis

└└└ Nachweis

Nachweis

L3 Detektoraufbau am LEP



1. Analog Vorlesung, Hadronen Jets
2. Masse/Ladung durch Felder+ Drifts mit Magnetfeld

2018-11-30

Z^0 Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

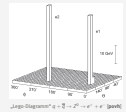
└ Nachweis

└ Nachweis

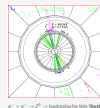
- nicht L3, aber analog
- Beispiel Event einer der ersten Messung
- Plane unten sind Kalorimeterzellen
- Energie Summe = Masse Z^0
- Winkel $180^\circ \Rightarrow$ entgegen gesetzte Richtungen

Nachweis

Entdeckung des Z^0 Bosons (1983 am CERN)



- └ Experimentelle Untersuchung
 - └ Präzessionsmessungen
 - └ Präzessionsmessungen



1. L3 detector LEP
2. beispielhafte Ereignisse
3. entlang der Strahlachse
4. Balken sind die Energien die Kalorimeter messen
5. Hadronische Jets, Farbladung nicht alleine vorkommend, immer neue Quark-Antiquark-Paare

2018-11-30

Z⁰ Resonanz

- └ Experimentelle Untersuchung
 - └ Präzessionsmessungen
 - └ Präzessionsmessungen

Präzessionsmessungen
L3 Detektor (1993 am LEP)



$e^+ + e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow e^+ + e^-$ (back)

1. herausgezoomt, weil Enrgie weniger verteilt
2. analog zu Lego
3. Winkel 180° => entgegen gesetzte Richtungen

2018-11-30

Z^0 Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Präzessionsmessungen

└ Präzessionsmessungen

Präzessionsmessungen

L3 Detektor (1993 am LEP)



$e^+e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ (BaBar)

1. Muon erst an äußeren Platten detektiert

Z^0 Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└└ Eigenschaften

└└└ Eigenschaften

Eigenschaften
Experimentelle Bestimmung► Messung:
► $M_Z = 91.188(2) \text{ GeV}/c^2$
► $\Gamma_Z = 2.495(2) \text{ GeV}$

1. Über Wirkungsquerschnitt? src [PD12]
2. Breite + Maximalstelle

Z^0 Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Eigenschaften

└ Eigenschaften

Eigenschaften

Experimentelle Bestimmung

► Messung:

► $M_Z = 91.188(3) \text{ GeV}/c^2$

► $\Gamma_Z = 2.495(2) \text{ GeV}$

► Zerfall:

$Z^0 \rightarrow e^- + e^+$	3.363(4) %
$\mu^- + \mu^+$	3.366(7) %
$\tau^- + \tau^+$	3.370(8) %
$\nu_{\mu,\mu,\tau} + \bar{\nu}_{\mu,\mu,\tau}$	20.0(6) %
Hadronen	69.91(6) %

1. Hadronen (idR. Anti+Quark) nicht unterscheidbar
2. Anti+Neutrino schwer detektierbar \Rightarrow % über Γ_{tot}

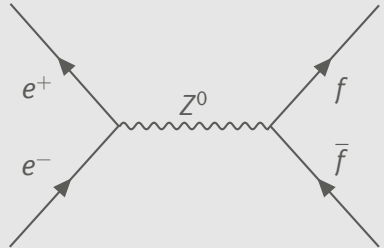
Z⁰ Resonanz

- └ Experimentelle Untersuchung
 - └ Anzahl Neutrinogenerationen
 - └ Anzahl Neutrinogenerationen

Anzahl Neutrinogenerationen
Wirkungsquerschnitt

$$\sigma_f = \frac{12\pi \cdot \Gamma_f \cdot \Gamma_e}{(s - M_Z^2)^2 + M_Z^2 \Gamma_Z^2}$$

1. Formel für σ Breit-Wigner
2. Einheiten \hbar und c multiplizieren
3. Abhängig von ...
4. γ unterdrückt



- └ Experimentelle Untersuchung
 - └ Anzahl Neutrinogenerationen
 - └ Anzahl Neutrinogenerationen

$$\Gamma_Z = \sum_i \Gamma_{Z \rightarrow i}$$

1. Breite ergibt sich aus Partial Breiten

Z^0 Resonanz

- └ Experimentelle Untersuchung
 - └ Anzahl Neutrino-Generationen
 - └ Anzahl Neutrino-Generationen

Anzahl Neutrino-Generationen
Zerfallsbreite

$$\Gamma_Z = \sum_f \Gamma_{Z \rightarrow f\bar{f}}$$

$$= \Gamma_{\nu_e \bar{\nu}_e} + \Gamma_{\nu_\mu \bar{\nu}_\mu} + \Gamma_{\nu_\tau \bar{\nu}_\tau}$$

1. kein top-Quark, da t-Masse ($\approx 175 \text{ GeV}$) größer als Z^0 -Masse ist

Z⁰ Resonanz

- └ Experimentelle Untersuchung
 - └ Anzahl Neutrinogenerationen
 - └ Anzahl Neutrinogenerationen

Anzahl Neutrinogenerationen

Zerfallsbreite

$$\begin{aligned}
 \Gamma_Z &= \sum_f \Gamma_{Z \rightarrow ff} \\
 &= \Gamma_{u_L u_L} + \Gamma_{u_R u_R} + \Gamma_{\nu_L \nu_L} \\
 &= N_C \cdot 2 \cdot \Gamma_u + N_C \cdot 3 \cdot \Gamma_d + 3 \cdot \Gamma_\nu + 3 \cdot \Gamma_\nu
 \end{aligned}$$

1. $\Gamma_f = \frac{G_F M_Z^3}{24\sqrt{2}\pi} \cdot (1 + (1 - e|Q_f| \sin^2 \theta_W)^2) = \frac{G_F M_Z^3}{24\sqrt{2}\pi} \cdot (1 + (1 - e|Q_f| \sin^2 \theta_W)^2)$
2. G_F Fermikonstante
3. Q_f Ladung des Fermions
4. Quantenmechanisch Herleitung der Formel nicht notwendig
5. primär von Ladung abhängig
6. Lep: e^\pm, μ^\pm, τ^\pm
7. Had: $u, c = 2/3$; $d, s, b = -1/3$
8. Neutrinos

Z⁰ Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Anzahl Neutrinogenerationen

└ Anzahl Neutrinogenerationen

Anzahl Neutrinogenerationen

Zerfallsbreite

$$\begin{aligned}
 \Gamma_Z &= \sum_f \Gamma_{Z \rightarrow ff} \\
 &= \Gamma_{u,d,s,c,b} + \Gamma_{\nu_e,\nu_\mu,\nu_\tau} \\
 &= N_C \cdot 2 \cdot \Gamma_u + N_C \cdot 3 \cdot \Gamma_d + 3 \cdot \Gamma_s + 3 \cdot \Gamma_c \\
 &= 3 \cdot 2 \cdot 94,9 \text{ MeV} + 3 \cdot 3 \cdot 122,4 \text{ MeV} + 3 \cdot 83,3 \text{ MeV} + 3 \cdot 165,8 \text{ MeV}
 \end{aligned}$$

1. Einsetzen, vgl Maximal für minimale Ladung $\Gamma_f = \frac{G_F M_Z^3}{24\sqrt{2}\pi} \cdot (1 + (1 - e|Q_f| \sin^2 \theta_W)^2)$

Z⁰ Resonanz

- └ Experimentelle Untersuchung
 - └ Anzahl Neutrino generationen
 - └ Anzahl Neutrino generationen

Anzahl Neutrino generationen

Zerfallsbreite

$$\begin{aligned}
 \Gamma_Z &= \sum_f \Gamma_{Z \rightarrow ff} \\
 &= \Gamma_{u,d,s,c,b} + \Gamma_{\nu_e,\nu_\mu,\nu_\tau} \\
 &= N_C \cdot 2 \cdot \Gamma_d + N_C \cdot 3 \cdot \Gamma_d + 3 \cdot \Gamma_s + 3 \cdot \Gamma_c \\
 &= 3 \cdot 2 \cdot 94,9 \text{ MeV} + 3 \cdot 3 \cdot 122,4 \text{ MeV} + 3 \cdot 83,3 \text{ MeV} + 3 \cdot 165,8 \text{ MeV} \\
 &= 2,42 \text{ GeV}
 \end{aligned}$$

1. Summe

$$\Gamma_f = \frac{G_F M_Z^3}{24\sqrt{2}\pi} \cdot (1 + (1 - e|Q_f| \sin^2 \theta_W)^2)$$

Z⁰ Resonanz

- └ Experimentelle Untersuchung
 - └ Anzahl Neutrinogenerationen
 - └ Anzahl Neutrinogenerationen

Anzahl Neutrinogenerationen

Zerfallsbreite

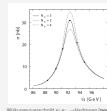
$$\begin{aligned}
 \Gamma_Z &= \sum_f \Gamma_{Z \rightarrow f\bar{f}} \\
 &= \Gamma_{u_L, d_L, u_R} + \Gamma_{d_R} + \Gamma_{\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau} \\
 &= N_C \cdot 2 \cdot \Gamma_u + N_C \cdot 3 \cdot \Gamma_d + 3 \cdot \Gamma_e + 3 \cdot \Gamma_\nu \\
 &= 3 \cdot 2 \cdot 94,9 \text{ MeV} + 3 \cdot 3 \cdot 122,4 \text{ MeV} + 3 \cdot 83,3 \text{ MeV} + 3 \cdot 165,8 \text{ MeV} \\
 &= 2,42 \text{ GeV} \\
 &\xrightarrow[\text{konstant}]{\text{Strahlung}} 2,497 \text{ GeV}
 \end{aligned}$$

1. Korrekturen aus QFT, höherer Ordnungen, Strahlungskorrektur
 $\Gamma_f = \frac{G_F^2 M_Z^3}{4\sqrt{2}\pi} (1 + (1 - e|Q_f| \sin^2 \theta_W)^2)$
2. Passt mit Unsicherheiten zu Exp. (nicht auf Folie)
3. $\Gamma_e / \Gamma_{tot} = 3,37\%$ passt auch zu Exp.

Z⁰ Resonanz

- └ Experimentelle Untersuchung
 - └ Anzahl Neutrino generationen
 - └ Anzahl Neutrino generationen

Anzahl Neutrino generationen



1. Cern Experiment
2. Wirkungsquerschnitt gegen Schwerpunktenergie
3. Ähnlich der Breit Wigner Funktion aber nicht passend symmetrisch durch Korrekturen höherer Ordnung und Bremsstrahlung durch e^-
4. Verschiedene Anzahl-Neutrino generationen-Kurven
5. 3 Neutrino generationen \rightarrow 3 Leptonen 3 Quarks Generationen

1. Weinbergwinkel Massenverhältniss W,Z Boson
2. Zerfallsbreite aus QFT großer Erfolg in Übereinstimmung mit Experiment
3. Bestätigung, dass es 3 Neutrinogenerationen gibt
4. Weiterführend Große Vereinheitlichung Analog ab $10^{16} \text{ GeV} \Rightarrow$ keine Differenzierung Fermionen, Quarks und Leptonen. (Astrovorträge, Universumentwicklungsröhre)
5. Noch Weiterführend Quantengravitation kombiniert mit GUT