

Z⁰-Resonanz

Alexander Neuwirth



1. Begrüßung
2. Thema

Gliederung

Historischer Überblick

Theorie

Experimentelle Untersuchung

Zusammenfassung

Z^0 Resonanz

2018-12-04

Z^0 Resonanz
└─ Gliederung

└─ Gliederung

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

Gliederung

Historischer Überblick

Theorie

Experimentelle Untersuchung

Zusammenfassung

Historischer Überblick

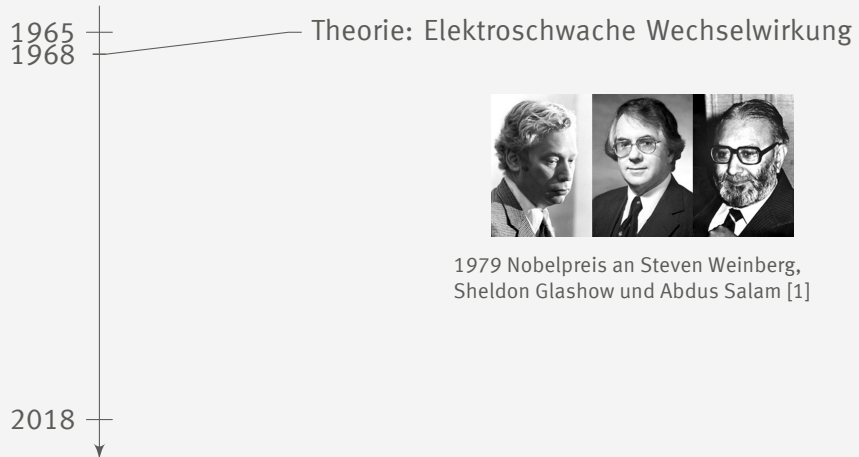
Theorie

Experimentelle Untersuchung

Zusammenfassung

- Zunächst Historie

Historischer Überblick



2018-12-04

Z^0 Resonanz

Historischer Überblick

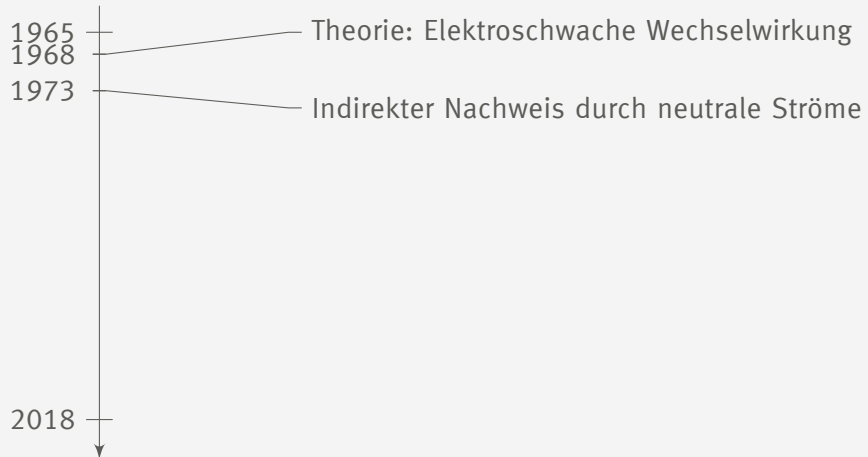
Historischer Überblick

Historischer Überblick



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

Historischer Überblick



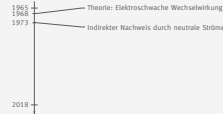
2018-12-04

Z^0 Resonanz

Historischer Überblick

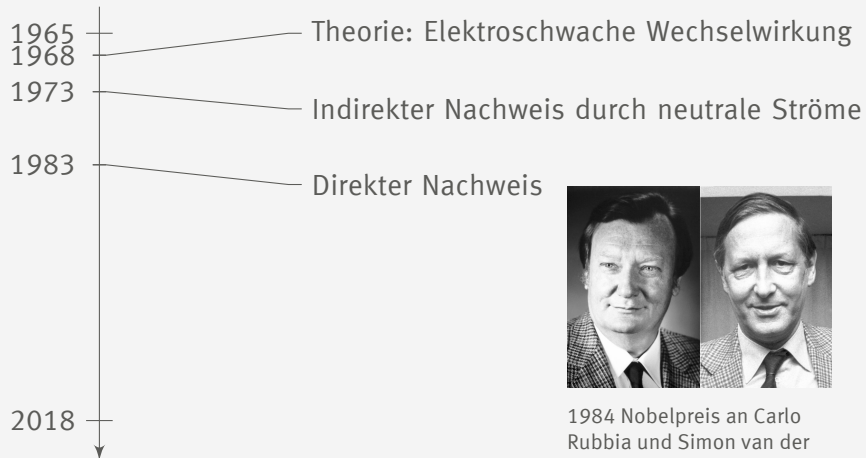
Historischer Überblick

Historischer Überblick



1. Gargamelle-Blasenkammer am CERN

Historischer Überblick



1984 Nobelpreis an Carlo Rubbia und Simon van der Meer [2]

2018-12-04

Z⁰ Resonanz

Historischer Überblick

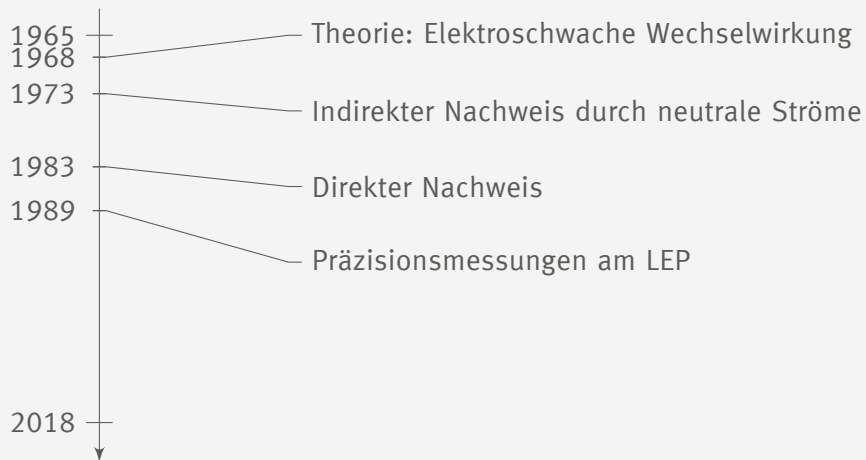
Historischer Überblick

Historischer Überblick



1. Am Large Electron Positron Collider, fokus
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

Historischer Überblick



2018-12-04

Z^0 Resonanz

Historischer Überblick

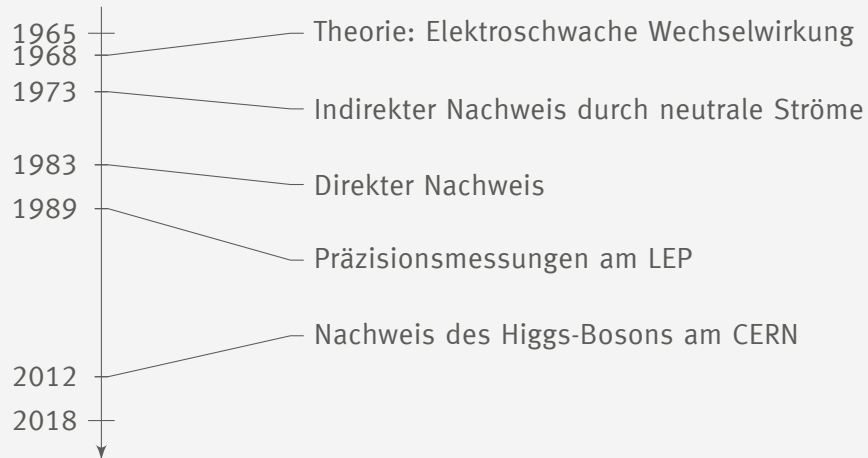
Historischer Überblick

Historischer Überblick



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

Historischer Überblick



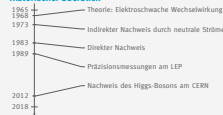
2018-12-04

Z⁰ 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

Historischer Überblick

Theorie

Einordnung im Standardmodell der Elementarteilchen
Elektroschwache Vereinheitlichung

Experimentelle Untersuchung

Zusammenfassung

Einordnung im Standardmodell der Elementarteilchen

Drei Generationen der Materie (Fermionen)

	I	II	III	
Masse →	2,3 MeV	1,275 GeV	173,07 GeV	0
Ladung →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
Spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Name →	up	charm	top	Photon
	4,8 MeV	95 MeV	4,18 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	down	strange	bottom	Gluon
	<2 eV	<0,19 MeV	<18,2 MeV	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0
	Elektron-Neutrino	Myon-Neutrino	Tau-Neutrino	Z ⁰ Boson
	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV	±1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	Elektron	Myon	Tau	W Boson

Z⁰-Boson:

- ▶ Halbwertszeit $t_{1/2} \approx 3 \cdot 10^{-25} \text{ s}$
- ▶ ungeladen
- ▶ eigenes Antiteilchen

Standardmodell[3]

2018-12-04

Z⁰ Resonanz

Theorie

Einordnung im Standardmodell der Elementarteilchen

Einordnung im Standardmodell der Elementarteilchen

Einordnung im Standardmodell der Elementarteilchen



Standardmodell[3]

- 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
- Nur durch Z-Boson lässt sich Neutrino-Neutrino-WW erklären, da sie nicht elektrisch sind.

Elektroschwache Vereinheitlichung

Austauschteilchen

- ▶ Photon → elektromagnetische Wechselwirkung
- ▶ Gluon → starke Wechselwirkung
- ▶ W,Z-Boson → schwache Wechselwirkung

Z^0 Resonanz

2018-12-04

Z^0 Resonanz

└ Theorie

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

Elektroschwache Vereinheitlichung
Austauschteilchen

- ▶ Photon → elektromagnetische Wechselwirkung
- ▶ Gluon → starke Wechselwirkung
- ▶ W,Z-Boson → schwache Wechselwirkung

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

Elektroschwache Vereinheitlichung

Schwacher Isospin

Z⁰ Resonanz

	Fermionmultipletts			T	T_3	z_f
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	0 -1
	e_R	μ_R	τ_R	0	0	-1
Quarks	$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix}_L$	1/2	+1/2 -1/2	+2/3 -1/3
	u_R	c_R	t_R	0	0	+2/3
	d_R	s_R	b_R	0	0	-1/3

Schwacher Isospin[4]

2018-12-04

Z⁰ Resonanz

└ Theorie

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

Elektroschwache Vereinheitlichung
Schwacher Isospin

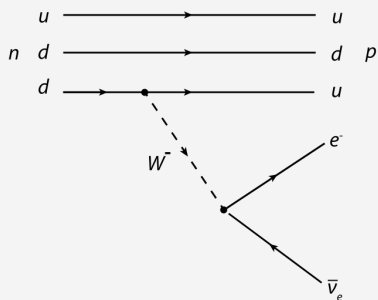
	Fermionmultipletts			T	T_3	z_f
Leptonen	$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}_L$	1/2	+1/2 -1/2	0 -1
	e_R	μ_R	τ_R	0	0	-1
Quarks	$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix}_L$	1/2	+1/2 -1/2	+2/3 -1/3
	u_R	c_R	t_R	0	0	+2/3
	d_R	s_R	b_R	0	0	-1/3

Schwacher Isospin[4]

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 != Masseneigenzustände, sondern Quarkmisch-Matrix CKM
7. T_3 Werte Bereich analog zu anderen Spins
8. z_f beschreibt Ladung
9. invers für Antiteilchen: rechshändige Fermionen (linkshändige Antifermionen) Singulett ($T = 0 = T_3$)
10. Umwandlung durch Absorption von W^\pm -Boson innerhalb Multiplett (darin Ladungsdifferenz = 1)

Elektroschwache Vereinheitlichung

Schwacher Isospin



β^- -Zerfall[5]

Z^0 Resonanz

2018-12-04

Z^0 Resonanz

Theorie

Elektroschwache Vereinheitlichung

Elektroschwache Vereinheitlichung

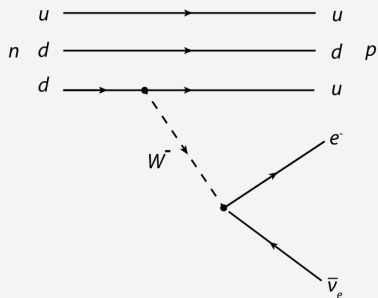
Elektroschwache Vereinheitlichung
Schwacher Isospin



1. Bekannt aus schwacher WW
2. $d \rightarrow u + W^-$

Elektroschwache Vereinheitlichung

Schwacher Isospin



► T_3 soll erhalten bleiben

β^- -Zerfall[5]

2018-12-04

Z^0 Resonanz

└ Theorie

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

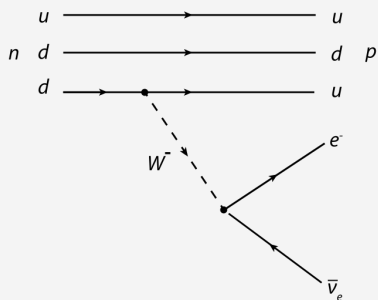
Elektroschwache Vereinheitlichung
Schwacher Isospin



1. T_3 Erhaltungsgröße

Elektroschwache Vereinheitlichung

Schwacher Isospin



β^- -Zerfall[5]

► T_3 soll erhalten bleiben

► $W^-: T_3 = -1$

Z^0 Resonanz

2018-12-04

Z^0 Resonanz

└ Theorie

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

Elektroschwache Vereinheitlichung
Schwacher Isospin

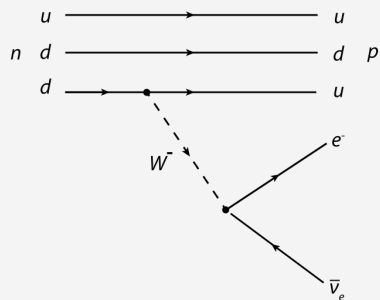


$$1. T: d(-1/2) = W(?) + u(1/2)$$

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

Elektroschwache Vereinheitlichung

Schwacher Isospin



β^- -Zerfall[5]

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

Z^0 Resonanz

2018-12-04

Z^0 Resonanz

└ Theorie

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

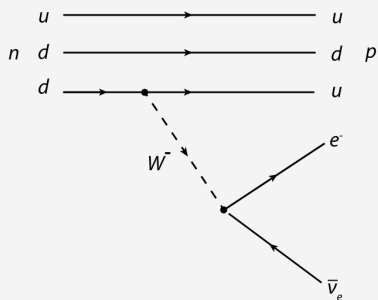
Elektroschwache Vereinheitlichung
Schwacher Isospin



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

Elektroschwache Vereinheitlichung

Schwacher Isospin



β^- -Zerfall[5]

- ▶ T_3 soll erhalten bleiben
- ▶ $W^-: T_3 = -1$
- ▶ $W^+: T_3 = 1$
- ▶ $W^0: (T = 1, T_3 = 0)$
- ▶ $B^0: (T = 0, T_3 = 0)$

Z^0 Resonanz

2018-12-04

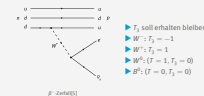
Z^0 Resonanz

Theorie

Elektroschwache Vereinheitlichung

Elektroschwache Vereinheitlichung

Elektroschwache Vereinheitlichung
Schwacher Isospin



- ▶ T_3 soll erhalten bleiben
- ▶ $W^-: T_3 = -1$
- ▶ $W^+: T_3 = 1$
- ▶ $W^0: (T = 1, T_3 = 0)$
- ▶ $B^0: (T = 0, T_3 = 0)$

1. B^0 postuliert
2. Mehr zum Beta-Zerfall nächste Woche (+Paritätsverletzung)

Elektroschwache Vereinheitlichung

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

$$|\gamma\rangle = +\cos\theta_W |B^0\rangle + \sin\theta_W |W^0\rangle$$

$$|Z^0\rangle = -\sin\theta_W |B^0\rangle + \cos\theta_W |W^0\rangle$$

2018-12-04

Z⁰ Resonanz

└ Theorie

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

Elektroschwache Vereinheitlichung

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

$$|\gamma\rangle = +\cos\theta_W |B^0\rangle + \sin\theta_W |W^0\rangle$$

$$|Z^0\rangle = -\sin\theta_W |B^0\rangle + \cos\theta_W |W^0\rangle$$

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

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:

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

2018-12-04

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:

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

2018-12-04

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:

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

► 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

Historischer Überblick

Theorie

Experimentelle Untersuchung

Erzeugung

Nachweis

Präzisionsmessungen

Eigenschaften

Anzahl Neutrinogenerationen

Zusammenfassung

2018-12-04

Z^0 Resonanz

Experimentelle Untersuchung

Historischer Überblick

Theorie

Experimentelle Untersuchung

Erzeugung

Nachweis

Präzisionsmessungen

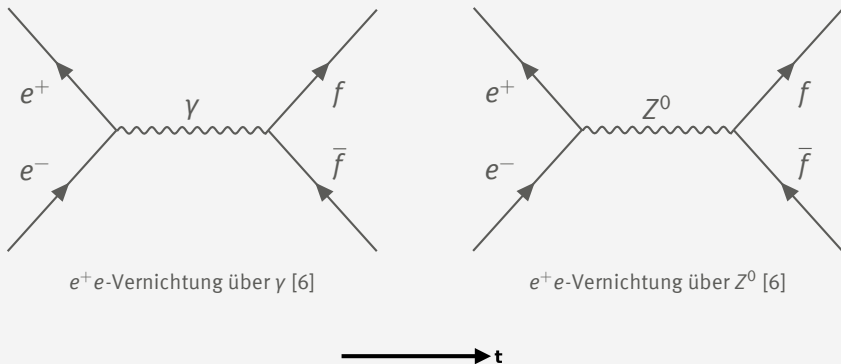
Eigenschaften

Anzahl Neutrinogenerationen

Zusammenfassung

Erzeugung Feynman-Diagramme

Z^0 Resonanz



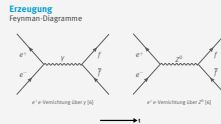
2018-12-04

Z^0 Resonanz

Experimentelle Untersuchung

Erzeugung

Erzeugung



- 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

Erzeugung

Z⁰ Resonanz

► LEP

- $e^- + e^+ \rightarrow Z^0$: Schwerpunktsenergie $\sqrt{s} = 2E_e \geq M_Z c^2 \approx 91,6 \text{ GeV}$
- $e^+ + e^- \rightarrow W^+ + W^-$: benötigt $2E_e \geq 2M_W c^2 \approx 160,8 \text{ GeV}$

2018-12-04

Z⁰ Resonanz

Experimentelle Untersuchung

Erzeugung

Erzeugung

Erzeugung

- LEP
- $e^- + e^+ \rightarrow Z^0$: Schwerpunktsenergie $\sqrt{s} = 2E_e \geq M_Z c^2 \approx 91,6 \text{ GeV}$
- $e^+ + e^- \rightarrow W^+ + W^-$: benötigt $2E_e \geq 2M_W c^2 \approx 160,8 \text{ GeV}$

1. 1989 am Stanford Linear Collider und LEP
2. Tritt nicht auf bei Energien $\approx 100 \text{ GeV}$
3. 1996 am LEP, $50 \rightarrow 86 \rightarrow 104,6 \text{ GeV}$

Erzeugung

Z⁰ Resonanz

► LEP

► $e^- + e^+ \rightarrow Z^0$: Schwerpunktsenergie $\sqrt{s} = 2E_e \geq M_Z c^2 \approx 91,6 \text{ GeV}$

► $e^+ + e^- \rightarrow W^+ + W^-$: benötigt $2E_e \geq 2M_W c^2 \approx 160,8 \text{ GeV}$

► SPS/Sp \bar{p} S

► $u + \bar{u} \rightarrow Z^0$: pp -Kollision benötigt $E_p \gtrsim 600 \text{ GeV}$

► $u + \bar{u} \rightarrow Z^0$: $p\bar{p}$ -Kollision benötigt $E_p \gtrsim 300 \text{ GeV}$

2018-12-04

Z⁰ Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Erzeugung

└ Erzeugung

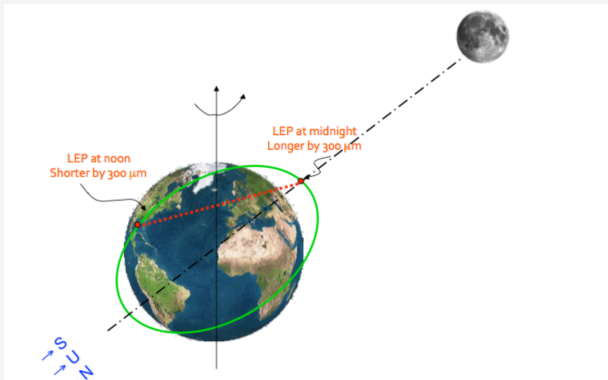
Erzeugung

- LEP
 - $e^- + e^+ \rightarrow Z^0$: Schwerpunktsenergie $\sqrt{s} = 2E_e \geq M_Z c^2 \approx 91,6 \text{ GeV}$
 - $e^+ + e^- \rightarrow W^+ + W^-$: benötigt $2E_e \geq 2M_W c^2 \approx 160,8 \text{ GeV}$
- SPS/Sp \bar{p} S
 - $u + \bar{u} \rightarrow Z^0$: 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. Energie muss in Quarks enthalten sein \rightarrow sehr viel mehr Energie auf Protonen (analog mit d) \Rightarrow e-e+ Kollision einfacher
2. Besser Proton-Antiproton, da weniger Energie notwendig.
3. in Beschleuniger inverse Rotation

Erzeugung

Einfluss auf Beschleuniger durch Gezeiten



LEP Ausdehnung[7]

Z^0 Resonanz

2018-12-04

Z^0 Resonanz

Experimentelle Untersuchung

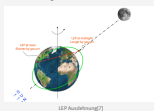
Erzeugung

Erzeugung

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

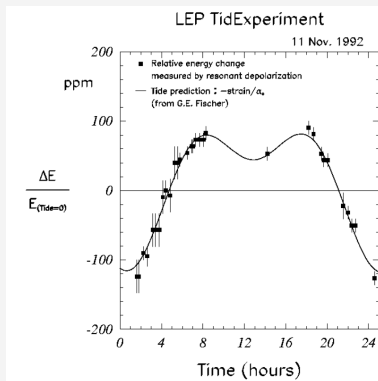
Erzeugung

Einfluss auf Beschleuniger durch Gezeiten



Erzeugung

Einfluss auf Beschleuniger durch Gezeiten



Relative Strahlenergieänderung[8]

Z^0 Resonanz

2018-12-04

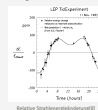
Z^0 Resonanz

Experimentelle Untersuchung

Erzeugung

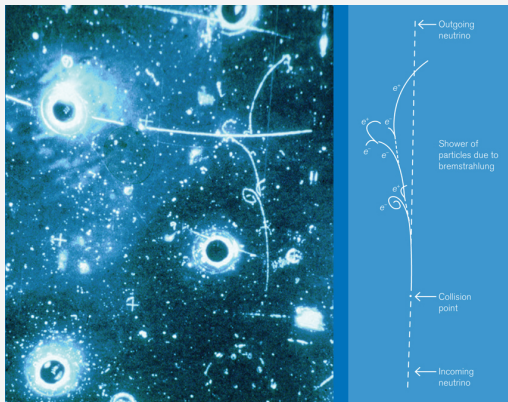
Erzeugung

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)

Nachweis durch neutrale Ströme



- ▶ Neutrinostrahl durch $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \bar{\nu}_\mu$
- ▶ Blasen-kammer:
 $\bar{\nu}_\mu + e^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu + e^-$
- ▶ Elektron sendet Bremsstrahlung aus
- ▶ $e^- e^+$ -Paarbildung \rightarrow elektromagnetischer Schauer

[9][10]

Z^0 Resonanz

2018-12-04

Z^0 Resonanz

Experimentelle Untersuchung

Nachweis

Nachweis

Nachweis
durch neutrale Ströme



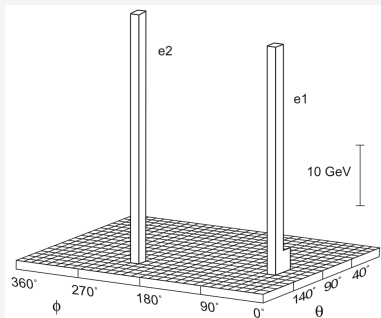
- ▶ Neutrinostrahl durch $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \bar{\nu}_\mu$
- ▶ Blasen-kammer:
 $\bar{\nu}_\mu + e^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu + e^-$
- ▶ Elektron sendet Bremsstrahlung aus
- ▶ $e^- e^+$ -Paarbildung \rightarrow elektromagnetischer Schauer

[9][10]

1. Striche und Kreise sind Lamben und Spiegel Reflexionen
2. Myonlose Neutrino-reaktion
3. Neutrale Ströme von links nach rechts Antineutrinostrahl in Blasen-kammer.
4. Neutrinostrahl durch bsplw. $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \bar{\nu}_\mu$ und Ladungsfilter
5. Photon nur bei elektr. Prozessen.(\Rightarrow neutraler Strom, Z)
6. Vorhergesagter Winkel und 1/3 Energie des e^- impliziert Wechselwirkung durch neutrale Ströme.
7. 700000 - Bilder überprüft. Spiral/Bremsstrahlung.

Nachweis

Entdeckung des Z^0 Bosons



„Lego-Diagramm“ $q + \bar{q} \rightarrow Z^0 \rightarrow e^+ + e^-$ [4]

- ▶ 1983 UA2 Detektor am Sp \bar{p} S
- ▶ Masse des Z^0 -Bosons entspricht der Summe der Energie von e^- und e^+
- ▶ Entgegengesetzte Impulse von e^- und e^+

Z^0 Resonanz

2018-12-04

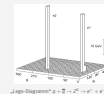
Z^0 Resonanz

Experimentelle Untersuchung

Nachweis

Nachweis

Nachweis
Entdeckung des Z^0 Bosons

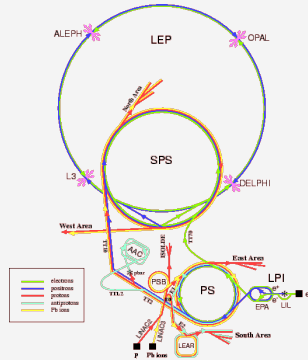


- ▶ 1983 UA2 Detektor am Sp \bar{p} S
- ▶ Masse des Z^0 -Bosons entspricht der Summe der Energie von e^- und e^+
- ▶ Entgegengesetzte Impulse von e^- und e^+

- 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

Präzisionsmessungen

Large Electron Positron Collider (LEP, 1989-2000)



Beschleuniger am CERN 1996 [11]

Z^0 Resonanz

2018-12-04

Z^0 Resonanz

Experimentelle Untersuchung

Präzisionsmessungen

Präzisionsmessungen

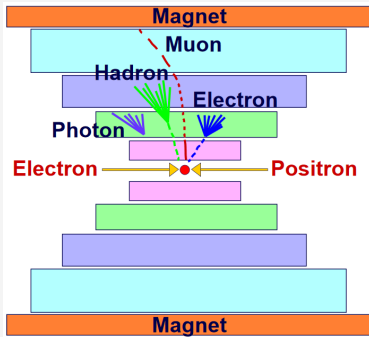
Präzisionsmessungen
Large Electron Positron Collider (LEP, 1989-2000)



1. LEP wurde zu LHC
2. L3 wurde zu ALICE
3. SppS von 1981 bis 1991 anstelle von SPS
4. Erzeugung, Lineare Beschleuniger und Vorstufen

Präzisionsmessungen

L3 Detektoraufbau am LEP



L3 Detektor [8]

Von Innen nach Außen:

1. Spurdetektor
2. Elektromagnetisches Kalorimeter
3. Hadronisches Kalorimeter
4. Myonkammer

Z^0 Resonanz

2018-12-04

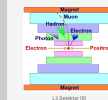
Z^0 Resonanz

Experimentelle Untersuchung

Präzisionsmessungen

Präzisionsmessungen

Präzisionsmessungen
L3 Detektoraufbau am LEP

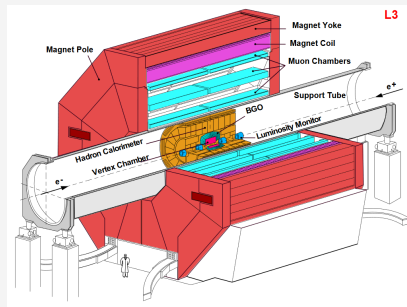


Von Innen nach Außen:
1. Spurdetektor
2. Elektromagnetisches Kalorimeter
3. Hadronisches Kalorimeter
4. Myonkammer

1. Alles in Magnetfeld
2. Spurdetektor: misst elektrische Teilchen
3. Krümmung gibt Impuls und Ladung
4. EM Kalorimeter: Energie von Elektron und Photon, EM Teilchen wird absorbiert
5. Had Kalorimeter: Energie von Hadronen, starke WW Teilchen werden absorbiert
6. Myonkammern: Für Myonen, groß, weil geringe WW
7. Vortrag speziell zur Teilchendetektion

Präzisionsmessungen

L3 Detektoraufbau am LEP



L3 Detektor [8]

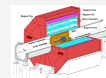
Z^0 Resonanz

2018-12-04

Z^0 Resonanz
 └ Experimentelle Untersuchung
 └ Präzisionsmessungen
 └ Präzisionsmessungen

Präzisionsmessungen

L3 Detektoraufbau am LEP

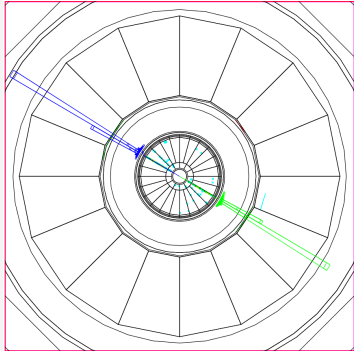


L3 Detektor [8]

1. Mensch für Größenverhältnis.
2. Magnet im ALICE wieder verwendet.

Präzisionsmessungen

L3 Detektor (1993 am LEP)



$$e^- + e^+ \rightarrow Z^0 \rightarrow e^- + e^+ [8]$$

- ▶ Energiemessung im elm. Kalorimeter
- ▶ Entgegengesetzte Ausbreitung

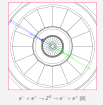
Z^0 Resonanz

2018-12-04

Z^0 Resonanz

- └ Experimentelle Untersuchung
 - └ Präzisionsmessungen
 - └ Präzisionsmessungen

Präzisionsmessungen
L3 Detektor (1993 am LEP)

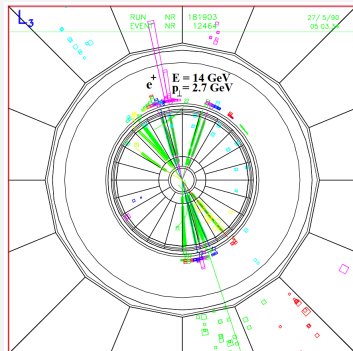


- ▶ Energiemessung im elm. Kalorimeter
- ▶ Entgegengesetzte Ausbreitung

1. L3 Detektor LEP
2. beispielhafte Ereignisse
3. entlang der Strahlachse
4. analog zu Lego
5. herausgezoomt, weil Enrgie weniger verteilt
6. Winkel $180^\circ \Rightarrow$ entgegen gesetzte Richtungen
7. Balken sind die Energien die Kalorimeter messen

Präzisionsmessungen

L3 Detektor (1993 am LEP)



$e^- + e^+ \rightarrow Z^0 \rightarrow \text{hadronische Jets}$ [8]

- ▶ Einzelnes Quark führt zu Quark-Antiquark-Paar Erzeugung, um isolierte Farbladung zu verhindern (Confinement)
- ▶ Reaktion äußert sich in hadronische Jets
- ▶ Energiemessung im Hadronischen Kalorimeter

2018-12-04 Z^0 Resonanz

- └ Experimentelle Untersuchung
- └ Präzisionsmessungen
- └ Präzisionsmessungen

Präzisionsmessungen
L3 Detektor (1993 am LEP)

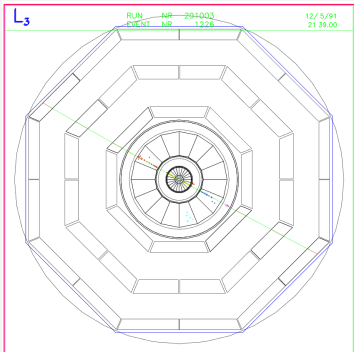


- ▶ Einzelnes Quark führt zu Quark-Antiquark-Paar Erzeugung, um isolierte Farbladung zu verhindern (Confinement)
- ▶ Reaktion äußert sich in hadronische Jets
- ▶ Energiemessung im Hadronischen Kalorimeter

1. Hadronische Jets, Farbladung nicht alleine vorkommend, immer neue Quark-Antiquark-Paare (Confinement)

Präzisionsmessungen

L3 Detektor (1993 am LEP)



$$e^- + e^+ \rightarrow Z^0 \rightarrow \mu^+ + \mu^- [8]$$

- ▶ Messung der Spur der Myonen durch mehrere Myonkammern
- ▶ I.A. keine Absorption

Z^0 Resonanz

2018-12-04

Z^0 Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Präzisionsmessungen

└ Präzisionsmessungen

Präzisionsmessungen
L3 Detektor (1993 am LEP)

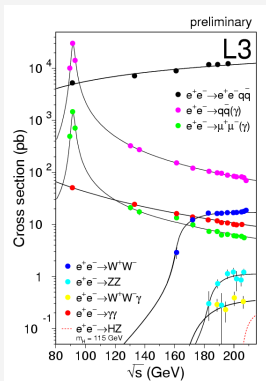


- ▶ Messung der Spur der Myonen durch mehrere Myonkammern
- ▶ I.A. keine Absorption

$$e^- + e^+ \rightarrow Z^0 \rightarrow \mu^+ + \mu^- [8]$$

1. Muon erst an äußeren Platten detektiert

Präzisionsmessungen



Wirkungsquerschnitte bei e^-e^+ Kollision [12]

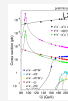
Z^0 Resonanz

2018-12-04

Z^0 Resonanz
└ Experimentelle Untersuchung
└ Präzisionsmessungen
└ Präzisionsmessungen

► Z^0 Resonanz bei $\approx 91 \text{ GeV}$

Präzisionsmessungen



► Z^0 Resonanz bei $\approx 91 \text{ GeV}$

Wirkungsquerschnitte bei e^-e^+ Kollision [12]

1. Achsen + Farbliche Zuordnung
2. Z^0 Resonanz und weitere Messungen

Eigenschaften

Experimentelle Bestimmung

► Messung:

- $M_Z = 91,188(2) \text{ GeV}/c^2$
- $\Gamma_Z = 2,495(2) \text{ GeV}$

Z^0 Resonanz

2018-12-04

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

Eigenschaften

Experimentelle Bestimmung

► Messung:

► $M_Z = 91,188(2) \text{ GeV}/c^2$

► $\Gamma_Z = 2,495(2) \text{ GeV}$

► Zerfall:

$Z^0 \rightarrow e^- + e^+$	3,363(4) %
$\mu^- + \mu^+$	3,366(7) %
$\tau^- + \tau^+$	3,370(8) %
$\nu_{e,\mu,\tau} + \bar{\nu}_{e,\mu,\tau}$	20,0(6) %
Hadronen	69,91(6) %

Z⁰ Resonanz

2018-12-04

Z⁰ Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Eigenschaften

└ Eigenschaften

Eigenschaften

Experimentelle Bestimmung

► Messung:

► $M_Z = 91,188(2) \text{ GeV}/c^2$

► $\Gamma_Z = 2,495(2) \text{ GeV}$

► Zerfall:

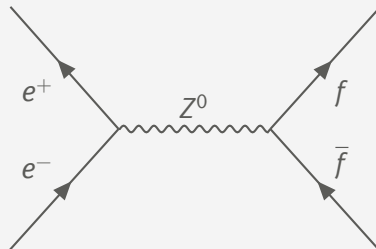
$Z^0 \rightarrow e^- + e^+$	3,363(4) %
$\mu^- + \mu^+$	3,366(7) %
$\tau^- + \tau^+$	3,370(8) %
$\nu_{e,\mu,\tau} + \bar{\nu}_{e,\mu,\tau}$	20,0(6) %
Hadronen	69,91(6) %

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

Anzahl Neutrino-Generationen

Wirkungsquerschnitt

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



2018-12-04

Z⁰ Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Anzahl Neutrino-Generationen

└ Anzahl Neutrino-Generationen

Anzahl Neutrino-Generationen
Wirkungsquerschnitt

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

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

Anzahl Neutrinogenerationen

Zerfallsbreite

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

Z^0 Resonanz

2018-12-04

Z^0 Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Anzahl Neutrinogenerationen

└ Anzahl Neutrinogenerationen

Anzahl Neutrinogenerationen
Zerfallsbreite

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

1. Breite ergibt sich aus Partial Breiten

Anzahl Neutrino-Generationen

Zerfallsbreite

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

$$= \Gamma_{u,c,d,s,b} + \Gamma_{e,\mu,\tau} + \Gamma_{\nu_e,\nu_\mu,\nu_\tau}$$

Z^0 Resonanz

2018-12-04

Z^0 Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Anzahl Neutrino-Generationen

└ Anzahl Neutrino-Generationen

Anzahl Neutrino-Generationen
Zerfallsbreite

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

$$= \Gamma_{u,c,d,s,b} + \Gamma_{e,\mu,\tau} + \Gamma_{\nu_e,\nu_\mu,\nu_\tau}$$

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

Anzahl Neutrinogenerationen

Zerfallsbreite

$$\begin{aligned}\Gamma_Z &= \sum_f \Gamma_{Z \rightarrow f\bar{f}} \\ &= \Gamma_{u,c,d,s,b} + \Gamma_{e,\mu,\tau} + \Gamma_{\nu_e,\nu_\mu,\nu_\tau} \\ &= N_C \cdot 2 \cdot \Gamma_u + N_C \cdot 3 \cdot \Gamma_d + 3 \cdot \Gamma_e + N_\nu \cdot \Gamma_\nu\end{aligned}$$

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

2018-12-04

Z⁰ Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Anzahl Neutrinogenerationen

└ Anzahl Neutrinogenerationen

Anzahl Neutrinogenerationen
Zerfallsbreite
 $\Gamma_Z = \sum_f \Gamma_{Z \rightarrow f\bar{f}}$
 $= \Gamma_{u,c,d,s,b} + \Gamma_{e,\mu,\tau} + \Gamma_{\nu_e,\nu_\mu,\nu_\tau}$
 $= N_C \cdot 2 \cdot \Gamma_u + N_C \cdot 3 \cdot \Gamma_d + 3 \cdot \Gamma_e + N_\nu \cdot \Gamma_\nu$

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

Anzahl Neutrino-Generationen

Zerfallsbreite

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

2018-12-04

Z⁰ Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Anzahl Neutrino-Generationen

└ Anzahl Neutrino-Generationen

Anzahl Neutrino-Generationen

Zerfallsbreite

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

1. Einsetzen, vgl Maximal für minimale Ladung

Anzahl Neutrino-Generationen

Zerfallsbreite

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

2018-12-04

Z⁰ Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Anzahl Neutrino-Generationen

└ Anzahl Neutrino-Generationen

Anzahl Neutrino-Generationen

Zerfallsbreite

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

1. Summe

Anzahl Neutrinogenerationen

Zerfallsbreite

$$\begin{aligned}\Gamma_Z &= \sum_f \Gamma_{Z \rightarrow f\bar{f}} \\ &= \Gamma_{u,c,d,s,b} + \Gamma_{e,\mu,\tau} + \Gamma_{\nu_e,\nu_\mu,\nu_\tau} \\ &= N_C \cdot 2 \cdot \Gamma_u + N_C \cdot 3 \cdot \Gamma_d + 3 \cdot \Gamma_e + N_\nu \cdot \Gamma_\nu \\ &= 3 \cdot 2 \cdot 94,9 \text{ MeV} + 3 \cdot 3 \cdot 122,4 \text{ MeV} + 3 \cdot 83,3 \text{ MeV} + 3 \cdot 165,8 \text{ MeV} \\ &= 2,42 \text{ GeV} \\ \text{Strahlungs-} &\xrightarrow{\text{korrektur}} 2,497 \text{ GeV}\end{aligned}$$

2018-12-04

Z⁰ Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└└ Anzahl Neutrinogenerationen

└└└ Anzahl Neutrinogenerationen

Anzahl Neutrinogenerationen

Zerfallsbreite

$$\begin{aligned}\Gamma_Z &= \sum_f \Gamma_{Z \rightarrow f\bar{f}} \\ &= \Gamma_{u,c,d,s,b} + \Gamma_{e,\mu,\tau} + \Gamma_{\nu_e,\nu_\mu,\nu_\tau} \\ &= N_C \cdot 2 \cdot \Gamma_u + N_C \cdot 3 \cdot \Gamma_d + 3 \cdot \Gamma_e + N_\nu \cdot \Gamma_\nu \\ &= 3 \cdot 2 \cdot 94,9 \text{ MeV} + 3 \cdot 3 \cdot 122,4 \text{ MeV} + 3 \cdot 83,3 \text{ MeV} + 3 \cdot 165,8 \text{ MeV} \\ &= 2,42 \text{ GeV} \\ \text{Strahlungs-} &\xrightarrow{\text{korrektur}} 2,497 \text{ GeV}\end{aligned}$$

1. Korrekturen aus QFT, höherer Ordnungen, Strahlungskorrektur
2. Passt mit Unsicherheiten zu Exp. (nicht auf Folie)
3. $\Gamma_e/\Gamma_{tot} = 3,37\%$ passt auch zu Exp.

Anzahl Neutrinogenerationen

Vergleich Theorie und Experiment

Z^0 Zerfall	theoretisch	experimentell
$e^- + e^+$	3,34 %	3,363(4) %
$\nu + \bar{\nu}$	19,92 %	20,0(6) %
Hadronen	66,92 %	69,91(6) %
Γ_Z	2,497 GeV	2,495(2) GeV

Z^0 Resonanz

2018-12-04

Z^0 Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Anzahl Neutrinogenerationen

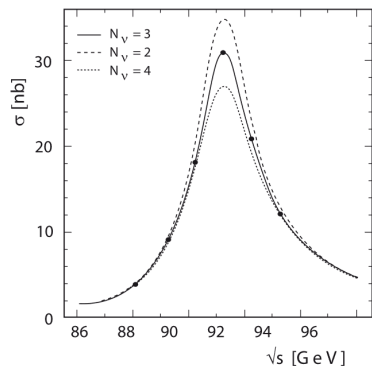
└ Anzahl Neutrinogenerationen

Anzahl Neutrinogenerationen
Vergleich Theorie und Experiment

Z^0 Zerfall	theoretisch	experimentell
$e^- + e^+$	3,34 %	3,363(4) %
$\nu + \bar{\nu}$	19,92 %	20,0(6) %
Hadronen	66,92 %	69,91(6) %
Γ_Z	2,497 GeV	2,495(2) GeV

1. e^- exemplarisch für Leptonen
2. passt alles gut

Anzahl Neutrino-Generationen



- ▶ OPAL-Detektor am LEP
- ▶ 3 Neutrino-Generationen passen zu Messungen
- ▶ Hinweis für 3 Generationen von Leptonen und Quarks

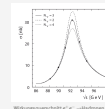
Wirkungsquerschnitt $e^+e^- \rightarrow \text{Hadronen}$ [4]

2018-12-04

Z^0 Resonanz

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

Anzahl Neutrino-Generationen



- ▶ OPAL-Detektor am LEP
- ▶ 3 Neutrino-Generationen passen zu Messungen
- ▶ Hinweis für 3 Generationen von Leptonen und Quarks

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

Historischer Überblick

Theorie

Experimentelle Untersuchung

Zusammenfassung

Zusammenfassung

- ▶ Weinbergwinkel $\cos \theta_W \approx 0.88$
- ▶ Zerfallsbreite $\Gamma_Z \approx 2,4 \text{ GeV}$
- ▶ 3 Neutrinogeneration

Z^0 Resonanz

2018-12-04

Z^0 Resonanz
└ Zusammenfassung

└ Zusammenfassung

Zusammenfassung

- ▶ Weinbergwinkel $\cos \theta_W \approx 0.88$
- ▶ Zerfallsbreite $\Gamma_Z \approx 2,4 \text{ GeV}$
- ▶ 3 Neutrinogeneration

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

Quellen I



Sheldon Glashow, Abdus Salam and Steven Weinberg. URL:
<http://thescientificodyssey.libsyn.com/episode-225-putting-the-puzzle-together> (besucht am 12.11.2018).



The Nobel Prize in Physics 1984. URL:
<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1984/summary/>
(besucht am 03.12.2018).



Standardmodell. URL:
<https://de.wikipedia.org/wiki/Standardmodell> (besucht am 12.11.2018).



Povh et al. Teilchen und Kerne. Springer Spektrum, 2014. Kap. 12.

Quellen I

- 1 Sheldon Glashow, Abdus Salam and Steven Weinberg. URL:
<http://thescientificodyssey.libsyn.com/episode-225-putting-the-puzzle-together> (besucht am 12.11.2018).
- 2 The Nobel Prize in Physics 1984. URL:
<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1984/summary/>
(besucht am 03.12.2018).
- 3 Standardmodell. URL:
<https://de.wikipedia.org/wiki/Standardmodell> (besucht am 12.11.2018).
- 4 Povh et al. Teilchen und Kerne. Springer Spektrum, 2014. Kap. 12.

Quellen II



Beta-Decay. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Betastrahlung> (besucht am 12. 11. 2018).



Donald H. Perkins. Introduction to High Energy Physics. Cambridge University Press, 2000.



How is the beam energy calibrated through the resonant spin depolarization? URL: <http://tlep.web.cern.ch/content/how-beam-energy-calibrated-through-resonant-spin-depolarization> (besucht am 29. 11. 2018).



Versuch Z^0 -Resonanz. URL: https://www.physik.hu-berlin.de/de/eephys/teaching/lab/z0resonance/index_html (besucht am 25. 11. 2018).

Quellen II

- 1 Beta-Decay. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Betastrahlung> (besucht am 12. 11. 2018).
- 2 Donald H. Perkins. Introduction to High Energy Physics. Cambridge University Press, 2000.
- 3 How is the beam energy calibrated through the resonant spin depolarization? URL: <http://tlep.web.cern.ch/content/how-beam-energy-calibrated-through-resonant-spin-depolarization> (besucht am 29. 11. 2018).
- 4 Versuch Z^0 -Resonanz. URL: https://www.physik.hu-berlin.de/de/eephys/teaching/lab/z0resonance/index_html (besucht am 25. 11. 2018).

Quellen III



F.J. Hasert u. a. „Search for elastic muon-neutrino electron scattering“. In: Physics Letters B 46.1 (1973), S. 121–124. ISSN: 0370-2693. DOI: [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(73\)90494-2](https://doi.org/10.1016/0370-2693(73)90494-2). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0370269373904942>.



Weak neutral current. URL: <https://www.symmetrismagazine.org/article/august-2009/weak-neutral-current> (besucht am 03.12.2018).



The LEP Accelerator. URL: <http://www.hep.ucl.ac.uk/~jpc/all/ulthesis/node15.html> (besucht am 03.12.2018).



L3 Home Page. URL: <http://l3.web.cern.ch/l3/> (besucht am 03.12.2018).

Quellen III

- 1 F.J. Hasert u. a. „Search for elastic muon-neutrino electron scattering“, In: Physics Letters B 46.1 (1973), S. 121–124. ISSN: 0370-2693. DOI: [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(73\)90494-2](https://doi.org/10.1016/0370-2693(73)90494-2). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0370269373904942>.
- 2 Weak neutral current. URL: <https://www.symmetrismagazine.org/article/august-2009/weak-neutral-current> (besucht am 03.12.2018).
- 3 The LEP Accelerator. URL: <http://www.hep.ucl.ac.uk/~jpc/all/ulthesis/node15.html> (besucht am 03.12.2018).
- 4 L3 Home Page. URL: <http://l3.web.cern.ch/l3/> (besucht am 03.12.2018).

Vielen Dank für eure Aufmerksamkeit!

Fragen?

Vielen Dank für eure Aufmerksamkeit!

Fragen?