

Z⁰-Resonanz

Alexander Neuwirth



2018-11-29

Z⁰ Resonanz

1. Begrüßung
2. Thema

Gliederung

Historischer Überblick

Theorie

Experimentelle Untersuchung

Zusammenfassung

Z^0 Resonanz

2018-11-29 Z^0 Resonanz
└─ Gliederung
└─ Gliederung

Gliederung

Historischer Überblick

Theorie

Experimentelle Untersuchung

Zusammenfassung

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

Historischer Überblick

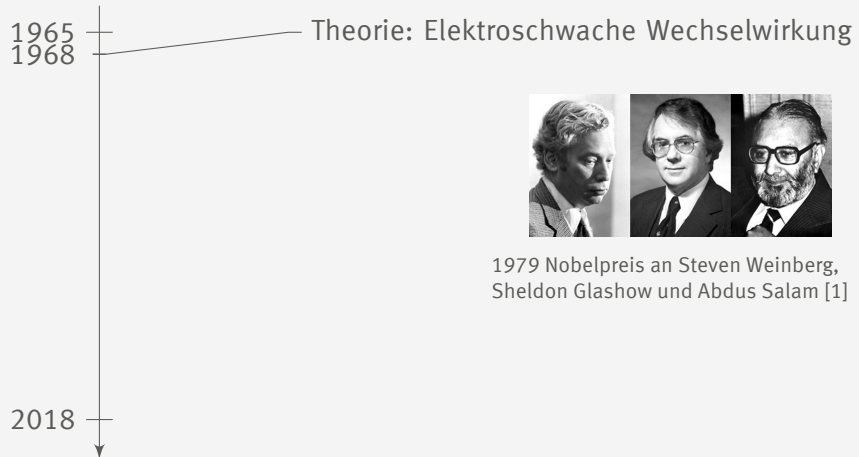
Theorie

Experimentelle Untersuchung

Zusammenfassung

Zunächst Historie

Historischer Überblick



1979 Nobelpreis an Steven Weinberg,
Sheldon Glashow und Abdus Salam [1]

2018-11-29

Z⁰ Resonanz

└ Historischer Überblick

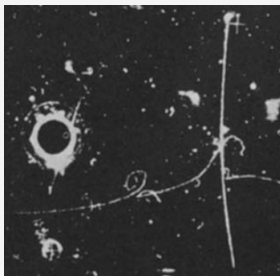
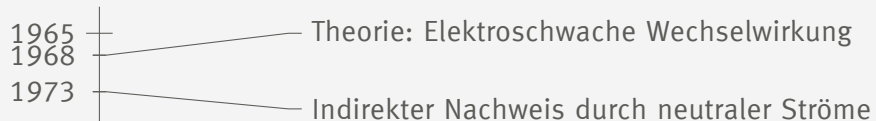
└ Historischer Überblick

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

Historischer Überblick



Historischer Überblick



Blasen-kammer:
 $\bar{\nu}_\mu + e^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu + e^-$ [2]

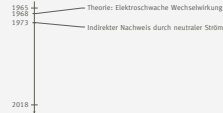
2018-11-29

Z^0 Resonanz

Historischer Überblick

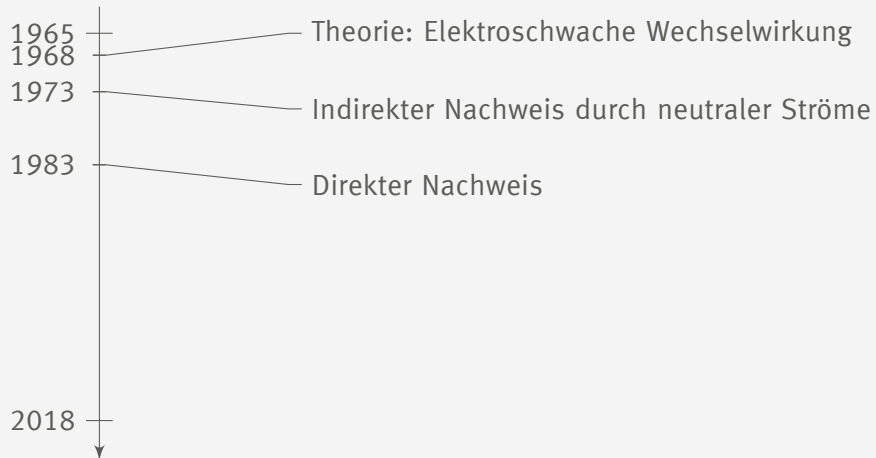
Historischer Überblick

Historischer Überblick



1. Gargamelle-Blasen-kammer am CERN
2. Neutrale Ströme von links nach rechts Antineutrinostrahl in Blasen-kammer.
3. Neutronenstrahl durch bsplw. $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \bar{\nu}_\mu$ und Ladungsfilter
4. Photon nur bei elektr. Prozessen.(=> neutraler Strom, Z)
5. Anhand von Winkel und 1/3 Energie des e^- folgt Wechselwirkung durch neutrale Ströme. 700000 - Bilder überprüft. Spiral/Bremsstrahlung.

Historischer Überblick



2018-11-29

Z⁰ Resonanz

Historischer Überblick

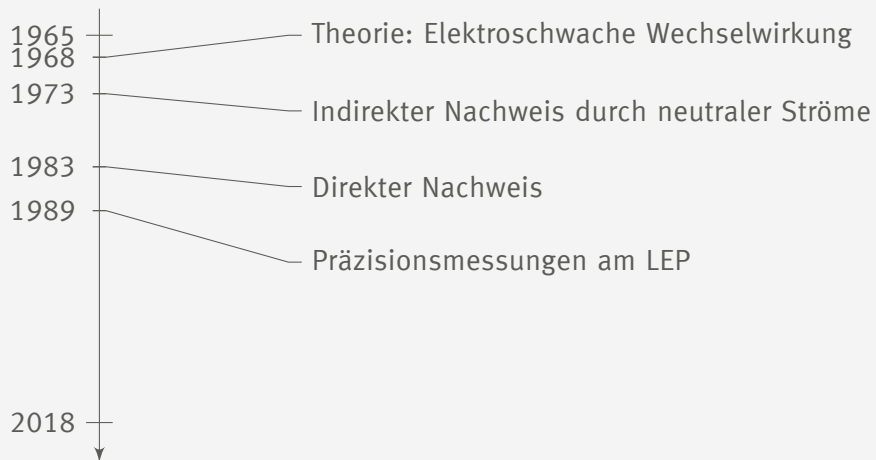
Historischer Überblick

Historischer Überblick



1. Am Large Electron Positron Collider
2. Mehr später
3. Nobelpreis für Carlo Rubbia and Simon van der Meer
4. 1984 Carlo Rubbia und Simon van der Meer Nobelpreis für experimentelle Beitrag Proton-Antiproton-Kollisionen
5. Weil führte mit zum Nachweis der Z und W Bosonen

Historischer Überblick



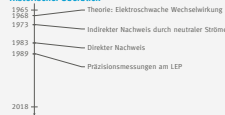
2018-11-29

Z^0 Resonanz

Historischer Überblick

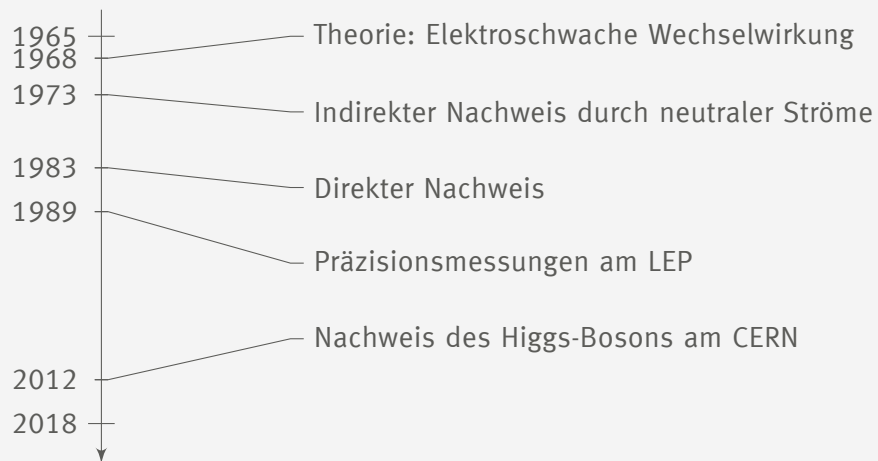
Historischer Überblick

Historischer Überblick



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

Historischer Überblick



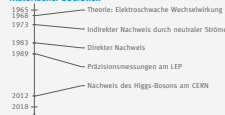
2018-11-29

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	u up	c charm	t 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
	d down	s strange	b bottom	g Gluon
	<2 eV	<0,19 MeV	<18,2 MeV	0
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e Elektron-Neutrino	ν_μ Myon-Neutrino	ν_τ Tau-Neutrino	Z ⁰ Z Boson
	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV	± 1
	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	1
	e Elektron	μ Myon	τ Tau	W [±] W Boson

Standardmodell[3]

2018-11-29

Z⁰ Resonanz

Theorie

Einordnung im Standardmodell der
Elementarteilchen

Einordnung im Standardmodell der
Elementarteilchen

Einordnung im Standardmodell der Elementarteilchen



- 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 ±1
- Antiteilchen invers
-
- Masse steigt mit Generation
- schwache WW
- W+- => elek. Teilchen WW (beta Zerfall)
- Z0 => auch neutral Teilchen WW (Neutrino)
- Z0 eigenes Antiteilchen
-
- Higgs aus Vollständigkeit

Elektroschwache Vereinheitlichung

Austauschteilchen

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

Z^0 Resonanz

2018-11-29

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

	Fermionmultipletts			
Leptonen	$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}_L$ e _R	$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}_L$ μ _R	$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}_L$ τ _R	
Quarks	$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}_L$ u _R d _R	$\begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}_L$ c _R s _R	$\begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix}_L$ t _R b _R	

Schwacher Isospin[4]

2018-11-29

Z⁰ Resonanz

└ Theorie

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

Elektroschwache Vereinheitlichung
Schwacher Isospin

	Fermionmultipletts		
Leptonen	$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}_L$ e _R	$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}_L$ μ _R	$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}_L$ τ _R
Quarks	$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}_L$ u _R d _R	$\begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}_L$ c _R s _R	$\begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix}_L$ t _R b _R

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 T₃ = z = 0, keine WW, Auftreten in Natur unbekannt
6. Der ' bedeutet != Masseneigenzustände, sondern Quarkmisch-Matrix CKM

Elektroschwache Vereinheitlichung

Schwacher Isospin

Z⁰ Resonanz

2018-11-29

Z⁰ Resonanz

└ Theorie

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

Elektroschwache Vereinheitlichung
Schwacher Isospin

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

Schwacher Isospin[4]

	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	$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix}_L$	1/2
	u_R	c_R	t_R	0
	d_R	s_R	b_R	0

Schwacher Isospin[4]

1. Nur linkshändige Fermionmultipletts haben T!=0

Elektroschwache Vereinheitlichung

Schwacher Isospin

Z⁰ Resonanz

2018-11-29

Z⁰ Resonanz

└ Theorie

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

Elektroschwache Vereinheitlichung
Schwacher Isospin

	Fermionmultipletts			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
	e _R	μ _R	τ _R	0	0
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
	u _R	c _R	t _R	0	0
	d _R	s _R	b _R	0	0

Schwacher Isospin[4]

	Fermionmultipletts			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
	e _R	μ _R	τ _R	0	0
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
	u _R	c _R	t _R	0	0
	d _R	s _R	b _R	0	0

Schwacher Isospin[4]

1. T₃ Werte Bereich analog zu anderen Spins

Elektroschwache Vereinheitlichung

Schwacher Isospin

Z^0 Resonanz

2018-11-29

Z^0 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]

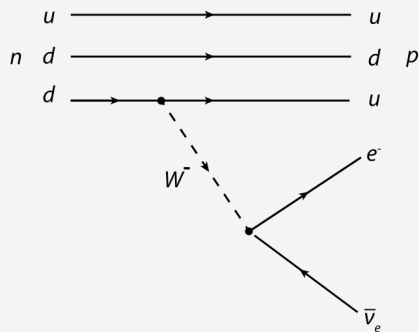
	Fermionmultipletts			T	T_3	z_f
Leptonen	$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}_L$	$1/2$	$+1/2$ $-1/2$	0 -1
	e_R	μ_R	τ_R	0	0	-1
Quarks	$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} c \\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

Schwacher Isospin[4]

1. 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)

Elektroschwache Vereinheitlichung

Schwacher Isospin



β^- -Zerfall[5]

2018-11-29

Z^0 Resonanz

└ Theorie

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

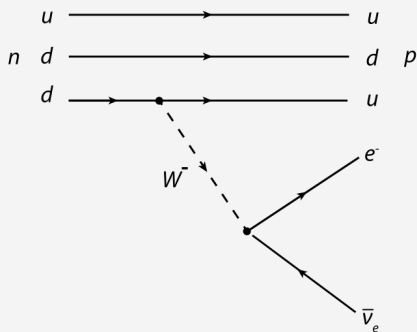
└ Elektroschwache Vereinheitlichung

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

Elektroschwache Vereinheitlichung

Schwacher Isospin

► T_3 soll erhalten bleiben



β^- -Zerfall[5]

2018-11-29

Z^0 Resonanz

└ Theorie

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

Elektroschwache Vereinheitlichung
Schwacher Isospin

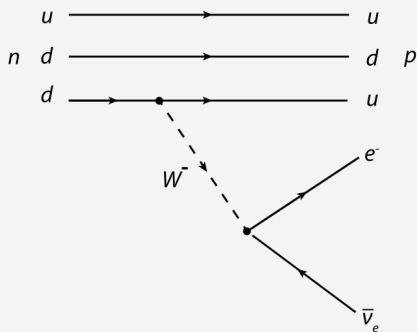
► T_3 soll erhalten bleiben

1. T_3 Erhaltungsgröße

Elektroschwache Vereinheitlichung

Schwacher Isospin

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


 β^- -Zerfall[5]

2018-11-29

 Z^0 Resonanz

└ Theorie

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

Elektroschwache Vereinheitlichung
Schwacher Isospin

▶ T_3 soll erhalten bleiben

▶ $W^-: T_3 = -1$

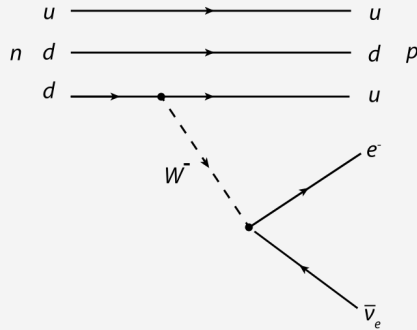
$$1. T: d(-1/2) = W(?) + u(1/2)$$

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

Elektroschwache Vereinheitlichung

Schwacher Isospin

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



β^- -Zerfall[5]

Z^0 Resonanz

2018-11-29

Z^0 Resonanz

└ Theorie

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

Elektroschwache Vereinheitlichung
Schwacher Isospin

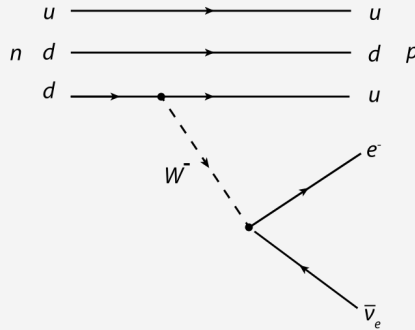
- ▶ T_3 soll erhalten bleiben
- ▶ $W^-: T_3 = -1$
- ▶ $W^+: T_3 = 1$

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

Elektroschwache Vereinheitlichung

Schwacher Isospin

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



β^- -Zerfall[5]

Z^0 Resonanz

2018-11-29

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:

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

2018-11-29

Z⁰ Resonanz

└ Theorie

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

Elektroschwache Vereinheitlichung

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

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

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:

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

2018-11-29

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:

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

2018-11-29

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

Präzessionsmessungen

Eigenschaften

Anzahl Neutrinogenerationen

Zusammenfassung

2018-11-29

Z^0 Resonanz
└ Experimentelle Untersuchung

Historischer Überblick

Theorie

Experimentelle Untersuchung

Erzeugung

Nachweis

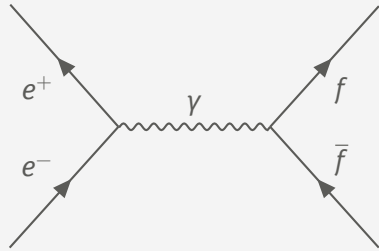
Präzessionsmessungen

Eigenschaften

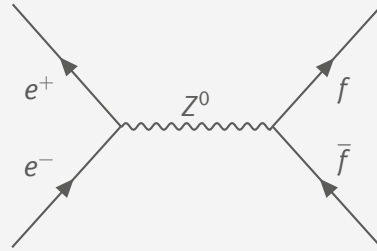
Anzahl Neutrinogenerationen

Zusammenfassung

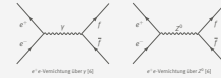
Erzeugung Feynman-Diagramme



e^+e^- -Vernichtung über γ [6]



e^+e^- -Vernichtung über Z^0 [6]



- 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

Z^0 Resonanz

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

2018-11-29

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

Erzeugung

Z^0 Resonanz

- ▶ $e^- + e^- \rightarrow Z^0$: Schwerpunktsenergie $\sqrt{s} = 2E_e \geq M_Z c^2 \approx 91,6 \text{ GeV}$
- ▶ $u + \bar{u} \rightarrow Z^0$: pp -Kollision benötigt $\sqrt{s} \gtrapprox 600 \text{ GeV}$ pro Proton

2018-11-29

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 $\sqrt{s} \gtrapprox 600 \text{ GeV}$ pro Proton

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

Erzeugung

Z⁰ Resonanz

- ▶ $e^- + e^- \rightarrow Z^0$: Schwerpunktsenergie $\sqrt{s} = 2E_e \geq M_Z c^2 \approx 91,6 \text{ GeV}$
- ▶ $u + \bar{u} \rightarrow Z^0$: pp -Kollision benötigt $\sqrt{s} \gtrapprox 600 \text{ GeV}$ pro Proton
- ▶ $u + \bar{u} \rightarrow Z^0$: $p\bar{p}$ -Kollision benötigt $\sqrt{s} \gtrapprox 300 \text{ GeV}$

2018-11-29

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 $\sqrt{s} \gtrapprox 600 \text{ GeV}$ pro Proton
- ▶ $u + \bar{u} \rightarrow Z^0$: $p\bar{p}$ -Kollision benötigt $\sqrt{s} \gtrapprox 300 \text{ GeV}$

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

Erzeugung

Z⁰ Resonanz

- ▶ $e^- + e^- \rightarrow Z^0$: Schwerpunktsenergie $\sqrt{s} = 2E_e \geq M_Z c^2 \approx 91,6 \text{ GeV}$
- ▶ $u + \bar{u} \rightarrow Z^0$: pp -Kollision benötigt $\sqrt{s} \gtrapprox 600 \text{ GeV}$ pro Proton
- ▶ $u + \bar{u} \rightarrow Z^0$: $p\bar{p}$ -Kollision benötigt $\sqrt{s} \gtrapprox 300 \text{ GeV}$
- ▶ $e^+ + e^- \rightarrow W^+ + W^-$: benötigt $\sqrt{s} \geq 2M_W c^2 \approx 160,8 \text{ GeV}$

2018-11-29

Z⁰ Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Erzeugung

└ Erzeugung

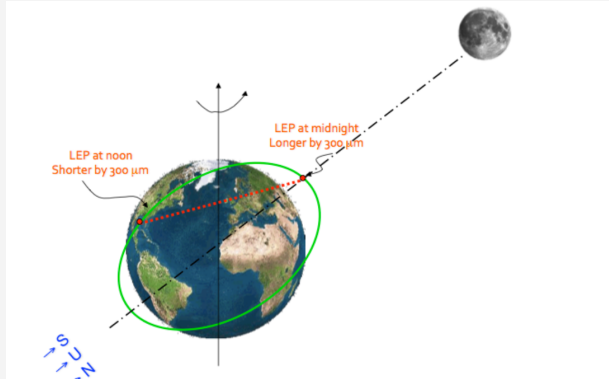
Erzeugung

- ▶ $e^- + e^- \rightarrow Z^0$: Schwerpunktsenergie $\sqrt{s} = 2E_e \geq M_Z c^2 \approx 91,6 \text{ GeV}$
- ▶ $u + \bar{u} \rightarrow Z^0$: pp -Kollision benötigt $\sqrt{s} \gtrapprox 600 \text{ GeV}$ pro Proton
- ▶ $u + \bar{u} \rightarrow Z^0$: $p\bar{p}$ -Kollision benötigt $\sqrt{s} \gtrapprox 300 \text{ GeV}$
- ▶ $e^+ + e^- \rightarrow W^+ + W^-$: benötigt $\sqrt{s} \geq 2M_W c^2 \approx 160,8 \text{ GeV}$

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

Erzeugung

Einfluss auf Beschleuniger durch Gezeiten



LEP Ausdehnung[8]

Z^0 Resonanz

2018-11-29

Z^0 Resonanz

Experimentelle Untersuchung

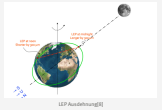
Erzeugung

Erzeugung

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

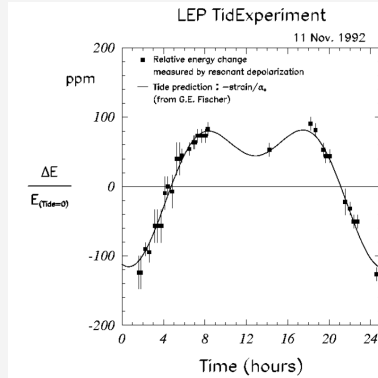
Erzeugung

Einfluss auf Beschleuniger durch Gezeiten



Erzeugung

Einfluss auf Beschleuniger durch Gezeiten



Relative Strahlenergieänderung[7]

Z^0 Resonanz

2018-11-29

Z^0 Resonanz

Experimentelle Untersuchung

Erzeugung

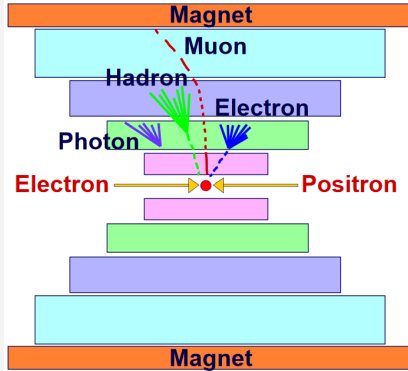
Erzeugung



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

Nachweis

L3 Detektoraufbau am LEP



L3 Detektor [7]

Z^0 Resonanz

2018-11-29

Z^0 Resonanz

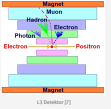
Experimentelle Untersuchung

Nachweis

Nachweis

Nachweis

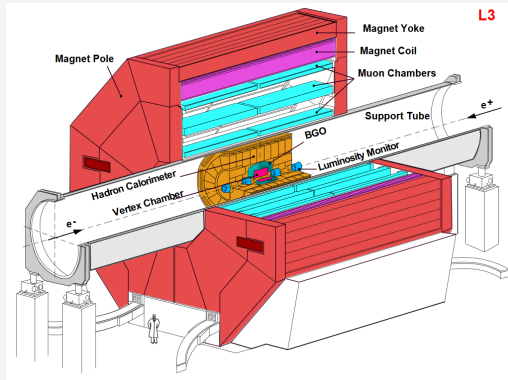
L3 Detektoraufbau am LEP



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

Nachweis

L3 Detektoraufbau am LEP



L3 Detektor [7]

Z^0 Resonanz

2018-11-29

Z^0 Resonanz

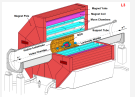
└ Experimentelle Untersuchung

└ Nachweis

└ Nachweis

Nachweis

L3 Detektoraufbau am LEP

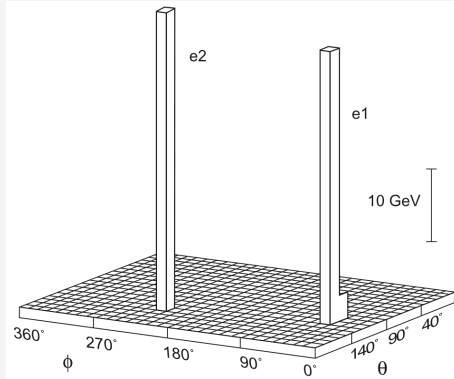


L3 Detektor [7]

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

Nachweis

Entdeckung des Z^0 Bosons (1983 am CERN)



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

Z^0 Resonanz

2018-11-29

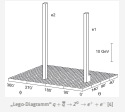
Z^0 Resonanz

Experimentelle Untersuchung

Nachweis

Nachweis

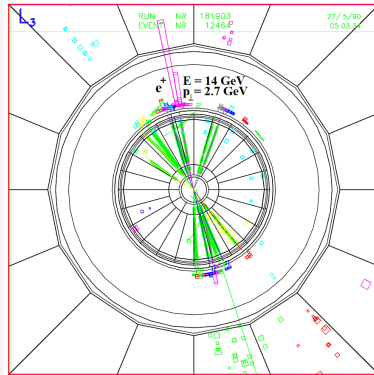
Nachweis
Entdeckung des Z^0 Bosons (1983 am CERN)



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

Präzessionsmessungen

L3 Detektor (1993 am LEP)



$e^- + e^+ \rightarrow Z^0 \rightarrow \text{hadronische Jets}$ [7]

Z^0 Resonanz

2018-11-29

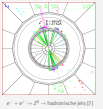
Z^0 Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Präzessionsmessungen

└ Präzessionsmessungen

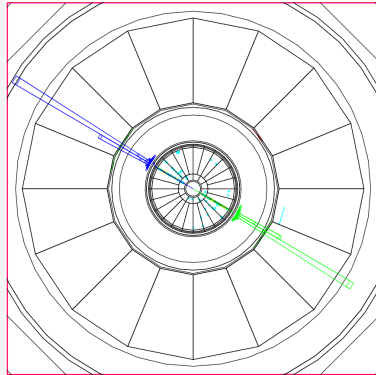
Präzessionsmessungen
L3 Detektor (1993 am LEP)



1. L3 detector LEP
2. beispielhafte Ereignisse
3. entlang der Strahlachse
4. Balken sind die Energien die Kalorimeter messen
5. Hadronische Jets

Präzessionsmessungen

L3 Detektor (1993 am LEP)



$$e^- + e^+ \rightarrow Z^0 \rightarrow e^+ + e^- [7]$$

Z^0 Resonanz

2018-11-29

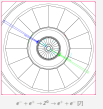
Z^0 Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Präzessionsmessungen

└ Präzessionsmessungen

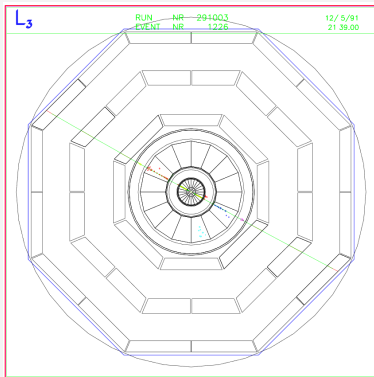
Präzessionsmessungen
L3 Detektor (1993 am LEP)



1. herausgezoomt, weil Enrgie weniger verteilt
2. analog zu Lego
3. Winkel $180^\circ \Rightarrow$ entgegen gesetzte Richtungen

Präzessionsmessungen

L3 Detektor (1993 am LEP)



$$e^- + e^+ \rightarrow Z^0 \rightarrow \mu^+ + \mu^- [7]$$

Z^0 Resonanz

2018-11-29

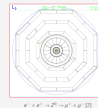
Z^0 Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Präzessionsmessungen

└ Präzessionsmessungen

Präzessionsmessungen
L3 Detektor (1993 am LEP)



1. Muon erst an äußeren Platten detektiert

Eigenschaften

Experimentelle Bestimmung

► Messung:

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

Z⁰ Resonanz

2018-11-29

Z⁰ Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Eigenschaften

└ Eigenschaften

Eigenschaften
Experimentelle Bestimmung
► Messung:
► $M_Z = 91,188(2) \text{ GeV}/c^2$
► $\Gamma_Z = 2,495(2) \text{ GeV}$

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

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) %

2018-11-29

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) %

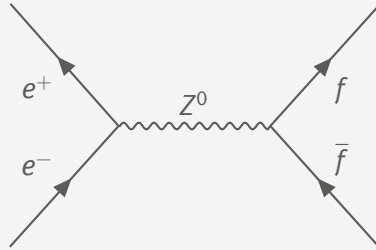
1. Hadronen (idR. Anti+Quark) nicht unterscheidbar
2. Anti+Neutrino schwer detektierbar \Rightarrow % über Γ_{tot}

Anzahl Neutrinogenerationen

Wirkungsquerschnitt

Z^0 Resonanz

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



2018-11-29

Z^0 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 h und c multiplizieren
3. Abhängig von ...
4. γ unterdrückt

Anzahl Neutrino-Generationen

Zerfallsbreite

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

Z⁰ Resonanz

2018-11-29

Z⁰ Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Anzahl Neutrino-Generationen

└ Anzahl Neutrino-Generationen

Anzahl Neutrino-Generationen
Zerfallsbreite

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

1. Breite ergibt sich aus Partial Breiten

Anzahl Neutrino-generationen

Zerfallsbreite

$$\begin{aligned}\Gamma_Z &= \sum_f \Gamma_{Z \rightarrow f\bar{f}} \\ &= \Gamma_{u,c,d,s,b} + \Gamma_{e,\mu,\tau} + \Gamma_{\nu_e,\nu_\mu,\nu_\tau}\end{aligned}$$

Z^0 Resonanz

2018-11-29

Z^0 Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Anzahl Neutrino-generationen

└ Anzahl Neutrino-generationen

Anzahl Neutrino-generationen
Zerfallsbreite

$$\begin{aligned}\Gamma_Z &= \sum_f \Gamma_{Z \rightarrow f\bar{f}} \\ &= \Gamma_{u,c,d,s,b} + \Gamma_{e,\mu,\tau} + \Gamma_{\nu_e,\nu_\mu,\nu_\tau}\end{aligned}$$

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

Anzahl Neutrinogenerationen

Zerfallsbreite

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

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

$$= N_C \cdot 2 \cdot \Gamma_u + N_C \cdot 3 \cdot \Gamma_d + 3 \cdot \Gamma_e + 3 \cdot \Gamma_\nu$$

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

2018-11-29

Z⁰ Resonanz

- Experimentelle Untersuchung

- Anzahl Neutrinogenerationen

- Anzahl Neutrinogenerationen

Anzahl Neutrinogenerationen

Zerfallsbreite

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

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

Anzahl Neutrino-generationen

Zerfallsbreite

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

2018-11-29

Z⁰ Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Anzahl Neutrino-generationen

└ Anzahl Neutrino-generationen

Anzahl Neutrino-generationen

Zerfallsbreite

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

1. Einsetzen, vgl Maximal für minimale Ladung

Anzahl Neutrino-Generationen

Zerfallsbreite

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

2018-11-29

Z⁰ Resonanz

- Experimentelle Untersuchung

- Anzahl Neutrino-Generationen

- Anzahl Neutrino-Generationen

Anzahl Neutrino-Generationen

Zerfallsbreite

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

1. Summe

Anzahl Neutrinogenerationen

Zerfallsbreite

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

Z⁰ Resonanz

2018-11-29

Z⁰ Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Anzahl Neutrinogenerationen

└ Anzahl Neutrinogenerationen

Anzahl Neutrinogenerationen

Zerfallsbreite

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

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 Neutrino-Generationen

Z^0 Resonanz

2018-11-29

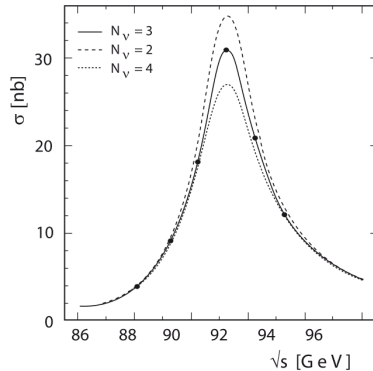
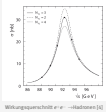
Z^0 Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Anzahl Neutrino-Generationen

└ Anzahl Neutrino-Generationen

Anzahl Neutrino-Generationen



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

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

Historischer Überblick

Theorie

Experimentelle Untersuchung

Zusammenfassung

Zusammenfassung

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

Z⁰ Resonanz

2018-11-29

Z⁰ 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, UniversumentwicklungsgröÙe)
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).
-  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>.

Quellen II



Standardmodell. URL:

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



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



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.

Z^0 Resonanz

2018-11-29



Z^0 Resonanz
└ Zusammenfassung

└ Quellen

Quellen II

- Standardmodell, um:
<https://de.wikipedia.org/wiki/Standardmodell> (besucht am 12.11.2018).
- Povh et al. Teilchen und Kerne, Springer Spektrum, 2014. Kap. 12.
- Beta-Decay, um:
<https://de.wikipedia.org/wiki/Betastrahlung> (besucht am 12.11.2018).
- Donald H. Perkins, Introduction to High Energy Physics. Cambridge University Press, 2000.

Quellen III

-  Versuch Z0-Resonanz. URL: https://www.physik.hu-berlin.de/de/eephys/teaching/lab/z0resonance/index_html (besucht am 25.11.2018).
-  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).

Vielen Dank für eure Aufmerksamkeit!

Fragen?

Vielen Dank für eure Aufmerksamkeit!

Fragen?