

Z⁰-Resonanz

Alexander Neuwirth



1. Begrüßung
2. Thema

Gliederung

Historischer Überblick

Theorie

Experimentelle Untersuchung

Zusammenfassung

Z^0 Resonanz

2018-12-07 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

1968

Theorie: Elektroschwache Wechselwirkung



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

2018-12-07

Z^0 Resonanz

└ Historischer Überblick

└ Historischer Überblick

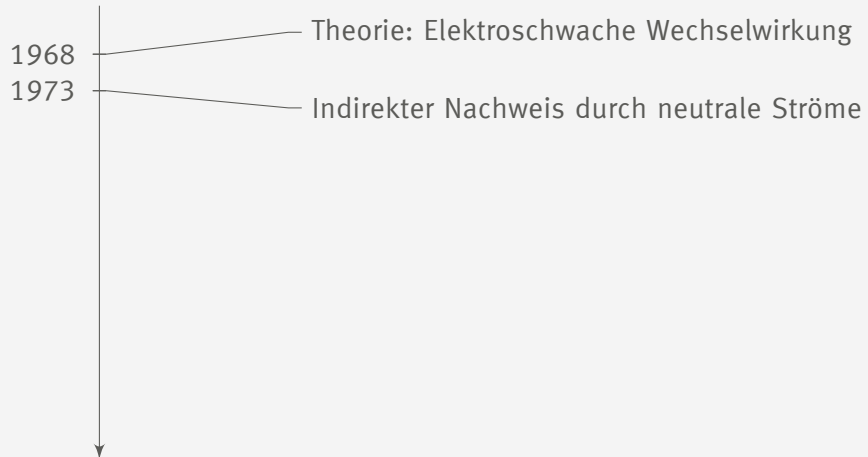
Historischer Überblick

1968

Theorie: Elektroschwache Wechselwirkung

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

Historischer Überblick



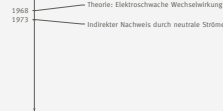
2018-12-07

Z^0 Resonanz

└ Historischer Überblick

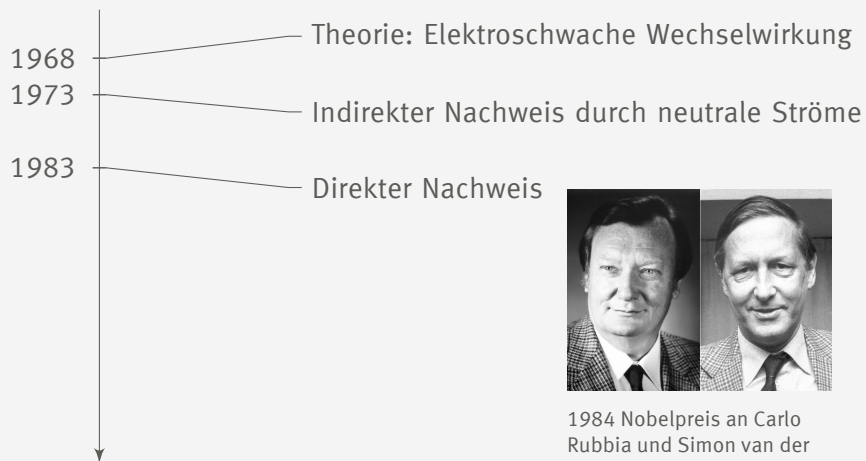
└ Historischer Überblick

Historischer Überblick



1. Gargamelle-Blasenkammer am CERN

Historischer Überblick



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

2018-12-07

Z⁰ Resonanz

└ Historischer Überblick

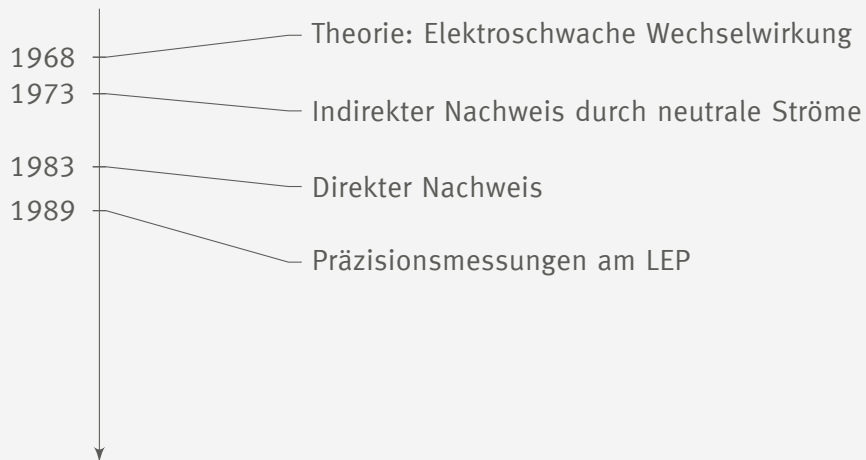
└ Historischer Überblick

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



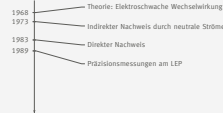
2018-12-07

Z^0 Resonanz

└ Historischer Überblick

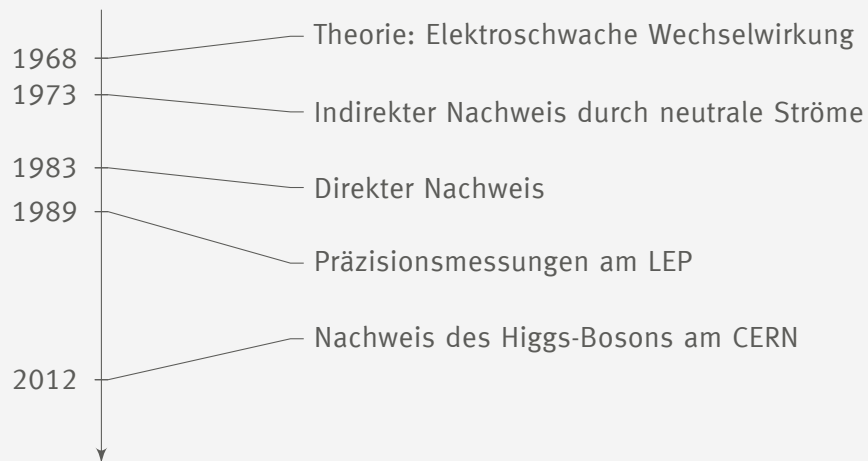
└ Historischer Überblick

Historischer Überblick



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

Historischer Überblick



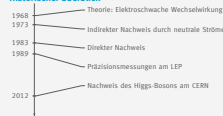
2018-12-07

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
				125,09 GeV
				Higgs Boson
Quarks				
	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	91,2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	Elektron-Neutrino	Myon-Neutrino	Tau-Neutrino	Z ⁰ Boson
Leptonen				
	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV	80,4 GeV
	-1	-1	-1	± 1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	Elektron	Myon	Tau	W [±] Boson

Eichbosonen

Z⁰-Boson:

- ▶ Lebensdauer $\tau \approx 3 \cdot 10^{-25} \text{ s}$
- ▶ Masse $M = 91,2 \text{ GeV}$
- ▶ ungeladen
- ▶ eigenes Antiteilchen

Standardmodell[3]

2018-12-07

Z⁰ Resonanz

└ Theorie

└ Einordnung im Standardmodell der Elementarteilchen

└ Einordnung im Standardmodell der Elementarteilchen

Einordnung im Standardmodell der Elementarteilchen

Das Standardmodell des Teilchenphysik

Quarks	Leptonen	Bosonen
u, d, s, b, c, t	e, μ , τ , ν_e , ν_μ , ν_τ	g, W [±] , Z ⁰ , H

Z⁰-Boson:

- ▶ Lebensdauer $\tau \approx 3 \cdot 10^{-25} \text{ s}$
- ▶ Masse $M = 91,2 \text{ GeV}$
- ▶ ungeladen
- ▶ eigenes Antiteilchen

Standardmodell[3]

1. Antiteilchen invers
2. Masse steigt mit Generation
3. Lebensdauer sehr sehr kurz
4. Masse (Reichweite)
5. ungeladen/neutral
6. Boson also Spin 1, außer Higgs
7. Schwache Wechselwirkung
8. Bestätigung der 3 Neutrinogenerationen

Elektroschwache Vereinheitlichung

Austauschteilchen

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

Z⁰ Resonanz

2018-12-07

Z⁰ Resonanz

└ Theorie

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

Elektroschwache Vereinheitlichung
Austauschteilchen

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

1. Warum? Weil Divergenzen in höherer Ordnung/Energien auftreten
2. Vereint QED mit schwacher WW.
3. Schwache/Fermi WW divergiert bei Energien nicht kleiner als W Boson Masse und ist nicht renormierbar
4. Masse der Bosonen, da Reichweite eingeschränkt ist
5. Kräfte durch Austauschteilchen
6. Photon elektro magn. beispielweise Elektron-Elektron-Streuung, Rutherford Streuung
7. W,Z bsplw. Beta-Zerfall, Elektron-Positron-Streuung (Energieabhängig)
8. Gluon Kernzusammenhalt, Farbladung, 8 (n-p-Anziehung), Quarkanziehung
9. Nur durch Z-Boson lässt sich Neutrino-Neutrino-WW erklären, da sie nicht elektrisch sind.

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]

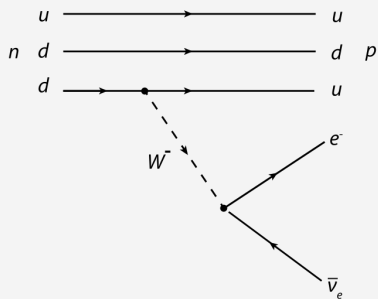
	Fermionmultipletts			T	T_3	z_f
Leptonen	$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}_L$	1/2	+1/2 -1/2	0 -1
Quarks	$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix}_L$	1/2	+1/2 -1/2	+2/3 -1/3
	e_R	μ_R	τ_R	0	0	-1
	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 Multipllett (darin Ladungsdifferenz = 1)

Elektroschwache Vereinheitlichung

Schwacher Isospin



β^- -Zerfall[5]

Z^0 Resonanz

2018-12-07

Z^0 Resonanz

Theorie

Elektroschwache Vereinheitlichung

Elektroschwache Vereinheitlichung

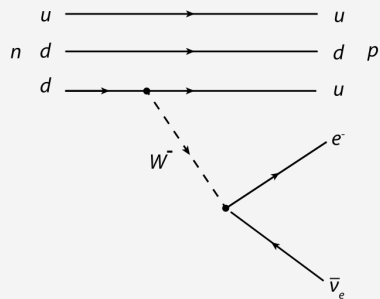
Elektroschwache Vereinheitlichung
Schwacher Isospin



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

Elektroschwache Vereinheitlichung

Schwacher Isospin



► T_3 soll erhalten bleiben

β^- -Zerfall[5]

2018-12-07

Z^0 Resonanz

└ Theorie

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

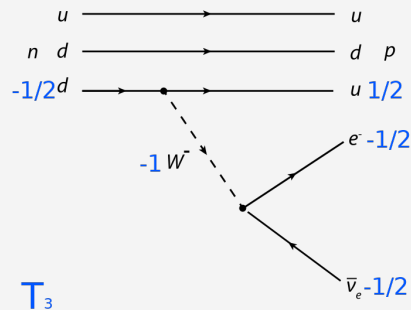
Elektroschwache Vereinheitlichung
Schwacher Isospin



1. T_3 Erhaltungsgröße

Elektroschwache Vereinheitlichung

Schwacher Isospin



► T_3 soll erhalten bleiben

► $W^-: T_3 = -1$

β^- -Zerfall[5]

2018-12-07

Z^0 Resonanz

└ Theorie

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

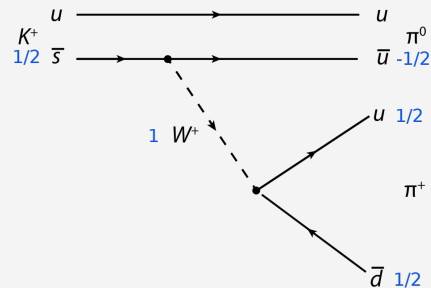
Elektroschwache Vereinheitlichung
Schwacher Isospin



1. T_3 in Graphik
2. W^- muss -1 sein

Elektroschwache Vereinheitlichung

Schwacher Isospin



K^+ -Zerfall[5]

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

2018-12-07

Z^0 Resonanz

Theorie

Elektroschwache Vereinheitlichung

Elektroschwache Vereinheitlichung

Elektroschwache Vereinheitlichung
Schwacher Isospin



1. analog β^+ -Zerfall: $u \rightarrow d + W^+$
2. Hier Kaon-Zerfall

Elektroschwache Vereinheitlichung

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

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

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

2018-12-07

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:

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

2018-12-07

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. Einziger Freier Parameter der Theorie.
3. 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:

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

2018-12-07

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

- Indirekter Nachweis
- Erzeugung des Z^0 -Bosons
- Nachweis
- Präzisionsmessungen
- Eigenschaften
- Anzahl Neutrinogenerationen

Zusammenfassung

2018-12-07

Z^0 Resonanz

Experimentelle Untersuchung

Historischer Überblick

Theorie

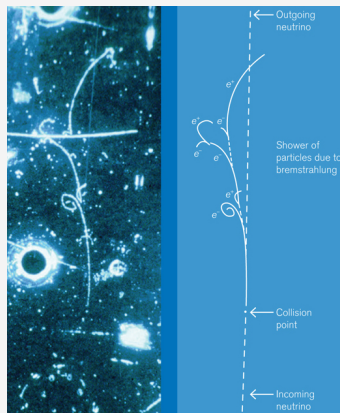
Experimentelle Untersuchung

- Indirekter Nachweis
- Erzeugung des Z^0 -Bosons
- Nachweis
- Präzisionsmessungen
- Eigenschaften
- Anzahl Neutrinogenerationen

Zusammenfassung

Indirekter Nachweis des Z^0 -Bosons durch neutrale Ströme

Z^0 Resonanz



- ▶ Neutrinostrahl durch $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \bar{\nu}_\mu$
- ▶ Blasenkammer:
 $\bar{\nu}_\mu + e^- \xrightarrow{Z^0} \bar{\nu}_\mu + e^-$
- ▶ Elektron sendet Bremsstrahlung aus
- ▶ e^-e^+ -Paarbildung \rightarrow elektromagnetischer Schauer

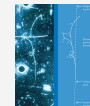
[6][7]

2018-12-07

Z^0 Resonanz

- └ Experimentelle Untersuchung
 - └ Indirekter Nachweis
 - └ Indirekter Nachweis

Indirekter Nachweis
des Z^0 -Bosons durch neutrale Ströme



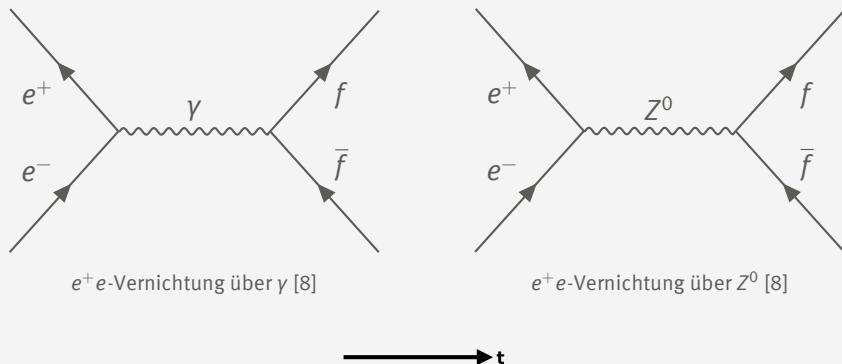
- ▶ Neutrinostrahl durch $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \bar{\nu}_\mu$
- ▶ Blasenkammer:
 $\bar{\nu}_\mu + e^- \xrightarrow{Z^0} \bar{\nu}_\mu + e^-$
- ▶ Elektron sendet Bremsstrahlung aus
- ▶ e^-e^+ -Paarbildung \rightarrow elektromagnetischer Schauer

[6][7]

1. Striche und Kreise sind Lamben und Spiegel Reflexionen
2. Myonlose Neutrinoreaktion
3. Neutrale Ströme von links nach rechts Antineutrinostrahl in Blasenkammer.
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.

Erzeugung des Z⁰-Bosons

Feynmandiagramme zur Elektron-Positron-Annihilation



2018-12-07

Z⁰ Resonanz

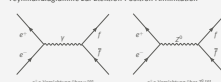
└ Experimentelle Untersuchung

└└ Erzeugung des Z⁰-Bosons

└└└ Erzeugung des Z⁰-Bosons

Erzeugung des Z⁰-Bosons

Feynmandiagramme zur Elektron-Positron-Annihilation

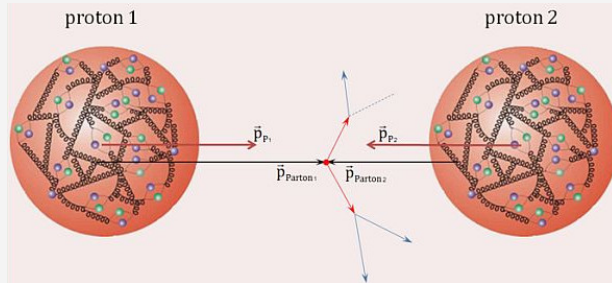


- W/Z-Boson durch Antilepton+Lepton/AntiQuark+Quark Reaktion
- kollidierende Teilchenstrahlen
- feynman diagram
- Zeit nach rechts
- Antiteilchen Zeitlich invers (Aus Dirac-Gleichung (Schrödinger gleichung mit eingesetzter Impuls/Energie Relation wirkt auf vier komponentigen Dirac Spinor) ergeben sich 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 des Z^0 -Bosons

am Super Proton Synchrotron (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 $E_p \gtrsim 300 \text{ GeV}$



Proton-Proton-Kollision [9]

Z^0 Resonanz

2018-12-07

Z^0 Resonanz

Experimentelle Untersuchung

Erzeugung des Z^0 -Bosons

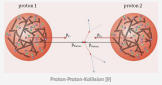
Erzeugung des Z^0 -Bosons

Erzeugung des Z^0 -Bosons

am Super Proton Synchrotron (SPS/Sp \bar{p} S)

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

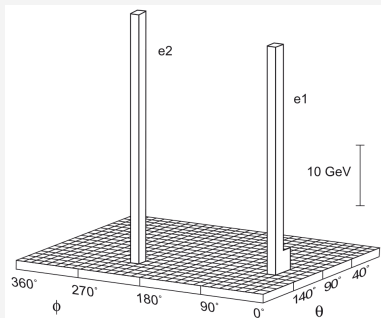
▶ $u + \bar{u} \rightarrow Z^0$: $p\bar{p}$ -Kollision benötigt $E_p \gtrsim 300 \text{ GeV}$



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
4. Veranschaulichung der Seequarks, Pfeile nicht direkt relevant
5. Keine Trennung up-down, sondern grün ist Antiquark

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

2018-12-07

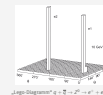
Z^0 Resonanz

Experimentelle Untersuchung

Nachweis

Nachweis

Nachweis
Entdeckung des Z^0 Bosons

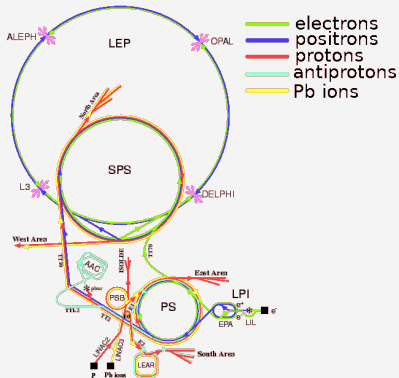


- ▶ 1983 UA2 Detektor am Sp \bar{p} S
- ▶ Masse des Z^0 -Bosons entspricht der Summe der Energie von e^- und e^+
- ▶ Entgegengesetzte Impulse von e^- und e^+

- 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 [10]

Z^0 Resonanz

2018-12-07

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

am Large Electron-Positron Collider (LEP)

► LEP 1 (1989-1996)

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

► LEP 2 (1996-2000)

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

2018-12-07

Z^0 Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Präzisionsmessungen

└ Präzisionsmessungen

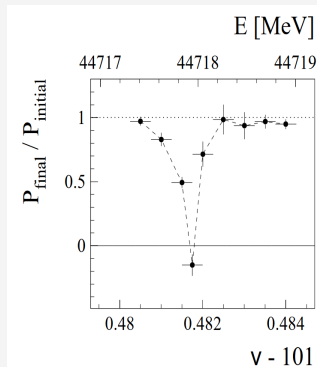
Präzisionsmessungen
am Large Electron-Positron Collider (LEP)

► LEP 1 (1989-1996)
► $e^- + e^+ \rightarrow Z^0$: Schwerpunktsenergie $\sqrt{s} = 2E_e \approx M_Z c^2 \approx 91 \text{ GeV}$
► LEP 2 (1996-2000)
► $e^- + e^+ \rightarrow W^+ + W^-$: benötigt $2E_e \approx 2M_W c^2 \approx 160 \text{ GeV}$

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

Präzisionsmessungen Energiekalibration

Z⁰ Resonanz



Relative Polarisation[11]

Resonante Spin Depolarisation:

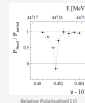
1. transversale Polarisation der Strahlen
2. Energie E ist proportional zu Spinpräzessionen pro Speicherringdurchlauf ν
3. Radiales oszillierendes Magnetfeld rotiert Spin minimal, falls dessen Frequenz in Phase zur Spinpräzession ist.

2018-12-07

Z⁰ Resonanz

- └ Experimentelle Untersuchung
 - └ Präzisionsmessungen
 - └ Präzisionsmessungen

Präzisionsmessungen
Energiekalibration

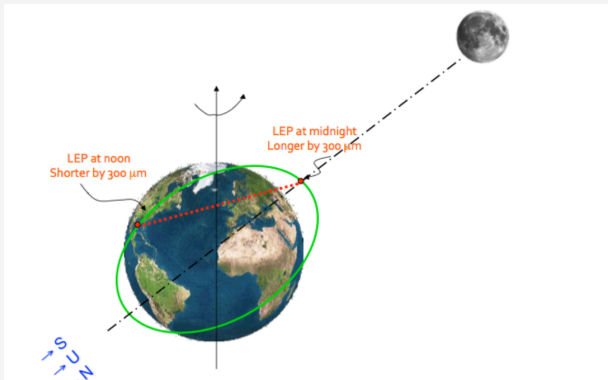


Resonante Spin Depolarisation:
1. transversale Polarisation der Strahlen
2. Energie E ist proportional zu Spinpräzessionen pro Speicherringdurchlauf ν
3. Radiales oszillierendes Magnetfeld rotiert Spin minimal, falls dessen Frequenz in Phase zur Spinpräzession ist.

1. relative Polarisation gegen Energie
2. ν Spinpräzessionen pro Speicherringdurchlauf
3. Polarisation durch Solokov-Ternov Mechanismus, relativistische Elektronen/Positronen polarisieren durch spin-flip synchrotron radiation (92.4%)
4. Andere Effekte sorgen auch für Spinpräzession
5. Misst offensichtlich nur gemittelt über mehrere Elektronen
6. Leichte Asymmetrie aufgrund von Gezeiten in 12 Minuten!

Präzisionsmessungen

Einfluss auf Beschleuniger durch Gezeiten



LEP Ausdehnung[12]

Z^0 Resonanz

2018-12-07

Z^0 Resonanz

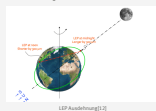
└ Experimentelle Untersuchung

└ Präzisionsmessungen

└ Präzisionsmessungen

Präzisionsmessungen

Einfluss auf Beschleuniger durch Gezeiten



LEP Ausdehnung[12]

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

Präzisionsmessungen

Einfluss auf Beschleuniger durch Gezeiten

Z^0 Resonanz

2018-12-07

Z^0 Resonanz

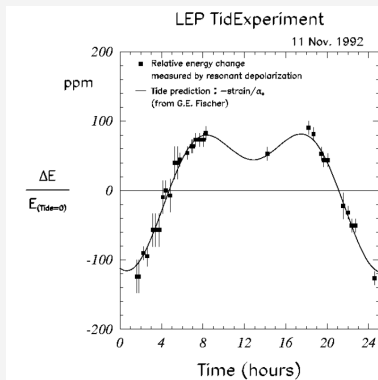
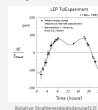
Experimentelle Untersuchung

Präzisionsmessungen

Präzisionsmessungen

Präzisionsmessungen

Einfluss auf Beschleuniger durch Gezeiten

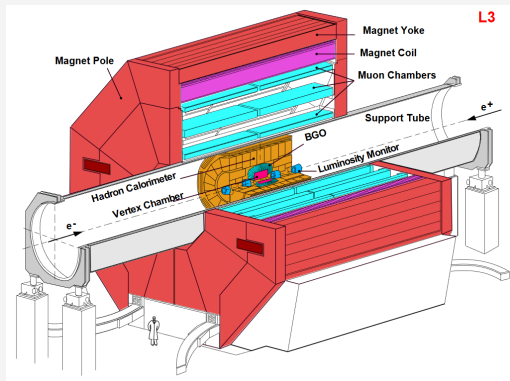


Relative Strahlenergieänderung[13]

1. Resonante depolarisation genaue Energiemessung (notwendig)
2. Über Verhalten des Spins der beschleunigten Elektronen
3. Größe primär relevant für Energie (+Synchrotron strahlung)
4. Energiemodell zur Vorhersage der Energie zu jedem Zeitpunkt als Lösung

Präzisionsmessungen

L3 Detektoraufbau am LEP



L3 Detektor [13]

Z⁰ Resonanz

2018-12-07

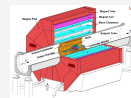
Z⁰ Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Präzisionsmessungen

└ Präzisionsmessungen

Präzisionsmessungen
L3 Detektoraufbau am LEP

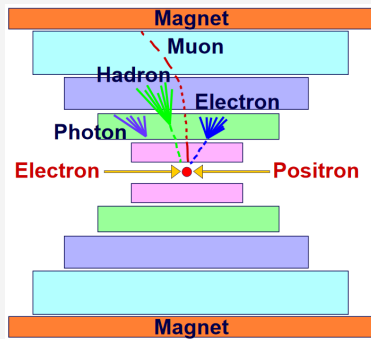


L3 Detektor [13]

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

Präzisionsmessungen

L3 Detektoraufbau am LEP



L3 Detektor [13]

Von Innen nach Außen:

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

Z^0 Resonanz

2018-12-07

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. Myonenkammer

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. Myonenkammern: Für Myonen, groß, weil geringe WW
7. Vortrag speziell zur Teilchendetektion

Präzisionsmessungen

Z^0 -Zerfallskanäle

Z^0 Resonanz

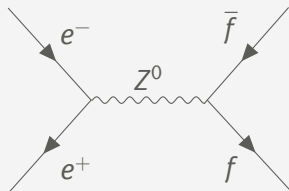
2018-12-07

Z^0 Resonanz

Experimentelle Untersuchung

Präzisionsmessungen

Präzisionsmessungen



e^+e^- -Vernichtung über Z^0 [8]

► mögliche Zerfälle:

$$Z^0 \rightarrow e^- + e^+ \\ \mu^- + \mu^+ \\ \tau^- + \tau^+ \\ \nu_{e,\mu,\tau} + \bar{\nu}_{e,\mu,\tau} \\ \text{Hadronen}$$

1. Messung dieser Zerfallskanäle
2. keine top-quarks, weil zu schwer

Präzisionsmessungen
 Z^0 -Zerfallskanäle

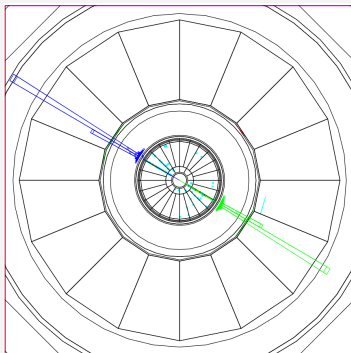


► mögliche Zerfälle:

$$Z^0 \rightarrow e^- + e^+ \\ \mu^- + \mu^+ \\ \tau^- + \tau^+ \\ \nu_{e,\mu,\tau} + \bar{\nu}_{e,\mu,\tau} \\ \text{Hadronen}$$

Präzisionsmessungen

L3 Detektor (1993 am LEP)



$$e^- + e^+ \rightarrow Z^0 \rightarrow e^- + e^+ [13]$$

- ▶ Energiemessung im elm. Kalorimeter
- ▶ Entgegengesetzte Ausbreitung

Z^0 Resonanz

2018-12-07

Z^0 Resonanz
└ Experimentelle Untersuchung
└ Präzisionsmessungen
└ Präzisionsmessungen

Präzisionsmessungen
L3 Detektor (1993 am LEP)



- ▶ Energiemessung im elm. Kalorimeter
- ▶ Entgegengesetzte Ausbreitung

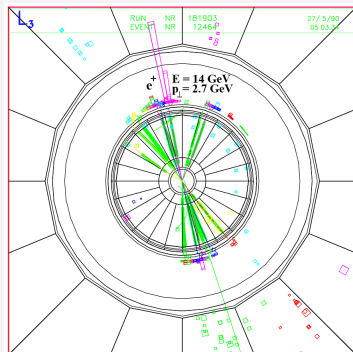
$$e^- + e^+ \rightarrow Z^0 \rightarrow e^- + e^+ [13]$$

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)

Z^0 Resonanz



$e^- + e^+ \rightarrow Z^0 \rightarrow \text{hadronische Jets}$ [13]

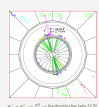
- ▶ Einzelnes Quark führt zu Quark-Antiquark-Paar Erzeugung, um isolierte Farbladung zu verhindern (Confinement)
- ▶ Reaktion äußert sich in hadronische Jets
- ▶ Energiemessung im Hadronischen Kalorimeter

2018-12-07

Z^0 Resonanz

- └ Experimentelle Untersuchung
 - └ Präzisionsmessungen
 - └ Präzisionsmessungen

Präzisionsmessungen
L3 Detektor (1993 am LEP)



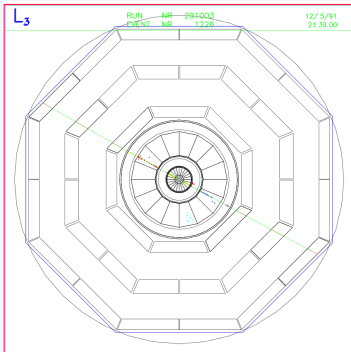
- ▶ Einzelnes Quark führt zu Quark-Antiquark-Paar Erzeugung, um isolierte Farbladung zu verhindern (Confinement)
- ▶ Reaktion äußert sich in hadronische Jets
- ▶ Energiemessung im Hadronischen Kalorimeter

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

Präzisionsmessungen

L3 Detektor (1993 am LEP)

Z^0 Resonanz



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

$$e^- + e^+ \rightarrow Z^0 \rightarrow \mu^+ + \mu^- [13]$$

2018-12-07

Z^0 Resonanz

- └ Experimentelle Untersuchung
 - └ Präzisionsmessungen
 - └ Präzisionsmessungen

Präzisionsmessungen
L3 Detektor (1993 am LEP)



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

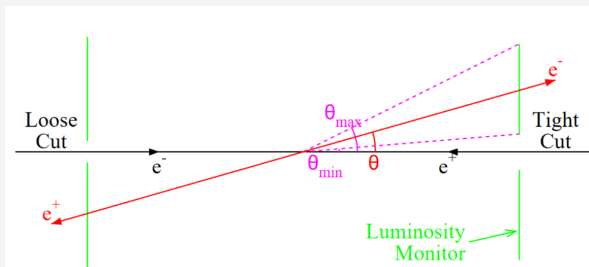
$$e^- + e^+ \rightarrow Z^0 \rightarrow \mu^+ + \mu^- [13]$$

1. Muon erst an äußeren Platten detektiert

Präzisionsmessungen

Luminosität

$$\sigma = \frac{N_{\text{sel}} - N_{\text{bg}}}{\epsilon_{\text{sel}} \mathcal{L}}$$



Bhabha Streuung [13]

Z⁰ Resonanz

2018-12-07


Z⁰ Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Präzisionsmessungen

└ Präzisionsmessungen

Präzisionsmessungen
Luminosität

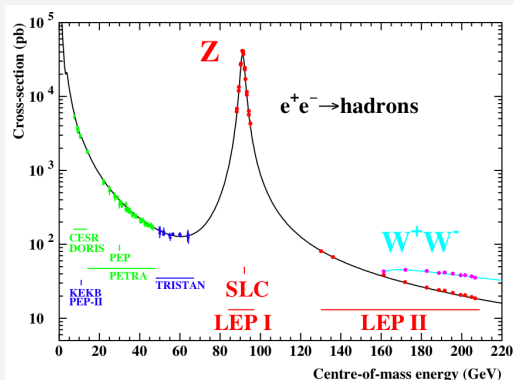
$$\sigma = \frac{N_{\text{sel}} - N_{\text{bg}}}{\epsilon_{\text{sel}} \mathcal{L}}$$


Bhabha Streuung [13]

1. Luminosität hängt von Beschleuniger ab
2. sigma ist gesucht
3. N sind Anzahl Teilchen bei Reaktion
4. epsilon N_{bg} können durch Simulationen bestimmt werden (in epsilon ist auch Akzeptanzrate)
5. Geringer Winkel theta max, da Bhabha stark winkel abhängig ist.
6. Wirkungsquerschnitt für Bhabha-Streuung $ee \rightarrow ee$ reine QED ziemlich genau bekannt (Kamera am Detektor?)
7. Bestimmen der Bunches die kollidieren? Über bekannte Luminosität, da bspw. Winkel abhängigkeit variiert werden kann.

Präzisionsmessungen

Z^0 -Resonanz bei ≈ 91 GeV



Wirkungsquerschnitte verschiedener Beschleuniger [14]

Z^0 Resonanz

2018-12-07

Z^0 Resonanz

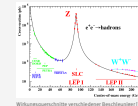
Experimentelle Untersuchung

Präzisionsmessungen

Präzisionsmessungen

Präzisionsmessungen

Z^0 -Resonanz bei ≈ 91 GeV



1. Achsen + Farbliche Zuordnung
2. Z^0 Resonanz und weitere Messungen
3. Große Breite \Rightarrow geringe Lebensdauer
4. Masse top Quark wurde gut durch $2M_W$ vermutet
5. Breite immer Γ_Z egal welcher Zerfall, Höhe variiert

Eigenschaften

Experimentelle Bestimmung

► Messung:

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

Z^0 Resonanz

2018-12-07

Z^0 Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Eigenschaften

└ Eigenschaften

Eigenschaften

Experimentelle Bestimmung

► Messung:

► Ruhemasse $M_Z = 91,188(2) \text{ GeV}/c^2$

► Zerfallsbreite $\Gamma_Z = 2,495(2) \text{ GeV}$

1. Über Wirkungsquerschnitt? src [PD12]

2. Breite + Maximalstelle

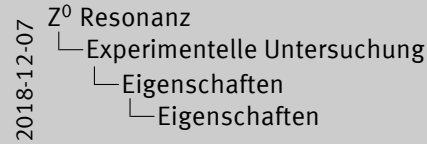
Eigenschaften

Experimentelle Bestimmung

- ▶ Messung:
 - ▶ Ruhemasse $M_Z = 91,188(2) \text{ GeV}/c^2$
 - ▶ Zerfallsbreite $\Gamma_Z = 2,495(2) \text{ GeV}$
- ▶ 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) %

Z^0 Resonanz



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

Eigenschaften
Experimentelle Bestimmung

▶ Messung:
 ▶ Ruhemasse $M_Z = 91,188(2) \text{ GeV}/c^2$
 ▶ Zerfallsbreite $\Gamma_Z = 2,495(2) \text{ GeV}$

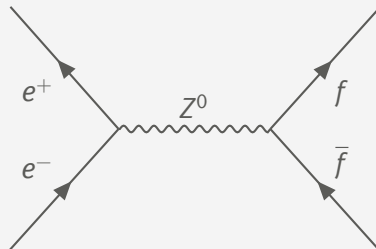
▶ Zerfall:

$Z^0 \rightarrow e^- + e^+$	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) %

Anzahl Neutrinogenerationen

Wirkungsquerschnitt

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



2018-12-07

Z^0 Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Anzahl Neutrinogenerationen

└ Anzahl Neutrinogenerationen

Anzahl Neutrinogenerationen
Wirkungsquerschnitt

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

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

Anzahl Neutrinogenerationen

Berechnung der Zerfallsbreite

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

Z⁰ Resonanz

2018-12-07

Z⁰ Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Anzahl Neutrinogenerationen

└ Anzahl Neutrinogenerationen

Anzahl Neutrinogenerationen
Berechnung der Zerfallsbreite

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

1. Breite ergibt sich aus Partial Breiten

Anzahl Neutrinogenerationen

Berechnung der 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

2018-12-07

Z^0 Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Anzahl Neutrinogenerationen

└ Anzahl Neutrinogenerationen

Anzahl Neutrinogenerationen
Berechnung der 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 Neutrino-Generationen

Berechnung der Zerfallsbreite

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

N_C : Anzahl der Farbladungen

N_ν : Anzahl der Neutrino-Generationen

G_F : Fermi-Kopplungskonstante

Q_f : Ladung

2018-12-07

Z⁰ Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Anzahl Neutrino-Generationen

└ Anzahl Neutrino-Generationen

Anzahl Neutrino-Generationen

Berechnung der Zerfallsbreite

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

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

Berechnung der Zerfallsbreite

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

N_C : Anzahl der Farbladungen

N_ν : Anzahl der Neutrino-Generationen

G_F : Fermi-Kopplungskonstante

Q_f : Ladung

2018-12-07

Z⁰ Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Anzahl Neutrino-Generationen

└ Anzahl Neutrino-Generationen

Anzahl Neutrino-Generationen

Berechnung der 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

Berechnung der Zerfallsbreite

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

N_C : Anzahl der Farbladungen

N_V : Anzahl der Neutrino-generationen

G_F : Fermi-Kopplungskonstante

Q_f : Ladung

2018-12-07

Z⁰ Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Anzahl Neutrino-generationen

└ Anzahl Neutrino-generationen

Anzahl Neutrino-generationen

Berechnung der Zerfallsbreite

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

1. Summe

Anzahl Neutrinogenerationen

Berechnung der Zerfallsbreite

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

N_C : Anzahl der Farbladungen
 N_ν : Anzahl der Neutrinogenerationen
 G_F : Fermi-Kopplungskonstante
 Q_f : Ladung

2018-12-07

Z⁰ Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Anzahl Neutrinogenerationen

└ Anzahl Neutrinogenerationen

Anzahl Neutrinogenerationen
Berechnung der Zerfallsbreite

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

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

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

2018-12-07

Z^0 Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Anzahl Neutrino-Generationen

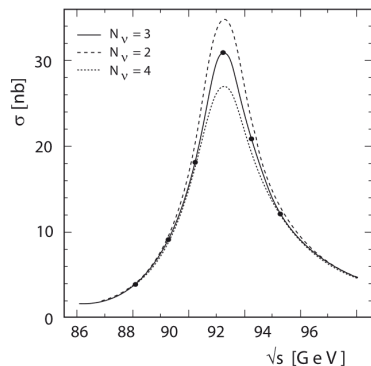
└ Anzahl Neutrino-Generationen

Anzahl Neutrino-Generationen
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
- ▶ Messung bestätigt vermutete 3 Neutrino-Generationen
- ▶ Hinweis für 3 Generationen von Leptonen und Quarks

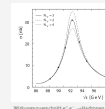
Wirkungsquerschnitt $e^+e^- \rightarrow \text{Hadronen}$ [4]

2018-12-07

Z^0 Resonanz

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

Anzahl Neutrino-Generationen



- ▶ OPAL-Detektor am LEP
- ▶ Messung bestätigt vermutete 3 Neutrino-Generationen
- ▶ Hinweis für 3 Generationen von Leptonen und Quarks

1. Cern Experiment
2. Wirkungsquerschnitt gegen Schwerpunktenenergie
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

- ▶ Schwache und Elektromagnetische Wechselwirkung lassen sich vereinheitlichen
- ▶ Weinbergwinkel $\cos \theta_W \approx 0.88$
- ▶ Zerfallsbreite $\Gamma_Z \approx 2,50 \text{ GeV}$
- ▶ 3 Neutrinogenerationen

Z^0 Resonanz

2018-12-07

Z^0 Resonanz
└ Zusammenfassung

└ Zusammenfassung

Zusammenfassung

- ▶ Schwache und Elektromagnetische Wechselwirkung lassen sich vereinheitlichen
- ▶ Weinbergwinkel $\cos \theta_W \approx 0.88$
- ▶ Zerfallsbreite $\Gamma_Z \approx 2,50 \text{ GeV}$
- ▶ 3 Neutrinogenerationen

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.

2018-12-07

Z⁰ Resonanz
└ Zusammenfassung

└ Quellen

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



Schwache_Wechselwirkung. URL:
https://de.wikipedia.org/wiki/Schwache_Wechselwirkung
(besucht am 04.12.2018).



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>.



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



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

2018-12-07

Z⁰ Resonanz
└ Zusammenfassung

└ Quellen

Quellen II

- 1 Schwachwechselwirkung. URL:
https://de.wikipedia.org/wiki/Schwache_Wechselwirkung
(besucht am 04.12.2018).
- 2 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>.
- 3 Weak neutral current. URL:
<https://www.symmetrymagazine.org/article/august-2009/weak-neutral-current> (besucht am 03.12.2018).
- 4 Donald H. Perkins. Introduction to High Energy Physics. Cambridge University Press, 2000.

Quellen III



International Masterclasses. URL:

<http://atlas.physicsmasterclasses.org/de/index.htm> (besucht am 04.12.2018).



The LEP Accelerator. URL:

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



L. Arnaudon u. a. „Accurate determination of the LEP beam energy by resonant depolarization“. In: Zeitschrift fr Physik C Particles and Fields 66.1-2 (März 1995), S. 45–62. DOI: 10.1007/bf01496579. URL: <https://doi.org/10.1007/bf01496579>.

2018-12-07

Z⁰ Resonanz
└ Zusammenfassung
└ Quellen

Quellen III

- 1 International Masterclasses. URL: <http://atlas.physicsmasterclasses.org/de/index.htm> (Besucht am 04.12.2018).
- 2 The LEP Accelerator. URL: <http://www.hep.ucl.ac.uk/~jpc/all/ulthesis/node15.html> (Besucht am 03.12.2018).
- 3 L. Arnaudon u. a. „Accurate determination of the LEP beam energy by resonant depolarization“. In: Zeitschrift fr Physik C Particles and Fields, 66.1-2 (März 1995), S. 45–62. DOI: 10.1007/bf01496579. URL: <https://doi.org/10.1007/bf01496579>.

Quellen IV



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 Z0-Resonanz. URL: https://www.physik.hu-berlin.de/de/eephys/teaching/lab/z0resonance/index_html (besucht am 25. 11. 2018).



The ALEPH Collaboration u. a. „Precision Electroweak Measurements on the Z Resonance“. In: (2005). DOI: 10.1016/j.physrep.2005.12.006. eprint: [arXiv:hep-ex/0509008](https://arxiv.org/abs/hep-ex/0509008).

2018-12-07

Z⁰ Resonanz

Zusammenfassung

Quellen

- Masterclasses Atlas ist qualitativ gut

Quellen IV

- 1 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).
- 2 Versuch Z0-Resonanz. URL: https://www.physik.hu-berlin.de/de/eephys/teaching/lab/z0resonance/index_html (besucht am 25. 11. 2018).
- 3 The ALEPH Collaboration u. a. „Precision Electroweak Measurements on the Z Resonance“. In: (2005). DOI: 10.1016/j.physrep.2005.12.006. eprint: [arXiv:hep-ex/0509008](https://arxiv.org/abs/hep-ex/0509008).

Vielen Dank für eure Aufmerksamkeit!

Fragen?

Vielen Dank für eure Aufmerksamkeit!

Fragen?