

Z⁰-Resonanz

Alexander Neuwirth



2018-12-10 Z⁰ Resonanz

1. Begrüßung
2. Thema

Gliederung

Historischer Überblick

Theorie

Experimentelle Untersuchung

Zusammenfassung

Z^0 Resonanz

2018-12-10 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]

2018-12-10

 Z^0 Resonanz

└ Historischer Überblick

└ Historischer Überblick

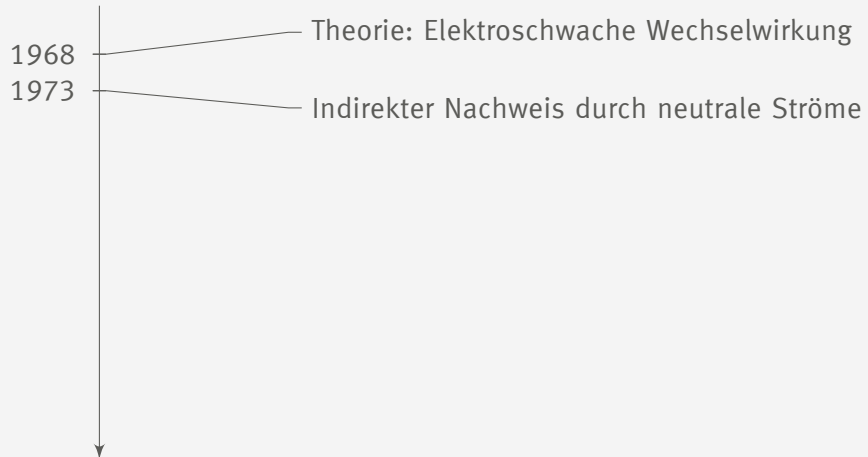
Historischer Überblick

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



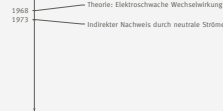
2018-12-10

Z^0 Resonanz

└ Historischer Überblick

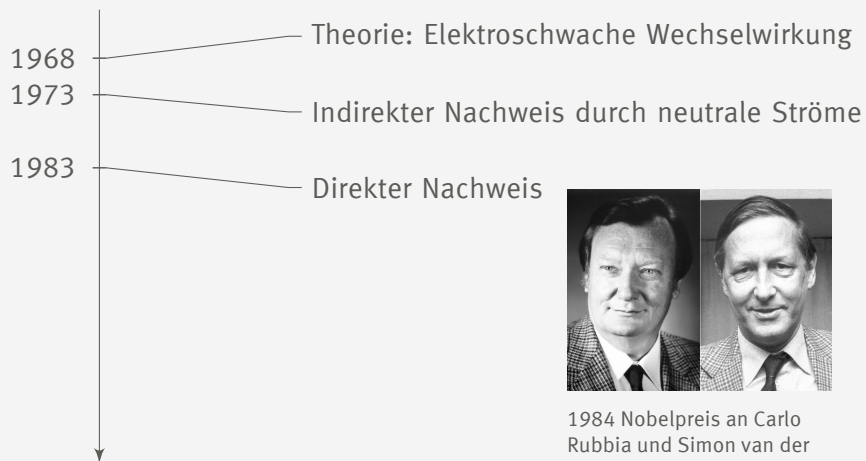
└ Historischer Überblick

Historischer Überblick



1. Gargamelle-Blasenkammer am CERN

Historischer Überblick



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

2018-12-10

Z⁰ Resonanz

└ Historischer Überblick

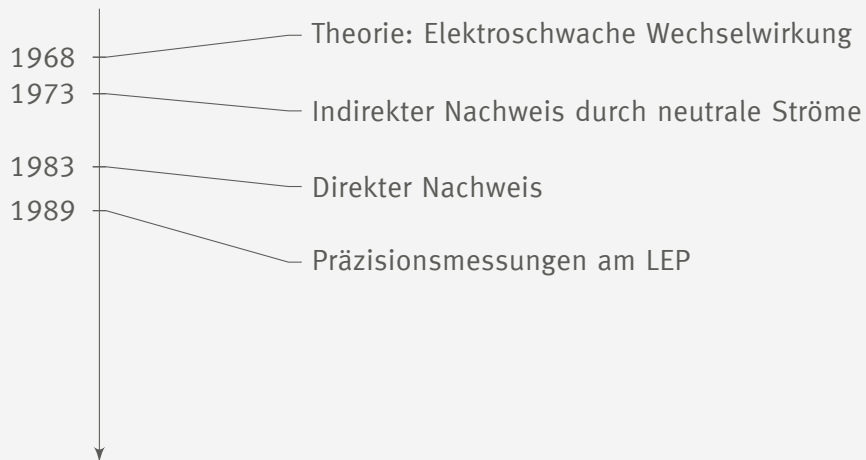
└ Historischer Überblick

Historischer Überblick



1. Am SppS
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



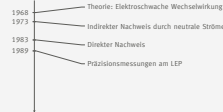
2018-12-10

Z^0 Resonanz

└ Historischer Überblick

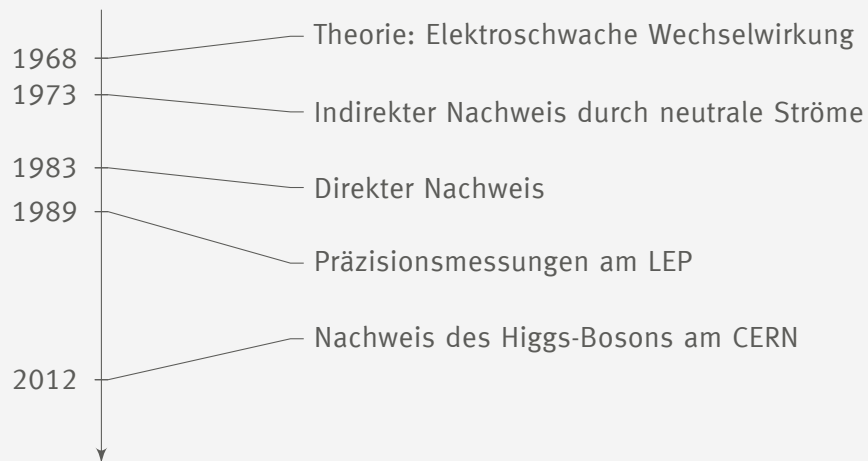
└ Historischer Überblick

Historischer Überblick



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

Historischer Überblick



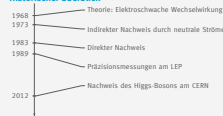
2018-12-10

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	Y Photon
				125,09 GeV Higgs Boson
Quarks				
	4,8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	95 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	4,18 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom	0 0 1 g Gluon
	<2 eV 0 $\frac{1}{2}$ v _e Elektron-Neutrino	<0,19 MeV 0 $\frac{1}{2}$ v _μ Myon-Neutrino	<18,2 MeV 0 $\frac{1}{2}$ v _τ Tau-Neutrino	91,2 GeV 0 $\frac{1}{2}$ Z ⁰ Z Boson
Leptonen				
	0,511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e Elektron	105,7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ Myon	1,777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ Tau	80,4 GeV ±1 1 W [±] 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]

2018-12-10

Z⁰ Resonanz

└ Theorie

└ Einordnung im Standardmodell der Elementarteilchen

└ Einordnung im Standardmodell der Elementarteilchen

Einordnung im Standardmodell der Elementarteilchen



Z⁰-Boson:
 ▶ Lebensdauer $\tau \approx 3 \cdot 10^{-25} \text{ s}$
 ▶ Masse $M = 91,2 \text{ GeV}$
 ▶ ungeladen
 ▶ eigenes Antiteilchen

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. Kräfte durch Austauschteilchen
8. Photon elektro magn. beispielweise Elektron-Elektron-Streuung, Rutherford Streuung
9. W,Z bsplw. Beta-Zerfall, Elektron-Positron-Streuung (Energieabhängig)
10. Gluon Kernzusammenhalt, Farbladung, 8 Sorten (n-p-Anziehung), Quarkanziehung
11. Nur durch Z-Boson lässt sich Neutrino-Neutrino-WW erklären, da sie nicht elektrisch sind.
12. Warum? Weil Divergenzen in höherer Ordnung/Energien auftreten ($E > M_W$)

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	$\begin{matrix} +1/2 \\ -1/2 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 0 \\ -1 \end{matrix}$
	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	$\begin{matrix} +1/2 \\ -1/2 \end{matrix}$	$\begin{matrix} +2/3 \\ -1/3 \end{matrix}$
	u_R	c_R	t_R	0	0	+2/3
	d_R	s_R	b_R	0	0	-1/3

Schwacher Isospin[4]

2018-12-10

Z⁰ Resonanz

└ Theorie

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

Elektroschwache Vereinheitlichung
Schwacher Isospin

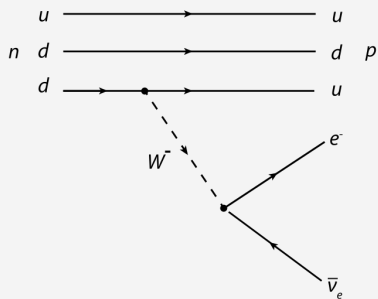
	Fermionmultipletts			T	T_3	z_f
Leptonen	$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}_L$	1/2	$\begin{matrix} +1/2 \\ -1/2 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 0 \\ -1 \end{matrix}$
Quarks	$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix}_L$	1/2	$\begin{matrix} +1/2 \\ -1/2 \end{matrix}$	$\begin{matrix} +2/3 \\ -1/3 \end{matrix}$
	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. Rechtshändige e, μ, τ Singulett Zustand.
3. Chiralität (l/r), Helizität, aber lorentzinvariant, Spinor Symmetrie
4. Rechtshändige Neutrinos $T_3 = z = 0$, keine WW, Auftreten in Natur unbekannt
5. T_3 Werte Bereich analog zu anderen Spins
6. invers für Antiteilchen: rechshändige Fermionen (linkshändige Antifermionen) Singulett ($T = 0 = T_3$)
7. Umwandlung durch Absorption von W^\pm -Boson innerhalb Multiplett (darin Ladungsdifferenz = 1)

Elektroschwache Vereinheitlichung

Schwacher Isospin



β^- -Zerfall[5]

Z^0 Resonanz

2018-12-10

Z^0 Resonanz

└ Theorie

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

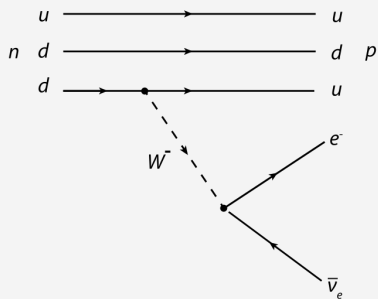
Elektroschwache Vereinheitlichung
Schwacher Isospin



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

Elektroschwache Vereinheitlichung

Schwacher Isospin



β^- -Zerfall[5]

► T_3 soll erhalten bleiben

Z^0 Resonanz

2018-12-10

Z^0 Resonanz

└ Theorie

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

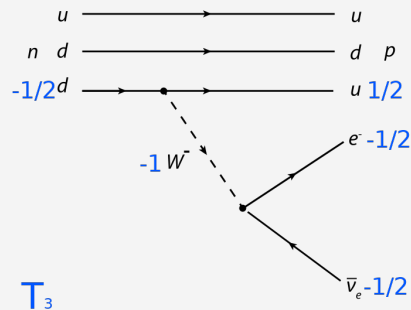
Elektroschwache Vereinheitlichung
Schwacher Isospin



1. T_3 Erhaltungsgröße

Elektroschwache Vereinheitlichung

Schwacher Isospin



β^- -Zerfall[5]

► T_3 soll erhalten bleiben

► $W^-: T_3 = -1$

2018-12-10

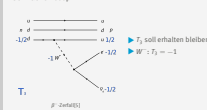
Z^0 Resonanz

Theorie

Elektroschwache Vereinheitlichung

Elektroschwache Vereinheitlichung

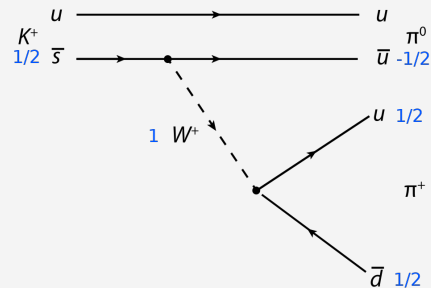
Elektroschwache Vereinheitlichung
Schwacher Isospin



1. T_3 in Graphik
2. W^- muss -1 sein
3. W^+ aus β^+ Zerfall
4. Mehr zum Beta-Zerfall nächste Woche (+Paritätsverletzung)

Elektroschwache Vereinheitlichung

Schwacher Isospin



K^+ -Zerfall[5]

2018-12-10

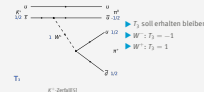
Z⁰ Resonanz

Theorie

Elektroschwache Vereinheitlichung

Elektroschwache Vereinheitlichung

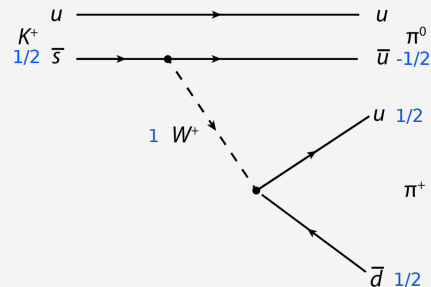
Elektroschwache Vereinheitlichung
Schwacher Isospin



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

Elektroschwache Vereinheitlichung

Schwacher Isospin



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

K^+ -Zerfall[5]

2018-12-10

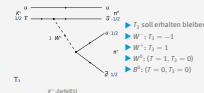
Z^0 Resonanz

Theorie

Elektroschwache Vereinheitlichung

Elektroschwache Vereinheitlichung

Elektroschwache Vereinheitlichung
Schwacher Isospin



1. Analog zu $1/2 \times 1/2$ Gekoppelten Spins
2. Triplet und Singulett Zustände
3. B^0 postuliert

Elektroschwache Vereinheitlichung

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

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

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

2018-12-10

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:

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

2018-12-10

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:

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

2018-12-10

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

Z^0 Resonanz

2018-12-10 Z^0 Resonanz
└ Experimentelle Untersuchung

Historischer Überblick

Theorie

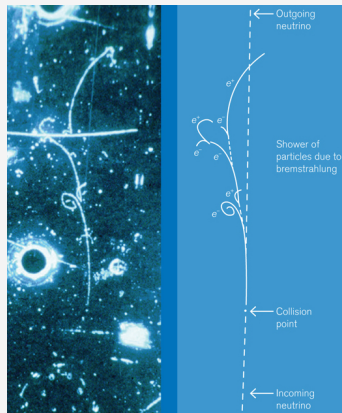
Experimentelle Untersuchung

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

Zusammenfassung

Indirekter Nachweis

des Z^0 -Bosons durch neutrale Ströme



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

[6][7]

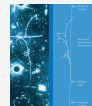
Z^0 Resonanz

2018-12-10

Z^0 Resonanz

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

Indirekter Nachweis
des Z^0 -Bosons durch neutrale Ströme



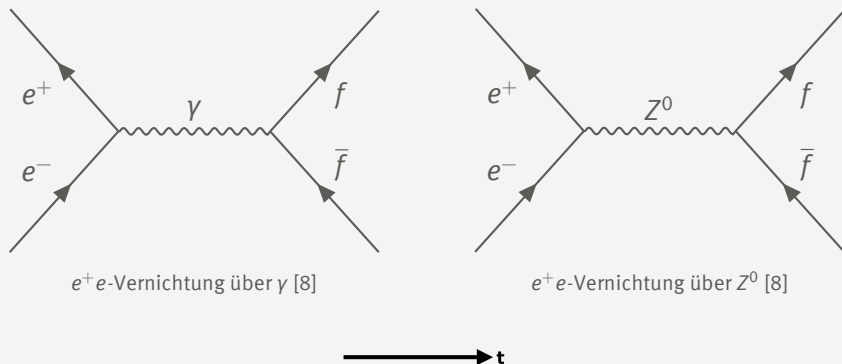
- ▶ Neutrinostrahl durch $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \bar{\nu}_\mu$
- ▶ Blasen-kammer:
 $\bar{\nu}_\mu + e^- \xrightarrow{Z^0} \bar{\nu}_\mu + e^-$
- ▶ Elektron sendet Bremsstrahlung aus
- ▶ e^-e^+ -Paarbildung \rightarrow elektromagnetischer Schauer

[6][7]

1. 1973 Gargamelle Blasnekammer am CERN
2. Striche und Kreise sind Lamben und Spiegel Reflexionen
3. Myonlose Neutrinoeaktion
4. Neutrale Ströme von unten nach oben Antineutrinostrahl in Blaskammer.
5. Neutronstrahl durch bsplw. $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \bar{\nu}_\mu$ und Ladungsfilter
6. Photon nur bei elektr. Prozessen.(\Rightarrow neutraler Strom, Z)
7. Vorhergesagter Winkel und 1/3 Energie des e^- impliziert Wechselwirkung durch neutrale Ströme.
8. 700000 - Bilder überprüft. Spiral/Bremsstrahlung.

Erzeugung des Z^0 -Bosons

Feynmandiagramme zur Elektron-Positron-Annihilation



2018-12-10

Z^0 Resonanz

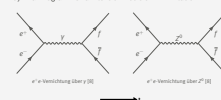
Experimentelle Untersuchung

Erzeugung des Z^0 -Bosons

Erzeugung des Z^0 -Bosons

Erzeugung des Z^0 -Bosons

Feynmandiagramme zur Elektron-Positron-Annihilation

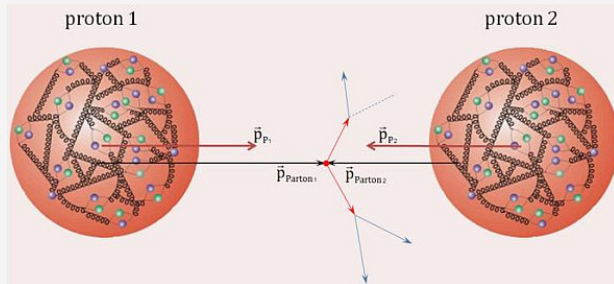


- W/Z-Boson durch Antilepton+Lepton/AntiQuark+Quark Reaktion
- kollidierende Teilchenstrahlen
- feynman diagram
- Zeit nach rechts
- über yoder Z zu Fermion und Antifermion paar.
- bei passender Energie approx M_Z dominiert Z^0 , aus QFT+Feynmanregeln
- s-Kanal

Erzeugung des Z^0 -Bosons

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

- ▶ $u + \bar{u} \rightarrow Z^0$: pp -Kollision benötigt $E_p \gtrapprox 600 \text{ GeV}$
- ▶ $u + \bar{u} \rightarrow Z^0$: $p\bar{p}$ -Kollision benötigt $E_p \gtrapprox 300 \text{ GeV}$



Proton-Proton-Kollision [9]

Z^0 Resonanz

2018-12-10

Z^0 Resonanz

Experimentelle Untersuchung

Erzeugung des Z^0 -Bosons

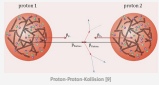
Erzeugung des Z^0 -Bosons

Erzeugung des Z^0 -Bosons

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

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

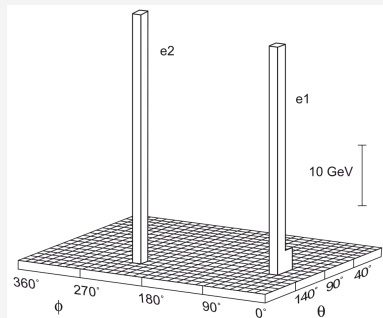
▶ $u + \bar{u} \rightarrow Z^0$: $p\bar{p}$ -Kollision benötigt $E_p \gtrapprox 300 \text{ GeV}$



1. 2 Möglichkeiten Z-Boson zu erzeugen mit Protonen (+Anti)
2. Energie muss in Quarks enthalten sein \rightarrow viel mehr Energie auf Valenzquarks \Rightarrow e-e+ Kollision einfacher (analog mit d-quark)
3. Seequarks sind virtuelle QuarkAntiquark-Paare hier gekoppelt.
4. Keine Trennung up-down, sondern blau ist quark und grün ist Antiquark
5. Besser Proton-Antiproton, da weniger Energie notwendig.
6. Vorteilhaft in Beschleuniger inverse Rotation

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

2018-12-10

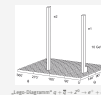
Z^0 Resonanz

Experimentelle Untersuchung

Nachweis

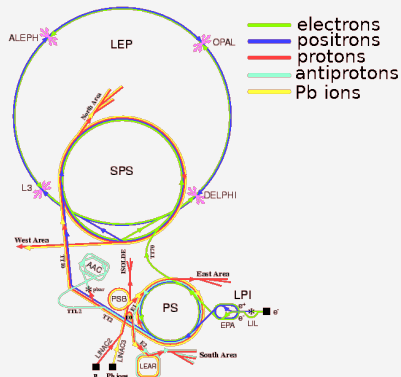
Nachweis

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^+

- Beispiel Event einer der ersten Messung 1983 am Sp \bar{p} S
- Plane unten sind Kalorimeterzellen zu Raumwinkel
- Energie Summe = Masse Z^0
- Winkel $180^\circ \Rightarrow$ entgegen gesetzte Richtungen



Beschleuniger am CERN 1996 [10]

2018-12-10

Z⁰ Resonanz

– Experimentelle Untersuchung

–Präzisionsmessungen

–Präzisionsmessungen

1. Farbe entspricht Teilchen

2. LEP wurde zu LHC

3. L3 wurde zu ALICE

4. Spps von 1981 bis 1991 anstelle von SPS

5. prinzipielle Erzeugung, Lineare Beschleuniger und Vorstufen bekannt aus Vorlesung



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 $2E_e \approx 2M_W c^2 \approx 160 \text{ GeV}$

2018-12-10

Z^0 Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Präzisionsmessungen

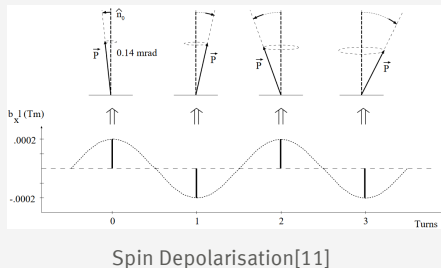
└ Präzisionsmessungen

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. 2 Untersuchungsreihen am LEP
2. Tritt nicht auf bei Energien $\approx 100 \text{ GeV}$
3. LEP1, 50 GeV, LEP2, 86 GeV $\rightarrow 104,6 \text{ GeV}$
4. Im folgenden Fokus aus LEP 1

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.

2018-12-10

Z⁰ Resonanz
└ Experimentelle Untersuchung
└ Präzisionsmessungen
└ Präzisionsmessungen

Präzisionsmessungen
Energiekalibration



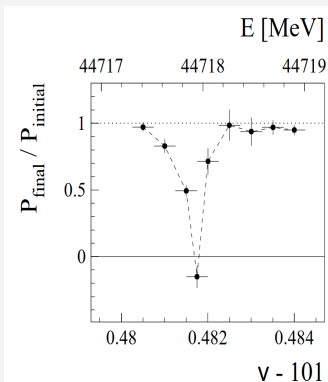
Resonante Spin Depolarisation:
1. transversale Polarisation der Strahlen
2. Energie E ist proportional zu Spinpräzessionen pro Speicherringdurchlauf ν
3. Radiales oszillierendes Magnetfeld rotiert Spin minimal, falls dessen Frequenz in Phase zur Spinpräzession ist.

1. Polarisation durch Synchrotronstrahlung bzw. Solokov-Ternov Mechanismus, relativistische Elektronen/Positronen polarisieren durch spin-flip synchrotron radiation (92.4%)
2. Andere Effekte (Erdmagnetfeld) sorgen auch für Spinpräzession
3. ν Spinpräzessionen pro Speicherringdurchlauf proportional zu E-Beam
4. ν wird über Spin Depolarisation gemessen

Präzisionsmessungen

Energiekalibration

Z^0 Resonanz



Relative Polarisation[11]

2018-12-10

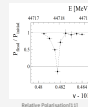
Z^0 Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Präzisionsmessungen

└ Präzisionsmessungen

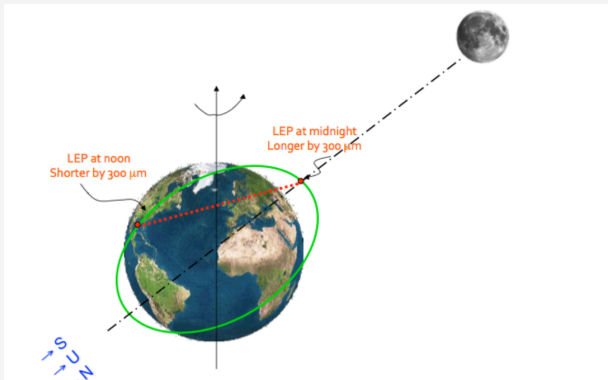
Präzisionsmessungen
Energiekalibration



1. relative Polarisation gegen Energie
2. Misst offensichtlich nur gemittelt über mehrere Elektronen
3. Leichte Asymmetrie aufgrund von Gezeiten in 12 Minuten!

Präzisionsmessungen

Einfluss auf Beschleuniger durch Gezeiten



LEP Ausdehnung[12]

Z^0 Resonanz

2018-12-10

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

2018-12-10

Z^0 Resonanz

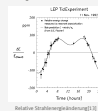
Experimentelle Untersuchung

Präzisionsmessungen

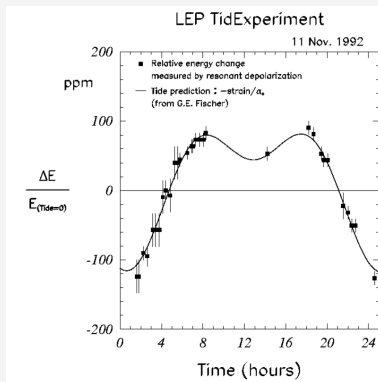
Präzisionsmessungen

Präzisionsmessungen

Einfluss auf Beschleuniger durch Gezeiten



[Item]Schwankung gemäß Erwartung

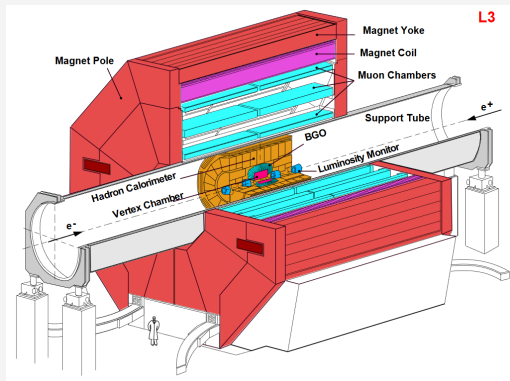


Relative Strahlenergieänderung[13]

1. relative Energie des Strahls über 24h
2. Energiemodell zur Vorhersage der Energie zu jedem Zeitpunkt als Lösung

Präzisionsmessungen

L3 Detektoraufbau am LEP



L3 Detektor [13]

Z⁰ Resonanz

2018-12-10

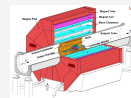
Z⁰ Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Präzisionsmessungen

└ Präzisionsmessungen

Präzisionsmessungen
L3 Detektoraufbau am LEP

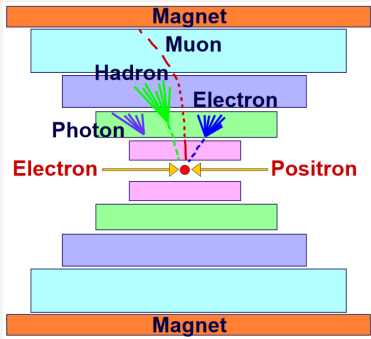


L3 Detektor [13]

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

2018-12-10

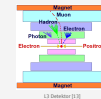
Z^0 Resonanz

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

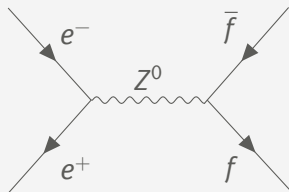
2018-12-10

Z^0 Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Präzisionsmessungen

└ Präzisionsmessungen



e^+e^- -Vernichtung über Z^0 [8]

► mögliche Zerfälle:

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

$$\mu^- + \mu^+$$

$$\tau^- + \tau^+$$

$$\nu_{e,\mu,\tau} + \bar{\nu}_{e,\mu,\tau}$$

$$q + \bar{q}$$

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

Präzisionsmessungen
 Z^0 -Zerfallskanäle



► mögliche Zerfälle:

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

$$\mu^- + \mu^+$$

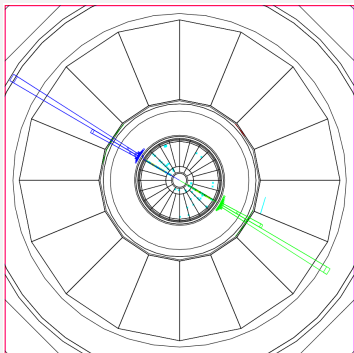
$$\tau^- + \tau^+$$

$$\nu_{e,\mu,\tau} + \bar{\nu}_{e,\mu,\tau}$$

$$q + \bar{q}$$

Präzisionsmessungen

L3 Detektor (1993 am LEP)



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

- ▶ Energiemessung im elm. Kalorimeter
- ▶ Entgegengesetzte Ausbreitung

Z⁰ Resonanz

2018-12-10

Z⁰ Resonanz
└ Experimentelle Untersuchung
└ Präzisionsmessungen
└ Präzisionsmessungen

Präzisionsmessungen
L3 Detektor (1993 am LEP)



- ▶ Energiemessung im elm. Kalorimeter
- ▶ Entgegengesetzte Ausbreitung

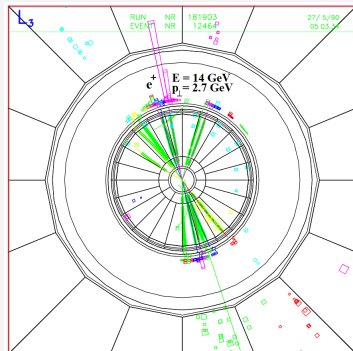
$$e^- + e^+ \rightarrow Z^0 \rightarrow e^- + e^+ [13]$$

1. L3 Detektor LEP
2. beispielhafte Ereignisse
3. entlang der Strahlachse
4. analog zu Lego
5. herausgezoomt, weil Enrgie weniger verteilt
6. Winkel 180° => 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

2018-12-10

Z^0 Resonanz

- └ Experimentelle Untersuchung
 - └ Präzisionsmessungen
 - └ Präzisionsmessungen

Präzisionsmessungen
L3 Detektor (1993 am LEP)



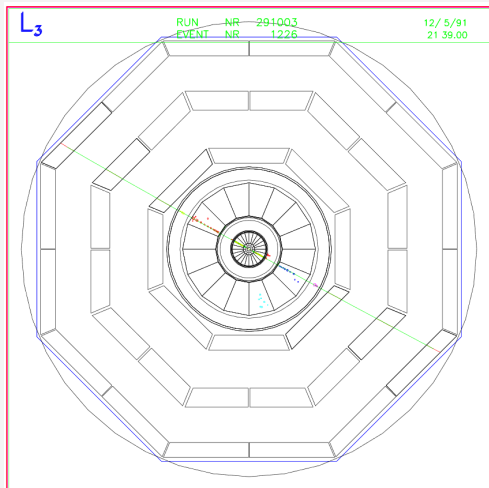
- ▶ Einzelnes Quark führt zu Quark-Antiquark-Paar Erzeugung, um isolierte Farbladung zu verhindern (Confinement)
- ▶ Reaktion äußert sich in hadronische Jets
- ▶ Energiemessung im Hadronischen Kalorimeter

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

Präzisionsmessungen

L3 Detektor (1993 am LEP)

- ▶ Messung der Spur der Myonen durch mehrere Myonenkammern
- ▶ kaum Absorption



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

Z^0 Resonanz

2018-12-10

Z^0 Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Präzisionsmessungen

└ Präzisionsmessungen

Präzisionsmessungen
L3 Detektor (1993 am LEP)

- ▶ Messung der Spur der Myonen durch mehrere Myonenkammern
- ▶ kaum Absorption

1. Muon erst an äußeren Platten detektiert

Präzisionsmessungen

Luminosität

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

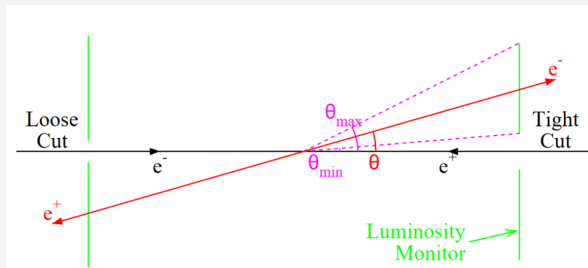
σ : Wirkungsquerschnitt

N_{sel} : Anzahl der Ereignisse

N_{bg} : Hintergrundereignisse

ϵ_{sel} : Effizienz

\mathcal{L} : Integrierte Luminosität



Bhabha Streuung [13]

2018-12-10

Z⁰ Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Präzisionsmessungen

└ Präzisionsmessungen

Präzisionsmessungen

Luminosität

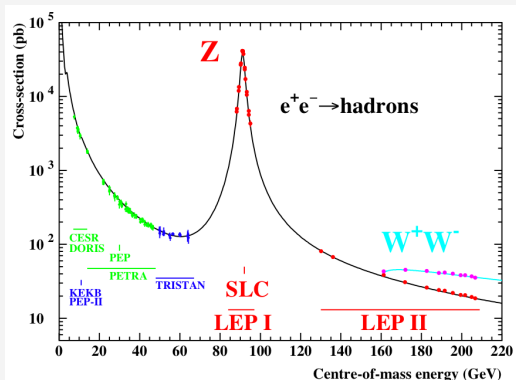
$$\sigma = \frac{N_{\text{sel}} - N_{\text{bg}}}{\epsilon_{\text{sel}} \mathcal{L}}$$



1. sigma ist gesucht
2. Luminosität hängt von Beschleuniger ab
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 -> ee reine QED ziemlich genau bekannt

Präzisionsmessungen

Z^0 -Resonanz bei ≈ 91 GeV



Wirkungsquerschnitte verschiedener Beschleuniger [14]

Z^0 Resonanz

2018-12-10

Z^0 Resonanz

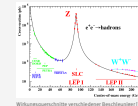
Experimentelle Untersuchung

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

2018-12-10

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

2018-12-10

Z^0 Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Eigenschaften

└ Eigenschaften

Eigenschaften

Experimentelle Bestimmung

- Messung:
 - Ruhemasse $M_Z = 91,188(2) \text{ GeV}/c^2$
 - Zerfallsbreite $\Gamma_Z = 2,495(2) \text{ GeV}$
- 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}
3. τ als Mischung von hadronischen Jets und elm., da τ schnell zerfällt

Anzahl Neutrinogenerationen

Wirkungsquerschnitt

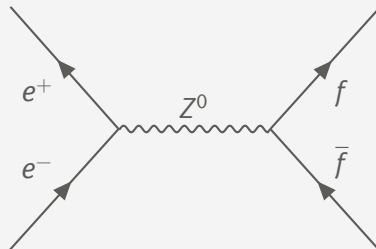
$$\sigma_f \propto \frac{s \cdot \Gamma_f \Gamma_e}{(s - M_Z^2)^2 + s^2 \Gamma_Z^2 / M_Z^2}$$

σ_f : Wirkungsquerschnitt

\sqrt{s} : Schwerpunktsenergie

Γ_i : Partialbreite

Γ_Z : Gesamtbreite



2018-12-10

Z⁰ Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Anzahl Neutrinogenerationen

└ Anzahl Neutrinogenerationen

Anzahl Neutrinogenerationen

Wirkungsquerschnitt

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

σ_f : Wirkungsquerschnitt

\sqrt{s} : Schwerpunktsenergie

Γ_i : Partialbreite

Γ_Z : Gesamtbreite

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

Anzahl Neutrinogenerationen

Berechnung der Zerfallsbreite

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

Z^0 Resonanz

2018-12-10

Z^0 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

2018-12-10

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

2018-12-10

Z⁰ Resonanz

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

Anzahl Neutrino-Generationen
 Berechnung der 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

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

2018-12-10

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

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

N_C : Anzahl der Farbladungen

N_ν : Anzahl der Neutrino-generationen

G_F : Fermi-Kopplungskonstante

Q_f : Ladung

2018-12-10

Z⁰ Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Anzahl Neutrino-generationen

└ Anzahl Neutrino-generationen

Anzahl Neutrino-generationen

Berechnung der Zerfallsbreite

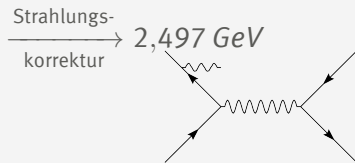
$$\begin{aligned}\Gamma_Z &= \sum_f \Gamma_{Z \rightarrow f\bar{f}} \\ &= \Gamma_{u,c,d,s,b} + \Gamma_{e,\mu,\tau} + \Gamma_{\nu_e,\nu_\mu,\nu_\tau} \\ &= N_C \cdot 2 \cdot \Gamma_u + N_C \cdot 3 \cdot \Gamma_d + 3 \cdot \Gamma_e + N_\nu \cdot \Gamma_\nu \\ &= 3 \cdot 2 \cdot 94,9 \text{ MeV} + 3 \cdot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

1. Summe

Anzahl Neutrinogenerationen

Berechnung der Zerfallsbreite

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



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

2018-12-10

Z⁰ Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└└ Anzahl Neutrinogenerationen

└└└ Anzahl Neutrinogenerationen

Anzahl Neutrinogenerationen
 Berechnung der Zerfallsbreite

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

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

2018-12-10

Z^0 Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Anzahl Neutrinogenerationen

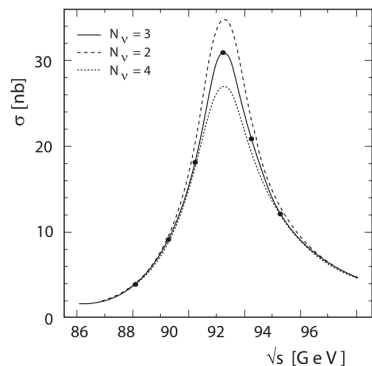
└ Anzahl Neutrinogenerationen

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

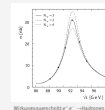
Wirkungsquerschnitt $e^+e^- \rightarrow \text{Hadronen}$ [4]

2018-12-10

Z^0 Resonanz

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

Anzahl Neutrino-Generationen



- ▶ OPAL-Detektor am LEP
- ▶ Messung bestätigt vermutete 3 Neutrino-Generationen
- ▶ Beleg 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 des Z⁰-Bosons $\Gamma_Z \approx 2,50 \text{ GeV}$
- ▶ Nachweis von 3 Neutrinogenerationen am LEP

2018-12-10

Z⁰ Resonanz
└ Zusammenfassung

└ Zusammenfassung

Zusammenfassung

- ▶ Schwache und Elektromagnetische Wechselwirkung lassen sich vereinheitlichen
- ▶ Weinbergwinkel $\cos \theta_W \approx 0.88$
- ▶ Zerfallsbreite des Z⁰-Bosons $\Gamma_Z \approx 2,50 \text{ GeV}$
- ▶ Nachweis von 3 Neutrinogenerationen am LEP

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.

2018-12-10

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.symmetrismagazine.org/article/august-2009/weak-neutral-current> (besucht am 03. 12. 2018).



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

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.symmetrismagazine.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>.

2018-12-10

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).

2018-12-10

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?