

# Z<sup>0</sup>-Resonanz

Alexander Neuwirth



2018-12-11

Z<sup>0</sup> Resonanz

1. Begrüßung
2. Thema

# Gliederung

Historischer Überblick zum  $Z^0$ -Boson

Theorie

Experimentelle Untersuchung

Zusammenfassung

$Z^0$  Resonanz

2018-12-11  $Z^0$  Resonanz  
└─ Gliederung  
└─ Gliederung

Gliederung

Historischer Überblick zum  $Z^0$ -Boson

Theorie

Experimentelle Untersuchung

Zusammenfassung

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

## Historischer Überblick zum $Z^0$ -Boson

Theorie

Experimentelle Untersuchung

Zusammenfassung

- Zunächst Historie

## Historischer Überblick zum $Z^0$ -Boson

1968

Theorie: Elektroschwache Wechselwirkung



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

2018-12-11

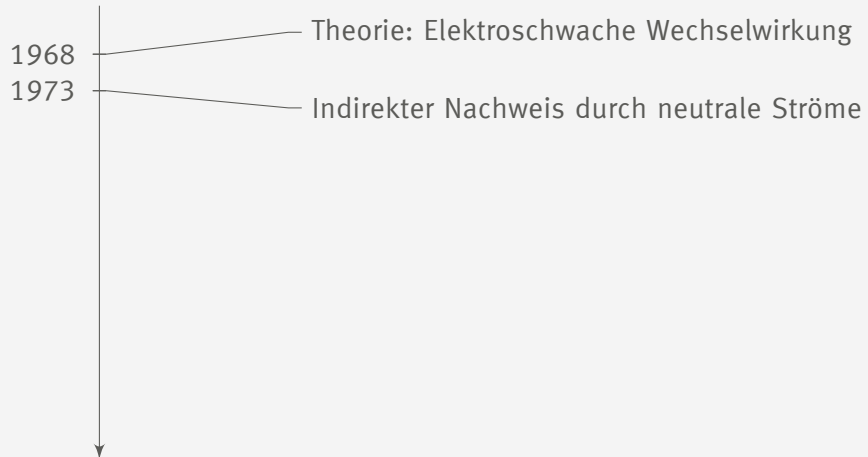
 $Z^0$  Resonanz└ Historischer Überblick zum  $Z^0$ -Boson└ Historischer Überblick zum  $Z^0$ -BosonHistorischer Überblick zum  $Z^0$ -Boson

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 zum $Z^0$ -Boson



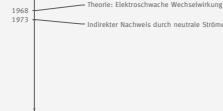
2018-12-11

$Z^0$  Resonanz

└ Historischer Überblick zum  $Z^0$ -Boson

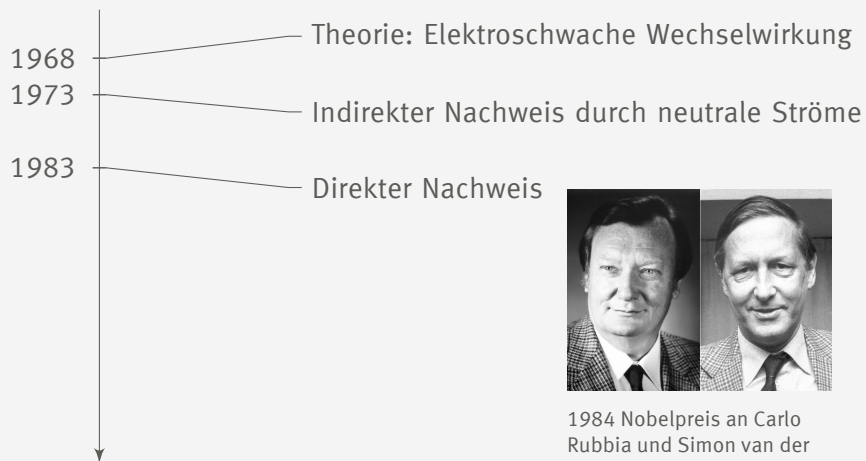
└ Historischer Überblick zum  $Z^0$ -Boson

Historischer Überblick zum  $Z^0$ -Boson



### 1. Gargamelle-Blasenkammer am CERN

## Historischer Überblick zum $Z^0$ -Boson



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

2018-12-11

$Z^0$  Resonanz

└ Historischer Überblick zum  $Z^0$ -Boson

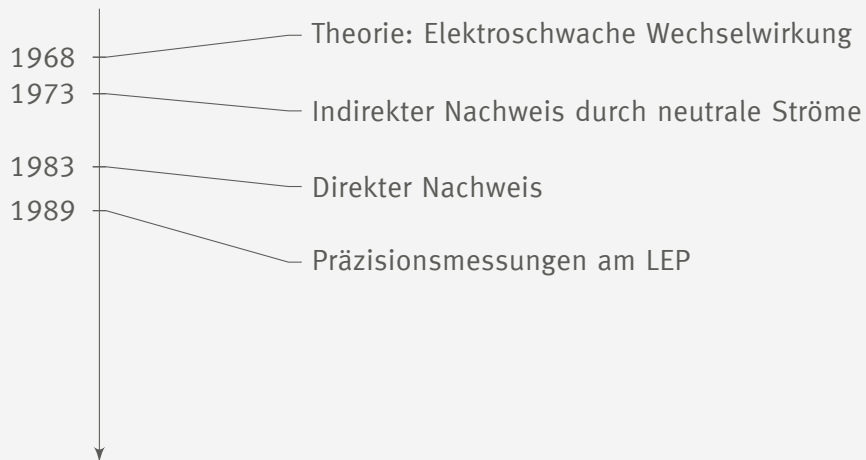
└ Historischer Überblick zum  $Z^0$ -Boson

Historischer Überblick zum  $Z^0$ -Boson



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 zum $Z^0$ -Boson

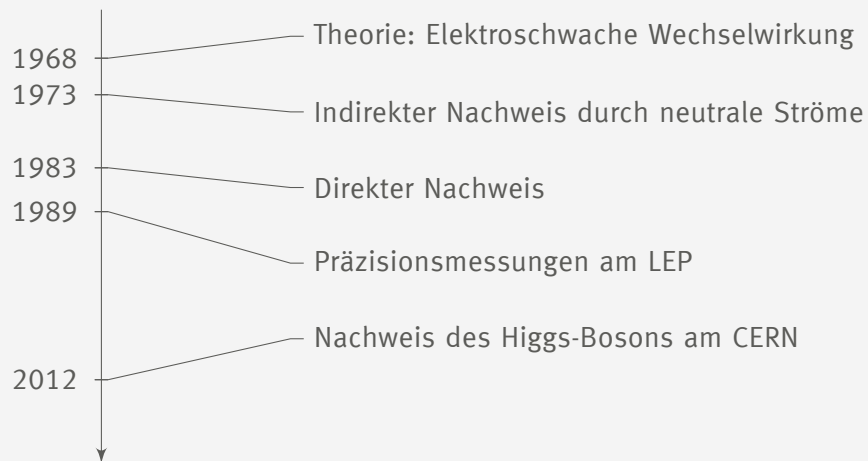


2018-12-11

 $Z^0$  Resonanz└ Historischer Überblick zum  $Z^0$ -Boson└ Historischer Überblick zum  $Z^0$ -BosonHistorischer Überblick zum  $Z^0$ -Boson

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

## Historischer Überblick zum $Z^0$ -Boson



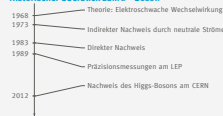
2018-12-11

$Z^0$  Resonanz

Historischer Überblick zum  $Z^0$ -Boson

Historischer Überblick zum  $Z^0$ -Boson

Historischer Überblick zum  $Z^0$ -Boson



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



## Historischer Überblick zum $Z^0$ -Boson

### Theorie

Einordnung im Standardmodell der Elementarteilchen  
Elektroschwache Vereinheitlichung

### Experimentelle Untersuchung

### Zusammenfassung

# Einordnung im Standardmodell der Elementarteilchen

Drei Generationen der Materie (Fermionen)

	I	II	III	
Masse	2,3 MeV	1,275 GeV	173,07 GeV	0
Ladung	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
Spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Name	u up	c charm	t top	Photon
	4,8 MeV	95 MeV	4,18 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Quarks	d down	s strange	b bottom	g 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
	$\nu_e$ Elektron-Neutrino	$\nu_\mu$ Myon-Neutrino	$\nu_\tau$ Tau-Neutrino	Z <sup>0</sup> Z Boson
	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV	80,4 GeV
	-1	-1	-1	$\pm 1$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Leptonen	e Elektron	$\mu$ Myon	$\tau$ Tau	W <sup>±</sup> W Boson

Eichbosonen

Standardmodell[3]

2018-12-11

Z<sup>0</sup> Resonanz

Theorie

Einordnung im Standardmodell der Elementarteilchen

Einordnung im Standardmodell der Elementarteilchen

Einordnung im Standardmodell der Elementarteilchen



Z<sup>0</sup> Boson:

- Masse  $M \approx 91,2 \text{ GeV}$
- ungeladen
- Lebensdauer  $\tau \approx 3 \cdot 10^{-25} \text{ s}$
- 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. Bestätigung der 3 Neutrinogenerationen
8. Kräfte durch Austauschteilchen
9. Photon elektro magn. beispielweise Elektron-Elektron-Streuung, Rutherford Streuung
10. W,Z bsplw. Beta-Zerfall, Elektron-Positron-Streuung (Energieabhängig)
11. Gluon Kernzusammenhalt, Farbladung, 8 Sorten (n-p-Anziehung), Quarkanziehung
12. Warum? Weil Divergenzen in höherer Ordnung/Energien auftreten ( $E > M_W$ )
13. Vereint QED mit schwacher WW.

# 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	$\begin{matrix} +1/2 \\ -1/2 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 0 \\ -1 \end{matrix}$
	$e_R$	$\mu_R$	$\tau_R$	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]

2018-12-11

Z<sup>0</sup> Resonanz

└ Theorie

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

Elektroschwache Vereinheitlichung  
Schwacher Isospin

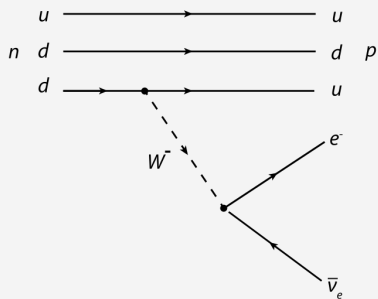
	Fermionmultipletts			$T$	$T_3$	$z_f$
Leptonen	$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}_L$	1/2	$\begin{matrix} +1/2 \\ -1/2 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 0 \\ -1 \end{matrix}$
Quarks	$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix}_L$	1/2	$\begin{matrix} +1/2 \\ -1/2 \end{matrix}$	$\begin{matrix} +2/3 \\ -1/3 \end{matrix}$
	$e_R$	$\mu_R$	$\tau_R$	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  $e, \mu, \tau$  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



$\beta^-$ -Zerfall[5]

$Z^0$  Resonanz

2018-12-11

$Z^0$  Resonanz

└ Theorie

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

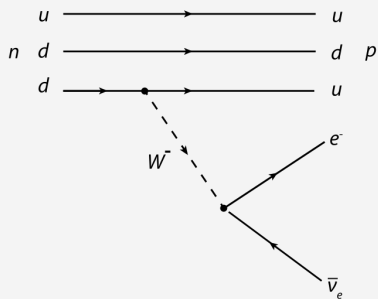
Elektroschwache Vereinheitlichung  
Schwacher Isospin



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

# Elektroschwache Vereinheitlichung

## Schwacher Isospin



$\beta^-$ -Zerfall[5]

►  $T_3$  soll erhalten bleiben

$Z^0$  Resonanz

2018-12-11

$Z^0$  Resonanz

└ Theorie

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

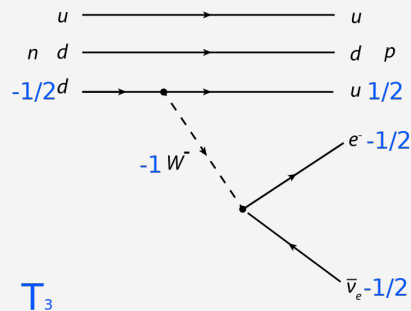
Elektroschwache Vereinheitlichung  
Schwacher Isospin



## 1. $T_3$ Erhaltungsgröße

# Elektroschwache Vereinheitlichung

## Schwacher Isospin



$\beta^-$ -Zerfall[5]

►  $T_3$  soll erhalten bleiben

►  $W^-: T_3 = -1$

2018-12-11

$Z^0$  Resonanz

Theorie

Elektroschwache Vereinheitlichung

Elektroschwache Vereinheitlichung

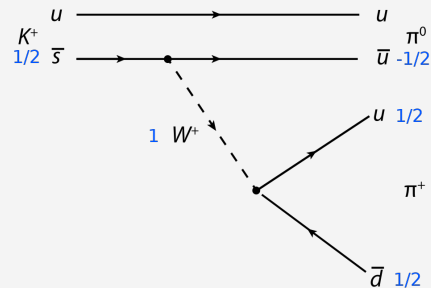
Elektroschwache Vereinheitlichung  
Schwacher Isospin



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

# Elektroschwache Vereinheitlichung

## Schwacher Isospin



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

$T_3$

$K^+$ -Zerfall[5]

2018-12-11

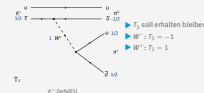
Z<sup>0</sup> Resonanz

Theorie

Elektroschwache Vereinheitlichung

Elektroschwache Vereinheitlichung

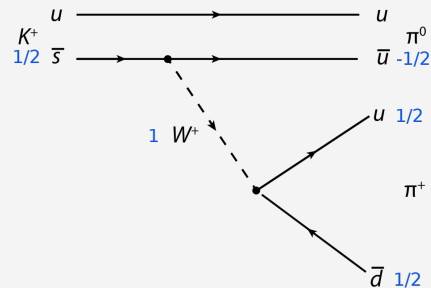
Elektroschwache Vereinheitlichung  
Schwacher Isospin



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

# Elektroschwache Vereinheitlichung

## Schwacher Isospin



$K^+$ -Zerfall[5]

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

2018-12-11

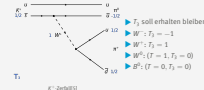
$Z^0$  Resonanz

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 Z<sup>0</sup> als orthogonale Linearkombination von B<sup>0</sup> und W<sup>0</sup>:

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

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

2018-12-11

Z<sup>0</sup> Resonanz

└ Theorie

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

Elektroschwache Vereinheitlichung

► Photon und Z<sup>0</sup> als orthogonale Linearkombination von B<sup>0</sup> und W<sup>0</sup>:

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

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

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 Z<sup>0</sup> als orthogonale Linearkombination von B<sup>0</sup> und W<sup>0</sup>:

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

► Weinbergwinkel:

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

2018-12-11

Z<sup>0</sup> Resonanz

└ Theorie

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

## Elektroschwache Vereinheitlichung

► Photon und Z<sup>0</sup> als orthogonale Linearkombination von B<sup>0</sup> und W<sup>0</sup>:

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

► 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 Z<sup>0</sup> leichter zu Bestimmen, da W-Boson in Neutrino zerfällt.  
⇒ Bestimmung über fehlenden Transversalimpuls

# Elektroschwache Vereinheitlichung

- Photon und Z<sup>0</sup> als orthogonale Linearkombination von B<sup>0</sup> und W<sup>0</sup>:

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

- Weinbergwinkel:

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

- Gekoppelte Ladungen:

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

2018-12-11

Z<sup>0</sup> Resonanz

└ Theorie

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

## Elektroschwache Vereinheitlichung

- Photon und Z<sup>0</sup> als orthogonale Linearkombination von B<sup>0</sup> und W<sup>0</sup>:

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

- 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 zum $Z^0$ -Boson

### Theorie

### Experimentelle Untersuchung

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

### Zusammenfassung

2018-12-11

## $Z^0$ Resonanz

### Experimentelle Untersuchung

Historischer Überblick zum  $Z^0$ -Boson

Theorie

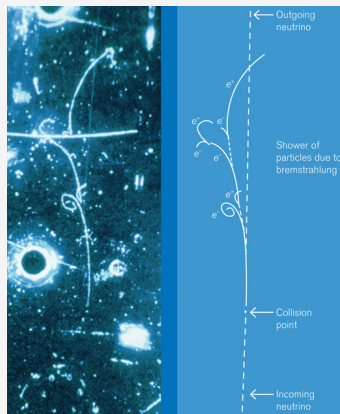
Experimentelle Untersuchung

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

Zusammenfassung

## Indirekter Nachweis

### des $Z^0$ -Bosons durch neutrale Ströme



- ▶ Neutrinostrahl durch  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \bar{\nu}_\mu$
- ▶ 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]

$Z^0$  Resonanz

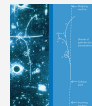
2018-12-11

$Z^0$  Resonanz

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

1. 1973 Gargamelle Blasen-kammer am CERN
2. Striche und Kreise sind Lamben und Spiegel Reflexionen
3. Myonlose Neutrino-reaktion
4. Neutrale Ströme von unten nach oben Antineutrinostrahl in Blasen-kammer.
5. Neutrinostrahl 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.

Indirekter Nachweis  
des  $Z^0$ -Bosons durch neutrale Ströme

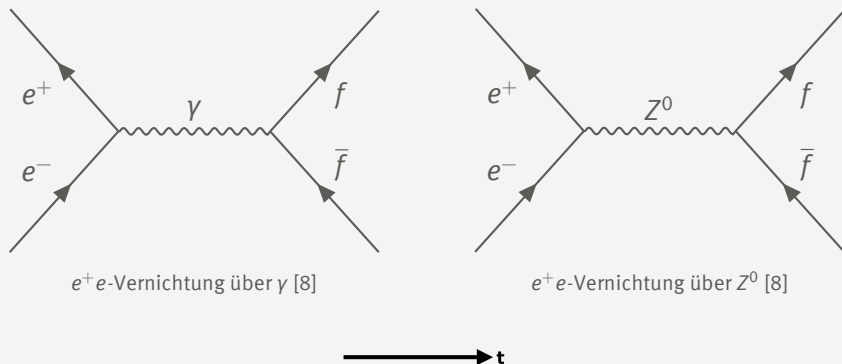


- ▶ Neutrinostrahl durch  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \bar{\nu}_\mu$
- ▶ Blasen-kammer:  
 $\bar{\nu}_\mu + e^- \xrightarrow{Z^0} \bar{\nu}_\mu + e^-$
- ▶ Elektron sendet Bremsstrahlung aus
- ▶  $e^-e^+$ -Paarbildung  $\rightarrow$  elektromagnetischer Schauer

[6][7]

## Erzeugung des $Z^0$ -Bosons

Feynmandiagramme zur Elektron-Positron-Annihilation



2018-12-11

$Z^0$  Resonanz

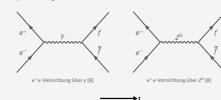
Experimentelle Untersuchung

Erzeugung des  $Z^0$ -Bosons

Erzeugung des  $Z^0$ -Bosons

Erzeugung des  $Z^0$ -Bosons

Feynmandiagramme zur Elektron-Positron-Annihilation

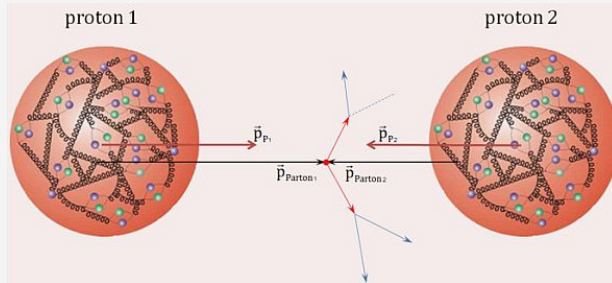


- Z-Boson durch Antilepton+Lepton/AntiQuark+Quark Reaktion
- kollidierende Teilchenstrahlen
- feynman diagram
- Zeit nach rechts
- über yoder Z zu Fermion und Antifermion paar.
- bei passender Energie  $\approx M_Z$  dominiert  $Z^0$ , aus QFT+Feynmanregeln (rechnerisch lässt sich zeigen)
- s-Kanal

## 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

2018-12-11

$Z^0$  Resonanz

Experimentelle Untersuchung

Erzeugung des  $Z^0$ -Bosons

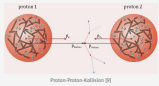
Erzeugung des  $Z^0$ -Bosons

Erzeugung des  $Z^0$ -Bosons

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

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

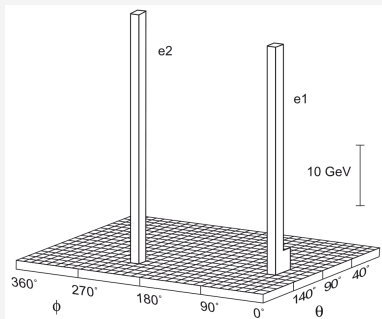
▶  $u + \bar{u} \rightarrow Z^0$ :  $p\bar{p}$ -Kollision benötigt  $E_p \gtrapprox 300 \text{ GeV}$



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

2018-12-11

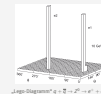
$Z^0$  Resonanz

Experimentelle Untersuchung

Nachweis

Nachweis

Nachweis  
Entdeckung des  $Z^0$  Bosons



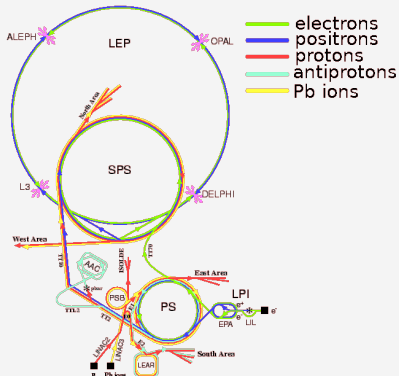
- ▶ 1983 UA2 Detektor am Sp $\bar{p}$ S
- ▶ Masse des  $Z^0$ -Bosons entspricht der Summe der Energie von  $e^-$  und  $e^+$
- ▶ Entgegengesetzte Impulse von  $e^-$  und  $e^+$

- 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°  $\Rightarrow$  entgegen gesetzte Richtungen



# Präzisionsmessungen

Large Electron Positron Collider (LEP, 1989-2000)



Beschleuniger am CERN 1996 [10]

$Z^0$  Resonanz

2018-12-11

$Z^0$  Resonanz

Experimentelle Untersuchung

Präzisionsmessungen

Präzisionsmessungen

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



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

2018-12-11

$Z^0$  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  $2E_e \approx 2M_W c^2 \approx 160 \text{ GeV}$

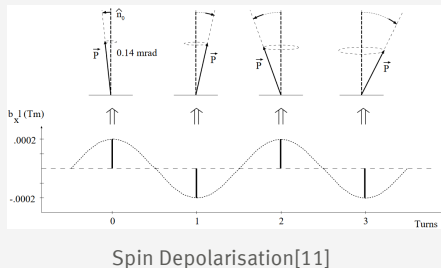
1. 2 Untersuchungsreihen am LEP
2. Tritt nicht auf bei Energien  $\approx 100 \text{ GeV}$
3. LEP1, 50 GeV, LEP2, 86 GeV  $\rightarrow 104,6 \text{ GeV}$
4. Im folgenden Fokus aus LEP 1

# Präzisionsmessungen Energiekalibration

Z<sup>0</sup> Resonanz

Resonante Spin Depolarisation:

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



2018-12-11

Z<sup>0</sup> Resonanz

- Experimentelle Untersuchung
- Präzisionsmessungen
- Präzisionsmessungen

Präzisionsmessungen  
Energiekalibration



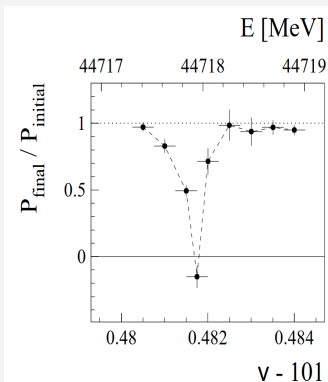
Resonante Spin Depolarisation:  
1. transversale Polarisation der Strahlen  
2. Energie  $E$  ist proportional zu Spinpräzessionen pro Speicherringdurchlauf  $\nu$   
3. Radiales oszillierendes Magnetfeld rotiert Spin minimal, falls dessen Frequenz in Phase zur Spinpräzession ist.

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.  $\nu$  Spinpräzessionen pro Speicherringdurchlauf proportional zu E-Beam
4.  $\nu$  wird über Spin Depolarisation gemessen

# Präzisionsmessungen

## Energiekalibration

$Z^0$  Resonanz



Relative Polarisation[11]

2018-12-11

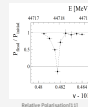
$Z^0$  Resonanz

Experimentelle Untersuchung

Präzisionsmessungen

Präzisionsmessungen

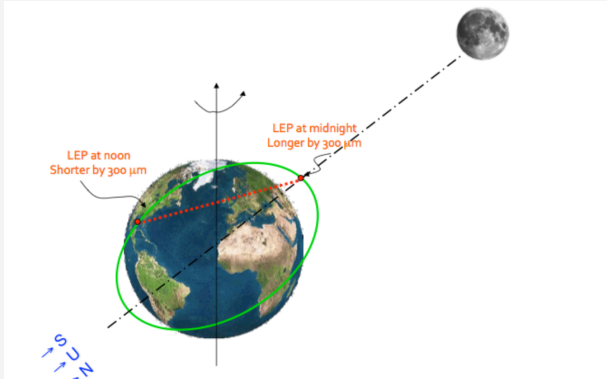
Präzisionsmessungen  
Energiekalibration



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

2018-12-11

$Z^0$  Resonanz

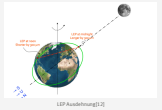
Experimentelle Untersuchung

Präzisionsmessungen

Präzisionsmessungen

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

Präzisionsmessungen  
Einfluss auf Beschleuniger durch Gezeiten



# Präzisionsmessungen

Einfluss auf Beschleuniger durch Gezeiten

$Z^0$  Resonanz

2018-12-11

$Z^0$  Resonanz

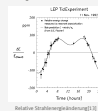
Experimentelle Untersuchung

Präzisionsmessungen

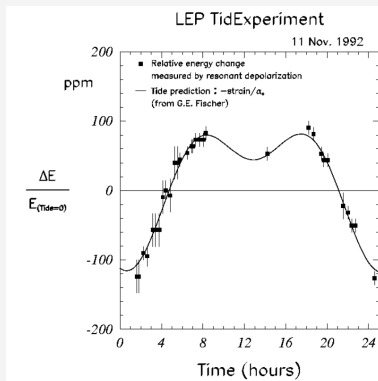
Präzisionsmessungen

Präzisionsmessungen

Einfluss auf Beschleuniger durch Gezeiten



[Item]Schwankung gemäß Erwartung

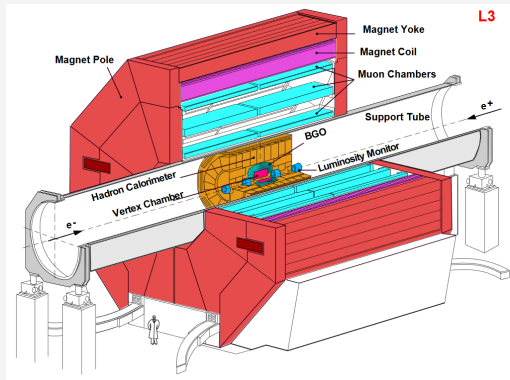


Relative Strahlenergieänderung[13]

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]

Z<sup>0</sup> Resonanz

2018-12-11

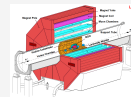
Z<sup>0</sup> Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Präzisionsmessungen

└ Präzisionsmessungen

Präzisionsmessungen  
L3 Detektoraufbau am LEP

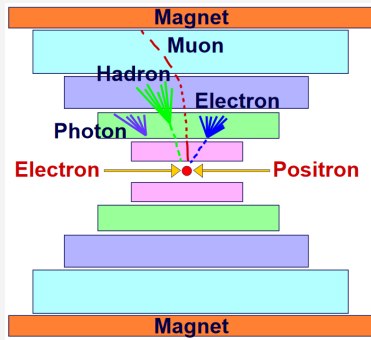


L3 Detektor [13]

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

2018-12-11

$Z^0$  Resonanz

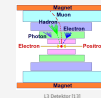
Experimentelle Untersuchung

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

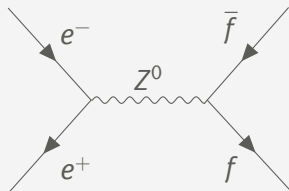
2018-12-11

$Z^0$  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:

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

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

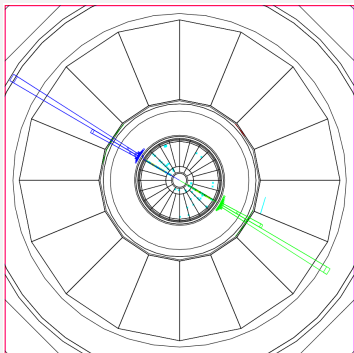
$$\tau^- + \tau^+$$

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

$$q + \bar{q}$$

# Präzisionsmessungen

## L3 Detektor (1993 am LEP)



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

- ▶ Energiemessung im elm. Kalorimeter
- ▶ Entgegengesetzte Ausbreitung

$Z^0$  Resonanz

2018-12-11

$Z^0$  Resonanz  
└ Experimentelle Untersuchung  
└ Präzisionsmessungen  
└ Präzisionsmessungen

Präzisionsmessungen  
L3 Detektor (1993 am LEP)



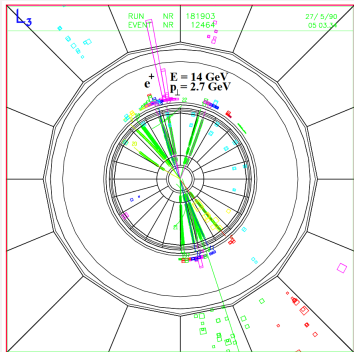
- ▶ Energiemessung im elm. Kalorimeter
- ▶ Entgegengesetzte Ausbreitung

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

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)



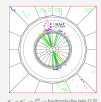
$e^- + e^+ \rightarrow Z^0 \rightarrow \text{hadronische Jets}$  [13]

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

2018-12-11  $Z^0$  Resonanz

- └ Experimentelle Untersuchung
- └ Präzisionsmessungen
- └ Präzisionsmessungen

Präzisionsmessungen  
L3 Detektor (1993 am LEP)



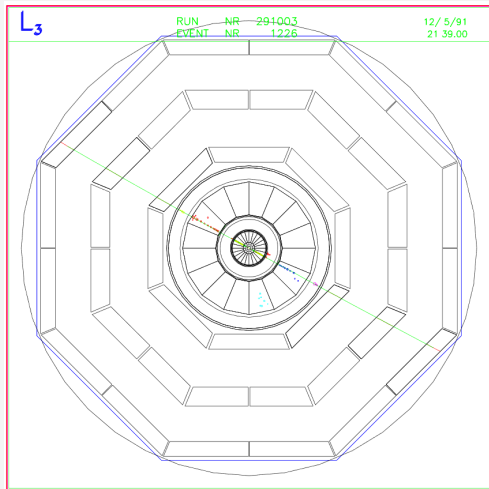
- ▶ Einzelnes Quark führt zu Quark-Antiquark-Paar Erzeugung, um isolierte Farbladung zu verhindern (Confinement)
- ▶ Reaktion äußert sich in hadronische Jets
- ▶ Energiemessung im Hadronischen Kalorimeter

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

2018-12-11

$Z^0$  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

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

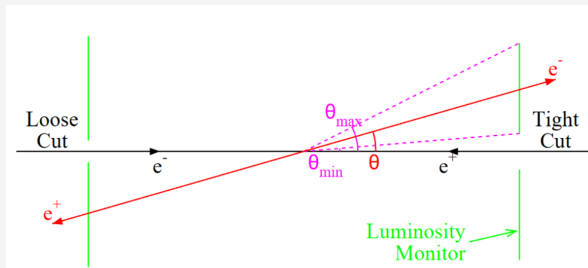
$\sigma$  : Wirkungsquerschnitt

$N_{\text{sel}}$  : Anzahl der Ereignisse

$N_{\text{bg}}$  : Hintergrundereignisse

$\epsilon_{\text{sel}}$  : Effizienz

$\mathcal{L}$  : Integrierte Luminosität



Bhabha Streuung [13]

2018-12-11

Z<sup>0</sup> Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Präzisionsmessungen

└ Präzisionsmessungen

Präzisionsmessungen

Luminosität

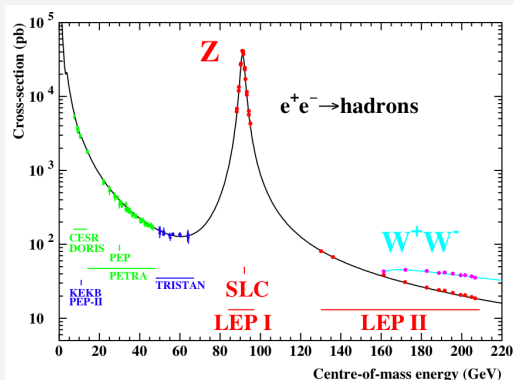
$$\sigma = \frac{N_{\text{sel}} - N_{\text{bg}}}{\epsilon_{\text{sel}} \mathcal{L}}$$



1. sigma ist gesucht
2. Luminosität hängt von Beschleuniger ab
3. N sind Anzahl Teilchen bei Reaktion
4. epsilon  $N_{\text{bg}}$  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  $\approx 91$  GeV



Wirkungsquerschnitte verschiedener Beschleuniger [14]

$Z^0$  Resonanz

2018-12-11

$Z^0$  Resonanz

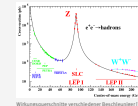
└ Experimentelle Untersuchung

└ Präzisionsmessungen

└ Präzisionsmessungen

Präzisionsmessungen

$Z^0$ -Resonanz bei  $\approx 91$  GeV



1. Achsen
2.  $Z^0$  Resonanz und weitere Messungen
3. Große Breite  $\Rightarrow$  geringe Lebensdauer
4. Breite immer  $\Gamma_Z$  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

2018-12-11

$Z^0$  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

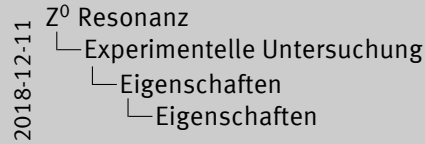
# Eigenschaften

## 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  $\Gamma_{\text{tot}}$
3.  $\tau$  als Mischung von hadronischen Jets und elm., da  $\tau$  schnell zerfällt

**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

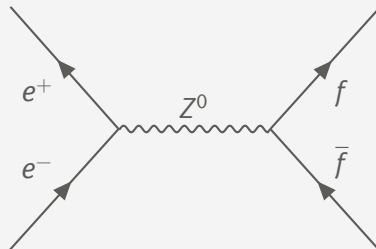
$$\sigma_f \propto \frac{s \cdot \Gamma_f \Gamma_e}{(s - M_Z^2)^2 + s^2 \Gamma_Z^2 / M_Z^2}$$

$\sigma_f$  : Wirkungsquerschnitt

$\sqrt{s}$  : Schwerpunktsenergie

$\Gamma_i$  : Partialbreite

$\Gamma_Z$  : Gesamtbreite



2018-12-11

Z<sup>0</sup> Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Anzahl Neutrinogenerationen

└ Anzahl Neutrinogenerationen

Anzahl Neutrinogenerationen

Wirkungsquerschnitt

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

$\sigma_f$  : Wirkungsquerschnitt  
 $\sqrt{s}$  : Schwerpunktsenergie  
 $\Gamma_i$  : Partialbreite  
 $\Gamma_Z$  : Gesamtbreite

1. Formel für  $\sigma$  Breit-Wigner
2. Einheiten  $h$  und  $c$  multiplizieren
3. Abhängig von ...
4.  $\gamma$  unterdrückt

# Anzahl Neutrinogenerationen

Berechnung der Zerfallsbreite

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

Z<sup>0</sup> Resonanz

2018-12-11

Z<sup>0</sup> 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

2018-12-11

$Z^0$  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

$N_\nu$  : Anzahl der Neutrino-generationen

$G_F$  : Fermi-Kopplungskonstante

$Q_f$  : Ladung

2018-12-11

Z<sup>0</sup> 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:  $e^\pm, \mu^\pm, \tau^\pm$
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

$N_\nu$  : Anzahl der Neutrino-generationen

$G_F$  : Fermi-Kopplungskonstante

$Q_f$  : Ladung

2018-12-11

Z<sup>0</sup> 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  
 $N_\nu$  : Anzahl der Neutrino-generationen  
 $G_F$  : Fermi-Kopplungskonstante  
 $Q_f$  : Ladung

2018-12-11

Z<sup>0</sup> Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Anzahl Neutrino-generationen

└ Anzahl Neutrino-generationen

**Anzahl Neutrino-generationen**  
 Berechnung der Zerfallsbreite

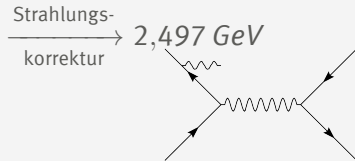
$$\begin{aligned}\Gamma_Z &= \sum_f \Gamma_{Z \rightarrow f\bar{f}} \\ &= \Gamma_{u,c,d,s,b} + \Gamma_{e,\mu,\tau} + \Gamma_{\nu_e,\nu_\mu,\nu_\tau} \\ &= N_C \cdot 2 \cdot \Gamma_u + N_C \cdot 3 \cdot \Gamma_d + 3 \cdot \Gamma_e + N_\nu \cdot \Gamma_\nu \\ &= 3 \cdot 2 \cdot 94,9 \text{ MeV} + 3 \cdot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

## 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  
 $N_\nu$  : Anzahl der Neutrinogenerationen  
 $G_F$  : Fermi-Kopplungskonstante  
 $Q_f$  : Ladung

2018-12-11

**Z<sup>0</sup> 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) %
$\Gamma_Z$	2,497 GeV	2,495(2) GeV

$Z^0$  Resonanz

2018-12-11

$Z^0$  Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Anzahl Neutrinogenerationen

└ Anzahl Neutrinogenerationen

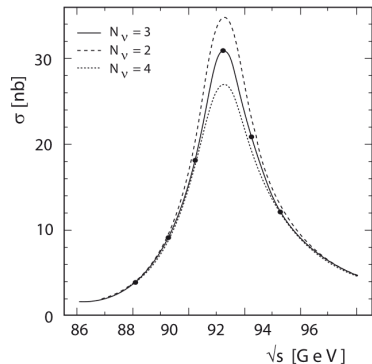
Anzahl Neutrinogenerationen  
Vergleich Theorie und Experiment

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

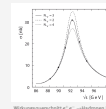
Wirkungsquerschnitt  $e^+e^- \rightarrow \text{Hadronen}$  [4]

2018-12-11

$Z^0$  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 zum  $Z^0$ -Boson

Theorie

Experimentelle Untersuchung

Zusammenfassung

# Zusammenfassung

- ▶ Schwache und Elektromagnetische Wechselwirkung lassen sich vereinheitlichen
- ▶ Weinbergwinkel  $\cos \theta_W \approx 0.88$
- ▶ Zerfallsbreite des  $Z^0$ -Bosons  $\Gamma_Z \approx 2,50 \text{ GeV}$
- ▶ Nachweis von 3 Neutrinogenerationen am LEP

$Z^0$  Resonanz

2018-12-11

$Z^0$  Resonanz  
└ Zusammenfassung

└ Zusammenfassung

Zusammenfassung

- ▶ Schwache und Elektromagnetische Wechselwirkung lassen sich vereinheitlichen
- ▶ Weinbergwinkel  $\cos \theta_W \approx 0.88$
- ▶ Zerfallsbreite des  $Z^0$ -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.

2018-12-11

 $Z^0$  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<sub>W</sub>echselwirkung. URL:  
[https://de.wikipedia.org/wiki/Schwache\\_Wechselwirkung](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](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>.

2018-12-11

Z<sup>0</sup> 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](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).

2018-12-11

## Z<sup>0</sup> 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](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?