

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

Alexander Neuwirth



1. Begrüßung
2. Thema

# Gliederung

Historischer Überblick

Theorie

Experimentelle Untersuchung

Zusammenfassung

$Z^0$  Resonanz

2018-12-04

$Z^0$  Resonanz  
└─ Gliederung

└─ Gliederung

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

Gliederung

Historischer Überblick

Theorie

Experimentelle Untersuchung

Zusammenfassung

## Historischer Überblick

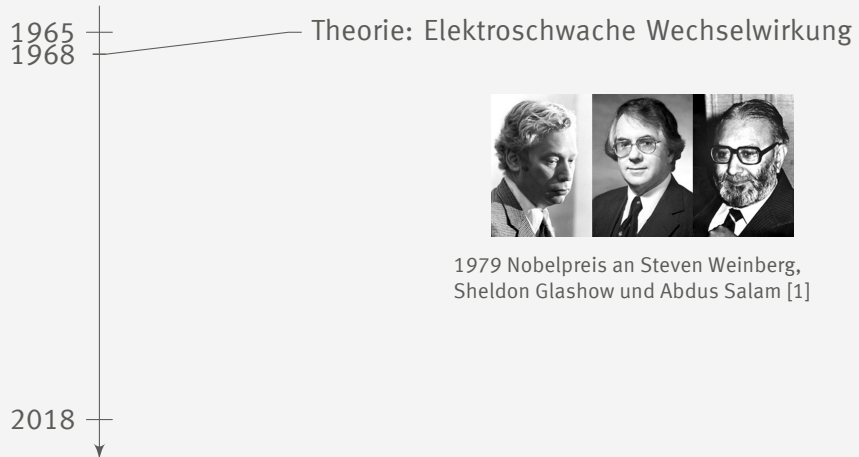
### Theorie

### Experimentelle Untersuchung

### Zusammenfassung

- Zunächst Historie

## Historischer Überblick



2018-12-04

$Z^0$  Resonanz

Historischer Überblick

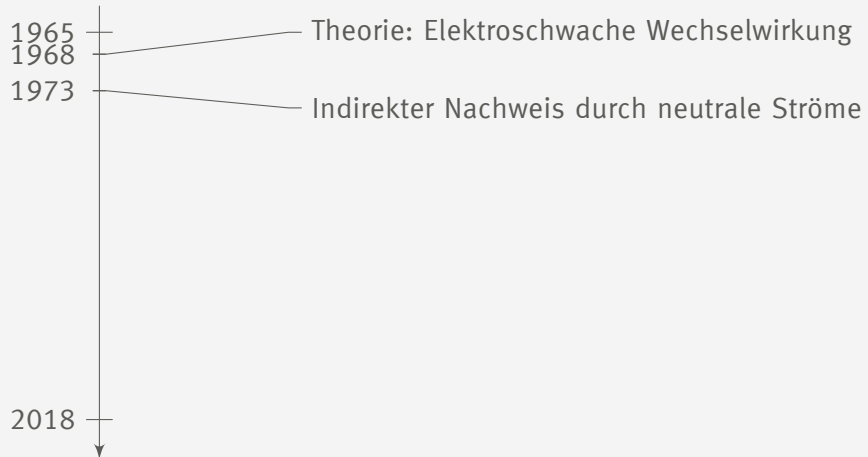
Historischer Überblick

Historischer Überblick



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

## Historischer Überblick



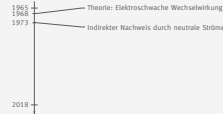
2018-12-04

$Z^0$  Resonanz

Historischer Überblick

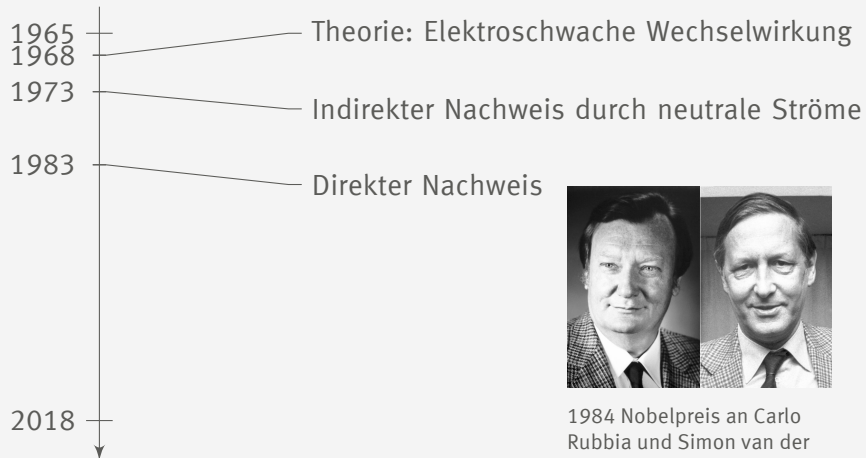
Historischer Überblick

Historischer Überblick



### 1. Gargamelle-Blasenkammer am CERN

## Historischer Überblick



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

2018-12-04

Z<sup>0</sup> Resonanz

Historischer Überblick

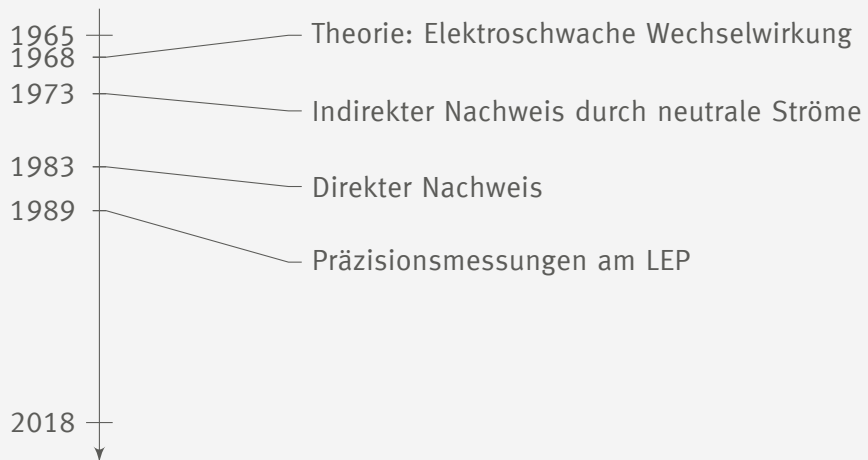
Historischer Überblick

Historischer Überblick



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

## Historischer Überblick



2018-12-04

$Z^0$  Resonanz

Historischer Überblick

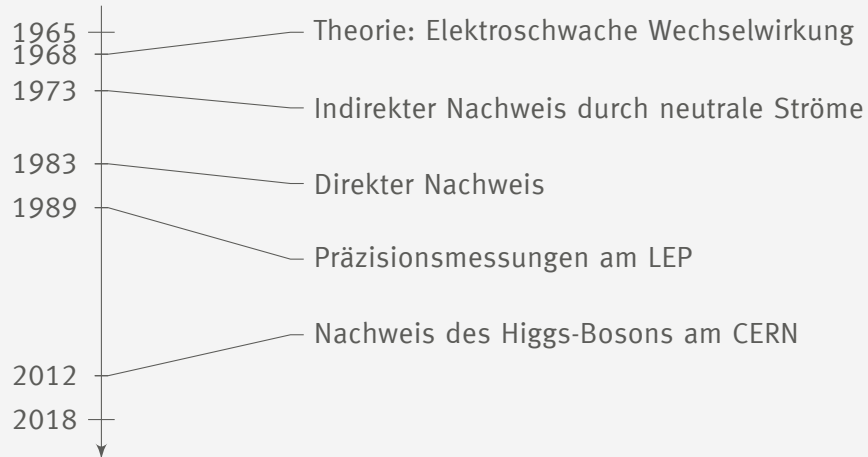
Historischer Überblick

Historischer Überblick



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

## Historischer Überblick

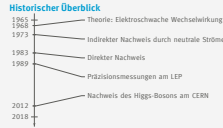


2018-12-04

Z<sup>0</sup> Resonanz

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
				H 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 $\frac{1}{2}$ ν <sub>e</sub> Elektron-Neutrino	<0,19 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν <sub>μ</sub> Myon-Neutrino	<18,2 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν <sub>τ</sub> Tau-Neutrino	91,2 GeV 0 1 Z <sup>0</sup> 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 <sup>±</sup> W Boson
				Eichbosonen

Standardmodell[3]

Z<sup>0</sup>-Boson:

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

2018-12-04

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:  
 ▶ 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. Schwache Wechselwirkung
8. Bestätigung der 3 Neutrinogenerationen

# Elektroschwache Vereinheitlichung

## Austauschteilchen

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

Z<sup>0</sup> Resonanz

2018-12-04

Z<sup>0</sup> Resonanz

└ Theorie

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

Elektroschwache Vereinheitlichung  
Austauschteilchen

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

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

# Elektroschwache Vereinheitlichung

## Schwacher Isospin

Z<sup>0</sup> Resonanz

2018-12-04

Z<sup>0</sup> Resonanz

— Theorie

— Elektroschwache Vereinheitlichung

— Elektroschwache Vereinheitlichung

Elektroschwache Vereinheitlichung  
Schwacher Isospin

	Fermionmultipletts			T	T <sub>3</sub>	z <sub>f</sub>
Leptonen	$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}_L$	1/2	+1/2 -1/2	0 -1
	e <sub>R</sub>	μ <sub>R</sub>	τ <sub>R</sub>	0	0	-1
Quarks	$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix}_L$	1/2	+1/2 -1/2	+2/3 -1/3
	u <sub>R</sub>	c <sub>R</sub>	t <sub>R</sub>	0	0	+2/3
	d <sub>R</sub>	s <sub>R</sub>	b <sub>R</sub>	0	0	-1/3

Schwacher Isospin[4]

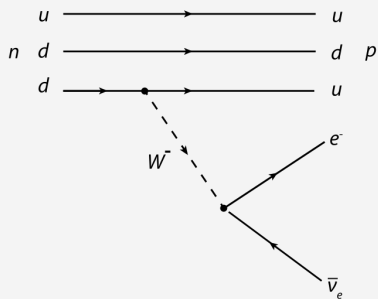
	Fermionmultipletts			T	T <sub>3</sub>	z <sub>f</sub>
Leptonen	$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}_L$	1/2	+1/2 -1/2	0 -1
	e <sub>R</sub>	μ <sub>R</sub>	τ <sub>R</sub>	0	0	-1
Quarks	$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix}_L$	1/2	+1/2 -1/2	+2/3 -1/3
	u <sub>R</sub>	c <sub>R</sub>	t <sub>R</sub>	0	0	+2/3
	d <sub>R</sub>	s <sub>R</sub>	b <sub>R</sub>	0	0	-1/3

Schwacher Isospin[4]

1. Einführung von schwachem Isospin, analogon zu starkem Isospin
2. Chiralität Index R/L formal: Zerlegung von Dirac-Spinoren in orthogonale Zustände die unter Paritätsoperationen ineinander übergehen. Eigenzustände  $\pm 1$
3. Rechtshändige  $e, \mu, \tau$  Singulett Zustand.
4. Chiralität (l/r), Spinor Symmetrie
5. Rechtshändige Neutrinos  $T_3 = z = 0$ , keine WW, Auftreten in Natur unbekannt
6. Der ' bedeutet != Masseneigenzustände, sondern Quarkmisch-Matrix CKM
7.  $T_3$  Werte Bereich analog zu anderen Spins
8.  $z_f$  beschreibt Ladung
9. invers für Antiteilchen: rechshändige Fermionen (linkshändige Antifermionen) Singulett ( $T = 0 = T_3$ )
10. Umwandlung durch Absorption von  $W^\pm$ -Boson innerhalb Multipllett (darin Ladungsdifferenz = 1)

# Elektroschwache Vereinheitlichung

## Schwacher Isospin



$\beta^-$ -Zerfall[5]

$Z^0$  Resonanz

2018-12-04

$Z^0$  Resonanz

Theorie

Elektroschwache Vereinheitlichung

Elektroschwache Vereinheitlichung

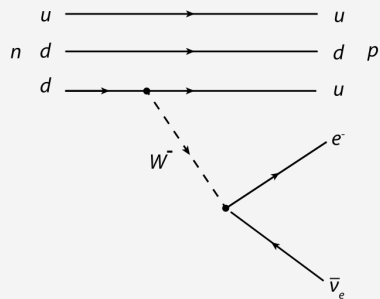
Elektroschwache Vereinheitlichung  
Schwacher Isospin



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

# Elektroschwache Vereinheitlichung

## Schwacher Isospin



►  $T_3$  soll erhalten bleiben

$\beta^-$ -Zerfall[5]

2018-12-04

Z<sup>0</sup> Resonanz

└ Theorie

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

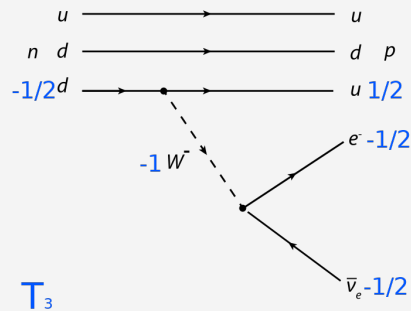
Elektroschwache Vereinheitlichung  
Schwacher Isospin



## 1. $T_3$ Erhaltungsgröße

# Elektroschwache Vereinheitlichung

## Schwacher Isospin



►  $T_3$  soll erhalten bleiben

►  $W^-: T_3 = -1$

$\beta^-$ -Zerfall[5]

2018-12-04

$Z^0$  Resonanz

└ Theorie

└└ Elektroschwache Vereinheitlichung

└└└ Elektroschwache Vereinheitlichung

Elektroschwache Vereinheitlichung  
Schwacher Isospin

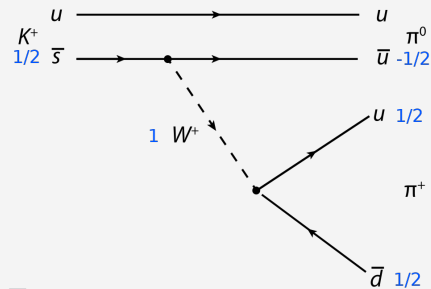


1.  $T_3$  in Graphik

2.  $W^-$  muss -1 sein

# Elektroschwache Vereinheitlichung

## Schwacher Isospin



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

$T_3$

$K^+$ -Zerfall[5]

2018-12-04

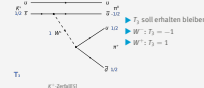
Z<sup>0</sup> Resonanz

Theorie

Elektroschwache Vereinheitlichung

Elektroschwache Vereinheitlichung

Elektroschwache Vereinheitlichung  
Schwacher Isospin

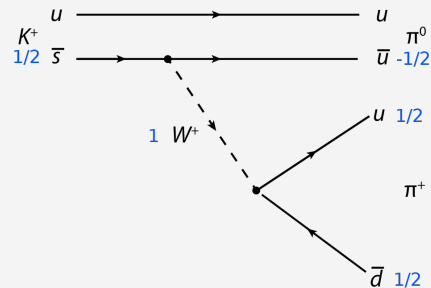


1. analog  $\beta^+$ -Zerfall:  $u \rightarrow d + W^+$
2. Hier Kaon-Zerfall



# Elektroschwache Vereinheitlichung

## Schwacher Isospin



$K^+$ -Zerfall[5]

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

$Z^0$  Resonanz

2018-12-04

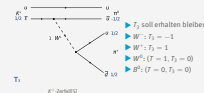
$Z^0$  Resonanz

Theorie

Elektroschwache Vereinheitlichung

Elektroschwache Vereinheitlichung

Elektroschwache Vereinheitlichung  
Schwacher Isospin



1. Analog zu  $1/2 \times 1/2$  Gekoppelten Spins
2. Tripplett und Singulett Zustände
3.  $B^0$  postuliert
4. Mehr zum Beta-Zerfall nächste Woche (+Paritätsverletzung)

# Elektroschwache Vereinheitlichung

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

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

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

2018-12-04

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:

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

2018-12-04

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. 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:

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

2018-12-04

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

## Theorie

## Experimentelle Untersuchung

Erzeugung des  $Z^0$ -Bosons

Nachweis

Präzisionsmessungen

Eigenschaften

Anzahl Neutrinogenerationen

## Zusammenfassung

2018-12-04

# $Z^0$ Resonanz

## Experimentelle Untersuchung

Historischer Überblick

Theorie

Experimentelle Untersuchung

Erzeugung des  $Z^0$ -Bosons

Nachweis

Präzisionsmessungen

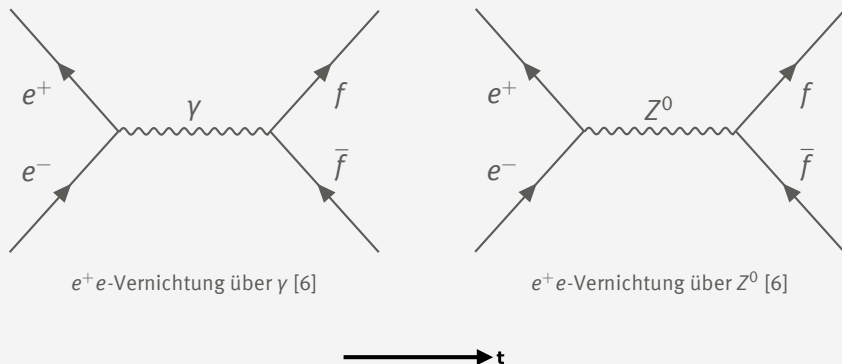
Eigenschaften

Anzahl Neutrinogenerationen

Zusammenfassung

# Erzeugung des Z<sup>0</sup>-Bosons

## Feynmandiagramme zur Elektron-Positron-Annihilation



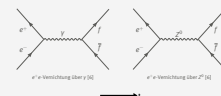
2018-12-04

**Z<sup>0</sup> Resonanz**

- Experimentelle Untersuchung
  - Erzeugung des Z<sup>0</sup>-Bosons
    - Erzeugung des Z<sup>0</sup>-Bosons

**Erzeugung des Z<sup>0</sup>-Bosons**

Feynmandiagramme zur Elektron-Positron-Annihilation



- W/Z-Boson durch Antilepton+Lepton/AntiQuark+Quark Reaktion
- kollidierende Teilchenstrahlen
- feynman diagram
- Zeit nach rechts
- Antiteilchen Zeitlich invers (Aus Dirac-Gleichung (Schrödinger Gleichung mit eingesetzter Impuls/Energie Relation wirkt auf vier komponentigen Dirac Spinor) ergeben sich positive und negative Lösungen für die Energie) (bzw. Klein Gordon Gleichung (entkoppelt)) nach Stückelberg-Feynman-Interpretation, bsplw. E-Feld  $e^-$  vs  $e^+$  mit anderer Richtung ist gleich. (Dirac sagte Antiteilchen vorher/definierte, wobei negative Energien besetzt sind und Löcher sich ausbreiten basierend auf Pauli-Ausschlussprinzip, da Bosonen nicht gehorchen  $\Rightarrow$  reverse Zeit Interpretation)
- über yoder Z zu Fermion und Antifermion paar.
- bei passender Energie approx  $M_Z$  dominiert  $Z^0$ , aus QFT+Feynmanregeln

# Erzeugung des $Z^0$ -Bosons

## am Large Electron-Positron Collider (LEP)

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

$Z^0$  Resonanz

2018-12-04  $Z^0$  Resonanz

- └ Experimentelle Untersuchung
  - └ Erzeugung des  $Z^0$ -Bosons
    - └ Erzeugung des  $Z^0$ -Bosons

Erzeugung des  $Z^0$ -Bosons  
am Large Electron-Positron Collider (LEP)

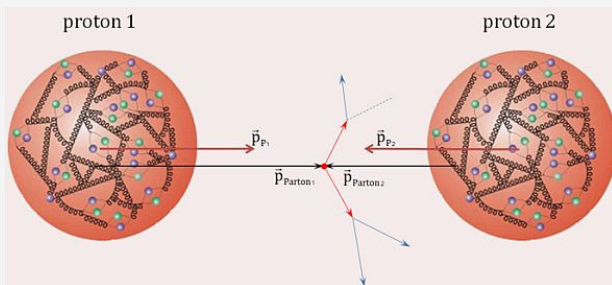
- ▶  $e^- + e^+ \rightarrow Z^0$ : Schwerpunktsenergie  $\sqrt{s} = 2E_e \geq M_Z c^2 \approx 91,6 \text{ GeV}$
- ▶  $e^- + e^+ \rightarrow W^+ + W^-$ : benötigt  $2E_e \geq 2M_W c^2 \approx 160,8 \text{ GeV}$

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

## Erzeugung 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 [7]

$Z^0$  Resonanz

2018-12-04

$Z^0$  Resonanz

Experimentelle Untersuchung

Erzeugung des  $Z^0$ -Bosons

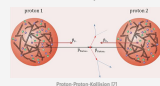
Erzeugung des  $Z^0$ -Bosons

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  $E_p \gtrapprox 300 \text{ GeV}$

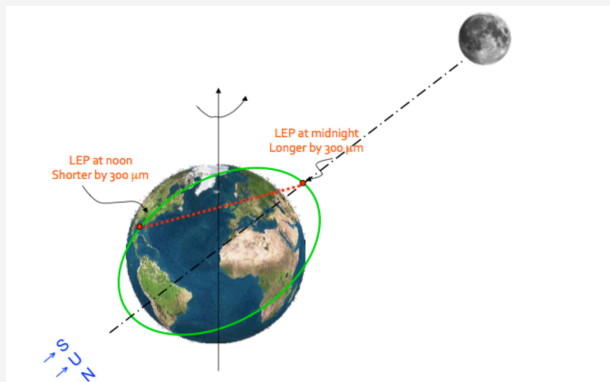


1. Energie muss in Quarks enthalten sein  $\rightarrow$  sehr viel mehr Energie auf Protonen (analog mit d)  $\Rightarrow$  e-e+ Kollision einfacher
2. Besser Proton-Antiproton, da weniger Energie notwendig.
3. in Beschleuniger inverse Rotation
4. Veranschaulichung der Seequarks, Pfeile nicht direkt relevant
5. Keine Trennung up-down, sondern grün ist Antiquark



# Erzeugung des $Z^0$ -Bosons

Einfluss auf Beschleuniger durch Gezeiten



LEP Ausdehnung[8]

$Z^0$  Resonanz

2018-12-04

$Z^0$  Resonanz

Experimentelle Untersuchung

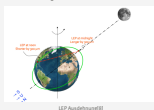
Erzeugung des  $Z^0$ -Bosons

Erzeugung des  $Z^0$ -Bosons

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

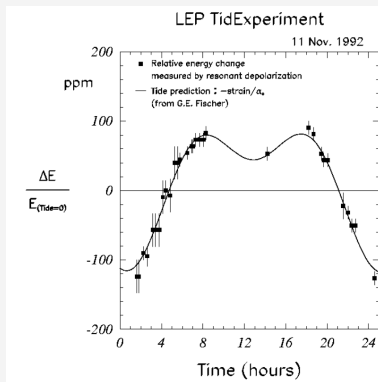
Erzeugung des  $Z^0$ -Bosons

Einfluss auf Beschleuniger durch Gezeiten



# Erzeugung des $Z^0$ -Bosons

Einfluss auf Beschleuniger durch Gezeiten



Relative Strahlenergieänderung[9]

$Z^0$  Resonanz

2018-12-04

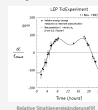
$Z^0$  Resonanz

Experimentelle Untersuchung

Erzeugung des  $Z^0$ -Bosons

Erzeugung des  $Z^0$ -Bosons

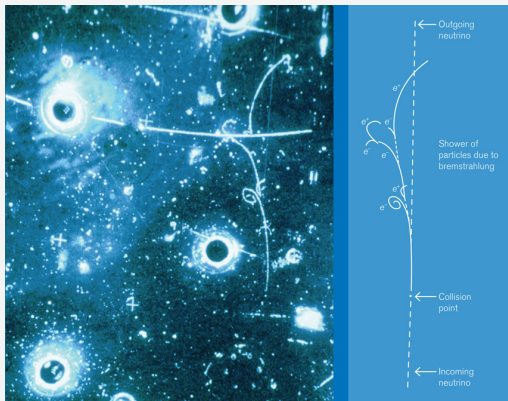
Erzeugung des  $Z^0$ -Bosons  
Einfluss auf Beschleuniger durch Gezeiten



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

# Nachweis

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



$Z^0$  Resonanz

- ▶ 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

[10][11]

2018-12-04

$Z^0$  Resonanz

- └ Experimentelle Untersuchung
  - └ Nachweis
    - └ Nachweis

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



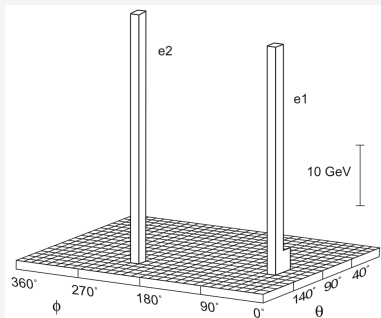
- ▶ Neutrinostrahl durch  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \bar{\nu}_\mu$
- ▶ Blaskammer:  
 $\bar{\nu}_\mu + e^- \xrightarrow{Z^0} \bar{\nu}_\mu + e^-$
- ▶ Elektron sendet Bremsstrahlung aus
- ▶  $e^-e^+$ -Paarbildung  $\rightarrow$  elektromagnetischer Schauer

[10][11]

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

# Nachweis

## Entdeckung des $Z^0$ Bosons



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

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

$Z^0$  Resonanz

2018-12-04

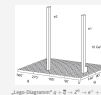
$Z^0$  Resonanz

Experimentelle Untersuchung

Nachweis

Nachweis

Nachweis  
Entdeckung des  $Z^0$  Bosons

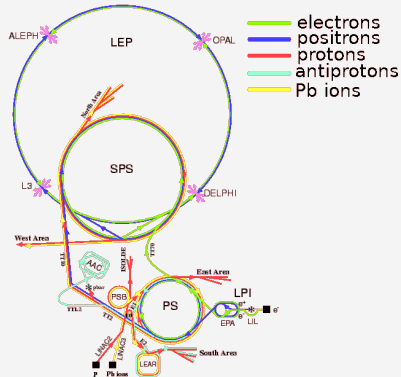


- ▶ 1983 UA2 Detektor am Sp $\bar{p}$ S
- ▶ Masse des  $Z^0$ -Bosons entspricht der Summe der Energie von  $e^-$  und  $e^+$
- ▶ Entgegengesetzte Impulse von  $e^-$  und  $e^+$

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

# Präzisionsmessungen

Large Electron Positron Collider (LEP, 1989-2000)



Beschleuniger am CERN 1996 [12]

$Z^0$  Resonanz

2018-12-04

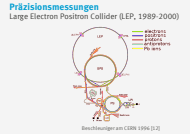
$Z^0$  Resonanz

Experimentelle Untersuchung

Präzisionsmessungen

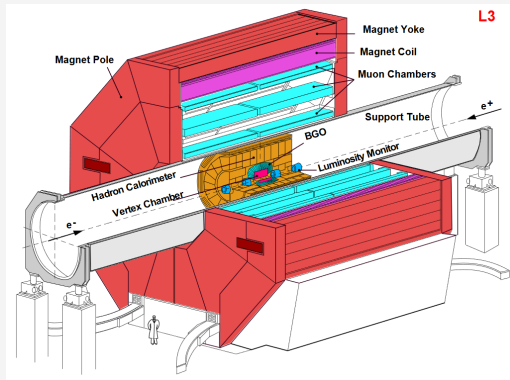
Präzisionsmessungen

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



# Präzisionsmessungen

## L3 Detektoraufbau am LEP



L3 Detektor [9]

$Z^0$  Resonanz

2018-12-04

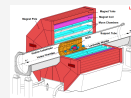
$Z^0$  Resonanz

Experimentelle Untersuchung

Präzisionsmessungen

Präzisionsmessungen

Präzisionsmessungen  
L3 Detektoraufbau am LEP

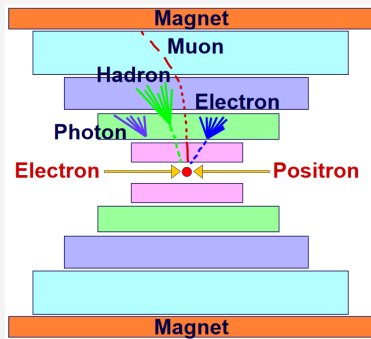


L3 Detektor [9]

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

# Präzisionsmessungen

## L3 Detektoraufbau am LEP



L3 Detektor [9]

Von Innen nach Außen:

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

$Z^0$  Resonanz

2018-12-04

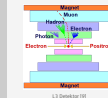
$Z^0$  Resonanz

Experimentelle Untersuchung

Präzisionsmessungen

Präzisionsmessungen

Präzisionsmessungen  
L3 Detektoraufbau am LEP

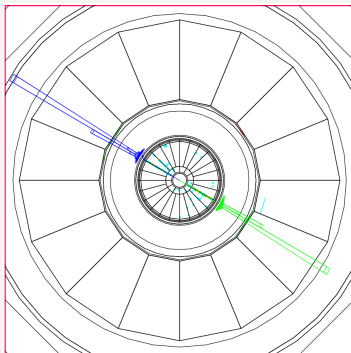


Von Innen nach Außen:  
1. Spurdetektor  
2. Elektromagnetisches Kalorimeter  
3. Hadronisches Kalorimeter  
4. Myonenkammer

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

## L3 Detektor (1993 am LEP)



$$e^- + e^+ \rightarrow Z^0 \rightarrow e^- + e^+ [9]$$

- ▶ Energiemessung im elm. Kalorimeter
- ▶ Entgegengesetzte Ausbreitung

Z<sup>0</sup> Resonanz

2018-12-04

Z<sup>0</sup> Resonanz  
└ Experimentelle Untersuchung  
└ Präzisionsmessungen  
└ Präzisionsmessungen

Präzisionsmessungen  
L3 Detektor (1993 am LEP)



- ▶ Energiemessung im elm. Kalorimeter
- ▶ Entgegengesetzte Ausbreitung

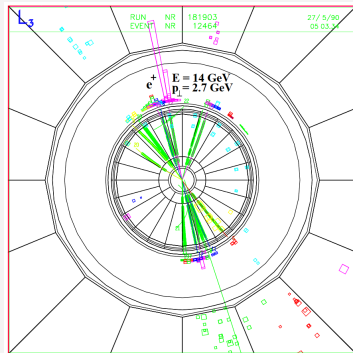
1. L3 Detektor LEP
2. beispielhafte Ereignisse
3. entlang der Strahlachse
4. analog zu Lego
5. herausgezoomt, weil Enrgie weniger verteilt
6. Winkel 180° => entgegen gesetzte Richtungen
7. Balken sind die Energien die Kalorimeter messen



# Präzisionsmessungen

## L3 Detektor (1993 am LEP)

$Z^0$  Resonanz



$e^- + e^+ \rightarrow Z^0 \rightarrow \text{hadronische Jets [9]}$

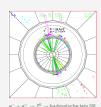
- ▶ Einzelnes Quark führt zu Quark-Antiquark-Paar Erzeugung, um isolierte Farbladung zu verhindern (Confinement)
- ▶ Reaktion äußert sich in hadronische Jets
- ▶ Energiemessung im Hadronischen Kalorimeter

2018-12-04

$Z^0$  Resonanz

- └ Experimentelle Untersuchung
  - └ Präzisionsmessungen
    - └ Präzisionsmessungen

Präzisionsmessungen  
L3 Detektor (1993 am LEP)

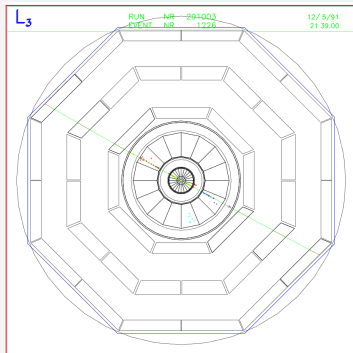


- ▶ Einzelnes Quark führt zu Quark-Antiquark-Paar Erzeugung, um isolierte Farbladung zu verhindern (Confinement)
- ▶ Reaktion äußert sich in hadronische Jets
- ▶ Energiemessung im Hadronischen Kalorimeter

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

# Präzisionsmessungen

## L3 Detektor (1993 am LEP)



$$e^- + e^+ \rightarrow Z^0 \rightarrow \mu^+ + \mu^- [9]$$

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

$Z^0$  Resonanz

2018-12-04

$Z^0$  Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Präzisionsmessungen

└ Präzisionsmessungen

Präzisionsmessungen  
L3 Detektor (1993 am LEP)



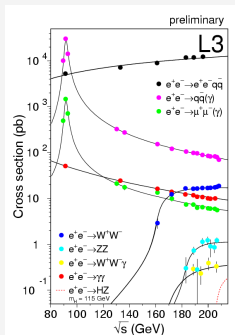
- ▶ Messung der Spur der Myonen durch mehrere Myonenkammern
- ▶ I.A. keine Absorption

$$e^- + e^+ \rightarrow Z^0 \rightarrow \mu^+ + \mu^- [9]$$

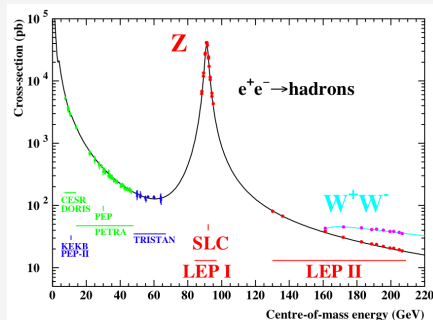
## 1. Muon erst an äußeren Platten detektiert

# Präzisionsmessungen

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



Wirkungsquerschnitte bei  $e^-e^+$  Kollision [13]



Wirkungsquerschnitte verschiedener Beschleuniger [14]

2018-12-04

$Z^0$  Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

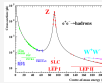
└ Präzisionsmessungen

└ Präzisionsmessungen

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



Wirkungsquerschnitte bei  $e^-e^+$  Kollision [13]



Wirkungsquerschnitte verschiedener Beschleuniger [14]

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

# 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

2018-12-04

$Z^0$  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<sup>0</sup> Resonanz

2018-12-04

## Z<sup>0</sup> 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) %

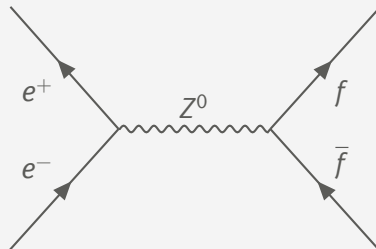
1. Hadronen (idR. Anti+Quark) nicht unterscheidbar

2. Anti+Neutrino schwer detektierbar  $\Rightarrow$  % über  $\Gamma_{\text{tot}}$

# Anzahl Neutrinogenerationen

## Wirkungsquerschnitt

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



2018-12-04

Z<sup>0</sup> Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└└ Anzahl Neutrinogenerationen

└└└ Anzahl Neutrinogenerationen

Anzahl Neutrinogenerationen  
Wirkungsquerschnitt

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

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

# Anzahl Neutrinogenerationen

Berechnung der Zerfallsbreite

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

$Z^0$  Resonanz

2018-12-04

$Z^0$  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

2018-12-04

$Z^0$  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

2018-12-04

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

2018-12-04

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

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

$N_C$  : Anzahl der Farbladungen

$N_V$  : Anzahl der Neutrino-generationen

$G_F$  : Fermi-Kopplungskonstante

$Q_f$  : Ladung

2018-12-04

Z<sup>0</sup> Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Anzahl Neutrino-generationen

└ Anzahl Neutrino-generationen

Anzahl Neutrino-generationen

Berechnung der Zerfallsbreite

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

## 1. Summe

# Anzahl Neutrinogenerationen

## Berechnung der Zerfallsbreite

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

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

2018-12-04

**Z<sup>0</sup> Resonanz**

└ Experimentelle Untersuchung

└└ Anzahl Neutrinogenerationen

└└└ Anzahl Neutrinogenerationen

**Anzahl Neutrinogenerationen**  
 Berechnung der Zerfallsbreite

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

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

# Anzahl 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

2018-12-04

$Z^0$  Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Anzahl Neutrinogenerationen

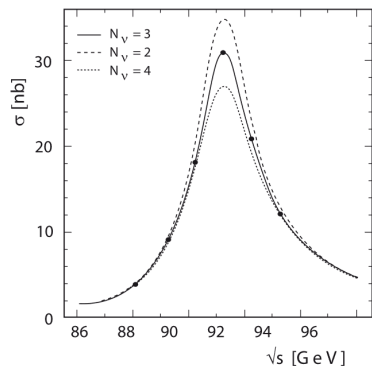
└ Anzahl Neutrinogenerationen

Anzahl Neutrinogenerationen  
Vergleich Theorie und Experiment

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

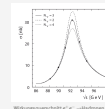
Wirkungsquerschnitt  $e^+e^- \rightarrow \text{Hadronen}$  [4]

2018-12-04

$Z^0$  Resonanz

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

Anzahl Neutrino-Generationen



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

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

Historischer Überblick

Theorie

Experimentelle Untersuchung

Zusammenfassung

# Zusammenfassung

- ▶ Weinbergwinkel  $\cos \theta_W \approx 0.88$
- ▶ Zerfallsbreite  $\Gamma_Z \approx 2,50 \text{ GeV}$
- ▶ 3 Neutrinogenerationen

$Z^0$  Resonanz

2018-12-04

$Z^0$  Resonanz  
└ Zusammenfassung

└ Zusammenfassung

Zusammenfassung

- ▶ Weinbergwinkel  $\cos \theta_W \approx 0.88$
- ▶ Zerfallsbreite  $\Gamma_Z \approx 2,50 \text{ GeV}$
- ▶ 3 Neutrinogenerationen

1. Weinbergwinkel Massenverhältniss W,Z Boson
2. Zerfallsbreite aus QFT großer Erfolg in Übereinstimmung mit Experiment
3. Bestätigung, dass es 3 Neutrinogenerationen gibt
4. Weiterführend Große Vereinheitlichung Analog ab  $10^{16} \text{ GeV} \Rightarrow$  keine Differenzierung Fermionen, Quarks und Leptonen. (Astrovorträge, Universumentwicklungsröhre)
5. Noch Weiterführend Quantengravitation kombiniert mit GUT



## Quellen I



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



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



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



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

### 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).



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



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



How is the beam energy calibrated through the resonant spin depolarization? URL: <http://tlep.web.cern.ch/content/how-beam-energy-calibrated-through-resonant-spin-depolarization>  
(besucht am 29.11.2018).

### Quellen II

- 1 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).
- 2 Donald H. Perkins. Introduction to High Energy Physics. Cambridge University Press, 2000.
- 3 International Masterclasses. URL: <http://atlas.physicsmasterclasses.org/de/index.htm> (besucht am 04.12.2018).
- 4 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).

## Quellen III



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).



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).

2018-12-04

Z<sup>0</sup> Resonanz  
└ Zusammenfassung  
  
└ Quellen

### Quellen III

- 1 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).
- 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).

## Quellen IV



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



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



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).

2018-12-04

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

### Zusammenfassung

### Quellen

- Masterclasses Atlas ist qualitativ gut

#### Quellen IV

- 1 The LEP Accelerator. URL:  
<http://www.hep.ucl.ac.uk/~jpc/all/ulthesis/node15.html>  
(besucht am 03.12.2018).
- 2 L3 Home Page. URL: <http://l3.web.cern.ch/l3/> (besucht am  
03.12.2018).
- 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?