

Z0-Resonanz

Alexander Neuwirth



Gliederung

Historischer Überblick

Theorie

Experimentelle Untersuchung

Zusammenfassung

Z0 Resonanz

2018-11-26 Z0 Resonanz
└─ Gliederung
└─ Gliederung

Gliederung

Historischer Überblick

Theorie

Experimentelle Untersuchung

Zusammenfassung

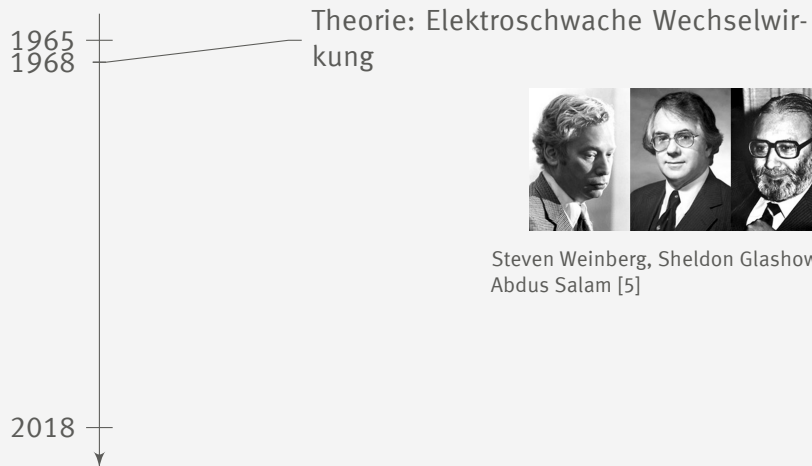
Historischer Überblick

Theorie

Experimentelle Untersuchung

Zusammenfassung

Historischer Überblick



Steven Weinberg, Sheldon Glashow und Abdus Salam [5]

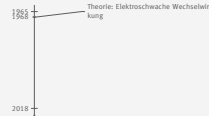
2018-11-26

Z0 Resonanz

Historischer Überblick

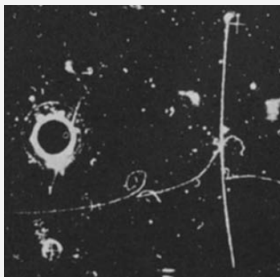
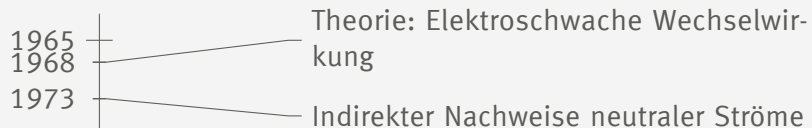
Historischer Überblick

Historischer Überblick

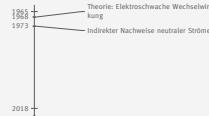


1. Neutrale Ströme von links nach rechts Antineutrinostrahl in Blasenkammer. Anhand von Winkel und $1/3$ Energie des e^- folgt Wechselwirkung durch neutrale Ströme. 700000 - Bilder überprüft. Spiral/Bremsstrahlung.
2. 1979 Nobelpreis für GWS
3. LEP bis 2000
4. 2013 Francois Englert und Peter Higgs Nobelpreis

Historischer Überblick

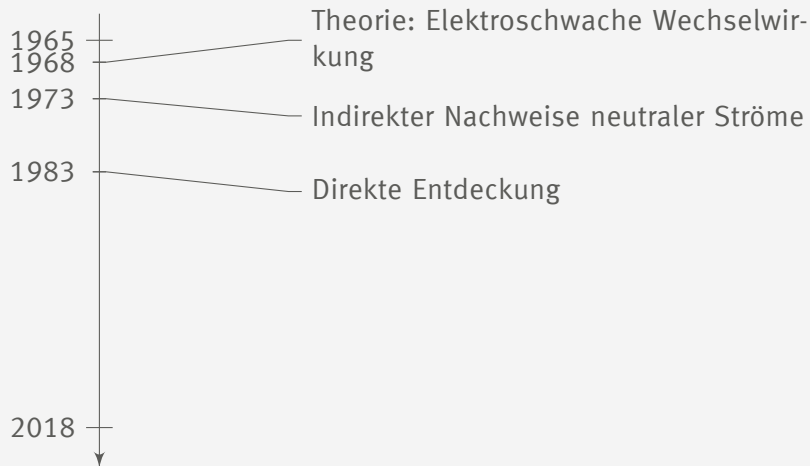


$$\bar{\nu}_\mu + e^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu + e^- [3]$$



1. Neutrale Ströme von links nach rechts Antineutrinostrahl in Blasenkammer. Anhand von Winkel und 1/3 Energie des e^- folgt Wechselwirkung durch neutrale Ströme. 700000 - Bilder überprüft. Spiral/Bremsstrahlung.
2. 1979 Nobelpreis für GWS
3. LEP bis 2000
4. 2013 Francois Englert und Peter Higgs Nobelpreis

Historischer Überblick



2018-11-26

Z0 Resonanz

Historischer Überblick

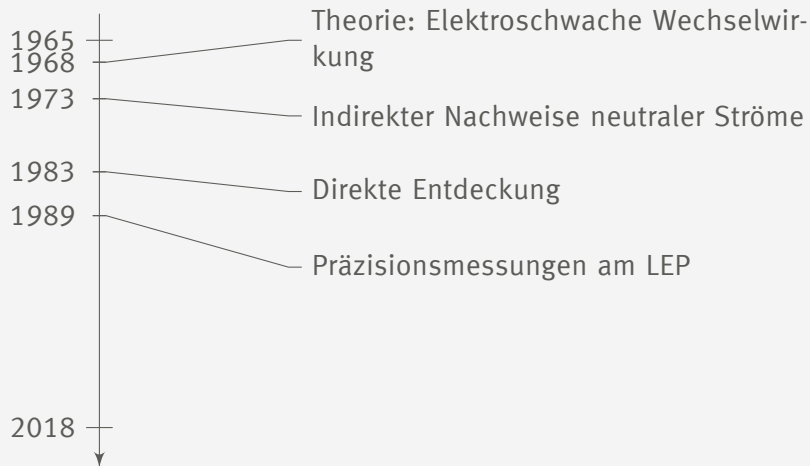
Historischer Überblick

Historischer Überblick



1. Neutrale Ströme von links nach rechts Antineutrinostrahl in Blaskammer. Anhand von Winkel und $1/3$ Energie des e^- folgt Wechselwirkung durch neutrale Ströme. 700000 - Bilder überprüft. Spiral/Bremsstrahlung.
2. 1979 Nobelpreis für GWS
3. LEP bis 2000
4. 2013 Francois Englert und Peter Higgs Nobelpreis

Historischer Überblick



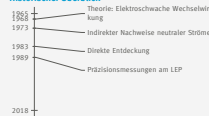
2018-11-26

Z0 Resonanz

Historischer Überblick

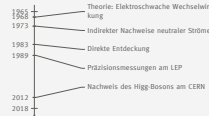
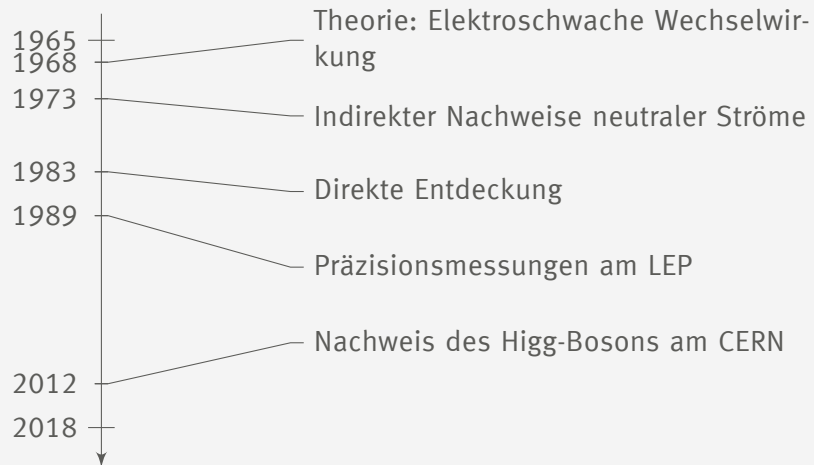
Historischer Überblick

Historischer Überblick



1. Neutrale Ströme von links nach rechts Antineutrinostrahl in Blasenkammer. Anhand von Winkel und $1/3$ Energie des e^- folgt Wechselwirkung durch neutrale Ströme. 700000 - Bilder überprüft. Spiral/Bremsstrahlung.
2. 1979 Nobelpreis für GWS
3. LEP bis 2000
4. 2013 Francois Englert und Peter Higgs Nobelpreis

Historischer Überblick



1. Neutrale Ströme von links nach rechts Antineutrinostrahl in Blasenkammer. Anhand von Winkel und $1/3$ Energie des e^- folgt Wechselwirkung durch neutrale Ströme. 700000 - Bilder überprüft. Spiral/Bremsstrahlung.
2. 1979 Nobelpreis für GWS
3. LEP bis 2000
4. 2013 Francois Englert und Peter Higgs Nobelpreis

Historischer Überblick

Theorie

Einordnung im Standardmodell der Elementarteilchen
Elektroschwache Vereinheitlichung
Zerfallsbreite

Experimentelle Untersuchung

Zusammenfassung

2018-11-26

Z0 Resonanz Theorie

[Historischer Überblick](#)

Theorie

Einordnung im Standardmodell der Elementarteilchen
Elektroschwache Vereinheitlichung
Zerfallsbreite

[Experimentelle Untersuchung](#)

[Zusammenfassung](#)

Einordnung im Standardmodell der Elementarteilchen

Drei Generationen der Materie (Fermionen)

	I	II	III	
Masse	2,3 MeV	1,275 GeV	173,07 GeV	0
Ladung	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
Spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Name	u up	c charm	t top	Y Photon
				125,09 GeV H Higgs Boson
	4,8 MeV	95 MeV	4,18 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	d down	s strange	b bottom	g Gluon
	<2 eV	<0,19 MeV	<18,2 MeV	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0
	ν_e Elektron-Neutrino	ν_μ Myon-Neutrino	ν_τ Tau-Neutrino	Z^0 Z Boson
	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV	80,4 GeV
	-1	-1	-1	± 1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	e Elektron	μ Myon	τ Tau	W^\pm W Boson

Standardmodell[6]

2018-11-26

Z0 Resonanz

Theorie

Einordnung im Standardmodell der Elementarteilchen

Einordnung im Standardmodell der Elementarteilchen

Einordnung im Standardmodell der Elementarteilchen



- Eichboson und Elementarteilchen
- schwache WW
- eigenes Antiteilchen
- $W^\pm \Rightarrow$ elek. Teilchen WW (beta Zerfall)
- $Z^0 \Rightarrow$ auch neutral Teilchen WW (Neutrino)

Elektroschwache Vereinheitlichung

Austauschteilchen

Z0 Resonanz

2018-11-26

Z0 Resonanz

└ Theorie

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

Elektroschwache Vereinheitlichung
Austauschteilchen

1. Allg. Grund + Was es ist.
2. Kräfte durch Austauschteilchen
3. Higgs
4. experimentelle Bestimmung

Elektroschwache Vereinheitlichung

Austauschteilchen

► Photon → elektromagnetische Wechselwirkung

Z0 Resonanz

2018-11-26

Z0 Resonanz

└ Theorie

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

Elektroschwache Vereinheitlichung
Austauschteilchen

► Photon → elektromagnetische Wechselwirkung

1. Allg. Grund + Was es ist.
2. Kräfte durch Austauschteilchen
3. Higgs
4. experimentelle Bestimmung

Elektroschwache Vereinheitlichung

Austauschteilchen

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

Z0 Resonanz

2018-11-26

Z0 Resonanz

└ Theorie

└└ Elektroschwache Vereinheitlichung

└└└ Elektroschwache Vereinheitlichung

Elektroschwache Vereinheitlichung
Austauschteilchen

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

1. Allg. Grund + Was es ist.
2. Kräfte durch Austauschteilchen
3. Higgs
4. experimentelle Bestimmung

Elektroschwache Vereinheitlichung

Austauschteilchen

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

Z0 Resonanz

2018-11-26

Z0 Resonanz

└ Theorie

└└ Elektroschwache Vereinheitlichung

└└└ Elektroschwache Vereinheitlichung

Elektroschwache Vereinheitlichung
Austauschteilchen

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

1. Allg. Grund + Was es ist.
2. Kräfte durch Austauschteilchen
3. Higgs
4. experimentelle Bestimmung

Elektroschwache Vereinheitlichung

Schwacher Isospin

	Fermionmultipletts			
Leptonen	$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}_L$ e_R	$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}_L$ μ_R	$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}_L$ τ_R	
Quarks	$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}_L$ u_R d_R	$\begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}_L$ c_R s_R	$\begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix}_L$ t_R b_R	

Schwacher Isospin[1]

2018-11-26

Z0 Resonanz

Theorie

Elektroschwache Vereinheitlichung

Elektroschwache Vereinheitlichung

Elektroschwache Vereinheitlichung
Schwacher Isospin

	Fermionmultipletts		
Leptonen	$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}_L$ e_R	$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}_L$ μ_R	$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}_L$ τ_R
Quarks	$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}_L$ u_R d_R	$\begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}_L$ c_R s_R	$\begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix}_L$ t_R b_R

Schwacher Isospin[1]

- Chiralität (l/r), Spinor Symmetrie
- analogon zu starkem Isospin
- Rechtshändige Neutrinos $T_3 = z = 0$, keine WW, Auftreten in Natur unbekannt

Elektroschwache Vereinheitlichung

Schwacher Isospin

Z0 Resonanz

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

Schwacher Isospin[1]

2018-11-26

Z0 Resonanz

└ Theorie

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

Elektroschwache Vereinheitlichung
Schwacher Isospin

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

Schwacher Isospin[1]

- Chiralität (l/r), Spinor Symmetrie
- analogon zu starkem Isospin
- Rechtshändige Neutrinos $T_3 = z = 0$, keine WW, Auftreten in Natur unbekannt

Elektroschwache Vereinheitlichung

Schwacher Isospin

Z0 Resonanz

2018-11-26

Z0 Resonanz

— Theorie

— Elektroschwache Vereinheitlichung

— Elektroschwache Vereinheitlichung

Elektroschwache Vereinheitlichung
Schwacher Isospin

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

Schwacher Isospin[1]

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

Schwacher Isospin[1]

- Chiralität (l/r), Spinor Symmetrie
- analogon zu starkem Isospin
- Rechtshändige Neutrinos $T_3 = z = 0$, keine WW, Auftreten in Natur unbekannt

Elektroschwache Vereinheitlichung

Schwacher Isospin

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

Schwacher Isospin[1]

2018-11-26

Z0 Resonanz

Theorie

Elektroschwache Vereinheitlichung

Elektroschwache Vereinheitlichung

Elektroschwache Vereinheitlichung
Schwacher Isospin

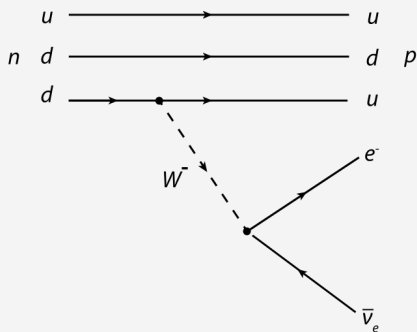
	Fermionmultipletts			T	T_3	z_f
Leptonen	$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}_L$	1/2	+1/2 -1/2	0 -1
Quarks	$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix}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

Schwacher Isospin[1]

- Chiralität (l/r), Spinor Symmetrie
- analogon zu starkem Isospin
- Rechtshändige Neutrinos $T_3 = z = 0$, keine WW, Auftreten in Natur unbekannt

Elektroschwache Vereinheitlichung

Austauschteilchen



β -Zerfall[2]

2018-11-26

Z0 Resonanz

└ Theorie

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

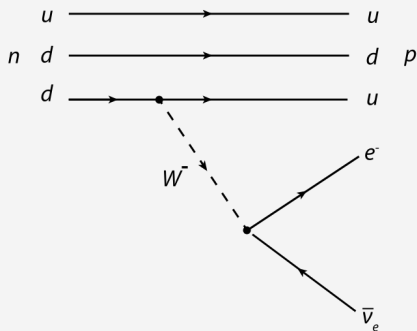
└ Elektroschwache Vereinheitlichung

1. Bekannt aus schwacher WW
2. $d \rightarrow u + W^-$
3. analog $u \rightarrow d + W^+$
4. Wieso $T=1$
5. B^0 postuliert

Elektroschwache Vereinheitlichung

Austauschteilchen

► T_3 soll erhalten bleiben



β -Zerfall[2]

2018-11-26

Z0 Resonanz

└ Theorie

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

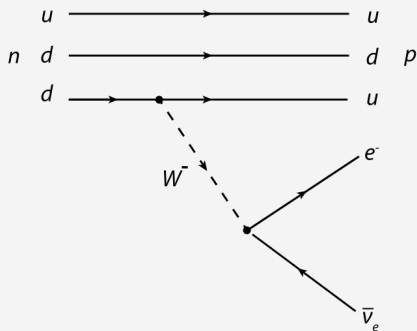
└ Elektroschwache Vereinheitlichung

1. Bekannt aus schwacher WW
2. $d \rightarrow u + W^-$
3. analog $u \rightarrow d + W^+$
4. Wieso $T=1$
5. B^0 postuliert

Elektroschwache Vereinheitlichung

Austauschteilchen

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



β -Zerfall[2]

2018-11-26

Z0 Resonanz

└ Theorie

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

Elektroschwache Vereinheitlichung
Austauschteilchen

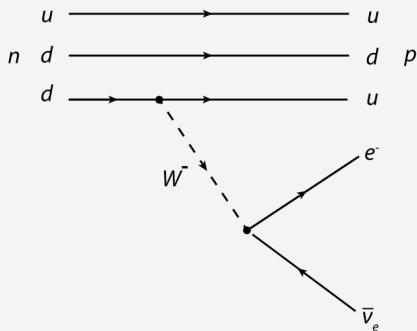
- ▶ T_3 soll erhalten bleiben
- ▶ $W^-: T_3 = -1$

1. Bekannt aus schwacher WW
2. $d \rightarrow u + W^-$
3. analog $u \rightarrow d + W^+$
4. Wieso $T=1$
5. B^0 postuliert

Elektroschwache Vereinheitlichung

Austauschteilchen

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



β -Zerfall[2]

2018-11-26

Z0 Resonanz

└ Theorie

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

Elektroschwache Vereinheitlichung
Austauschteilchen

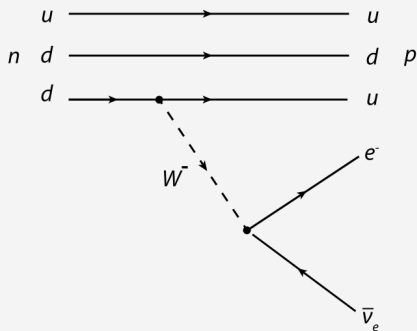
- ▶ T_3 soll erhalten bleiben
- ▶ $W^-: T_3 = -1$
- ▶ $W^+: T_3 = 1$

1. Bekannt aus schwacher WW
2. $d \rightarrow u + W^-$
3. analog $u \rightarrow d + W^+$
4. Wieso $T=1$
5. B^0 postuliert

Elektroschwache Vereinheitlichung

Austauschteilchen

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



β -Zerfall[2]

2018-11-26

Z0 Resonanz

└ Theorie

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

Elektroschwache Vereinheitlichung
Austauschteilchen

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

1. Bekannt aus schwacher WW
2. $d \rightarrow u + W^-$
3. analog $u \rightarrow d + W^+$
4. Wieso $T=1$
5. B^0 postuliert

Elektroschwache Vereinheitlichung

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

2018-11-26

Z0 Resonanz

└ Theorie

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

└ Elektroschwache Vereinheitlichung

Elektroschwache Vereinheitlichung

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

1. Drehung um Weinberg-Winkel/elektroschwachen Mischungswinkel , Naturkonstante
2. orthogonal + linear Kombination
3. experimentelle Bestimmung
4. Kopplungskonstanten relevant?

Elektroschwache Vereinheitlichung

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

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

2018-11-26

Z0 Resonanz

└ Theorie

└└ Elektroschwache Vereinheitlichung

└└└ Elektroschwache Vereinheitlichung

Elektroschwache Vereinheitlichung

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

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

1. Drehung um Weinberg-Winkel/elektroschwachen Mischungswinkel , Naturkonstante
2. orthogonal + linear Kombination
3. experimentelle Bestimmung
4. Kopplungskonstanten relevant?

Elektroschwache Vereinheitlichung

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

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

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

2018-11-26

Z0 Resonanz

└ Theorie

└└ Elektroschwache Vereinheitlichung

└└└ Elektroschwache Vereinheitlichung

Elektroschwache Vereinheitlichung

▶

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

▶

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

▶

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

1. Drehung um Weinberg-Winkel/elektroschwachen Mischungswinkel , Naturkonstante
2. orthogonal + linear Kombination
3. experimentelle Bestimmung
4. Kopplungskonstanten relevant?

Historischer Überblick

Theorie

Experimentelle Untersuchung

Erzeugung

Nachweis

Eigenschaften

Neutrino-generationen

Zusammenfassung

2018-11-26

Z0 Resonanz
└ Experimentelle Untersuchung

Historischer Überblick

Theorie

Experimentelle Untersuchung

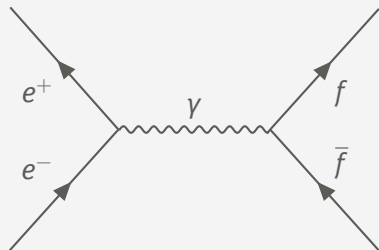
Erzeugung

Nachweis

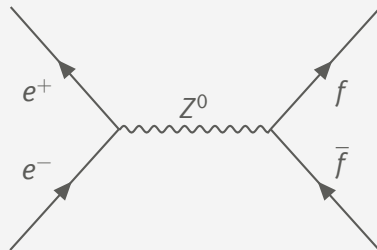
Eigenschaften

Neutrino-generationen

Zusammenfassung



e^+e^- -Vernichtung über γ [4]



e^+e^- -Vernichtung über Z^0 [4]

2018-11-26

Z0 Resonanz

Experimentelle Untersuchung

Erzeugung

Erzeugung

Erzeugung



- Allg. W/Z-Boson durch Anti+Lepton/Anti-Quark Reaktion
- kollidierende Teilchenstrahlen
- feynman diagram
- bei passender Energie approx M_Z dominiert Z^0 , aus QFT+Feynmanregeln

Erzeugung

► Schwerpunktsenergie $\sqrt{s} = 2E_e \geq M_Z c^2 \approx 91,6 \text{ GeV}$

Z0 Resonanz

2018-11-26

Z0 Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Erzeugung

└ Erzeugung

Erzeugung

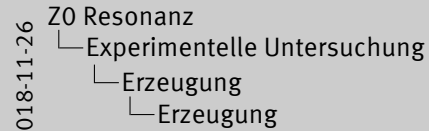
► Schwerpunktsenergie $\sqrt{s} = 2E_e \geq M_Z c^2 \approx 91,6 \text{ GeV}$

1. 1989 am Stanford Linear Collider
2. Energie muss in Quarks enthalten sein → sehr viel mehr Energie auf Protonen (analog mit d)
3. 1996 am LEP, $50 \rightarrow 86 \rightarrow 104,6 \text{ GeV}$

Erzeugung

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

Z0 Resonanz



Erzeugung

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

1. 1989 am Stanford Linear Collider
2. Energie muss in Quarks enthalten sein \rightarrow sehr viel mehr Energie auf Protonen (analog mit d)
3. 1996 am LEP, $50 \rightarrow 86 \rightarrow 104,6 \text{ GeV}$

Erzeugung

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

Z0 Resonanz

2018-11-26

Z0 Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Erzeugung

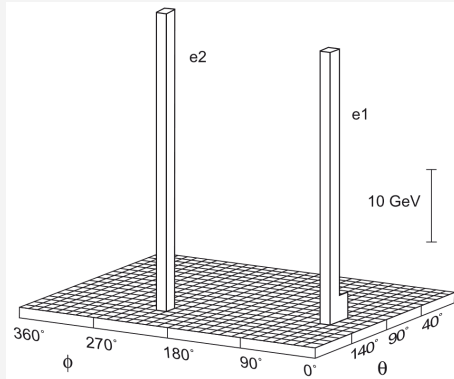
└ Erzeugung

Erzeugung

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

1. 1989 am Stanford Linear Collider
2. Energie muss in Quarks enthalten sein → sehr viel mehr Energie auf Protonen (analog mit d)
3. 1996 am LEP, $50 \rightarrow 86 \rightarrow 104,6 \text{ GeV}$

Nachweis 1983 am CERN



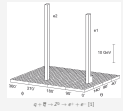
$$q + \bar{q} \rightarrow Z^0 \rightarrow e^+ + e^- [1]$$

Z⁰ Resonanz

2018-11-26

Z⁰ Resonanz
└ Experimentelle Untersuchung
└ Nachweis
└ Nachweis

Nachweis
1983 am CERN



- Energie Summe = Masse Z^0 (exakt?)
- Woher sicher, dass Z^0 Zerfall?

Eigenschaften

Experimentelle Bestimmung

► Messung:

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

2018-11-26

Z0 Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Eigenschaften

└ Eigenschaften

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

1. Über Wirkungsquerschnitt? src [PD12]
- 2.
3. Hadronen (idR. Anti+Quark) nicht unterscheidbar
4. Anti+Neutrino schwer detektierbar \Rightarrow % über Γ_{tot}
5. totale Breite = alle Zerfälle Anti+Fermion???

Eigenschaften

Experimentelle Bestimmung

► Messung:

► $M_Z = 91,188(2) \text{ GeV}/c^2$

► $\Gamma_Z = 2,495(2) \text{ GeV}$

► Zerfall:

$$Z^0 \rightarrow e^+ + e^- \quad 3,363(4) \%$$

$$\mu^+ + \mu^- \quad 3,366(7) \%$$

$$\tau^+ + \tau^- \quad 3,370(8) \%$$

$$\nu_{e,\mu,\tau}^+ + \bar{\nu}_{e,\mu,\tau} \quad 20,0(6) \%$$

$$\text{Hadronen} \quad 69,91(6) \%$$

2018-11-26

Z0 Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Eigenschaften

└ Eigenschaften

Eigenschaften

Experimentelle Bestimmung

► Messung:

► $M_Z = 91,188(2) \text{ GeV}/c^2$

► $\Gamma_Z = 2,495(2) \text{ GeV}$

► Zerfall:

$Z^0 \rightarrow e^+ + e^-$	3,363(4) %
$\mu^+ + \mu^-$	3,366(7) %
$\tau^+ + \tau^-$	3,370(8) %
$\nu_{e,\mu,\tau}^+ + \bar{\nu}_{e,\mu,\tau}$	20,0(6) %
Hadronen	69,91(6) %

1. Über Wirkungsquerschnitt? src [PD12]

2.

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

4. Anti+Neutrino schwer detektierbar \Rightarrow % über Γ_{tot}

5. totale Breite = alle Zerfälle Anti+Fermion???

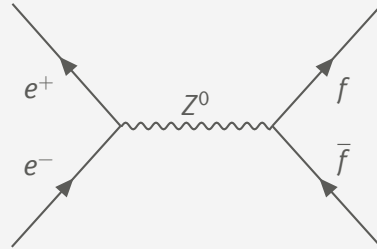
Neutrino-generationen

Wirkungsquerschnitt

$$\sigma_f = \sigma_0 \cdot \frac{s\Gamma_Z^2}{(s - M_Z^2)^2 + M_Z^2\Gamma_Z^2}$$

mit

$$\sigma_0 = \frac{12\pi}{M_Z^2} \cdot \frac{\Gamma_{i=e}\Gamma_f}{\Gamma_Z^2}$$



2018-11-26

Z0 Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└└ Neutrino-generationen

└└└ Neutrino-generationen

Neutrino-generationen
Wirkungsquerschnitt

$$\sigma_f = \sigma_0 \cdot \frac{s\Gamma_f^2}{(s - M_Z^2)^2 + M_Z^2\Gamma_Z^2}$$

mit

$$\sigma_0 = \frac{12\pi}{M_Z^2} \cdot \frac{\Gamma_{i=e}\Gamma_f}{\Gamma_Z^2}$$

1. Formel für σ Breit-Wigner
2. Abhängig von ...
3. γ unterdrückt

Neutrino-generationen

Zerfallsbreite

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

Z0 Resonanz

2018-11-26

Z0 Resonanz
 └ Experimentelle Untersuchung
 └ Neutrino-generationen
 └ Neutrino-generationen

Neutrino-generationen

Zerfallsbreite

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

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. Lep: e^\pm, μ^\pm, τ^\pm
5. Had: $u, c = 2/3$; $d, s, b = -1/3$
6. Neutrinos
7. kein top-Quark weil nicht genug Energie (≈ 175 GeV)
8. Korrekturen aus QFT, höherer Ordnungen, Strahlungskorrektur
9. Passt mit Unsicherheiten zu Exp. (nicht auf Folie)
10. $\Gamma_e / \Gamma_{tot} = 3,37\%$ passt auch zu Exp.

Neutrino-generationen

Zerfallsbreite

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

$$= \Gamma_{\text{Had}} + \Gamma_{\text{Lep}} + \Gamma_\nu$$

Z0 Resonanz

2018-11-26

Z0 Resonanz

└ Experimentelle Untersuchung

└ Neutrino-generationen

└ Neutrino-generationen

Neutrino-generationen
Zerfallsbreite

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

$$= \Gamma_{\text{Had}} + \Gamma_{\text{Lep}} + \Gamma_\nu$$

1. $\Gamma_f = \frac{G_F M_Z^3}{24\sqrt{2}\pi} \cdot (1 + (1 - e|Q_f| \sin^2 \theta_W)^2)$
2. G_F Fermikonstante
3. Q_f Ladung des Fermions
4. Lep: e^\pm, μ^\pm, τ^\pm
5. Had: u,c= 2/3; d,s,b=-1/3
6. Neutrinos
7. kein top-Quark weil nicht genug Energie (≈ 175 GeV)
8. Korrekturen aus QFT, höherer Ordnungen, Strahlungskorrektur
9. Passt mit Unsicherheiten zu Exp. (nicht auf Folie)
10. $\Gamma_e/\Gamma_{\text{tot}} = 3,37\%$ passt auch zu Exp.

Neutrino-generationen

Zerfallsbreite

$$\begin{aligned}\Gamma_Z &= \sum_f \Gamma_{Z \rightarrow f\bar{f}} \\ &= \Gamma_{\text{Had}} + \Gamma_{\text{Lep}} + \Gamma_\nu \\ &= N_C \cdot 2 \cdot \Gamma_u + N_C \cdot 3 \cdot \Gamma_d + 3 \cdot \Gamma_e + 3 \cdot \Gamma_\nu\end{aligned}$$

Z0 Resonanz

2018-11-26

Z0 Resonanz

- └ Experimentelle Untersuchung
 - └ Neutrino-generationen
 - └ Neutrino-generationen

Neutrino-generationen

Zerfallsbreite

$$\begin{aligned}\Gamma_Z &= \sum_f \Gamma_{Z \rightarrow f\bar{f}} \\ &= \Gamma_{\text{Had}} + \Gamma_{\text{Lep}} + \Gamma_\nu \\ &= N_C \cdot 2 \cdot \Gamma_u + N_C \cdot 3 \cdot \Gamma_d + 3 \cdot \Gamma_e + 3 \cdot \Gamma_\nu\end{aligned}$$

1. $\Gamma_f = \frac{G_F M_Z^3}{24\sqrt{2}\pi} \cdot (1 + (1 - e|Q_f| \sin^2 \theta_W)^2)$
2. G_F Fermikonstante
3. Q_f Ladung des Fermions
4. Lep: e^\pm, μ^\pm, τ^\pm
5. Had: u,c= 2/3; d,s,b=-1/3
6. Neutrinos
7. kein top-Quark weil nicht genug Energie (≈ 175 GeV)
8. Korrekturen aus QFT, höherer Ordnungen, Strahlungskorrektur
9. Passt mit Unsicherheiten zu Exp. (nicht auf Folie)
10. $\Gamma_e/\Gamma_{\text{tot}} = 3,37\%$ passt auch zu Exp.

Neutrino-generationen

Zerfallsbreite

$$\begin{aligned}
 \Gamma_Z &= \sum_f \Gamma_{Z \rightarrow f\bar{f}} \\
 &= \Gamma_{\text{Had}} + \Gamma_{\text{Lep}} + \Gamma_\nu \\
 &= N_C \cdot 2 \cdot \Gamma_u + N_C \cdot 3 \cdot \Gamma_d + 3 \cdot \Gamma_e + 3 \cdot \Gamma_\nu \\
 &= 3 \cdot 2 \cdot 94,9 \text{ MeV} + 3 \cdot 3 \cdot 122,4 \text{ MeV} + 3 \cdot 83,3 \text{ MeV} + 3 \cdot 165,8 \text{ MeV}
 \end{aligned}$$

2018-11-26

Z0 Resonanz

- └ Experimentelle Untersuchung
 - └ Neutrino-generationen
 - └ Neutrino-generationen

Neutrino-generationen
Zerfallsbreite

$$\begin{aligned}
 \Gamma_Z &= \sum_f \Gamma_{Z \rightarrow f\bar{f}} \\
 &= \Gamma_{\text{Had}} + \Gamma_{\text{Lep}} + \Gamma_\nu \\
 &= N_C \cdot 2 \cdot \Gamma_u + N_C \cdot 3 \cdot \Gamma_d + 3 \cdot \Gamma_e + 3 \cdot \Gamma_\nu \\
 &= 3 \cdot 2 \cdot 94,9 \text{ MeV} + 3 \cdot 3 \cdot 122,4 \text{ MeV} + 3 \cdot 83,3 \text{ MeV} + 3 \cdot 165,8 \text{ MeV}
 \end{aligned}$$

1. $\Gamma_f = \frac{G_F M_Z^3}{24\sqrt{2}\pi} \cdot (1 + (1 - e|Q_f| \sin^2 \theta_W)^2)$
2. G_F Fermikonstante
3. Q_f Ladung des Fermions
4. Lep: e^\pm, μ^\pm, τ^\pm
5. Had: u,c= 2/3; d,s,b=-1/3
6. Neutrinos
7. kein top-Quark weil nicht genug Energie ($\approx 175 \text{ GeV}$)
8. Korrekturen aus QFT, höherer Ordnungen, Strahlungskorrektur
9. Passt mit Unsicherheiten zu Exp. (nicht auf Folie)
10. $\Gamma_e/\Gamma_{\text{tot}} = 3,37\%$ passt auch zu Exp.

Neutrino-generationen

Zerfallsbreite

$$\begin{aligned}
 \Gamma_Z &= \sum_f \Gamma_{Z \rightarrow f\bar{f}} \\
 &= \Gamma_{\text{Had}} + \Gamma_{\text{Lep}} + \Gamma_\nu \\
 &= N_C \cdot 2 \cdot \Gamma_u + N_C \cdot 3 \cdot \Gamma_d + 3 \cdot \Gamma_e + 3 \cdot \Gamma_\nu \\
 &= 3 \cdot 2 \cdot 94,9 \text{ MeV} + 3 \cdot 3 \cdot 122,4 \text{ MeV} + 3 \cdot 83,3 \text{ MeV} + 3 \cdot 165,8 \text{ MeV} \\
 &= 2,42 \text{ GeV}
 \end{aligned}$$

Z0 Resonanz

2018-11-26

Z0 Resonanz
 └ Experimentelle Untersuchung
 └ Neutrino-generationen
 └ Neutrino-generationen

Neutrino-generationen
 Zerfallsbreite

$$\begin{aligned}
 \Gamma_Z &= \sum_f \Gamma_{Z \rightarrow f\bar{f}} \\
 &= \Gamma_{\text{Had}} + \Gamma_{\text{Lep}} + \Gamma_\nu \\
 &= N_C \cdot 2 \cdot \Gamma_u + N_C \cdot 3 \cdot \Gamma_d + 3 \cdot \Gamma_e + 3 \cdot \Gamma_\nu \\
 &= 3 \cdot 2 \cdot 94,9 \text{ MeV} + 3 \cdot 3 \cdot 122,4 \text{ MeV} + 3 \cdot 83,3 \text{ MeV} + 3 \cdot 165,8 \text{ MeV} \\
 &= 2,42 \text{ GeV}
 \end{aligned}$$

1. $\Gamma_f = \frac{G_F M_Z^3}{24\sqrt{2}\pi} \cdot (1 + (1 - e|Q_f| \sin^2 \theta_W)^2)$
2. G_F Fermikonstante
3. Q_f Ladung des Fermions
4. Lep: e^\pm, μ^\pm, τ^\pm
5. Had: u,c= 2/3; d,s,b=-1/3
6. Neutrinos
7. kein top-Quark weil nicht genug Energie ($\approx 175 \text{ GeV}$)
8. Korrekturen aus QFT, höherer Ordnungen, Strahlungskorrektur
9. Passt mit Unsicherheiten zu Exp. (nicht auf Folie)
10. $\Gamma_e/\Gamma_{\text{tot}} = 3,37\%$ passt auch zu Exp.

Neutrino-generationen

Zerfallsbreite

$$\begin{aligned}
 \Gamma_Z &= \sum_f \Gamma_{Z \rightarrow f\bar{f}} \\
 &= \Gamma_{\text{Had}} + \Gamma_{\text{Lep}} + \Gamma_\nu \\
 &= N_C \cdot 2 \cdot \Gamma_u + N_C \cdot 3 \cdot \Gamma_d + 3 \cdot \Gamma_e + 3 \cdot \Gamma_\nu \\
 &= 3 \cdot 2 \cdot 94,9 \text{ MeV} + 3 \cdot 3 \cdot 122,4 \text{ MeV} + 3 \cdot 83,3 \text{ MeV} + 3 \cdot 165,8 \text{ MeV} \\
 &= 2,42 \text{ GeV} \\
 &\xrightarrow[\text{korrektur}]{\text{Strahlungs-}} 2,497 \text{ GeV}
 \end{aligned}$$

Z0 Resonanz

2018-11-26

Z0 Resonanz
 └ Experimentelle Untersuchung
 └ Neutrino-generationen
 └ Neutrino-generationen

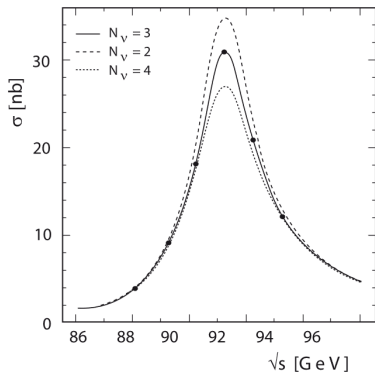
1. $\Gamma_f = \frac{G_F M_Z^3}{24\sqrt{2}\pi} \cdot (1 + (1 - e|Q_f| \sin^2 \theta_W)^2)$
2. G_F Fermikonstante
3. Q_f Ladung des Fermions
4. Lep: e^\pm, μ^\pm, τ^\pm
5. Had: $u, c = 2/3; d, s, b = -1/3$
6. Neutrinos
7. kein top-Quark weil nicht genug Energie ($\approx 175 \text{ GeV}$)
8. Korrekturen aus QFT, höherer Ordnungen, Strahlungskorrektur
9. Passt mit Unsicherheiten zu Exp. (nicht auf Folie)
10. $\Gamma_e/\Gamma_{\text{tot}} = 3,37\%$ passt auch zu Exp.

Neutrino-generationen
 Zerfallsbreite

$$\begin{aligned}
 \Gamma_Z &= \sum_f \Gamma_{Z \rightarrow f\bar{f}} \\
 &= \Gamma_{\text{Had}} + \Gamma_{\text{Lep}} + \Gamma_\nu \\
 &= N_C \cdot 2 \cdot \Gamma_u + N_C \cdot 3 \cdot \Gamma_d + 3 \cdot \Gamma_e + 3 \cdot \Gamma_\nu \\
 &= 3 \cdot 2 \cdot 94,9 \text{ MeV} + 3 \cdot 3 \cdot 122,4 \text{ MeV} + 3 \cdot 83,3 \text{ MeV} + 3 \cdot 165,8 \text{ MeV} \\
 &= 2,42 \text{ GeV} \\
 &\xrightarrow[\text{korrektur}]{\text{Strahlungs-}} 2,497 \text{ GeV}
 \end{aligned}$$

Neutrino-Generationen

Z0 Resonanz



Wirkungsquerschnitt $e^+e^- \rightarrow \text{Hadronen}$ [1]

2018-11-26

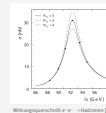
Z0 Resonanz

Experimentelle Untersuchung

Neutrino-Generationen

Neutrino-Generationen

Neutrino-Generationen



1. Cern Experiment
2. Schwerpunkt energie gegen Wirkungsquerschnitt
3. Ähnlich der Breit-Wigner-Funktion aber nicht perfekt symmetrisch durch Korrekturen höherer Ordnung
4. Verschiedene Anzahl-Neutrino-Generationen-Kurven
5. 3 Neutrino-Generationen \rightarrow 3 Leptonen 3 Quark-Generationen

Historischer Überblick

Theorie

Experimentelle Untersuchung

Zusammenfassung

Neutrino-generationen

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

Z0 Resonanz

2018-11-26

Z0 Resonanz
└ Zusammenfassung

└ Neutrino-generationen

Neutrino-generationen


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

1. Weinbergwinkel Massenverhältniss W,Z Boson




Quellen I

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

 Beta-Decay. URL:
<https://de.wikipedia.org/wiki/Betastrahlung> (besucht am 12.11.2018).

 F.J. Hasert u. a. „Search for elastic muon-neutrino electron scattering“. In: Physics Letters B 46.1 (1973), S. 121–124. ISSN: 0370-2693. DOI:
[https://doi.org/10.1016/0370-2693\(73\)90494-2](https://doi.org/10.1016/0370-2693(73)90494-2). URL:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0370269373904942>.

Quellen II

-  Donald H. Perkins. Introduction to High Energy Physics. [Cambridge University Press](#), 2000.
-  Sheldon Glashow, Abdus Salam and Steven Weinberg. URL: <http://thescientificodyssey.libsyn.com/episode-225-putting-the-puzzle-together> (besucht am 12.11.2018).
-  Standardmodell. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Standardmodell> (besucht am 12.11.2018).

Quellen II

-  Donald H. Perkins. Introduction to High Energy Physics. [Cambridge University Press](#), 2000.
-  Sheldon Glashow, Abdus Salam and Steven Weinberg. URL: <http://thescientificodyssey.libsyn.com/episode-225-putting-the-puzzle-together> (besucht am 12.11.2018).
-  Standardmodell. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Standardmodell> (besucht am 12.11.2018).

Folien-Überschrift

Hier kommt Text!

Ein „normaler“ Block

Inhalt hier.

`itemize` und `enumerate`:

- ▶ Ein Punkt
 - ▶ Ein Unterpunkt
- ▶ Noch ein Punkt

1. Ein Punkt
 - 1.1 Ein Unterpunkt
2. Noch ein Punkt

2018-11-26

Z0 Resonanz
└ Zusammenfassung

└ Folien-Überschrift

Folien-Überschrift

Hier kommt Text!

Ein „normaler“ Block

Inhalt hier.

`itemize` und `enumerate`:

- ▶ Ein Punkt
 - ▶ Ein Unterpunkt
- ▶ Noch ein Punkt

1. Ein Punkt
 - 1.1 Ein Unterpunkt
2. Noch ein Punkt

Ein Alert-Block

Ein Folien-Untertitel

Z0 Resonanz

Achtung!

Hier kommt Rot ins Spiel!

2018-11-26

Z0 Resonanz
└ Zusammenfassung

└ Ein Alert-Block

Ein Alert-Block
Ein Folien-Untertitel

Achtung!

Hier kommt Rot ins Spiel!

Ein Example-Block

Z0 Resonanz

Beispiel

Hier kommt Grün ins Spiel!

2018-11-26

Z0 Resonanz
└ Zusammenfassung

└ Ein Example-Block

Ein Example-Block

Beispiel

Hier kommt Grün ins Spiel!

Vielen Dank für eure Aufmerksamkeit!

Habt ihr noch Fragen?

<https://www.uni-muenster.de/Physik.FSPHYS>