

Z^0 -Resonanz

Alexander Neuwirth



Gliederung

Historischer Überblick

Theorie

Experimentelle Untersuchung

Zusammenfassung

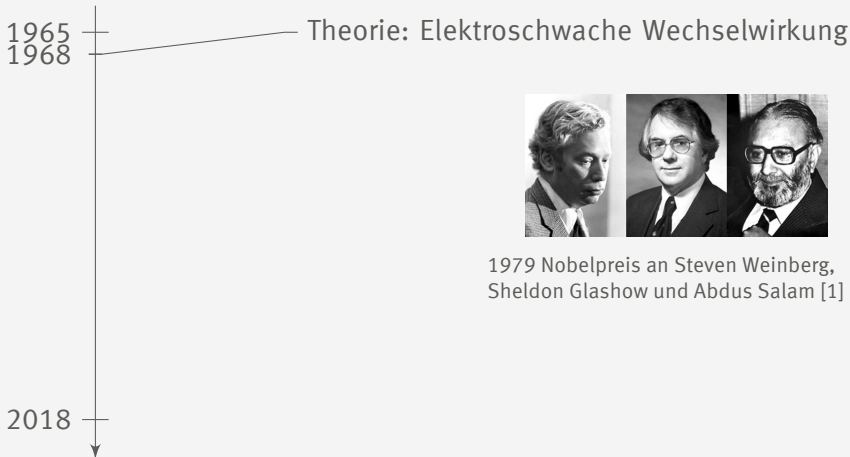
Historischer Überblick

Theorie

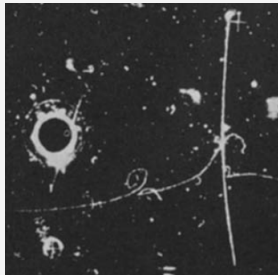
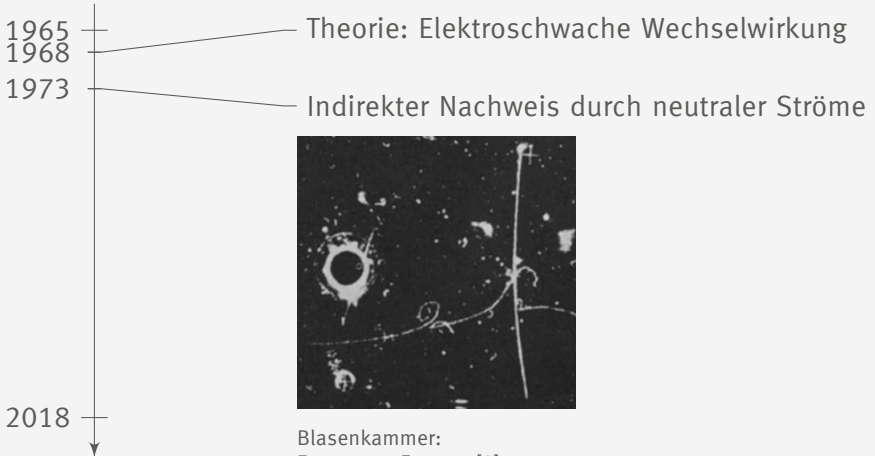
Experimentelle Untersuchung

Zusammenfassung

Historischer Überblick

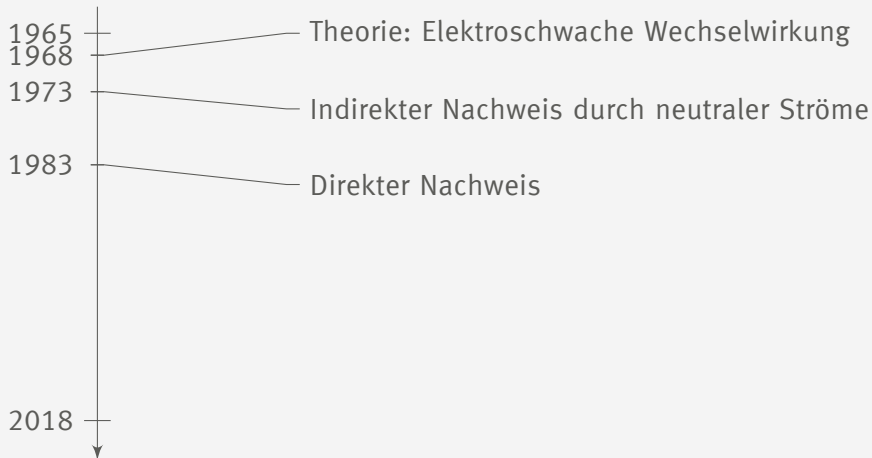


Historischer Überblick

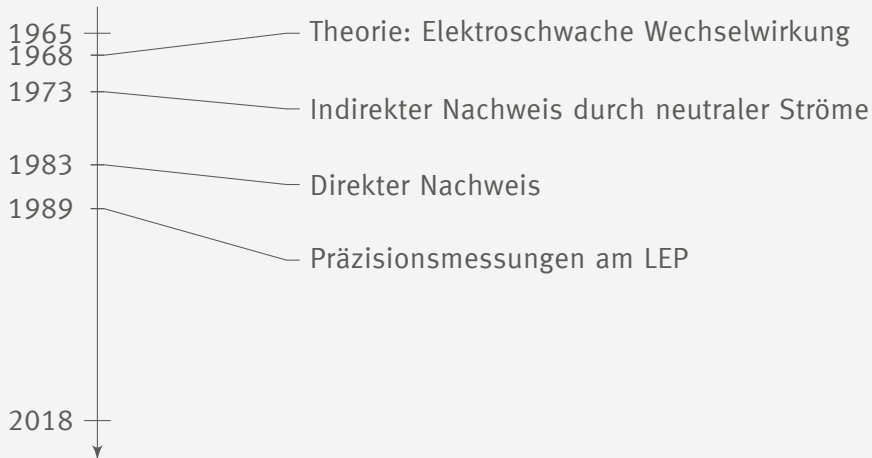


Blasenkammer:
 $\bar{\nu}_\mu + e^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu + e^-$ [2]

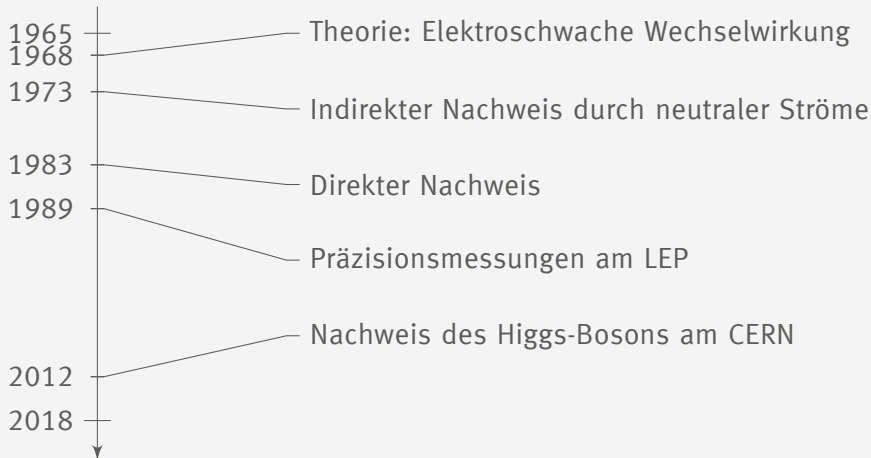
Historischer Überblick



Historischer Überblick



Historischer Überblick



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	125,09 GeV
Ladung	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
Spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
Name	u up	c charm	t top	γ Photon	H Higgs Boson
Quarks	4,8 MeV $-\frac{1}{3}$	95 MeV $-\frac{1}{3}$	4,18 GeV $-\frac{1}{3}$	0	
	d down	s strange	b bottom	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
				g Gluon	
Leptonen	<2 eV 0	<0,19 MeV 0	<18,2 MeV 0	91,2 GeV 0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	ν_e Elektron- Neutrino	ν_μ Myon- Neutrino	ν_τ Tau- Neutrino	Z⁰ Z Boson	
	0,511 MeV -1	105,7 MeV -1	1,777 GeV -1	80,4 GeV ±1	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	e Elektron	μ Myon	τ Tau	W[±] W Boson	
					Eichbosonen

Standardmodell[3]

Elektroschwache Vereinheitlichung

Austauschteilchen

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

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[4]

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[4]

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

Schwacher Isospin[4]

Elektroschwache Vereinheitlichung

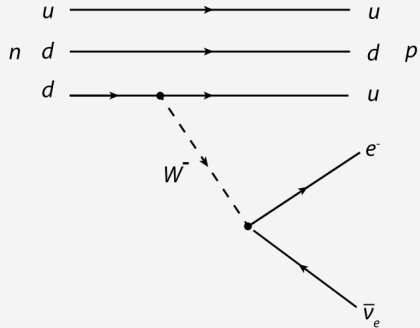
Schwacher Isospin

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

Schwacher Isospin[4]

Elektroschwache Vereinheitlichung

Schwacher Isospin

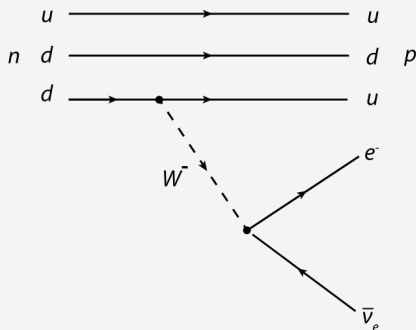


β^- -Zerfall[5]

Elektroschwache Vereinheitlichung

Schwacher Isospin

► T_3 soll erhalten bleiben



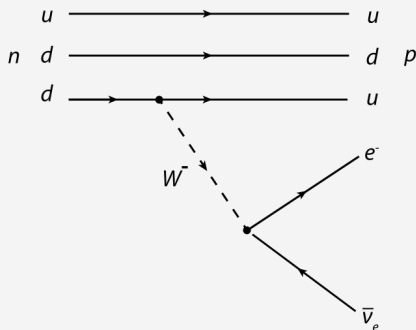
β^- -Zerfall[5]

Elektroschwache Vereinheitlichung

Schwacher Isospin

► T_3 soll erhalten bleiben

► $W^-: T_3 = -1$

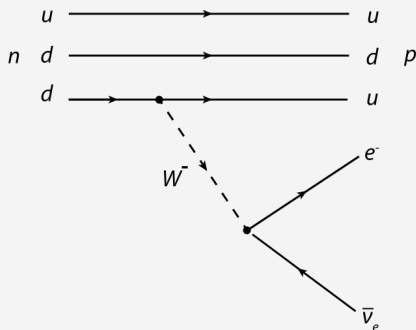


β^- -Zerfall[5]

Elektroschwache Vereinheitlichung

Schwacher Isospin

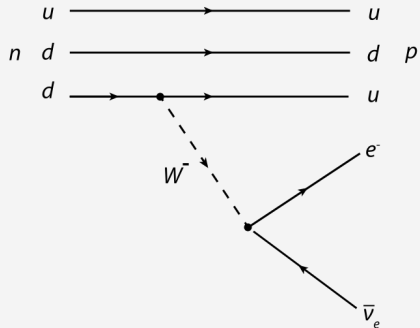
- ▶ T_3 soll erhalten bleiben
- ▶ $W^-: T_3 = -1$
- ▶ $W^+: T_3 = 1$

 β^- -Zerfall[5]

Elektroschwache Vereinheitlichung

Schwacher Isospin

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



β^- -Zerfall[5]

Elektroschwache Vereinheitlichung

► Photon und Z^0 als orthogonale Linearkombination von B^0 und W^0 :

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

Elektroschwache Vereinheitlichung

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

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

- Weinbergwinkel:

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

Elektroschwache Vereinheitlichung

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

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

- Weinbergwinkel:

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

- Gekoppelte Ladungen:

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

Historischer Überblick

Theorie

Experimentelle Untersuchung

Erzeugung

Nachweis

Präzessionsmessungen

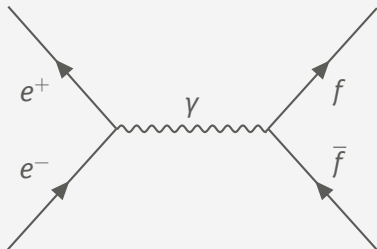
Eigenschaften

Anzahl Neutrinogenerationen

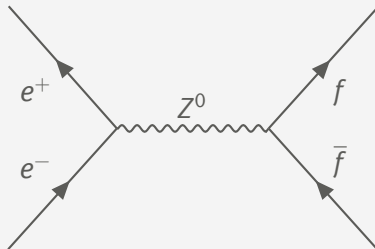
Zusammenfassung

Erzeugung

Feynman-Diagramme



e^+e^- -Vernichtung über γ [6]



e^+e^- -Vernichtung über Z^0 [6]

Erzeugung

► $e^- + e^- \rightarrow Z^0$: Schwerpunktsenergie $\sqrt{s} = 2E_e \geq M_Z c^2 \approx 91,6 \text{ GeV}$

Erzeugung

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

Erzeugung

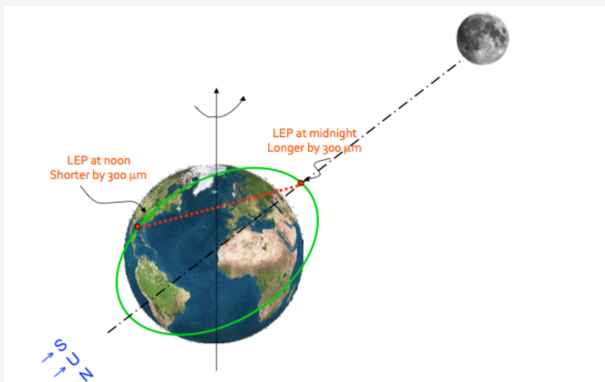
- ▶ $e^- + e^- \rightarrow Z^0$: Schwerpunktsenergie $\sqrt{s} = 2E_e \geq M_Z c^2 \approx 91,6 \text{ GeV}$
- ▶ $u + \bar{u} \rightarrow Z^0$: pp -Kollision benötigt $\sqrt{s} \gtrapprox 600 \text{ GeV}$ pro Proton
- ▶ $u + \bar{u} \rightarrow Z^0$: $p\bar{p}$ -Kollision benötigt $\sqrt{s} \gtrapprox 300 \text{ GeV}$

Erzeugung

- ▶ $e^- + e^- \rightarrow Z^0$: Schwerpunktsenergie $\sqrt{s} = 2E_e \geq M_Z c^2 \approx 91,6 \text{ GeV}$
- ▶ $u + \bar{u} \rightarrow Z^0$: pp -Kollision benötigt $\sqrt{s} \gtrapprox 600 \text{ GeV}$ pro Proton
- ▶ $u + \bar{u} \rightarrow Z^0$: $p\bar{p}$ -Kollision benötigt $\sqrt{s} \gtrapprox 300 \text{ GeV}$
- ▶ $e^+ + e^- \rightarrow W^+ + W^-$: benötigt $\sqrt{s} \geq 2M_W c^2 \approx 160,8 \text{ GeV}$

Erzeugung

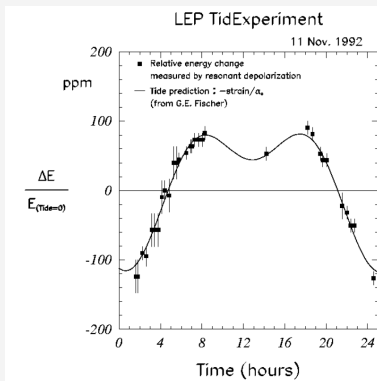
Einfluss auf Beschleuniger durch Gezeiten



LEP Ausdehnung[8]

Erzeugung

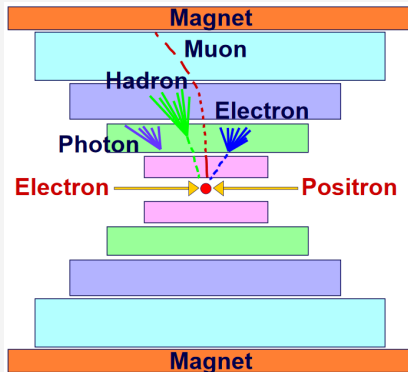
Einfluss auf Beschleuniger durch Gezeiten



Relative Strahlenergieänderung[7]

Nachweis

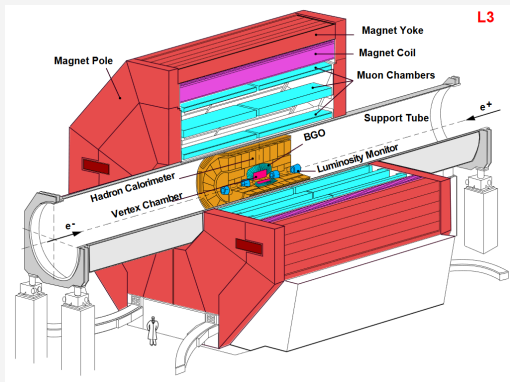
L3 Detektoraufbau am LEP



L3 Detektor [7]

Nachweis

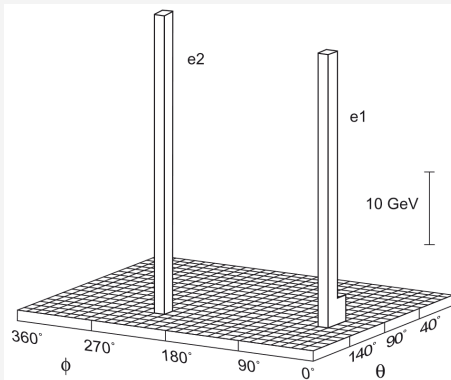
L3 Detektoraufbau am LEP



L3 Detektor [7]

Nachweis

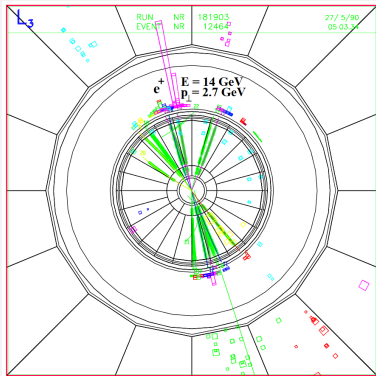
Entdeckung des Z^0 Bosons (1983 am CERN)



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

Präzessionsmessungen

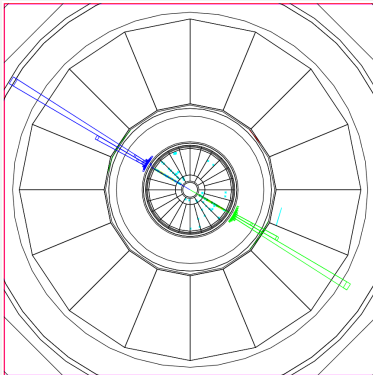
L3 Detektor (1993 am LEP)



$e^- + e^+ \rightarrow Z^0 \rightarrow \text{hadronische Jets [7]}$

Präzessionsmessungen

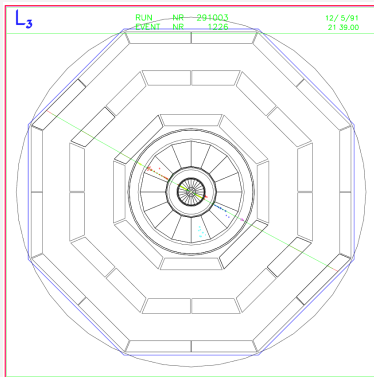
L3 Detektor (1993 am LEP)



$$e^- + e^+ \rightarrow Z^0 \rightarrow e^+ + e^- [7]$$

Präzessionsmessungen

L3 Detektor (1993 am LEP)



$$e^- + e^+ \rightarrow Z^0 \rightarrow \mu^+ + \mu^- [7]$$

Eigenschaften

Experimentelle Bestimmung

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

Eigenschaften

Experimentelle Bestimmung

► Messung:

► $M_Z = 91,188(2) \text{ GeV}/c^2$

► $\Gamma_Z = 2,495(2) \text{ GeV}$

► Zerfall:

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

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

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

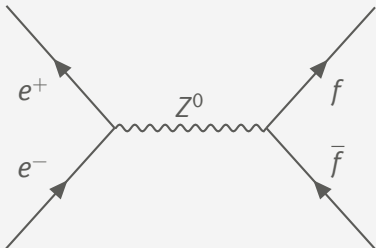
$$\nu_{e,\mu,\tau} + \bar{\nu}_{e,\mu,\tau} \quad 20,0(6) \%$$

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

Anzahl Neutrino-Generationen

Wirkungsquerschnitt

$$\sigma_f = \frac{12\pi \cdot \Gamma_f \cdot \Gamma_e}{(s - M_Z^2)^2 + M_Z^2 \Gamma_Z^2}$$



Anzahl Neutrinogenerationen

Zerfallsbreite

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

Anzahl Neutrino-generationen

Zerfallsbreite

$$\begin{aligned}\Gamma_Z &= \sum_f \Gamma_{Z \rightarrow f\bar{f}} \\ &= \Gamma_{u,c,d,s,b} + \Gamma_{e,\mu,\tau} + \Gamma_{\nu_e,\nu_\mu,\nu_\tau}\end{aligned}$$

Anzahl Neutrino generationen

Zerfallsbreite

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

$$= \Gamma_{u,c,d,s,b} + \Gamma_{e,\mu,\tau} + \Gamma_{\nu_e,\nu_\mu,\nu_\tau}$$

$$= N_C \cdot 2 \cdot \Gamma_u + N_C \cdot 3 \cdot \Gamma_d + 3 \cdot \Gamma_e + 3 \cdot \Gamma_\nu$$

$$\Gamma_f = \frac{G_F M_Z^3}{24\sqrt{2}\pi} \cdot (1 + (1 - e|Q_f| \sin^2 \theta_W)^2)$$

Anzahl Neutrinogenerationen

Zerfallsbreite

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

$$\Gamma_f = \frac{G_F M_Z^3}{24\sqrt{2}\pi} \cdot (1 + (1 - e|Q_f| \sin^2 \theta_W)^2)$$

Anzahl Neutrino generationen

Zerfallsbreite

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

$$\Gamma_f = \frac{G_F M_Z^3}{24\sqrt{2}\pi} \cdot (1 + (1 - e|Q_f| \sin^2 \theta_W)^2)$$

Anzahl Neutrinogenerationen

Zerfallsbreite

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

$$= \Gamma_{u,c,d,s,b} + \Gamma_{e,\mu,\tau} + \Gamma_{\nu_e,\nu_\mu,\nu_\tau}$$

$$= N_C \cdot 2 \cdot \Gamma_u + N_C \cdot 3 \cdot \Gamma_d + 3 \cdot \Gamma_e + 3 \cdot \Gamma_\nu$$

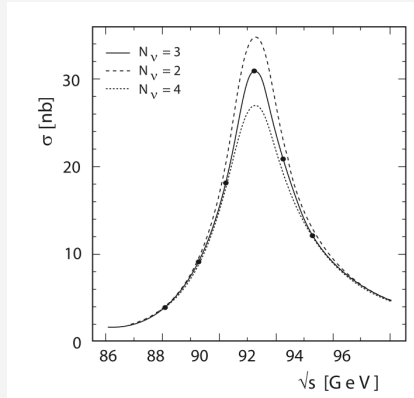
$$= 3 \cdot 2 \cdot 94,9 \text{ MeV} + 3 \cdot 3 \cdot 122,4 \text{ MeV} + 3 \cdot 83,3 \text{ MeV} + 3 \cdot 165,8 \text{ MeV}$$

$$= 2,42 \text{ GeV}$$

$$\begin{array}{c} \text{Strahlungs-} \\ \hline \text{korrektur} \end{array} \rightarrow 2,497 \text{ GeV}$$

$$\Gamma_f = \frac{G_F M_Z^3}{24\sqrt{2}\pi} \cdot (1 + (1 - e|Q_f| \sin^2 \theta_W)^2)$$

Anzahl Neutrino generationen



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

Historischer Überblick

Theorie

Experimentelle Untersuchung

Zusammenfassung

Zusammenfassung

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

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).



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



Standardmodell. URL:

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



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).



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

Quellen III

-  Versuch Z⁰-Resonanz. URL: https://www.physik.hu-berlin.de/de/eephys/teaching/lab/z0resonance/index_html (besucht am 25.11.2018).
-  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).

Vielen Dank für eure Aufmerksamkeit!

Fragen?