

Z^0 -Resonanz

Alexander Neuwirth



Gliederung

Historischer Überblick

Theorie

Experimentelle Untersuchung

Zusammenfassung

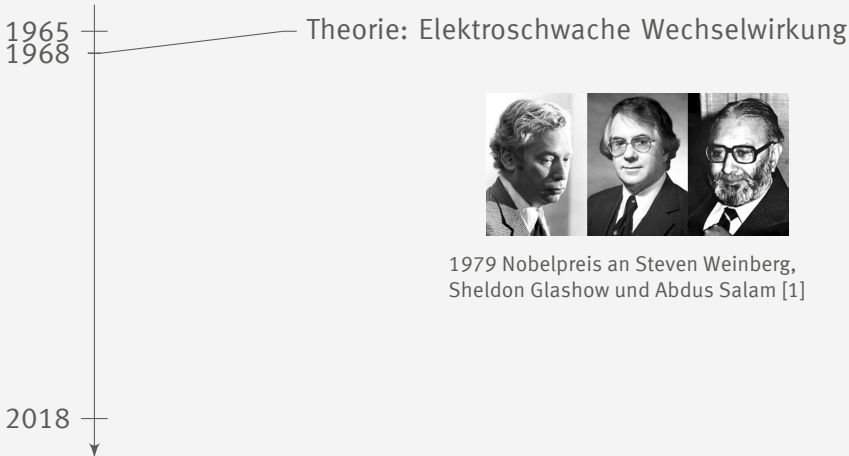
Historischer Überblick

Theorie

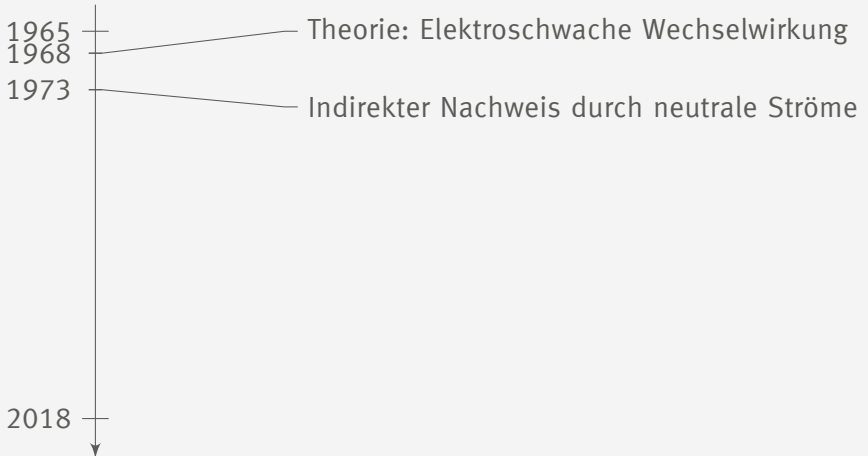
Experimentelle Untersuchung

Zusammenfassung

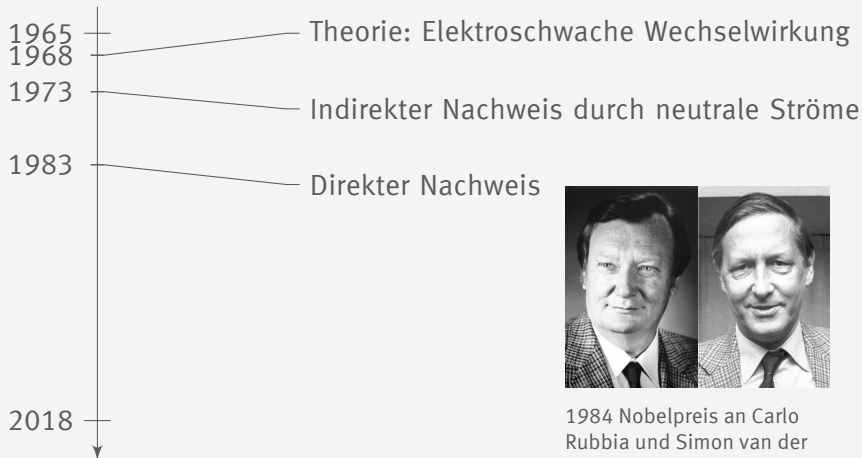
Historischer Überblick



Historischer Überblick

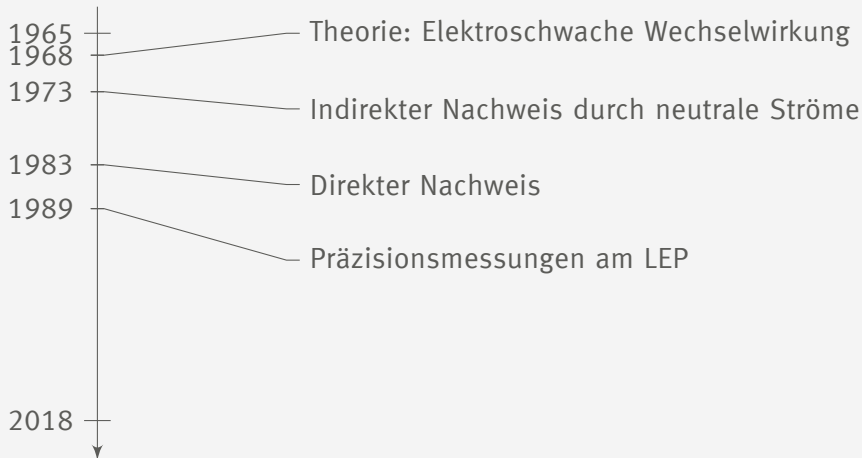


Historischer Überblick

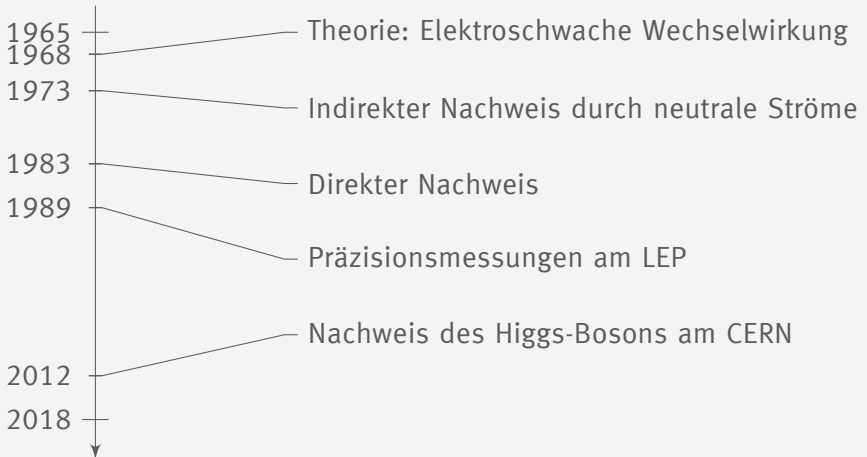


1984 Nobelpreis an Carlo Rubbia und Simon van der Meer [2]

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	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	
Leptonen	<2 eV	<0,19 MeV	<18,2 MeV	91,2 GeV	
	0	0	0	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	ν_e Elektron- Neutrino	ν_μ Myon- Neutrino	ν_τ Tau- Neutrino	Z⁰ 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[±] W Boson	

Eichbosonen

Z⁰-Boson:

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

Standardmodell[3]

Elektroschwache Vereinheitlichung

Austauschteilchen

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

Elektroschwache Vereinheitlichung

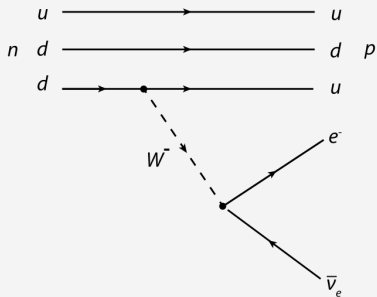
Schwacher Isospin

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

Schwacher Isospin[4]

Elektroschwache Vereinheitlichung

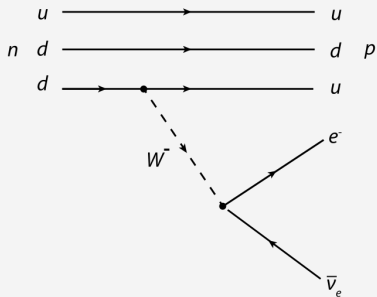
Schwacher Isospin



β^- -Zerfall[5]

Elektroschwache Vereinheitlichung

Schwacher Isospin

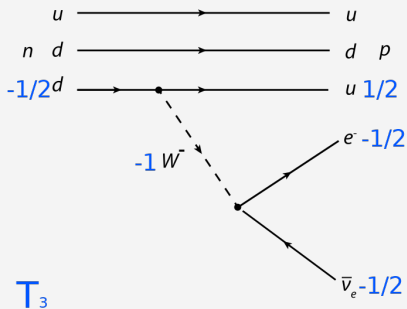


► T_3 soll erhalten bleiben

β^- -Zerfall[5]

Elektroschwache Vereinheitlichung

Schwacher Isospin

-1 W^-

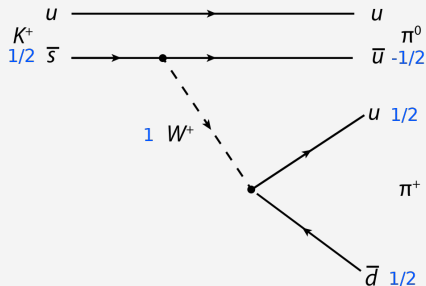
► T_3 soll erhalten bleiben

► $W^-: T_3 = -1$

β^- -Zerfall[5]

Elektroschwache Vereinheitlichung

Schwacher Isospin



► T_3 soll erhalten bleiben

► $W^-: T_3 = -1$

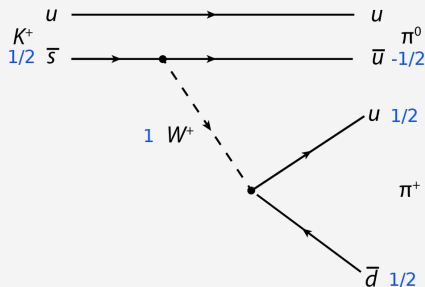
► $W^+: T_3 = 1$

T_3

K^+ -Zerfall[5]

Elektroschwache Vereinheitlichung

Schwacher Isospin



► T_3 soll erhalten bleiben

► $W^-: T_3 = -1$

► $W^+: T_3 = 1$

► $W^0: (T = 1, T_3 = 0)$

► $B^0: (T = 0, T_3 = 0)$

T_3

K^+ -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 des Z^0 -Bosons

- Nachweis

- Präzisionsmessungen

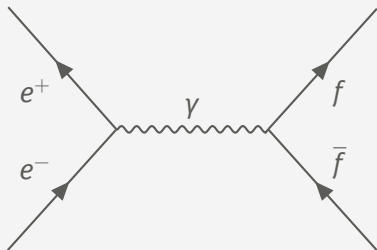
- Eigenschaften

- Anzahl Neutrinogenerationen

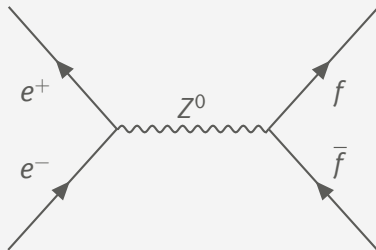
Zusammenfassung

Erzeugung des Z^0 -Bosons

Feynmandiagramme zur Elektron-Positron-Annihilation



e^+e^- -Vernichtung über γ [6]



e^+e^- -Vernichtung über Z^0 [6]

→ t

Erzeugung des Z^0 -Bosons

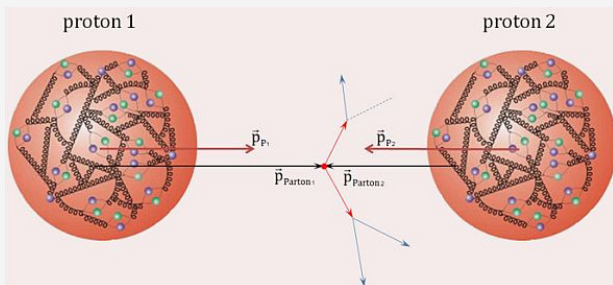
am Large Electron-Positron Collider (LEP)

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

Erzeugung des Z^0 -Bosons

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

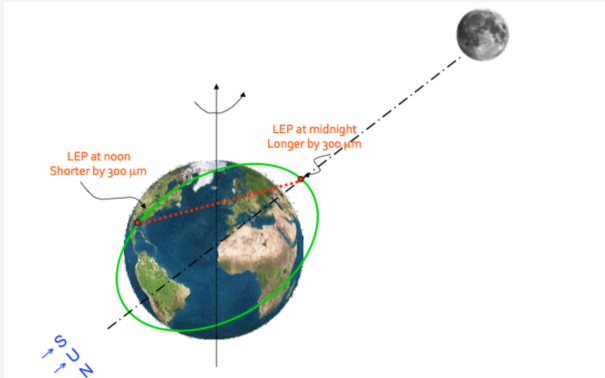
- ▶ $u + \bar{u} \rightarrow Z^0$: pp -Kollision benötigt $E_p \gtrapprox 600 \text{ GeV}$
- ▶ $u + \bar{u} \rightarrow Z^0$: $p\bar{p}$ -Kollision benötigt $E_p \gtrapprox 300 \text{ GeV}$



Proton-Proton-Kollision [7]

Erzeugung des Z^0 -Bosons

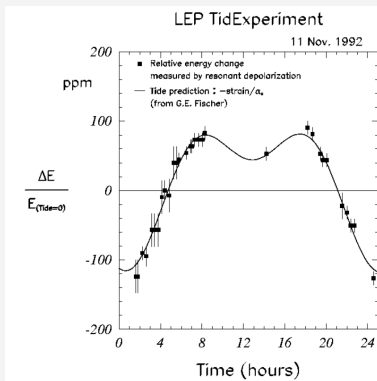
Einfluss auf Beschleuniger durch Gezeiten



LEP Ausdehnung[8]

Erzeugung des Z⁰-Bosons

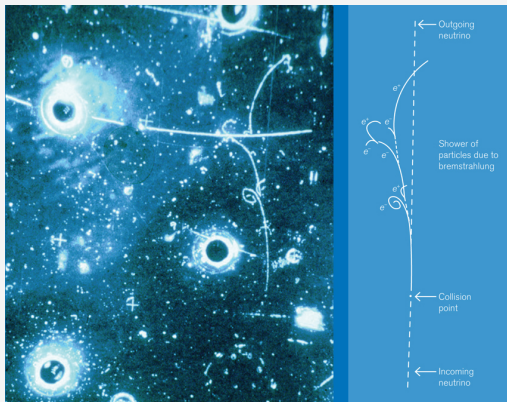
Einfluss auf Beschleuniger durch Gezeiten



Relative Strahlenergieänderung[9]

Nachweis

des Z⁰-Bosons durch neutrale Ströme



► Neutrinostrahl durch
 $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \bar{\nu}_\mu$

► Blasenkammer:
 $\bar{\nu}_\mu + e^- \xrightarrow{Z^0} \bar{\nu}_\mu + e^-$

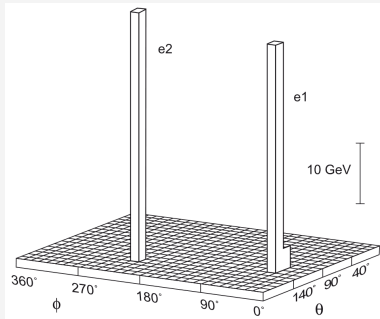
► Elektron sendet
 Bremsstrahlung aus

► e^-e^+ -Paarbildung →
 elektromagnetischer
 Schauer

[10][11]

Nachweis

Entdeckung des Z^0 Bosons

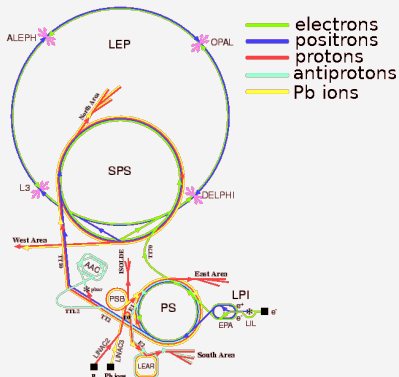


„Lego-Diagramm“ $q + \bar{q} \rightarrow Z^0 \rightarrow e^+ + e^-$ [4]

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

Präzisionsmessungen

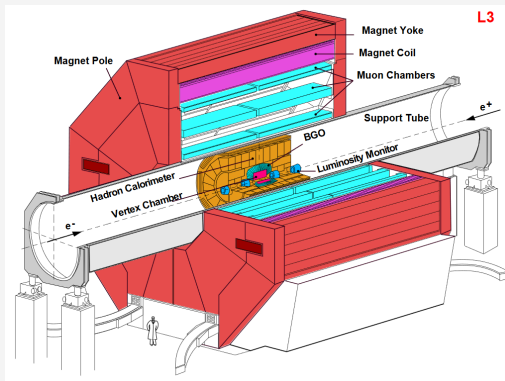
Large Electron Positron Collider (LEP, 1989-2000)



Beschleuniger am CERN 1996 [12]

Präzisionsmessungen

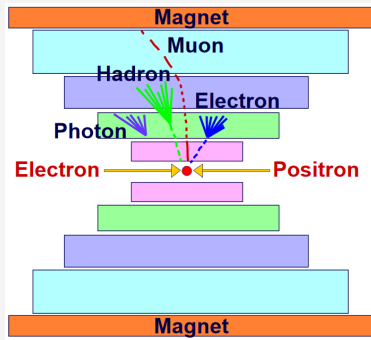
L3 Detektoraufbau am LEP



L3 Detektor [9]

Präzisionsmessungen

L3 Detektoraufbau am LEP



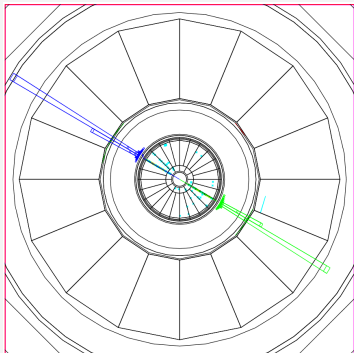
L3 Detektor [9]

Von Innen nach Außen:

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

Präzisionsmessungen

L3 Detektor (1993 am LEP)

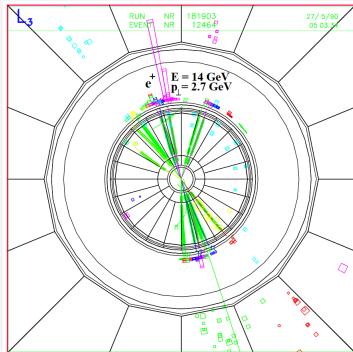


- ▶ Energiemessung im elm. Kalorimeter
- ▶ Entgegengesetzte Ausbreitung

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

Präzisionsmessungen

L3 Detektor (1993 am LEP)

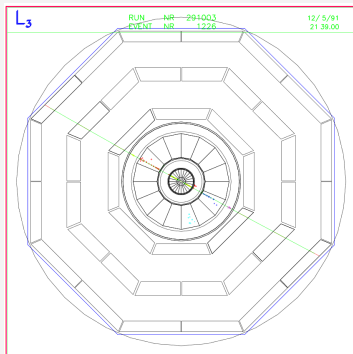


$e^- + e^+ \rightarrow Z^0 \rightarrow \text{hadronische Jets [9]}$

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

Präzisionsmessungen

L3 Detektor (1993 am LEP)

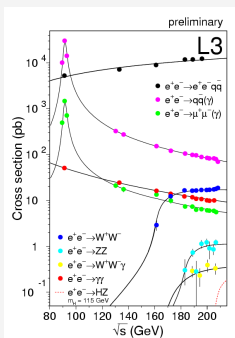


- ▶ Messung der Spur der Myonen durch mehrere Myonenkammern
- ▶ I.A. keine Absorption

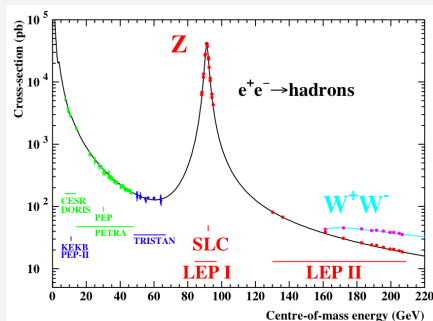
$$e^- + e^+ \rightarrow Z^0 \rightarrow \mu^+ + \mu^- [9]$$

Präzisionsmessungen

Z⁰-Resonanz bei ≈ 91 GeV



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



Wirkungsquerschnitte verschiedener Beschleuniger [14]

Eigenschaften

Experimentelle Bestimmung

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

Eigenschaften

Experimentelle Bestimmung

► Messung:

► Ruhemasse $M_Z = 91,188(2) \text{ GeV}/c^2$

► Zerfallsbreite $\Gamma_Z = 2,495(2) \text{ GeV}$

► Zerfall:

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

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

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

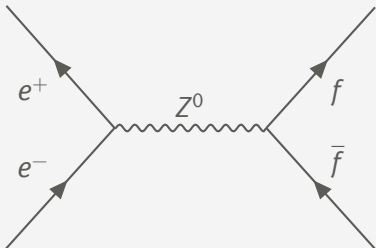
$$\nu_{e,\mu,\tau} + \bar{\nu}_{e,\mu,\tau} \quad 20,0(6) \%$$

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

Anzahl Neutrino generationen

Wirkungsquerschnitt

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



Anzahl Neutrino generationen

Berechnung der Zerfallsbreite

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

Anzahl Neutrinogenerationen

Berechnung der Zerfallsbreite

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

Anzahl Neutrino-generationen

Berechnung der Zerfallsbreite

$$\begin{aligned}
 \Gamma_Z &= \sum_f \Gamma_{Z \rightarrow f\bar{f}} \\
 &= \Gamma_{u,c,d,s,b} + \Gamma_{e,\mu,\tau} + \Gamma_{\nu_e,\nu_\mu,\nu_\tau} \\
 &= N_C \cdot 2 \cdot \Gamma_u + N_C \cdot 3 \cdot \Gamma_d + 3 \cdot \Gamma_e + N_\nu \cdot \Gamma_\nu
 \end{aligned}
 \qquad
 \Gamma_f = \frac{G_F M_Z^3}{24\sqrt{2}\pi} \cdot (1 + (1 - e|Q_f| \sin^2 \theta_W)^2)$$

N_C : Anzahl der Farbladungen

N_ν : Anzahl der Neutrino-generationen

G_F : Fermi-Kopplungskonstante

Q_f : Ladung

Anzahl Neutrino-generationen

Berechnung der Zerfallsbreite

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

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

N_C : Anzahl der Farbladungen

N_ν : Anzahl der Neutrino-generationen

G_F : Fermi-Kopplungskonstante

Q_f : Ladung

Anzahl Neutrino-generationen

Berechnung der Zerfallsbreite

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

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

N_C : Anzahl der Farbladungen

N_ν : Anzahl der Neutrino-generationen

G_F : Fermi-Kopplungskonstante

Q_f : Ladung

Anzahl Neutrino-generationen

Berechnung der Zerfallsbreite

$$\begin{aligned}
 \Gamma_Z &= \sum_f \Gamma_{Z \rightarrow f\bar{f}} & \Gamma_f &= \frac{G_F M_Z^3}{24\sqrt{2}\pi} \cdot (1 + (1 - e|Q_f| \sin^2 \theta_W)^2) \\
 &= \Gamma_{u,c,d,s,b} + \Gamma_{e,\mu,\tau} + \Gamma_{\nu_e,\nu_\mu,\nu_\tau} \\
 &= N_C \cdot 2 \cdot \Gamma_u + N_C \cdot 3 \cdot \Gamma_d + 3 \cdot \Gamma_e + N_\nu \cdot \Gamma_\nu \\
 &= 3 \cdot 2 \cdot 94,9 \text{ MeV} + 3 \cdot 3 \cdot 122,4 \text{ MeV} + 3 \cdot 83,3 \text{ MeV} + 3 \cdot 165,8 \text{ MeV} \\
 &= 2,42 \text{ GeV} \\
 &\xrightarrow[\text{korrektur}]{\text{Strahlungs-}} 2,497 \text{ GeV}
 \end{aligned}$$

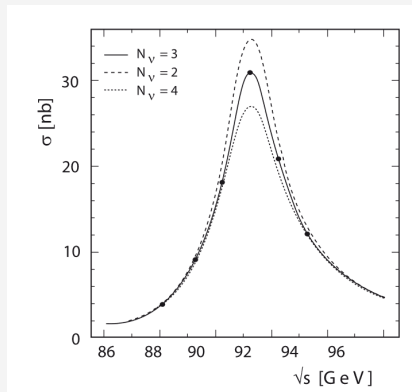
N_C : Anzahl der Farbladungen
 N_ν : Anzahl der Neutrino-generationen
 G_F : Fermi-Kopplungskonstante
 Q_f : Ladung

Anzahl Neutrinogenerationen

Vergleich Theorie und Experiment

Z^0 Zerfall	theoretisch	experimentell
$e^- + e^+$	3,34 %	3,363(4) %
$\nu + \bar{\nu}$	19,92 %	20,0(6) %
Hadronen	66,92 %	69,91(6) %
Γ_Z	2,497 GeV	2,495(2) GeV

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]

Historischer Überblick

Theorie

Experimentelle Untersuchung

Zusammenfassung

Zusammenfassung

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

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 II



Schwache_Wechselwirkung. URL:

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 III



Versuch Z0-Resonanz. URL: 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.symmetrymagazine.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](https://doi.org/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?