

Z^0 -Resonanz

Alexander Neuwirth



Gliederung

Historischer Überblick

Theorie

Experimentelle Untersuchung

Zusammenfassung

Historischer Überblick

Theorie

Experimentelle Untersuchung

Zusammenfassung

Historischer Überblick

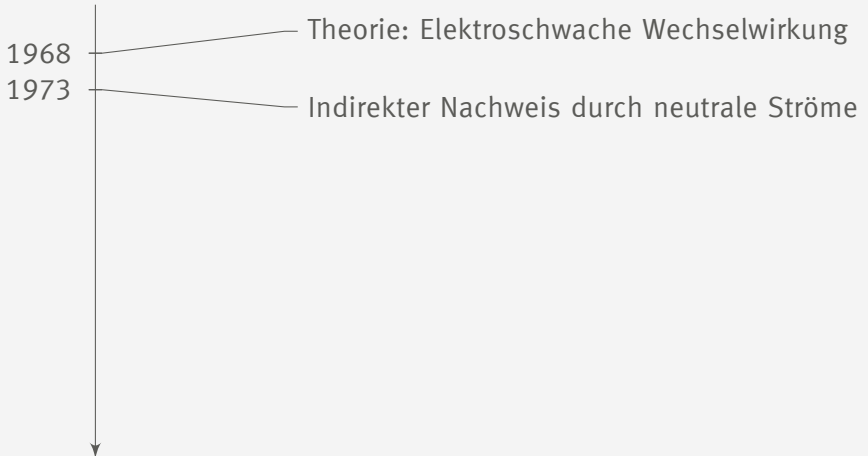
1968

Theorie: Elektroschwache Wechselwirkung

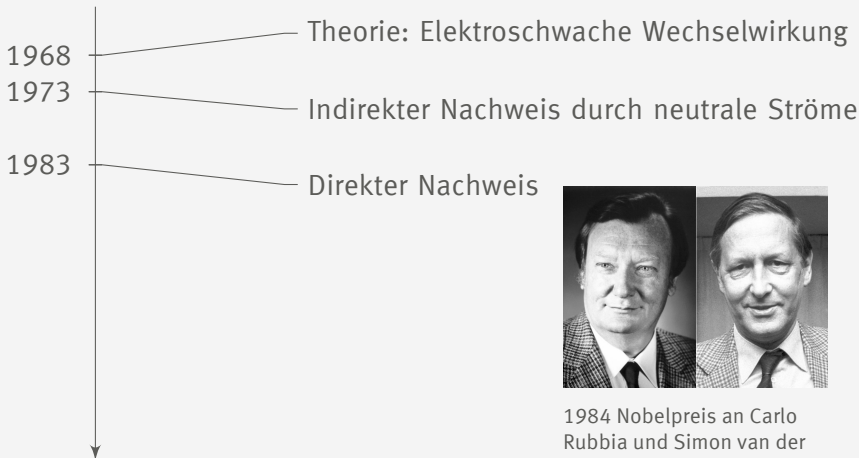


1979 Nobelpreis an Steven Weinberg,
Sheldon Glashow und Abdus Salam [1]

Historischer Überblick

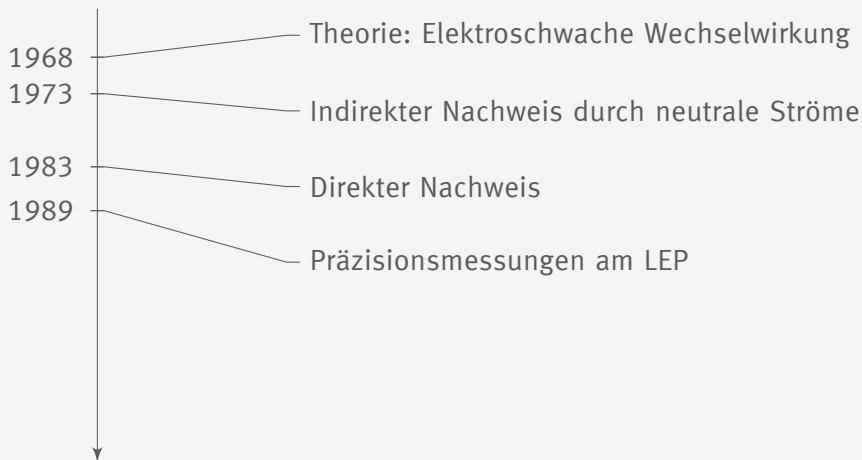


Historischer Überblick

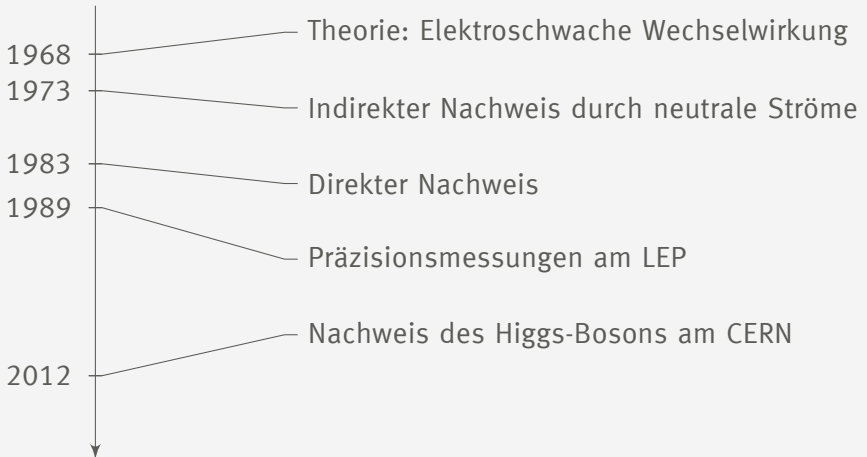


1984 Nobelpreis an Carlo Rubbia und Simon van der Meer [2]

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

Elektroschwache Vereinheitlichung

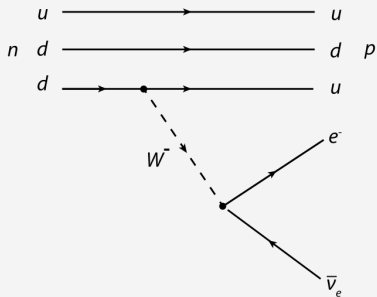
Schwacher Isospin

	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	+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

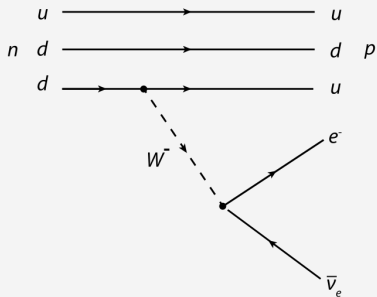
Schwacher Isospin



β^- -Zerfall[5]

Elektroschwache Vereinheitlichung

Schwacher Isospin

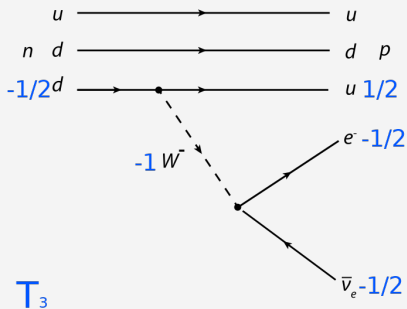


► T_3 soll erhalten bleiben

β^- -Zerfall[5]

Elektroschwache Vereinheitlichung

Schwacher Isospin



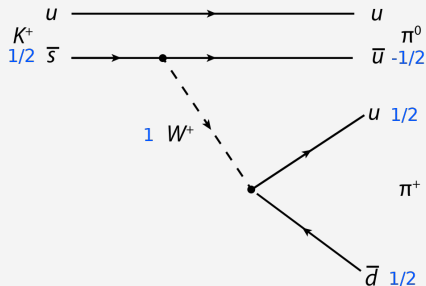
► T_3 soll erhalten bleiben

► $W^-: T_3 = -1$

β^- -Zerfall[5]

Elektroschwache Vereinheitlichung

Schwacher Isospin



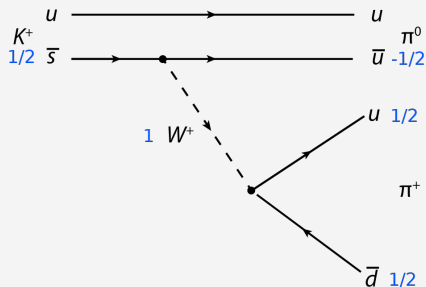
- ▶ T_3 soll erhalten bleiben
- ▶ $W^-: T_3 = -1$
- ▶ $W^+: T_3 = 1$

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 Z⁰ als orthogonale Linearkombination von B⁰ und W⁰:

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

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

- Indirekter Nachweis

- Erzeugung des Z^0 -Bosons

- Nachweis

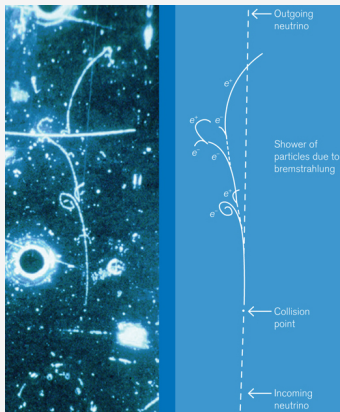
- Präzisionsmessungen

- Eigenschaften

- Anzahl Neutrinogenerationen

Zusammenfassung

Indirekter Nachweis des Z⁰-Bosons durch neutrale Ströme

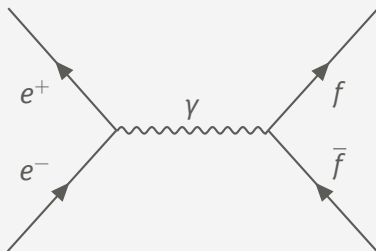


- ▶ Neutrinostrahl durch
 $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \bar{\nu}_\mu$
- ▶ Blasenkammer:
 $\bar{\nu}_\mu + e^- \xrightarrow{Z^0} \bar{\nu}_\mu + e^-$
- ▶ Elektron sendet
Bremsstrahlung aus
- ▶ e^-e^+ -Paarbildung \rightarrow
elektromagnetischer
Schauer

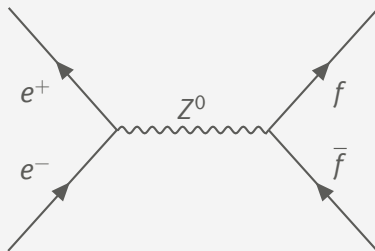
[6][7]

Erzeugung des Z^0 -Bosons

Feynmandiagramme zur Elektron-Positron-Annihilation



e^+e^- -Vernichtung über γ [8]



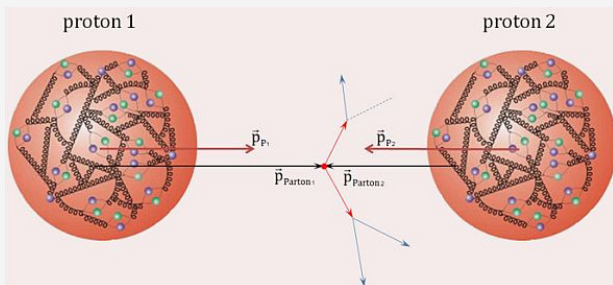
e^+e^- -Vernichtung über Z^0 [8]

→ **t**

Erzeugung des Z^0 -Bosons

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

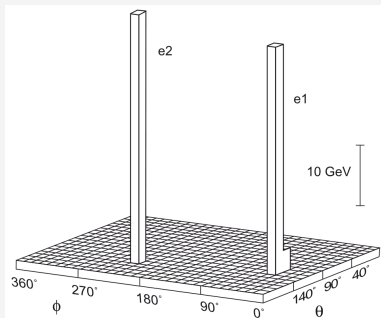
- ▶ $u + \bar{u} \rightarrow Z^0$: pp -Kollision benötigt $E_p \gtrapprox 600 \text{ GeV}$
- ▶ $u + \bar{u} \rightarrow Z^0$: $p\bar{p}$ -Kollision benötigt $E_p \gtrapprox 300 \text{ GeV}$



Proton-Proton-Kollision [9]

Nachweis

Entdeckung des Z^0 Bosons

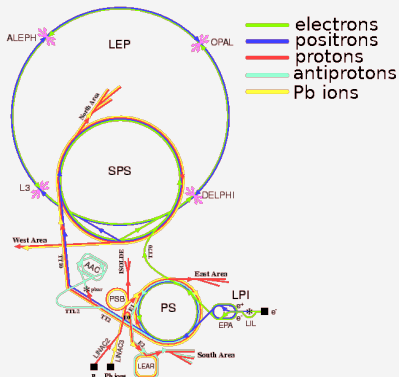


„Lego-Diagramm“ $q + \bar{q} \rightarrow Z^0 \rightarrow e^+ + e^-$ [4]

- ▶ 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 [10]

Präzisionsmessungen

am Large Electron-Positron Collider (LEP)

► LEP 1 (1989-1996)

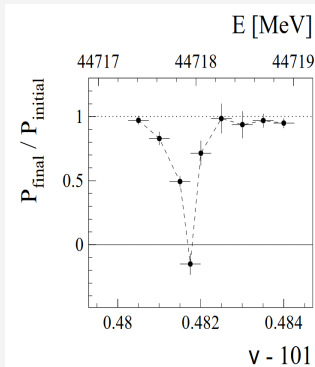
► $e^- + e^+ \rightarrow Z^0$: Schwerpunktsenergie $\sqrt{s} = 2E_e \approx M_Z c^2 \approx 91 \text{ GeV}$

► LEP 2 (1996-2000)

► $e^- + e^+ \rightarrow W^+ + W^-$: benötigt $2E_e \approx 2M_W c^2 \approx 160 \text{ GeV}$

Präzisionsmessungen

Energiekalibration



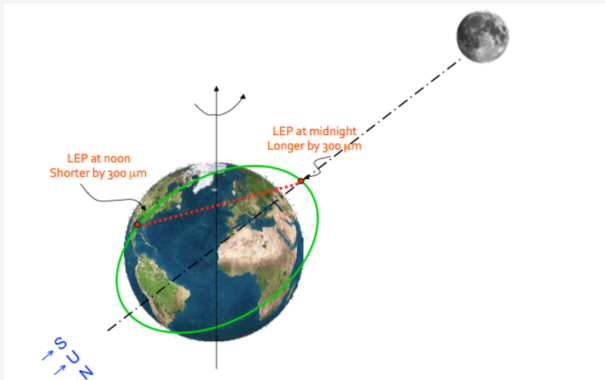
Relative Polarisation[11]

Resonante Spin Depolarisation:

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

Präzisionsmessungen

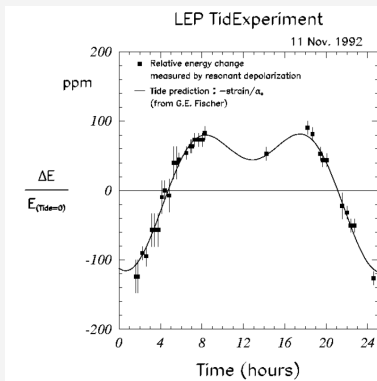
Einfluss auf Beschleuniger durch Gezeiten



LEP Ausdehnung[12]

Präzisionsmessungen

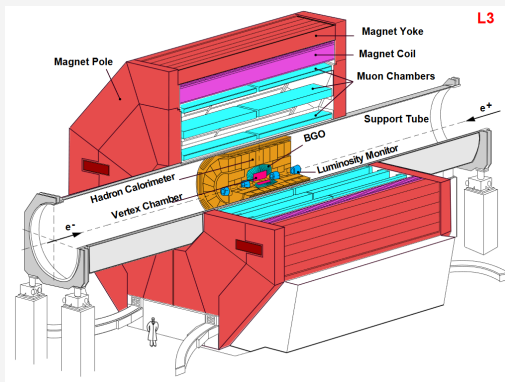
Einfluss auf Beschleuniger durch Gezeiten



Relative Strahlenergieänderung[13]

Präzisionsmessungen

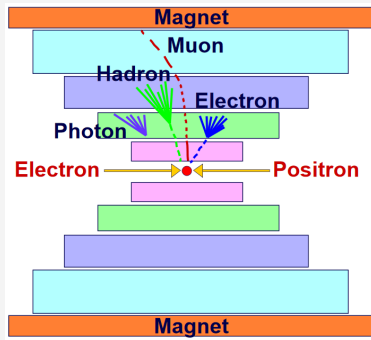
L3 Detektoraufbau am LEP



L3 Detektor [13]

Präzisionsmessungen

L3 Detektoraufbau am LEP



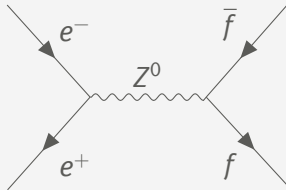
L3 Detektor [13]

Von Innen nach Außen:

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

Präzisionsmessungen

Z^0 -Zerfallskanäle



e^+e^- -Vernichtung über Z^0 [8]

► mögliche Zerfälle:

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

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

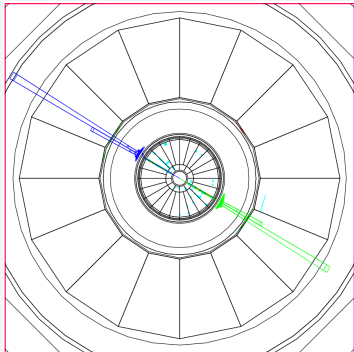
$$\tau^- + \tau^+$$

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

Hadronen

Präzisionsmessungen

L3 Detektor (1993 am LEP)

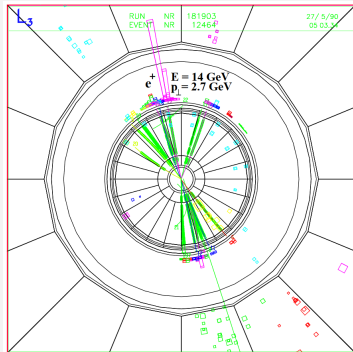


- ▶ Energiemessung im elm. Kalorimeter
- ▶ Entgegengesetzte Ausbreitung

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

Präzisionsmessungen

L3 Detektor (1993 am LEP)

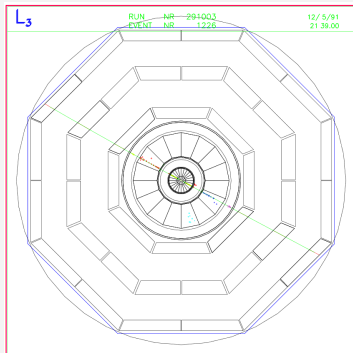


- ▶ Einzelnes Quark führt zu Quark-Antiquark-Paar Erzeugung, um isolierte Farbladung zu verhindern (Confinement)
- ▶ Reaktion äußert sich in hadronische Jets
- ▶ Energiemessung im Hadronischen Kalorimeter

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

Präzisionsmessungen

L3 Detektor (1993 am LEP)



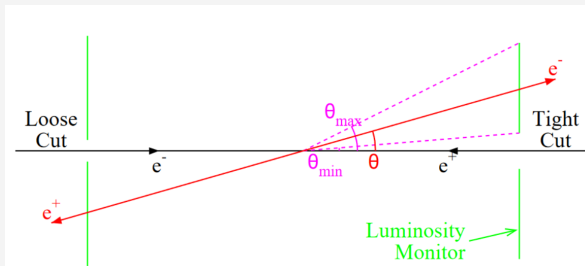
- ▶ Messung der Spur der Myonen durch mehrere Myonenkammern
- ▶ I.A. keine Absorption

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

Präzisionsmessungen

Luminosität

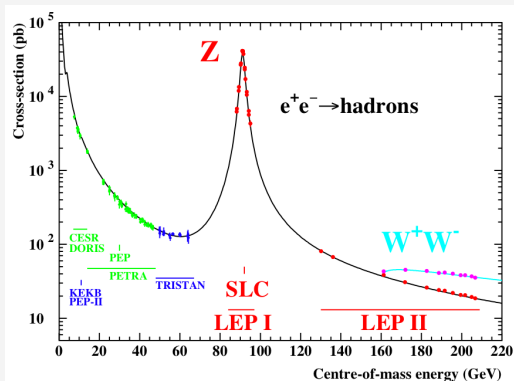
$$\sigma = \frac{N_{\text{sel}} - N_{\text{bg}}}{\epsilon_{\text{sel}} \mathcal{L}}$$



Bhabha Streuung [13]

Präzisionsmessungen

Z⁰-Resonanz bei ≈ 91 GeV



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

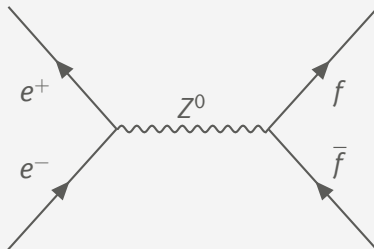
► Zerfall:

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

Anzahl Neutrino-Generationen

Wirkungsquerschnitt

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



Anzahl Neutrino generationen

Berechnung der Zerfallsbreite

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

Anzahl Neutrino generationen

Berechnung der Zerfallsbreite

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

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

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

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 Neutrinogenerationen

Berechnung der Zerfallsbreite

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

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

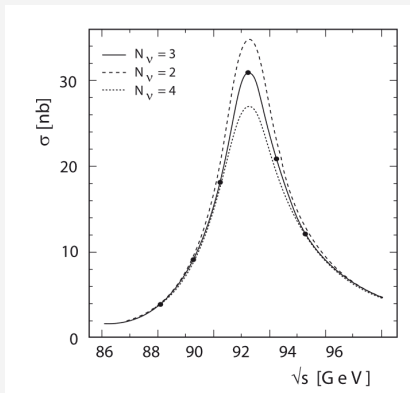
N_C : Anzahl der Farbladungen
 N_ν : Anzahl der Neutrinogenerationen
 G_F : Fermi-Kopplungskonstante
 Q_f : Ladung

Anzahl Neutrino generationen

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

- ▶ Schwache und Elektromagnetische Wechselwirkung lassen sich vereinheitlichen
- ▶ 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).



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).



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

Quellen III



International Masterclasses. URL:

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



The LEP Accelerator. URL:

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



L. Arnaudon u. a. „Accurate determination of the LEP beam energy by resonant depolarization“. In: Zeitschrift fr Physik C Particles and Fields 66.1-2 (März 1995), S. 45–62. DOI: 10.1007/bf01496579. URL: <https://doi.org/10.1007/bf01496579>.

Quellen IV



How is the beam energy calibrated through the resonant spin depolarization? URL: <http://tlep.web.cern.ch/content/how-beam-energy-calibrated-through-resonant-spin-depolarization> (besucht am 29. 11. 2018).



Versuch Z0-Resonanz. URL: https://www.physik.hu-berlin.de/de/eephys/teaching/lab/z0resonance/index_html (besucht am 25. 11. 2018).



The ALEPH Collaboration u. a. „Precision Electroweak Measurements on the Z Resonance“. In: (2005). DOI: [10.1016/j.physrep.2005.12.006](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?