

Z^0 -Resonanz

Alexander Neuwirth



Gliederung

Historischer Überblick

Theorie

Experimentelle Untersuchung

Zusammenfassung

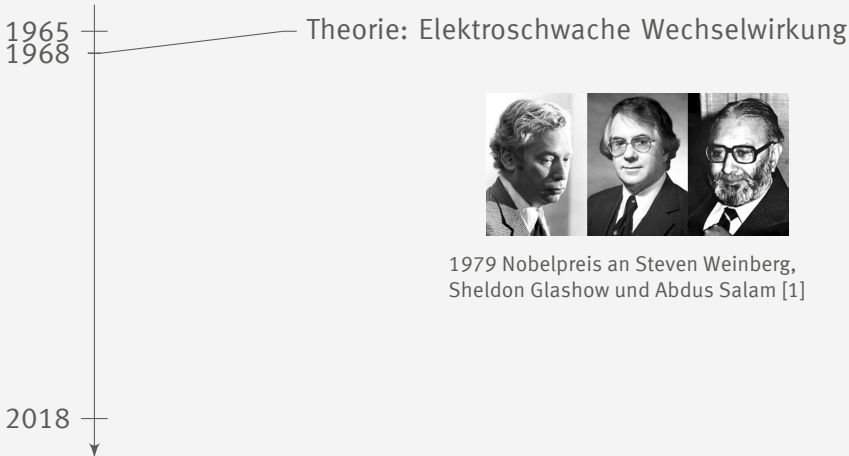
Historischer Überblick

Theorie

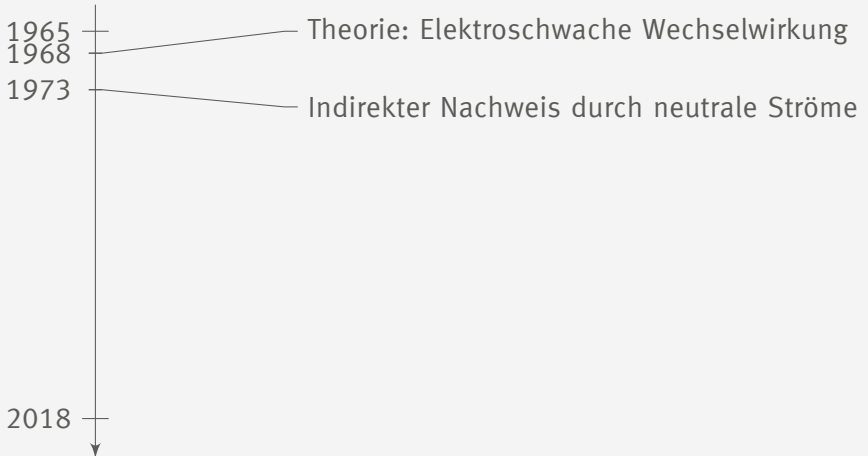
Experimentelle Untersuchung

Zusammenfassung

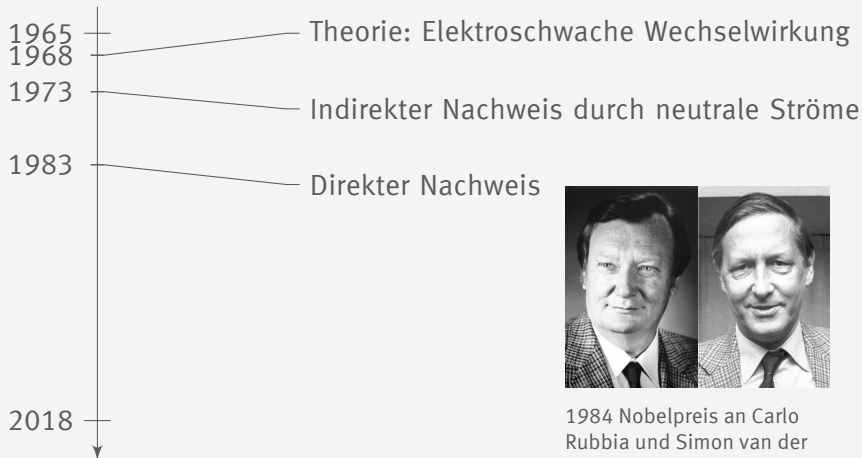
Historischer Überblick



Historischer Überblick

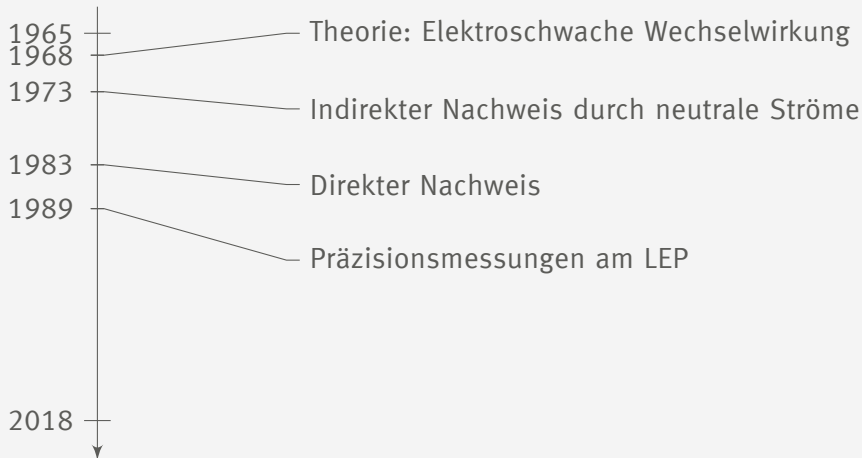


Historischer Überblick

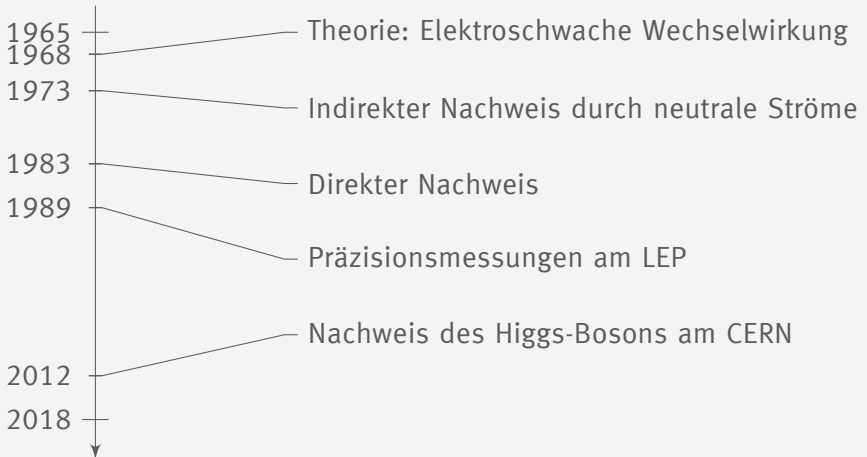


1984 Nobelpreis an Carlo Rubbia und Simon van der Meer [2]

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 $-\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ 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_e Elektron- Neutrino	<0,19 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ Myon- Neutrino	<18,2 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ Tau- Neutrino	91,2 GeV 0 1 Z⁰ Z Boson	
	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[±] W Boson	
Leptonen					

Eichbosonen

Z⁰-Boson:

- ▶ Halbwertszeit $t_{1/2} \approx 3 \cdot 10^{-25} \text{ s}$
- ▶ ungeladen
- ▶ eigenes Antiteilchen

Standardmodell[3]

Elektroschwache Vereinheitlichung

Austauschteilchen

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

Elektroschwache Vereinheitlichung

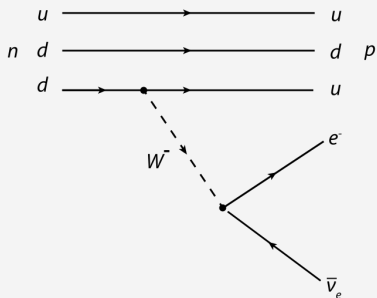
Schwacher Isospin

	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	+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

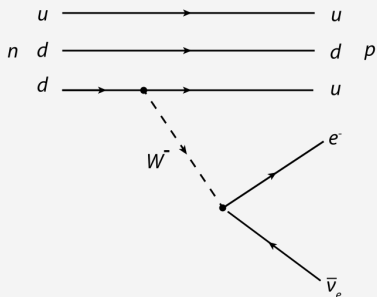
Schwacher Isospin



β^- -Zerfall[5]

Elektroschwache Vereinheitlichung

Schwacher Isospin

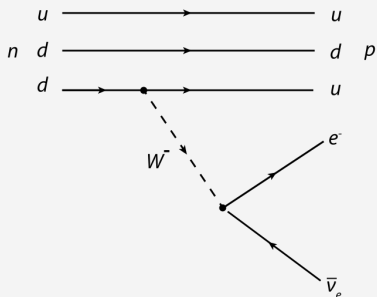


► T_3 soll erhalten bleiben

β^- -Zerfall[5]

Elektroschwache Vereinheitlichung

Schwacher Isospin



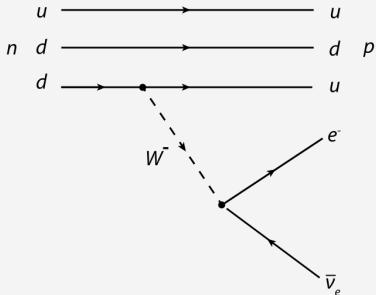
► T_3 soll erhalten bleiben

► $W^-: T_3 = -1$

β^- -Zerfall[5]

Elektroschwache Vereinheitlichung

Schwacher Isospin



▶ T_3 soll erhalten bleiben

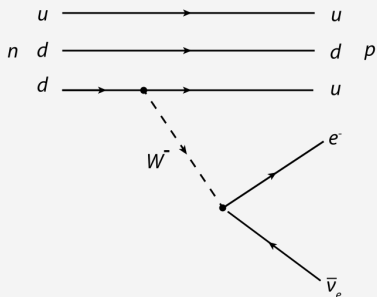
▶ $W^-: T_3 = -1$

▶ $W^+: T_3 = 1$

β^- -Zerfall[5]

Elektroschwache Vereinheitlichung

Schwacher Isospin



β^- -Zerfall[5]

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

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

Präzisionsmessungen

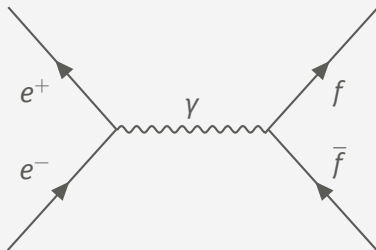
Eigenschaften

Anzahl Neutrinogenerationen

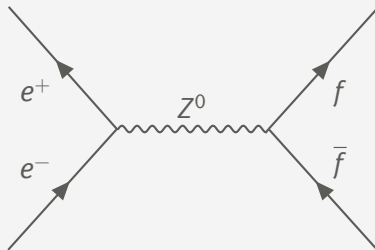
Zusammenfassung

Erzeugung

Feynman-Diagramme



e^+e^- -Vernichtung über γ [6]



e^+e^- -Vernichtung über Z^0 [6]

→ t

Erzeugung

► 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

► LEP

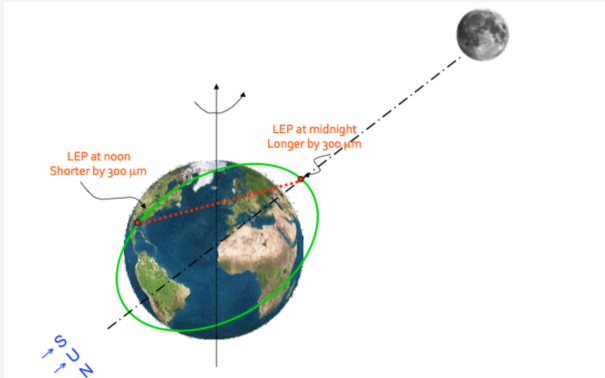
- $e^- + e^+ \rightarrow Z^0$: Schwerpunktsenergie $\sqrt{s} = 2E_e \geq M_Z c^2 \approx 91,6 \text{ GeV}$
- $e^+ + e^- \rightarrow W^+ + W^-$: benötigt $2E_e \geq 2M_W c^2 \approx 160,8 \text{ GeV}$

► 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 $E_p \gtrapprox 300 \text{ GeV}$

Erzeugung

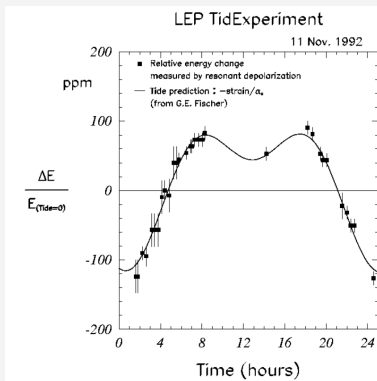
Einfluss auf Beschleuniger durch Gezeiten



LEP Ausdehnung[7]

Erzeugung

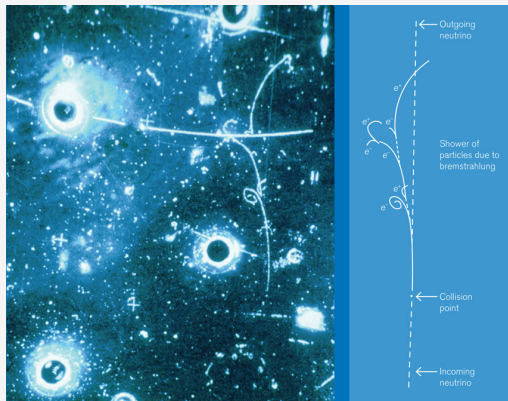
Einfluss auf Beschleuniger durch Gezeiten



Relative Strahlenergieänderung[8]

Nachweis

durch neutrale Ströme

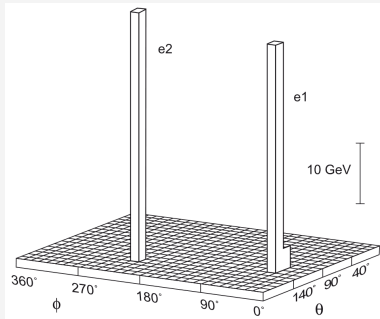


- ▶ Neutrinostrahl durch
 $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \bar{\nu}_\mu$
- ▶ Blasenkammer:
 $\bar{\nu}_\mu + e^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu + e^-$
- ▶ Elektron sendet
 Bremsstrahlung aus
- ▶ e^-e^+ -Paarbildung \rightarrow
 elektromagnetischer
 Schauer

[9][10]

Nachweis

Entdeckung des Z^0 Bosons

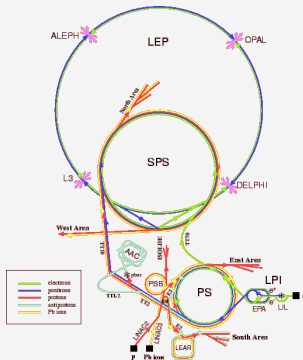


„Lego-Diagramm“ $q + \bar{q} \rightarrow Z^0 \rightarrow e^+ + e^-$ [4]

- ▶ 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

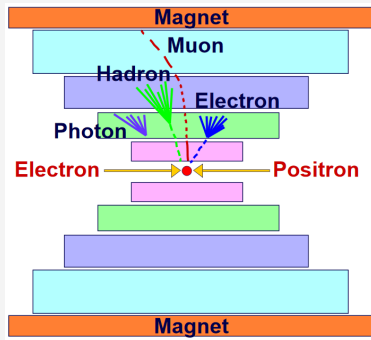
Large Electron Positron Collider (LEP, 1989-2000)



Beschleuniger am CERN 1996 [11]

Präzisionsmessungen

L3 Detektoraufbau am LEP



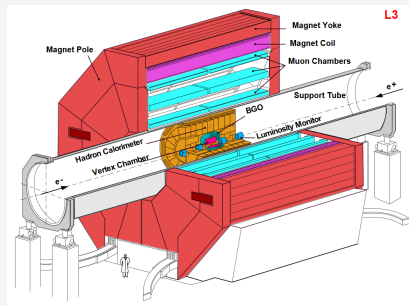
L3 Detektor [8]

Von Innen nach Außen:

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

Präzisionsmessungen

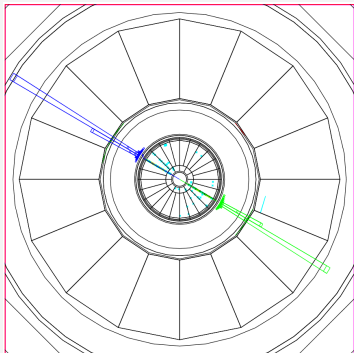
L3 Detektoraufbau am LEP



L3 Detektor [8]

Präzisionsmessungen

L3 Detektor (1993 am LEP)

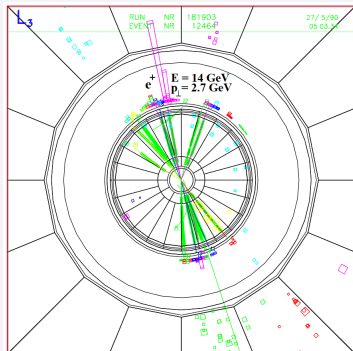


- ▶ Energiemessung im elm. Kalorimeter
- ▶ Entgegengesetzte Ausbreitung

$$e^- + e^+ \rightarrow Z^0 \rightarrow e^- + e^+ [8]$$

Präzisionsmessungen

L3 Detektor (1993 am LEP)

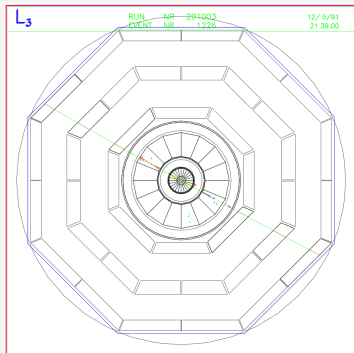


$e^- + e^+ \rightarrow Z^0 \rightarrow \text{hadronische Jets}$ [8]

- ▶ 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

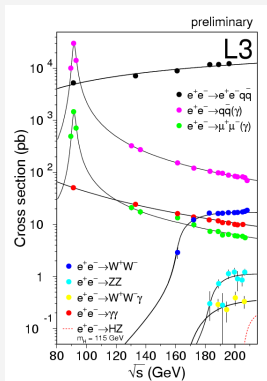
L3 Detektor (1993 am LEP)



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

$$e^- + e^+ \rightarrow Z^0 \rightarrow \mu^+ + \mu^- [8]$$

Präzisionsmessungen



► Z⁰ Resonanz bei $\approx 91 \text{ GeV}$

Wirkungsquerschnitte bei e^-e^+ Kollision [12]

Eigenschaften

Experimentelle Bestimmung

► Messung:

► $M_Z = 91,188(2) \text{ GeV}/c^2$

► $\Gamma_Z = 2,495(2) \text{ GeV}$

Eigenschaften

Experimentelle Bestimmung

► Messung:

► $M_Z = 91,188(2) \text{ GeV}/c^2$

► $\Gamma_Z = 2,495(2) \text{ GeV}$

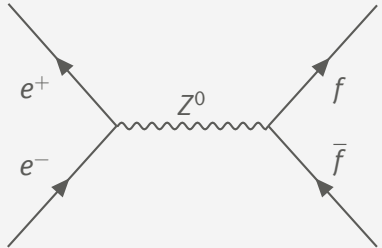
► Zerfall:

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

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



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 Neutrinogenerationen

Zerfallsbreite

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

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

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

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

Anzahl Neutrino generationen

Zerfallsbreite

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

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

Anzahl Neutrino generationen

Zerfallsbreite

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

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

Anzahl Neutrinogenerationen

Zerfallsbreite

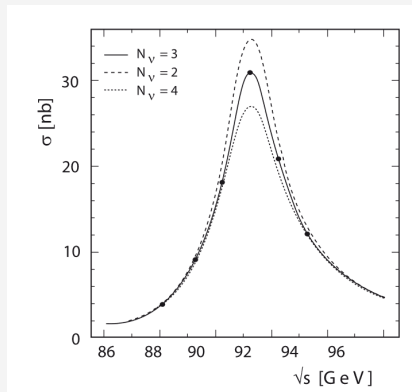
$$\begin{aligned}
 \Gamma_Z &= \sum_f \Gamma_{Z \rightarrow f\bar{f}} \\
 &= \Gamma_{u,c,d,s,b} + \Gamma_{e,\mu,\tau} + \Gamma_{\nu_e,\nu_\mu,\nu_\tau} \\
 &= N_C \cdot 2 \cdot \Gamma_u + N_C \cdot 3 \cdot \Gamma_d + 3 \cdot \Gamma_e + N_\nu \cdot \Gamma_\nu \\
 &= 3 \cdot 2 \cdot 94,9 \text{ MeV} +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

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
- ▶ 3 Neutrino-Generationen passen zu Messungen
- ▶ 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 $\Gamma_Z \approx 2,4 \text{ GeV}$
- ▶ 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).



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



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.



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).

Quellen III



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).



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).

Vielen Dank für eure Aufmerksamkeit!

Fragen?