

# $Z^0$ -Resonanz

Alexander Neuwirth



# Gliederung

Historischer Überblick zum  $Z^0$ -Boson

Theorie

Experimentelle Untersuchung

Zusammenfassung

# Historischer Überblick zum $Z^0$ -Boson

Theorie

Experimentelle Untersuchung

Zusammenfassung

# Historischer Überblick zum $Z^0$ -Boson

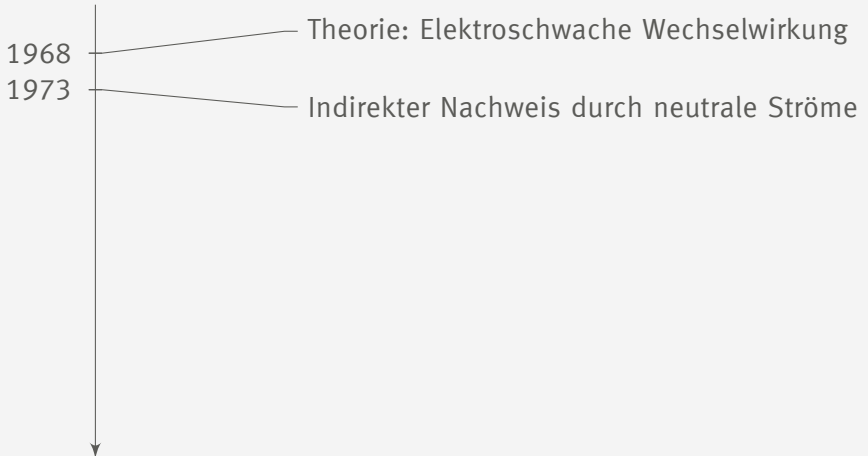
1968

Theorie: Elektroschwache Wechselwirkung

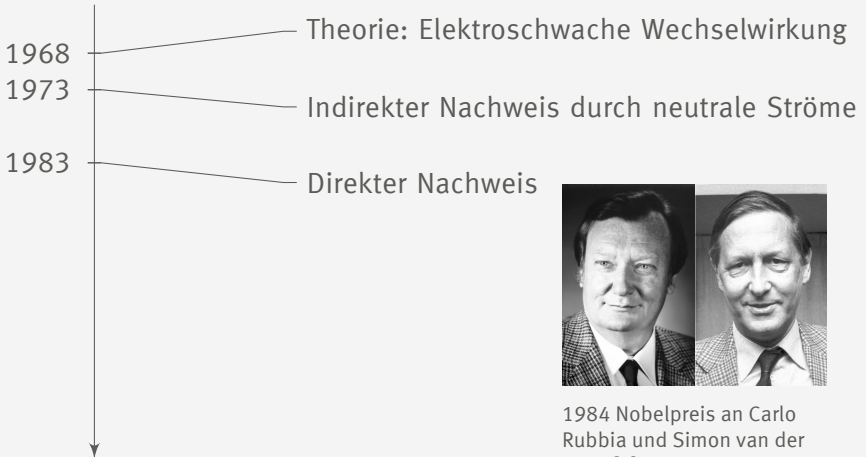


1979 Nobelpreis an Steven Weinberg,  
Sheldon Glashow und Abdus Salam [1]

# Historischer Überblick zum $Z^0$ -Boson

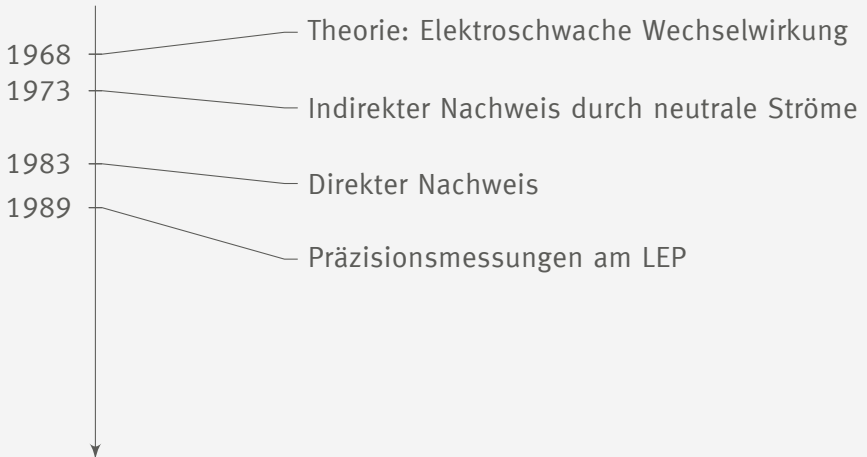


## Historischer Überblick zum $Z^0$ -Boson

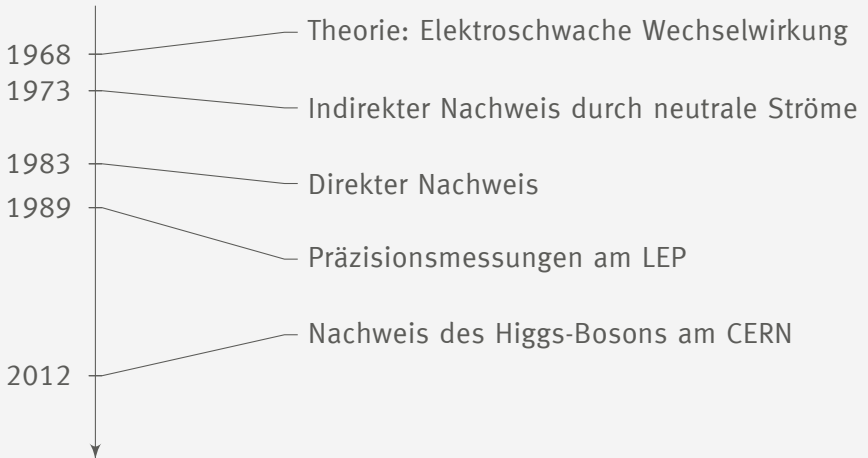


1984 Nobelpreis an Carlo Rubbia und Simon van der Meer [2]

## Historischer Überblick zum $Z^0$ -Boson



## Historischer Überblick zum $Z^0$ -Boson





## Historischer Überblick zum $Z^0$ -Boson

### 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	125,09 GeV
Ladung	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
Spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Name	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>Y</b> Photon
				<b>H</b> Higgs Boson
Quarks				
	4,8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>d</b> down	95 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>s</b> strange	4,18 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>b</b> bottom	0 $\frac{1}{2}$ <b>g</b> Gluon
	<2 eV 0 $\frac{1}{2}$ <b><math>\nu_e</math></b> Elektron-Neutrino	<0,19 MeV 0 $\frac{1}{2}$ <b><math>\nu_\mu</math></b> Myon-Neutrino	<18,2 MeV 0 $\frac{1}{2}$ <b><math>\nu_\tau</math></b> Tau-Neutrino	91,2 GeV 0 $\frac{1}{2}$ <b><math>Z^0</math></b> Z Boson
Leptonen				
	0,511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ <b>e</b> Elektron	105,7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ <b><math>\mu</math></b> Myon	1,777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ <b><math>\tau</math></b> Tau	80,4 GeV $\pm 1$ 1 <b><math>W^\pm</math></b> W Boson

Eichbosonen

$Z^0$ -Boson:

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

Standardmodell[3]

# Elektroschwache Vereinheitlichung

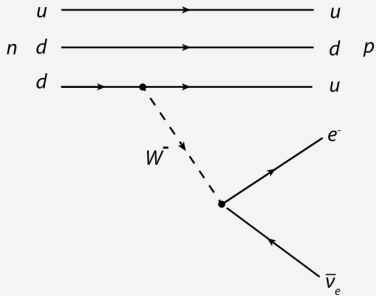
## Schwacher Isospin

	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	$\begin{matrix} +1/2 \\ -1/2 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 0 \\ -1 \end{matrix}$
	$e_R$	$\mu_R$	$\tau_R$	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

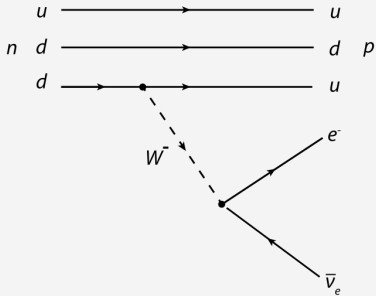
## Schwacher Isospin



$\beta^-$ -Zerfall[5]

# Elektroschwache Vereinheitlichung

## Schwacher Isospin

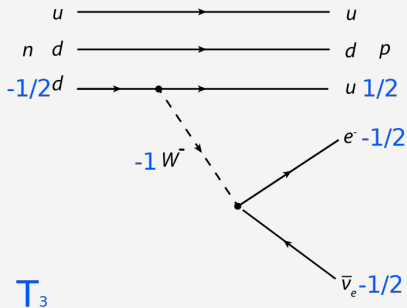


►  $T_3$  soll erhalten bleiben

$\beta^-$ -Zerfall[5]

# Elektroschwache Vereinheitlichung

## Schwacher Isospin



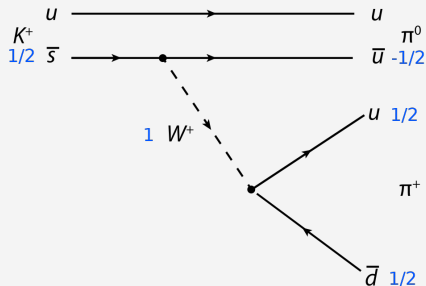
►  $T_3$  soll erhalten bleiben

►  $W^-: T_3 = -1$

$\beta^-$ -Zerfall[5]

# Elektroschwache Vereinheitlichung

## Schwacher Isospin



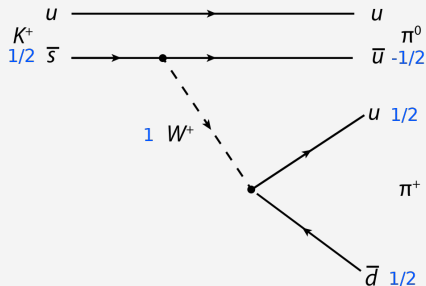
- ▶  $T_3$  soll erhalten bleiben
- ▶  $W^-: T_3 = -1$
- ▶  $W^+: T_3 = 1$

$T_3$

$K^+$ -Zerfall[5]

# Elektroschwache Vereinheitlichung

## Schwacher Isospin



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

$K^+$ -Zerfall[5]



# Elektroschwache Vereinheitlichung

► Photon und Z<sup>0</sup> als orthogonale Linearkombination von B<sup>0</sup> und W<sup>0</sup>:

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

# Elektroschwache Vereinheitlichung

► Photon und Z<sup>0</sup> als orthogonale Linearkombination von B<sup>0</sup> und W<sup>0</sup>:

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

► Weinbergwinkel:

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

# Elektroschwache Vereinheitlichung

- Photon und Z<sup>0</sup> als orthogonale Linearkombination von B<sup>0</sup> und W<sup>0</sup>:

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

- Weinbergwinkel:

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

- Gekoppelte Ladungen:

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

# Historischer Überblick zum $Z^0$ -Boson

## Theorie

## Experimentelle Untersuchung

- Indirekter Nachweis

- Erzeugung des  $Z^0$ -Bosons

- Nachweis

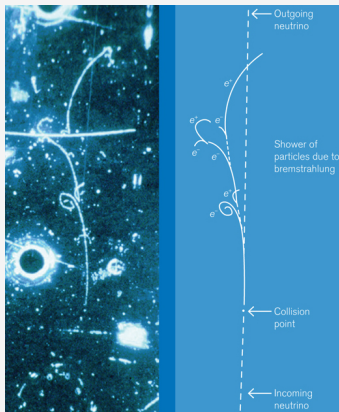
- Präzisionsmessungen

- Eigenschaften

- Anzahl Neutrinogenerationen

## Zusammenfassung

# Indirekter Nachweis des $Z^0$ -Bosons durch neutrale Ströme

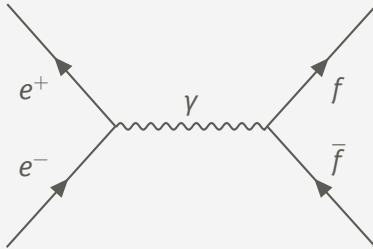


- ▶ Neutrinostrahl durch  
 $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \bar{\nu}_\mu$
- ▶ Blasenkammer:  
 $\bar{\nu}_\mu + e^- \xrightarrow{Z^0} \bar{\nu}_\mu + e^-$
- ▶ Elektron sendet  
Bremsstrahlung aus
- ▶  $e^-e^+$ -Paarbildung  $\rightarrow$   
elektromagnetischer  
Schauer

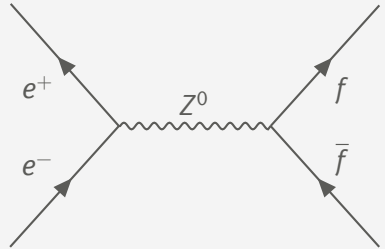
[6][7]

# Erzeugung des $Z^0$ -Bosons

## Feynmandiagramme zur Elektron-Positron-Annihilation



$e^+e^-$ -Vernichtung über  $\gamma$  [8]



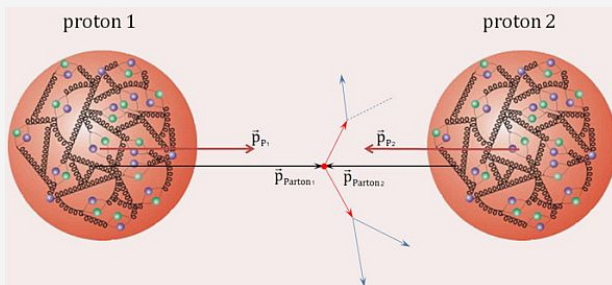
$e^+e^-$ -Vernichtung über  $Z^0$  [8]

→ t

# Erzeugung des $Z^0$ -Bosons

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

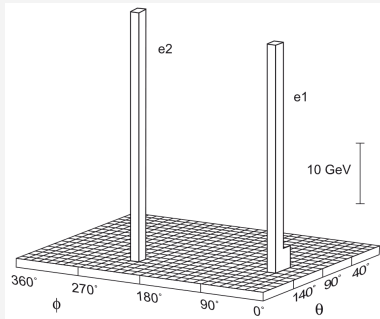
- ▶  $u + \bar{u} \rightarrow Z^0$ :  $pp$ -Kollision benötigt  $E_p \gtrapprox 600 \text{ GeV}$
- ▶  $u + \bar{u} \rightarrow Z^0$ :  $p\bar{p}$ -Kollision benötigt  $E_p \gtrapprox 300 \text{ GeV}$



Proton-Proton-Kollision [9]

# Nachweis

## Entdeckung des $Z^0$ Bosons



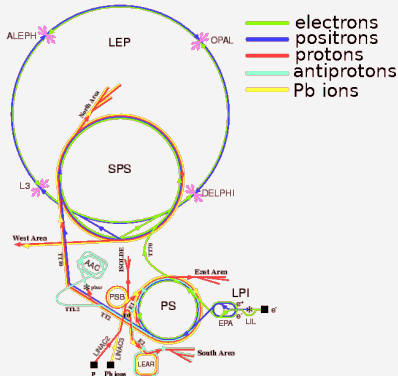
„Lego-Diagramm“  $q + \bar{q} \rightarrow Z^0 \rightarrow e^+ + e^-$  [4]

- ▶ 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)

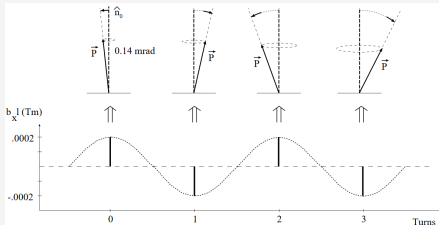
▶  $e^- + e^+ \rightarrow Z^0$ : Schwerpunktsenergie  $\sqrt{s} = 2E_e \approx M_Z c^2 \approx 91 \text{ GeV}$

▶ LEP 2 (1996-2000)

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

# Präzisionsmessungen

## Energiekalibration



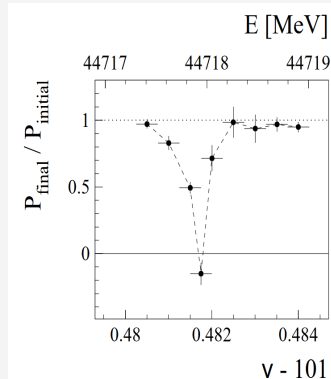
Spin Depolarisation[11]

Resonante Spin Depolarisation:

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

# Präzisionsmessungen

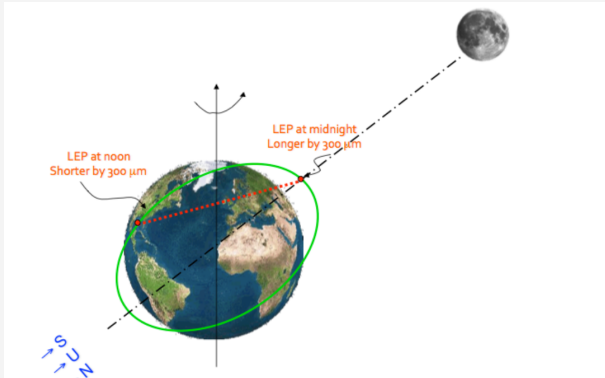
## Energiekalibration



Relative Polarisation[11]

# Präzisionsmessungen

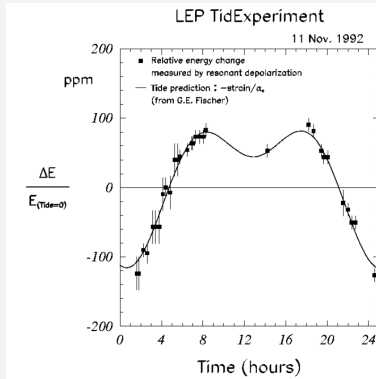
## Einfluss auf Beschleuniger durch Gezeiten



LEP Ausdehnung[12]

# Präzisionsmessungen

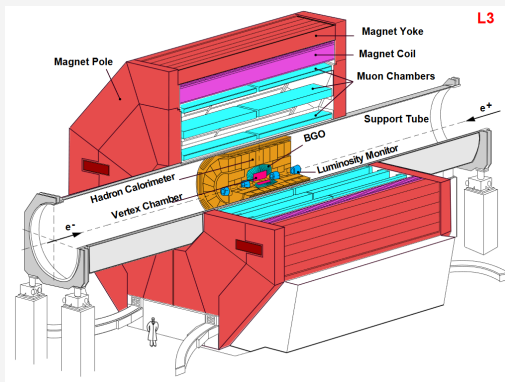
## Einfluss auf Beschleuniger durch Gezeiten



Relative Strahlenergieänderung[13]

# Präzisionsmessungen

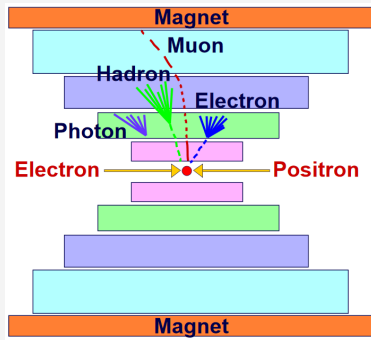
## L3 Detektoraufbau am LEP



L3 Detektor [13]

# Präzisionsmessungen

## L3 Detektoraufbau am LEP



L3 Detektor [13]

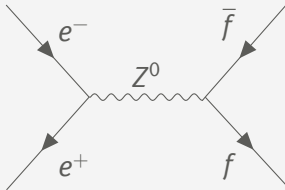
Von Innen nach Außen:

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



# Präzisionsmessungen

## $Z^0$ -Zerfallskanäle



$e^+e^-$ -Vernichtung über  $Z^0$  [8]

► mögliche Zerfälle:

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

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

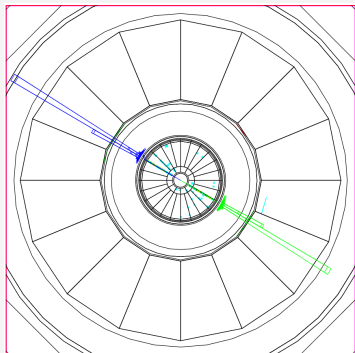
$$\tau^- + \tau^+$$

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

$$q + \bar{q}$$

# Präzisionsmessungen

## L3 Detektor (1993 am LEP)

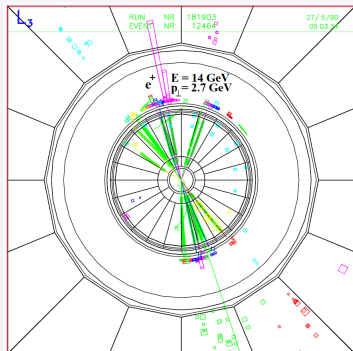


- ▶ Energiemessung im elm. Kalorimeter
- ▶ Entgegengesetzte Ausbreitung

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

# Präzisionsmessungen

## L3 Detektor (1993 am LEP)



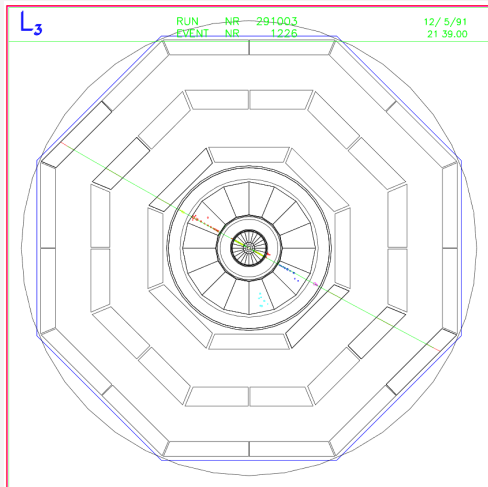
- ▶ Einzelnes Quark führt zu Quark-Antiquark-Paar Erzeugung, um isolierte Farbladung zu verhindern (Confinement)
- ▶ Reaktion äußert sich in hadronische Jets
- ▶ Energiemessung im Hadronischen Kalorimeter

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

# Präzisionsmessungen

## L3 Detektor (1993 am LEP)

- ▶ Messung der Spur der Myonen durch mehrere Myonenkammern
- ▶ kaum Absorption



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

# Präzisionsmessungen

## Luminosität

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

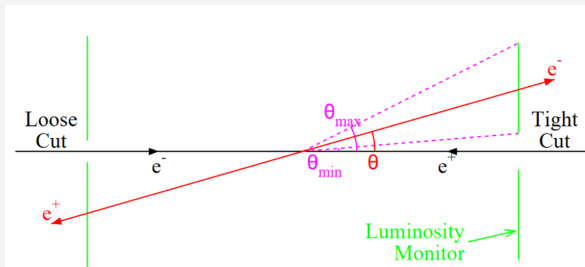
$\sigma$  : Wirkungsquerschnitt

$N_{\text{sel}}$  : Anzahl der Ereignisse

$N_{\text{bg}}$  : Hintergrundereignisse

$\epsilon_{\text{sel}}$  : Effizienz

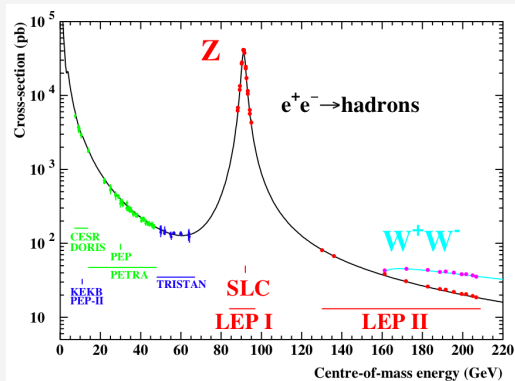
$\mathcal{L}$  : Integrierte Luminosität



Bhabha Streuung [13]

# Präzisionsmessungen

## $Z^0$ -Resonanz bei $\approx 91$ 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:

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

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

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

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

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



# Anzahl Neutrino-Generationen

## Wirkungsquerschnitt

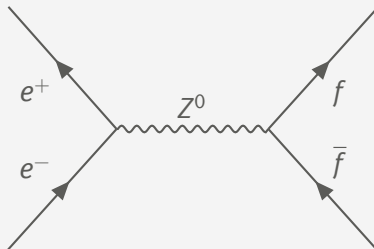
$$\sigma_f \propto \frac{s \cdot \Gamma_f \Gamma_e}{(s - M_Z^2)^2 + s^2 \Gamma_Z^2 / M_Z^2}$$

$\sigma_f$  : Wirkungsquerschnitt

$\sqrt{s}$  : Schwerpunktsenergie

$\Gamma_i$  : Partialbreite

$\Gamma_Z$  : Gesamtbreite



# 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

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

$$\Gamma_f = \frac{G_F M_Z^3}{24\sqrt{2}\pi} \cdot (1 + (1 - 4|Q_f| \sin^2 \theta_W)^2)$$

$N_C$  : Anzahl der Farbladungen

$N_\nu$  : Anzahl der Neutrino-generationen

$G_F$  : Fermi-Kopplungskonstante

$Q_f$  : Ladung

# Anzahl Neutrino-generationen

## Berechnung der Zerfallsbreite

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

$N_C$  : Anzahl der Farbladungen

$N_\nu$  : Anzahl der Neutrino-generationen

$G_F$  : Fermi-Kopplungskonstante

$Q_f$  : Ladung

# Anzahl Neutrino-generationen

## Berechnung der Zerfallsbreite

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

$$\Gamma_f = \frac{G_F M_Z^3}{24\sqrt{2}\pi} \cdot (1 + (1 - 4|Q_f| \sin^2 \theta_W)^2)$$

$N_C$  : Anzahl der Farbladungen

$N_\nu$  : Anzahl der Neutrino-generationen

$G_F$  : Fermi-Kopplungskonstante

$Q_f$  : Ladung

# Anzahl Neutrinogenerationen

## Berechnung der Zerfallsbreite

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

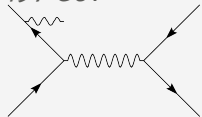
$$= \Gamma_{u,c,d,s,b} + \Gamma_{e,\mu,\tau} + \Gamma_{\nu_e,\nu_\mu,\nu_\tau}$$

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

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

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

Strahlungs-  
korrektur  $\rightarrow 2,497 \text{ GeV}$



$$\Gamma_f = \frac{G_F M_Z^3}{24\sqrt{2}\pi} \cdot (1 + (1 - 4|Q_f| \sin^2 \theta_W)^2)$$

$N_C$  : Anzahl der Farbladungen

$N_\nu$  : Anzahl der Neutrinogenerationen

$G_F$  : Fermi-Kopplungskonstante

$Q_f$  : Ladung

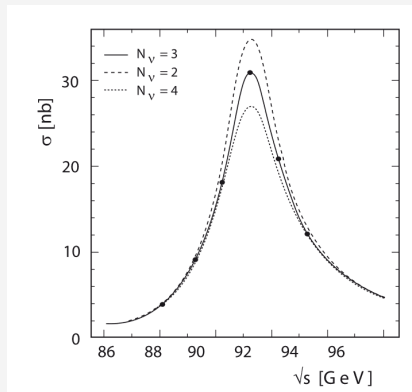
# Anzahl Neutrino generationen

## 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) %
$\Gamma_Z$	2,497 GeV	2,495(2) GeV



# Anzahl Neutrinogenerationen



- ▶ OPAL-Detektor am LEP
- ▶ Messung bestätigt vermutete 3 Neutrinogenerationen
- ▶ Beleg für 3 Generationen von Leptonen und Quarks

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

Historischer Überblick zum  $Z^0$ -Boson

Theorie

Experimentelle Untersuchung

Zusammenfassung

# Zusammenfassung

- ▶ Schwache und Elektromagnetische Wechselwirkung lassen sich vereinheitlichen
- ▶ Weinbergwinkel  $\cos \theta_W \approx 0.88$
- ▶ Zerfallsbreite des Z<sup>0</sup>-Bosons  $\Gamma_Z \approx 2,50 \text{ GeV}$
- ▶ Nachweis von 3 Neutrinogenerationen am LEP

## 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<sub>W</sub>echselwirkung. URL:

[https://de.wikipedia.org/wiki/Schwache\\_Wechselwirkung](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](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. eprint: [arXiv:hep-ex/0509008](https://arxiv.org/abs/hep-ex/0509008).

Vielen Dank für eure Aufmerksamkeit!

Fragen?