

Z^0 -Resonanz

Alexander Neuwirth



Gliederung

Historischer Überblick

Theorie

Experimentelle Untersuchung

Zusammenfassung

Historischer Überblick

Theorie

Experimentelle Untersuchung

Zusammenfassung

Historischer Überblick

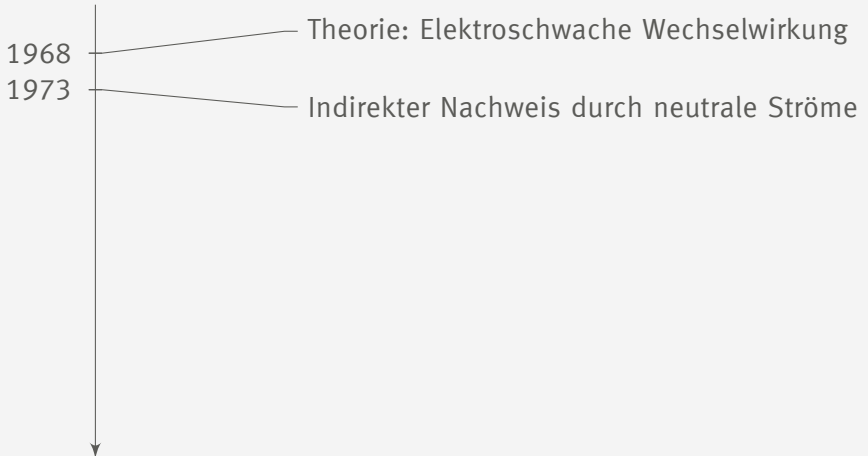
1968

Theorie: Elektroschwache Wechselwirkung

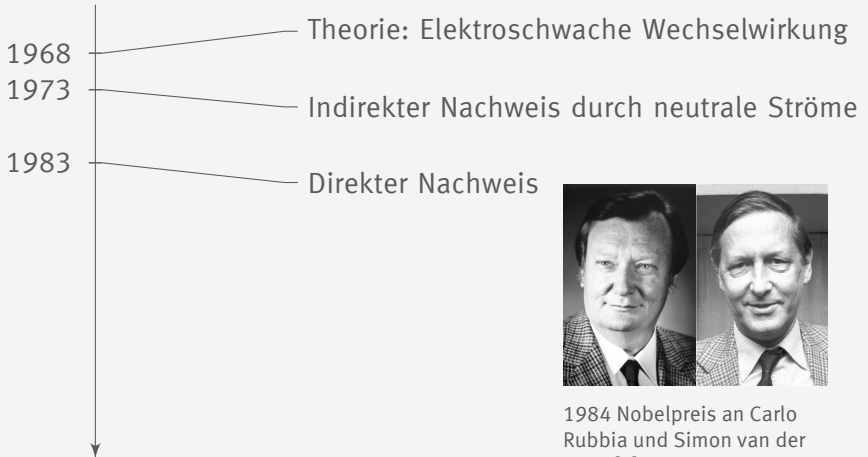


1979 Nobelpreis an Steven Weinberg,
Sheldon Glashow und Abdus Salam [1]

Historischer Überblick

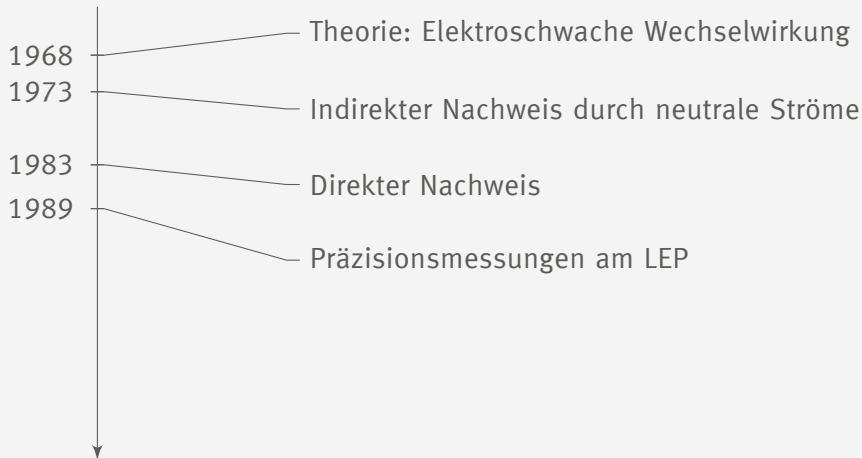


Historischer Überblick

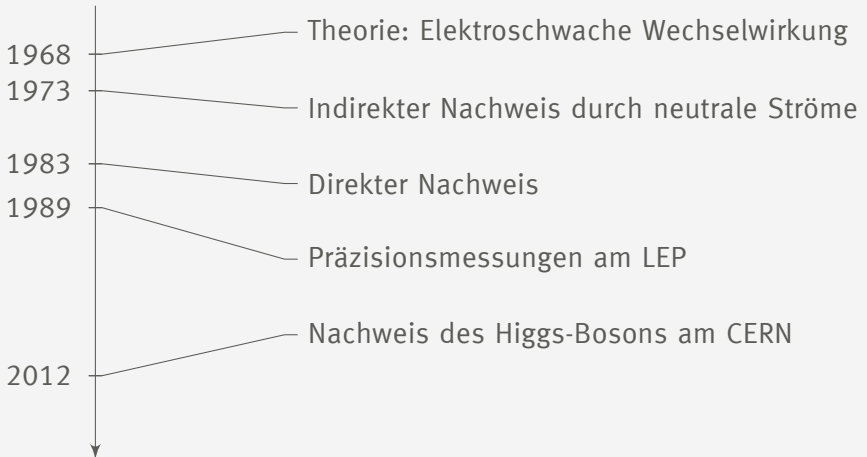


1984 Nobelpreis an Carlo Rubbia und Simon van der Meer [2]

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 | 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 | u up | c charm | t top | Y Photon |
| | | | | H Higgs Boson |
| Quarks | | | | |
| | 4,8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down | 95 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange | 4,18 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom | 0 $\frac{1}{2}$ 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 $\frac{1}{2}$ Z^0 Z Boson |
| Leptonen | | | | |
| | 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^\pm 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

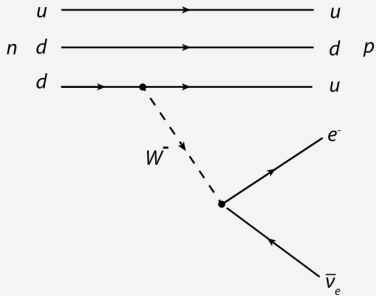
Schwacher Isospin

| | 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 | 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

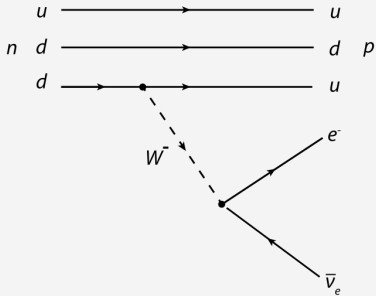
Schwacher Isospin



β^- -Zerfall[5]

Elektroschwache Vereinheitlichung

Schwacher Isospin

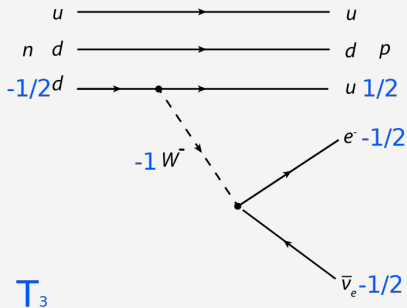


► T_3 soll erhalten bleiben

β^- -Zerfall[5]

Elektroschwache Vereinheitlichung

Schwacher Isospin



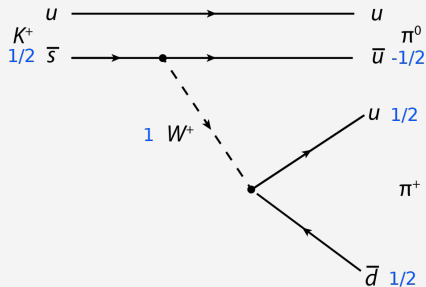
► T_3 soll erhalten bleiben

► $W^-: T_3 = -1$

β^- -Zerfall[5]

Elektroschwache Vereinheitlichung

Schwacher Isospin



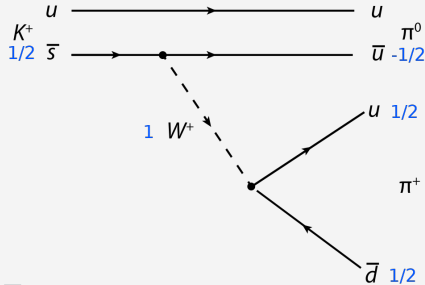
- ▶ T_3 soll erhalten bleiben
- ▶ $W^-: T_3 = -1$
- ▶ $W^+: T_3 = 1$

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

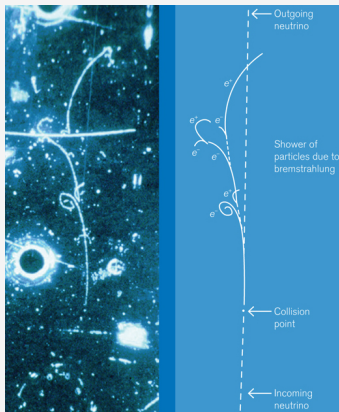
- Präzisionsmessungen

- Eigenschaften

- Anzahl Neutrinogenerationen

Zusammenfassung

Indirekter Nachweis des Z^0 -Bosons durch neutrale Ströme

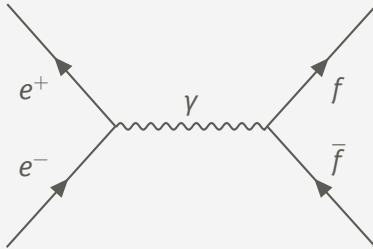


- ▶ Neutrinostrahl durch
 $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \bar{\nu}_\mu$
- ▶ Blasenkammer:
 $\bar{\nu}_\mu + e^- \xrightarrow{Z^0} \bar{\nu}_\mu + e^-$
- ▶ Elektron sendet
Bremsstrahlung aus
- ▶ e^-e^+ -Paarbildung \rightarrow
elektromagnetischer
Schauer

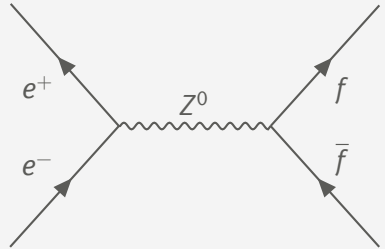
[6][7]

Erzeugung des Z^0 -Bosons

Feynmandiagramme zur Elektron-Positron-Annihilation



e^+e^- -Vernichtung über γ [8]



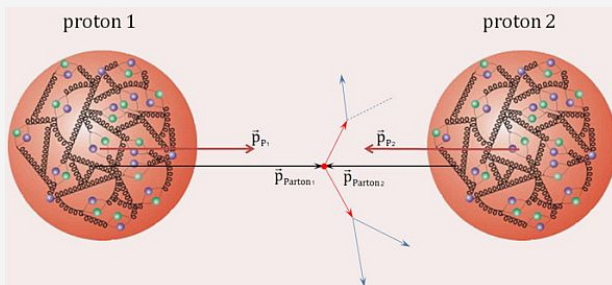
e^+e^- -Vernichtung über Z^0 [8]

→ t

Erzeugung des Z^0 -Bosons

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

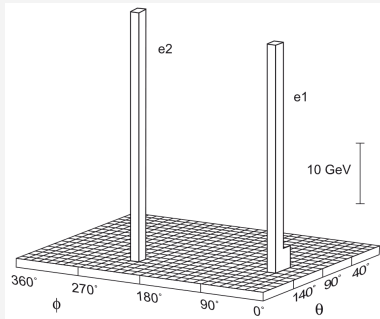
- ▶ $u + \bar{u} \rightarrow Z^0$: pp -Kollision benötigt $E_p \gtrapprox 600 \text{ GeV}$
- ▶ $u + \bar{u} \rightarrow Z^0$: $p\bar{p}$ -Kollision benötigt $E_p \gtrapprox 300 \text{ GeV}$



Proton-Proton-Kollision [9]

Nachweis

Entdeckung des Z^0 Bosons

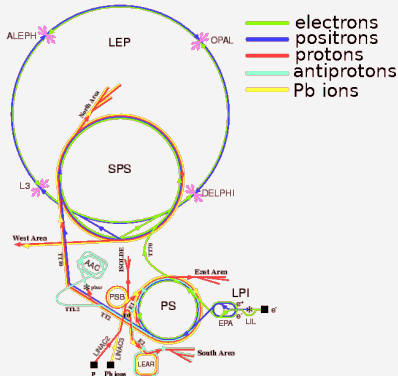


„Lego-Diagramm“ $q + \bar{q} \rightarrow Z^0 \rightarrow e^+ + e^-$ [4]

- ▶ 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)

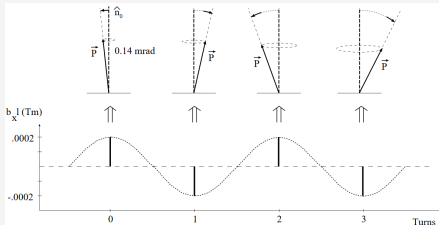
▶ $e^- + e^+ \rightarrow Z^0$: Schwerpunktsenergie $\sqrt{s} = 2E_e \approx M_Z c^2 \approx 91 \text{ GeV}$

▶ LEP 2 (1996-2000)

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

Präzisionsmessungen

Energiekalibration



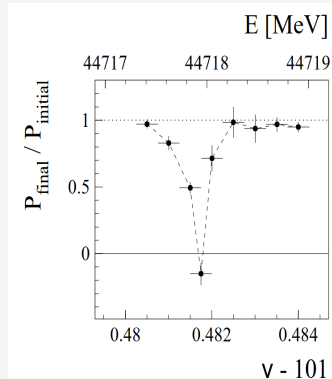
Spin Depolarisation[11]

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

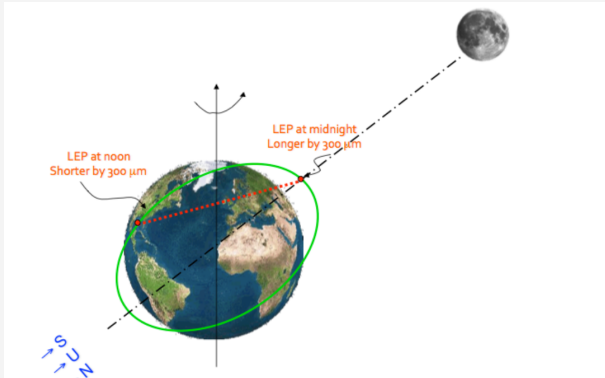
Energiekalibration



Relative Polarisation[11]

Präzisionsmessungen

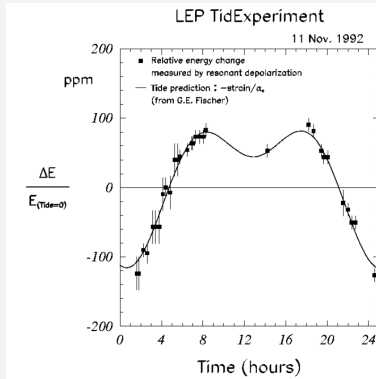
Einfluss auf Beschleuniger durch Gezeiten



LEP Ausdehnung[12]

Präzisionsmessungen

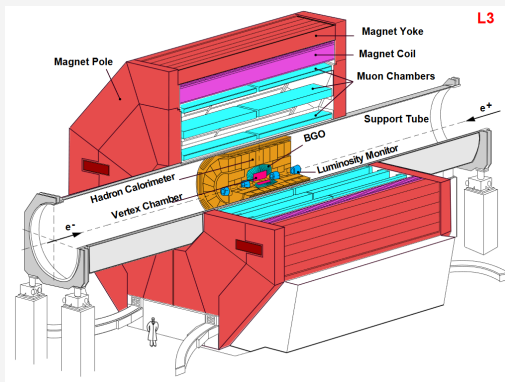
Einfluss auf Beschleuniger durch Gezeiten



Relative Strahlenergieänderung[13]

Präzisionsmessungen

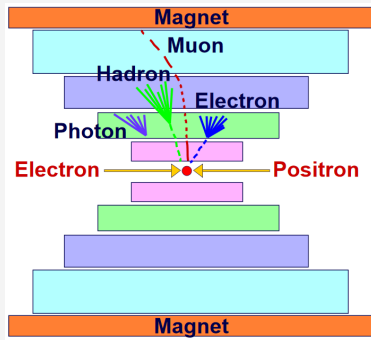
L3 Detektoraufbau am LEP



L3 Detektor [13]

Präzisionsmessungen

L3 Detektoraufbau am LEP



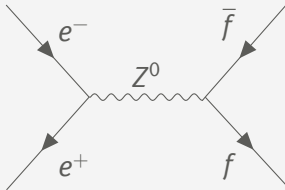
L3 Detektor [13]

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:

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

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

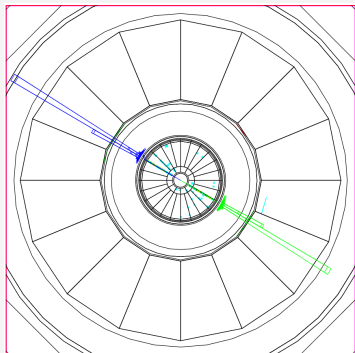
$$\tau^- + \tau^+$$

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

$$q + \bar{q}$$

Präzisionsmessungen

L3 Detektor (1993 am LEP)

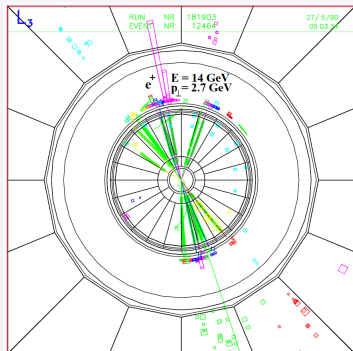


- ▶ Energiemessung im elm. Kalorimeter
- ▶ Entgegengesetzte Ausbreitung

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

Präzisionsmessungen

L3 Detektor (1993 am LEP)



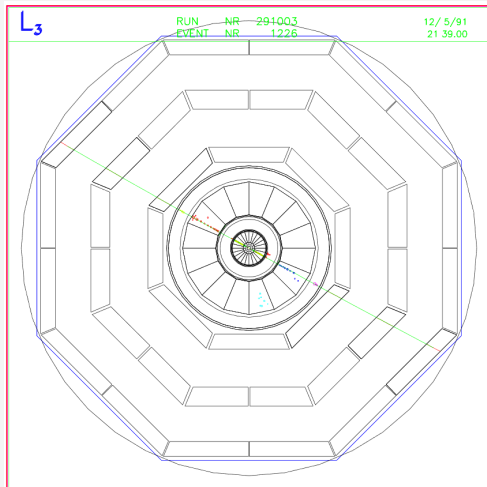
- ▶ Einzelnes Quark führt zu Quark-Antiquark-Paar Erzeugung, um isolierte Farbladung zu verhindern (Confinement)
- ▶ Reaktion äußert sich in hadronische Jets
- ▶ Energiemessung im Hadronischen Kalorimeter

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

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

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

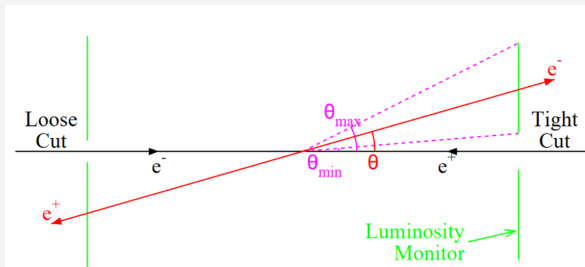
σ : Wirkungsquerschnitt

N_{sel} : Anzahl der Ereignisse

N_{bg} : Hintergrundereignisse

ϵ_{sel} : Effizienz

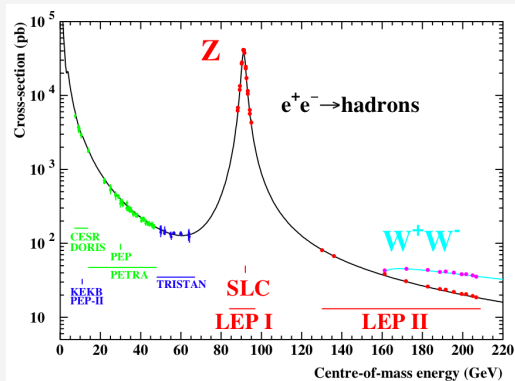
\mathcal{L} : Integrierte Luminosität



Bhabha Streuung [13]

Präzisionsmessungen

Z^0 -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:

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

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

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

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

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

Anzahl Neutrino-Generationen

Wirkungsquerschnitt

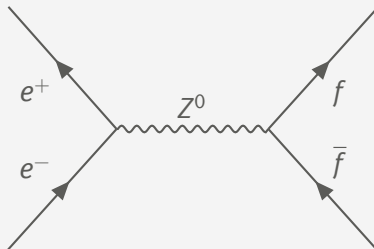
$$\sigma_f \propto \frac{s \cdot \Gamma_f \Gamma_e}{(s - M_Z^2)^2 + s^2 \Gamma_Z^2 / M_Z^2}$$

σ_f : Wirkungsquerschnitt

\sqrt{s} : Schwerpunktsenergie

Γ_i : Partialbreite

Γ_Z : Gesamtbreite



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

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

N_C : Anzahl der Farbladungen

N_ν : Anzahl der Neutrino-generationen

G_F : Fermi-Kopplungskonstante

Q_f : Ladung

Anzahl Neutrinogenerationen

Berechnung der Zerfallsbreite

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

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

N_C : Anzahl der Farbladungen

N_V : Anzahl der Neutrinogenerationen

G_F : Fermi-Kopplungskonstante

Q_f : Ladung

Anzahl Neutrino-Generationen

Berechnung der Zerfallsbreite

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

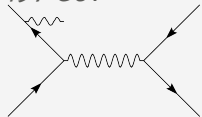
$$= \Gamma_{u,c,d,s,b} + \Gamma_{e,\mu,\tau} + \Gamma_{\nu_e,\nu_\mu,\nu_\tau}$$

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

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

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

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



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

N_C : Anzahl der Farbladungen

N_ν : Anzahl der Neutrino-Generationen

G_F : Fermi-Kopplungskonstante

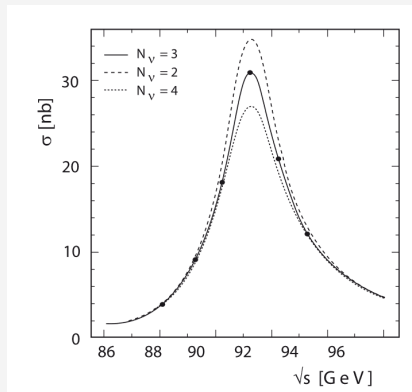
Q_f : Ladung

Anzahl Neutrino-generationen

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 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

Theorie

Experimentelle Untersuchung

Zusammenfassung

Zusammenfassung

- ▶ Schwache und Elektromagnetische Wechselwirkung lassen sich vereinheitlichen
- ▶ Weinbergwinkel $\cos \theta_W \approx 0.88$
- ▶ Zerfallsbreite des Z⁰-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_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. eprint: [arXiv:hep-ex/0509008](https://arxiv.org/abs/hep-ex/0509008).

Vielen Dank für eure Aufmerksamkeit!

Fragen?