WWU
MÜNSTER

Z^0-Resonanz

Alexander Neuwirth

wissen.leben

Gliederung

Historischer Überblick

Theorie

Experimentelle Untersuchung

Zusammenfassung

Historischer Überblick

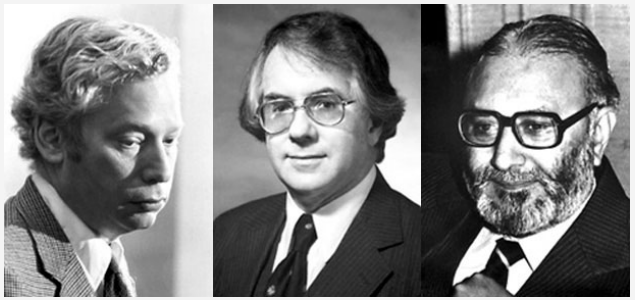
Theorie

Experimentelle Untersuchung

Zusammenfassung

Historischer Überblick

1965
1968 — Theorie: Elektroschwache Wechselwirkung



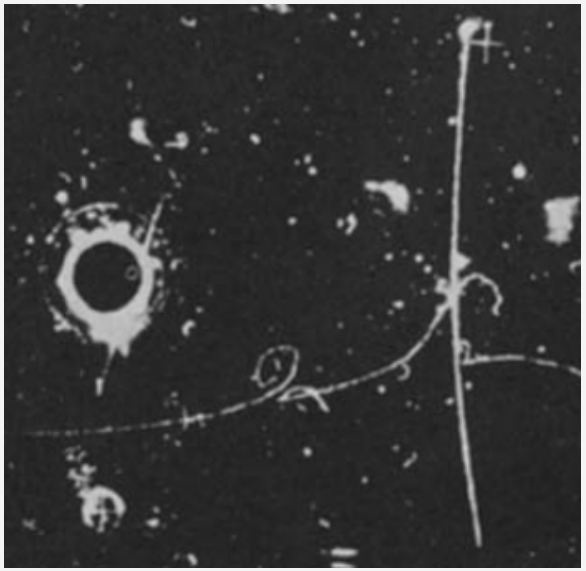
1979 Nobelpreis an Steven Weinberg,
Sheldon Glashow und Abdus Salam [1]

2018

Historischer Überblick

1965
1968 — Theorie: Elektroschwache Wechselwirkung

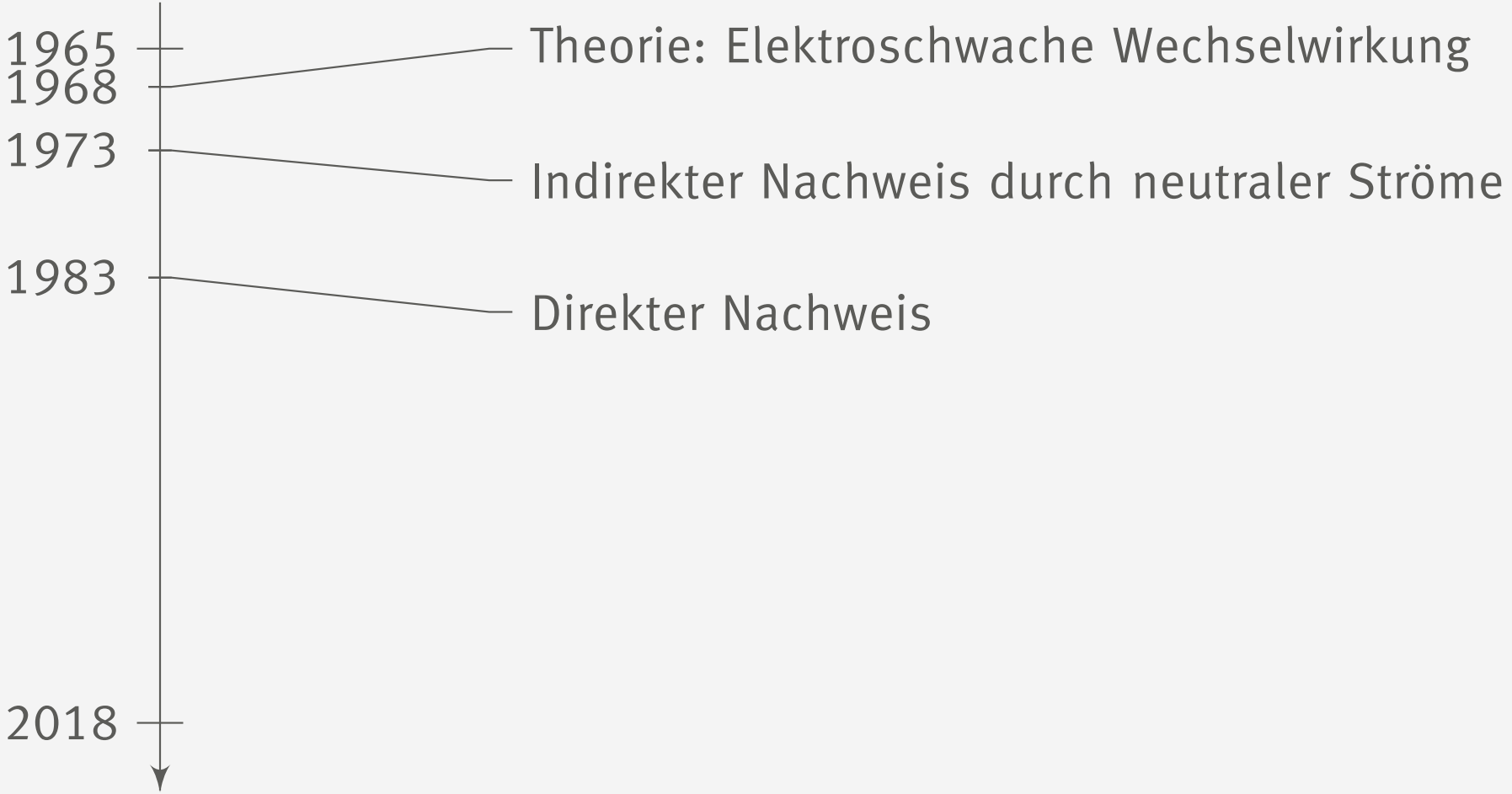
1973 — Indirekter Nachweis durch neutraler Ströme



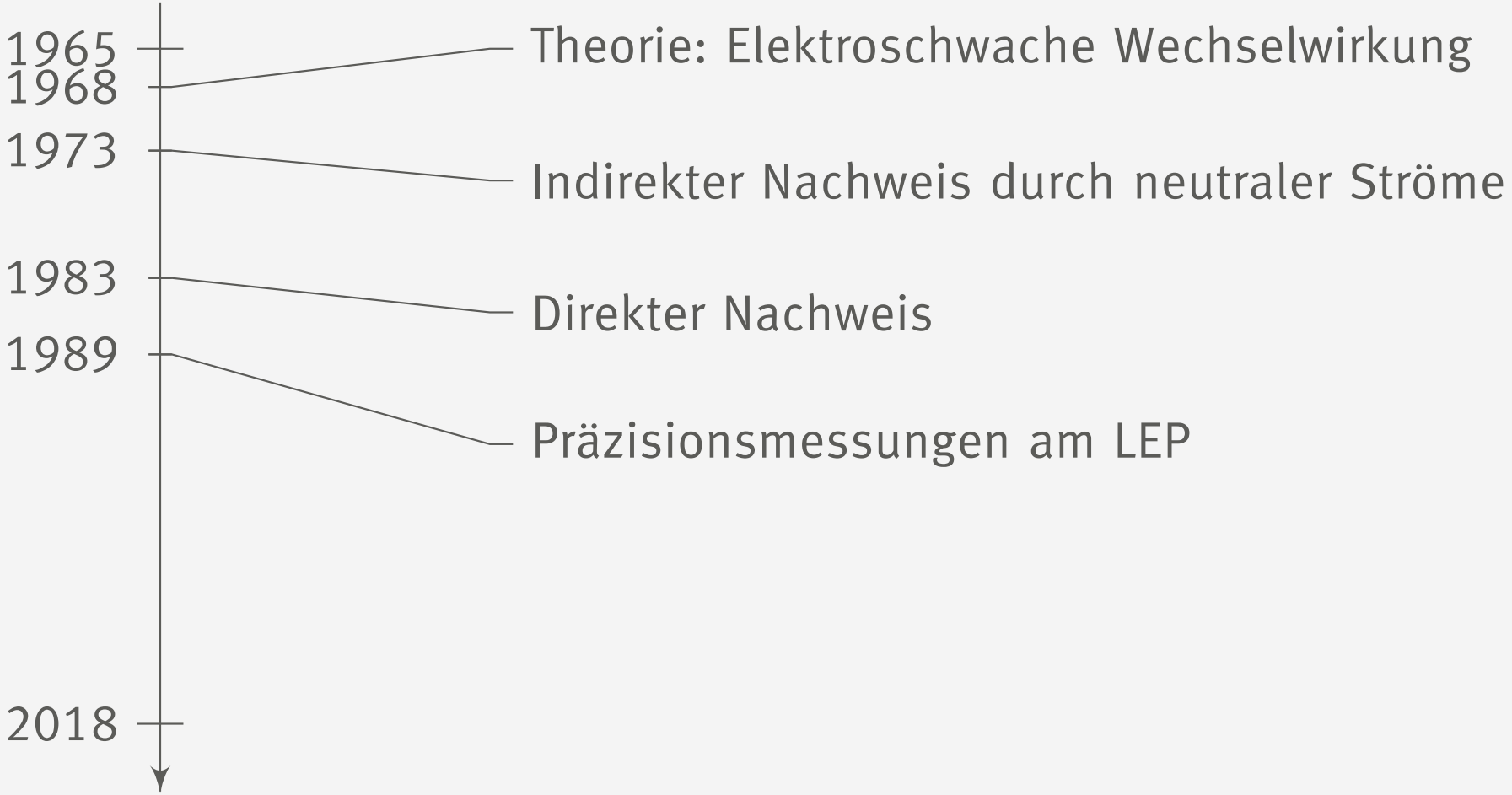
Blasenkammer:
$\bar{\nu}_\mu + e^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu + e^-$ [2]

2018

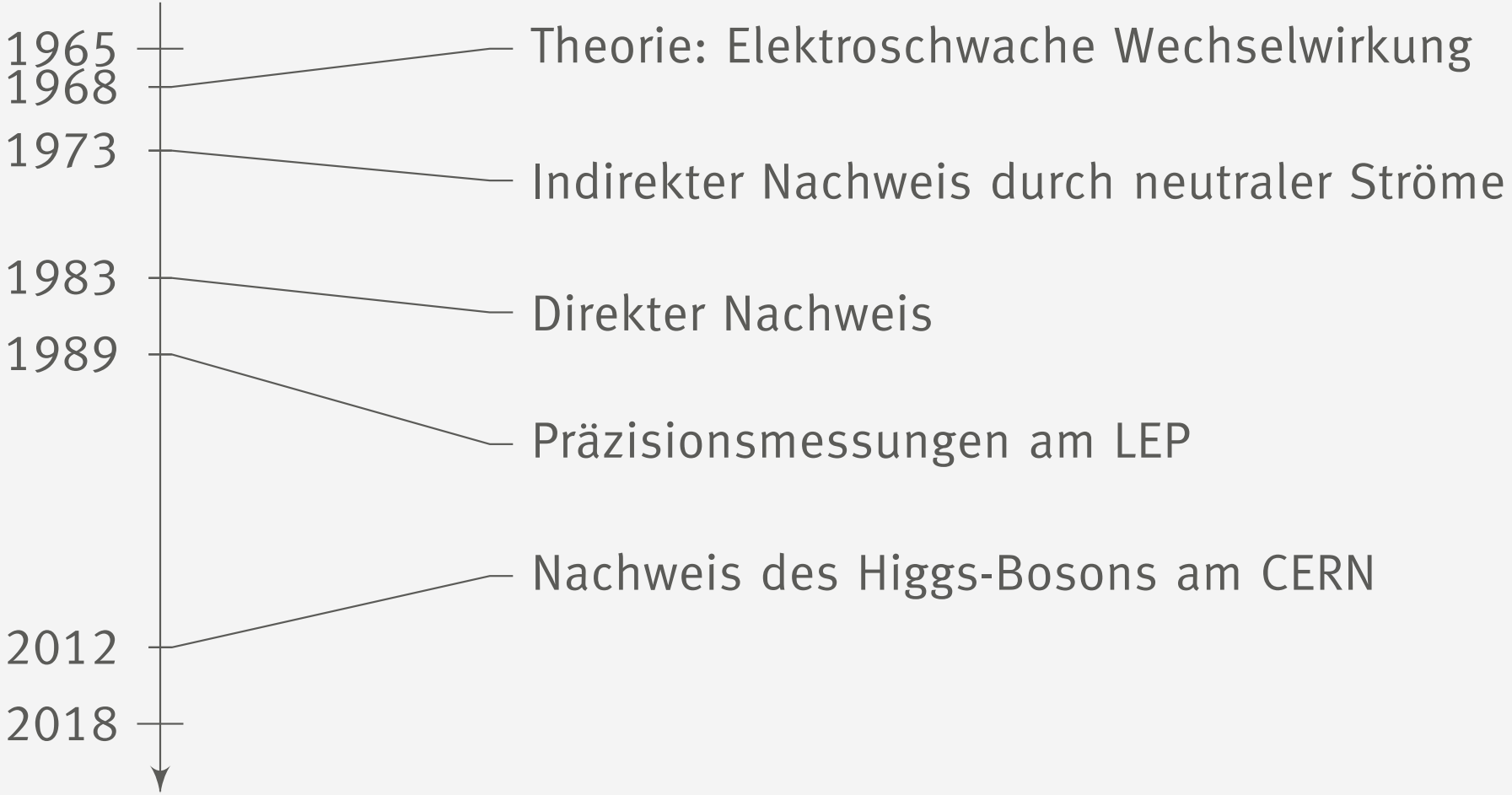
Historischer Überblick



Historischer Überblick



Historischer Überblick



Historischer Überblick

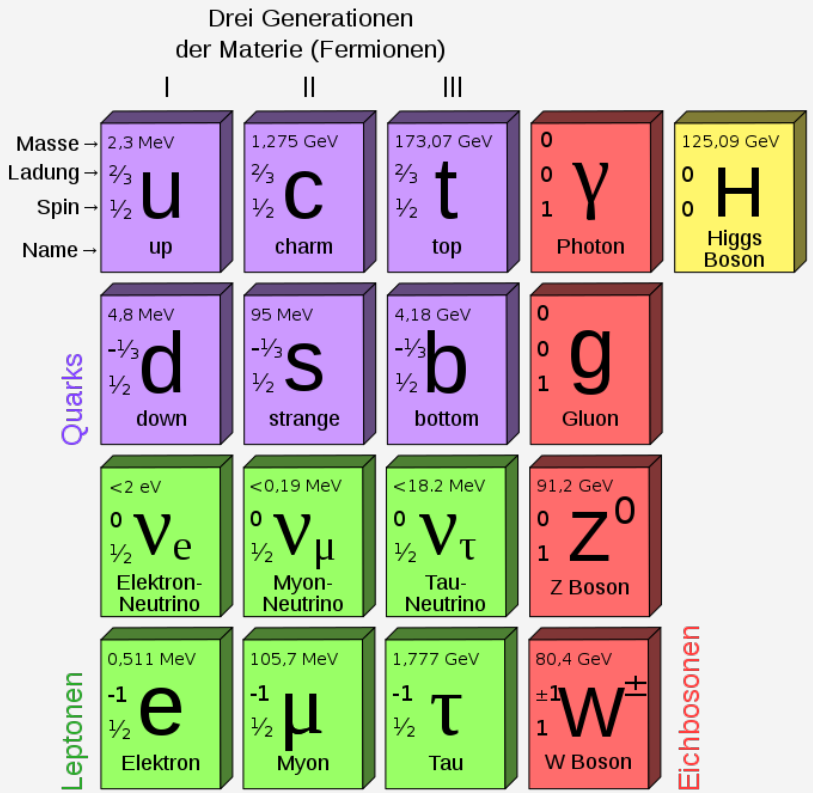
Theorie

- Einordnung im Standardmodell der Elementarteilchen
- Elektroschwache Vereinheitlichung

Experimentelle Untersuchung

Zusammenfassung

Einordnung im Standardmodell der Elementarteilchen



Standardmodell[3]

Elektroschwache Vereinheitlichung

Austauschteilchen

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

Elektroschwache Vereinheitlichung

Schwacher Isospin

	Fermionmultipletts	
Leptonen	$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}_L$ $\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}_L$ $\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}_L$ e_R μ_R τ_R	
Quarks	$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}_L$ $\begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}_L$ $\begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix}_L$ u_R c_R t_R d_R s_R b_R	

Schwacher Isospin[4]

Elektroschwache Vereinheitlichung

Schwacher Isospin

	Fermionmultipletts			T
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
	e_R	μ_R	τ_R	0
Quarks	$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix}_L$	1/2
	u_R	c_R	t_R	0
	d_R	s_R	b_R	0

Schwacher Isospin[4]

Elektroschwache Vereinheitlichung

Schwacher Isospin

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

Schwacher Isospin[4]

Elektroschwache Vereinheitlichung

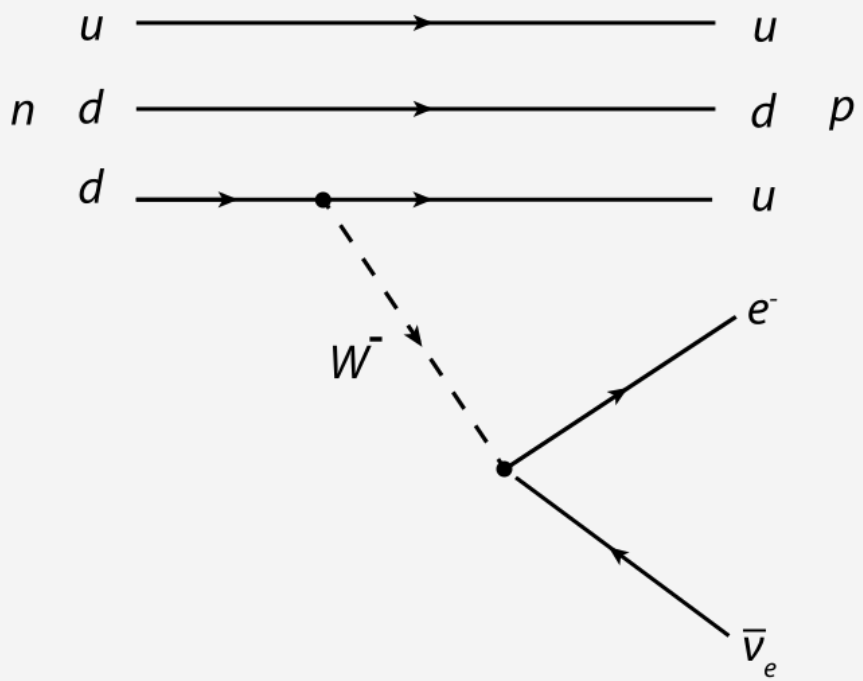
Schwacher Isospin

	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

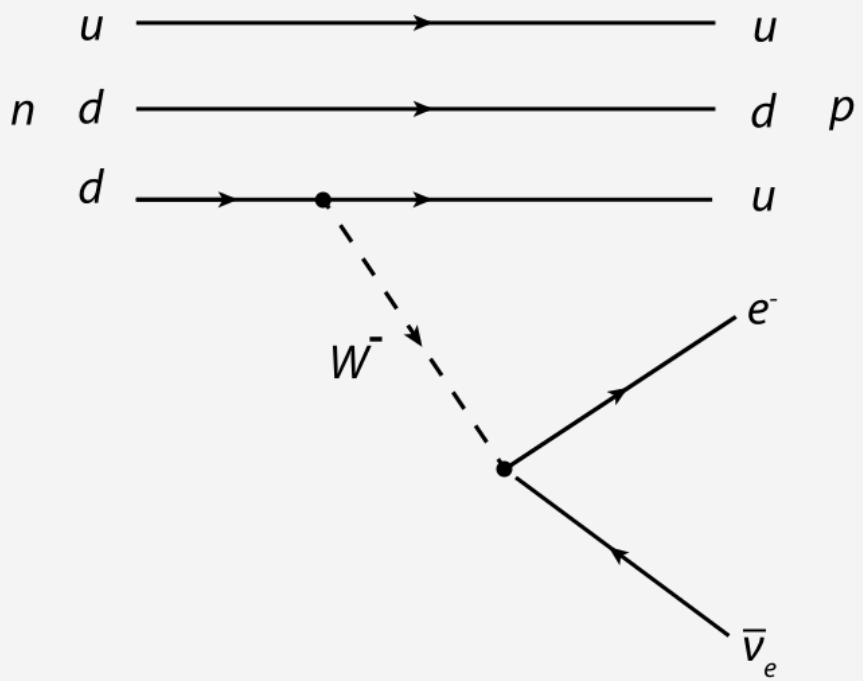


β^--Zerfall[5]

Elektroschwache Vereinheitlichung

Schwacher Isospin

- T_3 soll erhalten bleiben

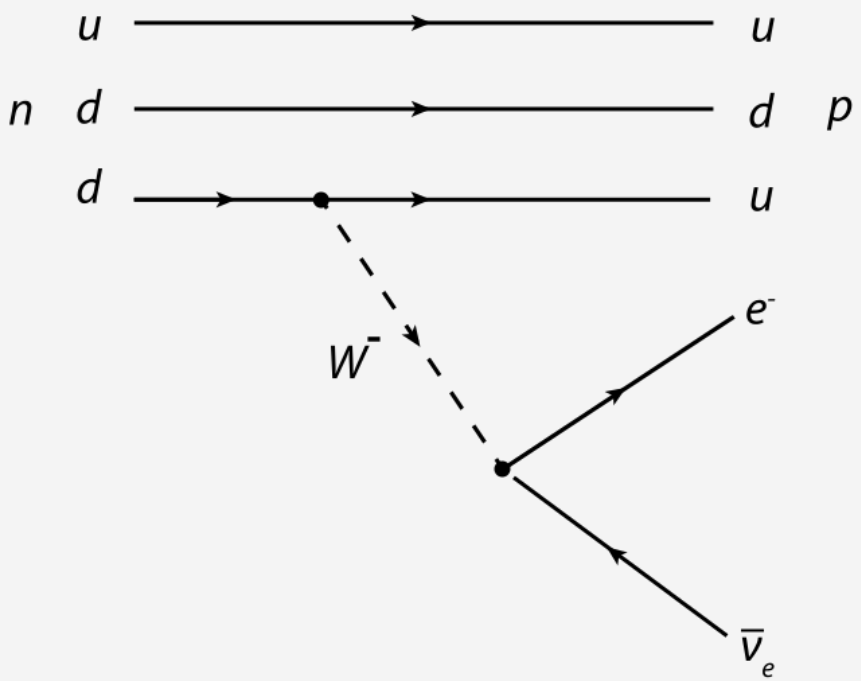


β^--Zerfall[5]

Elektroschwache Vereinheitlichung

Schwacher Isospin

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

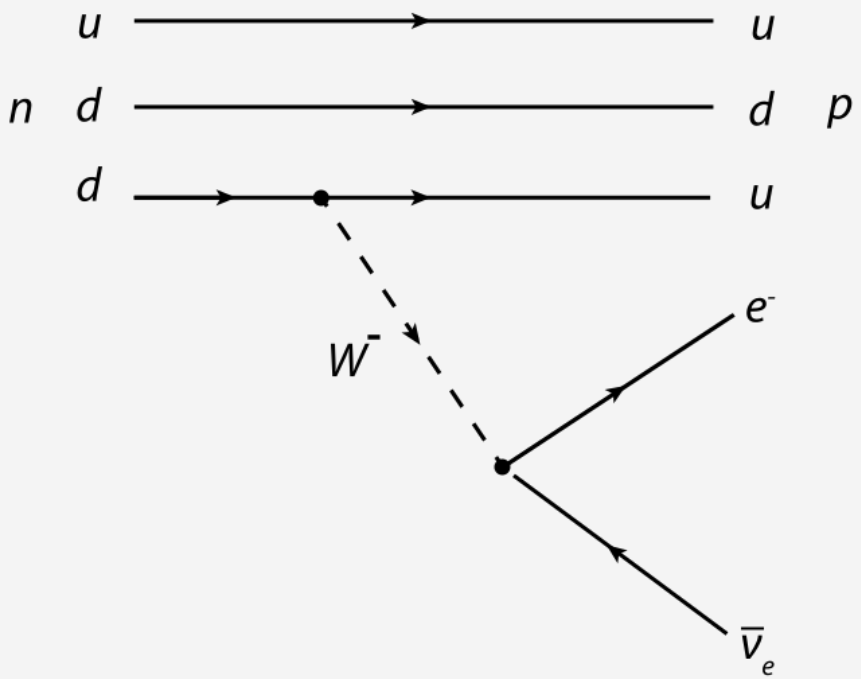


β^--Zerfall[5]

Elektroschwache Vereinheitlichung

Schwacher Isospin

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

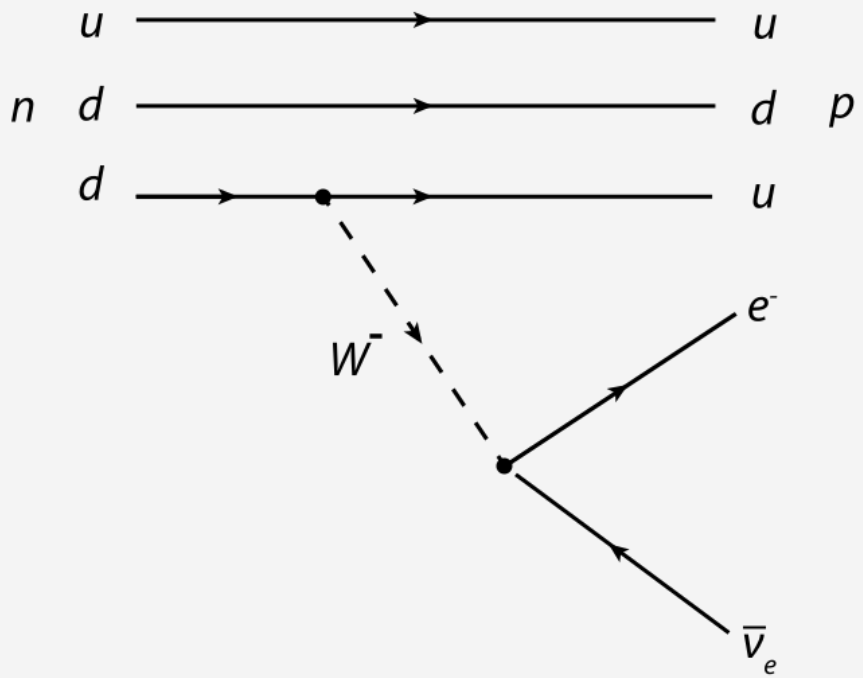


β^--Zerfall[5]

Elektroschwache Vereinheitlichung

Schwacher Isospin

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



β^--Zerfall[5]

Elektroschwache Vereinheitlichung

- Photon und Z^0 als orthogonale Linearkombination von B^0 und W^0:

$$|\gamma\rangle = +\cos\theta_W \left|B^0\right\rangle + \sin\theta_W \left|W^0\right\rangle$$
$$\left|Z^0\right\rangle = -\sin\theta_W \left|B^0\right\rangle + \cos\theta_W \left|W^0\right\rangle$$

Elektroschwache Vereinheitlichung

- Photon und Z^0 als orthogonale Linearkombination von B^0 und W^0:

$$|\gamma\rangle = +\cos\theta_W \left|B^0\right\rangle + \sin\theta_W \left|W^0\right\rangle$$
$$\left|Z^0\right\rangle = -\sin\theta_W \left|B^0\right\rangle + \cos\theta_W \left|W^0\right\rangle$$

- Weinbergwinkel:

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

Elektroschwache Vereinheitlichung

- Photon und Z^0 als orthogonale Linearkombination von B^0 und W^0:

$$|\gamma\rangle = +\cos\theta_W \left|B^0\right\rangle + \sin\theta_W \left|W^0\right\rangle$$
$$\left|Z^0\right\rangle = -\sin\theta_W \left|B^0\right\rangle + \cos\theta_W \left|W^0\right\rangle$$

- Weinbergwinkel:

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

- Gekoppelte Ladungen:

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

Historischer Überblick

Theorie

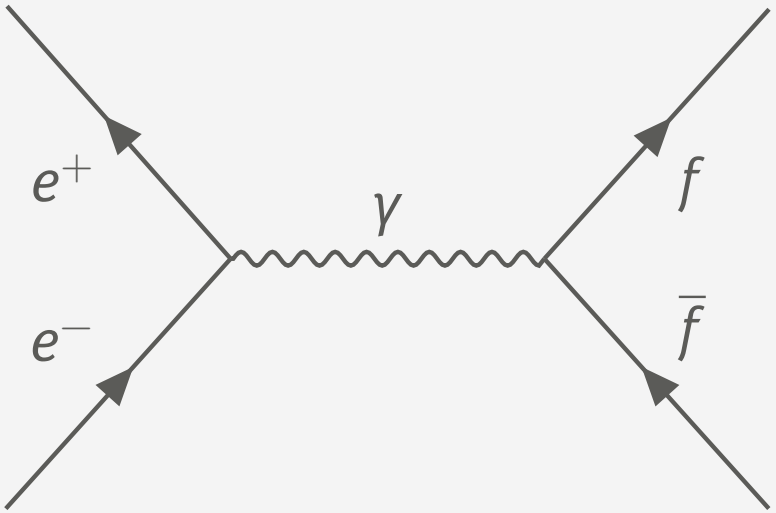
Experimentelle Untersuchung

- Erzeugung
- Nachweis
- Präzessionsmessungen
- Eigenschaften
- Anzahl Neutrinogenerationen

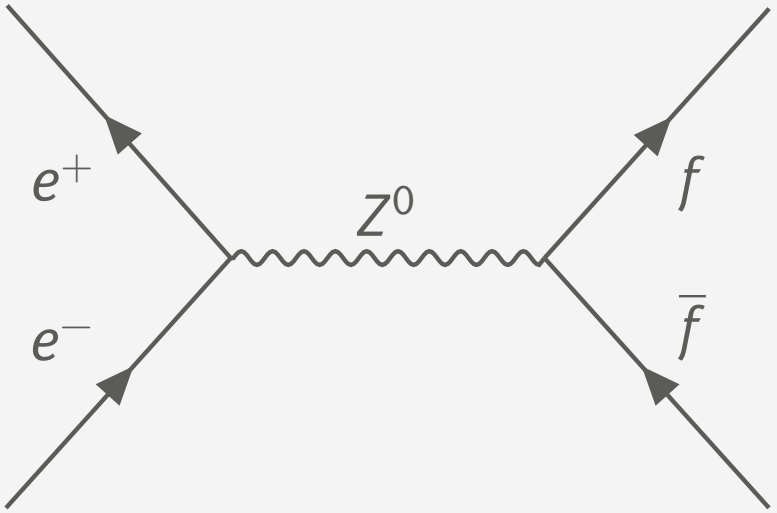
Zusammenfassung

Erzeugung

Feynman-Diagramme



e^+e-Vernichtung über γ [6]



e^+e-Vernichtung über Z^0 [6]

Erzeugung

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

Erzeugung

- $e^- + e^- \rightarrow Z^0$: Schwerpunktsenergie $\sqrt{s} = 2E_e \geq M_Z c^2 \approx 91{,}6\,GeV$
- $u + \overline{u} \rightarrow Z^0$: pp-Kollision benötigt $E_p \gtrapprox 600\,GeV$

Erzeugung

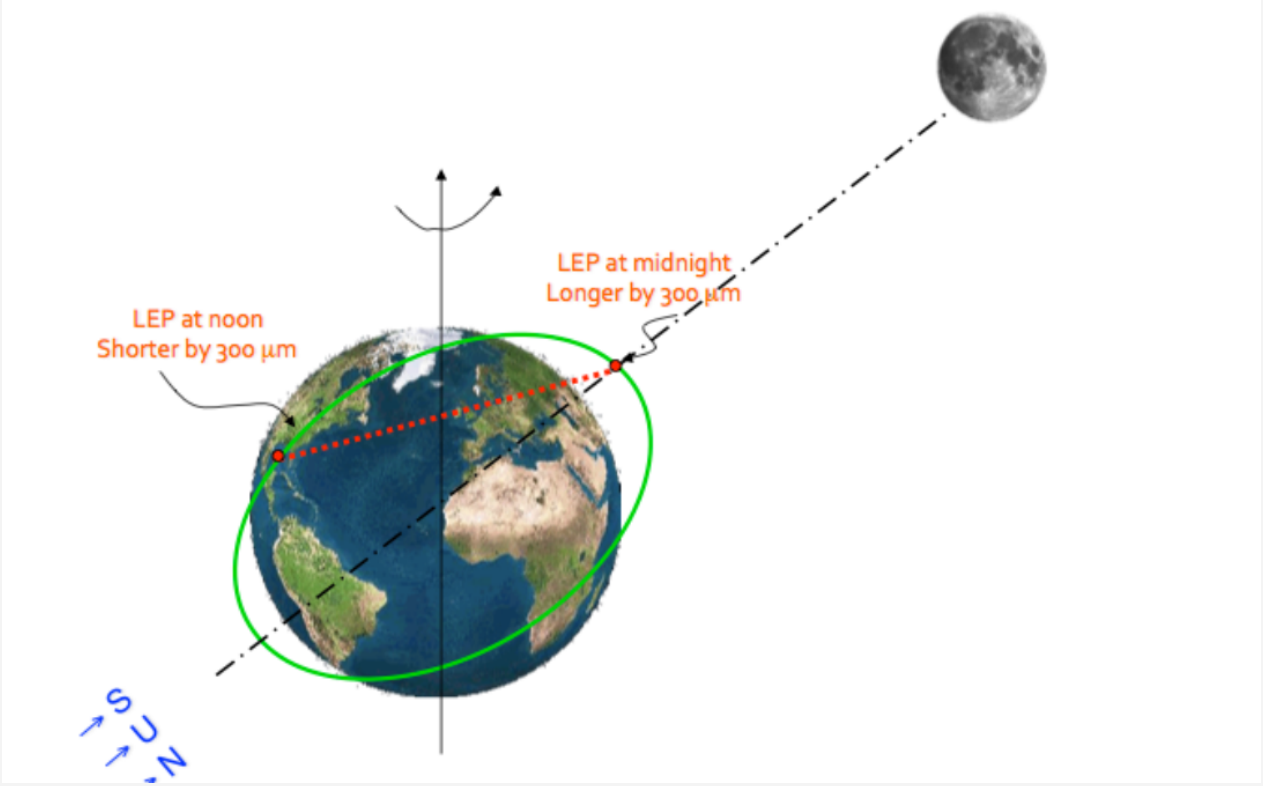
- $e^- + e^- \rightarrow Z^0$: Schwerpunktsenergie $\sqrt{s} = 2E_e \geq M_Z c^2 \approx 91{,}6\,GeV$
- $u + \overline{u} \rightarrow Z^0$: pp-Kollision benötigt $E_p \gtrapprox 600\,GeV$
- $u + \overline{u} \rightarrow Z^0$: $p\overline{p}$-Kollision benötigt $E_p \gtrapprox 300\,GeV$

Erzeugung

- $e^- + e^- \rightarrow Z^0$: Schwerpunktsenergie $\sqrt{s} = 2E_e \geq M_Z c^2 \approx 91{,}6\,GeV$
- $u + \bar{u} \rightarrow Z^0$: pp-Kollision benötigt $E_p \gtrapprox 600\,GeV$
- $u + \bar{u} \rightarrow Z^0$: $p\bar{p}$-Kollision benötigt $E_p \gtrapprox 300\,GeV$
- $e^+ + e^- \rightarrow W^+ + W^-$: benötigt $2E_e \geq 2M_W c^2 \approx 160{,}8\,GeV$

Erzeugung

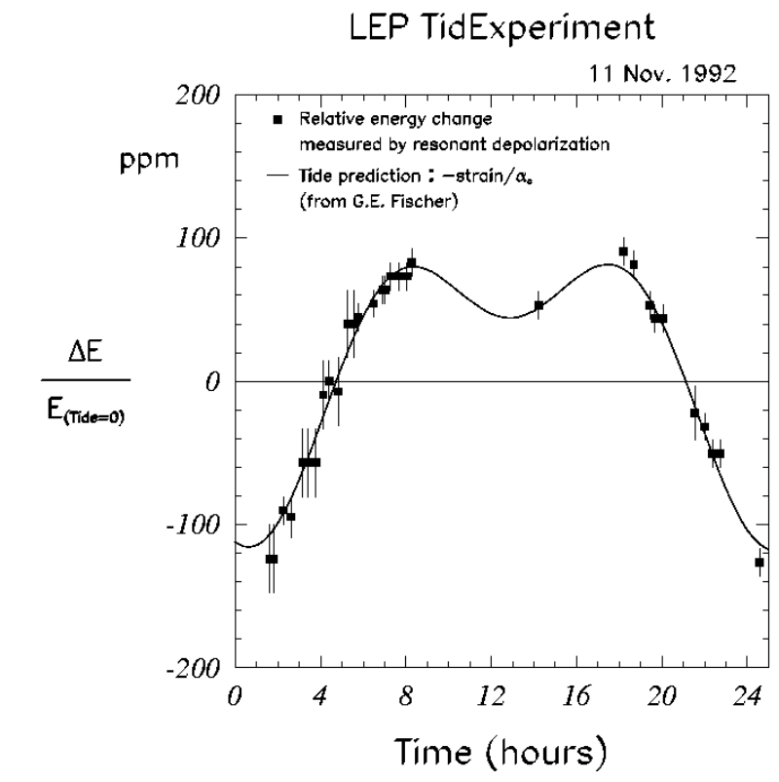
Einfluss auf Beschleuniger durch Gezeiten



LEP Ausdehnung[8]

Erzeugung

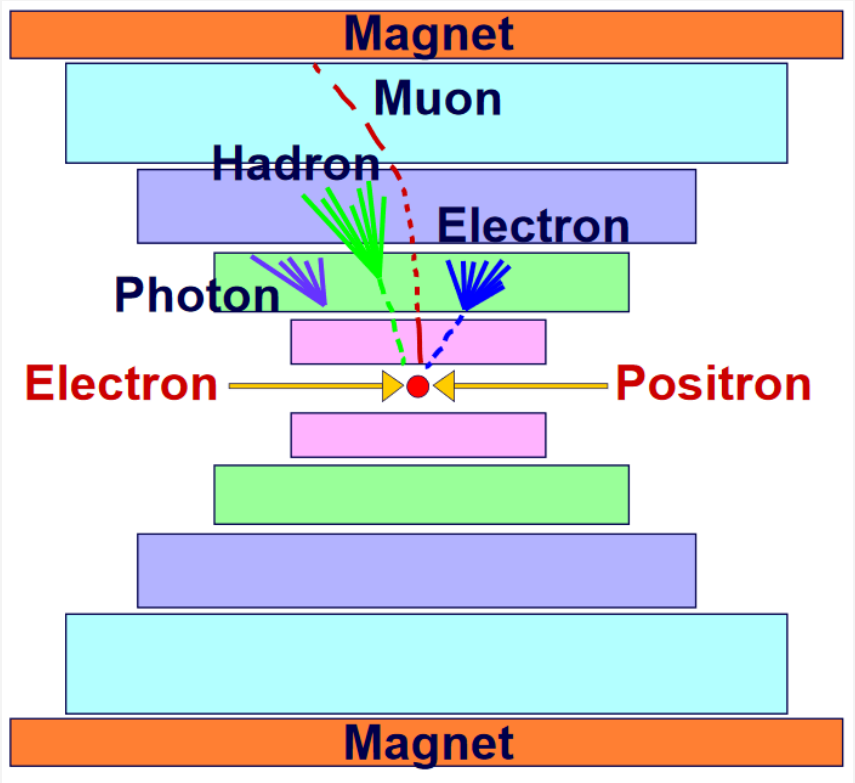
Einfluss auf Beschleuniger durch Gezeiten



Relative Strahlenergieänderung[7]

Nachweis

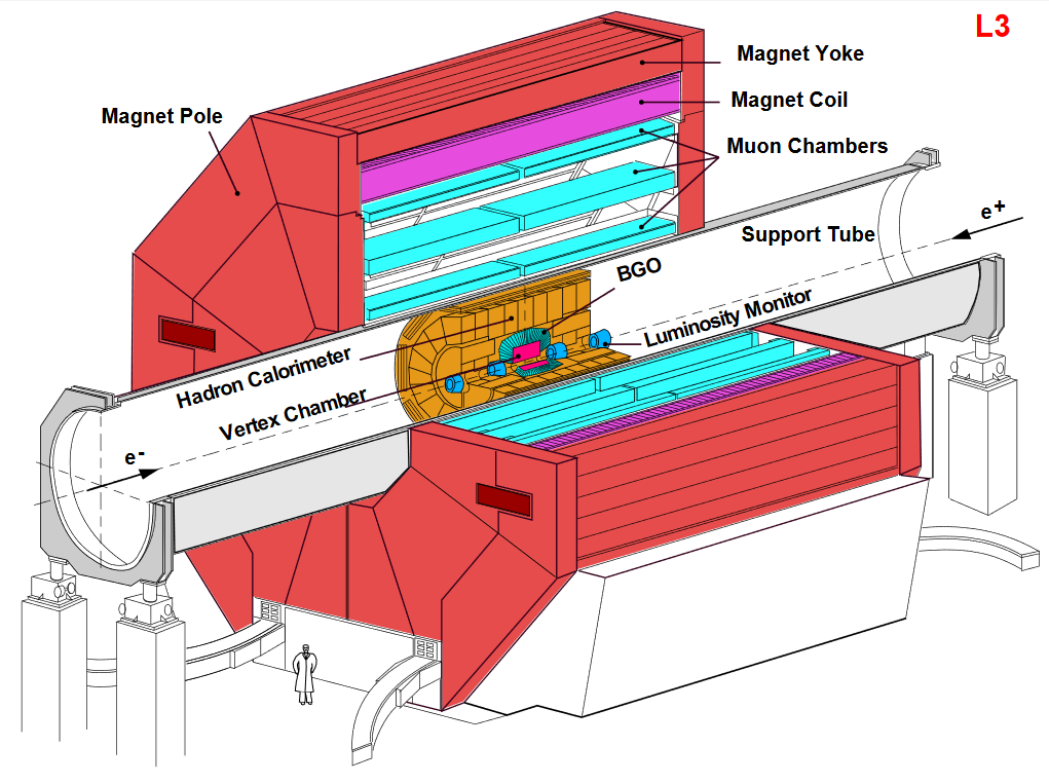
L3 Detektoraufbau am LEP



L3 Detektor [7]

Nachweis

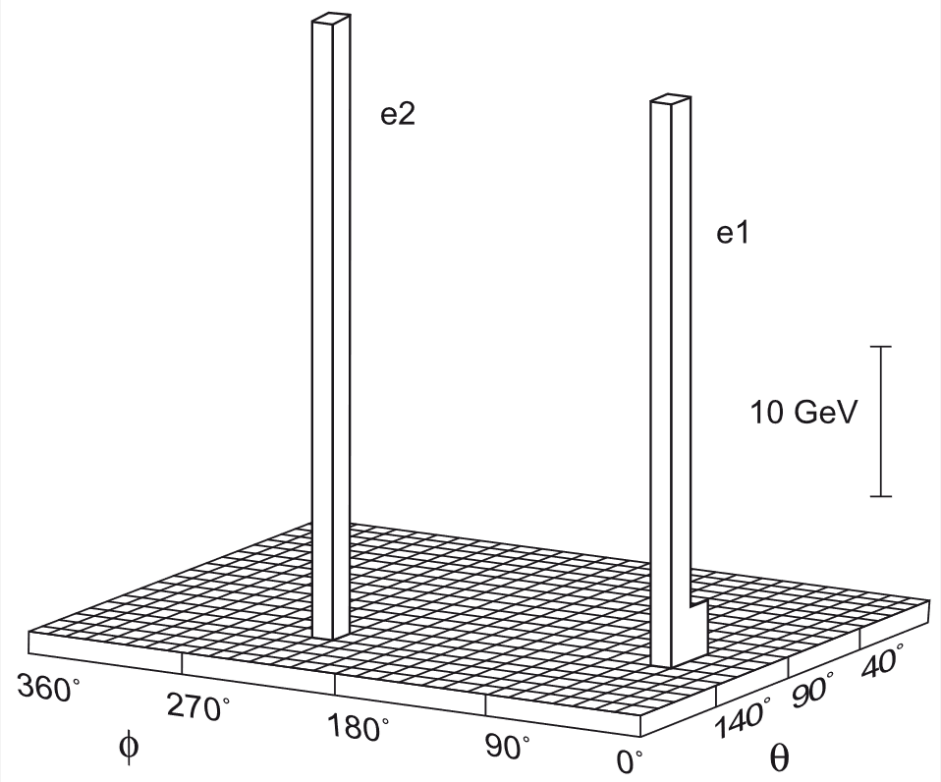
L3 Detektoraufbau am LEP



L3 Detektor [7]

Nachweis

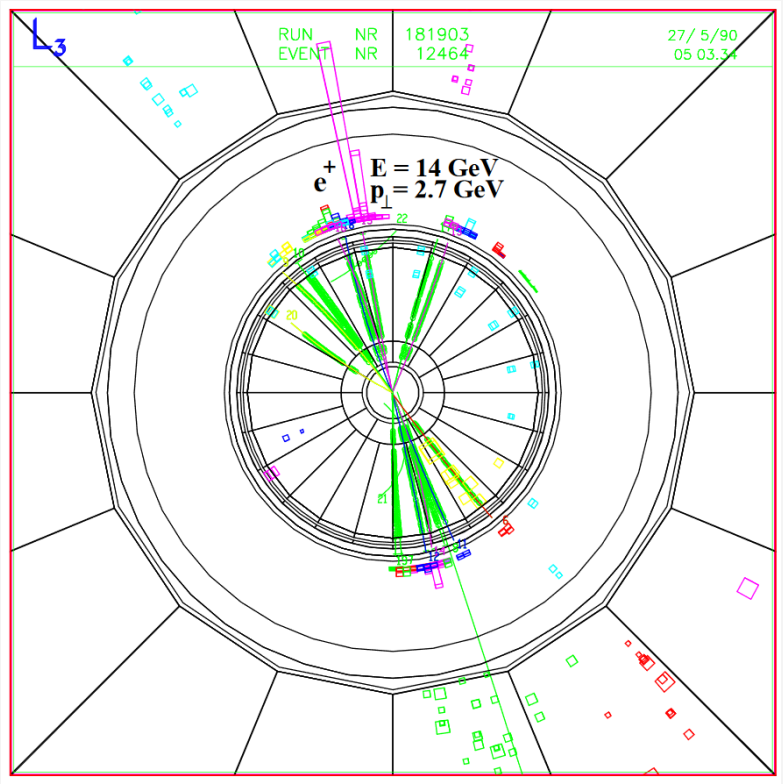
Entdeckung des Z^0 Bosons (1983 am CERN)



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

Präzessionsmessungen

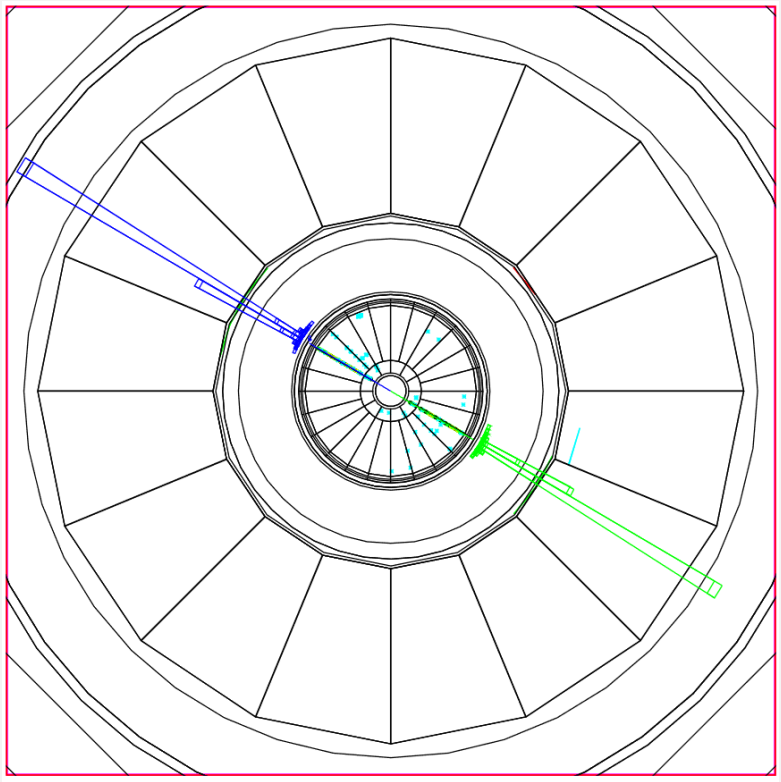
L3 Detektor (1993 am LEP)



$e^- + e^+ \rightarrow Z^0 \rightarrow$ hadronische Jets [7]

Präzessionsmessungen

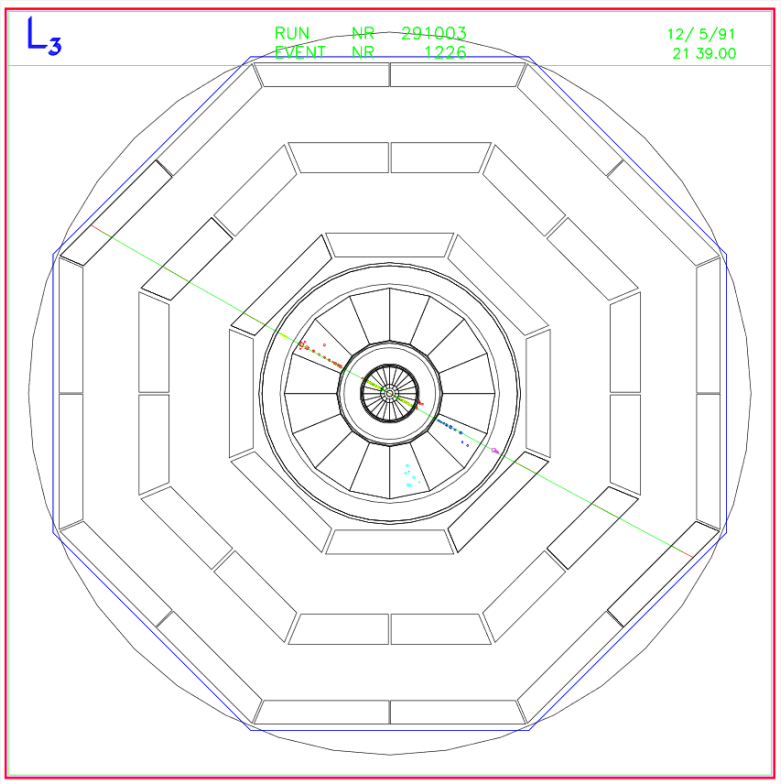
L3 Detektor (1993 am LEP)



$$e^- + e^+ \rightarrow Z^0 \rightarrow e^+ + e^- \text{ [7]}$$

Präzessionsmessungen

L3 Detektor (1993 am LEP)



$$e^- + e^+ \rightarrow Z^0 \rightarrow \mu^+ + \mu^- \text{ [7]}$$

Eigenschaften

Experimentelle Bestimmung

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

Eigenschaften

Experimentelle Bestimmung

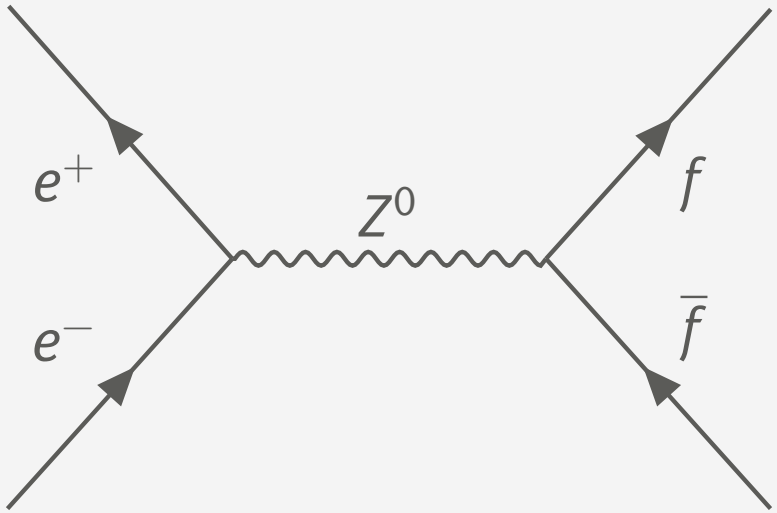
- Messung:
  - $M_Z = 91{,}188(2)\,GeV/c^2$
  - $\Gamma_Z = 2{,}495(2)\,GeV$
- Zerfall:

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

Anzahl Neutrinogenerationen

Wirkungsquerschnitt

$$\sigma_f = \frac{12\pi \cdot \Gamma_f \cdot \Gamma_e}{(s - M_Z^2)^2 + M_Z^2 \Gamma_Z^2}$$



Anzahl Neutrinogenerationen

Zerfallsbreite

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

Anzahl Neutrinogenerationen

Zerfallsbreite

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

Anzahl Neutrinogenerationen

Zerfallsbreite

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

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

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

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

Anzahl Neutrinogenerationen

Zerfallsbreite

$$\Gamma_Z = \sum_f \Gamma_{Z\to f\bar{f}} \qquad \Gamma_f = \frac{G_F M_Z^3}{24\sqrt{2}\pi}\cdot(1+(1-e|Q_f|\sin^2\theta_W)^2)$$

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

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

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

Anzahl Neutrinogenerationen

Zerfallsbreite

$$\Gamma_Z = \sum_f \Gamma_{Z\to f\bar{f}} \qquad \Gamma_f = \frac{G_F M_Z^3}{24\sqrt{2}\pi}\cdot(1+(1-e|Q_f|\sin^2\theta_W)^2)$$

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

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

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

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

Anzahl Neutrinogenerationen

Zerfallsbreite

$$\Gamma_Z = \sum_f \Gamma_{Z\to f\bar{f}} \qquad \Gamma_f = \frac{G_F M_Z^3}{24\sqrt{2}\pi}\cdot(1+(1-e|Q_f|\sin^2\theta_W)^2)$$

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

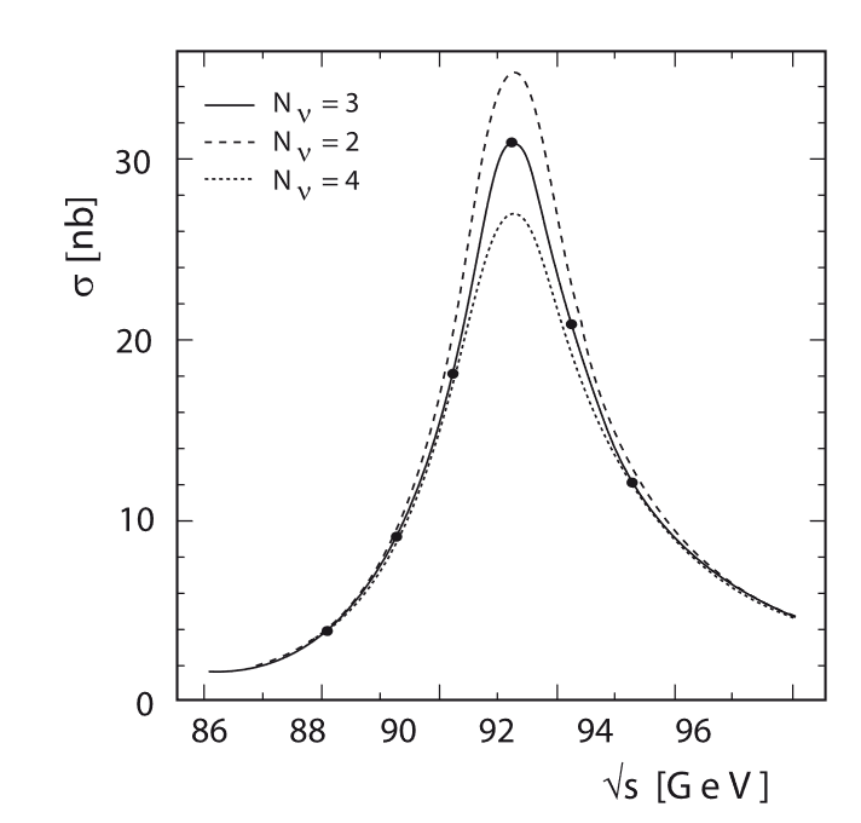
$$= N_C \cdot 2 \cdot \Gamma_u + N_C \cdot 3 \cdot \Gamma_d + 3 \cdot \Gamma_e + 3 \cdot \Gamma_\nu$$

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

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

$$\xrightarrow[\text{korrektur}]{\text{Strahlungs-}} 2{,}497\,GeV$$

Anzahl Neutrinogenerationen



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

Historischer Überblick

Theorie

Experimentelle Untersuchung

Zusammenfassung

Zusammenfassung

- Weinbergwinkel $\cos\theta_W \approx 0.88$
- Zerfallsbreite $\Gamma_Z \approx 2{,}4\,GeV$
- 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).

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. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0370269373904942.

Quellen II

- Standardmodell. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Standardmodell (besucht am 12.11.2018).
- Povh et al. Teilchen und Kerne. Springer Spektrum, 2014. Kap. 12.
- 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.

Quellen III

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

Vielen Dank für eure Aufmerksamkeit!

Fragen?