

1.3 Wechselwirkungen

Wechselwirkung	Austauschteilchen	Masse	Spin-Parität	Reichweite	relat. Kopplungsstärke	Typ. WQ	typ. Lebensdauer
Gravitation	Graviton ?	0	2^+	∞	10^{-40}	-	-
Elektromagn. WW	Photon	0	1^-	∞	10^{-2}	10 nb	10^{-20} s
schwache WW	W^+, W^-, Z^0	90 GeV	$1^-, 1^+$	10^{-18} m	10^{-5}	10^{-8} nb	10^{-8} s
starke WW	8 Gluonen	0	1^-	10^{-15} m	≈ 1	10^4 nb	10^{-23} s

- WW **lokal**, vermittelt durch Kraftfelder
- Kraftfelder bzw. Potentiale **kontinuierliche Funktionen von Ort und Zeit**
- **Quantenfeldtheorie (QFT)**: Erzeugungs- und Vernichtungsoperatoren fuer Feldquanten, WW durch Austauschteilchen ($\gamma, W^\pm, Z^0, \text{Gluonen} \dots$)
- **Renormierbarkeit**: konsistente Beseitigung von Divergenzen (in allen Ordnungen)

Ableitung der WW aus allgemeinen Prinzipien?

Maxwell-Gleichungen in Lorentz-Formulierung

Der elektromagnetische Feldstärketensor

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu = \begin{pmatrix} 0 & E_1 & E_2 & E_3 \\ -E_1 & 0 & -B_3 & B_2 \\ -E_2 & B_3 & 0 & -B_1 \\ -E_3 & -B_2 & B_1 & 0 \end{pmatrix}$$

Maxwell-Gleichungen

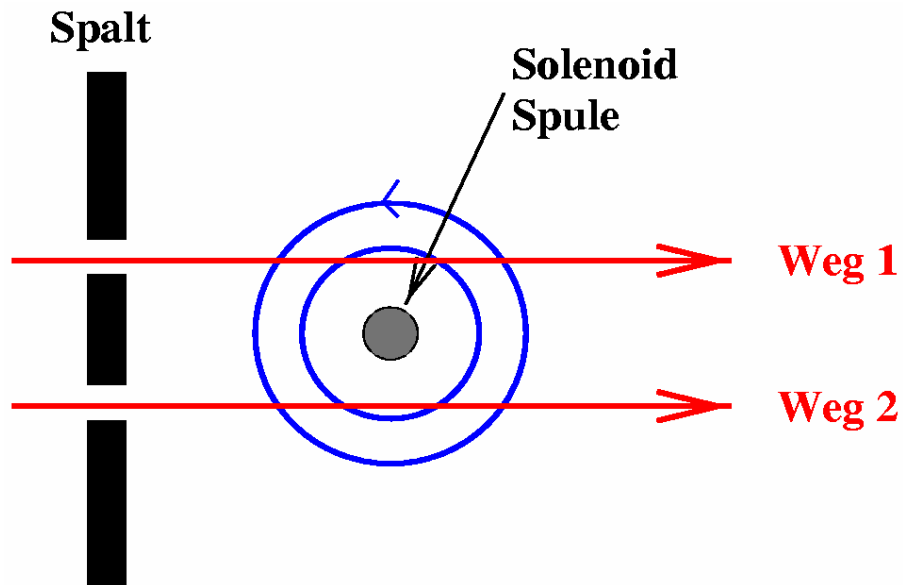
$$\partial^\mu F_{\mu\nu} = j_\nu$$

$$\partial_\lambda F_{\mu\nu} + \partial_\mu F_{\nu\lambda} + \partial_\nu F_{\lambda\mu} = 0$$

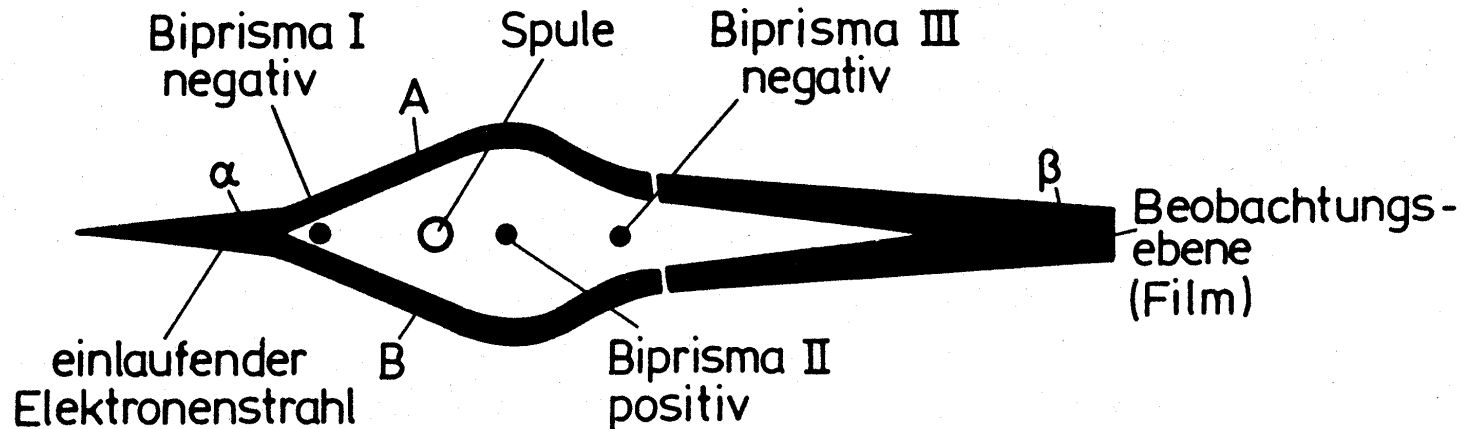
Aharonov-Bohm-Effekt

Y. Aharonov and D. Bohm, "Significance of Electromagnetic Potentials in the Quantum Theory,"
The Physical Review, vol. 115, no. 3, pages 485–491, Aug. 1959.

<http://fisica.udea.edu.co/~mpaez/aharanov/Bohmen.html>

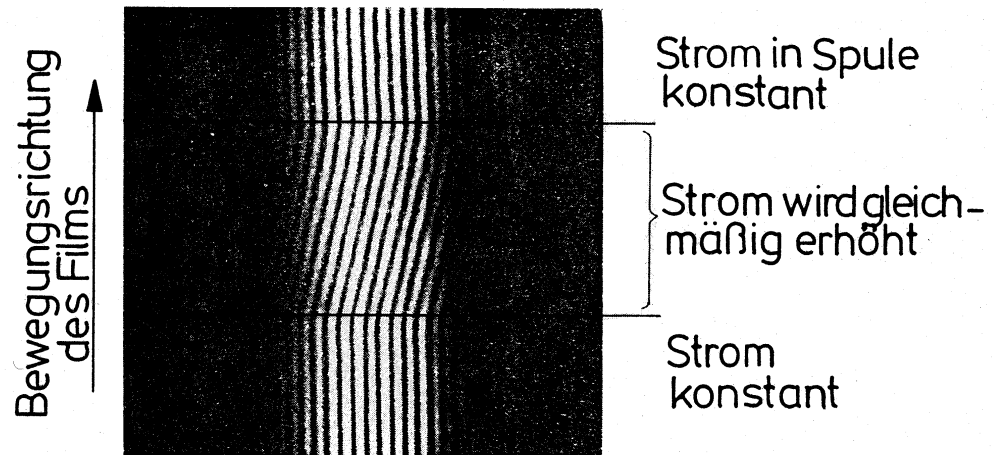


Aharonov-Bohm-Effekt: Möllenstedt-Experiment



Der Elektronenstrahl wird durch einen metallisierten Quarzfaden, der sich auf negativem Potential befindet, in zwei kohärente Teilstrahlen aufgespaltet.

Hinter dem ersten Quarzfaden wird eine Solenoidspule (14-18 μm Durchmesser) angebracht, die aus Wolframdraht von 4 μm Dicke gewickelt ist.



Ergebnis des Möllenstedt - Experiments
[G.Möllenstedt, W.Bayh, Phys.Blätter 1962, S.299]

Allgemeine lokale Phasentransformation

$$\psi(\mathbf{x}) \rightarrow e^{i\vec{T}^a \alpha^a(\mathbf{x})} \cdot \psi(\mathbf{x}) = U(\mathbf{x}) \cdot \psi(\mathbf{x})$$

- $U(\mathbf{x})$ = Elemente der Lie - Gruppe
 - $\psi = (\psi_1, \dots, \psi_m)$ = Fermionfelder mit Gruppenindex m
(m = Dimension der Darstellung)
 - $\vec{T} = (T_1, \dots, T_n)$ = $n \times n$ - Matrizen = Generatoren der Lie - Algebra
z.B. SU(2) : $n = 3$; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$; $m = 2$ für $I = \frac{1}{2}$
 - $\vec{\alpha} = (\alpha_1, \dots, \alpha_n)$ = skalare Parameter
- \vec{T} definiert durch VR : $[T_a, T_b] = if_{abc} T_c$ (f_{abc} = Strukturkonstanten)

SU(2)-Symmetrie

Gruppe aller unitären 2x2 Matrizen U mit Determinante 1:

$$UU^\dagger = 1 \text{ und } \det U = 1$$

Infinitesimale Transformationen:

$$U = 1 + i\xi$$

Mit $\det U = 1$ folgt:

$$\text{Spur } \xi = 0.$$

Es gibt genau 3 linear unabhängige, hermitesche 2x2-Matrizen mit Spur 0; eine mögliche Basis sind die Pauli-Matrizen:

$$\tau_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \tau_2 = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}, \quad \tau_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

$$\xi = \frac{1}{2}(\varepsilon_1 \tau_1 + \varepsilon_2 \tau_2 + \varepsilon_3 \tau_3) \quad \Rightarrow \quad U = 1 + \frac{1}{2} i \vec{\varepsilon} \cdot \vec{\tau}$$

Für endliche "Drehwinkel" ($\vec{\varepsilon} = \vec{\alpha}/n$) gilt dann:

$$U = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{2} i \frac{\vec{\tau} \cdot \vec{\alpha}}{n} \right)^n = e^{+\frac{1}{2} \vec{\tau} \cdot \vec{\alpha}}$$

SU(3)-Symmetrie

Dies ist Gruppe aller unitären 3x3 Matrizen U mit der Determinante 1:
 $UU^\dagger=1$ und $\det U = 1$

8 linear unabhängige, hermitesche 3x3 - Matrizen mit Spur 0: **Gell-Mann Matrizen**

$$\lambda^1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \lambda^2 = \begin{pmatrix} 0 & -i & 0 \\ i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \lambda^3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \lambda^4 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$
$$\lambda^5 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -i \\ 0 & 0 & 0 \\ i & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \lambda^6 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \lambda^7 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -i \\ 0 & i & 0 \end{pmatrix}, \quad \lambda^8 = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -2 \end{pmatrix}$$

Die Transformation

$$\psi' = e^{+\frac{1}{2}i \sum_{j=1}^8 \lambda_j \alpha_j} \Psi$$

stellt die Verallgemeinerung der Phasentransformation dar

- Die Gruppe SU(3) ist nicht abelsch
- Es gibt 8 Winkel α_i

Die Anzahl der linear unabhängigen Matrizen legt die Anzahl der Eichbosonen fest.

Experimente zum Test des Standardmodells

W-Physik

$$pp, p\bar{p} \rightarrow W^\pm + X$$

$$ep \rightarrow \nu + X$$

$$e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$$

$$e^+e^- \rightarrow W^+W^-$$

Tevatron, LHC

HERA

LEP, CESR

LEP II, ILC

Z-Physik

$$pp, p\bar{p} \rightarrow Z^0 + X$$

$$e^+e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow f\bar{f}$$

Tevatron, LHC

LEP

CP-Verletzung

$$e^+e^- \rightarrow b\bar{b}$$

$$pp \rightarrow b\bar{b}$$

B-Fabriken

LHC-b

Higgs-Suche

$$pp, p\bar{p}, e^+e^- \rightarrow H^0 + X$$

LHC, Tevatron, ILC

QCD

$$pp, p\bar{p}, e^+e^-, ep \rightarrow \text{Jets}_{(\text{Quarks}, \text{Gluons})}$$

HERA, LHC, Tevatron

ν -Physik

Massen, Oszillationen

Beschleun., Reaktoren, Sonne,...

„Neue Physik“

SUSY, Extra-Dimensionen, GUT,
Monopole, Dunkle Energie

überall

1.5 Physik jenseits des Standardmodells, offene Fragen

- Anzahl der freien Parameter
- Ursprung der Massen \Rightarrow Higgs?
- Generationen
- Hierarchieproblem \Rightarrow SUSY?
- Vereinheitlichung der WW \Rightarrow Protonzerfall, Monopole?
- Dunkle Materie \Rightarrow SUSY?
- Dunkle Energie
- Neutrinomasse , -oszillationen
- Quark-Lepton-Beziehung \Rightarrow GUT?
- Gravitation \Rightarrow Extra-Dimensionen?
- kosmol. Inflation
-
-