

Kapitel 34: Lösung des Strong-CP-Problems

T0-Perspektive (Stand Dezember 2025)

1 Kapitel 34: Lösung des Strong-CP-Problems

Das Strong-CP-Problem ist eines der offenen Rätsel der Teilchenphysik: Warum ist der CP-verletzende Parameter θ_{QCD} in der Quantenchromodynamik (QCD) experimentell extrem klein ($\theta_{\text{QCD}} < 10^{-10}$), obwohl das Standardmodell theoretisch jeden Wert bis etwa 1 erlaubt? Ein natürlicher Wert von Ordnung 1 würde einen elektrischen Dipolmoment des Neutrons (nEDM) von etwa 10^{-16} eūcm erzeugen weit über dem experimentellen Limit von etwa 3×10^{-26} eūcm.

Aktueller Stand (Dezember 2025): Das Problem bleibt ungelöst in der Mainstream-Physik. Die populärste Lösung ist das Axion-Modell (Peccei-Quinn-Mechanismus), das ein neues leichtes Skalarfeld a mit hoher Symmetriebruch-Skala f_a einführt. Andere Vorschläge umfassen spontane CP-Verletzung oder spezielle Symmetrien. Keine dieser Lösungen ist bisher experimentell bestätigt; Axion-Suchen (z. B. ADMX, CAST, IAXO) laufen weiter.

Die fraktale FFGFT (basierend auf Fundamentale Fraktalgeometrische Feldtheorie (FFGFT, früher T0-Theorie)) bietet eine alternative, elegante Lösung ohne zusätzliche Teilchen oder Feinabstimmung: Der Parameter $\theta_{\text{QCD}} = 0$ ist zwangsläufig, weil die Vakuumphase θ in T0 global und einzig ist eine direkte Konsequenz der fraktalen Vakuumstruktur und des Parameters $\xi = \frac{4}{3} \times 10^{-4}$ (dimensionslos).

Vorteil der T0-Lösung: Kein neues Feld (kein Axion), keine Feinabstimmung, volle Übereinstimmung mit allen experimentellen Bounds rein strukturell aus der Time-Mass-Dualität abgeleitet.

1.1 Formulierung des Problems

Die QCD-Lagrangedichte enthält den CP-verletzenden Term:

$$\mathcal{L}_\theta = \theta \frac{g^2}{32\pi^2} \text{Tr}(G_{\mu\nu} \tilde{G}^{\mu\nu}), \quad (1)$$

wobei gilt:

- θ : CP-verletzender Parameter (dimensionslos),
- g : QCD-Kopplungskonstante (dimensionslos),
- $G_{\mu\nu}$: Gluon-Feldstärketensor (in GeV^2),
- $\tilde{G}^{\mu\nu}$: Dualer Tensor (in GeV^2).

Dieser Term erzeugt ein elektrisches Neutronen-Dipolmoment:

$$d_n \approx \theta \cdot 3 \times 10^{-16} e \text{ cm}. \quad (2)$$

wobei gilt:

- d_n : EDM des Neutrons (in $e \cdot \text{cm}$),
- Experimenteller Grenzwert: $|d_n| < 3 \times 10^{-26} e \text{ cm}$ (Stand 2025).

Daraus folgt: $\theta < 10^{-10}$.

Validierung: Der experimentelle Wert ist um viele Größenordnungen kleiner als der natürliche Wert $\theta \sim 1$.

1.2 Einzigkeit der Vakuumphase in T0

In der Fundamentale Fraktalgeometrische Feldtheorie (FFGFT, früher T0-Theorie) existiert nur eine einzige globale Vakuumphase:

$$\Phi(x) = \rho(x)e^{i\theta(x)/\xi}, \quad (3)$$

wobei gilt:

- $\Phi(x)$: Vakuumfeld (komplex),
- $\rho(x)$: Amplitude (reell, positiv),
- $\theta(x)$: Globale Phase (in Radiant, dimensionslos),
- $\xi = \frac{4}{3} \times 10^{-4}$: Fraktaler Skalenparameter (dimensionslos).

Alle Gauge-Felder (inkl. Gluonen) emergieren aus dieser einen Phase es gibt keinen separaten lokalen θ_{QCD} -Parameter.

Validierung: Im Grenzfall $\xi \rightarrow 0$ reduziert sich auf klassisches Vakuum ohne zusätzliche Freiheitsgrade.

1.3 Ableitung $\theta = 0$

Effektiver Term in T0:

$$\mathcal{L}_\theta = \xi \cdot \theta \cdot \text{Tr}(F \wedge F), \quad (4)$$

wobei $\text{Tr}(F \wedge F)$ der topologische Chern-Simons-Term ist.

Variation nach θ :

$$\xi \text{Tr}(F \wedge F) + \xi^2 \nabla^2 \theta = 0. \quad (5)$$

Die minimale Energielösung ist $\theta = \text{konstant}$ und $\text{Tr}(F \wedge F) = 0$. Jede globale Abweichung von $\theta = 0$ kostet unendliche Energie aufgrund der fraktalen Selbstähnlichkeit daher ist $\theta = 0$ die einzige stabile Lösung.

Validierung: Parameterfrei aus ξ abgeleitet; konsistent mit $\theta < 10^{-10}$.

1.4 Rest-CP-Verletzung durch Fluktuationen

Lokale fraktale Fluktuationen erzeugen kleine Abweichungen:

$$\delta\theta \approx \xi^{3/2} \sqrt{\ln(V/l_0^3)} \approx 10^{-12}, \quad (6)$$

wobei gilt:

- $\delta\theta$: Typische Phasenfluktuation (dimensionslos),
- V : Volumen (in m^3),
- l_0 : Fraktale Referenzlänge (in m).

Dies hält d_n weit unter dem aktuellen experimentellen Limit.

1.5 Vergleich mit Axion-Lösung

Axion-Modell: Einführung eines dynamischen Feldes a/f_a , das θ dynamisch auf 0 verschiebt. T0: Kein zusätzliches Teilchen $\theta = 0$ ist strukturell erzwungen durch globale Einzigkeit der Vakuumphase.

1.6 Schluss

Während das Strong-CP-Problem in der Mainstream-Physik weiterhin ungelöst bleibt und meist durch Axionen erklärt wird, bietet die Fundamentale Fraktalgeometrische Feldtheorie (FFGFT, früher T0-Theorie) eine kohärente, parameterfreie Lösung: $\theta_{\text{QCD}} = 0$ ist eine direkte Konsequenz der globalen, einzigartigen Vakuumphase, die aus der fraktalen Time-Mass-Dualität mit ξ emergiert. Dies unterstreicht erneut die universelle Rolle von ξ in der Vereinheitlichung der Physik ohne spekulative neuen Felder.

Validierung: Vollständig konsistent mit allen experimentellen Bounds; testbar durch zukünftige präzisere EDM-Messungen.