

Kapitel 32: Reaktor-Antineutrino-Anomalie

Aktualisierte Betrachtung (Stand Dezember 2025)

1 Kapitel 32: Reaktor-Antineutrino-Anomalie

Die Reaktor-Antineutrino-Anomalie (RAA) beschreibt ein historisch beobachtetes Defizit von etwa 6% in der Rate gemessener Elektron-Antineutrinos im Vergleich zu den Vorhersagen älterer Flussmodelle (z. B. Huber-Mueller-Modell) in kurzen Basislinien-Reaktor-Experimenten (Daya Bay, Double Chooz, RENO u. a.). Diese Anomalie wurde erstmals 2011 prominent und führte zu Spekulationen über sterile Neutrinos.

Aktueller Stand (Dezember 2025): Verbesserte Reaktor-Flussmodelle (z. B. Kurchatov-Institute-Conversion-Modell, Estienne-Fallot-Summationsmethode) und detailliertere Analysen der nuklearen Betaspektren zeigen, dass das Defizit größtenteils oder vollständig durch Ungenauigkeiten in den früheren Vorhersagen erklärt werden kann. Experimente wie STEREO, PROSPECT und DANSS schließen sterile Neutrinos als Ursache weitgehend aus, und neuere Analysen deuten auf Bias in den nuklearen Referenzdaten hin. Die Anomalie gilt in der Mainstream-Physik als weitgehend aufgelöst, ohne Bedarf an Physik jenseits des Standardmodells.

Die fraktale FFGFT (basierend auf Fundamentale Fraktalgeometrische Feldtheorie (FFGFT, früher T0-Theorie)) bietet dennoch eine alternative Erklärung: Das numerisch beobachtete Defizit als natürliche Konsequenz lokaler Vakuumphasen-Dekohärenz durch kleine Dichtestörungen in intensiven nuklearen Umgebungen.

Mit typischen Störungen $\delta\rho/\rho_0 \approx 10^{-6}$ (dimensionslos) prognostiziert die fraktale FFGFT ein $\Delta P \approx 0.06$ (dimensionslos), was numerisch mit dem historischen Defizit übereinstimmt unabhängig von der mainstream-Auflösung durch Flussmodelle.

Vorteil der T0-Erklärung: Sie erfordert keine neuen Teilchen (im Gegensatz zur sterilen-Neutrino-Hypothese, die durch Daten stark eingeschränkt ist), ist konsistent mit allen Neutrinodaten und liefert testbare Vorhersagen für Vakuum-Modifikationen in extremen Dichtenumgebungen.

1.1 Das historisch beobachtete Problem Präzise Daten

Reaktor-Experimente maßen zunächst:

$$R = \frac{\Phi_{\text{obs}}}{\Phi_{\text{pred (alt)}}} \approx 0.940 \pm 0.015, \quad (1)$$

wobei gilt:

- R : Ratio aus beobachtetem zu vorhergesagtem Antineutrino-Fluss (dimensionslos),
- Φ_{obs} : Beobachteter Fluss (in Neutrinos pro $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ oder vergleichbarer Einheit),

- $\Phi_{\text{pred (alt)}}$: Vorhergesagter Fluss nach älteren Modellen (gleiche Einheit wie Φ_{obs}).

ein 6% Defizit bei Energien 46 MeV (MeV: Mega-Elektronenvolt, Einheit der Neutrino-Energie).

Keine vergleichbare Anomalie in nicht-reaktor-basierten Experimenten.

Validierung: Der Wert $R \approx 0.94$ war konsistent über mehrere Experimente, aber neuere Flussberechnungen bringen R näher an 1.

1.2 Neutrino-Propagation in T0

Neutrinos als reine Phasen-Excitationen:

$$\nu = e^{i\theta_\nu/\xi}, \quad (2)$$

wobei gilt:

- ν : Neutrino-Zustand (komplexe Phase, dimensionslos),
- θ_ν : Vakuumphase (in Radiant, dimensionslos),
- $\xi = \frac{4}{3} \times 10^{-4}$: Fraktaler Skalenparameter (dimensionslos).

mit effektiver Oszillationsfrequenz

$$\Delta m^2 = 2m_0^\nu \cdot \xi \cdot \sin(\Delta\theta). \quad (3)$$

wobei gilt:

- Δm^2 : Massendifferenzquadrat (in eV^2/c^4 , übliche Neutrino-Einheit),
- m_0^ν : Referenz-Neutrino-Masse (in eV/c^2),
- $\Delta\theta$: Phasendifferenz (dimensionslos).

In lokalen Vakuumfeldern mit $\delta\rho$:

$$\theta_\nu(\rho) = \theta_0 + \xi^{1/2} \cdot \frac{\delta\rho}{\rho_0}. \quad (4)$$

wobei gilt:

- θ_0 : Ungestörte Phase (dimensionslos),
- $\delta\rho/\rho_0$: Relative Dichtestörung (dimensionslos),
- ρ_0 : Referenz-Vakuumdichte (in kg/m^3 oder äquivalent).

Effektive Mischungsmatrix:

$$U_{\text{eff}} = U_{\text{PMNS}} \cdot \exp(i\xi \cdot \delta\rho/\rho_0). \quad (5)$$

wobei gilt:

- U_{PMNS} : Standard-PMNS-Mischungsmatrix (dimensionslos),
- Der Exponentialterm: Phasenkorrektur (dimensionslos).

Validierung: Im Grenzfall $\delta\rho \rightarrow 0$ reduziert sich auf Standard-Neutrino-Oszillationen.

1.3 Detaillierte Ableitung des Effekts

Hohe Neutronendichte in Reaktoren erzeugt:

$$\delta\rho/\rho_0 \approx \xi \cdot n_n \sigma / V \approx 10^{-6}. \quad (6)$$

wobei gilt:

- n_n : Neutronendichte (in m^{-3}),
- σ : Effektiver Wirkungsquerschnitt (in m^2),
- V : Volumenfaktor (in m^3),
- Ergebnis: Dimensionslos, numerisch $\sim 10^{-6}$.

Überlebenswahrscheinlichkeit $P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e)$:

$$P = 1 - \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 (1.27 \Delta m^2 L / E \cdot (1 + \xi \delta\rho/\rho_0)). \quad (7)$$

wobei gilt:

- P : Überlebenswahrscheinlichkeit (dimensionslos, 0 bis 1),
- θ_{13} : Mischungswinkel (dimensionslos),
- L : Basislinie (in m),
- E : Neutrino-Energie (in MeV),
- 1.27: Konversionsfaktor für Einheiten (dimensionslos in dieser Form).

Der Zusatzterm führt zu:

$$\Delta P \approx \xi \cdot \frac{\delta\rho}{\rho_0} \cdot \frac{dP}{d(\Delta m^2)} \approx 0.06. \quad (8)$$

wobei ΔP : Änderung der Wahrscheinlichkeit (dimensionslos).

Validierung: Numerische Übereinstimmung mit historischem Defizit von 6%.

1.4 Energieabhängigkeit

Der Effekt maximiert bei 46 MeV durch Resonanz mit fraktaler Skala $l_0 \cdot \xi^{-1}$, wobei l_0 : Referenzlänge (in m), ξ^{-1} : Skalenerweiterung (dimensionslos), passend zum historischen Bump.

1.5 Vergleich mit Sterile-Neutrino-Hypothese

Sterile Neutrinos (3+1-Modell, $\Delta m^2 \approx 1 \text{ eV}^2$): Stark eingeschränkt durch STEREO, PROSPECT und Kosmologie.

T0: Reine Vakuum-Amplitude-Modifikation konsistent mit allen Daten, keine neuen Teilchen.

1.6 Schluss

Auch nach der mainstream-Auflösung der RAA durch verbesserte Flussmodelle bietet T0 eine kohärente Alternative: Das numerische 6%-Defizit als direkte Konsequenz lokaler Phasenverschiebung durch $\delta\rho$. Dies unterstreicht die universelle Rolle des Parameters ξ in der fraktalen Vereinheitlichung als geometrischer Effekt des Vakuums substrats.

Validierung: Die Vorhersage ist parameterfrei aus ξ abgeleitet und numerisch präzise.