

Vereinheitlichung von Casimir-Effekt und kosmischer Hintergrundstrahlung: Eine fundamentale Vakuum-Theorie

1 Einleitung

Die vorliegende Arbeit entwickelt eine neuartige theoretische Beschreibung, die den mikroskopischen Casimir-Effekt und die makroskopische kosmische Hintergrundstrahlung (CMB) als verschiedene Manifestationen einer zugrundeliegenden Vakuumstruktur interpretiert. Durch die Einführung einer charakteristischen Vakuum-Längenskala L_ξ und einer fundamentalen dimensionslosen Kopplungskonstante ξ wird gezeigt, dass beide Phänomene durch ein einheitliches theoretisches Framework beschrieben werden können.

Die Theorie basiert auf der Hypothese einer granulierten Raumzeit mit einer minimalen Längenskala $L_0 = \xi \cdot L_P$, bei der alle physikalischen Kräfte vollständig wirksam sind. Für Abstände $d > L_0$ werden nur Teile dieser Kräfte durch die Vakuumfluktuationen sichtbar, was durch die $1/d^4$ -Abhängigkeit der Casimir-Kraft beschrieben wird. Aufgrund der extrem kleinen Größe von L_0 ist eine direkte experimentelle Messung derzeit nicht möglich, weshalb die messbare Skala L_ξ als Brücke zwischen der fundamentalen Raumzeitstruktur und experimentellen Beobachtungen dient. Gravitation wird als emergente Eigenschaft eines Zeitfeldes interpretiert, wodurch kosmische Effekte wie die CMB ohne die Annahme von Dunkler Energie oder Dunkler Materie erklärt werden können.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Fundamentale Längenskalen

Das vorgeschlagene Framework definiert eine Hierarchie von charakteristischen Längenskalen:

$$L_0 = \xi \cdot L_P \tag{1}$$

$$L_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \approx 1.616 \times 10^{-35} \text{ m} \tag{2}$$

$$L_\xi = \text{charakteristische Vakuum-Längenskala} \approx 100 \text{ } \mu\text{m} \tag{3}$$

Hierbei repräsentiert L_0 die minimale Längenskala einer granulierten Raumzeit, bei der alle Vakuumfluktuationen vollständig wirksam sind, während L_ξ die emergente Skala für messbare Vakuum-Wechselwirkungen darstellt.

2.2 Die Kopplungskonstante ξ

Die dimensionslose Kopplungskonstante ξ wird zu

$$\xi = \frac{4}{3} \times 10^{-4} = 1.333 \times 10^{-4} \quad (4)$$

bestimmt. Diese Konstante fungiert als fundamentaler Raumparameter, der die Granulation der Raumzeit bei L_0 mit messbaren Effekten wie dem Casimir-Effekt und der CMB verknüpft. Sie kann aus einem Lagrangian abgeleitet werden, der die Dynamik eines Zeitfeldes beschreibt.

3 Die CMB-Vakuum-Beziehung

3.1 Grundgleichung

Die zentrale Beziehung der Theorie verknüpft die Energiedichte der kosmischen Hintergrundstrahlung mit der charakteristischen Vakuum-Längenskala:

$$\rho_{\text{CMB}} = \frac{\xi \hbar c}{L_\xi^4} \quad (5)$$

Diese Formel ist dimensional konsistent, da

$$[\rho_{\text{CMB}}] = \frac{[1] \cdot [\hbar c]}{[L_\xi^4]} = \frac{\text{J m}}{\text{m}^4} = \text{J/m}^3 \quad (6)$$

3.2 Numerische Bestimmung von L_ξ

Mit der experimentell bestimmten CMB-Energiedichte $\rho_{\text{CMB}} = 4.17 \times 10^{-14} \text{ J/m}^3$ lässt sich L_ξ berechnen:

$$L_\xi^4 = \frac{\xi \hbar c}{\rho_{\text{CMB}}} \quad (7)$$

$$L_\xi^4 = \frac{1.333 \times 10^{-4} \times 3.162 \times 10^{-26} \text{ J m}}{4.17 \times 10^{-14} \text{ J/m}^3} \quad (8)$$

$$L_\xi^4 = 1.011 \times 10^{-16} \text{ m}^4 \quad (9)$$

$$L_\xi = 100 \text{ } \mu\text{m} \quad (10)$$

4 Modifizierte Casimir-Theorie

4.1 Erweiterte Casimir-Formel

Der Casimir-Effekt wird durch die folgende modifizierte Formel beschrieben:

$$|\rho_{\text{Casimir}}(d)| = \frac{\pi^2}{240\xi} \rho_{\text{CMB}} \left(\frac{L_\xi}{d} \right)^4 \quad (11)$$

wobei d den Abstand zwischen den Casimir-Platten bezeichnet.

4.2 Konsistenz mit der Standard-Casimir-Formel

Durch Einsetzen der CMB-Vakuum-Beziehung (5) in die modifizierte Casimir-Formel (11) ergibt sich:

$$|\rho_{\text{Casimir}}(d)| = \frac{\pi^2}{240\xi} \cdot \frac{\xi\hbar c}{L_\xi^4} \cdot \frac{L_\xi^4}{d^4} \quad (12)$$

$$= \frac{\pi^2\hbar c}{240d^4} \quad (13)$$

Dies entspricht exakt der etablierten Standard-Casimir-Formel und beweist die mathematische Konsistenz der vorgeschlagenen Theorie.

5 Numerische Verifikation

5.1 Vergleichsrechnungen

Zur Verifikation der theoretischen Konsistenz werden Casimir-Energiedichten für verschiedene Plattenabstände berechnet:

Abstand d	$(L_\xi/d)^4$	$\rho_{\text{Casimir}} \text{ (J/m}^3\text{)}$	$\rho_{\text{Casimir}} \text{ (J/m}^3\text{)}$
1 μm	1.000×10^8	1.30×10^{-3}	1.30×10^{-3}
100 nm	1.000×10^{12}	1.30×10^1	1.30×10^1
10 nm	1.000×10^{16}	1.30×10^5	1.30×10^5

Tabelle 1: Vergleich der Casimir-Energiedichten zwischen Standard-Formel und neuer theoretischer Beschreibung

Die perfekte Übereinstimmung bestätigt die mathematische Korrektheit der entwickelten Theorie.

5.2 Charakteristische Längenskalen-Hierarchie

Die Theorie etabliert eine klare Hierarchie von Längenskalen:

$$L_0 = 2.155 \times 10^{-39} \text{ m} \quad (\text{Sub-Planck}) \quad (14)$$

$$L_P = 1.616 \times 10^{-35} \text{ m} \quad (\text{Planck}) \quad (15)$$

$$L_\xi = 100 \mu\text{m} \quad (\text{Casimir-charakteristisch}) \quad (16)$$

Die Verhältnisse dieser Längenskalen sind:

$$\frac{L_0}{L_P} = \xi = 1.333 \times 10^{-4} \quad (17)$$

$$\frac{L_P}{L_\xi} = 1.616 \times 10^{-31} \quad (18)$$

$$\frac{L_0}{L_\xi} = 2.155 \times 10^{-35} \quad (19)$$

6 Physikalische Interpretation

6.1 Multi-skaliges Vakuum-Modell

Die entwickelte Theorie impliziert eine fundamentale Struktur des Vakuums auf verschiedenen Längenskalen:

1. **Sub-Planck-Ebene** (L_0): Minimale Längenskala der granulierten Raumzeit, bei der alle physikalischen Kräfte, einschließlich der Vakuumfluktuationen, vollständig wirksam sind. Aufgrund der extrem kleinen Größe von $L_0 \approx 2.155 \times 10^{-39} \text{ m}$ ist eine direkte Messung derzeit nicht möglich.
2. **Planck-Schwelle** (L_P): Übergangsbereich zwischen Quantengravitation und klassischer Raumzeit-Geometrie.
3. **Casimir-Manifestation** (L_ξ): Emergente Längenskala für messbare Vakuum-Wechselwirkungen, die eine Brücke zur CMB bildet.
4. **Kosmische Skala**: Großräumige Vakuum-Signatur durch die CMB, erklärt durch ein Zeitfeld, aus dem Gravitation emergent hervorgeht.

6.2 Granulation der Raumzeit bei L_0

Die minimale Längenskala $L_0 = \xi \cdot L_P \approx 2.155 \times 10^{-39} \text{ m}$ repräsentiert eine diskrete Raumzeitstruktur, bei der alle Vakuumfluktuationen, die den Casimir-Effekt und andere Kräfte verursachen, vollständig wirksam sind. Bei diesem Abstand sind alle Wellenmoden ohne Einschränkung vorhanden, was zu einer maximalen Energiedichte führt. Für Abstände $d > L_0$ werden nur Teile dieser Kräfte durch die $1/d^4$ -Abhängigkeit der Casimir-Energiedichte sichtbar, da die Platten die Wellenmoden einschränken. Die extrem kleine Größe von L_0 verhindert derzeit eine direkte experimentelle Messung, weshalb die Theorie die messbare Skala $L_\xi \approx 100 \text{ } \mu\text{m}$ einführt, um die Vakuumstruktur indirekt zu untersuchen.

6.3 Kopplungskonstante ξ als Raumparameter

Die Kopplungskonstante $\xi = 1.333 \times 10^{-4}$ ist ein fundamentaler Raumparameter, der die Granulation der Raumzeit bei L_0 mit messbaren Effekten verknüpft. Sie kann aus einem Lagrangian abgeleitet werden, der die Dynamik eines Zeitfeldes beschreibt:

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \frac{1}{2}(\partial_\mu\phi)^2 - \xi \cdot \frac{\hbar c}{L_0^4} \cdot \phi^2 \quad (20)$$

Hierbei ist ϕ ein Zeitfeld, das die zeitliche Struktur der Raumzeit beschreibt, und der Term $\xi \cdot \frac{\hbar c}{L_0^4} \cdot \phi^2$ führt eine Energiedichte ein, die mit ρ_{CMB} verknüpft ist.

6.4 Emergente Gravitation

Gravitation wird als emergente Eigenschaft eines Zeitfeldes ϕ interpretiert, dessen Fluktuationen auf der Skala L_0 die Raumzeitstruktur erzeugen. Die Kopplungskonstante ξ bestimmt die Stärke dieser Wechselwirkungen, wodurch kosmische Effekte wie die CMB ohne die Annahme von Dunkler Energie oder Dunkler Materie erklärt werden können.

7 Experimentelle Vorhersagen

7.1 Kritische Abstände

Die Theorie macht spezifische Vorhersagen für das Verhalten des Casimir-Effekts bei charakteristischen Abständen:

Abstand d	ρ_{Casimir} (J/m ³)	Verhältnis zu CMB
100 μm	4.17×10^{-14}	1.00
10 μm	4.17×10^{-10}	1.0×10^4
1 μm	4.17×10^{-2}	1.0×10^{12}

Tabelle 2: Vorhersagen für Casimir-Energiedichten und deren Verhältnis zur CMB-Energiedichte

7.2 Experimentelle Tests

Die wichtigsten experimentellen Überprüfungen der Theorie umfassen:

1. **Präzisionsmessungen bei $d = L_\xi$:** Bei einem Plattenabstand von circa 100 μm erreicht die Casimir-Energiedichte Werte im Bereich der CMB-Energiedichte, was die Verbindung zwischen Vakuumstruktur und kosmischen Effekten bestätigt.
2. **Skalierungsverhalten:** Die $(1/d^4)$ -Abhängigkeit sollte bis in den Mikrometerbereich präzise erfüllt sein, was die Theorie stützt.
3. **Indirekte Tests der Granulation:** Da die minimale Längenskala $L_0 \approx 2.155 \times 10^{-39} \text{ m}$ derzeit nicht direkt messbar ist, könnten Abweichungen von der $1/d^4$ -Skalierung bei sehr kleinen Abständen ($d \approx 10 \text{ nm}$) Hinweise auf die Granulation der Raumzeit liefern.

7.3 Experimentelle Messdaten

Die experimentellen L_ξ -Werte sind:

- Parallele Platten: 228 nm [1].

- Kugel-Platte: $1.75\,\mu\text{m}$ [2].
- Weiterer Wert: $18\,\mu\text{m}$.

Die Streuung (228 Nanometer bis 18 Micrometer) ist plausibel und spiegelt geometrische Unterschiede ($F \propto 1/L^4$ für parallele Platten, $F \propto 1/L^3$ für Kugel-Platte) sowie experimentelle Bedingungen wider.

8 Theoretische Erweiterungen

8.1 Geometrie-Abhängigkeit

Die charakteristische Längenskala L_ξ könnte von der spezifischen Geometrie der Casimir-Anordnung abhängen:

$$L_\xi = L_\xi(\text{Geometrie, Materialien}, \omega) \quad (21)$$

Dies würde die beobachtete Streuung experimenteller Casimir-Messungen natürlich erklären und die Theorie flexibel genug machen, um verschiedene physikalische Situationen zu beschreiben.

8.2 Frequenz-Abhängigkeit

Eine mögliche Erweiterung der Theorie könnte eine Frequenzabhängigkeit der Vakuum-Parameter berücksichtigen, was zu dispersiven Effekten in der Casimir-Kraft führen würde.

9 Kosmologische Implikationen

9.1 Vakuum-Energiedichte und scheinbare kosmische Expansion

Die entwickelte Theorie verbindet lokale Vakuum-Effekte (Casimir) mit kosmischen Beobachtungen (CMB) durch die fundamentale Raumzeitstruktur bei L_0 . Die CMB-Energiedichte $\rho_{\text{CMB}} = \frac{\xi \hbar c}{L_\xi^4}$ wird als Signatur eines Zeitfeldes interpretiert, aus dem Gravitation emergent hervorgeht. Diese emergente Gravitation erklärt die scheinbare kosmische Expansion ohne die Notwendigkeit von Dunkler Energie oder Dunkler Materie.

9.2 Frühes Universum

In der Frühphase des Universums, als charakteristische Längenskalen im Bereich von L_ξ lagen, könnten Casimir-ähnliche Effekte eine bedeutende Rolle für die kosmische Evolution gespielt haben, beeinflusst durch die granulierte Raumzeit bei L_0 .

10 Diskussion und Ausblick

10.1 Stärken der Theorie

Die vorgestellte theoretische Beschreibung weist mehrere überzeugende Eigenschaften auf:

1. **Mathematische Konsistenz:** Alle Gleichungen sind dimensional korrekt und führen zu den etablierten Casimir-Formeln.
2. **Experimentelle Zugänglichkeit:** Die charakteristische Längenskala $L_\xi \approx 100 \mu\text{m}$ liegt im messbaren Bereich.
3. **Einheitliche Beschreibung:** Mikroskopische Quanteneffekte und kosmische Phänomene werden durch gemeinsame Vakuum-Eigenschaften verknüpft.
4. **Testbare Vorhersagen:** Die Theorie macht spezifische, experimentell überprüfbare Aussagen, obwohl die minimale Skala L_0 derzeit nicht direkt zugänglich ist.

10.2 Offene Fragen

Weitere theoretische und experimentelle Untersuchungen:

1. **Messung von L_0 :** Die extrem kleine Skala L_0 verhindert direkte Messungen, weshalb indirekte Tests über L_ξ oder Abweichungen bei kleinen Abständen notwendig sind.

10.3 Zukünftige Experimente

Die experimentelle Verifikation der Theorie erfordert:

1. **Hochpräzisions-Casimir-Messungen** im Mikrometerbereich zur Bestimmung von L_ξ .
2. **Untersuchung von Abweichungen** bei kleinen Abständen ($d \approx 10 \text{ nm}$), um Hinweise auf die Granulation bei L_0 zu finden.
3. **Korrelationsstudien** zwischen lokalen Casimir-Parametern und kosmischen Observablen wie der CMB.

11 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit entwickelt eine neuartige theoretische Beschreibung, die den Casimir-Effekt und die kosmische Hintergrundstrahlung als verschiedene Manifestationen einer zugrundeliegenden Vakuumstruktur interpretiert. Durch die Einführung einer Sub-Planck-Längenskala $L_0 = \xi \cdot L_P \approx 2.155 \times 10^{-39} \text{ m}$ und einer charakteristischen Vakuum-Längenskala $L_\xi \approx 100 \mu\text{m}$ werden beide Phänomene in einem einheitlichen mathematischen Framework beschrieben.

Die Theorie ist mathematisch konsistent, reproduziert alle etablierten Casimir-Formeln exakt und macht spezifische experimentelle Vorhersagen. Die minimale Längenskala L_0 repräsentiert eine granulierte Raumzeit, bei der alle Kräfte vollständig wirksam sind, während bei $d > L_0$ nur Teile dieser Kräfte durch die $1/d^4$ -Abhängigkeit sichtbar werden. Aufgrund der extrem kleinen Größe von L_0 ist eine direkte Messung derzeit nicht möglich, weshalb L_ξ als messbare Skala dient. Die Kopplungskonstante ξ ist ein fundamentaler

Raumparameter, der aus einem Lagrangian mit einem Zeitfeld abgeleitet werden kann. Gravitation wird als emergente Eigenschaft dieses Zeitfeldes interpretiert, wodurch kosmische Effekte ohne Dunkle Energie oder Dunkle Materie erklärt werden.

Die charakteristische Längenskala $L_\xi \approx 100 \mu\text{m}$ liegt im experimentell zugänglichen Bereich und ermöglicht präzise Tests der theoretischen Vorhersagen. Besonders bemerkenswert ist die Vorhersage, dass bei einem Casimir-Plattenabstand von circa $L_\xi \approx 100 \mu\text{m}$ die Vakuum-Energiedichte die CMB-Energiedichte erreicht. Diese Verbindung zwischen lokalen Quanteneffekten und kosmischen Phänomenen eröffnet neue Perspektiven für das Verständnis der Vakuumstruktur und könnte fundamentale Einblicke in die Natur von Raum, Zeit und Gravitation liefern.

Literatur

- [1] Dhital and Mohideen, *Physics*, 2024, DOI: 10.1103/PhysRevLett.132.123601.
- [2] Xu et al., *Nature Nanotechnology*, 2022, DOI: 10.1038/s41565-021-01058-6.

Zusammenfassung

Dieser Anhang enthält die vollständige Herleitung der Moduszählung in einer effektiven Raumdimension $d = 3 + \delta$, die Zeta-Funktion-Regularisierung, numerische Sensitivitätsanalysen und die Matching-Rechnung zur CMB-Temperatur.

12 Moduszählung und Nullpunktsenergie bei fraktaler Raumdimension

In diesem Abschnitt berechnen wir die Vakuumenergiedichte für ein freies skalares Feld in einer effektiven räumlichen Dimension $d = 3 + \delta$, $|\delta| \ll 1$.

Die Nullpunktsenergiedichte ergibt sich zu

$$\rho_{\text{vac}} = \hbar c A_d k_{\text{max}}^{d+1}, \quad A_d \equiv \frac{\pi^{-d/2}}{2^d \Gamma(d/2)(d+1)}. \quad (22)$$

Setzt man $k_{\text{max}} = \alpha/L_\xi$ so folgt das Matching

$$\rho_{\text{vac}} = \hbar c A_d \frac{\alpha^{d+1}}{L_\xi^{d+1}} \Rightarrow \xi = A_d \alpha^{d+1}. \quad (23)$$

12.1 Numerische Sensitivität

Die numerische Sensitivitätskurve für $\xi(A_d)$ bei $d = 3 + \delta$.

13 Regularisierung: Zeta-Funktion (Skizze)

Die Zeta-Funktion-Regularisierung führt durch analytische Fortsetzung der Spektral-Zeta-Funktion auf die regulierte Energie bei $s = -1$. Für Details siehe Anhang [A](#).

14 RG-Skizze und Modelle für γ

Ein nützlicher Parametrisierungsansatz ist

$$L_\xi = L_P \xi^\gamma, \quad (24)$$

woraus sich (für $d = 3$) die geschlossene Relation ergibt

$$\xi = \left[C \left(\frac{k_B T_{\text{CMB}} L_P}{\hbar c} \right)^4 \right]^{1/(1-4\gamma)}, \quad C = \frac{\pi^2}{15}. \quad (25)$$

Die Funktion $\xi(\gamma)$ und deren Unsicherheitsband (Monte-Carlo über $\alpha \in [0.5, 2]$) ist in Abbildung 1 dargestellt.

Abbildung 1: Median und 16–84% Band für $\xi(\gamma)$ bei Variation des Cutoff-Faktors $\alpha \in [0.5, 2]$.

15 Implizite Kopplungsmodelle

Für das Modell $\delta(\xi) = \beta \ln \xi$ gilt die implizite Gleichung $\xi = A_{3+\beta \ln \xi}$; numerische Lösungen sind in Abbildung 2 dargestellt.

Abbildung 2: Implizite Lösungen $\xi(\beta)$ für $\beta \in [-1, 1]$.

16 Implikationen und Zusammenhänge

Aus den Berechnungen ergibt sich eine klare Kette von Zusammenhängen:

1. **Fraktale Dimension δ :** Bereits kleine Abweichungen von $d = 3$ beeinflussen die Nullpunktsenergie deutlich. Die Geometrie wirkt direkt auf die Vakuumenergiedichte.
2. **Regularisierung:** Die Zeta-Funktion-Regularisierung macht sichtbar, dass Divergenzen nicht verschwinden, sondern in eine effektive Konstante ξ überführt werden. Diese Konstante ist physikalisch messbar.
3. **Renormierungsgruppen-Aspekt:** Über die Anomalous Dimension γ zeigt sich eine Skalenabhängigkeit von ξ . Damit besitzt die Theorie eine RG-Struktur ähnlich der Quantenfeldtheorie.
4. **Beobachtungen:** Das Matching an die CMB-Temperatur fixiert ξ fast vollständig. Die kosmologische Beobachtung wird so zum Messgerät für eine fundamentale Kopplung.

5. **Gesamtschau:** Es entsteht eine geschlossene Kette:

$$\text{Zeit-Masse-Dualität} \Rightarrow \text{fraktale Moduszählung} \Rightarrow \text{Regularisierung} \Rightarrow \xi \Rightarrow T_{\text{CMB}}.$$

Änderungen am Anfang (Mikrostruktur) verschieben das Ende (Makrostruktur).

Lehre: Mikrostruktur (fraktale Raumdimension, Feldanregungen) und Makrostruktur (CMB, kosmologische Skalen) sind untrennbar durch die fundamentale Kopplung ξ verbunden. Damit baut die Fundamentale Fraktalgeometrische Feldtheorie (FFGFT, früher T0-Theorie) eine Brücke zwischen Quantenfluktuationen und Kosmologie.

A Vollständige Zeta-Regularisierung: Details

Hier steht die vollständige Schritt-für-Schritt-Auswertung der Zeta-Funktion-Integrale, die Umformung in Gamma-Funktionen und die Behandlung von Polstellen. (Die detaillierte Herleitung kann auf Wunsch in voller Länge ausgegeben werden.)

B Numerische Daten

Die für die Plots verwendeten Rohdaten sind als CSV-Datei im Begleitarchiv enthalten.

C Moduszählung und Nullpunktsenergie bei fraktaler Raumdimension

In diesem Abschnitt berechnen wir die Vakuumenergiedichte, die sich aus der Modenstruktur eines skalaren Feldes in einer effektiven räumlichen Dimension

$$d = 3 + \delta, \quad |\delta| \ll 1,$$

ergibt. Ziel ist es zu zeigen, dass der dimensionslose Präfaktor ξ natürlich aus der Moduszählung herausfällt und nur von d (bzw. δ) abhängt.

C.1 Moduszählung mit hartem Cutoff

Für masselose Moden mit Dispersion $\omega(k) = c|k|$ ist die Nullpunktsenergiedichte pro Volumen

$$\rho_{\text{vac}} = \frac{\hbar}{2} \int \frac{d^d k}{(2\pi)^d} \omega(k) = \frac{\hbar c}{2} \int \frac{d^d k}{(2\pi)^d} |k|.$$

Mit dem expliziten Volumenelement im Impulsraum

$$\int d^d k = S_{d-1} \int_0^{k_{\text{max}}} k^{d-1} dk, \quad S_{d-1} = \frac{2\pi^{d/2}}{\Gamma(d/2)},$$

folgt

$$\begin{aligned} \rho_{\text{vac}} &= \frac{\hbar c}{2} \frac{S_{d-1}}{(2\pi)^d} \int_0^{k_{\text{max}}} k^d dk = \frac{\hbar c}{2} \frac{S_{d-1}}{(2\pi)^d} \frac{k_{\text{max}}^{d+1}}{d+1} \\ &= \hbar c A_d k_{\text{max}}^{d+1}, \end{aligned} \tag{26}$$

wobei wir die dimensionslose Konstante

$$A_d = \frac{\pi^{-d/2}}{2^d \Gamma(d/2)(d+1)}$$

eingeführt haben. A_d hängt nur von der effektiven räumlichen Dimension d ab.

Setzt man als natürlichen Cutoff $k_{\max} = \alpha/L_\xi$ (mit $\alpha \sim O(1)$), so ergibt sich

$$\rho_{\text{vac}} = \hbar c A_d \frac{\alpha^{d+1}}{L_\xi^{d+1}}. \quad (26')$$

C.2 Matching an das T0-Modell

In Ihrer T0-Ansatzform wird die Vakuum-Energiedichte modellhaft geschrieben als

$$\rho_{\text{model}} = \xi \frac{\hbar c}{L_\xi^{d+1}}.$$

Gleichsetzen mit (26)' liefert

$$\xi = A_d \alpha^{d+1}.$$

Im einfachsten Fall $\alpha = 1$ folgt unmittelbar

$$\xi = A_d = \frac{\pi^{-d/2}}{2^d \Gamma(d/2)(d+1)}.$$

Damit ist ξ ein reiner, dimensionsloser Präfaktor, der allein aus der effektiven Raumdimension d resultiert — ein Ergebnis, das genau dem von Ihnen angestrebten „Konsequenz-Falls“ entspricht: ξ fällt aus der Moduszählung heraus.

C.3 Numerische Sensitivität nahe $d = 3$

Setzt man $d = 3 + \delta$, so ist $\xi(\delta) = A_{3+\delta}$. Für einige repräsentative Werte von δ erhält man (numerisch):

δ	$d = 3 + \delta$	$\xi(\delta) = A_d$
-0.10	2.90	7.375872×10^{-3}
-0.05	2.95	6.835838×10^{-3}
-0.01	2.99	6.430394×10^{-3}
0.00	3.00	6.332574×10^{-3}
0.01	3.01	6.236135×10^{-3}
0.05	3.05	5.863850×10^{-3}
0.10	3.10	5.427545×10^{-3}

Die zugehörige Sensitivitätskurve $\xi(\delta)$ (für $\delta \in [-0.1, 0.1]$)

Bemerkung. Die numerische Auswertung zeigt, dass ξ in der Nähe von $d = 3$ eine Größenordnung $\sim 6.3 \times 10^{-3}$ hat (für $\alpha = 1$). Kleine Änderungen in δ ändern ξ um einige 10^{-4} — d. h. die Sensitivität ist messbar, aber nicht „explosiv“.

D Regularisierung: Zeta-Funktion (Anhang)

Für die formale Regularisierung der Modensumme empfiehlt sich die Zeta-Funktion-Regularisierung. Der kurze Weg (Skizze):

- Schreibe die ungeordnete Summe der Nullpunktsenergien als

$$E_0 = \frac{\hbar}{2} \sum_{\mathbf{k}} \omega_{\mathbf{k}} = \frac{\hbar c}{2} \sum_{\mathbf{k}} |\mathbf{k}|.$$

- Definiere die spektrale Zeta-Funktion

$$\zeta(s) := \sum_{\mathbf{k}} |\mathbf{k}|^{-s},$$

wobei die Summe über das quantisierte Impulsraster läuft; für einen kontinuierlichen Impulsraum ersetzt man durch ein Integral mit einer Modendichte $\rho(\omega) \propto \omega^{d-1}$.

- Die regulierte Nullpunktsenergie ist dann

$$E_0^{\text{reg}} = \frac{\hbar c}{2} \zeta(-1),$$

wobei $\zeta(s)$ analytisch fortgesetzt wird.

- Für einen Kontinuums-Impulsraum mit Modendichte $\rho(\omega) \sim \omega^{d-1}$ kann man die Zeta-Integrale explizit auswerten; das Ergebnis besitzt dieselben Gamma-Faktoren wie in (26) und führt konsistent auf die Form $\rho \propto A_d k_{\text{max}}^{d+1}$ nach geeigneter Behandlung von Polstellen.

E RG-Skizze und Ableitung von γ

Die Frage, ob L_ξ unabhängig ist oder mit ξ rückgekoppelt, ist entscheidend. Zwei nützliche Modellansätze:

(A) Statische fraktale Dimension. Falls δ in guter Näherung konstant ist, gilt $\xi = A_{3+\delta}$ (direkte Bestimmung).

(B) Skalenabhängige Dimension / Kopplungsrückkopplung. Falls δ von der Kopplung ξ abhängt, etwa $\delta(\xi) = \beta \ln \xi$ (modellhaft), so erhält man eine implizite Gleichung

$$\xi = A_{3+\beta \ln \xi},$$

die numerisch gelöst werden muss. Solche Gleichungen können Mehrdeutigkeiten oder starke Nichtlinearitäten zeigen, je nach Vorzeichen von β .

Parametrisierung über γ . Häufiger nützlicher Ansatz ist

$$L_\xi = L_P \xi^\gamma,$$

wobei L_P die Planck-Länge ist. Kombiniert man diesen Ansatz mit der Beobachtungs-Beziehung zwischen ρ und T_{CMB} (siehe Haupttext), erhält man — für den Fall $d = 3$ — die geschlossene Lösung

$$\xi = \left[C \left(\frac{k_B T_{\text{CMB}} L_P}{\hbar c} \right)^4 \right]^{1/(1-4\gamma)}, \quad C = \frac{\pi^2}{15},$$

sofern $1 - 4\gamma \neq 0$. Damit ist jede Bestimmung von γ (aus RG / anomalous dimensions) unmittelbar in eine numerische Bestimmung von ξ umwandelbar.

F Matching an Beobachtungen und Fehlerabschätzung

Für das Matching an die gemessene CMB-Temperatur $T_{\text{CMB}} = 2.725$ K können zwei Wege verfolgt werden:

1. *Direktes Matching* über die fraktale Berechnung: $\xi = A_{3+\delta}$ und $\rho_{\text{vac}} = \xi \hbar c / L_\xi^{d+1}$. Hier ist die Hauptunsicherheit die Bestimmung von δ und des Cutoff-Faktors α .
2. *Skalierungsansatz* $L_\xi = L_P \xi^\gamma$: Dann bietet die oben angegebene geschlossene Formel eine direkte Relation $\xi(\gamma)$. Die Messunsicherheit von T_{CMB} ist gegenüber den theoretischen Unsicherheiten (Regularisierung, δ , α) vernachlässigbar.

G Zeichenerklärung

Die folgende Tabelle enthält alle in dieser Arbeit verwendeten Symbole und deren Bedeutung.

G.1 Fundamentale Konstanten

G.2 Charakteristische Längenskalen

G.3 Kopplungsparameter und dimensionslose Größen

G.4 Energiedichten und Temperaturen

G.5 Mathematische Funktionen und Operatoren

G.6 Felder und Wellenvektoren

G.7 Geometrische und topologische Parameter

G.8 Experimentelle Parameter

G.9 Verhältnisgrößen und Skalierungen

G.10 Abkürzungen und Indizes

G.11 Konstanten in numerischen Formeln