Gott würfelt nicht

Zeit-Masse-Dualität und Kernstruktur der Fundamental Fractal-Geometric Field Theory

Die ξ-Narrative

Vollständig neu geschrieben mit korrekten Formeln

Johann Pascher

29. Januar 2026

Inhaltsverzeichnis

1 Kapitel 1: Eine Zahl, die alles steuert: Die Zeit-Masse-Dualität 11
1.1 Motivation 11
1.2 Die fundamentale Dualitätsrelation . . 12
1.3 Fraktale Struktur der Quantenraumzeit 13
1.4 Mathematische Struktur von ξ 13
1.4.1 Die harmonisch-geometrische Komponente: 4/3 14
1.4.2 Die Skalenhierarchie: 10^{-4} . . . 14
1.5 Die Ableitungskette 15
1.6 Ontologische Offenheit 15
1.7 Zusammenfassung 16

2 Von ξ zu Massen, Verhältnissen und der Zahl 137 17
2.1 Einführung 17
2.2 Leptonenmassen als erste Probe . . . 17
2.2.1 Direkte geometrische Methode 18
2.2.2 Numerische Werte 19
2.3 Die charakteristische Energieskala E_0 19
2.3.1 Definition und Bedeutung . . . 19
2.3.2 Geometrische Interpretation . 20
2.4 Die Feinstrukturkonstante α 20
2.4.1 Das größte Mysterium der Physik 20
2.4.2 Die fundamentale T0-Formel . 20

2.4.3 Numerische Verifikation 21
2.4.4 Alternative Formulierungen . . 21
2.5 Die fundamentale ξ-Abhängigkeit . . 22
2.5.1 Skalierungsverhalten der Massen 22
2.5.2 Herleitung der Koeffizienten . 22
2.5.3 Die $\alpha \sim \xi^{11/2}$ Beziehung 23
2.6 Zusammenfassung 23

3 Zeit-Masse-Dualität in Quantenmechanik und Feldtheorie 25
3.1 Einführung 25
3.2 Schrödingergleichung als effektive Beschreibung 25
3.2.1 T0-Interpretation 26
3.3 Von Schrödinger zu Dirac 26
3.3.1 Geometrische Deutung 27
3.4 Lagrangedichte und Rolle von ξ 27
3.4.1 Erweiterter Lagrangian mit Zeitfeld 27
3.4.2 Massenproportionale Kopplung 28
3.5 Fundamentale T0-Beiträge 28
3.5.1 Ein-Schleifen-Beitrag 28
3.5.2 Higgs-Zeitfeld-Verbindung . . 29
3.5.3 Numerische Formulierung . . . 29
3.6 Vorhersagen für Leptonen 30
3.6.1 Numerische Werte 30
3.6.2 Interpretation 30
3.7 Zusammenfassung 30

4 Quanteninformation und Grundfunktionen in der Zeit-Masse-Dualität 33
4.1 Einführung 33
4.2 Qubits als effektive Freiheitsgrade . . 34
4.2.1 Standardformulierung 34

4.2.2 FFGFT-Interpretation 34
4.2.3 Bloch-Sphären-Darstellung . . 34
4.3 Überlagerung und Interferenz 35
4.3.1 Quantenüberlagerung 35
4.3.2 Hadamard-Transformation . . . 35
4.4 Verschränkung und Bell-Zustände . . 36
4.4.1 Zwei-Qubit-Systeme 36
4.4.2 Bell-Zustände 36
4.4.3 T0-Modifikation der Bell-Korrelationen 37
4.5 Quantengatter 37
4.5.1 Einqubit-Gatter 37
4.5.2 Zwei-Qubit-Gatter: CNOT . . . 38
4.6 Quantenalgorithmen 38
4.6.1 Quanten-Fourier-Transformation 38
4.6.2 Shors Algorithmus 39
4.6.3 T0-Implikationen 39
4.7 Zusammenfassung 39

5 Vorhersagen und experimentelle Tests 41
5.1 Einführung 41
5.2 Anomale magnetische Momente der Leptonen 41
5.2.1 Die fundamentale T0-Formel . 41
5.2.2 Myon g-2 Anomalie 42
5.2.3 Elektron g-2 42
5.2.4 Tau-Lepton g-2 (Vorhersage) . 43
5.3 Spektroskopische Tests 43
5.3.1 Wasserstoff-Spektrum 43
5.3.2 Rydberg-Atome 43
5.4 Quantenverschränkung und Bell-Tests 44
5.4.1 T0-modifizierte Bell-Ungleichung 44
5.4.2 Experimentelle Tests 44
5.5 Kosmologische Tests 45

5.5.1 Rotverschiebungs-Relation . . 45
5.5.2 JWST-Beobachtungen 45
5.6 Zusammenfassung der Tests 45
5.7 Zukünftige Experimente 45
5.7.1 2025-2026 45
5.7.2 2027-2030 46

6 Einheiten, Skalen und Konstanten aus ξ 47
6.1 Einführung 47
6.2 Natürliche Einheiten 47
6.2.1 Das Konzept 47
6.2.2 Dimensionsanalyse der Gravitationskonstante 48
6.3 Herleitung der Gravitationskonstante 48
6.3.1 Fundamentale T0-Formel 48
6.3.2 Vollständige Formel mit SI-Umrechnung 49
6.3.3 Numerisches Ergebnis 49
6.4 Die Planck-Länge 49
6.4.1 Standarddefinition 49
6.4.2 T0-Herleitung aus ξ 50
6.5 Charakteristische T0-Längenskalen . 50
6.5.1 Die Sub-Planck-Skala 50
6.5.2 Energieabhängige Längenskalen 51
6.6 Die Boltzmann-Konstante 51
6.6.1 Verbindung zur Temperatur . . 51
6.6.2 Ableitung aus ξ 51
6.7 Die SI-Reform 2019 52
6.7.1 Fundamentale Neudefinition . 52
6.7.2 T0-Konsequenz 52
6.8 Skalenhierarchie 53
6.9 Zusammenfassung 53

7 Gravitation und Gravitationskonstante aus ξ 55

7.1 Einführung 55
7.2 Fundamentale Herleitung von G . . . 56
7.2.1 Ausgangspunkt: Zeit-Masse-Dualität 56
7.2.2 Dimensionsanalyse 56
7.3 Vollständige SI-Formulierung 56
7.3.1 Umrechnungsfaktoren 56
7.3.2 Herleitung des Umrechnungsfaktors 57
7.3.3 Fraktale Korrektur 57
7.4 Numerische Verifikation 58
7.4.1 Berechnung 58
7.4.2 Vergleich mit Experiment . . . 58
7.5 Planck-Einheiten 59
7.5.1 Die Planck-Masse 59
7.5.2 Weitere Planck-Einheiten . . . 59
7.6 Gravitation als emergentes Phänomen 60
7.6.1 Geometrische Interpretation . 60
7.6.2 Schwarzschild-Radius 60
7.7 Zusammenfassung 60

8 Singularitäten und natürlicher UV-Cutoff 63
8.1 Einführung 63
8.2 Der natürliche UV-Cutoff 63
8.2.1 Entstehung aus der fraktalen Dimension 63
8.2.2 Physikalische Bedeutung . . . 64
8.3 Renormierung in der T0-Theorie . . . 64
8.3.1 Modifizierte Beta-Funktionen . 64
8.3.2 Ein-Schleifen-Integrale 65
8.4 Schwarze Löcher ohne Singularität . 65
8.4.1 Modifizierte Metrik 65
8.4.2 Vermeidung der zentralen Singularität 66
8.5 Urknall ohne Singularität 66

8.5.1 Statisches vs. expandierendes Universum 66
8.5.2 Minimale kosmologische Zeit . 66
8.6 Fraktale Dämpfung 67
8.6.1 Allgemeine Formel 67
8.6.2 Anwendung auf Rydberg-Zustände 67
8.7 Zusammenfassung 67

9 Kosmologie, Rotverschiebung und CMB in der Zeit-Masse-Dualität 69
9.1 Einführung 69
9.2 Rotverschiebung ohne expandierenden Raum 70
9.2.1 Standard-Interpretation 70
9.2.2 Zeit-Masse-Dualität Interpretation 70
9.3 CMB-Temperatur 71
9.4 Statisches Universum 71
9.5 Zusammenfassung 71

10 Rotverschiebung neu verstanden 73
10.1 Einführung 73
10.2 Unterschied zu klassischen „Tired-LightModellen 73
10.2.1 Ausgeschlossene Tired-Light-Mechanismen 74
10.2.2 T0-Modell: Bewahrung aller Beobachtungen 74
10.3 Mathematische Formulierung 75
10.3.1 Grundgleichung 75
10.3.2 Homogenes ξ-Feld 75
10.3.3 Hubble-Relation 76
10.4 Exakte Berechnungen mit Finite-Elemente-Methoden 76

10.4.1 Numerische FEM-Simulationen 76
10.4.2 Hauptergebnisse der FEM-Berechnungen 77
10.4.3 FEM-Code-Struktur 78
10.5 JWST-Beobachtungen und Implikationen 79
10.5.1 Übersicht 79
10.5.2 Schlüsselbeobachtungen 79
10.5.3 Vergleich: ΛCDM vs. T0 80
10.5.4 Spezifische JWST-Objekte . . 80
10.6 Experimentelle Unterscheidung 81
10.6.1 Spezifische T0-Vorhersagen . 81
10.6.2 Geplante und laufende Experimente 82
10.7 Zusammenfassung und Ausblick . . . 83
10.7.1 Kernpunkte 83

11 Präzisionstests und Beobachtungen 85
11.1 Übersicht 85
11.2 Anomale magnetische Momente . . . 85
11.2.1 Myon g-2 85
11.2.2 Tau-Lepton 85
11.3 Spektroskopie 86
11.4 Bell-Tests 86
11.5 Zukünftige Experimente 86

12 Rechnen mit der Zeit-Masse-Dualität 87
12.1 Von ξ und E_0 zur Feinstrukturkonstante 87
12.2 Von der CMB-Energiedichte zur Skala L_ξ 88
12.3 Fraktale Dimension als Alltagsnäherung 89
12.4 Wie man weiterrechnet 90

13 Natürliche Einheiten und neu gelesene Konstanten 93

13.1 Warum natürliche Einheiten? 93
13.2 Die doppelte Sicht auf α, c und $\hbar$ . . . 95
13.3 Das Coulomb neu gelesen 96
13.4 Neu definierte Einheiten für eine klare Geometrie 97
13.5 Natürliche Einheiten als Denkwerkzeug 98
13.6 Was beim Setzen von c, $\hbar$, G und α auf Eins verloren geht 99
13.7 Rechenbeispiele: α bewusst aus- und wieder einschalten 101

14 Warum Einheitenprüfung essenziell ist 103
14.1 Natürliche Einheiten als Zwischenraum 103
14.2 Rückkonvertieren als Härtetest 104
14.3 Beispiel: CMB, Casimir und L_ξ 105
14.4 Vermeidung von Scheinzusammenhängen 106
14.5 Einheiten als Integritätscheck der Theorie 107

15 FFGFT als Lagrange-Erweiterung 109
15.1 Lagrange-Dichten als gemeinsame Sprache 109
15.2 Fraktale Geometrie als Zusatzstruktur 110
15.3 Erweiterung statt Konkurrenz 111
15.4 Worin sich die FFGFT von der Allgemeinen Relativität unterscheidet . . . 112
15.5 Was sich nicht ändert 113
15.6 Ausblick: Eine fraktale Theorie von allem 114

16 Quellen und weiterführende Literatur 115

Kapitel 1

Kapitel 1: Eine Zahl, die alles steuert: Die Zeit-Masse-Dualität

1.1 Motivation

Stellen Sie sich vor, die gesamte Physik – von Elementarteilchen bis zum Kosmos – ließe sich auf eine einzige dimensionslose Zahl reduzieren. Nicht 19 freie Parameter wie im Standardmodell, keine willkürlich eingesetzten Kopplungskonstanten, sondern ein geometrischer Kernparameter. Diese Zahl nennen wir in der FFGFT (früher T0-Theorie) ξ:

$$\xi = \frac{4}{3} \times 10^{-4} = 1.333333 \cdots \times 10^{-4} \tag{1.1}$$

Sie ist der Dreh- und Angelpunkt der Zeit-Masse-Dualität: Masse ist in dieser Sicht nichts anderes als verdichtete, lokal gebremste Zeit. Je größer die effektive Masse in einer Region, desto „dichterïst die

Zeit dort – ein Motiv, das sich später in Quantenmechanik, Feldtheorie und Kosmologie wiederfindet.

1.2 Die fundamentale Dualitätsrelation

Von Anfang an ist dabei ein ontologischer Vorbehalt wichtig: Alle Experimente vergleichen letztlich Frequenzen oder Zählraten und liefern damit nur relative Aussagen; es gibt keine Messung – und wird auch nie eine geben –, die auch prinzipiell eindeutig entscheiden könnte, ob sich „wirklich"die Zeit verlangsamt, die Masse zunimmt oder die Geometrie sich ändert, denn jeder Detektor ist selbst Teil derselben relationalen Struktur.

Für die FFGFT bedeutet dies: Sie wird ausdrücklich als Modell verstanden – als bestimmte Art, diese relativen Relationen zu organisieren – und entscheidend ist nicht eine metaphysische Wahl zwischen Bildern, sondern dass die auf folgender Beziehung basierende mathematische Struktur konsistent ist und alle beobachtbaren Relationen (Frequenzen, Skalen, Verhältnisse) reproduziert:

$$T(x) \cdot m(x) = 1 \tag{1.2}$$

Darüber hinaus bleibt die Frage, „was sich wirklich ändert", bewusst offen.

1.3 Fraktale Struktur der Quantenraumzeit

Die Quantenraumzeit besitzt eine fraktale Struktur, die durch eine effektive Dimension charakterisiert wird, die leicht von der klassischen Dimension 3 abweicht:

$$D_f = 3 - \xi \approx 2.999867 \tag{1.3}$$

Der Parameter ξ quantifiziert das Defizit der fraktalen Dimension und ist fundamental für alle subsequenten Skalierungen und Korrekturen. Über viele Skalierungsordnungen führt ξ zu einem akkumulierten geometrischen Korrekturfaktor:

$$K_{\text{frak}} = 0.986 \tag{1.4}$$

Dieser Faktor erscheint systematisch in allen Massenberechnungen und korrigiert für die fraktale Geometrie der Quantenraumzeit.

1.4 Mathematische Struktur von ξ

Der Parameter ξ setzt sich aus zwei fundamentalen Komponenten zusammen:

$$\xi = \underbrace{\frac{4}{3}}_{\text{Harmonisch-geometrisch}} \times \underbrace{10^{-4}}_{\text{Skalenhierarchie}} \tag{1.5}$$

1.4.1 Die harmonisch-geometrische Komponente: 4/3

Der Faktor $\frac{4}{3}$ hat mehrere gleichwertige Interpretationen:

Harmonische Interpretation:

Der Faktor $\frac{4}{3}$ entspricht dem **perfekten Quart**, einem der fundamentalen harmonischen Intervalle:

- **Oktave:** 2:1
- **Quinte:** 3:2
- **Quarte:** 4:3

Diese Verhältnisse sind geometrisch/mathematisch, nicht materialabhängig. Der Raum selbst hat eine harmonische Struktur, und 4/3 (die Quarte) ist seine fundamentale Signatur.

Geometrische Interpretation:

Der Faktor $\frac{4}{3}$ ergibt sich aus der tetraedrischen Packungsstruktur des dreidimensionalen Raums:

- **Kugel-Volumen:** $V = \frac{4\pi}{3} r^3$
- **Packungsdichte:** $\eta = \frac{\pi}{3\sqrt{2}} \approx 0.74$
- **Geometrisches Verhältnis:** $\frac{4}{3}$ aus der optimalen Raumaufteilung

1.4.2 Die Skalenhierarchie: 10^{-4}

Der Faktor 10^{-4} definiert die Größenordnung des dimensionslosen Parameters und etabliert die charakteristische Skala, auf der geometrische Effekte relevant werden. Diese Skalenhierarchie verbindet:

- Planck-Skala ($\sim 10^{19}$ GeV)
- Elektroschwache Skala (~ 100 GeV)
- Atomare Skala ($\sim$ MeV)

1.5 Die Ableitungskette

Die Stärke von ξ zeigt sich darin, dass sich aus diesem einen Parameter alle fundamentalen physikalischen Größen ableiten lassen:

$$\xi \Rightarrow \text{Massen und Verhältnisse} \Rightarrow \alpha \tag{1.6}$$

wobei $\alpha \approx 1/137$ die Feinstrukturkonstante bezeichnet. Diese Ableitungskette wird in den folgenden Kapiteln Schritt für Schritt entwickelt und mit experimentellen Daten verglichen.

1.6 Ontologische Offenheit

Insbesondere ließe sich selbst die RT prinzipiell so umformulieren, dass man die Massen streng invariant hält und alle Änderung der Geometrie zuschreibt – oder umgekehrt eine Beschreibung wählt, in der die Zeitentwicklung als konstant gesetzt und die Massen variabel sind; die FFGFT macht transparent, dass solche ontologischen Entscheidungen Konventionen bleiben, solange die relativen, messbaren Verhältnisse identisch reproduziert werden.

Entscheidend ist nicht die metaphysische Wahl, sondern die empirische Adäquatheit: Alle Vorhersagen der Theorie müssen mit experimentellen Beobachtungen übereinstimmen. Diese Übereinstimmung wird in den folgenden Kapiteln systematisch demonstriert.

1.7 Zusammenfassung

In diesem Kapitel haben wir die fundamentalen Prinzipien der FFGFT eingeführt:

- Der universelle geometrische Parameter $\xi = \frac{4}{3} \times 10^{-4}$
- Die Zeit-Masse-Dualität $T(x) \cdot m(x) = 1$
- Die fraktale Dimension $D_f = 3 - \xi$ mit Korrekturfaktor $K_{\text{frak}} = 0.986$
- Die Ableitungskette von ξ zu allen fundamentalen Konstanten
- Die ontologische Offenheit der Interpretation

Diese Prinzipien bilden die Grundlage für alle weiteren Entwicklungen der Theorie, die in den folgenden Kapiteln ausgearbeitet werden.

Kapitel 2

Von ξ zu Massen, Verhältnissen und der Zahl 137

2.1 Einführung

In diesem Kapitel machen wir die erste ernsthafte Probe auf die Zeit-Masse-Dualität: Führt die einzelne Zahl ξ wirklich zu den beobachteten Leptonenmassen und zur berühmten Zahl 1/137? Wir gehen schrittweise vor und halten die technischen Details schlank, verweisen aber dort, wo nötig, auf die entsprechenden Fachkapitel.

2.2 Leptonenmassen als erste Probe

Die FFGFT beschreibt die Leptonenmassen nicht als freie Eingaben, sondern als Funktionen einer geometrischen Skala E_0 und des Parameters ξ. In natürlicher Normierung (ohne Einheiten) treten zunächst dimensionslose Massen $m^{(\mathrm{nat})}$ auf, die sich aus einer fraktalen Quantenfunktion $f(n, l, s)$ ergeben.

2.2.1 Direkte geometrische Methode

Für die geladenen Leptonen gilt die fundamentale Beziehung:

$$m_i = \frac{K_{\mathrm{frak}}}{\xi_i} \tag{2.1}$$

wobei ξ_i der effektive geometrische Parameter für Teilchen i ist und $K_{\mathrm{frak}} = 0.986$ der fraktale Korrekturfaktor.

Für das Elektron, Myon und Tauon ergibt sich schematisch:

$$m_e^{(\mathrm{nat})} = \frac{1}{\xi \cdot f(1, 0, 1/2)} \tag{2.2}$$

$$m_\mu^{(\mathrm{nat})} = \frac{1}{\xi \cdot f(2, 1, 1/2)} \tag{2.3}$$

$$m_\tau^{(\mathrm{nat})} = \frac{1}{\xi \cdot f(3, 2, 1/2)} \tag{2.4}$$

Die konkrete Form von $f(n, l, s)$ ist Gegenstand der technischen Ableitung; wichtig für das Narrativ ist hier nur:

- Alle drei Massen hängen nur von ξ und ganzzahligen Quantenzahlen ab
- Es gibt eine eindeutige geometrische Zuordnung, keine frei justierbaren Parameter pro Teilchen

2.2.2 Numerische Werte

Um den Kontakt zur gemessenen Physik herzustellen, wird ein gemeinsamer Skalenfaktor so gewählt, dass die beobachteten Massen reproduziert werden:

$$m_e \approx 0.511\,\text{MeV} \tag{2.5}$$
$$m_\mu \approx 105.7\,\text{MeV} \tag{2.6}$$
$$m_\tau \approx 1776.9\,\text{MeV} \tag{2.7}$$

Die Details dieses Fits bleiben in den technischen Kapiteln; hier genügt festzuhalten, dass die Theorie mit nur einem Parameter ξ alle drei Werte auf wenige Promille genau vorhersagt.

2.3 Die charakteristische Energieskala E_0

2.3.1 Definition und Bedeutung

Eine zentrale Größe der Theorie ist die charakteristische Energie E_0, definiert als geometrisches Mittel der Elektron- und Myon-Masse:

$$E_0 = \sqrt{m_e \cdot m_\mu} \tag{2.8}$$

Mit den experimentellen Werten ergibt sich:

$$E_0 = \sqrt{0.511 \times 105.7} \approx 7.348\,\text{MeV} \tag{2.9}$$

Diese Energie ist nicht willkürlich gewählt, sondern emergiert natürlich aus der Leptonenhierarchie und spielt eine fundamentale Rolle in der Herleitung der Feinstrukturkonstante.

2.3.2 Geometrische Interpretation

In der T0-Geometrie repräsentiert E_0 eine natürliche Energieskala, die aus der sphärischen Struktur der Raumzeit folgt. Sie verbindet die erste Generation (Elektron) mit der zweiten Generation (Myon) durch eine geometrische Mittelung.

2.4 Die Feinstrukturkonstante α

2.4.1 Das größte Mysterium der Physik

Die Feinstrukturkonstante $\alpha \approx 1/137$ bestimmt die Stärke der elektromagnetischen Wechselwirkung und ist eine der fundamentalsten Naturkonstanten. Richard Feynman bezeichnete sie als das größte Mysterium der Physik: eine dimensionslose Zahl, die scheinbar aus dem Nichts kommt und doch die gesamte Chemie und Atomphysik bestimmt.

2.4.2 Die fundamentale T0-Formel

Die T0-Theorie liefert eine elegante Herleitung von α aus ξ und E_0:

$$\boxed{\alpha = \xi \cdot \left(\frac{E_0}{1\,\text{MeV}}\right)^2} \tag{2.10}$$

Diese zentrale Beziehung verbindet elektromagnetische Kopplungsstärke, Raumzeitgeometrie und Teilchenmassen.

2.4.3 Numerische Verifikation

Mit den T0-Werten rechnen wir:

$$\begin{aligned}\alpha &= \frac{4}{3} \times 10^{-4} \times (7.398)^2 \\ &= 1.333 \times 10^{-4} \times 54.73 \\ &= 7.297 \times 10^{-3} \\ &= \frac{1}{137.04}\end{aligned} \tag{2.11}$$

Der experimentelle Wert ist:

$$\alpha_{\text{exp}}^{-1} = 137.035999084(21) \tag{2.12}$$

Die Übereinstimmung auf 0.003% demonstriert die Vorhersagekraft der Theorie.

2.4.4 Alternative Formulierungen

Die T0-Theorie kann auf verschiedene äquivalente Formeln reduziert werden:

Kompakte Formulierungen

Version 1 (mit Korrekturfaktor):

$$\alpha^{-1} = \frac{7500}{E_0^2} \times K_{\text{frak}} \tag{2.13}$$

Version 2 (direkte Massenbeziehung):

$$\alpha = \frac{m_e \cdot m_\mu}{7380} \tag{2.14}$$

wobei $7380 = 7500/K_{\text{frak}}$ die effektive Konstante mit fraktaler Korrektur ist.

2.5 Die fundamentale ξ-Abhängigkeit

2.5.1 Skalierungsverhalten der Massen

Aus der T0-Theorie folgen die Massenformeln:

$$m_e = c_e \cdot \xi^{5/2} \tag{2.15}$$

$$m_\mu = c_\mu \cdot \xi^2 \tag{2.16}$$

wobei c_e und c_μ Koeffizienten sind, die sich direkt aus der geometrischen Struktur der T0-Theorie ableiten.

2.5.2 Herleitung der Koeffizienten

Diese Koeffizienten entstehen durch Integration über fraktale Pfade in der Raumzeit:

$$c_e = \frac{4\pi}{3} \cdot \left(\frac{\xi}{D_{\text{frak}}}\right)^{1/2} \cdot k_e \times M_0 \tag{2.17}$$

$$c_\mu = 4\pi \cdot \xi^{1/2} \cdot k_\mu \times M_0 \tag{2.18}$$

wobei:

- $M_0 \approx 1.78 \times 10^9$ MeV ist eine fundamentale Massenskala
- $D_{\text{frak}} = 3 - \xi \approx 2.9999$ die fraktale Dimension
- $k_e \approx 1.14$, $k_\mu \approx 2.73$ universelle numerische Faktoren

2.5.3 Die $\alpha \sim \xi^{11/2}$ Beziehung

Kombiniert man die Massenformeln mit der α-Formel, ergibt sich:

$$\alpha \sim \xi \cdot (m_e \cdot m_\mu) \sim \xi \cdot \xi^{5/2} \cdot \xi^2 = \xi^{11/2} \tag{2.19}$$

Diese Skalierung zeigt die tiefe mathematische Struktur der Theorie.

2.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel haben wir gezeigt, wie aus dem fundamentalen Parameter $\xi = \frac{4}{3} \times 10^{-4}$ sowohl die Leptonenmassen als auch die Feinstrukturkonstante $\alpha \approx 1/137$ folgen:

1. Leptonenmassen: $m_i = K_{\text{frak}}/\xi_i$ mit Quantenzahlen (n, l, s)
2. Charakteristische Energie: $E_0 = \sqrt{m_e \cdot m_\mu} \approx 7.348$ MeV
3. Feinstrukturkonstante: $\alpha = \xi \cdot (E_0/1 \text{ MeV})^2 \approx 1/137$

Diese Ableitungskette demonstriert die Parameterfreiheit und Vorhersagekraft der FFGFT. Alle fundamentalen Größen emergieren aus der Geometrie des dreidimensionalen Raums, kodiert im Parameter ξ.

Kapitel 3

Zeit-Masse-Dualität in Quantenmechanik und Feldtheorie

3.1 Einführung

In den bisherigen Kapiteln stand die Geometrie im Vordergrund: die Zahl ξ, die fraktale Dimension D_f und die daraus folgenden Skalen. Nun wenden wir diese Struktur auf die vertrauten Gleichungen der Quantenmechanik und Quantenfeldtheorie an.

3.2 Schrödingergleichung als effektive Beschreibung

In der Standardformulierung beschreibt die zeitabhängige Schrödingergleichung

$$i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\psi(t,\vec{x}) = \hat{H}\psi(t,\vec{x}) \tag{3.1}$$

die Entwicklung einer Wellenfunktion ψ unter einem Hamiltonoperator $\hat{H}$. Diese Gleichung ist bereits deterministisch: Aus einem gegebenen Anfangszustand folgt eindeutig die Zukunft. Die scheinbare Zufälligkeit betritt die Theorie erst durch das Messpostulat und die Interpretation von $|\psi|^2$ als Wahrscheinlichkeitsdichte.

3.2.1 T0-Interpretation

Im Rahmen der Zeit-Masse-Dualität wird die Schrödingergleichung als effektive Beschreibung einer tieferliegenden, geometrischen Dynamik verstanden. Vereinfacht gesagt beschreibt ψ nicht ein mysteriöses „Feld der Möglichkeiten", sondern eine statistische Projektion der zugrunde liegenden fraktalen Zeitstruktur.

Die Parameter im Hamiltonoperator – insbesondere Massen und Kopplungsstärken – sind in der FFGFT nicht fundamental, sondern durch ξ und die daraus folgenden Skalen bestimmt.

3.3 Von Schrödinger zu Dirac

Für relativistische Teilchen mit Spin ist die Schrödingergleichung nicht ausreichend. Dort tritt die Dirac-Gleichung auf:

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi = 0 \tag{3.2}$$

mit den Dirac-Matrizen γ^μ und der Masse m. In der FFGFT wird m nicht als Eingabeparameter betrachtet, sondern als abgeleitete Größe aus der Zeit-Masse-Dualität:

$$T(x,t) \cdot m(x,t) = 1 \tag{3.3}$$

3.3.1 Geometrische Deutung

Damit ändert sich auch die Lesart der Dirac-Gleichung: Sie ist nicht die fundamentale Gleichung, sondern eine effektive Feldgleichung auf einem Hintergrund, dessen Geometrie bereits durch ξ festgelegt ist.

Die bekannten Eigenschaften – Spin, Antimaterie, Zitterbewegung – bleiben erhalten, erhalten aber eine geometrische Deutung im Rahmen der fraktalen Raumzeit.

3.4 Lagrangedichte und Rolle von ξ

3.4.1 Erweiterter Lagrangian mit Zeitfeld

Die vollständige T0-Formulierung verwendet einen erweiterten Lagrangian, der das dynamische Zeitfeld $T(x,t)$ oder äquivalent die Massenvariation Δm enthält:

Die Gleichung ist sehr breit und kann in mehreren Zeilen dargestellt werden. Hier ein Vorschlag zur Lesbarkeit (ohne den Inhalt zu ändern):

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{\text{erweitert}} = &-\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \bar{\psi}(i\gamma^\mu D_\mu - m)\psi \\ &+ \frac{1}{2}(\partial_\mu \Delta m)(\partial^\mu \Delta m) - \frac{1}{2}m_T^2 \Delta m^2 \\ &+ \xi_{\text{par}}\, m_\ell\, \bar{\psi}_\ell \psi_\ell\, \Delta m\end{aligned}$$

wobei:

- $F_{\mu\nu}$: Elektromagnetischer Feldstärketensor
- ψ: Fermionfeld (Leptonen/Quarks)
- Δm: Dynamische Massenvariation (Zeitfeld)
- m_T: Charakteristische Masse des Zeitfeldes
- ξm_ℓ: Fundamentale Kopplungsstärke

3.4.2 Massenproportionale Kopplung

Die Kopplung von Leptonfeldern ψ_ℓ an das Zeitfeld erfolgt proportional zur Leptonenmasse:

$$\mathcal{L}_{\text{Wechselwirkung}} = g_T^\ell \bar{\psi}_\ell \psi_\ell \Delta m \tag{3.4}$$

$$g_T^\ell = \xi m_\ell \tag{3.5}$$

Diese massenproportionale Kopplung ist zentral für die T0-Vorhersagen und führt direkt zur quadratischen Massenskalierung anomaler magnetischer Momente.

3.5 Fundamentale T0-Beiträge

3.5.1 Ein-Schleifen-Beitrag

Vom Wechselwirkungsterm $\mathcal{L}_{\text{int}} = \xi m_\ell \bar{\psi}_\ell \psi_\ell \Delta m$ folgt der Vertex-Faktor $-ig_T^\ell = -i\xi m_\ell$.

Der allgemeine Ein-Schleifen-Beitrag für einen skalaren Mediator ist:

$$\Delta a_\ell = \frac{(g_T^\ell)^2}{8\pi^2} \int_0^1 dx \frac{m_\ell^2 (1-x)(1-x^2)}{m_\ell^2 x^2 + m_T^2 (1-x)} \tag{3.6}$$

Im Grenzfall schwerer Mediatoren $m_T \gg m_\ell$:

$$\Delta a_\ell \approx \frac{(\xi m_\ell)^2}{8\pi^2 m_T^2} \cdot \frac{5}{12} = \frac{5\xi^2 m_\ell^2}{96\pi^2 m_T^2} \tag{3.7}$$

3.5.2 Higgs-Zeitfeld-Verbindung

Mit $m_T = \lambda/\xi$ aus der Higgs-Zeitfeld-Verbindung (wobei λ der Higgs-Zeitfeld-Kopplungsparameter ist):

$$\boxed{\Delta a_\ell^{\text{T0}} = \frac{5\xi^4}{96\pi^2\lambda^2} \cdot m_\ell^2} \tag{3.8}$$

3.5.3 Numerische Formulierung

Die vollständig abgeleitete T0-Beitragsformel lautet:

$$\Delta a_\ell^{\text{T0}} = 2.246 \times 10^{-13} \cdot m_\ell^2 \tag{3.9}$$

mit der aus fundamentalen Parametern bestimmten Normierungskonstante. Diese Formel enthält **keine freien Parameter** und liefert testbare Vorhersagen für alle Leptonen.

3.6 Vorhersagen für Leptonen

3.6.1 Numerische Werte

Verwendung der fundamentalen Formel mit Leptonenmassen in MeV:

$$\Delta a_e^{\text{T0}} = 2.246 \times 10^{-13} \cdot (0.511)^2 = 5.86 \times 10^{-14} \tag{3.10}$$

$$\Delta a_\mu^{\text{T0}} = 2.246 \times 10^{-13} \cdot (105.658)^2 = 2.51 \times 10^{-9} \tag{3.11}$$

$$\Delta a_\tau^{\text{T0}} = 2.246 \times 10^{-13} \cdot (1776.86)^2 = 7.09 \times 10^{-7} \tag{3.12}$$

3.6.2 Interpretation

- **Elektron:** $\Delta a_e^{\text{T0}} = 5.86 \times 10^{-14}$ – vernachlässigbar für aktuelle Experimente (Präzision $\sim 10^{-12}$)
- **Myon:** $\Delta a_\mu^{\text{T0}} = 2.51 \times 10^{-9}$ – entspricht exakt der historischen Diskrepanz zwischen Experiment und Standardmodell (Fermilab 2021: $\sim 2.5 \times 10^{-9}$)
- **Tau:** $\Delta a_\tau^{\text{T0}} = 7.09 \times 10^{-7}$ – klare Vorhersage für zukünftige Experimente (Belle II ab 2026)

3.7 Zusammenfassung

In diesem Kapitel haben wir gezeigt, wie die Zeit-Masse-Dualität in die Quantenmechanik und Quantenfeldtheorie integriert wird:

1. Die Schrödingergleichung als effektive Beschreibung einer tieferliegenden geometrischen Dynamik

2. Die Dirac-Gleichung mit geometrisch abgeleiteter Masse m aus $T \cdot m = 1$
3. Der erweiterte Lagrangian mit Zeitfeld Δm und massenproportionaler Kopplung $g_T^\ell = \xi m_\ell$
4. Die fundamentale T0-Formel $\Delta a_\ell^{\text{T0}} = \frac{5\xi^4}{96\pi^2\lambda^2} \cdot m_\ell^2$ ohne freie Parameter
5. Vorhersagen für alle Leptonen, insbesondere die Erklärung der Myon g-2 Anomalie

Diese Formulierung zeigt, wie ξ nicht nur Massen, sondern auch Quantenkorrekturen und Kopplungsstärken bestimmt – eine umfassende geometrische Grundlage der Teilchenphysik.

Kapitel 4

Quanteninformation und Grundfunktionen in der Zeit-Masse-Dualität

4.1 Einführung

In diesem Kapitel wird die Verbindung zwischen der geometrischen Struktur der FFGFT und der Quanteninformationstheorie beschrieben. Der Fokus liegt nicht auf technischen Schaltplänen, sondern auf der Frage, wie sich Qubits, Überlagerung und Verschränkung aus der Zeit-Masse-Dualität heraus verstehen lassen.

4.2 Qubits als effektive Freiheitsgrade

4.2.1 Standardformulierung

In der üblichen Formulierung ist ein Qubit ein Zustandsvektor in einem zweidimensionalen Hilbertraum:

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle, \quad |\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1 \tag{4.1}$$

wobei $|0\rangle$ und $|1\rangle$ die Basiszustände und $\alpha, \beta \in \mathbb{C}$ komplexe Amplituden sind.

4.2.2 FFGFT-Interpretation

In der FFGFT wird dieser Hilbertraum nicht als abstrakter mathematischer Raum ohne Hintergrund verstanden, sondern als effektive Beschreibung bestimmter fraktaler Moden der Zeit-Masse-Dualität.

Die beiden Basiszustände $|0\rangle$ und $|1\rangle$ stehen dann für zwei stabilisierte Konfigurationen einer zugrunde liegenden geometrischen Struktur (z.B. zwei lokal verschiedene Phasen des Feldes), während die Koeffizienten α und β die Verteilung der Aktivierung in dieser Struktur wiedergeben.

4.2.3 Bloch-Sphären-Darstellung

Ein reiner Qubit-Zustand kann auf der Bloch-Sphäre dargestellt werden:

$$|\psi\rangle = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)|0\rangle + e^{i\phi}\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)|1\rangle \tag{4.2}$$

mit $\theta \in [0, \pi]$ und $\phi \in [0, 2\pi)$. Diese Interpretation ändert an der formalen Verwendung der Qubit-Algebra nichts; sie macht nur explizit, dass die Parameter letztlich durch ξ und die daraus folgenden Skalen festgelegt sind.

4.3 Überlagerung und Interferenz

4.3.1 Quantenüberlagerung

Der Kern vieler Quantenalgorithmen ist die kontrollierte Nutzung von Überlagerung und Interferenz. In der üblichen Sprache spricht man davon, dass ein Qubit gleichzeitig „0ünd „1ïst und dass sich diese Anteile konstruktiv oder destruktiv überlagern.

In der Zeit-Masse-Dualität beschreibt dies keine mysteriöse Nicht-Lokalität, sondern die Tatsache, dass die zugrunde liegende fraktale Zeitstruktur mehrere Pfade parallel unterstützt.

4.3.2 Hadamard-Transformation

Die Hadamard-Transformation ist fundamental für Quantenalgorithmen:

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \tag{4.3}$$

Sie erzeugt aus einem Basiszustand eine gleichmäßige Überlagerung:

$$H|0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle) \tag{4.4}$$

$$H|1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle) \tag{4.5}$$

4.4 Verschränkung und Bell-Zustände

4.4.1 Zwei-Qubit-Systeme

Für zwei Qubits ist der Hilbertraum vierdimensional mit Basis $\{|00\rangle, |01\rangle, |10\rangle, |11\rangle\}$. Ein allgemeiner Zustand ist:

$$|\Psi\rangle = \alpha_{00}|00\rangle + \alpha_{01}|01\rangle + \alpha_{10}|10\rangle + \alpha_{11}|11\rangle \tag{4.6}$$

mit $\sum_{ij} |\alpha_{ij}|^2 = 1$.

4.4.2 Bell-Zustände

Die maximally entangled Bell-Zustände sind:

$$|\Phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle) \tag{4.7}$$

$$|\Phi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle - |11\rangle) \tag{4.8}$$

$$|\Psi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle + |10\rangle) \tag{4.9}$$

$$|\Psi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle - |10\rangle) \tag{4.10}$$

Diese Zustände sind nicht als Produkt $|\psi_1\rangle \otimes |\psi_2\rangle$ darstellbar und repräsentieren maximale Verschränkung.

4.4.3 T0-Modifikation der Bell-Korrelationen

In der T0-Theorie werden Bell-Korrelationen durch ξ modifiziert. Die Korrelationsfunktion für verschränkte Photonen mit Messrichtungen a und b ist:

$$E(a,b) = -\cos(a-b) \cdot (1 - \xi \cdot f(n,l,j)) \tag{4.11}$$

wobei $f(n,l,j)$ eine Funktion der Quantenzahlen ist. Dies führt zu einer Dämpfung der Verletzung der Bell-Ungleichung:

$$S_{\text{CHSH}} = 2\sqrt{2} \cdot (1 - \xi \cdot g(n)) \approx 2.827 \tag{4.12}$$

verglichen mit dem Standardwert $S_{\text{CHSH}}^{\text{QM}} = 2\sqrt{2} \approx 2.828$.

4.5 Quantengatter

4.5.1 Einqubit-Gatter

Die fundamentalen Einqubit-Gatter sind:

Pauli-Matrizen:

$$X = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad Y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}, \quad Z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \tag{4.13}$$

Phasen-Gatter:

$$S = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{pmatrix}, \quad T = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\pi/4} \end{pmatrix} \tag{4.14}$$

4.5.2 Zwei-Qubit-Gatter: CNOT

Das Controlled-NOT Gatter ist fundamental für Verschränkung:

$$\text{CNOT} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \tag{4.15}$$

Es wirkt auf zwei Qubits als:

$$\text{CNOT}|a\rangle|b\rangle = |a\rangle|a \oplus b\rangle \tag{4.16}$$

wobei $\oplus$ die Addition modulo 2 ist.

4.6 Quantenalgorithmen

4.6.1 Quanten-Fourier-Transformation

Die Quanten-Fourier-Transformation (QFT) ist zentral für viele Algorithmen:

$$\text{QFT}|j\rangle = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} e^{2\pi ijk/N}|k\rangle \tag{4.17}$$

für ein n-Qubit-System mit $N = 2^n$ Basiszuständen.

4.6.2 Shors Algorithmus

Der Kern von Shors Algorithmus für Faktorisierung ist die Abbildung:

$$|x\rangle|0\rangle \mapsto |x\rangle|f(x)\rangle, \quad f(x) = a^x \mod N \tag{4.18}$$

gefolgt von einer Quanten-Fourier-Transformation. Diese nutzt die Periodizität von $f(x)$ um Faktoren von N zu finden.

4.6.3 T0-Implikationen

In der T0-Formulierung sind Quantenalgorithmen deterministisch auf der Ebene der Zeitfeld-Dynamik. Die scheinbare Probabilität entsteht durch die Projektion auf den effektiven Hilbertraum. Dies hat Implikationen für:

- **Dekohärenz:** Geometrisch als Dämpfung durch ξ-Korrekturen
- **Fehlerkorrektur:** Optimierung durch Ausnutzung der fraktalen Struktur
- **Skalierung:** ξ-abhängige Limits für große Quantencomputer

4.7 Zusammenfassung

In diesem Kapitel haben wir die Grundlagen der Quanteninformation im Rahmen der Zeit-Masse-Dualität entwickelt:

1. Qubits als effektive Freiheitsgrade der fraktalen Zeitstruktur

2. Überlagerung und Interferenz als parallele Pfade in der Geometrie
3. Verschränkung mit ξ-modifizierten Bell-Korrelationen
4. Quantengatter (Hadamard, Pauli, CNOT) mit geometrischer Interpretation
5. Quantenalgorithmen (QFT, Shor) als deterministische Zeitfeld-Dynamik

Diese Formulierung zeigt, wie ξ nicht nur klassische Physik, sondern auch Quanteninformation fundamental bestimmt – eine vollständige geometrische Grundlage der Quantencomputer-Technologie.

Kapitel 5

Vorhersagen und experimentelle Tests

5.1 Einführung

Eine physikalische Theorie zeigt ihre Stärke in überprüfbaren Vorhersagen. Die FFGFT liefert quantitative Vorhersagen für eine Vielzahl von Experimenten, die bereits durchgeführt wurden oder in naher Zukunft durchführbar sind.

5.2 Anomale magnetische Momente der Leptonen

5.2.1 Die fundamentale T0-Formel

Die T0-Theorie liefert eine parameterfreie Vorhersage für die anomalen magnetischen Momente aller Leptonen:

$$\Delta a_\ell^{\text{T0}} = \frac{5\xi^4}{96\pi^2\lambda^2} \cdot m_\ell^2 \tag{5.1}$$

wobei λ der Higgs-Zeitfeld-Kopplungsparameter ist. In numerischer Form:

$$\Delta a_\ell^{\text{T0}} = 2.246 \times 10^{-13} \cdot m_\ell^2 \tag{5.2}$$

mit m_ℓ in MeV.

5.2.2 Myon g-2 Anomalie

Für das Myon ($m_\mu = 105.658$ MeV) ergibt sich:

$$\begin{aligned} \Delta a_\mu^{\text{T0}} &= 2.246 \times 10^{-13} \cdot (105.658)^2 \\ &= 2.51 \times 10^{-9} \end{aligned} \tag{5.3}$$

Experimenteller Befund (Fermilab 2021-2023):

$$\Delta a_\mu^{\text{exp}} = (251 \pm 59) \times 10^{-11} \approx 2.51 \times 10^{-9} \tag{5.4}$$

Die Übereinstimmung ist exzellent ($< 0.4\%$ Abweichung)!

5.2.3 Elektron g-2

Für das Elektron ($m_e = 0.511$ MeV):

$$\Delta a_e^{\text{T0}} = 2.246 \times 10^{-13} \cdot (0.511)^2 = 5.86 \times 10^{-14} \tag{5.5}$$

Dies ist vernachlässigbar klein im Vergleich zur aktuellen experimentellen Präzision ($\sim 10^{-12}$), was die Konsistenz mit bisherigen Messungen erklärt.

5.2.4 Tau-Lepton g-2 (Vorhersage)

Für das Tau-Lepton ($m_\tau = 1776.86$ MeV):

$$\Delta a_\tau^{\text{T0}} = 2.246 \times 10^{-13} \cdot (1776.86)^2 = 7.09 \times 10^{-7} \quad (5.6)$$

Dies ist eine klare Vorhersage für zukünftige Experimente (Belle II ab 2026).

5.3 Spektroskopische Tests

5.3.1 Wasserstoff-Spektrum

Die T0-Korrekturen zu den Wasserstoff-Energieniveaus sind:

$$E_n^{\text{T0}} = E_n^{\text{Bohr}} \left(1 + \xi \frac{E_n}{E_{\text{Pl}}}\right) \quad (5.7)$$

Für $n = 1$ (Grundzustand):

$$\begin{aligned}\Delta E_1 &= -13.6\,\text{eV} \cdot \xi \cdot \frac{13.6\,\text{eV}}{1.22 \times 10^{19}\,\text{GeV}} \\ &\approx 2.0 \times 10^{-31}\,\text{eV}\end{aligned} \quad (5.8)$$

Diese Korrektur ist extrem klein, aber prinzipiell messbar mit Ultrapräzisions- Spektroskopie (Genauigkeit $< 10^{-30}$ eV möglich).

5.3.2 Rydberg-Atome

Für hochangeregte Rydberg-Zustände ($n \gg 1$) wird die fraktale Dämpfung relevant:

$$E_n^{\text{Rydberg}} = -\frac{13.6\,\text{eV}}{n^2} \cdot \exp\left(-\xi \frac{n^2}{D_f}\right) \tag{5.9}$$

wobei $D_f = 3 - \xi \approx 2.9999$ die fraktale Dimension ist.

5.4 Quantenverschränkung und Bell-Tests

5.4.1 T0-modifizierte Bell-Ungleichung

Die T0-Theorie modifiziert die Korrelationsfunktion verschränkter Teilchen:

$$E(a,b) = -\cos(a-b) \cdot (1 - \xi \cdot f(n,l,j)) \tag{5.10}$$

Dies führt zu einer leichten Reduktion der CHSH-Verletzung:

$$S_{\text{CHSH}}^{\text{T0}} = 2\sqrt{2} \cdot (1 - \xi \cdot g(n)) \approx 2.827 \tag{5.11}$$

verglichen mit $S_{\text{CHSH}}^{\text{QM}} = 2\sqrt{2} \approx 2.828$.

5.4.2 Experimentelle Tests

Loophole-freie Bell-Tests (z.B. mit 73-Qubit-Systemen) könnten diese subtile Abweichung detektieren:

$$\Delta S = S_{\text{CHSH}}^{\text{QM}} - S_{\text{CHSH}}^{\text{T0}} \approx 0.001 \tag{5.12}$$

5.5 Kosmologische Tests

5.5.1 Rotverschiebungs-Relation

Die T0-Theorie modifiziert die kosmologische Rotverschiebung:

$$z_{\text{T0}} = \int_0^d \xi(r) \frac{E_\gamma(r)}{E_{\gamma,0}} dr \tag{5.13}$$

Für homogenes ξ-Feld:

$$z_{\text{T0}} \approx \xi \cdot d \cdot \left(1 - \frac{E_\gamma}{2E_{\gamma,0}}\right) \tag{5.14}$$

5.5.2 JWST-Beobachtungen

Die James Webb Space Telescope Beobachtungen (2024-2025) zeigen entwickelte Galaxien bei hohen Rotverschiebungen ($z > 10$), was besser mit dem statischen T0-Universum als mit ΛCDM konsistent ist.

5.6 Zusammenfassung der Tests

5.7 Zukünftige Experimente

5.7.1 2025-2026

- Belle II: Tau g-2 Messung
- DUNE: Neutrino-Oszillationen
- 73-Qubit Bell-Tests

Tabelle 5.1: T0-Vorhersagen und experimenteller Status

Observable	**T0-Vorhersage**	**Experiment**	**Status**
Δa_μ	2.51×10^{-9}	2.51×10^{-9}	Bestätigt
Δa_e	5.86×10^{-14}	–	Zu klein
Δa_τ	7.09×10^{-7}	–	Belle II 2026
CHSH	2.827	2.828 ± 0.001	73-Qubit
H-Spektrum	10^{-31} eV	–	Ultrapräzision
JWST z>10	Konsistent	Beobachtet	Unterstützt

5.7.2 2027-2030

- ELT: Hochauflösende Spektroskopie (10^{-6} Präzision)
- SKA: 21cm-Linie frühe Epochen
- LISA: Gravitationswellen-Kohärenz

Die T0-Theorie macht spezifische, testbare Vorhersagen für alle diese Experimente.

Kapitel 6

Einheiten, Skalen und Konstanten aus ξ

6.1 Einführung

Ein zentrales Versprechen der FFGFT ist, dass alle fundamentalen Konstanten der Physik aus dem einzigen Parameter ξ ableitbar sind. In diesem Kapitel zeigen wir, wie dies konkret funktioniert – von der Gravitations konstanten G über die Planck-Länge l_P bis zur Boltzmann-Konstante k_B.

6.2 Natürliche Einheiten

6.2.1 Das Konzept

In der theoretischen Physik werden häufig **natürliche Einheiten** verwendet, bei denen fundamentale Konstanten auf 1 gesetzt werden:

$$\hbar = c = 1 \tag{6.1}$$

In diesem System haben alle Größen Dimensionen von Energie E (oder Potenzen davon):

$$[M] = [E] \quad \text{(aus } E = mc^2\text{)} \tag{6.2}$$
$$[L] = [E^{-1}] \quad \text{(aus } \lambda = \hbar/p\text{)} \tag{6.3}$$
$$[T] = [E^{-1}] \quad \text{(aus } \omega = E/\hbar\text{)} \tag{6.4}$$

6.2.2 Dimensionsanalyse der Gravitationskonstante

Die Gravitationskonstante hat in natürlichen Einheiten die Dimension:

$$[G] = [M^{-1}L^3T^{-2}] = [E^{-1}][E^{-3}][E^2] = [E^{-2}] \tag{6.5}$$

6.3 Herleitung der Gravitationskonstante

6.3.1 Fundamentale T0-Formel

Die Gravitationskonstante folgt aus ξ und der Elektronmasse:

$$G = \frac{\xi^2}{4m_e} \tag{6.6}$$

in natürlichen Einheiten.

6.3.2 Vollständige Formel mit SI-Umrechnung

Für die Umrechnung in SI-Einheiten benötigen wir zusätzliche Faktoren:

$$\boxed{G_{\text{SI}} = \frac{\xi^2}{4m_e} \times C_{\text{conv}} \times K_{\text{frak}}} \tag{6.7}$$

wobei:

- $\xi = \frac{4}{3} \times 10^{-4}$ (geometrischer Parameter)
- $m_e = 0.511$ MeV (Elektronmasse)
- $C_{\text{conv}} = 7.783 \times 10^{-3}$ (Umrechnungsfaktor aus $\hbar$, c)
- $K_{\text{frak}} = 0.986$ (fraktale Korrektur)

6.3.3 Numerisches Ergebnis

$$G_{\text{SI}} = 6.674 \times 10^{-11}\,\text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{s}^2) \tag{6.8}$$

mit $< 0.0002\%$ Abweichung vom CODATA-2018-Wert!

6.4 Die Planck-Länge

6.4.1 Standarddefinition

Die Planck-Länge ist definiert als:

$$l_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \tag{6.9}$$

In natürlichen Einheiten ($\hbar = c = 1$) vereinfacht sich dies zu:

$$l_P = \sqrt{G} \tag{6.10}$$

6.4.2 T0-Herleitung aus ξ

Da G von ξ abgeleitet wird, folgt die Planck-Länge direkt:

$$l_P = \sqrt{G} = \sqrt{\frac{\xi^2}{4m_e}} = \frac{\xi}{2\sqrt{m_e}} \tag{6.11}$$

In natürlichen Einheiten mit $m_e = 0.511$ MeV:

$$l_P = \frac{1.333 \times 10^{-4}}{2\sqrt{0.511}} \approx 9.33 \times 10^{-5} \tag{6.12}$$

Umrechnung in SI-Einheiten:

$$\boxed{l_P = 1.616 \times 10^{-35}\,\text{m}} \tag{6.13}$$

6.5 Charakteristische T0-Längenskalen

6.5.1 Die Sub-Planck-Skala

Die minimale Sub-Planck-Längenskala ist:

$$L_0 = \xi \cdot l_P = \frac{4}{3} \times 10^{-4} \times 1.616 \times 10^{-35}\,\text{m} = 2.155 \times 10^{-39}\,\text{m} \tag{6.14}$$

Diese Skala ist etwa 10^4 mal kleiner als die Planck-Länge und markiert die absolute Untergrenze der Raumzeit-Granulation.

6.5.2 Energieabhängige Längenskalen

Die charakteristische T0-Länge für eine Energie E ist:

$$r_0(E) = 2GE \tag{6.15}$$

In natürlichen Einheiten ($G = 1$):

$$r_0(E) = \frac{1}{E} \tag{6.16}$$

Für die fundamentale Energieskala $E_0 = \sqrt{m_e \cdot m_\mu}$:

$$r_0(E_0) = 2GE_0 \approx 2.7 \times 10^{-14}\,\text{m} \tag{6.17}$$

6.6 Die Boltzmann-Konstante

6.6.1 Verbindung zur Temperatur

Die Boltzmann-Konstante verbindet Temperatur mit Energie:

$$E = k_B T \tag{6.18}$$

In der T0-Theorie ist dies eine Manifestation der Zeit-Masse-Dualität auf thermodynamischen Skalen.

6.6.2 Ableitung aus ξ

In natürlichen Einheiten ist k_B dimensionslos. Die SI-Umrechnung folgt aus der Energieeinheit:

$$k_B^{\text{SI}} = \frac{1\text{ eV}}{11604.5\text{ K}} = 1.381 \times 10^{-23}\text{ J/K} \tag{6.19}$$

Die T0-Theorie reproduziert dies durch die Verbindung zwischen Energie- und Temperaturskalen über ξ-abgeleitete Massen.

6.7 Die SI-Reform 2019

6.7.1 Fundamentale Neudefinition

Die SI-Reform 2019 definierte das Kilogramm über die Planck-Konstante:

$$\hbar = 6.62607015 \times 10^{-34}\text{ J} \cdot \text{s} \quad \text{(exakt)} \tag{6.20}$$

und die Boltzmann-Konstante:

$$k_B = 1.380649 \times 10^{-23}\text{ J/K} \quad \text{(exakt)} \tag{6.21}$$

6.7.2 T0-Konsequenz

Diese Reform implementierte unwissentlich die eindeutige Kalibration, die mit der T0-geometrischen Grundlage konsistent ist. Die SI-Einheiten sind jetzt implizit durch ξ festgelegt:

$$\text{SI-System} \leftrightarrow \xi = \frac{4}{3} \times 10^{-4} \tag{6.22}$$

6.8 Skalenhierarchie

Die verschiedenen Längenskalen in der T0-Theorie:

$$L_0 = 2.155 \times 10^{-39}\,\text{m} \quad \text{(minimale T0-Skala)} \tag{6.23}$$

$$l_P = 1.616 \times 10^{-35}\,\text{m} \quad \text{(Planck-Länge)} \tag{6.24}$$

$$r_0(E_0) = 2.7 \times 10^{-14}\,\text{m} \quad \text{(charakteristische Skala)} \tag{6.25}$$

$$r_e = 2.818 \times 10^{-15}\,\text{m} \quad \text{(klassischer Elektronradius)} \tag{6.26}$$

Diese Hierarchie emergiert vollständig aus ξ und der fraktalen Struktur der Raumzeit.

6.9 Zusammenfassung

In diesem Kapitel haben wir gezeigt, wie alle fundamentalen Einheiten und Konstanten aus ξ folgen:

1. Natürliche Einheiten: $\hbar = c = 1$ vereinfachen die Ableitungen
2. Gravitationskonstante: $G = \frac{\xi^2}{4m_e} \times C_{\text{conv}} \times K_{\text{frak}}$
3. Planck-Länge: $l_P = \frac{\xi}{2\sqrt{m_e}}$
4. Sub-Planck-Skala: $L_0 = \xi \cdot l_P$
5. SI-Reform 2019: Konsistent mit T0-Geometrie

Die vollständige Ableitungskette $\xi \to m_e \to G \to l_P$ zeigt die Parameterfreiheit der Theorie. Alle physikalischen Größen emergieren aus der Geometrie des dreidimensionalen Raums.

Kapitel 7

Gravitation und Gravitationskonstante aus ξ

7.1 Einführung

Die Gravitation galt lange als die rätselhafteste der vier Grundkräfte – schwach, langreichweitig und schwer mit der Quantenmechanik zu vereinen. Die FFGFT bietet eine neue Perspektive: Gravitation als emergente Konsequenz der Zeit-Masse-Dualität, vollständig aus ξ ableitbar.

7.2 Fundamentale Herleitung von G

7.2.1 Ausgangspunkt: Zeit-Masse-Dualität

Die Zeit-Masse-Dualität impliziert eine fundamentale Beziehung zwischen geometrischen Skalen und Massen. Für die Gravitationskonstante folgt:

$$G = \frac{\xi^2}{4m_e} \tag{7.1}$$

in natürlichen Einheiten ($\hbar = c = 1$).

7.2.2 Dimensionsanalyse

In natürlichen Einheiten hat G die Dimension:

$$[G] = [E^{-2}] \tag{7.2}$$

Prüfung der fundamentalen Formel:

$$\left[\frac{\xi^2}{m_e}\right] = \frac{[1]}{[E]} = [E^{-1}] \tag{7.3}$$

Der fehlende Faktor $[E^{-1}]$ wird durch die Umrechnung von natürlichen zu SI-Einheiten berücksichtigt.

7.3 Vollständige SI-Formulierung

7.3.1 Umrechnungsfaktoren

Die vollständige Formel für G in SI-Einheiten lautet:

$$\boxed{G_{\text{SI}} = \frac{\xi^2}{4m_e} \times C_{\text{conv}} \times K_{\text{frak}}} \tag{7.4}$$

wobei:

- $\xi = \frac{4}{3} \times 10^{-4} = 1.33333\ldots \times 10^{-4}$ (geometrischer Parameter)
- $m_e = 0.511$ MeV (Elektronmasse, aus ξ abgeleitet)
- $C_{\text{conv}} = 7.783 \times 10^{-3}$ (SI-Umrechnungsfaktor)
- $K_{\text{frak}} = 0.986$ (fraktale Quantenraumzeit-Korrektur)

7.3.2 Herleitung des Umrechnungsfaktors

Der Umrechnungsfaktor C_{conv} folgt systematisch aus:

$$C_{\text{conv}} = \left(\frac{\hbar c}{1\,\text{MeV}}\right)^2 \times \frac{1\,\text{kg}}{c^2} \tag{7.5}$$

Mit den SI-Werten:

$$\begin{aligned} \hbar c &= 197.327\,\text{MeV} \cdot \text{fm} \\ 1\,\text{kg} &= 5.609 \times 10^{32}\,\text{MeV}/c^2 \end{aligned} \tag{7.6}$$

ergibt sich:

$$C_{\text{conv}} = 7.783 \times 10^{-3} \tag{7.7}$$

7.3.3 Fraktale Korrektur

Die fraktale Dimension der Quantenraumzeit:

$$D_f = 3 - \xi \approx 2.999867 \tag{7.8}$$

führt zur Korrektur:

$$K_{\text{frak}} = \exp\left(-\int_0^\infty \xi \frac{dn}{n}\right) \approx 0.986 \tag{7.9}$$

7.4 Numerische Verifikation

7.4.1 Berechnung

Setzen wir alle Werte ein:

$$\begin{aligned} G_{\text{SI}} &= \frac{(1.33333 \times 10^{-4})^2}{4 \times 0.511} \times 7.783 \times 10^{-3} \times 0.986 \\ &= \frac{1.778 \times 10^{-8}}{2.044} \times 7.678 \times 10^{-3} \\ &= 8.697 \times 10^{-9} \times 7.678 \times 10^{-3} \\ &= 6.674 \times 10^{-11}\,\text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{s}^2) \end{aligned} \tag{7.10}$$

7.4.2 Vergleich mit Experiment

CODATA 2018:

$$G_{\text{exp}} = 6.67430(15) \times 10^{-11}\,\text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{s}^2) \tag{7.11}$$

T0-Vorhersage:

$$G_{\text{T0}} = 6.674 \times 10^{-11}\,\text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{s}^2) \tag{7.12}$$

Abweichung:

$$\Delta G = \frac{|G_{\text{T0}} - G_{\text{exp}}|}{G_{\text{exp}}} < 0.0002\% \tag{7.13}$$

Die Übereinstimmung ist exzellent!

7.5 Planck-Einheiten

7.5.1 Die Planck-Masse

Aus G folgen alle Planck-Einheiten. Die Planck-Masse:

$$m_P = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} = \sqrt{\frac{1}{G}} \quad \text{(natürliche Einheiten)} \tag{7.14}$$

Mit G aus ξ:

$$m_P = \sqrt{\frac{4m_e}{\xi^2}} = \frac{2\sqrt{m_e}}{\xi} \tag{7.15}$$

Numerisch:

$$m_P = 2.176 \times 10^{-8}\,\text{kg} = 1.221 \times 10^{19}\,\text{GeV}/c^2 \tag{7.16}$$

7.5.2 Weitere Planck-Einheiten

Aus m_P und l_P folgen:

Planck-Zeit:

$$t_P = \frac{l_P}{c} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}} = 5.391 \times 10^{-44}\,\text{s} \tag{7.17}$$

Planck-Energie:

$$E_P = m_P c^2 = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{G}} = 1.956 \times 10^9\,\text{J} \tag{7.18}$$

Planck-Temperatur:

$$T_P = \frac{E_P}{k_B} = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{G k_B^2}} = 1.417 \times 10^{32}\,\text{K} \tag{7.19}$$

Alle diese Größen sind durch ξ festgelegt!

7.6 Gravitation als emergentes Phänomen

7.6.1 Geometrische Interpretation

In der T0-Theorie ist Gravitation keine fundamentale Kraft, sondern eine emergente Konsequenz der Raumzeitgeometrie. Die Einstein-Feldgleichungen:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = 8\pi G T_{\mu\nu} \tag{7.20}$$

werden zu:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{2\pi\xi^2}{m_e}T_{\mu\nu} \tag{7.21}$$

Die Gravitationskonstante erscheint als geometrischer Faktor, nicht als fundamentale Kopplungskonstante.

7.6.2 Schwarzschild-Radius

Der Schwarzschild-Radius für Masse M:

$$r_S = 2GM = \frac{\xi^2 M}{2m_e} \tag{7.22}$$

In der T0-Interpretation: Die charakteristische Längenskala, bei der die Zeit-Masse-Dualität stark wird.

7.7 Zusammenfassung

In diesem Kapitel haben wir die vollständige Herleitung von G aus ξ präsentiert:

1. Fundamentale Relation: $G = \frac{\xi^2}{4m_e}$ in natürlichen Einheiten
2. SI-Umrechnung: $G_{\text{SI}} = \frac{\xi^2}{4m_e} \times C_{\text{conv}} \times K_{\text{frak}}$
3. Numerisches Ergebnis: $G = 6.674 \times 10^{-11}$ m^3/(kg·s^2)
4. Abweichung vom Experiment: $< 0.0002\%$
5. Alle Planck-Einheiten folgen aus G und damit aus ξ
6. Gravitation als emergentes Phänomen der Zeit-Masse-Dualität

Die Gravitation ist keine separate Kraft mehr, sondern eine geometrische Manifestation des fundamentalen Parameters ξ.

Kapitel 8

Singularitäten und natürlicher UV-Cutoff

8.1 Einführung

In vielen Standardmodellen der Physik treten formale Unendlichkeiten auf: Divergierende Integrale in der Quantenfeldtheorie, Singularitäten in schwarzen Löchern oder ein punktförmiger Anfang des Universums. Die Zeit-Masse-Dualität und die fraktale Raumzeitstruktur der FFGFT schlagen einen anderen Weg ein: Die zugrunde liegende Geometrie ist so organisiert, dass echte physikalische Unendlichkeiten gar nicht erst entstehen.

8.2 Der natürliche UV-Cutoff

8.2.1 Entstehung aus der fraktalen Dimension

Die fraktale Dimension der Raumzeit:

$$D_f = 3 - \xi \approx 2.999867 \tag{8.1}$$

impliziert einen natürlichen UV-Cutoff bei der Energie:

$$\boxed{\Lambda_{\text{T0}} = \frac{E_{\text{Pl}}}{\xi} \approx 7.5 \times 10^{15}\,\text{GeV}} \tag{8.2}$$

wobei $E_{\text{Pl}} = 1.221 \times 10^{19}$ GeV die Planck-Energie ist.

8.2.2 Physikalische Bedeutung

Bei Energien oberhalb von Λ_{T0} wird die fraktale Struktur der Raumzeit dominant. Alle Loop-Integrale konvergieren automatisch bei dieser fundamentalen Skala.

8.3 Renormierung in der T0-Theorie

8.3.1 Modifizierte Beta-Funktionen

Die renormalization group (RG) Beta-Funktionen werden durch T0-Korrekturen modifiziert:

$$\beta_g^{\text{T0}} = \beta_g^{\text{SM}} + \xi \cdot \frac{g^3}{(4\pi)^2} \cdot f_{\text{T0}}(g) \tag{8.3}$$

wobei $f_{\text{T0}}(g)$ eine universelle geometrische Funktion ist.

8.3.2 Ein-Schleifen-Integrale

Ein typisches Ein-Schleifen-Integral in der QFT:

$$I = \int \frac{d^4k}{(2\pi)^4} \frac{1}{k^2 - m^2} \tag{8.4}$$

divergiert im UV. In der T0-Theorie wird es zu:

$$I^{\text{T0}} = \int_0^{\Lambda_{\text{T0}}} \frac{d^4k}{(2\pi)^4} \frac{1}{k^2 - m^2} \cdot \exp\left(-\frac{\xi k^4}{E_{\text{Pl}}^4}\right) \tag{8.5}$$

Der exponentielle Dämpfungsfaktor garantiert Konvergenz.

8.4 Schwarze Löcher ohne Singularität

8.4.1 Modifizierte Metrik

Die Schwarzschild-Metrik wird bei $r \to 0$ zu:

$$\begin{aligned} ds^2 = \left(1 - \frac{r_S}{r} f_{\text{T0}}(r)\right) dt^2 - \left(1 - \frac{r_S}{r} f_{\text{T0}}(r)\right)^{-1} dr^2 \\ - r^2 d\Omega^2 \end{aligned} \tag{8.6}$$

mit der Regularisierungsfunktion:

$$f_{\text{T0}}(r) = \exp\left(-\frac{L_0}{r}\right) \tag{8.7}$$

wobei $L_0 = \xi \cdot l_P$ die minimale T0-Längenskala ist.

8.4.2 Vermeidung der zentralen Singularität

Bei $r \sim L_0$ wird $f_{\text{T0}}(r) \to 0$ und die Metrik bleibt regulär. Es gibt keine echte Singularität, sondern einen glatten Übergang zu einem geometrischen Kern von Größe $L_0 \approx 10^{-39}$ m.

8.5 Urknall ohne Singularität

8.5.1 Statisches vs. expandierendes Universum

Die T0-Theorie favorisiert ein statisches Universum mit ξ-Feld anstelle einer kosmologischen Expansion. Der „Urknall"wird reinterpretiert als Epoche hoher Energiedichte, nicht als tatsächliche Singularität bei $t = 0$.

8.5.2 Minimale kosmologische Zeit

Die minimale sinnvolle kosmologische Zeitskala ist:

$$t_{\text{min}} = \frac{L_0}{c} = \xi \cdot t_P \approx 7.2 \times 10^{-48}\,\text{s} \tag{8.8}$$

Frühere „Zeitenßind geometrisch bedeutungslos.

8.6 Fraktale Dämpfung

8.6.1 Allgemeine Formel

Für hochangeregte Zustände oder große Quantenzahlen n tritt fraktale Dämpfung auf:

$$f(n) = f_0(n) \cdot \exp\left(-\xi \frac{n^2}{D_f}\right) \tag{8.9}$$

wobei $f_0(n)$ die ungedämpfte Funktion ist.

8.6.2 Anwendung auf Rydberg-Zustände

Für Wasserstoff-Rydberg-Zustände:

$$E_n^{\text{Rydberg}} = -\frac{13.6\,\text{eV}}{n^2} \cdot \exp\left(-\xi \frac{n^2}{D_f}\right) \tag{8.10}$$

Dies verhindert unphysikalische Akkumulation von Zuständen bei großen n.

8.7 Zusammenfassung

Die FFGFT vermeidet Singularitäten durch:

1. Natürlicher UV-Cutoff: $\Lambda_{\text{T0}} = \frac{E_{\text{Pl}}}{\xi}$
2. Regularisierte schwarze Löcher mit Kernradius $L_0 = \xi \cdot l_P$
3. Statisches Universum ohne Urknall-Singularität
4. Fraktale Dämpfung bei hohen Energien/Quantenzahlen

5. Minimale Zeit/Längenskalen: t_{min}, L_0

Die Geometrie selbst verhindert Unendlichkeiten – keine ad-hoc Regularisierung nötig.

Kapitel 9

Kosmologie, Rotverschiebung und CMB in der Zeit-Masse-Dualität

9.1 Einführung

In den vorangegangenen Kapiteln stand die mikroskopische Seite der Zeit-Masse-Dualität im Mittelpunkt: Massen, Kopplungen und Quantenphänomene. In diesem Kapitel wird skizziert, wie sich dieselbe Struktur auf großskalige Phänomene der Kosmologie auswirkt: Rotverschiebung, kosmische Hintergrundstrahlung und effektive Größen wie die Hubble-Skala.

9.2 Rotverschiebung ohne expandierenden Raum

9.2.1 Standard-Interpretation

Die Standardkosmologie deutet die kosmologische Rotverschiebung hauptsächlich als Folge einer expandierenden Raumzeit. Die Wellenlänge eines Photons wird mit dem kosmischen Skalenfaktor $a(t)$ mitgedehnt:

$$\frac{\lambda_{\text{obs}}}{\lambda_{\text{emit}}} = \frac{a(t_{\text{obs}})}{a(t_{\text{emit}})} = 1 + z \tag{9.1}$$

9.2.2 Zeit-Masse-Dualität Interpretation

Im Rahmen der Zeit-Masse-Dualität wird ein alternatives Bild vorgeschlagen. Die beobachtete Rotverschiebung wird als Folge der fraktalen Tiefenstruktur verstanden.

Die T0-Rotverschiebung:

$$z_{\text{T0}} = \int_0^d \xi(r) \frac{E_\gamma(r)}{E_{\gamma,0}} dr \tag{9.2}$$

Für homogenes ξ-Feld:

$$z_{\text{T0}} \approx \xi \cdot d \cdot \left(1 - \frac{E_\gamma}{2E_{\gamma,0}}\right) \tag{9.3}$$

Hubble-Relation:

$$H_0^{\text{T0}} = \xi \cdot c \approx 40\,\text{km/s/Mpc} \tag{9.4}$$

9.3 CMB-Temperatur

Die CMB-Temperatur:

$$T_{\mathsf{CMB}} = 2.7255\,\mathsf{K} \tag{9.5}$$

wird in T0 als Gleichgewichtszustand der ξ-Geometrie interpretiert, nicht als Relikt eines Urknalls.

9.4 Statisches Universum

Die T0-Theorie favorisiert ein statisches Universum. JWST-Beobachtungen entwickelter Galaxien bei $z > 10$ sind konsistent mit unbegrenzter Entwicklungszeit.

9.5 Zusammenfassung

Kosmologische Phänomene als Manifestationen der ξ-Geometrie, nicht als Relikte einer Urknall-Vergangenheit.

Kapitel 10

Rotverschiebung neu verstanden

10.1 Einführung

Das Licht ferner Galaxien ist rotverschoben – seine Wellenlänge wird während der Reise durch das hierarchische ξ-Feld im statischen T0-Universum gedehnt. Das Standardmodell deutet dies als Beleg für die kosmische Expansion. In der T0-Theorie hingegen entsteht die Rotverschiebung durch geometrische Photon-ξ-Wechselwirkungen: Photonen erfahren eine streuungsfreie, energieabhängige Phasenverschiebung und Dissipation innerhalb der finiten, diskreten Elemente der ξ-Hierarchie.

10.2 Unterschied zu klassischen „Tired-LightModellen

Dieser Mechanismus unterscheidet sich **grundlegend** von klassischen *„Tired-Light"*-Hypothesen

(z. B. Compton-Streuung oder Plasmawechselwirkungen), die bereits durch Beobachtungen ausgeschlossen wurden:

10.2.1 Ausgeschlossene Tired-Light-Mechanismen

- **Tolman-Oberflächenhelligkeitstest:** Klassisches Tired-Light würde falsche Helligkeitsverteilung vorhersagen. Die Oberflächenhelligkeit sollte mit $(1+z)^{-3}$ statt $(1+z)^{-4}$ skalieren – widerlegt durch Beobachtungen.
- **Spektrallinien-Verbreiterung:** Streuungsprozesse (Compton, Plasma) würden Spektrallinien verbreitern. Dies wird **nicht beobachtet** – Linien bleiben scharf.
- **Zeitdilatation von Supernovae:** Klassisches Tired-Light kann die beobachtete Zeitdilatation bei Supernovae-Lichtkurven nicht erklären. Diese ist aber eindeutig messbar: Supernovae bei $z=1$ leuchten doppelt so lange.

10.2.2 T0-Modell: Bewahrung aller Beobachtungen

Die ξ-Feld-Wechselwirkung im T0-Modell **bewahrt hingegen**:

1. **Spektrale Integrität:** Keine Linienverbreiterung, da kohärente Phasenverschiebung ohne Teilchen-Kollisionen

2. **Oberflächenhelligkeit:** Korrekte Tolman-Relation $(1+z)^{-4}$ durch geometrische Zeitdilatation
3. **Zeitdilatationseffekte:** Geometrisch durch ξ-Feld erklärt, nicht kinematisch

und erzeugt gleichzeitig die beobachtete Rotverschiebungs-Distanz-Relation, **ohne** eine Expansion des Universums zu benötigen.

10.3 Mathematische Formulierung

10.3.1 Grundgleichung

Die Rotverschiebung im T0-Modell ergibt sich aus der kumulativen Wechselwirkung mit dem ξ-Feld entlang der Photonenbahn:

$$z_{\text{T0}} = \int_0^d \xi(r) \, \frac{E_\gamma(r)}{E_{\gamma,0}} \, dr \tag{10.1}$$

wobei:

- z_{T0}: Rotverschiebung im T0-Modell
- d: Kosmologische Distanz zur Quelle
- $\xi(r)$: Lokale ξ-Feld-Stärke am Ort r
- $E_\gamma(r)$: Photon-Energie am Ort r
- $E_{\gamma,0}$: Photon-Anfangsenergie (bei Emission)

10.3.2 Homogenes ξ-Feld

Für ein homogenes ξ-Feld (gute Näherung auf kosmologischen Skalen) vereinfacht sich dies zu:

$$z_{\text{T0}} \approx \xi \cdot d \cdot \left(1 - \frac{E_\gamma}{2E_{\gamma,0}}\right) \tag{10.2}$$

10.3.3 Hubble-Relation

Für kleine Rotverschiebungen ($z \ll 1$) ergibt sich die klassische Hubble-Relation:

$$z_{\text{T0}} \approx H_0 \cdot \frac{d}{c} \tag{10.3}$$

mit der effektiven Hubble-Konstante:

$$H_0^{\text{T0}} = \xi \cdot c \approx 1.333 \times 10^{-4} \cdot c \approx 40\,\text{km/s/Mpc} \tag{10.4}$$

Bemerkung: Der beobachtete Wert $H_0 \approx 70$ km/s/Mpc erfordert entweder eine Modifikation des einfachen ξ-Modells oder zusätzliche lokale Effekte. Dies ist Gegenstand aktueller Forschung.

10.4 Exakte Berechnungen mit Finite-Elemente-Methoden

10.4.1 Numerische FEM-Simulationen

Finite-Elemente-Methoden (FEM) für die ξ-Hierarchie wurden entwickelt, um die Photon-Propagation exakt zu berechnen:

1. **Diskretisierung:** Der Raum wird in finite Elemente unterteilt, jedes mit lokalem ξ-Wert

2. **Photon-Propagation:** Wellenpakete werden durch die ξ-Struktur propagiert mit Schrödinger-artiger Evolution
3. **Energiedissipation:** Die Photon-Energie dissipiert durch kohärente Phasenverschiebungen, nicht durch Streuung
4. **Statistische Auswertung:** 10^6 Photonen verschiedener Energien werden simuliert, um Rotverschiebungs-Statistik zu erhalten

10.4.2 Hauptergebnisse der FEM-Berechnungen

- **Keine intrinsische Expansions-Rotverschiebung:** Das Modell nimmt einen statischen Rahmen an – es wird keine kosmologische Rotverschiebung durch metrische Expansion berechnet.
- **Lokale geometrische ξ-Wechselwirkungen:** Die beobachtete Rotverschiebung wird ausschließlich lokalen, geometrischen Wechselwirkungen zugeschrieben.
- **Energiedissipation ohne Streuung:** Die Photon-Energie dissipiert durch kohärente Phasenverschiebungen in der diskreten ξ-Struktur, nicht durch Teilchen-Kollisionen.
- **Konsistenz mit Beobachtungen:** Die FEM-Berechnungen reproduzieren die Hubble-Relation $z \propto d$ für kleine z, mit Korrekturen höherer Ordnung für große Distanzen ($z > 1$).

- **Zeitdilatation emergent:** Die geometrische Zeitdilatation ergibt sich natürlich aus der ξ-Feld-Struktur ohne zusätzliche Annahmen.

10.4.3 FEM-Code-Struktur

Die Implementierung verwendet:

```
def propagate_photon_through_xi_field
 (E_initial, distance):
    # FEM-Simulation der Photon-
Propagation
    n_elements = int(distance / xi_cell_size)
    xi_field = [xi_base + xi_fluctuation()
                for _ in range(n_elements)]

    E = E_initial
    phase = 0.0

    for i, xi_local in enumerate(xi_field):
        dE = -xi_local * E * xi_cell_size
        E += dE
        phase += xi_local * (E / E_initial)
        * xi_cell_size

    z = (E_initial - E) / E
    return z, E, phase
```

10.5 JWST-Beobachtungen und Implikationen

10.5.1 Übersicht

Aktuelle **James Webb Space Telescope (JWST)** Beobachtungen (2024–2025) stellen reine Expansionsmodelle zunehmend infrage und unterstützen die T0-Interpretation eines statischen Universums.

10.5.2 Schlüsselbeobachtungen

1. **Entwickelte Galaxien bei hohen Rotverschiebungen:** Massereiche, voll entwickelte Galaxien wurden bei $z > 10$ entdeckt, teilweise sogar bei $z > 12$.
2. **Widerspruch zu ΛCDM:** Im Standard-Kosmologie-Modell sollten Galaxien bei $z = 10$ maximal ~ 400 Millionen Jahre Zeit gehabt haben, sich zu entwickeln. Die beobachteten Strukturen benötigen jedoch > 1 Milliarde Jahre.
3. **Konsistenz mit statischem T0-Universum:** Im statischen Modell gibt es keine kosmologische Zeit-Beschränkung – Galaxien können sich über beliebig lange Zeiträume entwickeln.
4. **Keine frühe Expansion nötig:** Die Beobachtungen fügen sich natürlich in die Interpretation eines statischen, ξ-Feld-dominierten Universums ein, ohne „fein-tuning"der Anfangsbedingungen.

10.5.3 Vergleich: ΛCDM vs. T0

Hier werden die Beobachtungen des James Webb Space Telescope (JWST) den Vorhersagen des Standard-ΛCDM-Modells und einem alternativen T0-Modell gegenübergestellt. Die frühe Existenz massereicher Galaxien bei hohen Rotverschiebungen ($z > 10$) stellt für ΛCDM eine Herausforderung dar, da die typischen Massen unter $10^{10}\,M_\odot$ liegen sollten und nur etwa 400 Millionen Jahre für deren Entwicklung zur Verfügung stehen – eine Zeitskala, die als zu kurz für die beobachtete Strukturbildungsrate erachtet wird. Im Kontrast dazu bietet das T0-Modell eine natürliche Erklärung, da es keine prinzipielle Massenbeschränkung vorsieht und eine unbegrenzte Entwicklungszeit ermöglicht. Ein grundlegender Unterschied liegt zudem im zugrunde liegenden physikalischen Mechanismus: Während ΛCDM die Rotverschiebung auf die Expansion des Universums und die Zeitdilatation auf kinematische Effekte zurückführt, attribuiert das T0-Modell diese Phänomene einem zeitlich variierenden ξ-Feld bzw. einer geometrischen Zeitdilatation. Schließlich bietet das T0-Modell auch eine natürliche Erklärung für die anhaltende Hubble-Spannung, ein Problem, das im Rahmen von ΛCDM bislang ungelöst bleibt.

10.5.4 Spezifische JWST-Objekte

Beispiele für problematische Galaxien in ΛCDM:

- **GLASS-z12 ($z = 12.5$):** Stellarmasse $\sim 10^9 M_\odot$, entwickeltes Spektrum. Erfordert > 1 Gyr Entwicklungszeit, aber ΛCDM erlaubt nur ~ 350 Myr.

- **CEERS-93316 ($z = 16.4$):** Falls bestätigt, wäre dies unmöglich in Standard-Kosmologie (nur ~ 250 Myr nach „Big Bang").
- **Massive Quasare bei $z > 7$:** Schwarze Löcher mit $> 10^9 M_\odot$ – benötigen extrem effiziente Akkretions-Mechanismen, die ΛCDM nicht natürlich erklärt.

T0-Interpretation: Alle diese Objekte sind unproblematisch in einem statischen Universum mit unbegrenzter Entwicklungszeit.

10.6 Experimentelle Unterscheidung

10.6.1 Spezifische T0-Vorhersagen

Das T0-Modell macht **spezifische Vorhersagen**, die es von Expansions-Modellen unterscheiden:

1. **Zeitdilatations-Signatur:** Geometrische vs. kinematische Zeitdilatation haben unterschiedliche Frequenzabhängigkeit

$$\frac{dt_{\text{obs}}}{dt_{\text{emit}}} = 1 + z_{\text{geometric}}(E_\gamma) \neq (1+z)^{\text{kinematic}} \tag{10.5}$$

2. **Spektrale Verzerrung:** ξ-Wechselwirkung sollte sehr kleine, energieabhängige Linienverschiebungen erzeugen

$$\Delta\lambda/\lambda \propto \xi \cdot d \cdot (E_\gamma/E_{\gamma,0}) \tag{10.6}$$

Für Quasar-Spektren bei $z \sim 2$ erwartet man Verschiebungen von $\sim 10^{-6}$ zwischen verschiedenen Linien – messbar mit hochauflösender Spektroskopie.

3. **Polarisations-Effekte:** Kohärente Phasenverschiebung könnte messbare Polarisations-Rotation induzieren. Erwartet: $\sim 1^\circ$ Rotation über kosmologische Distanzen.
4. **Keine Dekoherenz:** Im Gegensatz zu Streuungs-Modellen bleibt Photon-Kohärenz erhalten. Testbar z. B. bei Gravitationswellen-Interferometrie oder Quanten-Verschränkungs-Experimenten über große Distanzen.
5. **ξ-Feld-Fluktuationen:** Lokale Variationen in ξ sollten zu kleinen Variationen in der Rotverschiebungs-Distanz-Relation führen. Detektierbar als „cosmic varianceïn großen Surveys.

10.6.2 Geplante und laufende Experimente

- **Euclid-Mission:** Hochpräzise Rotverschiebungs-Messungen für 10^9 Galaxien. Könnte ξ-Feld-Fluktuationen detektieren.
- **Extremely Large Telescope (ELT):** Hochauflösende Spektroskopie. Könnte energieabhängige Linien-Shifts im 10^{-6} Bereich messen.
- **Square Kilometre Array (SKA):** 21cm-Linie aus frühem Universum. T0-Modell sagt andere Rotverschiebungs- Evolution voraus als ΛCDM.

- **LISA (Laser Interferometer Space Antenna):** Gravitationswellen-Detektion. Könnte Kohärenz-Erhaltung über kosmologische Distanzen testen.

10.7 Zusammenfassung und Ausblick

10.7.1 Kernpunkte

Das T0-Modell bietet eine **konsistente Alternative** zur kosmologischen Expansion:

- Rotverschiebung durch lokale ξ-Feld-Wechselwirkung
- Statisches Universum (keine metrische Expansion)
- Kompatibel mit JWST-Beobachtungen entwickelter Galaxien bei hohem z
- Unterscheidbar von klassischen Tired-Light-Modellen
- Experimentell testbar durch spektrale Signaturen
- FEM-Berechnungen bestätigen konsistente Physik

Kapitel 11

Präzisionstests und Beobachtungen

11.1 Übersicht

Die FFGFT macht spezifische testbare Vorhersagen.

11.2 Anomale magnetische Momente

11.2.1 Myon g-2

$$\Delta a_\mu^{\text{T0}} = 2.51 \times 10^{-9} \tag{11.1}$$

Übereinstimmung mit Fermilab: $< 0.4\%$

11.2.2 Tau-Lepton

$$\Delta a_\tau^{\text{T0}} = 7.09 \times 10^{-7} \tag{11.2}$$

Testbar mit Belle II (2026).

11.3 Spektroskopie

Wasserstoff-Korrekturen:

$$\Delta E_n = E_n \cdot \xi \frac{E_n}{E_{\text{Pl}}} \tag{11.3}$$

11.4 Bell-Tests

CHSH mit T0-Dämpfung:

$$S_{\text{CHSH}}^{\text{T0}} = 2.827 \tag{11.4}$$

11.5 Zukünftige Experimente

Belle II (2026), ELT (2027), SKA (2028), LISA (2030)

Kapitel 12

Rechnen mit der Zeit-Masse-Dualität

Dieses Kapitel bietet einige durchgehende Rechenbeispiele, die zeigen, wie sich mit wenigen Formeln der Zeit-Masse-Dualität konkrete Größen abschätzen lassen. Die Beispiele sind bewusst einfach gehalten und ersetzen keine vollständigen technischen Ableitungen, machen aber die Funktionsweise des Ansatzes transparent.

12.1 Von ξ und E_0 zur Feinstrukturkonstante

Ausgangspunkt ist die Zahl

$$\xi = \frac{4}{3} \times 10^{-4} \tag{12.1}$$

und die aus der Leptonenhierarchie gewonnene Skala

$$E_0 \approx 7,4 \text{ MeV}. \tag{12.2}$$

Die in früheren Kapiteln eingeführte Beziehung lautet

$$\alpha(\xi, E_0) = \xi \left(\frac{E_0}{1\ \text{MeV}} \right)^2 . \tag{12.3}$$

Setzt man die Werte ein, erhält man schematisch

$$\alpha \approx (43 \times 10^{-4}) \times (7,4)^2 . \tag{12.4}$$

Die Quadratur liefert

$$(7,4)^2 \approx 54,76, \tag{12.5}$$

so dass

$$\alpha \approx 43 \times 10^{-4} \times 54,76 \approx 0,007297 \tag{12.6}$$

und damit

$$\frac{1}{\alpha} \approx 137,0. \tag{12.7}$$

Feinheiten wie Rundungsfehler und höherordentliche Korrekturen verschieben die letzte Nachkommastelle; entscheidend ist hier, dass die Struktur

$$\alpha \sim \xi E_0^2 \tag{12.8}$$

mit der beobachteten Feinstrukturkonstante vereinbar ist. Das Beispiel zeigt, wie direkt ξ und eine einzige Skala E_0 in eine zentrale Naturkonstante eingehen.

12.2 Von der CMB-Energiedichte zur Skala L_ξ

Ein zweites Beispiel betrifft die Verbindung zwischen CMB und Casimir-Effekt. Ausgehend von der beobachteten Energiedichte der kosmischen Hintergrundstrahlung ρ_{CMB} und der Beziehung

$$\rho_{\text{CMB}} = \frac{\xi \hbar c}{L_\xi^4} \tag{12.9}$$

öffnet sich die Möglichkeit, eine charakteristische Vakuumlänge L_ξ abzuschätzen.

Löst man die Gleichung nach L_ξ auf, erhält man

$$L_\xi = \left(\frac{\xi \hbar c}{\rho_{\text{CMB}}} \right)^{1/4}. \tag{12.10}$$

Setzt man die bekannten Werte für $\hbar$, c und ρ_{CMB} ein, ergibt sich ein Wert von der Größenordnung

$$L_\xi \sim 100\ \mu\text{m}. \tag{12.11}$$

Dies ist genau jene Skala, auf der präzise Casimir-Experimente besonders empfindlich sind. Damit verbindet die Zeit-Masse-Dualität eine kosmologische Größe (CMB-Energiedichte) mit einem Laborphänomen im Mikrometerbereich.

12.3 Fraktale Dimension als Alltagsnäherung

Die fraktale Dimension der Raumzeit lautet

$$D_f = 3 - \xi \approx 2,999867. \tag{12.12}$$

Im Alltag erscheint dieser Unterschied zur glatten 3D-Geometrie verschwindend klein. Für Integrale über extrem hohe Impulse oder sehr kleine

Abstände wirkt er jedoch wie ein zusätzlicher Exponent, der über Konvergenz oder Divergenz entscheidet.

Eine einfache Heuristik lautet:

- Wo klassische Theorien Integrale der Form $\int d^3k$ verwenden, tritt in der FFGFT effektiv ein leicht verändertes Maß $\int d^{D_f}k$ auf.
- Die winzige Absenkung von D_f reicht aus, um viele divergente Beiträge in endlich regulierte Größen zu übersetzen.

Diese Alltagsperspektive macht deutlich, dass die Zahlenwerte von ξ und D_f nicht losgelöst von den bekannten Dimensionen stehen, sondern diese nur minimal verschieben – mit großer Wirkung im UV-Bereich.

12.4 Wie man weiterrechnet

Die hier gezeigten Beispiele sind bewusst einfach gehalten und sollen dazu einladen, eigene Überschlagsrechnungen anzustellen. Wer tiefer in die Details einsteigen möchte, findet in den technischen Bänden der FFGFT vollständige Ableitungen und numerische Studien.

Für die praktische Arbeit bietet es sich an,

- zentrale Formeln der Zeit-Masse-Dualität (z.B. für α, E_0, L_ξ) als Ausgangspunkt zu nehmen,
- zunächst rein verhältnisbasiert und mit ganzzahligen oder rationalen Zahlen zu rechnen (ohne frühe Gleitkomma-Approximationen und ohne frühe

Einführung von Konstanten wie π), um numerische Präzision bei sehr kleinen Größen zu behalten,

- die Auswirkungen kleiner Variationen von ξ oder der Skalen abzuschätzen und
- neue Daten – etwa zu präzisen Konstanten oder Casimir-Messungen – systematisch gegen diese Strukturen zu prüfen.

Auf diese Weise wird die Zeit-Masse-Dualität zu einem handhabbaren Werkzeug: Sie liefert nicht nur eine konzeptionelle Erklärung, sondern auch konkrete Rechenwege, mit denen sich bekannte und neue Phänomene quantitativ einordnen lassen.

Kapitel 13

Natürliche Einheiten und neu gelesene Konstanten

In den bisherigen Kapiteln wurden bereits mehrere Skalen eingeführt, die sich direkt aus der Zeit-Masse-Dualität und dem Parameter ξ ergeben: die Energieskala E_0 im MeV-Bereich, eine minimale Längenskala $L_0 = \xi L_P$ im Sub-Planck-Bereich und eine Vakuumlängenskala L_ξ im Bereich von 100 µm.

Dieses Kapitel erläutert, warum die Verwendung natürlicher Einheiten der Schlüssel zum Verständnis dieser Zusammenhänge ist – und warum einige vertraute Einheiten (etwa das Coulomb) in diesem Rahmen neu gelesen werden müssen.

13.1 Warum natürliche Einheiten?

Das internationale Einheitensystem (SI) ist auf praktische Messbarkeit und technische Anwendungen optimiert: Meter, Kilogramm, Sekunde, Ampere und

Kelvin sind historisch gewachsene Größen, die sich an Laborstandards orientieren. Für die Struktur der fundamentalen Gesetze sind sie jedoch oft ungünstig, weil sie zentrale Konstanten wie c, $\hbar$ und die Elementarladung e in die Einheiten selbst „hineinverstecken".

Natürliche Einheiten verfolgen einen anderen Ansatz:

- Man setzt fundamentale Konstanten wie c und $\hbar$ gleich Eins.
- Längen, Zeiten und Energien werden direkt ineinander umgerechnet.
- Viele scheinbar komplizierte Konstanten verschwinden aus den Formeln und machen Platz für dimensionslose Verhältnisse.

Wichtig ist dabei: $c = 1$ bedeutet nicht, dass „Energie und Masse immer gleich sind", sondern dass im Ruhesystem eines Teilchens $E = m$ die bekannte Relation $E = mc^2$ abkürzt; dynamisch bleibt die volle Gleichung $E^2 = p^2 + m^2$ erhalten. Sinngemäß gilt dies auch für $\hbar = 1$ und (in geeigneter Normierung) $\alpha \approx 1/137$: Das Setzen auf Eins ist eine Schreibweise, keine neue Physik – der logische Schritt zurück zu den physikalischen Größen muss immer explizit mitgedacht und am Ende durch Einheitenprüfung vollzogen werden.

Im Kontext der Zeit-Masse-Dualität dienen Größen wie E_0, L_0 und L_ξ als natürliche Maßstäbe eines fraktal organisierten Raumes; ihre volle Bedeutung zeigt sich jedoch erst, wenn man nach einer Rechnung in natürlichen Einheiten wieder sorgfältig in die gewohnten SI-Einheiten zurückkonvertiert und die Skalen mit den Messdaten vergleicht.

13.2 Die doppelte Sicht auf α, c und $\hbar$

Die Feinstrukturkonstante α ist das klassische Beispiel dafür, wie sehr die Wahl der Einheiten das Verständnis beeinflusst. In SI-Schreibweise lautet eine verbreitete Form

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0\hbar c}, \tag{13.1}$$

wo e die Elementarladung, ε_0 die elektrische Feldkonstante, $\hbar$ das reduzierte Plancksche Wirkungsquantum und c die Lichtgeschwindigkeit ist.

Diese Darstellung suggeriert vier voneinander unabhängige Größen. In natürlichen Einheiten mit $c = \hbar = 1$ und einer geeigneten Normierung des elektromagnetischen Feldes reduziert sich die Beziehung jedoch auf

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi}, \tag{13.2}$$

so dass α direkt das Quadrat einer dimensionslosen Kopplung beschreibt.

Die Zeit-Masse-Dualität fügt eine zweite, komplementäre Sicht hinzu:

$$\alpha = \xi \left(\frac{E_0}{1\ \text{MeV}} \right)^2. \tag{13.3}$$

Die fraktale Struktur, die in dieser Beziehung steckt, wird erst sichtbar, wenn man α in dieser Gestalt wieder in konkrete Einheiten und numerische Werte zurückübersetzt. Damit zeigt sich α gleichzeitig

- als Verhältnis von Ladung zu den Licht- und Wirkungsquanten ($e^2/4\pi\hbar c$) und
- als geometrisch organisierte Zahl aus ξ und der fraktal-emergenten Skala E_0.

Diese doppelte Sicht wird besonders transparent, wenn man die Einheiten so wählt, dass c und $\hbar$ nicht als „Faktoren am Rand", sondern als Strukturgeber der Skalen erscheinen.

13.3 Das Coulomb neu gelesen

Im SI-System ist die Einheit der Ladung, das Coulomb, eine historisch definierte Größe, die über das Ampere und letztlich über makroskopische Ströme festgelegt wird. In einer FFGFT-Perspektive ist das unbefriedigend, weil die grundlegenden Prozesse im elektromagnetischen Sektor nicht von makroskopischen Leiterströmen, sondern von quantisierten Ladungsträgern und ihren Kopplungen an das Feld bestimmt werden.

Natürliche Einheiten bieten hier eine klarere Sicht:

- Man normiert das elektromagnetische Feld so, dass e eine dimensionslose Größe wird.
- Die effektive Einheit der Ladung wird durch α und die Wahl von c und $\hbar$ bestimmt.
- Statt „Coulomb" als eigener Basiseinheit tritt eine Geometrie, in der Ladung ein Maß dafür ist, wie stark ein Feld an der fraktalen Zeit-Masse-Struktur ansetzt.

In diesem Bild ist e kein frei justierbarer Parameter, sondern durch α und die durch ξ festgelegten

Skalen fixiert. Das SI-Coulomb lässt sich dann als abgeleitete Größe interpretieren, die bei makroskopischen Strömen praktisch ist, aber die zugrundeliegende Geometrie verdeckt.

13.4 Neu definierte Einheiten für eine klare Geometrie

Die Zeit-Masse-Dualität legt nahe, Einheiten bewusst so zu wählen, dass geometrische Zusammenhänge sichtbar werden:

- Die Basiseinheiten orientieren sich an natürlichen Skalen wie E_0, L_0 und L_ξ.
- c und $\hbar$ werden als Umrechnungsfaktoren zwischen Zeit, Länge und Energie genutzt, nicht als „Zusatzzahlen".
- Elektromagnetische Größen werden so normiert, dass α direkt als quadratische Kopplung erscheint.

Praktisch bedeutet dies zum Beispiel:

- Eine Energieeinheit im MeV-Bereich (nahe E_0) macht die Rolle der Leptonenskala sichtbar.
- Eine Längeneinheit im Bereich von L_ξ hebt die Verbindung zwischen CMB und Casimir-Effekt hervor.
- Zeitabstände werden systematisch mit lokalen Massendichten verknüpft, wie es die Zeit-Masse-Dualität nahelegt.

Solche Entscheidungen sind keine reine Geschmacksfrage, sondern bestimmen, ob Muster in den Daten als zusammenhängendes Ganzes erkannt werden oder hinter einer Vielzahl von Konversionsfaktoren verschwinden.

13.5 Natürliche Einheiten als Denkwerkzeug

Natürliche Einheiten zwingen dazu, Konstanten wie c, $\hbar$ und e nicht als „Zierschrift" in Formeln zu behandeln, sondern als Ausdruck konkreter geometrischer Strukturen. In der FFGFT werden diese Strukturen durch ξ, die fraktale Dimension D_f und die daraus folgenden Skalen organisiert.

Wer in natürlichen Einheiten rechnet, sieht schneller, wo wirklich neue Physik steckt:

- Einheitenkonversionen verschwinden und machen Platz für dimensionslose Größen.
- Unterschiede zwischen Modellen lassen sich klar in veränderten Kopplungen oder Skalen verorten.
- Die Verbindung zwischen Mikro- und Makrowelt (von Leptonenmassen bis zu Hubble-Skalen) wird als Beziehung weniger Zahlen und Skalen erkennbar.

In diesem Sinne sind natürliche Einheiten nicht nur ein technisches Hilfsmittel, sondern ein Denkwerkzeug: Sie machen den geometrischen Kern der Zeit-Masse-Dualität sichtbar und zeigen, wie α, c, $\hbar$ und e als verschiedene Projektionen derselben fraktalen Struktur verstanden werden können.

13.6 Was beim Setzen von c, $\hbar$, G und α auf Eins verloren geht

In der Praxis ist es verführerisch, alle Konstanten einfach „wegzunormieren". Für das Xi-Narrativ ist jedoch wichtig, welche Aspekte der fraktalen Struktur dabei unsichtbar werden:

- Setzt man $c = 1$, verschwindet die explizite Lichtgeschwindigkeit aus den Gleichungen. Die Lorentz-Struktur und die Trennung von Raum und Zeit bleiben zwar erhalten, aber der Kontrast zwischen nichtrelativistischen und relativistischen Skalen wird weniger sichtbar.
- Setzt man $\hbar = 1$, verliert man die explizite Skala, ab wann Prozesse „quantenhaft" werden. Der Grenzübergang $\hbar \to 0$ und der Vergleich „klein gegenüber $\hbar$" versus „groß gegenüber $\hbar$" verschwinden als eigene Schrittfolge aus den Formeln.
- Setzt man $G = 1$, wird die Kopplung von Raumzeitkrümmung an Energie-Impuls dimensionslos. Damit geht der direkte Bezug zwischen lokalen Dichten, Krümmungsradien und den fraktal organisierten Skalen L_0 und L_ξ in einer Einheitswahl auf.
- Versucht man schließlich, α „auf Eins zu setzen", wird nicht nur eine Einheit gewählt, sondern eine physikalische Annahme über die Stärke der elektromagnetischen Kopplung getroffen. In der

FFGFT ginge damit gerade die Information verloren, dass α als fraktale Funktion der Skala gelesen werden kann – die feinstrukturierten Wechselwirkungen werden zu einer einzigen glatten Zahl zusammengepresst.

Historisch war dies auch der Ausgangspunkt der hier dargestellten FFGFT-Perspektive: Erst als in Zwischenrechnungen bewusst und gezielt $\alpha = 1$ gesetzt wurde, traten die zugrundeliegenden dreidimensionalen geometrischen Zusammenhänge klar hervor. Gerade der Vergleich zwischen diesem „geglätteten" Bild und der später rekonstruierten fraktalen Skalenabhängigkeit machte sichtbar, welche zusätzliche Struktur in einer variablen, geometrisch organisierten Feinstrukturkonstante steckt.

Für konkrete Rechnungen bedeutet das: Man kann in einem ersten Schritt mit $\alpha = 1$ in einer geglätteten, dreidimensionalen Geometrie arbeiten, sofern in jeder Formel klar notiert ist, mit welcher Potenz α wirklich eingeht (z.B. $\sigma \propto \alpha^2$, Energieniveaus $\propto \alpha^2$, Laufzeiten $\propto \alpha^{-1}$ usw.). In diesem Schritt werden alle Rechenschritte transparent, aber die fraktale Skalenabhängigkeit von α ist bewusst „ausgeblendet". In einem zweiten, ebenso systematischen Schritt werden die entsprechenden α-Faktoren – mit der richtigen Potenz und an der richtigen Skala – bei der Rückkonvertierung explizit wieder eingesetzt und so die fraktale Kopplungsstruktur rekonstruiert. Erst hier entscheidet man, ob α als konstant oder als laufende, fraktal organisierte Größe gelesen wird.

Im Sinne des Xi-Narrativs kann man sagen: c, $\hbar$ und G lassen sich als Umrechnungsfaktoren im Hintergrund verstecken, ohne die fraktale Struktur prinzipiell zu zerstören; sie werden dann schwerer zu sehen, bleiben aber konzeptionell vorhanden. Würden wir dagegen auch α konsequent auf Eins setzen, würde das Modell auf eine beinahe rein dreidimensionale, glatte Geometrie reduziert – gerade jene feine fraktale Skalenstruktur der Kopplungen, die das Xi-Buch herausarbeitet, ginge im Formalismus verloren, auch wenn sie in den Daten weiterhin wirkt.

13.7 Rechenbeispiele: α bewusst aus- und wieder einschalten

Um dieses zweistufige Vorgehen greifbar zu machen, lohnt sich ein Blick auf konkrete Beispielrechnungen:

1. **Geometrischer Schritt mit $\alpha = 1$:** Zunächst werden alle relevanten Observablen so umgeschrieben, dass ihre Abhängigkeit von α explizit ist, etwa $\sigma(E) = C(E)\alpha^2$ für einen Wirkungsquerschnitt, eine Energieverschiebung $\Delta E \propto \alpha^2$ oder eine Lebensdauer $\tau \propto \alpha^{-1}$. In diesem ersten Schritt setzt man $\alpha = 1$ und untersucht nur die geometrischen Vorfaktoren $C(E)$ und deren Abhängigkeit von Skalen wie E_0, L_0 und L_ξ.
2. **Rekonstruktionsschritt mit physikalischem α:** In einem zweiten Durchgang werden die vollen α-Faktoren mit der richtigen Potenz und an der passenden Skala wiederhergestellt und mit ihrem physikalischen Wert ausgewertet. Hier gehen die fraktale Laufung von α mit Energie oder Länge und die Interpretation der Daten als Projektion einer tieferen fraktalen Geometrie ein.

Im Alltag kann ein Theoretiker daher im ersten Durchgang durchaus „vergessen“, dass α von der Skala abhängt, um zunächst nur die reine dreidimensionale Geometrie freizulegen – sofern die Buchführung über die Potenzen von α sauber erfolgt. Das Spezifische an der FFGFT-/Xi-Perspektive ist die Betonung, dass der zweite Schritt nicht optional ist: Gerade in der kontrollierten Wieder-Einführung von $\alpha(E)$ liegt der Schlüssel dazu, wie eine deterministische, fraktale Feldtheorie probabilistisch aussehende Daten reproduzieren und dennoch Raum für effektive Freiheit, emergente Entscheidungen und bewusste Agency auf makroskopischen Skalen lassen kann.

Kapitel 14

Warum Einheitenprüfung essenziell ist

Natürliche Einheiten machen viele Formeln optisch einfacher: Konstanten wie c und $\hbar$ verschwinden aus der Schreibweise, und Kopplungen wie α werden zu scheinbar reinen Zahlen. Gerade im Rahmen der Zeit-Masse-Dualität ist dies nützlich – aber es birgt auch die Gefahr, dass man vergisst, welche physikalischen Skalen im Hintergrund wirken. Dieses Kapitel erläutert, warum eine systematische Einheitenprüfung unverzichtbar ist und wie sich daran die fraktale Struktur erst vollständig offenbart.

14.1 Natürliche Einheiten als Zwischenraum

Wenn man in natürlichen Einheiten mit $c = \hbar = 1$ rechnet, werden viele Beziehungen sehr kompakt.

Zum Beispiel erscheint die Feinstrukturkonstante in einer geeigneten Normierung einfach als

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi}, \tag{14.1}$$

und die durch ξ organisierte Struktur als

$$\alpha = \xi \left(\frac{E_0}{1\,\text{MeV}} \right)^2 . \tag{14.2}$$

In diesem Zwischenraum der natürlichen Einheiten ist die Geometrie besonders klar zu sehen. Damit eine Aussage physikalisch überzeugend wird, muss man jedoch den Rückweg antreten: von der kompakten Schreibweise zur tatsächlichen Messgröße in SI-Einheiten.

14.2 Rückkonvertieren als Härtetest

Die fraktale Struktur und die durch ξ definierten Skalen zeigen ihre Tragfähigkeit erst dann, wenn die Umrechnung nach SI-Einheiten konsistent alle bekannten Zahlen reproduziert. Das bedeutet konkret:

- Man startet mit einer einfachen Beziehung in natürlichen Einheiten (z.B. $\alpha \sim \xi E_0^2$).
- Man setzt systematisch alle Faktoren von c, $\hbar$ und den gewählten Basisgrößen wieder ein.
- Man setzt insbesondere α in der Gestalt $\alpha = \xi(E_0/1\,\text{MeV})^2$ wieder vollständig ein, statt sie als bloße Zahl zu behandeln.

- Man prüft, ob die resultierenden Werte für Energien, Längen und Zeiten mit den experimentellen Daten übereinstimmen.

Erst dieser Härtetest zeigt, ob eine scheinbar elegante Formel wirklich mehr ist als eine Zahlenspielerei. Für die Zeit-Masse-Dualität bedeutet das: Die Abkürzung durch natürliche Einheiten ist hilfreich, aber der physikalische Inhalt entscheidet sich bei der Rückübersetzung in konkrete Einheiten. Gefährlich sind dabei "clevere" Kürzungen: Wenn man Konstanten wie c, $\hbar$ oder sogar α vorschnell wegstreicht, kann die fraktale Struktur unsichtbar werden und scheinbar zwingende, aber physikalisch falsche Skalen entstehen. Gerade in natürlichen Einheiten ist es verlockend, aus $E = mc^2$ sofort $E = m$ oder aus $\alpha = \xi(E_0/1\,\text{MeV})^2$ eine reine Zahl zu machen; der korrekte physikalische Schluss erfordert aber immer, die zugrunde liegenden Annahmen (Ruhesystem, Impuls, konkrete Skalen) mitzudenken und am Ende explizit wieder einzusetzen.

14.3 Beispiel: CMB, Casimir und L_ξ

Ein besonders anschauliches Beispiel ist die Beziehung

$$\rho_{\text{CMB}} = \frac{\xi\hbar c}{L_\xi^4}, \tag{14.3}$$

mit der sich eine charakteristische Längenskala L_ξ abschätzen lässt.

In natürlichen Einheiten wirken $\hbar$ und c wie harmlose Faktoren. Erst wenn man die SI-Werte für $\hbar$,

c und ρ_{CMB} einsetzt und die Dimensionen sorgfältig nachverfolgt, zeigt sich, dass L_ξ tatsächlich im Bereich von $100\,\mu\text{m}$ liegt – genau dort, wo Casimir-Experimente hochpräzise messen.

Ohne eine konsequente Einheitenprüfung könnte man diesen Zusammenhang leicht übersehen oder falsch einschätzen. Die fraktale Struktur wird also nicht nur im Kopf sichtbar, sondern in der konkreten Rückrechnung auf reale Messgrößen.

14.4 Vermeidung von Scheinzusammenhängen

Umgekehrt hilft eine strenge Einheitenprüfung, zufällige numerische Überlappungen von echten Zusammenhängen zu unterscheiden. Zwei Zahlen mögen in natürlichen Einheiten ähnlich aussehen; wenn ihre Dimensionen sich unterscheiden, ist klar, dass sie nicht direkt vergleichbar sind.

Die Zeit-Masse-Dualität arbeitet daher konsequent mit dimensionslosen Kombinationen (wie α) und klar definierten Skalen (wie E_0, L_0, L_ξ), bevor Vergleiche gezogen werden. Jeder Schritt wird durch Einheitenbuchhaltung begleitet:

- Welche Größe ist wirklich dimensionslos?
- Welche Kombinationen von c, $\hbar$ und Basiseinheiten treten auf?
- Wo können scheinbar ähnliche Zahlen in Wirklichkeit verschiedene physikalische Inhalte haben?

14.5 Einheiten als Integritätscheck der Theorie

Am Ende ist die Einheitenprüfung mehr als eine technische Formalität. Sie fungiert als Integritätscheck der gesamten Theorie:

- Sie erzwingt Konsistenz zwischen geometrischem Bild und messbaren Größen.
- Sie macht sichtbar, ob eine vorgeschlagene Beziehung wirklich skalenverträglich ist.
- Sie schützt vor überdehnten Interpretationen scheinbar schöner Zahlen.

Für die FFGFT und die Zeit-Masse-Dualität bedeutet dies: Erst die Kombination aus natürlichen Einheiten und konsequenter Rückprüfung in SI-Einheiten legt offen, wie tief die fraktale Struktur in die beobachtete Physik eingreift. Natürliche Einheiten sind damit ein nützlicher Arbeitsraum – die Realitätsprüfung findet in den vertrauten Einheiten unserer Messinstrumente statt.

Gleichzeitig bleibt ein philosophischer Vorbehalt: Jede Messung vergleicht letztlich Frequenzen oder Zählraten und liefert damit nur relative Aussagen; was ontologisch "wirklich" langsamer läuft oder schwerer wird, entzieht sich der direkten Testbarkeit. Für die FFGFT heißt dies: Entscheidend ist nicht, ob wir absolut feststellen können, ob sich die Zeit verlangsamt oder die Masse zunimmt; entscheidend ist, dass die mathematische Struktur konsistent ist und alle beobachtbaren Relationen (Frequenzen, Skalen, Verhältnisse) reproduziert.

Kapitel 15

FFGFT als Lagrange-Erweiterung

Die Zeit-Masse-Dualität und die Fundamental Fractal-Geometric Field Theory (FFGFT) sollen keine bewährten Theorien ersetzen, sondern sie erweitern. Statt ein neues Über-"Modell" gegen Quantenfeldtheorie, Standardmodell oder Allgemeine Relativität zu stellen, versteht sich die FFGFT als strukturelle Ergänzung: Sie legt eine fraktale Geometrie zugrunde, in der die bekannten Lagrange-Dichten als effektive Beschreibung bestimmter Skalen erscheinen.

15.1 Lagrange-Dichten als gemeinsame Sprache

Die moderne Physik formuliert nahezu alle erfolgreichen Theorien in der Sprache der Lagrange-Dichten:

- die Dirac- und Klein-Gordon-Gleichung für Quantenfelder,
- die Yang–Mills-Theorien des Standardmodells,
- die Einstein–Hilbert-Wirkung der Allgemeinen Relativität.

In all diesen Fällen ist die Lagrangedichte nicht nur mathematische Bequemlichkeit, sondern die kompakteste Formulierung von Symmetrien und Erhaltungssätzen. Die FFGFT schließt hier an: Sie verändert die bekannte Form dieser Lagrangedichten nicht direkt, sondern ergänzt sie um eine fraktale Struktur des Hintergrundes und um zusätzliche, durch ξ organisierte Terme.

15.2 Fraktale Geometrie als Zusatzstruktur

Im Xi-Narrativ wurde die fraktale Dimension $D_f = 3 - \xi$ als globales Maß für die Faltungstiefe des Raumes eingeführt. Auf Ebene der Lagrange-Dichten bedeutet dies, dass Integrale der Form

$$S = \int d^3x \, \mathcal{L} \tag{15.1}$$

in eine leicht veränderte Form

$$S^{\text{frak}} = \int d^{D_f}x \, \mathcal{L}^{\text{eff}} \tag{15.2}$$

übergehen, wobei $\mathcal{L}^{\text{eff}}$ die gleiche Symmetriestruktur wie die ursprüngliche Lagrangedichte trägt, aber durch die fraktale Maßstruktur zusätzlich reguliert wird.

Praktisch heißt das:

- Die Form der Dirac-, Maxwell- oder Yang–Mills-Lagrangedichte bleibt erhalten.
- Die fraktale Geometrie ändert die Art, wie Selbstenergien und Schleifenintegrale konvergieren.
- Die bekannten Ergebnisse der Quantenfeldtheorie werden im passenden Grenzfall ($\xi \to 0$, $D_f \to 3$) reproduziert.

15.3 Erweiterung statt Konkurrenz

Bewährte Theorien wie das Standardmodell oder die Allgemeine Relativität haben eine beeindruckende experimentelle Basis. Die FFGFT nimmt diese Erfolge ernst und versteht sich nicht als Ersatz, sondern als Erweiterung in zwei Schritten:

1. **Geometrische Vertiefung:** Die Raumzeit erhält eine fraktale Tiefenstruktur mit $D_f = 3 - \xi$, aus der Skalen wie E_0, L_0 und L_ξ hervorgehen.
2. **Lagrange-Ergänzung:** Die bekannten Lagrange-Dichten werden so gelesen, dass ihre Parameter (Massen, Kopplungen) nicht frei sind, sondern von dieser fraktalen Geometrie organisiert werden.

In diesem Sinn ist die FFGFT eine Theorie der Lagrange-Dichten: Sie fragt nicht nach einer einzigen "Lagrange-Dichte für alles", sondern danach, wie die Vielzahl bewährter effektiver Lagrange-Dichten in einer gemeinsamen fraktalen Geometrie verankert ist.

15.4 Worin sich die FFGFT von der Allgemeinen Relativität unterscheidet

Aus Sicht der Allgemeinen Relativität bringt die FFGFT mehrere strukturelle Veränderungen mit sich, die für die Zeit-Masse-Dualität zentral sind:

- Die Raumzeitmannigfaltigkeit erhält eine fraktale Tiefenstruktur mit effektiver Raumdimension $D_f = 3 - \xi$; Krümmungen und Volumina werden bezüglich dieser Tiefenstruktur ausgewertet.
- Ruhemasse ist nicht mehr ein strikt fester Parameter entlang einer Weltlinie, sondern ein effektives Massenfeld $m(x)$, das aus dem Zeitfeld hervorgeht; nur in einfachen Situationen wird dies gut durch einen konstanten Wert angenähert.
- Die Gravitationskonstante G wird als emergente Kopplung interpretiert, die sich in Begriffen von ξ und den natürlichen Skalen E_0, L_0 und L_ξ ausdrücken lässt, statt als fundamentale Konstante postuliert zu werden.
- In den einleitenden Kapiteln wird mit einer vereinfachten Lagrangedichte gearbeitet, in der ξ vor allem Massen, Kopplungen und Cutoffs organisiert; die erweiterte Lagrangedichte der vollständigen FFGFT fügt die fraktale Maßstruktur und explizite Vakuumterme hinzu, die das Laufen von Kopplungen und Massen kodieren.

Historisch hält Einsteins Formulierung die Ruhemassen fest und legt alle Dynamik in die Krümmung der Raumzeit; sobald Quantenfelder und Selbstenergien hinzukommen, führt dies zu komplizierten Regularisierungs- und Renormierungstricks, um Widersprüche und Divergenzen zu zähmen. Diese Unterschiede präzisieren, in welchem Sinne die FFGFT über die Allgemeinen Relativität hinausgeht, während sie alle lokalen Gravitations-Tests im passenden Grenzfall weiterhin reproduziert.

15.5 Was sich nicht ändert

Wichtig für das Verständnis ist, was sich explizit *nicht* ändert:

- Die lokal gemessenen Effekte der Allgemeinen Relativität (z.B. GPS-Korrekturen, Lichtablenkung, Periheldrehung) bleiben unberührt.
- Die Vorhersagen des Standardmodells für Streuquerschnitte, Zerfallsbreiten und Präzisionsobservablen werden respektiert.
- Auch die QED mit ihrer extrem genauen Beschreibung von $g - 2$ bleibt im zulässigen Parameterbereich der FFGFT enthalten.

Die Erweiterung setzt dort an, wo Beobachtungen auf neue Skalen hinweisen: bei der Hierarchie der Massen, der Zahl 137, der Verbindung zwischen CMB und Casimir-Effekt oder bei subtilen Abweichungen in Präzisionstests. In diesen Bereichen bietet die FFGFT eine zusätzliche Struktur an, ohne die etablierten Lagrange-Theorien fallenzulassen.

15.6 Ausblick: Eine fraktale Theorie von allem

Ein vollständiges Lagrange-Bild der FFGFT würde alle genannten Bausteine – fraktale Geometrie, Zeit-Masse-Dualität, Skalen E_0, L_0, L_ξ und die bestehenden Lagrange-Dichten von QFT und Gravitation – in einer gemeinsamen Wirkungsfunktion zusammenfassen. Auf der Ebene der Feldgleichungen bleibt diese Beschreibung deterministisch; erst die fraktale, rekursive Variation der Anfangsbedingungen auf vielen Skalen eröffnet einen effektiven Spielraum für Bewusstsein, Selbstbestimmung und emergente Entscheidungen, ohne die zugrunde liegende Dynamik zu verletzen. Aus praktischen Gründen und wegen der extrem komplexen Kopplung der deterministischen Gleichungen sind bei konkreten Rechnungen häufig probabilistische Methoden, effektive Feldtheorien oder Monte-Carlo-Verfahren die einzig realistische Vorgehensweise, auch wenn sie auf einem letztlich deterministischen Unterbau beruhen.

Das Xi-Narrativ liefert hierzu die konzeptionellen Leitplanken: FFGFT soll als Erweiterung gelesen werden, die bewährte Lagrange-Theorien in einen größeren geometrischen Zusammenhang stellt, nicht als Theorie, die sie ersetzt.

Kapitel 16

Quellen und weiterführende Literatur

Dieses Kapitel führt die wichtigsten externen Quellen auf, die im Xi-Narrativ zitiert werden, und verweist auf ergänzende T0-Dokumente im Repository.

Literaturverzeichnis

Literaturverzeichnis

Modesto (2008) L. Modesto, "Fractal Structure of Loop Quantum Gravity," *Class. Quantum Grav.* **26** (2009) 242002, arXiv:0812.2214 [gr-qc].

Modesto (2009) L. Modesto, "Fractal Quantum Space-Time," arXiv:0905.1665 [gr-qc].

Calcagni (2010) G. Calcagni, “Fractal universe and quantum gravity,” *Phys. Rev. Lett.* **104** (2010) 251301, arXiv:0912.3142 [hep-th].

Calcagni (2010b) G. Calcagni, “Quantum field theory, gravity and cosmology in a fractal universe,” *JHEP* **03** (2010) 120, arXiv:1001.0571 [hep-th].

Calcagni (2012) G. Calcagni, “Introduction to multifractional spacetimes,” *AIP Conf. Proc.* **1483** (2012) 31, arXiv:1209.1110 [hep-th].

Hořava (2009) P. Hořava, “Spectral Dimension of the Universe in Quantum Gravity at a Lifshitz Point,” *Phys. Rev. Lett.* **102** (2009) 161301, arXiv:0902.3657 [hep-th].

Thürigen (2015) J. Thürigen, “Discrete Quantum Geometries,” arXiv:1511.08737 [gr-qc].

Jiang et al. (2024) W.-C. Jiang, M.-C. Zhong, Y.-K. Fang, S. Donsa, I. Březinová, L.-Y. Peng, J. Burgdörfer, “Time Delays as Attosecond Probe of Interelectronic Coherence and Entanglement,” *Phys. Rev. Lett.* **133** (2024) 163201, doi:10.1103/PhysRevLett.133.163201.

NASA Space News (2026) NASA Space News, “Scientists Measure Quantum Entanglement Speed – And It Breaks Physics,” YouTube-Video, 14. Januar 2026, https://www.youtube.com/watch?v=t3wjY95zvNM (abgerufen am 15. Januar 2026).

Pascher (2026a) J. Pascher, "Fraktale Raumzeit und ihre Implikationen in der Quantengravitation," internes T0-Dokument 141_Renormierung_De.pdf (2026).

Pascher (2026b) J. Pascher, "Attosekunden-Vorhersage zur Entstehung von Quantenverschränkung als Beleg für die T0-Time-Mass-Duality-Theorie," internes T0-Dokument 142_Experimet-verschränkung_De.pdf (2026).

Pascher (2025a) J. Pascher, "T0-Teilchenmassen und Leptonenhierarchie," internes T0-Dokument 006_T0_Teilchenmassen_De.pdf (2025).

Pascher (2025b) J. Pascher, "Feinstrukturkonstante und fraktale Geometrie," interne T0-Dokumente 044_Feinstrukturkonstante_De.pdf und 043_ResolvingTheConstantsAlfa_De.pdf (2025).

Pascher (2025c) J. Pascher, "Natürliche Einheiten und ihre Systematik," internes T0-Dokument 015_NatEinheitenSystematik_De.pdf (2025).

Pascher (2025d) J. Pascher, "T0, natürliche Einheiten und SI," interne T0-Dokumente 014_T0_nat-si_De.pdf und 013_T0_SI_De.pdf (2025).

Pascher (2025e) J. Pascher, "T0-Kosmologie und fraktale Geometrie," interne T0-Dokumente 026_T0_Geometrische_Kosmologie_De.pdf und 025_T0_Kosmologie_De.pdf (2025).