
Quantenkosmologie - Existiert die Zeit?

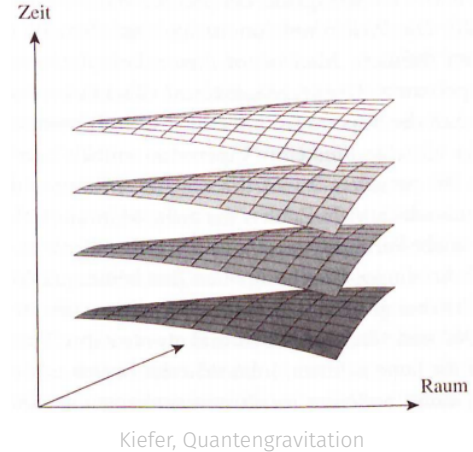
Big Questions

Jan Leo Löwe

14. Januar 2021

Inhaltsverzeichnis

1. Motivation der Quantenkosmologie
2. Quantengravitation
 - Diskussion des Zeitbegriffes
3. Wheeler-DeWitt Gleichung
4. Lösung des Zeitproblems
5. Alternative Theorien
6. Zusammenfassung



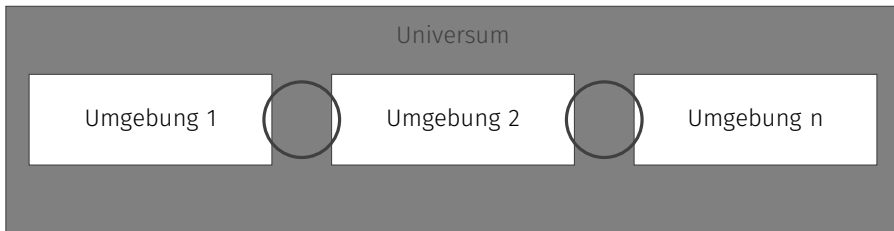
Was ist Quantenkosmologie?

- Anwendung Quantentheorie auf Universum als Ganzes
- Quantenmechanische Beschreibung aller Freiheitsgrade im Universum
- Klärung offener Fragen:
 - Quantengravitation
 - Planck-Ära
 - Singularitäten
 - Irreversibilitäten

Warum Quantenkosmologie?, H.D. Zeh, Institut für Theoretische Physik, Universität Heidelberg

Notwendigkeit der Quantenkosmologie

- Universelle Gültigkeit der Quantentheorie
- Quantensysteme können nicht isoliert betrachtet werden
 - Wechselwirkung mit anderen Quantensystemen ("Umgebung")



- Universum einzig abgeschlossenes System

Quantenkosmologie

- Untersysteme nur näherungsweise Wellenfunktionen
- Universum mit hochgradig verschränkte Wellenfunktion ($\Psi_{\text{Universum}}$) beschreiben
- Universum auf großen Skalen von Gravitation dominiert

⇒ Universum wird zum Quantenkosmos

Quantengravitation

Zeit in der Physik

- Zeit ist etwas Alltägliches → Grundlegend einer der schwierigsten Begriffe

DOES TIME EXIST IN QUANTUM GRAVITY?, C. Kiefer, 2009

Zeit in der Physik

- Zeit ist etwas Alltägliches → Grundlegend einer der schwierigsten Begriffe

1. Vor Newton

- Zeit mit periodischen Bewegungen assoziiert → "abzählbare" Zeit
- keine Vorstellung von Kontinuum
- "willkürlicher" Zeitparameter

DOES TIME EXIST IN QUANTUM GRAVITY?, C. Kiefer, 2009

Zeit in der Physik

- Zeit ist etwas Alltägliches → Grundlegend einer der schwierigsten Begriffe

1. Vor Newton

- Zeit mit periodischen Bewegungen assoziiert → "abzählbare" Zeit
- keine Vorstellung von Kontinuum
- "willkürlicher" Zeitparameter

2. Newton's Definition

"Die absolute, wahre und mathematische Zeit verfließt an sich und vermöge ihrer Natur gleichförmig und ohne Beziehung auf irgendeinen äußeren Gegenstand"

- Raum und Zeit sind absolut → Starre Rahmen der Welt
- Kritik: Unbeobachtbarkeit, Keine Zeitrichtung

DOES TIME EXIST IN QUANTUM GRAVITY?, C. Kiefer, 2009

Zeit in der Physik

3. Ernst Mach's Kritik

- Zweifel an Newtons Interpretation
- absolute Zeit keinen praktischen und wissenschaftlichen Wert
- lokale Bewegungsabläufe erst durch globale Bewegung bestimmt

DOES TIME EXIST IN QUANTUM GRAVITY?, C. Kiefer, 2009

Zeit in der Physik

3. Ernst Mach's Kritik

- Zweifel an Newtons Interpretation
- absolute Zeit keinen praktischen und wissenschaftlichen Wert
- lokale Bewegungsabläufe erst durch globale Bewegung bestimmt

4. Einstein's Definition

- Spezielle und generelle Relativitätstheorie
- Zeit verbunden mit Raum: 4D Raumzeit \rightarrow "Minkowski-Raumzeit"
- Erkenntnis: Gravitation ist Manifestation der Geometrie der Raumzeit
- Raumzeit nicht mehr absolut sondern dynamisch
- Reactio aller Materie und Felder auf Raumzeit

DOES TIME EXIST IN QUANTUM GRAVITY?, C. Kiefer, 2009

Problem der Zeit

Relativitätstheorie

$$R_{\mu\nu} - \frac{R}{2}g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

- Zeit und Raum gekoppelt
- Zeit ist dynamisch

Quantentheorie

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \hat{H}\Psi$$

- Zeit wird separiert behandelt
 - Zeit ist absolut
- Newtons-Zeit übernommen

Problem der Zeit

Relativitätstheorie

$$R_{\mu\nu} - \frac{R}{2}g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

- Zeit und Raum gekoppelt
- Zeit ist dynamisch

Quantentheorie

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \hat{H}\Psi$$

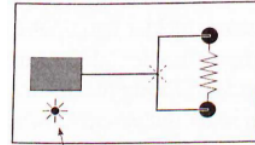
- Zeit wird separiert behandelt
 - Zeit ist absolut
- Newtons-Zeit übernommen

Problem der Zeit: Zeit kann nicht absolut und gleichzeitig nicht-absolut sein

DOES TIME EXIST IN QUANTUM GRAVITY?, C. Kiefer, 2009

Warum Quantengravitation?

- 1981: Page & Geilker
 - Testen semiklassische Theorie



radioaktive Quelle



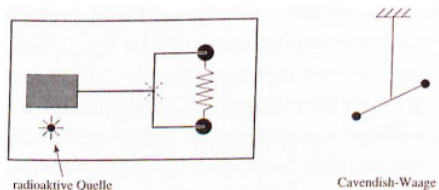
Cavendish-Waage

Kiefer, Quantengravitation

Warum Quantengravitation?

- 1981: Page & Geilker

→ Testen semiklassische Theorie



Kiefer, Quantengravitation

- Gravitationsfeld hängt von allen Komponenten der Wellenfunktion ab
- Bildung Mittelwert
 - Quelle radioaktiv zerfallen
 - Quelle nicht radioaktiv zerfallen
- Waage folgt Mittelwert der Massenverteilung
- Quantentheorie: Waage spricht auf Komponenten "zerfallen" oder "nicht zerfallen" an

Warum Quantengravitation?

- Doppelspaltexperiment
- Glaube an Vereinheitlichung aller Wechselwirkungen
- Universalität Quantentheorie
 - Superpositionsprinzip muss auch für gravitative Felder gelten
- Universalität gravitativer Felder
 - Koppelt an alle Energieformen
 - Interagiert mit allen Quantenzuständen von Materie
- Unvollständigkeit der allgemeinen Relativitätstheorie
 - Singularitäten: Zeit muss Ende haben

Warum Quantengravitation noch nicht beobachtet?

- Quantengravitation wichtig auf kleinen Skalen ("Planck-Skala")

$$l_{\text{Planck}} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \approx 1.62 \cdot 10^{-35} \text{m}$$

- Superpositionsprinzip: Formation gravitative Quantenzustände auf jeder Skala
- Dekohärenz verhindert Beobachtbarkeit
- Kaum experimentell nachprüfbar

Quantisierungsansätze

1. Direkte Quantisierung der allgemeinen Relativitätstheorie
2. Vereinheitlichte Quantentheorie aller Interaktionen

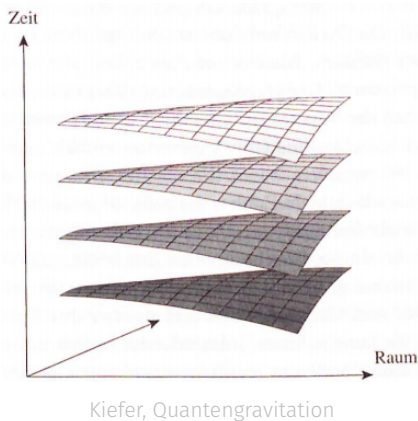
Quantisierungsansätze

- Suche Wellengleichung, die im klassischen Grenzfall die Einstein-Gleichungen ergibt
- Idee: Kanonische Quantisierung
 1. Lagrangian → Hamiltonian
 2. Kanonische Quantisierung
 3. Zustand Ψ , $i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \hat{H}\Psi$
- Wahl dreidimensionale Metrik und ihren konjugierten Impuls
- Punktweise Definition
- Raumzeit aufbrechen

Kiefer, Quantengravitation
Kiefer, Quantengravity

Foliation

- Raum und Zeit separieren
 - Raumartige Hyperflächen
 - Foliation: Ablauf der Zeit



” Foliation ” der Zeit entlang einer zeitartigen Richtung in raumartige Hyperfläche

⇒ Quantengeometrodynamik: Statische Gleichung, nur Geometrie des Raumes

Wheeler-DeWitt Gleichung

$$\hat{H}_{\text{total}} \Psi_{\text{Universum}} = 0$$

- Nicht auf Längen- oder Energieskalen beschränkt
- \hat{H}_{total} ganzer Hamiltonian mit Gravitation und Materie
- $\Psi_{\text{Universum}}$ ist auf Superraum definiert und hängt von 3D Metrik ab

”Die Wheeler-DeWitt Gleichung charakterisiert die physikalischen Zustände für die Wellenfunktion des Universums im Raum aller denkbaren Gravitations- und Materiekonfigurationen (” Superraum”)”

Wheeler-DeWitt Gleichung

$$\hat{H}_{\text{total}} \Psi_{\text{Universum}} = 0$$

- Nicht auf Längen- oder Energieskalen beschränkt
- \hat{H}_{total} ganzer Hamiltonian mit Gravitation und Materie
- $\Psi_{\text{Universum}}$ ist auf Superraum definiert und hängt von 3D Metrik ab

”Die Wheeler-DeWitt Gleichung charakterisiert die physikalischen Zustände für die Wellenfunktion des Universums im Raum aller denkbaren Gravitations- und Materiekonfigurationen (” Superraum”)”

⇒ **Grundlegend zeitlose Gleichung!**

QUANTUM COSMOLOGY AND THE ARROW OF TIME, C. Kiefer, 2005

Wheeler-DeWitt Gleichung

$$\hat{H}_{\text{total}} \Psi_{\text{Universum}} = 0$$

- Gleichung ist nicht exakt lösbar
- Problem: Zu viele Freiheitsgrade
- Ausweg: Drastische Reduktion der Freiheitsgrade

⇒ In Kosmologie: Nur gemittelte Größen

Zurückgewinnung der Zeit

- Annahme: $\Psi_{\text{Universum}}$ hängt nur von Skalenfaktor und homogenen Freiheitsgraden ab

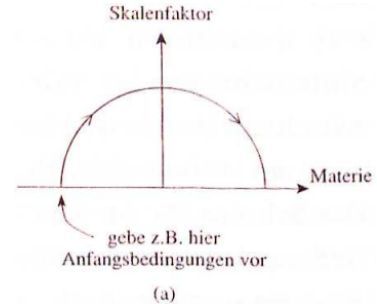
⇒ 2 dimensionaler Konfigurationsraum

- Betrachtung Friedmann Modell

Zurückgewinnung der Zeit

Klassische Entwicklung

- Anfangsbedingung legt zeitliche Entwicklung fest
- Ganze Entwicklung deterministisch bestimmbar
- Richtung beliebig

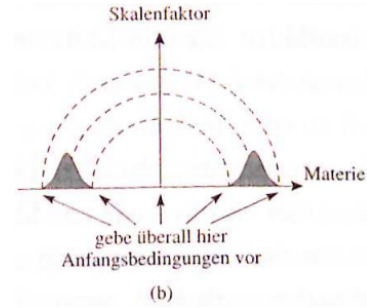


Kiefer, Quantengravitation

Zurückgewinnung der Zeit

Quantenmechanische Entwicklung

- Keine klassische Bahn
 - Verfügung: Wellenfunktion
- Schlauch um klassische Bahn
- Anfangsbedingung als Wellenfunktion formulieren



Kiefer, Quantengravitation

⇒ "innere" Zeit : Skalenfaktor!

Richtung der Zeit

- Grundlegend offenes Problem: Ursprung Irreversibilität im Universum

Strahlung

Thermodynamik

Quantenmechanik

Gravitation

Master Pfeil

QUANTUM COSMOLOGY AND THE ARROW OF TIME, C. Kiefer, 2005

Wurzel der Zeit

- Wheeler-DeWitt Gleichung asymmetrisch im Bezug auf α
 - "kleines" Universum \rightarrow kleiner Skalenfaktor $\alpha \rightarrow$ geringe Verschränkung
 - "großes" Universum \rightarrow großer Skalenfaktor $\alpha \rightarrow$ wachsende Verschränkung
- \Rightarrow Richtung der Zeit durch zunehmende Verschränkung definiert
- \Rightarrow Expansion des Universums: Tautologie

Konsistenzproblem



⚡ Teetasse wird nicht heile

⚡ Keine Information aus der Zukunft

C. Kiefer, Quantum Gravity: General Introduction and Recent Developments

Konsistenzproblem

- Kein klassischer Durchgang im Quantenkosmos
- Lösung Wheeler-DeWitt Gleichung: Universum gelangt an Maximum in Quantenphase
 - Viele Teilzweige interferieren
 - Klassische Entwicklung am Ende
- Universum endet in Zeitlosigkeit
- Alle Beobachter sind Zeitpfeil unterworfen

⚡ Zeitreisen

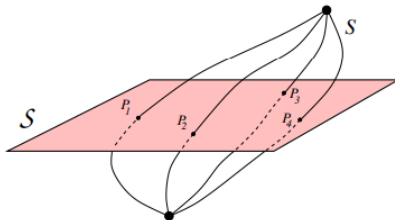
Alternative Modelle

Schleifenquantengravitation

- Ortsvariable entlang einer Schleife definiert
- Verallgemeinerter Impuls: Verallgemeinerter elektrischer Fluss durch Fläche
- Raum kein Hintergrund mehr, sondern dynamisches Objekt

→ Zweidimensionale Größe

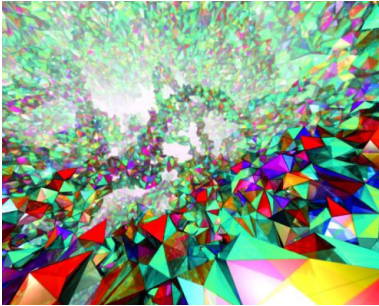
- Wellenfunktion aus Spinnetzwerk aufbauen



C. Kiefer, Quantum Gravity: General Introduction and Recent Developments

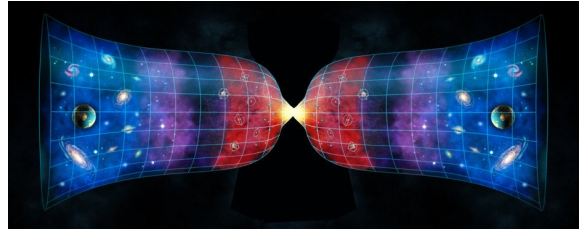
- Netz selbst ist der Raum
- Fläche kommt nur in diskreten Werten vor
- Elementares Flächenquantum \rightarrow alle Flächen Vielfaches davon
- Problem: Zeitparameter wiederfinden, Fehlen eines klassischen Limits, Unbeobachtbarkeit

Darstellung des Spinnnetzwerkes:



MPI für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut),
MildeMarketing, Exozet

Idee des Big Bounce:



What Existed Before The Big Bang?, A. Peshin, 2019

Stringtheorie

- Direkte Quantisierung aller Wechselwirkungen
- 11 dim Raumzeit
- Neuer freier Parameter: Stringlänge l

→ Fundamentale Parameter: c, h, l

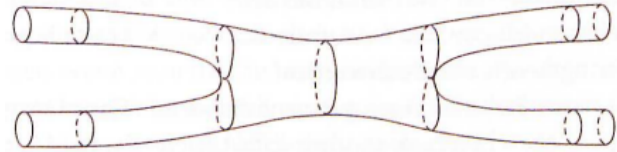


Kiefer, Quantengravitation

- Alle Teilchen sind Anregung fundamentaler Strings

→ Höhere Spannung → Höhere Energie zur Anregung benötigt

- Wechselwirkung in Raumzeit:



C. Kiefer, Quantum Gravity: General Introduction and Recent Developments

- Problem: Dimensionen, Unbeobachtbarkeit

Zusammenfassung

- Wheeler-DeWitt Gleichung: Beschreibung des Quantenkosmos

Existiert die Zeit?

- Universelle Zeitlosigkeit
- Zeit in einer semiklassischen Beschreibung zurückgewonnen

- Irreversibilität kann erklärt werden
- Alternative Modelle kennengelernt

→ Mathematisch konsistent, aber Fehlen experimenteller Hinweise