

DER QUANTENKOSMOS

Von der zeitlosen Welt zum expandierenden Universum

Claus Kiefer

Institut für Theoretische Physik
Universität zu Köln



Inhaltsverzeichnis

Unser Universum

Relativitätstheorie

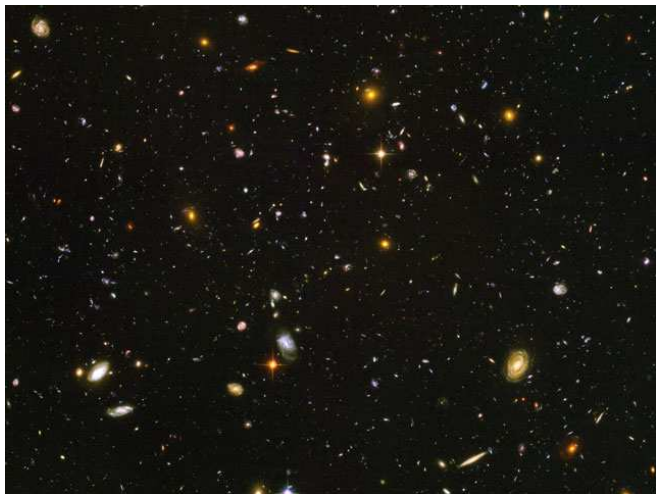
Die Welt der Quanten

Quantenkosmologie

Zufall oder Notwendigkeit?

Unser Universum

Ein Blick in das frühe Universum:



2009 war das Jahr der Astronomie

Das Jahr **1609** ist eines der wichtigsten für die Astronomie:

- ▶ Johannes Kepler (1571 bis 1630) veröffentlicht seine *Astronomia Nova*; sie enthält die beiden ersten Keplerschen Gesetze



- ▶ Galileo Galilei (1564 bis 1642) benutzt als erster ein Fernrohr für astronomische Beobachtungen (Jupitermonde, Mondoberfläche, ...)



Peter Paul Rubens, Selbstbildnis im Kreis der Mantuaner Freunde, um 1604 (Wallraf-Richartz-Museum, Köln)

Warum ist es nachts dunkel?

Kepler an Galilei 1610:

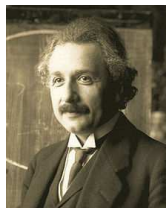
Wenn das wahr ist, und wenn jene Sonnen von gleicher Beschaffenheit sind wie die unsrige, weshalb übertreffen dann alle jene Sonnen insgesamt an Glanz nicht unsere Sonne?

Wichtige Beobachtungen

- ▶ Dunkelheit des Nachthimmels
(Das Universum expandiert und hat ein endliches Alter)
- ▶ Rotverschiebung der Galaxien und Supernovae
(Das Universum expandiert)
- ▶ Spektrum der Kosmischen Hintergrundstrahlung
(Das frühe Universum war heiß)
- ▶ Großräumige Verteilung der Struktur
(Galaxien und Galaxienhaufen)
- ▶ Häufigkeit der leichten Elemente im Universum
(Wasserstoff, Helium, Lithium, ...)

Die theoretischen Grundlagen der Kosmologie

- ▶ Wichtigste theoretische Grundlage:
Einsteins **Allgemeine Relativitätstheorie**



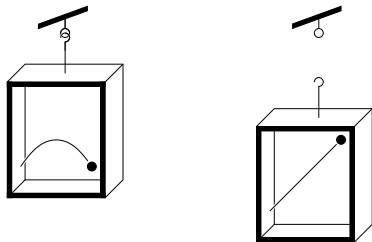
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

- ▶ Die experimentell bewährten Theorien der Kern- und Teilchenphysik
- ▶ Für das sehr frühe Universum („inflationäre Phase“) benötigt man auch spekulative Theorien

Hermann Minkowski, Köln, 21.9.1908:

Meine Herren! Die Anschauungen über Raum und Zeit, die ich Ihnen entwickeln möchte, sind auf experimentell-physikalischem Boden erwachsen. Darin liegt ihre Stärke. Ihre Tendenz ist eine radikale. Von Stund' an sollen Raum für sich und Zeit für sich völlig zu Schatten herabsinken und nur noch eine Art Union der beiden soll Selbständigkeit bewahren.

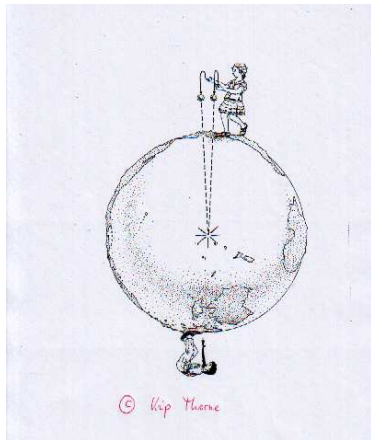
Allgemeine Relativitätstheorie



Äquivalenzprinzip:

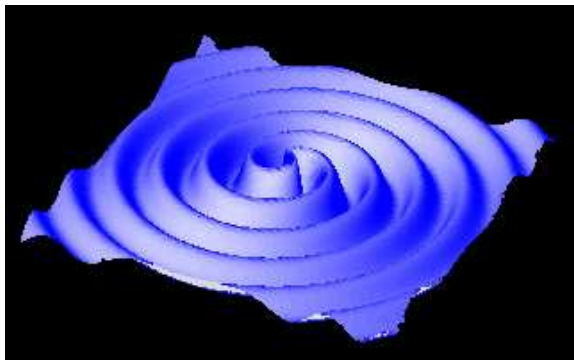
Beschleunigung und Gravitation sind **lokal äquivalent**.

Die geometrische Natur der Gravitation



Gravitation ist Ausdruck der Geometrie von Raum und Zeit;
zentrale Gleichungen: Einsteinsche Feldgleichungen

Beispiel: Gravitationswellen

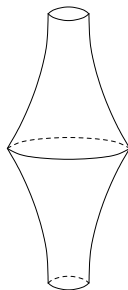
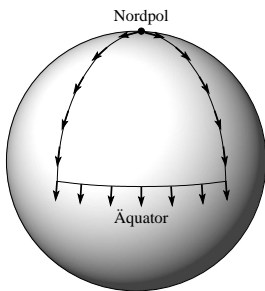


Kosmologisches Prinzip: Wir befinden uns im Universum nicht an einem ungewöhnlichen Ort

Hieraus folgen auf sehr großen Skalen die

- ▶ Homogenität (Gleichförmigkeit) und
- ▶ Isotropie (gleicher Anblick in alle Richtungen)

des räumlichen Universums



Kugeloberfläche und Pseudosphäre

Ein konsistentes Bild unseres Universums

- ▶ Das Universum ist etwa **13,75 Milliarden Jahre** alt;
- ▶ es expandiert mit einer Rate von etwa **70 Kilometer pro Sekunde und Megaparsec**;
- ▶ es expandiert heute mit einer positiven Beschleunigung;
- ▶ es ist räumlich ungefähr flach;
- ▶ es besteht hauptsächlich aus:
 - ▶ 72,8 % Dunkler Energie
 - ▶ 22,7% Dunkler exotischer (nichtbaryonischer) Materie
 - ▶ 4,5 % normaler (baryonischer) Materie
 - ▶ Kleinen Mengen von Strahlung und Neutrinos

Die zeitliche Entwicklung unseres Universums

von null bis 10^{-43} Sekunden Quantengravitation

zwischen ca. 10^{-34} und 10^{-32} Sekunden Beschleunigte Expansion („Inflation“)

10^{-6} Sekunden Erzeugung der Baryonen (vor allem Protonen und Neutronen) und Antibaryonen

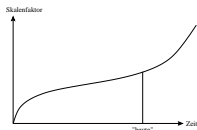
1 Sekunde Vernichtung der Antimaterie

1 Sekunde bis 3 Minuten Entstehung der leichten Elemente

380 000 Jahre Entkopplung von Strahlung und Materie

100 Millionen Jahre Entstehung der ersten Galaxien

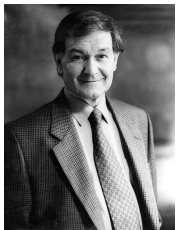
13,75 Milliarden Jahre Heute



Die Zukunft des Universums

- ▶ Falls die gegenwärtige Beschleunigung tatsächlich von einer **Kosmologischen Konstante** herrührt: Universum expandiert für immer und ewig und wird immer „leerer“
 - ▶ nach ca. 100 Milliarden Jahren könnten wir nur noch unsere Milchstraße sehen (die dann mit dem Andromedanebel verschmolzen sein wird);
 - ▶ allerdings wird die Erde bereits in etwa 7,6 Milliarden Jahren von der Sonne „verschluckt“
- ▶ Bei einer zeitlich veränderlichen Dunklen Energie sind andere Möglichkeiten denkbar:
 - ▶ „**Großer Riß**“: Das Universum wird in endlicher Zeit unendlich groß
 - ▶ „**Große Bremse**“: Universum bremst in der Zukunft unendlich schnell ab und ändert seine Größe dann nicht mehr

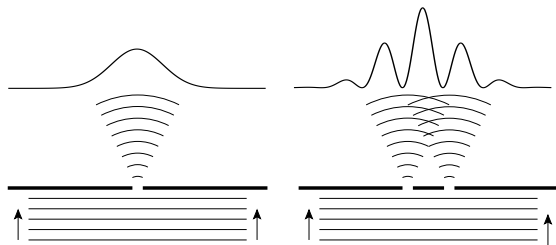
Die Grenzen der klassischen Kosmologie



Roger Penrose und Stephen Hawking 1970:

Unter sehr allgemeinen Annahmen ist Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie unvollständig; sie kann den Anfang des Universums nicht beschreiben („Singularitätentheoreme“)

QUANTENGRAVITATION?

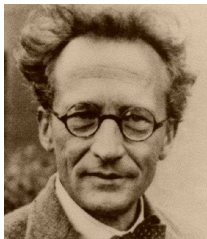


Superpositionsprinzip

Die Summe zweier physikalischer Quantenzustände (Wellenfunktionen) ist wieder ein physikalisch erlaubter Zustand;

$$\Psi = \alpha\Psi_1 + \beta\Psi_2$$

Die Schrödinger-Gleichung



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

(Erwin Schrödinger 1926)

Diese Gleichung ist **deterministisch** – doch woher kommt der Zufall in der Quantentheorie?

Die Wahrscheinlichkeitsinterpretation



$|\Psi|^2$ ist die **Wahrscheinlichkeitsdichte** für klassische Größen (z.B. dafür, bei einer Ortsmessung das Elektron in einem bestimmten Volumen zu finden);

(Max Born 1926)

Ende des Determinismus in der Physik?

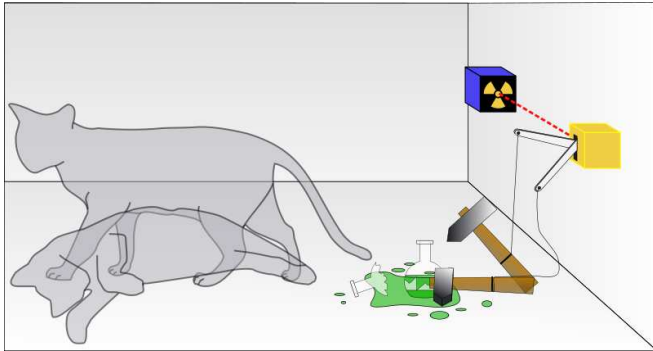
Die Unbestimmtheitsrelation

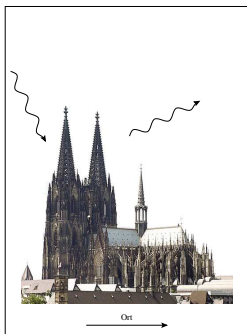


$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

(Werner Heisenberg 1927)

Schrödingers Katze





Klassische Eigenschaften entstehen durch **Dekohärenz**, der irreversiblen und unvermeidlichen Wechselwirkung mit der Umgebung

(das Universum als Ganzes ist das einzige streng abgeschlossene System)

Interpretation der Quantentheorie?

Bei einer realistischen Auffassung und ohne die Hinzunahme neuer Elemente hat man im wesentlichen die Wahl zwischen

- ▶ der **Everett-Interpretation**: alle Komponenten der Wellenfunktion nach einer „Messung“ sind gleichzeitig **real**; Ableitung der Wahrscheinlichkeitsinterpretation aus relativen Häufigkeiten?
- ▶ Der expliziten Einführung eines **Kollapses** der Wellenfunktion in eine einzige reale Komponente bei einer „Messung“ (Verletzung der Schrödinger-Gleichung)

Unabhängig davon ist eine lokale Natur der Realität experimentell ausgeschlossen („Bellsche Ungleichungen“)

Warum Quantengravitation?

- ▶ Vereinheitlichung aller Wechselwirkungen
- ▶ Singularitätentheoreme
 - ▶ Schwarze Löcher
 - ▶ „Urknall“
- ▶ Das Problem der Zeit
- ▶ Das Scheitern von Alternativen



Albertus Magnus (um 1200 - 1280):
„Ergo esse temporis non dependet ab anima, sed temporis perceptio.“



Max Planck, Über irreversible Strahlungsvorgänge, *Sitzungsberichte der königlich-preußischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, phys.-math. Klasse*, Seiten 440–80 (1899)

Planck-Einheiten

$$l_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \approx 1,62 \times 10^{-35} \text{ Meter}$$

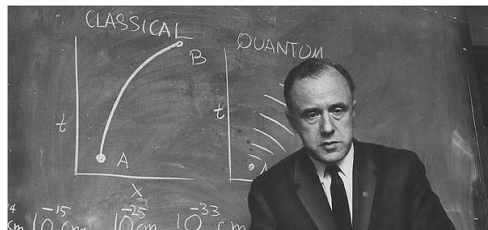
$$t_P = \frac{l_P}{c} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}} \approx 5,40 \times 10^{-44} \text{ Sekunden}$$

$$m_P = \frac{\hbar}{l_P c} = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} \approx 2,17 \times 10^{-8} \text{ Kilogramm} \approx 1,22 \times 10^{19} \frac{\text{GeV}}{c^2}$$

Max Planck (1899):

Diese Größen behalten ihre natürliche Bedeutung so lange bei, als die Gesetze der Gravitation, der Lichtfortpflanzung im Vacuum und die beiden Hauptsätze der Wärmetheorie in Gültigkeit bleiben, sie müssen also, von den verschiedensten Intelligenzen nach den verschiedensten Methoden gemessen, sich immer wieder als die nämlichen ergeben.

Die Zeitlosigkeit der Quantengravitation



$$\hat{H}\Psi = 0$$

(Wheeler-DeWitt-Gleichung)

Auf der fundamentalen Ebene der Quantengravitation ist die Zeit völlig verschwunden. Nur unter wohldefinierten speziellen Umständen ergibt sich ein approximativer Zeitbegriff, der mit dem Zeitbegriff in der Relativitätstheorie übereinstimmt

Gell-Mann und Hartle 1990:

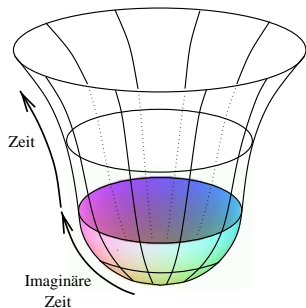
„Die Quantenmechanik selbst kann man am besten und grundlegendsten im Rahmen der Quantenkosmologie verstehen.“

- ▶ Universell gültige Quantentheorie:
Anwendung auf das Universum als Ganzes als dem einzigen streng abgeschlossenen System →
„Wellenfunktion des Universums“
- ▶ Benötige Quantentheorie der Gravitation, da diese auf kosmischen Skalen dominiert

Was soll die Quantenkosmologie leisten?

- ▶ Vollständiges Bild für die Entstehung und Entwicklung des Universums ohne Singularitäten – ist möglich in bestimmten Modellen
- ▶ Ursprung der Zeitrichtung
- ▶ Strukturentwicklung aus Quantenfluktuationen (sehr wichtig: Dekohärenz)
- ▶ Lösung der Rätsel von Dunkler Materie und Dunkler Energie?
- ▶ Tieferes Verständnis der Quantentheorie; Rolle des Zufalls?

Beispiel: Der Vorschlag von Hartle und Hawking



Stephen Hawking, Vatikankonferenz 1982:

Die Randbedingungen des Universums müssen sehr speziell sein, und was kann spezieller sein als die Bedingung, daß es keinen Rand gibt.

Schleifenquantenkosmologie (M. Bojowald 1999):

- ▶ Die Größe des Universums kann nur diskrete Werte annehmen (spürbar nur im Bereich der Planck-Skala);
- ▶ der Wert null kommt nicht vor;
- ▶ die klassische Singularität kann quasi „übersprungen“ werden, wobei man in ein „anderes Universum“ gelangt;
- ▶ dieses andere Universum befindet sich nur formal „vor dem Urknall“; es gibt keine direkte kausale Verbindung zu unserem Universum

Die Pfeile der Zeit

Obwohl fast alle fundamentalen Gesetze der Physik keine Zeitrichtung auszeichnen, sind die meisten Phänomene *irreversibel* (unumkehrbar)

Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik:

Die **Entropie** („Unordnung“) nimmt in einem abgeschlossenen System nie ab



Paul Cézanne, Nature morte au crâne, 1895/1900
(The Barnes Foundation, Pennsylvania)

Ursprung der Zeitrichtung

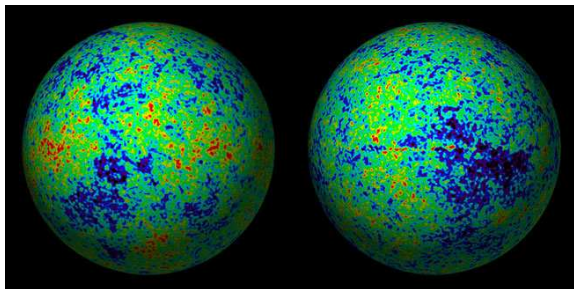
Fundamentale Asymmetrie der Wheeler-DeWitt-Gleichung bezüglich der Größe des Universums (der „inneren Zeit“): größere Entropie bei größerem Universum?

Expansion des Universums **definiert** Zeitrichtung

Ist die Expansion des Universums eine Tautologie?

Beobachtungen?

Enthält das Anisotropiespektrum der Hintergrundstrahlung Information über die Quantengravitation?



Mit Spannung erwartet: Ergebnisse des PLANCK-Satelliten (Start: Mai 2009)

Interpretation der Quantenkosmologie

Praktisch einzige benutzte Interpretation wegen der Linearität der Gleichungen: [Everett-Interpretation](#)
(mit Dekohärenz als wesentlichem Bestandteil)

B. S. DeWitt 1967:

Everett's view of the world is a very natural one to adopt in the quantum theory of gravity, where one is accustomed to speak without embarrassment of the 'wave function of the universe.' It is possible that Everett's view is not only natural but essential.

Determinismus oder Zufall?

- ▶ Hypothetischer Blick von „außen“ (**Vogelperspektive**):
Fundamentale Quantenwelt ist zeitlos und enthält alle von ψ erlaubten Möglichkeiten (Determinismus in einem trivialen Sinn).
- ▶ Unsere Perspektive (**Froschperspektive**): Quantenwelt erscheint zeitabhängig und dem Zufall unterworfen; das Bild der klassischen Kosmologie ist eine Näherung. Offen: Warum gibt es lokale Beobachter in der nichtlokalen Quantenwelt?

Quo vadis?

Albert Einstein 1953:

Es hat schweren Ringens bedurft, um zu dem für die theoretische Entwicklung unentbehrlichen Begriff des selbständigen und absoluten Raumes zu gelangen. Und es hat nicht geringerer Anstrengung bedurft, um diesen Begriff nachträglich wieder zu überwinden – ein Prozeß, der wahrscheinlich noch keineswegs beendet ist.

Literatur

C. Kiefer, *Der Quantenkosmos* (S. Fischer 2008).

