

DER QUANTENKOSMOS

Von der zeitlosen Welt zum expandierenden Universum

Claus Kiefer

Institut für Theoretische Physik
Universität zu Köln



Inhaltsverzeichnis

Unser Universum

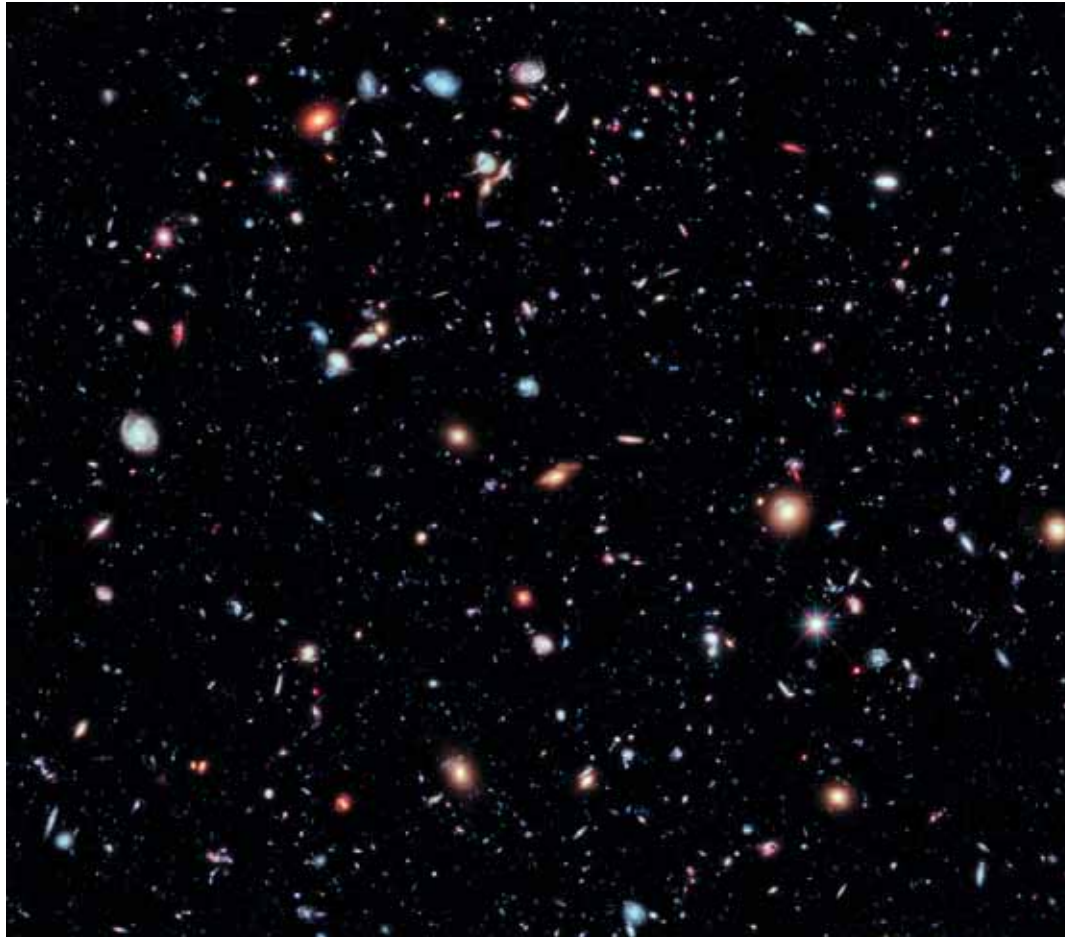
Relativitätstheorie

Quantentheorie

Quantengravitation

Die Richtung der Zeit

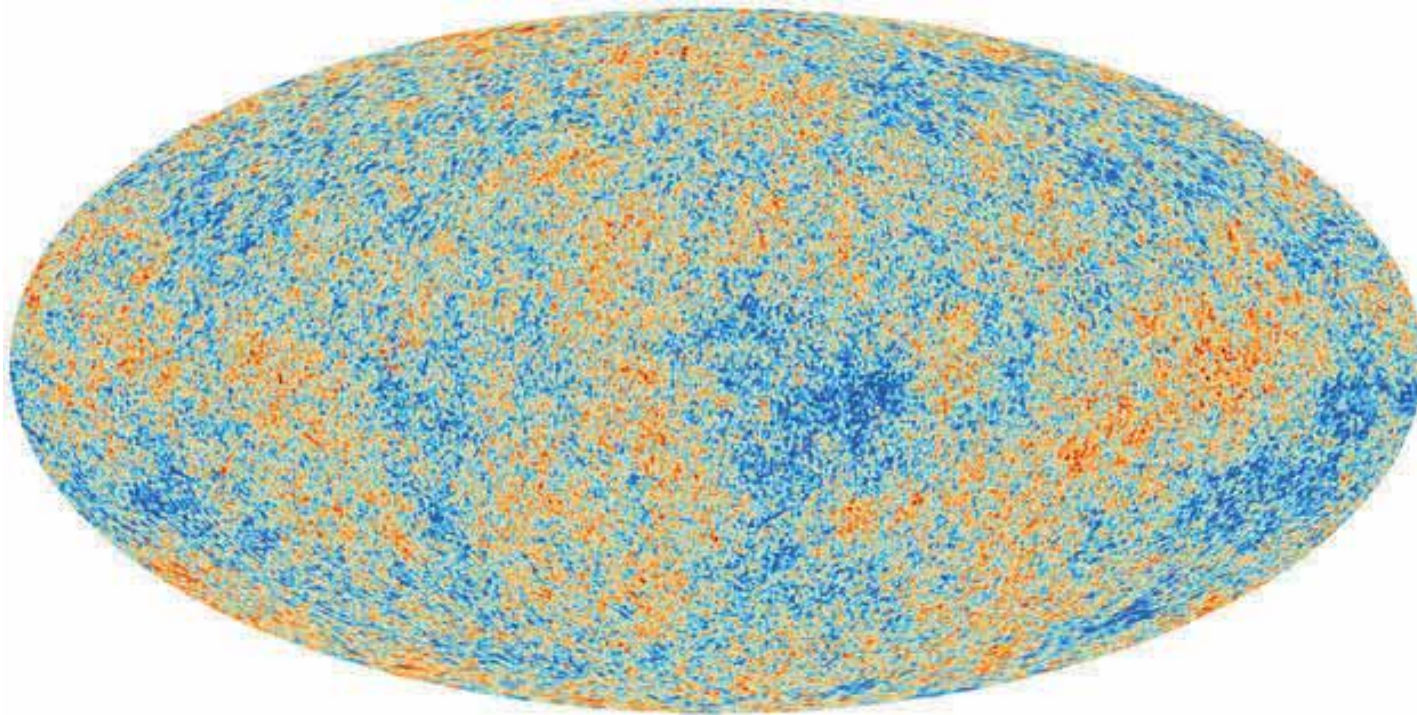
Ein Blick in das frühe Universum



Das Hubble Extreme Deep Field

Abbildungsnachweis: Nasa, Esa

Ein Blick in das sehr frühe Universum



Die *Kosmische Hintergrundstrahlung (CMB)*

Abbildungsnachweis: ESA/PLANCK Collaboration

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?

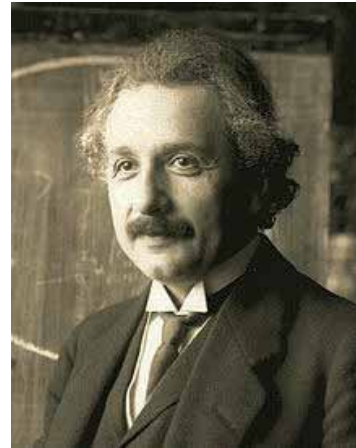
Aus: J. Kepler, Des kaiserlichen Mathematikers Johannes Kepler Unterredung mit dem Sternenboten: der unlängst von dem Paduanischen Mathematiker Galileo Galilei zu den Sterblichen gesandt wurde

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, ...)
- ▶ Altersbestimmungen
(z.B. von Kugelsternhaufen)

Allgemeine Relativitätstheorie

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



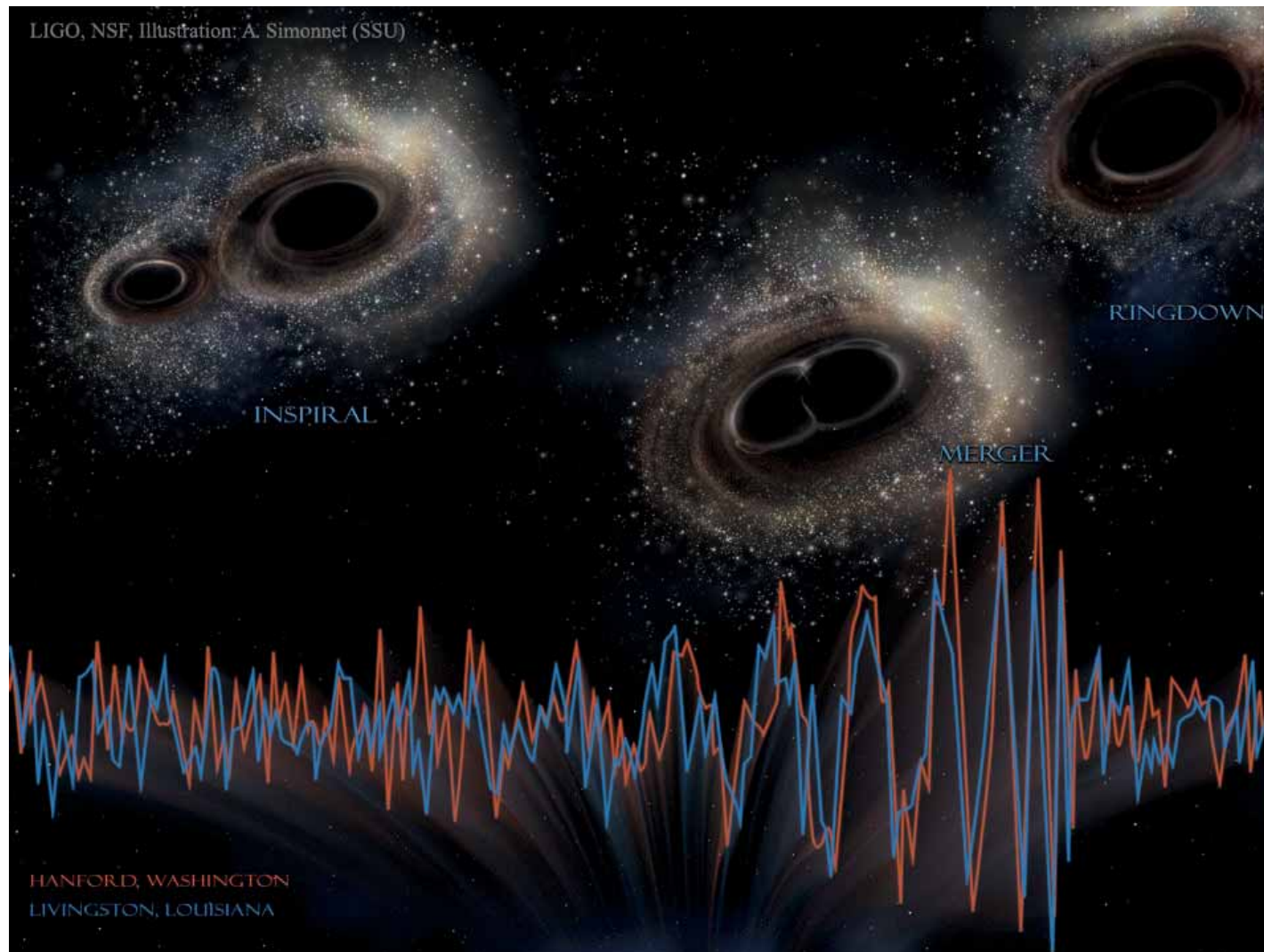
Abbildungsnachweis: Wikipedia (Albert Einstein) – gemeinfrei

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

(25. November 1915)

- ▶ Links: Geometrie (Gravitationsfeld)
- ▶ Rechts: Materiefelder (Standardmodell der Teilchenphysik)

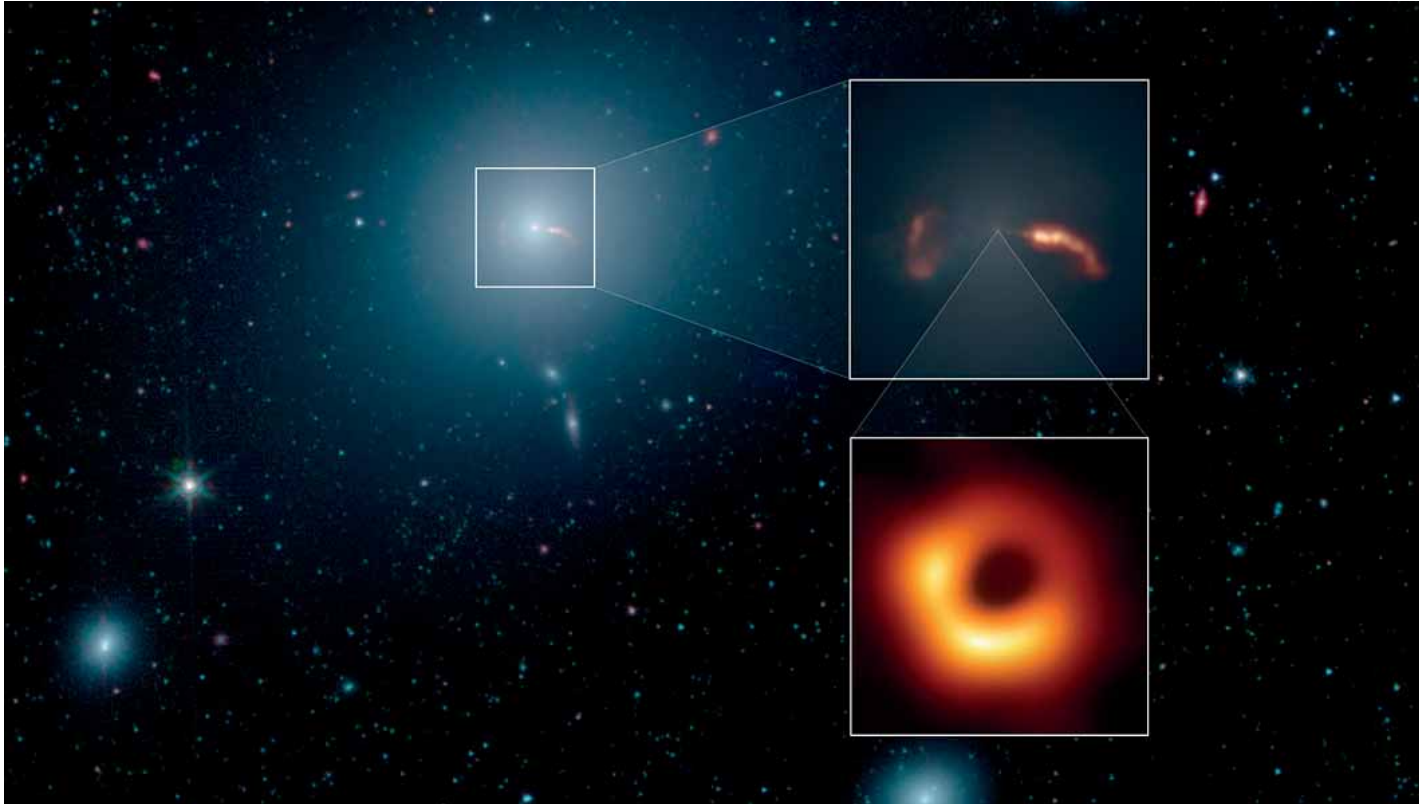
Beispiel I: Gravitationswellen



Abbildungsnachweis: LIGO, NSF, Aurore Simonnet

Erster **direkter** Nachweis im September 2015!

Beispiel II: Schwarze Löcher

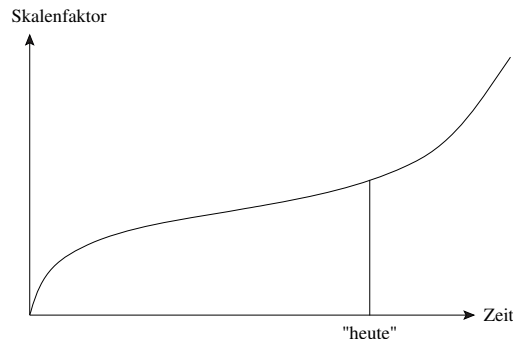


Das Schwarze Loch in der Galaxie M87

Abbildungsnachweis: NASA, JPL-Caltech, Event Horizon Telescope Collaboration

Ein konsistentes Bild unseres Universums

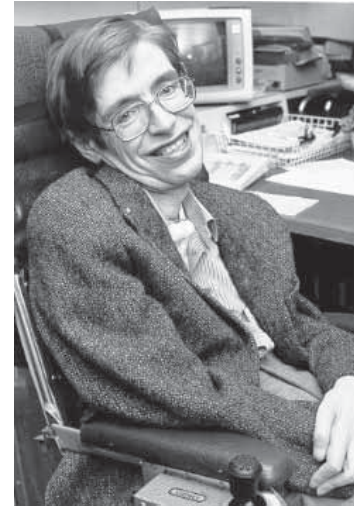
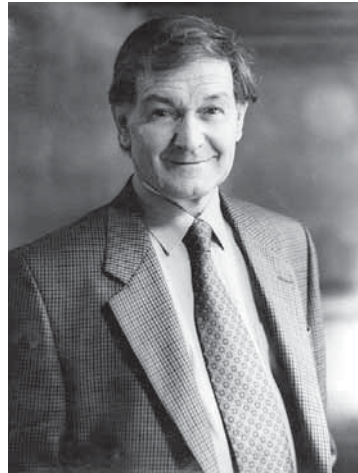
- ▶ Das Universum ist etwa **13,82 Milliarden Jahre** alt;
- ▶ es expandiert mit einer Rate von etwa **67 Kilometer pro Sekunde und Megaparsec**;
- ▶ es expandiert heute mit einer positiven Beschleunigung;
- ▶ es ist räumlich ungefähr flach;
- ▶ es besteht hauptsächlich aus:
 - ▶ 68,3 % Dunkler Energie
 - ▶ 26,8% Dunkler exotischer (nichtbaryonischer) Materie
 - ▶ 4,9 % normaler (baryonischer) Materie
 - ▶ Kleinen Mengen von Strahlung und Neutrinos



Die Zukunft des Universums

- ▶ Falls die gegenwärtige Beschleunigung 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

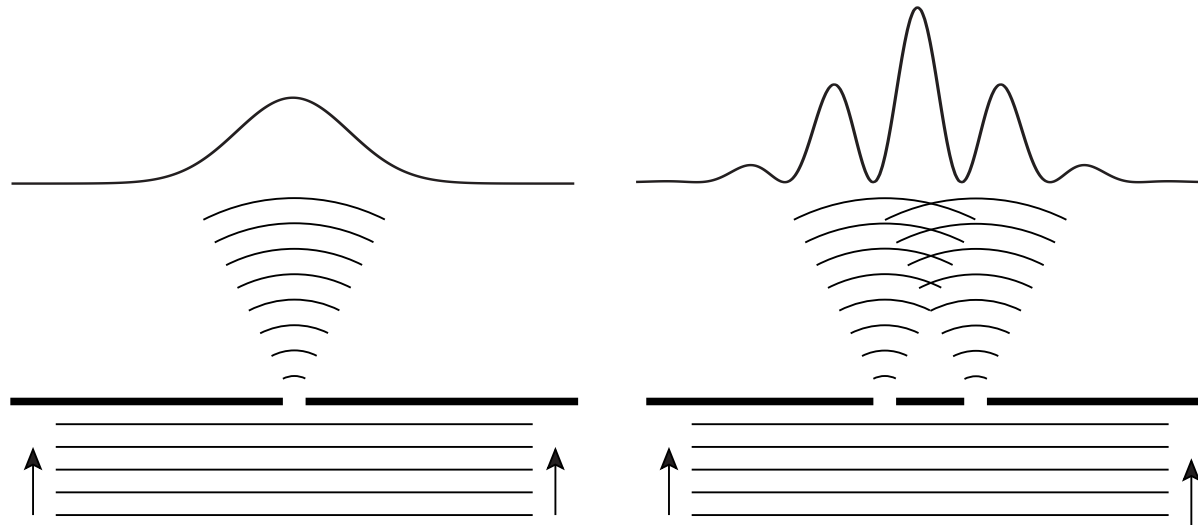
Die Grenzen der klassischen Kosmologie



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?

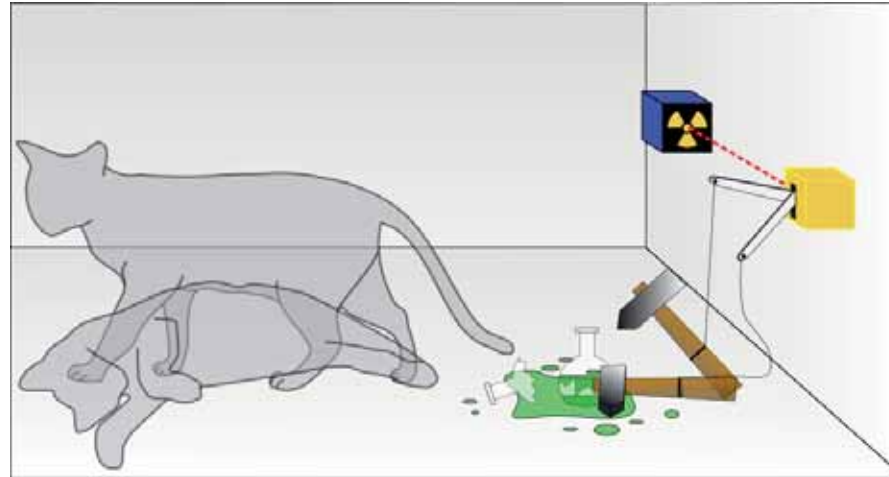
Die Unbestimmtheitsrelationen



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

(Werner Heisenberg 1927)

Schrödingers Katze



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? Klassische Eigenschaften entstehen durch **Dekohärenz**.
- ▶ Der expliziten Einführung eines **Kollapses** der Wellenfunktion in eine einzige reale Komponente bei einer „Messung“ (Verletzung der Schrödinger-Gleichung)

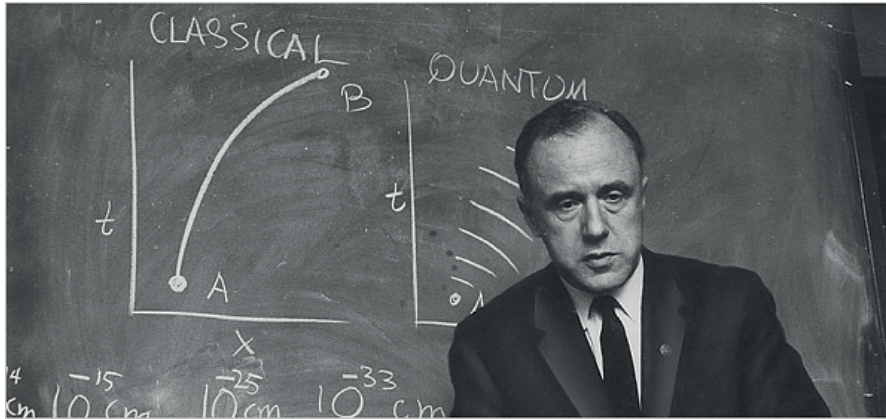
Goethe, *Maximen und Reflexionen*

Was uns so sehr irremacht, wenn wir die Idee in der Erscheinung anerkennen wollen, ist, daß sie oft und gewöhnlich den Sinnen widerspricht. Das Kopernikanische System beruht auf einer Idee, die schwer zu fassen war und noch täglich unseren Sinnen widerspricht . . .

Das Problem der Zeit

- ▶ Die Zeit in der Relativitätstheorie ist **dynamisch**
- ▶ Die Zeit in der Quantenmechanik (bzw. die Raumzeit in der Quantenfeldtheorie) ist **absolut**
- ▶ Was passiert, wenn man Relativitätstheorie und Quantentheorie zu einer Theorie der **Quantengravitation** vereinigt?

Die Zeitlosigkeit der Quantengravitation

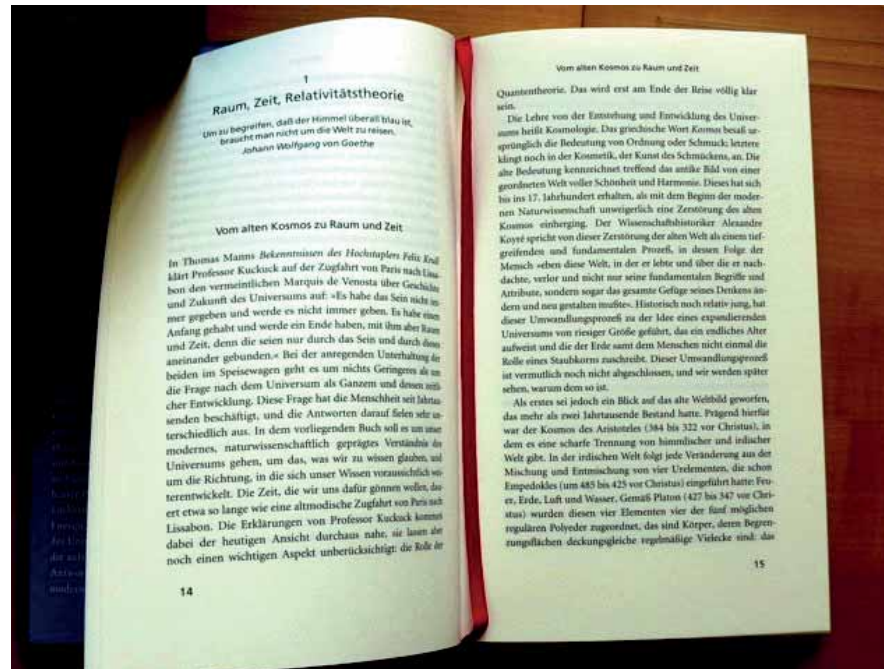


$$\hat{H}\Psi = 0$$

(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

Die Suche nach der verlorenen Zeit



Die „Illusion der Zeit“ entsteht durch Korrelation mit dem „Rest des Universums“ analog der Lektüre eines Buches oder dem Spielen einer Partitur

Determinismus oder Zufall?

- ▶ Hypothetischer Blick von „außen“ (**Vogelperspektive**): Die fundamentale Quantenwelt ist zeitlos und enthält alle von ψ erlaubten Möglichkeiten (Determinismus in einem trivialen Sinn). **Multiversum?**
- ▶ Unsere Perspektive (**Froschperspektive**): Die Quantenwelt erscheint zeitabhängig und dem Zufall unterworfen; die übliche Zeit ist nur eine Näherung. Ihre Richtung läßt sich im Prinzip aus einer einfachen Randbedingung in der Quantengravitation verstehen.

Die Richtung der Zeit



Paul Cézanne, *Nature morte au crâne* (Barnes Foundation, Pennsylvania)

Ursprung der Zeitrichtung

- ▶ Die grundlegenden Naturgesetze zeichnen keine Zeitrichtung aus
- ▶ Man beobachtet **Zeitpfeile**
(zentral: Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik)
- ▶ Gemeinsamer Ursprung?

Ursprung der Zeitrichtung: Kosmologie

Woher kommt die Sonne?



Gravitative Instabilität von Staubwolken



Kosmologie

Ludwig Boltzmann (1898):

Daß in der Natur der Übergang von einem wahrscheinlichen in einen unwahrscheinlichen Zustand nicht ebenso häufig passiert wie der umgekehrte Vorgang sollte durch die Annahme eines sehr unwahrscheinlichen Anfangszustands des gesamten uns umgebenden Universums ausreichend erklärt werden. . . .

Woher kommt der unwahrscheinliche Anfangszustand?

- ▶ Mögliche Erklärung: Natürliche Randbedingung in der „zeitlosen“ Quantengravitation (z.B. ist die Wheeler-DeWitt-Gleichung besonders einfach für ein kleines Universum)
- ▶ Die Zeitrichtung wird dann durch die Größe des Universums **definiert**.
- ▶ Wichtig: **Dekohärenz**

Gibt es die Zeit oder nicht?

John Wheeler 1968:

Diese Überlegungen zeigen, daß den Begriffen Raumzeit und Zeit keine grundlegenden Bedeutung in der Struktur der physikalischen Theorie zukommt. . . . Es gibt keine Raumzeit, es gibt keine Zeit, kein vorher, kein nachher. Die Frage, was als „nächstes“ passiert, ist bedeutungslos.

Literatur

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

J. A. Wheeler, *Einsteins Vision* (Springer 1968)