

Zusammenfassung, insbes. offene und beantwortbare Fragen

Kosmologie für Nicht-Physiker

Markus Pössel & Björn Malte Schäfer

Haus der Astronomie/Institut für Theoretische Astrophysik

16.10.2014 bis 29.1.2015

Inhalt

- 1 Expansion versus Bewegung: Was dehnt sich aus?**
- 2 Raumgeometrie: Ist das Universum endlich oder unendlich?**
- 3 Was geschah im frühesten Universum?**
- 4 Dunkle Materie, Dunkle Energie?**
- 5 Multiversum: Gibt es mehr als ein Universum?**
- 6 Wie sicher ist unser kosmologisches Wissen?**

Expansion versus Bewegung

Beschreibung mit Skalenfaktor: Abstandsänderungen direkt mit Raumeigenschaften verknüpft.

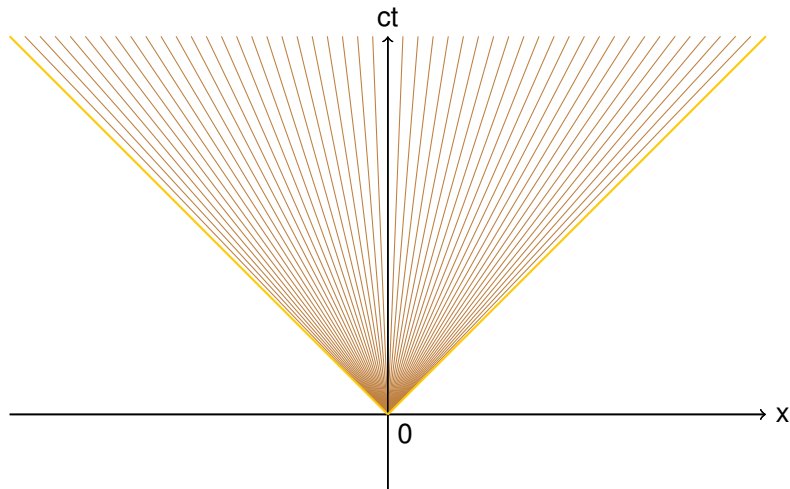
Aber heißt das, dass wir es mit etwas ganz anderem als Bewegung zu tun haben?

Modellvorstellungen von Luftballon, Gummituch, Rosinenkuchen betont Expansion des Raums — ist das „Entstehung von neuem Raum“?

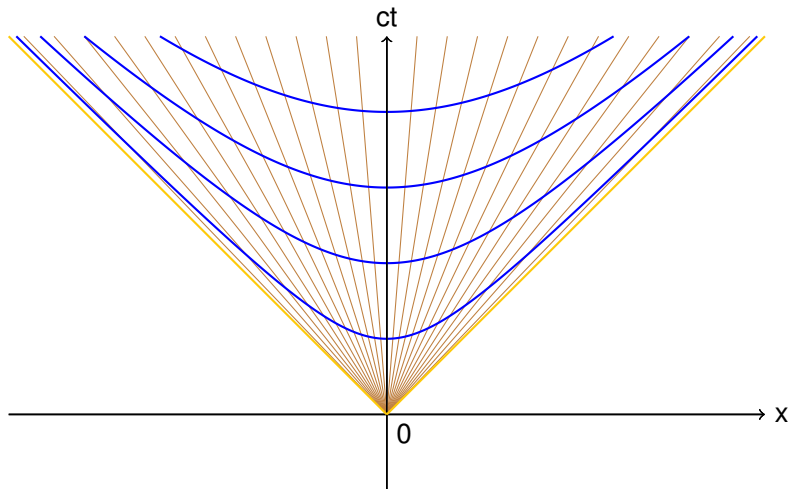
Problem mit Bewegung: Klassisches Explosionsbild zeichnet „Mittelpunkt des Universums“ aus — Widerspruch zur Homogenität!

„Relativistische Explosion“: Edmund Arthur Milne (1932)

Milne-Universum: Raumzeitdiagramm



Kosmische Zeit im Milne-Universum



Kosmologische Rotverschiebung vs. Dopplereffekt

Im Milne-Universum: Rotverschiebung ist normaler speziell-relativistischer Dopplereffekt. Überlichtgeschwindigkeiten sind Konsequenz der ungewöhnlichen Gleichzeitigkeitswahl (kosmische Zeit)

Im Milne-Universum klar: „Energieverlust“ der Photonen ist lediglich eine Folge davon, gegeneinander bewegte Beobachter zu einem System „zusammenzukleben“!

Allgemein: ART-Rezept zum Vergleichen von Geschwindigkeiten (=„Paralleltransport von Raumzeitvektoren“) liefert ebenfalls Zusammenhang z und Relativgeschwindigkeit über die speziell-relativistische Dopplerformel.

Was passiert mit gebundenen Systemen?

Expansionsvorstellung potenziell irreführend (auch zwischen Atomkern und Elektron „entsteht neuer Raum“?)

Bewegungsvorstellung führt zum Ziel: Aktuelle Ausdehnungsrate ist eine „Anfangsgeschwindigkeit“, die für Atome nicht gegeben ist; entscheidend ist lediglich $\ddot{a}(t)$ [Beschleunigung — positiv wg. Dunkler Energie, negativ wg. normaler Massendichten]

Insbesondere gibt es keine „Expansions-Reibungskraft“, die im Raum befindliche Objekte „mitführt“

Was passiert mit gebundenen Systemen?

Rechnung zeigt (vgl. Giulini, arXiv:1306.0374v1): Expansion dominiert über große Längenskalen, Bindungskräfte über kleinere. Konkret:

$$\frac{1}{2}\dot{r}^2 + U(r) = E, \quad r^2\dot{\phi} = L,$$

mit L Bahndrehimpuls, $U(r)$ effektivem Potenzial

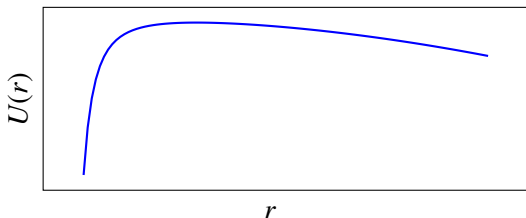
$$U(r) = \frac{L^2}{2r^2} - \frac{C}{r} + \frac{1}{2}Ar^2,$$

wobei

$$C = \begin{cases} GM & \text{Gravitationsfeld} \\ \frac{Qe}{4\pi\epsilon_0 m} & \text{elektrisches Feld} \end{cases}$$

und $A = -q_0 H_0$ Einfluss von \ddot{a} .

Was passiert mit gebundenen Systemen?



Kritischer Radius bei

$$r_c = \sqrt[3]{\frac{C}{A}}$$

Ergibt

$$r_c = \begin{cases} \left(\frac{M}{M_\odot}\right)^{1/3} 108\text{pc} & \text{Gravitation} \\ \left(\frac{Q}{e}\right)^{1/3} 30\text{AU} & \text{Elektrostatik} \end{cases}$$

Was passiert mit gebundenen Systemen?

$$r_c = \begin{cases} \left(\frac{M}{M_\odot}\right)^{1/3} 108\text{pc} & \text{Gravitation} \\ \left(\frac{Q}{e}\right)^{1/3} 30\text{AU} & \text{Elektrostatik} \end{cases}$$

bedeutet

- Wasserstoffatom dort, wo jetzt die Sonne ist: Elektron müsste nahe Pluto sein, bevor Beschleunigung der Expansion überwiegt
- für die Sonne: Planeten müssten weit jenseits der Nachbarsterne sein
- Galaxie von $10^{12} M_\odot$: nächste Galaxie müsste mehr als 1 Mpc entfernt sein

Da $q_0 = \frac{4\pi G}{3}(\rho_0 + 3p_0/c^2)$ ist q_0 für normale Dunkle Energie konstant; wenn nicht (wie in einigen Quintessenz-Modellen), könnte es einen „Big Rip“ geben.

Die „angebundene Galaxie“

Halte Abstand zunächst konstant; dann loslassen



Davis et al. 2003, arXiv:astro-ph/0104349

„Entstehung neuen Raums“ würde bedeuten: Abstand beginnt sofort nach dem loslassen zuzunehmen (vgl. Gummituch).

In Wirklichkeit: Nur Beschleunigungen spielen eine Rolle; in Kosmos ohne kosmologische Konstante beginnt die Galaxie sogar, sich auf den Beobachter (blauer Kreis) zuzubewegen!

Ist das Universum endlich oder unendlich?

Missverständnisse (selbst unter Astronomen anzutreffen):

$\Omega > 1$	\Leftrightarrow	sphärisch,	endlich,	kollabiert irgendwann
$\Omega = 1$	\Leftrightarrow	euklidisch,	unendlich,	expandiert ewig
$\Omega < 1$	\Leftrightarrow	hyperbolisch,	unendlich,	expandiert ewig

Synonyme: endlich = „geschlossenes Universum“, unendlich = „offenes Universum“.

- Lokale Geometrie \neq globale Struktur (Topologie)!
- Direkter Zusammenhang Ω mit Kollaps nur für $\Omega_\Lambda = 0$!

Ist das Universum endlich oder unendlich?

Missverständnisse (selbst unter Astronomen anzutreffen):

$\Omega > 1$	\Leftrightarrow	sphärisch,	endlich,	kollabiert irgendwann
$\Omega = 1$	\Leftrightarrow	euklidisch,	unendlich,	expandiert ewig
$\Omega < 1$	\Leftrightarrow	hyperbolisch,	unendlich,	expandiert ewig

Synonyme: endlich = „geschlossenes Universum“, unendlich = „offenes Universum“.

- Lokale Geometrie \neq globale Struktur (Topologie)!
- Direkter Zusammenhang Ω mit Kollaps nur für $\Omega_\Lambda = 0$!

Ist das Universum endlich oder unendlich?

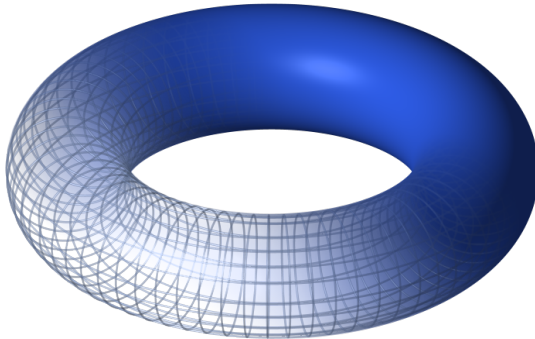
Missverständnisse (selbst unter Astronomen anzutreffen):

$\Omega > 1$	\Leftrightarrow	sphärisch,	endlich,	kollabiert irgendwann
$\Omega = 1$	\Leftrightarrow	euklidisch,	unendlich,	expandiert ewig
$\Omega < 1$	\Leftrightarrow	hyperbolisch,	unendlich,	expandiert ewig

Synonyme: endlich = „geschlossenes Universum“, unendlich = „offenes Universum“.

- Lokale Geometrie \neq globale Struktur (Topologie)!
- Direkter Zusammenhang Ω mit Kollaps nur für $\Omega_\Lambda = 0$!

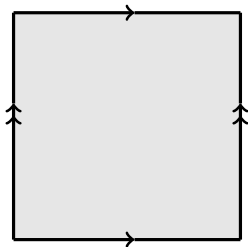
Einfache nicht-triviale Topologie: Tori



„Zweifach aufgerollter“ Ebenenausschnitt

Der Torus ist eben!

Mathematische Darstellung („Computerspieltopologie“):



Gleich gekennzeichnete Teile werden miteinander identifiziert —
erster Schritt: offener Zylinder, zweiter Schritt: Torus („Donut“-Bild
gibt die Geometrie nicht richtig wieder!)

Topologische Möglichkeiten: Global

- $K = 0$: 18 verschiedene Möglichkeiten für homogenen Raum — erstmals im Zusammenhang mit Kristallografie klassifiziert (1885). 10 endlich, 8 unendlich (aber nicht unbedingt in alle Richtungen!)
- $K = +1$: abzählbar unendlich viele verschiedene topologische Möglichkeiten für homogenen Raum — alle sind endlich (in-sich-Faltungen der 3-Kugel)
- $K = -1$: überabzählbar unendlich viele verschiedene Möglichkeiten; einige endlich, andere unendlich

$K = 0$ vgl. Riazuelo et al. 2004, astro-ph/0311314

$K = +1$ vgl. Gausmann et al. 2001, gr-qc/0106033

$K = -1$ vgl. Cornish et al. 1998, astro-ph/9801212

Topologische Möglichkeiten: Nachweis

Grundsätzlich: Nur (hinreichend) kleines Universum ist nachweisbar!

Nachweis über Korrelationen:

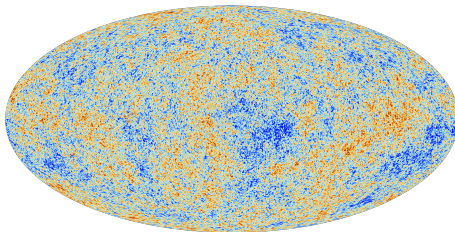


Bild: ESA/Planck Collaboration

Homogene Geometrie = kein Mittelpunkt

Homogene Raumgeometrie: Alle Orte gleichberechtigt, kein Mittelpunkt.

Häufige Frage „Wo, an welchem Punkt war der Urknall?“ ergibt entsprechend keinen Sinn — der Urknall (die Urknallphase) war überall.

Beobachtbares Universum war auf einen einzigen Punkt zusammengezogen; im unendlich großen Universum: auch die Urknallsingularität unendlich!

Was geschah im frühesten Universum?

Planck-Skala gibt Größenordnungen dafür, wann sowohl Allgemeine Relativitätstheorie als auch Quantentheorie wichtig werden → Quantengravitation

Verschiedene Ansätze: Quantenkosmologie, Loop-Quantengravitation, Stringtheorie

Planck-Skala

Erste Frage: Was sind die kleinsten sinnvollen Längenskalen im Universum?

Quantenmechanik: Teilchen haben eine Wellenlänge, $\lambda = h/p$.
Lokalisierung von Wellen besagt: Genauer als auf λ genau so lässt sich der Ort eines Teilchens nicht festlegen.

Um Teilchen genauer lokalisieren zu können, müssen wir ihnen höheren Impuls \rightarrow höhere Energie erteilen. Im relativistischen Regime wird $E = pc$, also

$$l_{min} = \lambda = \frac{hc}{E} = 1.24 \cdot 10^{-15} \left(\frac{1 \text{ GeV}}{E} \right) m$$

Planck-Skala

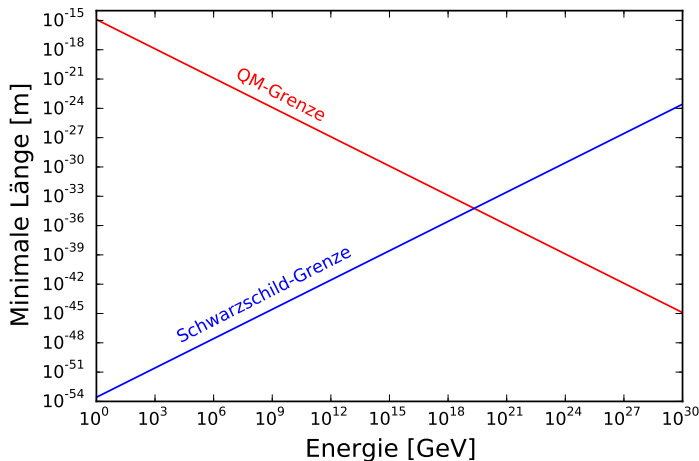
Allgemeine Relativitätstheorie sagt: Teilchen mit gegebener Masse bzw. Energie ist allenfalls bis zu einer Genauigkeit von

$$l_{min} = \frac{2GM}{c^2} = \frac{2GE}{c^4} = 2.65 \cdot 10^{-54} \left(\frac{E}{1 \text{ GeV}} \right) m$$

zu lokalisieren — das wäre der Schwarzschildradius, wenn das Teilchen so kompakt zusammengepresst wäre, dass ein Schwarzes Loch entstünde.

Planck-Skala

Zusammen ergeben beide Effekte eine minimale sinnvolle Länge:



Planck-Skala

Aus dieser Bedingung (bis auf kleine Faktoren): **Planck-Energie**
(mit $\hbar = h/2\pi$):

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

Planck-Masse bzw. **-energie**:

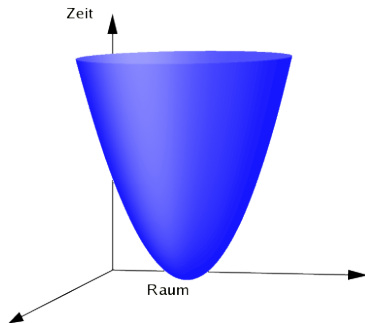
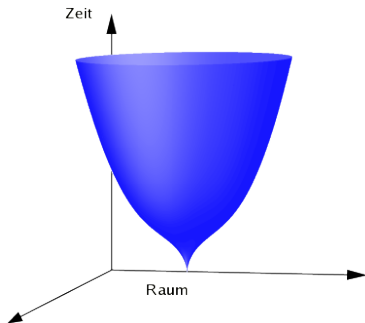
$$m_{pl} = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} \approx 1.22 \cdot 10^{19} \text{ GeV}/c^2 = 2.18 \cdot 10^{-8} \text{ kg}$$

Planck-Zeit

$$t_{pl} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}} \approx 5.34 \cdot 10^{-44} \text{ s}$$

An der Planck-Skala sind sowohl Effekte der QM als der ART wichtig → Quantengravitation! Aber: Weit jeder direkten [z.B. Beschleuniger-]Messungen!

Hartle-Hawking-Quantenkosmologie

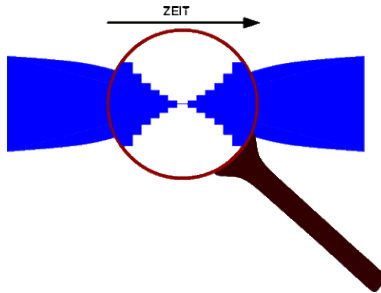


„Vor dem Urknall“ ist genauso sinnvoll wie „nördlich vom Nordpol“

cf. Louko, <http://www.einstein-online.info/vertiefung/QuantenkosmologiePfadintegrale>

Schleifen-Quantengravitation

Schleifen-Quantengravitation: Rovelli, Smolin; in D: Thiemann;
Kosmologie: Bojowald

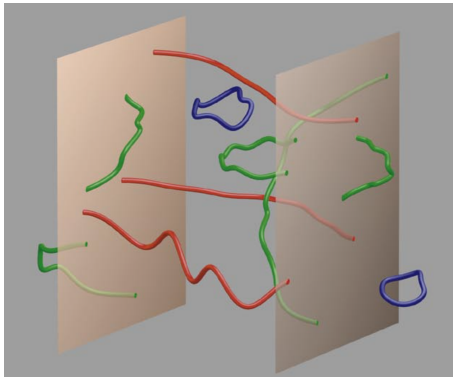


Martin Bojowald: *Zurück vor den Urknall. Die ganze Geschichte des Universums*. S. Fischer, Frankfurt am Main 2009.

auf *Einstein Online*: <http://www.einstein-online.info/vertiefung/UrknallSprung>

Stringtheorie

Herkunft aus der Elementarteilchenphysik – ersetze Punktteilchen durch eindimensionale Gebilde, „Strings“



Erfordert 9 (oder 10) Raumdimensionen — Möglichkeit von „Branwelten“ (s.o.) inklusive kosmologischer Modelle (ekpyrotisches Universum)

Dunkle Materie

Bereits besprochen: Unabhängige Hinweise auf Existenz (und, Minderheitenmeinung, Abweichung Gravitationsgesetz)

Kandidaten: Supersymmetrische Teilchen oder andere WIMPs, Axionen (vermeiden Symmetrieverletzung [CP] in der Quantenchromodynamik [Quarks & Co.]), ...

Sterile Neutrinos: Umwandlung in normale Neutrinos; dann γ -Abstrahlung (über Paarbildung) — Röntgenlinie Anfang 2014 als Hinweis? Astro-H-Satellit (Start 2016) könnte Klarheit bringen.

Dunkle Materie

Mitte 2014 Diskussionen Signale CRESST, CDMS-Si, CoGeNT-Experimente — verträglich mit einzigem, leichten WIMP? Leider durch bessere Messungen bei CRESST und CDMS widerlegt.

2014: LUX-Detektor (Homestake, South Dakota), dieses Jahr XENON1T (Gran Sasso) zwei Größenordnungen besser → es bleibt spannend!

Dunkle Energie

Einfachste Version (=kosmologische Konstante):

$$p = -\rho c^2 \quad (= w\rho c^2)$$

Allgemeiner: Skalarfeld (kann sich im Prinzip mit der Zeit bzw. von Ort zu Ort ändern). Frage: Welche Eigenschaften können die Dunkle-Energie-Felder haben? Was lässt sich durch Beobachtungen eingrenzen? (z.B. Amendola et al., arXiv:1210.0439v2)

Phänomenologische Parametrisierung, etwa Chevallier-Polarski-Linder (CPL):

$$w(z) = w_0 + w_a \left(\frac{z}{1+z} \right)$$

Dunkle Energie: Offene Fragen

Was ist Dunkle Energie eigentlich?

Unterschiedliches Skalenverhalten: Warum leben wir in einem Universum mit $\Omega_m \sim \Omega_\Lambda$?

Kleinheitsproblem: Warum ist Dunkle Energie soviel kleiner als entsprechende Terme, die man in Quantenfeldtheorien berechnen kann (Vakuumenergie)?

Dunkle Energie: Viele, viele Modelle!

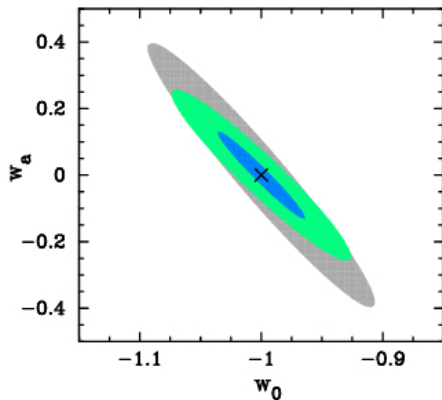
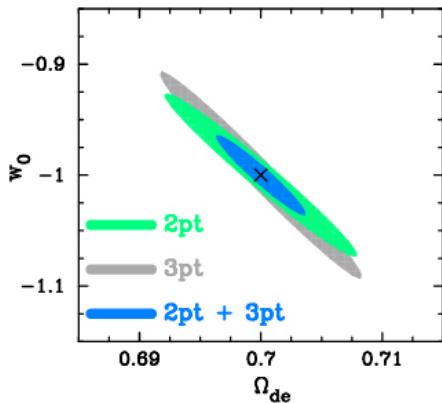
- Quintessenz: Skalarfelder mit verschiedenen möglichen Potenzialen
Scalar fields with different possible potentials
- K-Essenz: Skalarfelder mit ungewöhnlichem kinetischen Term
- Modifikationen der Allgemeinen Relativitätstheorie $R \rightarrow f(R)$
- Kopplung von Dunkler Energie und Dunkler Materie
- Chaplygin-Gas: $p = -A/\rho$ beschreibt sowohl dunkle Materie (gebremste Phase) und Dunkle Energie (beschleunigte Phase)
- Höhere Dimensionen: Dvali, Gabadadze, Porrati (DGP)
Bran-Welt-Modell: Gravitation ist 5D
- Inhomogene Modelle wie kugelsymmetrisches Lemaître-Tolman-Bondi
- Nichtlineare Effekte der Allgemeinen Relativitätstheorie (Durchschnittsbetrachtungen sind gar nicht so einfach - Buchert et al.)

Wichtigste Beobachtungen z

Künftige allgemeine Durchmusterungen wie LSST, oder spezialisierte Missionen wie Euclid:

- Verfolge $H(z)$ direkt bis zu verschiedenen z
- Zusammenballungen von Masse: Inhomogenitäten bei unterschiedlichen z
- Spezialfälle wie Scherungslinsen von Galaxien (LSST: $z = 3$ durch Massen $z < 3$)

(Derzeit noch fiktives) Beispiel: LSST



Powerspektrum (Grün), Dreipunktfunktionen (Grau), Kombination (Blau) Power spectrum (green), 3-point functions (gray), combination (blue). Grafik: LSST Dark Energy Task Force Paper on www.lsst.org

Gibt es mehr als ein Universum?

Per Definition: *universus* lat. ganz, sämtlich; deutsches Ersatzwort „Weltall“ (< 17. Jh., sagt der *Kluge*)

Gemeint ist mit „Multiversum“: Gibt es Regionen des Weltalls, die nicht oder kaum miteinander interagieren (können)? Jede davon ein (beobachtbares) *Universum*, Gesamtheit: *Multiversum*, alle außer unserem eigenen: *Paralleluniversen*

Verschiedene Möglichkeiten:

- Räumliche Trennung
- Höhere Dimensionen (Stringtheorie)
- Chaotische Inflation: Getrennte Inflations„blasen“

Mehr dazu: Brian Greene: *Die verborgene Wirklichkeit*. Siedler 2011.

Gibt es mehr als ein Universum?

Viele Wissenschaftler reagieren allergisch auf Behauptungen zur Existenz des Multiversums (jüngste Diskussion: Stringtheorie und „String-Landschaften“).

Prinzipielles Problem: Kann etwas, das sich per Definition (so gut wie?) nicht beobachten lässt, Teil wissenschaftlicher Modelle/Theorien sein?

Andererseits: Was, wenn (alternativlose) Modelle, mit denen wir die Welt erklären können und die durch Beobachtungen gut gestützt werden, die Existenz von Paralleluniversen zwingend erfordern?

Anthropisches Prinzip

Anthropisches Prinzip: Die Möglichkeiten, wie das Universum beschaffen sein kann, sind allein schon dadurch eingeschränkt, dass es Beobachter wie uns gibt.

Beispiel bei Newton: Eigenschaften (Bewohnbarkeit) des Planeten Erde.

Mögliche anthropische Lösung für Feinabstimmung der Naturkonstanten (oder ist das ein Problem, dass wir Leben nicht gut genug verstehen, um uns anderes Leben vorstellen zu können?).

Wie sicher ist unser kosmologisches Wissen?

Homogene Modelle

Allg. Relativität

FLRW-Raumzeiten

H_0 Kinematik

$\Omega_m, \Omega_\Lambda, \Omega_b, \Omega_r$ Dynamik

Früher, heißer Kosmos

Thermodynamik/Statistik

Teilchen-, Kern-, Atomph.

η Baryon-Photon ratio

Inflaton-Eigenschaften

Inhomogenitäten

Newton'sche Störungen

Newton'sche Simulationen

Raytracing

Powerspektrum

Skalar vs. Tensor

Reionisationszeit

Wie sicher ist unser kosmologisches Wissen?

Mittlerweile: Vielzahl von Daten/Messungen — Musterbeispiel:
Inhomogenitäten der kosmischen Hintergrundstrahlung

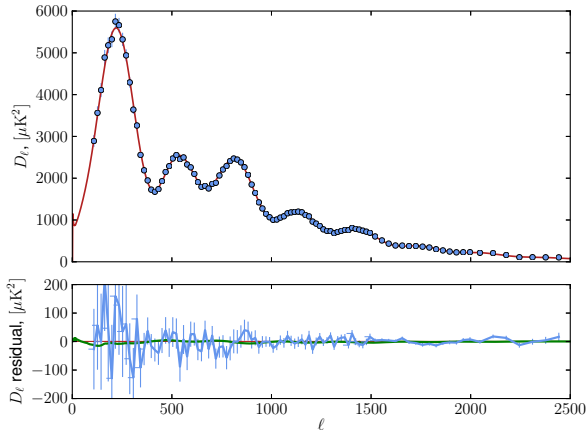
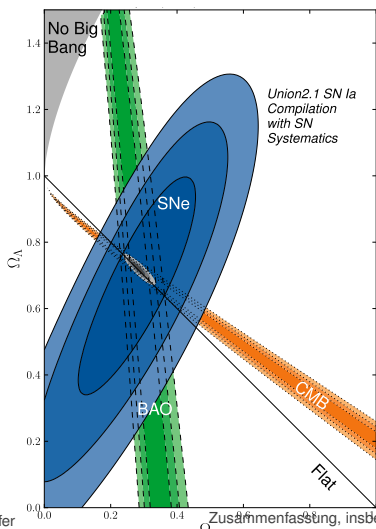


Bild: ESA/Planck Collaboration, A&A 571, A15 (2014)

Wie sicher ist unser kosmologisches Wissen?

Konsistenzchecks möglich:

Suzuki et al. 2011



Wie sicher ist unser kosmologisches Wissen?

- Weite Teile der Modelle basieren auf anderweitig getesteter Physik (Nukleosynthese, ART, statistischer Physik)
- Expansionskurve gut beschrieben durch Modelle
- Wechselspiel großräumige Messungen / Vorhersagen frühes Universum (Konsistenzchecks!) funktioniert
- *Interpretation* von Dunkler Materie (Teilchenbild) und Dunkler Energie (???) unsicher
- Inflation: Vielfalt der Modelle; allgemeiner Mechanismus durch Daten bestätigt
- Je früher, desto unsicherer — Anfang (wäre im Modell: Urknallsingularität) sehr unsicher; keine solide Basis