

Kosmologie: Das Universum als Ganzes

Kosmische Evolution für Nicht-Physiker

Markus Pössel

Haus der Astronomie

7.11.2017

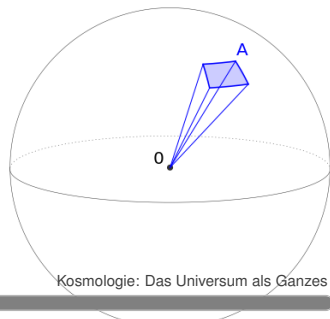
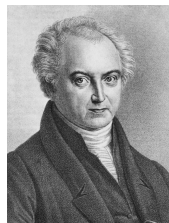
Olbers'sches Paradoxon (1823)

Heinrich Wilhelm Matthias Olbers
(1758-1840):

Das Universum kann nicht unendlich groß,
zeitlich unveränderlich und gleichmäßig mit
unendlich vielen Sternen gefüllt sein.

Helligkeit in konstantem Raumwinkel bei
jedem Abstand dieselbe \rightarrow summiert sich
auf! $1/r^2$ vs. r^2

(Staub \rightarrow Absorption? Würde durch
thermisches Gleichgewicht die gleiche
Flächenhelligkeit bekommen!)



Ein Universum voll Galaxien

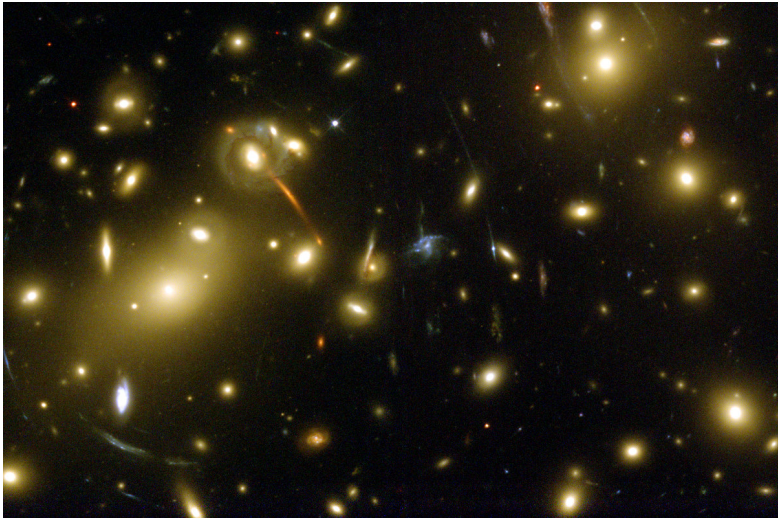


Bild: NASA/ESA/STScI/AURA

Wie sind die Galaxien verteilt?

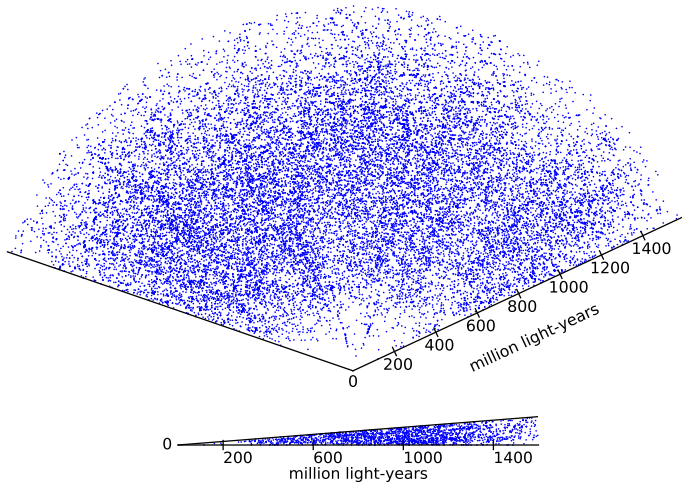


Bild: 25231 Galaxien mit Abständen aus NED, Position aus 2MASX

Wie sind die Galaxien verteilt?

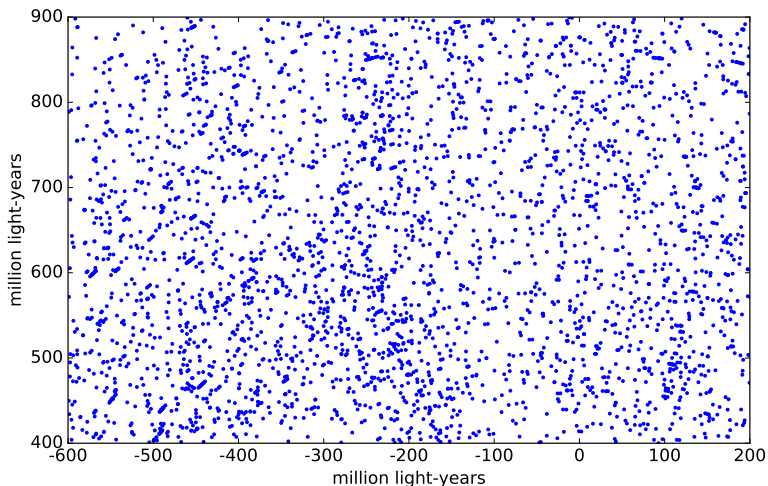
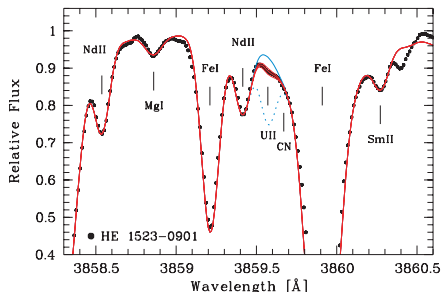


Bild: 25231 Galaxien mit Abständen aus NED, Position aus 2MASX (Untermenge)

Sternalter

Nichts im Universum kann älter sein als das Universum als Ganzes.
 Älteste Kugelsternhaufen (Entwicklungsdiagramme), individuelle
 Sternalter (radioaktive Datierung) jeweils 13,2 Milliarden Jahre



Beispiel für sehr alten Stern; HE 1523-0903 kaum Elemente außer Wasserstoff und Helium („metallarm“; Frebel, Christlieb et al. 2007): *U*- und *Th*-datiert

Buchtipp: Anna Frebel, *Auf der Suche nach den ältesten Sternen*, Fischer 2012

Sterne: Chemische Zusammensetzung



Element	relative Häufigkeit
Wasserstoff	92,1%
Helium	7,8%
Sauerstoff	0,5‰
Kohlenstoff	0,23‰

Daten: Lodders et al. 2009, Landolt-Börnstein

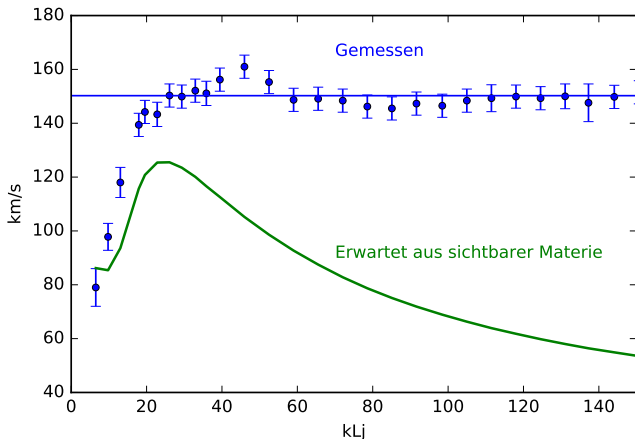
Erstmals Cecilia H. Payne 1925: fast nur Wasserstoff!

Caveat: Nur für obere Atmosphärenschichten

Massenprozent: H 75%, He 25% recht allgemein

Dunkle Materie

Ableitung aus Keplerbewegung im Vergleich sichtbarer Masse:



Daten aus Karukes, Salucci, Gentile 2015

Dunkle Materie

- leuchtet nicht; verschärft: keine elektromagnetische Wechselwirkung, nur Gravitation
- erstmals 1933 von Fritz Zwicky postuliert, um Bewegungen im Coma-Haufen (Galaxienhaufen mit Geschwindigkeiten um die 7500 km/s) zu erklären
- Experimente zum direkten Nachweis von „Dunkle-Materie-Teilchen“: noch keine klaren (und z.T. widersprüchliche) Ergebnisse
- WIMPS – zusätzliche Teilchen außerhalb des Standardmodells der Elementarteilchen \Rightarrow LHC
- verschiedene unabhängige Hinweise auf Existenz:
 - Rotationskurven von Galaxien
 - Gravitationslinsen-Effekte (incl. Bullet Cluster)
 - Kosmologie (später): Fluktuationen im primordialen Plasma
- (oder alternativ: modifizierte Dynamik, z.B. MOND?)

Materieinhalt unseres Kosmos

- Sterne: einfach nachzuweisen! (man braucht freilich Absorptionskarten)
- Staub in unserer Milchstraße: Infrarot-Beobachtungen
- Wasserstoffatome: 21 cm-Linie, Absorptionslinien
- Moleküle: IR und Radiowellen
- Sehr fernes, warmes Plasma: Schwierig nachzuweisen

Allgemeinere Massenbestimmung: Gravitations-Sonden (z.B. Satelliten-Galaxien einer größeren Galaxie)

Virial-Messungen: Streuung der Sternengeschwindigkeiten σ hängen mit anziehender Masse M bei charakteristischem Abstand R zusammen wie

$$\sigma^2 \sim \frac{GM}{R}.$$

Materieinhalt: Gesamtdichte

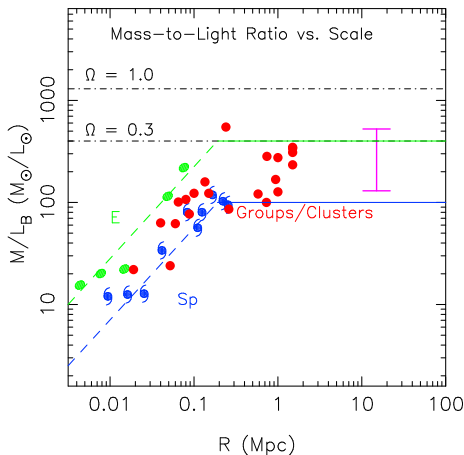


Abb. 1 in N. Bahcall & X. Fang 1998

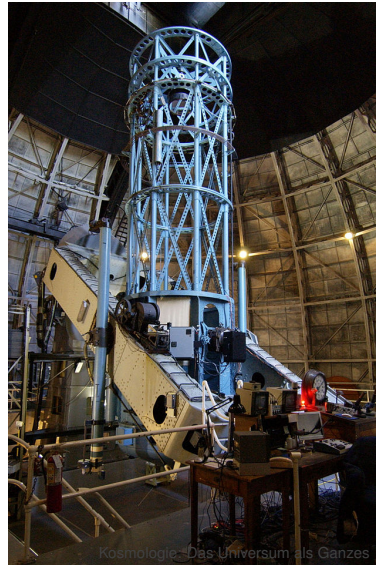
wobei $\Omega \approx \rho / (10^{-26} \text{kg/m}^3)$. Leuchtende Materie ~ 20 Massen-%

Edwin Hubble am Mount Wilson

Vesto Slipher: Erstes
Galaxienspektrum M31 im Jahre
1912 (4 Stunden Belichtungszeit,
Lowell 24" Clark-Refraktor)

Ab 1927: Milton Humason (erst 100"
auf Mt. Wilson, später 200" auf Mt.
Palomar)

Edwin Hubble: Erstmals
Entfernungsbestimmung (Cepheiden
= variable Sterne) außerhalb
unserer Milchstraßengalaxie —
Entfernung zu anderen Galaxien!



Galaxienbewegungen: Hubbles Beobachtung

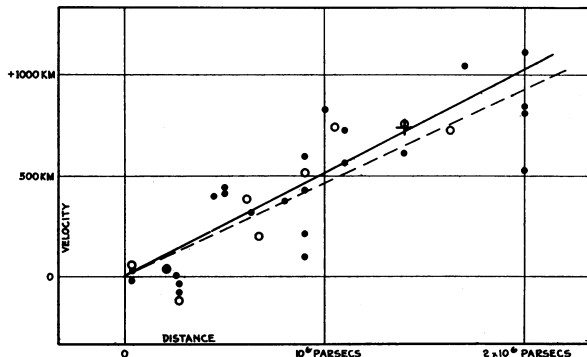


FIGURE 1
Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

Hubble 1929: „A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae“ in PNAS 15(3), S. 168ff.

Galaxienbewegungen

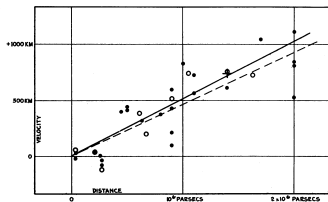


FIGURE 1
Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

Hubble 1929: „A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae“ in PNAS 15(3), S. 168ff.

... erste von vielen Messungen, spätere weit genauer!

Asymmetrie: Ab einer bestimmten Entfernung bewegen sich ferne Galaxien *alle* von uns fort!

Proportionalität: $v = H \cdot d$ (Hubble-Relation, H Hubble-Konstante)

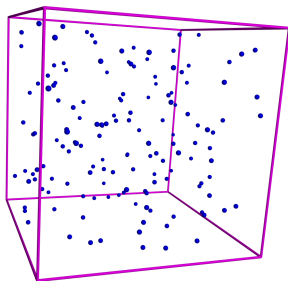
Grundlegende Beobachtungsdaten

für die Kosmologie:

- Olbers-Beobachtung
- Gesamtdichte $\sim 0,3 \cdot 10^{-26} \text{ kg/m}^3$
- \exists Dunkle Materie. Leuchtende Materie nur rund 20 Massenprozent
- Leuchtende Materie: Wasserstoff 92 Prozent, Helium 8 Prozent (25 Massenprozent)
- Älteste Objekte > 13 Milliarden Jahre
- Ausdehnung größer als Milliarden Lichtjahre
- Hierarchische Struktur (Haufen von Haufen von Haufen) bis zu 100 Mio. Lj. – darüber im Mittel homogen
- Großräumige Isotropie
- Hubble-Relation zwischen Rotverschiebungen/Entfernungen ferner Galaxien

Expansion mit Skalenfaktor

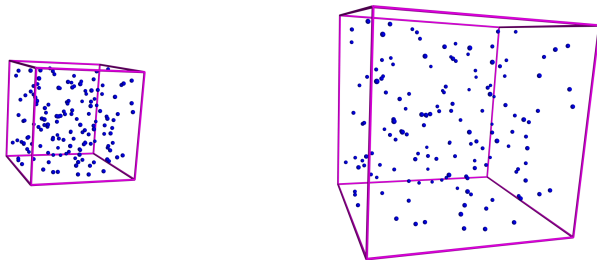
Modelluniversum: homogen und isotrop



Hilfsvorstellung: „Momentaufnahme“ des Kosmos, das alle Galaxien dort zeigt, wo sie sich jetzt, in diesem Moment, zur Zeit t_1 befinden.

Skalenfaktor-Expansion: Alle Abstände ändern sich mit der Zeit $\sim a(t)$.

Expansion



Verteilung (Muster) dasselbe — lediglich die Skala der Abstände verändert sich!

Grundannahmen der Expansionsmodelle

Das Modelluniversum, das wir im folgenden betrachten:

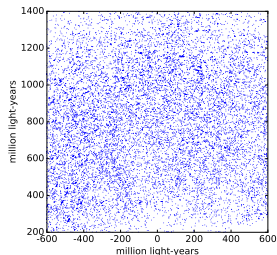
- Kosmologisches Prinzip: Das Universum sieht für jeden Beobachter im Mittel (große Größenskalen) gleich aus (homogen, isotrop)
- Einfachstes Modell: Exakt homogenes und isotropes Universum
- Vorgehen: Erst homogene/isotrope Modelle rechnen, später Inhomogenitäten als Störungen hinzufügen

... diese Annahmen muss man anschließend nachprüfen! Liefern die Modelle die richtige Antwort?

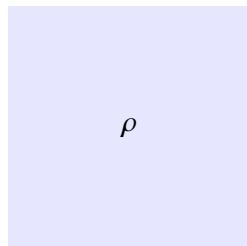
„Galaxienstaub“ im homogenen Universum

Wir springen zwischen zwei Ansichten hin und her.

- 1 Kontinuum mit räumlich konstanter Dichte $\rho(t)$
- 2 Einzelne Galaxien im Hubble-Fluss senden/empfangen Licht



„Galaxienstaub“ aus
separaten Galaxien



Kontinuum mit konstanter
Dichte ρ

Wirkliche Bewegung = Hubble-Bewegung plus *Pekuliargeschwindigkeiten*

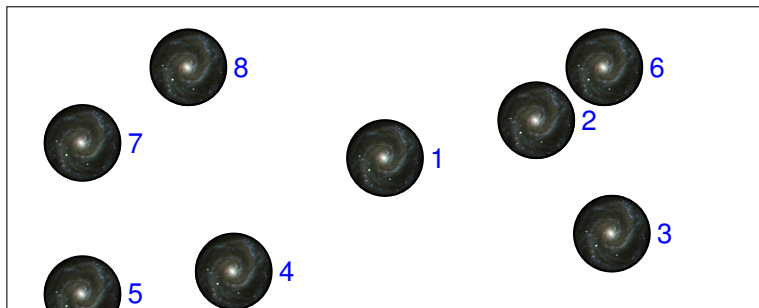
Kosmische Zeit

Definition einer kosmischen Zeitkoordinate t :

- 1 Gleichzeitigkeit so gewählt, dass Homogenität deutlich wird (bei Expansion: gleiche Dichtewerte zeigen gleiche Zeitpunkte an)
- 2 Verlauf der Zeit: Eigenzeit auf Galaxien, die sich mit dem Hubble-Fluss bewegen.
- 3 Zeitnullpunkt: Wird später so gewählt, dass Form von $a(t)$ möglichst einfach. (Läuft heraus auf: Urknall war bei $t = 0$)

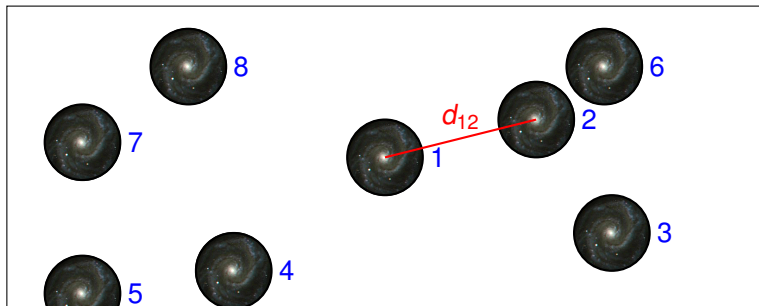
Ein statisches Universum

Galaxien durchnummerieren:



Ein statisches Universum

Anordnung vollständig beschrieben durch paarweise Abstände d_{ij} :

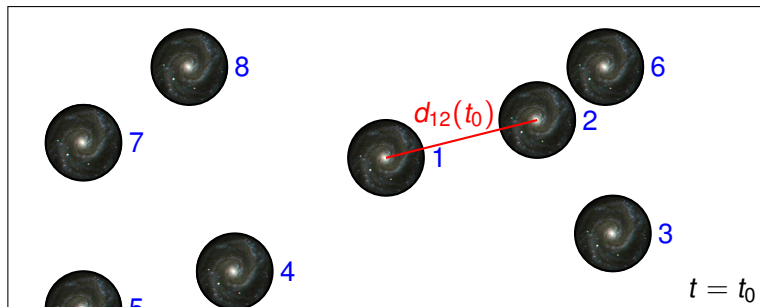


d_{ij} : Abstand zwischen Galaxie i und Galaxie j .

Abstände d_{ij} verändern sich nicht.

Abstände zwischen Galaxien

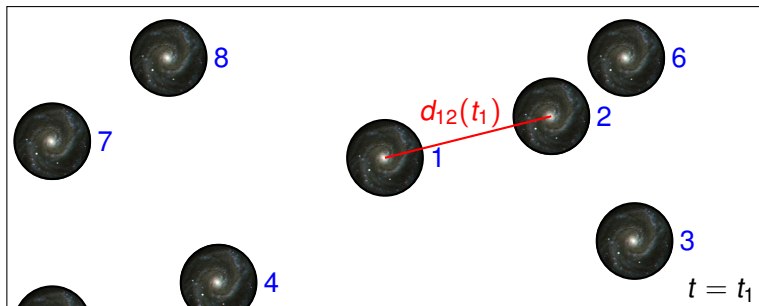
Galaxien „im Hubble-Fluss“:



Alle Abstände ändern sich wie $d_{ij}(t) = \frac{a(t)}{a(t_0)} \cdot d_{ij}(t_0)$.

Abstände zwischen Galaxien

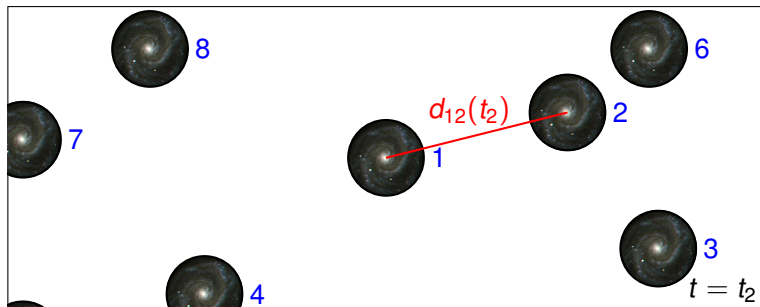
Galaxien „im Hubble-Fluss“:



Alle Abstände ändern sich wie $d_{ij}(t) = \frac{a(t)}{a(t_0)} \cdot d_{ij}(t_0)$.

Abstände zwischen Galaxien

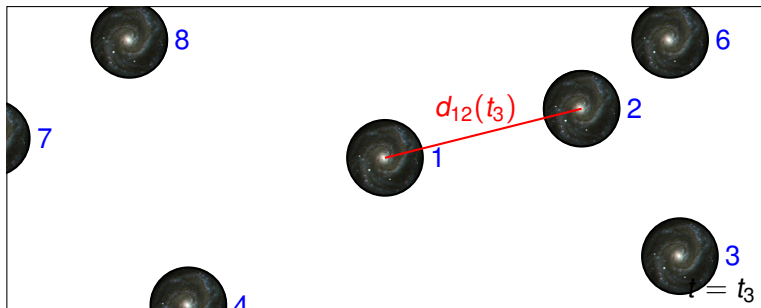
Galaxien „im Hubble-Fluss“:



Alle Abstände ändern sich wie $d_{ij}(t) = \frac{a(t)}{a(t_0)} \cdot d_{ij}(t_0)$.

Abstände zwischen Galaxien

Galaxien „im Hubble-Fluss“:



Alle Abstände ändern sich wie $d_{ij}(t) = \frac{a(t)}{a(t_0)} \cdot d_{ij}(t_0)$.

Konsequenzen der Skalenfaktor-Expansion

Wenn $d(t) = \frac{a(t)}{a(t_0)} d(t_0)$ und mit $v(t) \equiv \dot{d}(t)$:

$$v(t) = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)} d(t) = H(t) d(t)$$

mit

$$H(t) \equiv \frac{\dot{a}(t)}{a(t)}$$

dem **Hubble-Parameter**.

Heutiger Wert heißt **Hubble-Konstante** H_0

Hubble-Relation

Abstandsänderung mit Skalenfaktor: Faktor 1.1 in 1 Million Jahren

Abstand vorher	Abstand nachher	Abstandszuwachs
1 Mio. Lj	1.1 Mio. Lj.	0.1 Mio. Lj
2 Mio. Lj	2.2 Mio. Lj.	0.2 Mio. Lj
3 Mio. Lj	3.3 Mio. Lj.	0.3 Mio. Lj
4 Mio. Lj	4.4 Mio. Lj.	0.4 Mio. Lj
5 Mio. Lj	5.5 Mio. Lj.	0.5 Mio. Lj

⇒ je größer der Abstand, desto größer der Abstandszuwachs!

Hubbles Messung (und ähnliche Messungen):

Hinweis auf Skalenfaktor-Expansion des Kosmos!

Konsequenzen der Skalenfaktor-Expansion



klassischer Dopplereffekt für Radialgeschwindigkeit v :

$$z = \frac{v}{c} \quad \text{mit} \quad z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$$

für Licht, das von der Galaxie zu uns ausgesandt wird (ausgesandt bei Wellenlänge λ_0 , empfangen bei Wellenlänge λ), also

$$cz(t) = H(t) d(t).$$

Diagnostik anhand von Spektrallinien:



Hubble-Beziehung

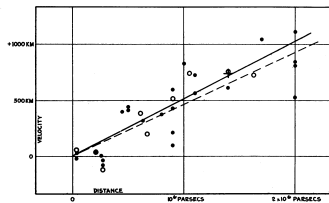


FIGURE 1
Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

Hubble 1929: „A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae“ in PNAS 15(3), S. 168ff.

$cz = H_0 \cdot d$ erklärt, warum (bis auf nahe Galaxien) alle Werte für z positiv sind und warum die Werte (mit beachtlicher Streuung!) auf einer Geraden liegen.

Verschiedene Vorläufer für die betreffenden Messungen – vgl. Virginia Trimble, „Anybody but Hubble!“ (2013)

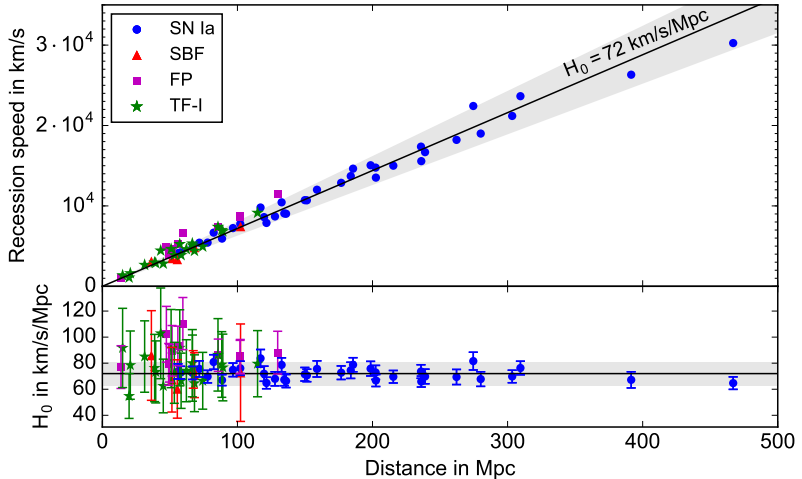
Hubble Space Telescope



Bild: STScI und NASA

H_0 Key Project (Marc Aaronson, Wendy Freedman et al.):
Cepheiden kalibrieren; darauf aufbauend sekundäre
Entfernungsbestimmung (SN Ia, Tully-Fisher, Fundamentalebene,
Fluktuationen der Oberflächenhelligkeit etc.)

H_0 Key Project results



Daten aus Freedman 2001 et al. (HST Key Project)

Die Dynamik der kosmischen Expansion

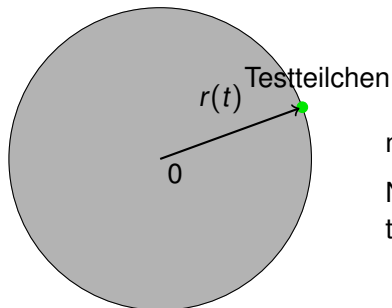
Grundfrage in diesem Abschnitt: Was bestimmt die Form $a(t)$ des kosmischen Skalenfaktors?

In der Physik: Bewegungen ergeben sich aus dem Einfluss von Kräften

Welche Einflüsse bestimmen, wie der Kosmos expandiert?

Modellsituation zur Dynamik

Wie verändert sich



$$r(t) = \frac{a(t)}{a_0} r_0$$

mit der Zeit?

Newton: Nur Masse im Kugellinneren trägt bei. Gravitationsgesetz:

$$\ddot{r} = -\frac{GM}{r^2}.$$

Welche Masse trägt bei?

$$\ddot{r} = -\frac{GM}{r^2}.$$

In der Allgemeinen Relativitätstheorie gibt es mehr Gravitationsladungen als nur die Masse!

- 1 Energie und Masse sind äquivalent, $E = mc^2$
- 2 *Druck* trägt bei (wichtig z.B. bei Gravitationskollaps von Sternen)

In der Situation, um die es hier geht, ist effektiv

$$M = M_E + M_P = U/c^2 + V \frac{3p}{c^2} = V(\rho + 3p/c^2)$$

mit U der Gesamtenergie, V dem Volumen der Massenkugel, ρ der Massendichte (= Energiedichte/ c^2) und p dem Druck darin.

Gleichungen für $a(t)$: Newton'sche Näherung

Newton'sche Ableitung (siehe Handreichung) führt auf korrekte Form der **Friedmann-Gleichung 2. Ordnung**

$$\frac{\ddot{a}(t)}{a(t)} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + 3\frac{p}{c^2} \right),$$

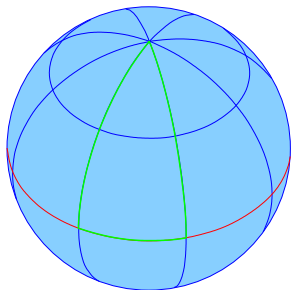
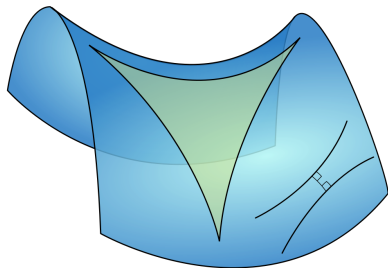
zur **zeitlichen Änderung der Dichte**

$$\dot{\rho} + 3\frac{\dot{a}(t)}{a(t)}(\rho + p/c^2) = 0$$

und zur **Friedmann-Gleichung erster Ordnung**

$$\frac{\dot{a}^2 + Kc^2}{a^2} = \frac{8\pi G}{3}\rho.$$

Friedmann-Gleichungen und Raumgeometrie



Kritische Dichte, abhängig von der Hubble-Konstante:

$$\rho_{c0} \equiv \frac{3H_0^2}{8\pi G}$$

bestimmt Geometrie: $\rho > \rho_{c0}$ kugelartig, $\rho = \rho_{c0}$ euklidisch,
 $\rho < \rho_{c0}$ sattelartig

Unterschiedliche Arten von Materie

Friedmann-Gleichungen enthalten Information über die Eigenschaften von Raum, Zeit und Gravitation. Um sie zu lösen, benötigen wir aber noch mehr: Eigenschaften der im Kosmos enthaltenen Materie!

Schlüssel: **Zustandsgleichung**

$$p = p(\rho)$$

Entwicklungsgleichung:

$$\dot{\rho} + 3 \frac{\dot{a}(t)}{a(t)} (\rho + p/c^2) = 0$$

nicht so schwer zu lösen. Vereinfachungen je nach Zustandsgleichung möglich.

Staub/Materie

Staub (kosmologischer Sprachgebrauch für Materie, deren Druck man vernachlässigen kann — z.B. Galaxien im Hubble-Flow):

Zustandsgleichung $p = 0$.

Lösung:

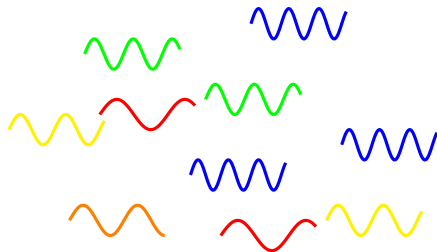
$$\rho = \rho_0 \cdot \left(\frac{a(t_0)}{a(t)} \right)^3.$$

Wie erwartet bei konstanter Teilchenzahl, Volumen geht mit a^3 .

Strahlung

Strahlungsdruck (Maxwell) $p = \rho c^2/3$, entspricht Lösung

$$\rho = \rho_0 \cdot \left(\frac{a(t_0)}{a(t)} \right)^4.$$



Wie erwartet bei konstanter Photonenzahl, Volumen geht mit a^3 ; zusätzlich Energieverlust jedes Photons proportional zu a^{-1} .

Dunkle Energie

Zunächst rein als Gedankenspiel (obwohl es in der Teilchenphysik solche Gleichungen gibt): Was ist mit einer Zustandsgleichung

$$p = -\rho c^2?$$

Das entspricht

$$\dot{\rho} = 0$$

Lösung:

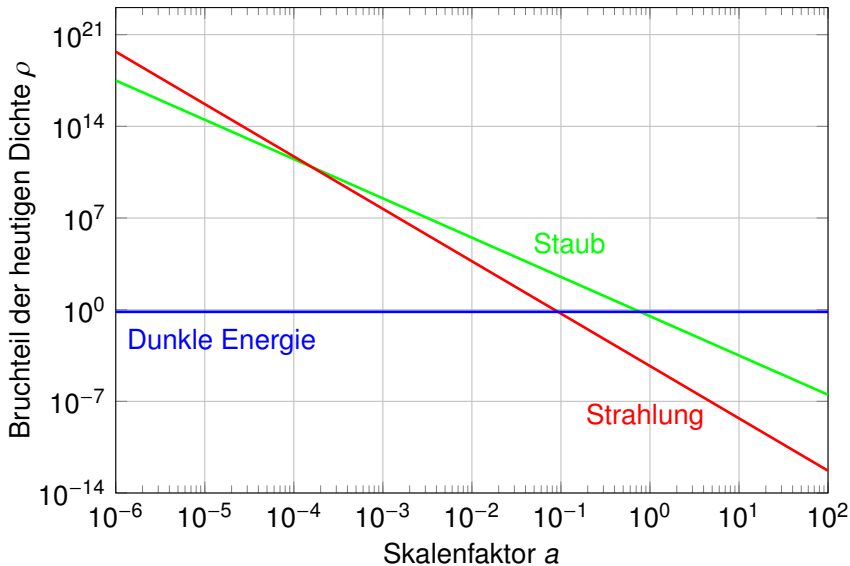
$$\rho = \text{const.}$$

Bei Einstein: entsprechende Gleichungen durch kosmologische Konstante, hier durch besondere Zustandsgleichung. Die Beobachtungen von $a(t)$ zeigen, dass man solch eine „Materie“ benötigt, insbesondere in

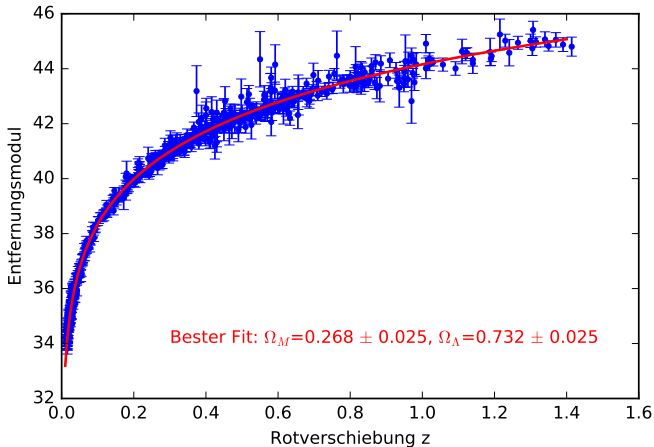
$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p/c^2)$$

die bislang einzige Möglichkeit für $\ddot{a} > 0$!

Dichte: Unterschiedliche Dominanz-Epochen



Erweiterung der Hubble-Relation



Aus fernen Supernovae vom Typ Ia (hier: Union-Katalog) Rückschlüsse auf beschleunigte Expansion der Universums!

Erweiterung der Hubble-Relation

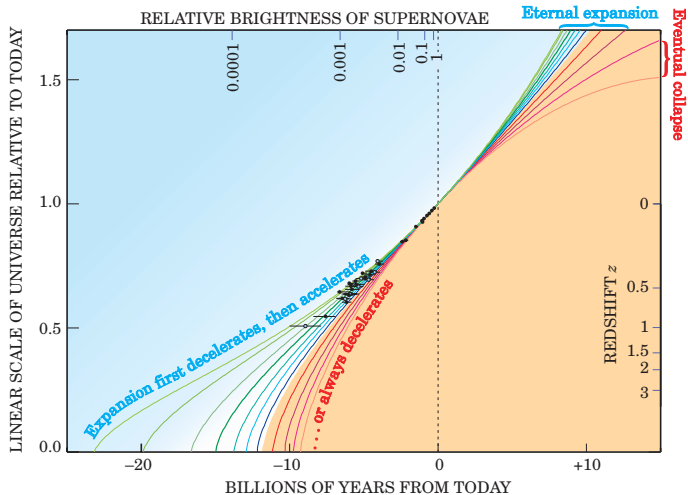


Bild: Perlmutter 2003 in *Physics Today*

Skalenfaktor-Geschichte des Universums

