

Physik des Universums

Vom Urknall zur Supernova

Freitags, 14 - 16

Hörsaal HNB

Prof. Susanne Hüttemeister
Astronomisches Institut, RUB
und
Planetarium Bochum

Ihre Dozentin:

Prof. Dr. Susanne Hüttemeister

Zeiss – Planetarium Bochum
Castroper Straße 67
44791 Bochum

huettemeister@planetarium-bochum.de
0234 5160641

und
Astronomisches Institut
NA 7/26

www.astro.rub.de/huette/



Übungen

Notwendig, um Credit Points zu erwerben!

Gruppen:

1. Gruppe: Freitag 16 – 17:30, NA 7/32

Beginn: 2. 11. 2012

2. Gruppe: Montag, 16 – 17:30, NA 7/32

Beginn 5. 11. 2012

Weitere Gruppen freitags oder montags nach Bedarf

Anwesenheitsaufgaben zu gegebenem Thema
(einschließlich einfacher quantitativer Betrachtungen)

Leitfragen

lebhaftige Beteiligung und Diskussion 40%

Klausur 60%



Scheinvergabe

Literatur

Die Folien zur Vorlesung, die im Web zur Verfügung gestellt werden, sind die wichtigste Literatur.

Daneben eignen sich einführende Astronomie-Lehrbücher auf gehoben-populärwissenschaftlichem Niveau wie zum Beispiel:

Bennett, Donahue et al.: Astronomie – Die kosmische Perspektive (Pearson Studium, 2010)

Bezug genommen wird auch auf online-Material, zum Beispiel „Einstein online – Relativität für alle“ (Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik) <http://www.einstein-online.info/> (Spezielle und Allgemeine Relativitätstheorie) und

Münchener Internetprojekt zur Quantenmechanik (Universität München) <http://homepages.physik.uni-muenchen.de/~milq/> (Quanten, Teilchen und Strahlung)

Übersicht

Populärwissenschaftliche Veranstaltung für Hörer aller Fakultäten:

→

Kein konkretes physikalisches Vorwissen nötig, aber großes Interesse an naturwissenschaftlichen Fragen und/oder Bereitschaft zur Nachbereitung der Vorlesung werden vorausgesetzt.

- In der Vorlesung (fast) keine Mathematik (aber Zahlen)
- In der Übung werden auch einfache Rechnungen durchgeführt
- In der Klausur sind Rechnungen die große Ausnahme

Um welche Themen soll es gehen?

Das moderne Bild des Universums – von der Beschreibung der Struktur des Kosmos bis zu den großen Theorien, auf denen unser Verständnis beruht und zur Entwicklung des Kosmos als Ganzem.

(1) Der Kosmos



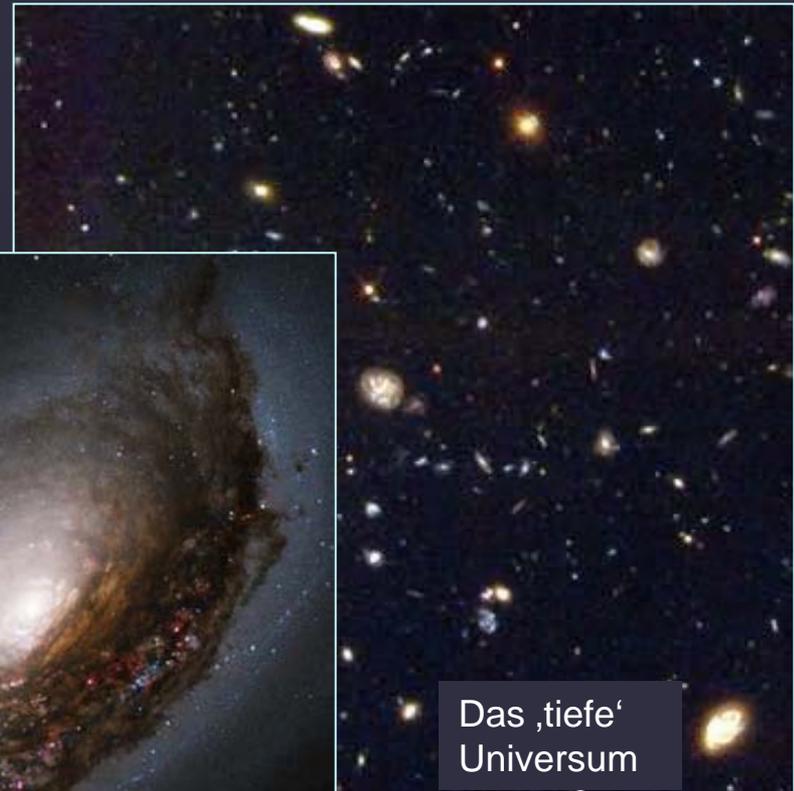
Planeten



Sterne



Galaxien



Das ,tiefe'
Universum



Im interstellaren Raum

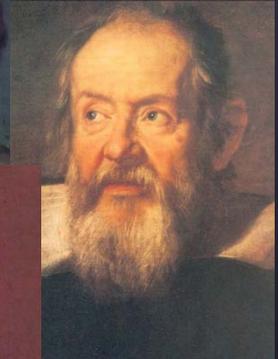
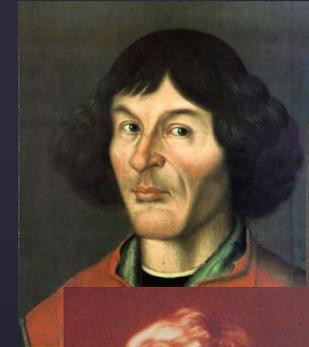
Wir lernen das Objekt unseres
Interesses kennen

(2)

Die Geschichte unseres Weltbilds



Schon immer...
Zurück in die
Bronzezeit



Die Anfänge
von
„Wissenschaft“:
Babylonier
und Griechen



Eine Revolution:
Kopernikus, Kepler,
Galilei, Newton

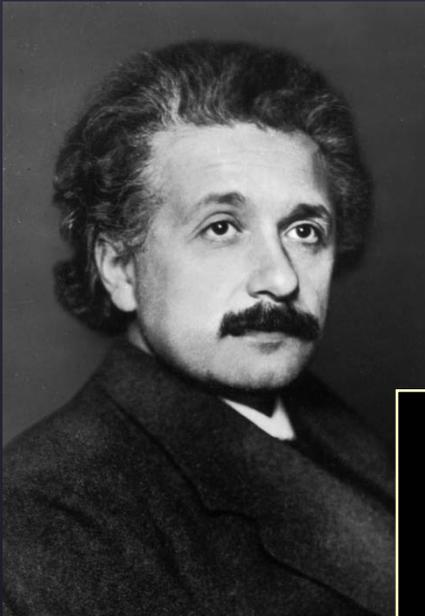
Astrophysik
entsteht:

19. und frühes 20. Jahrhundert

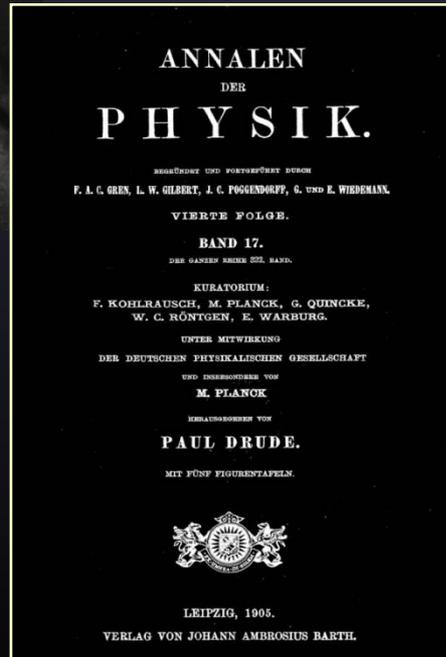


(3)

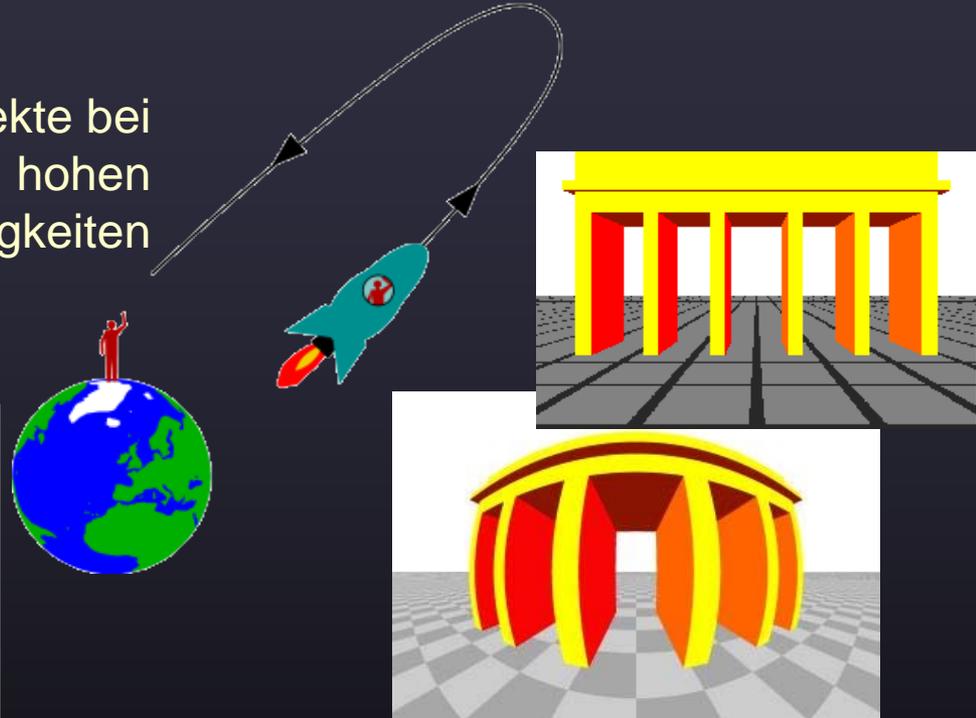
Einsteins Ideen: Spezielle Relativitätstheorie



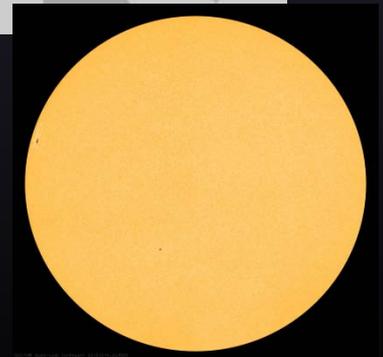
Geniale Ideen
aus dem
Jahr 1905



„Paradoxe“ Effekte bei hohen Geschwindigkeiten

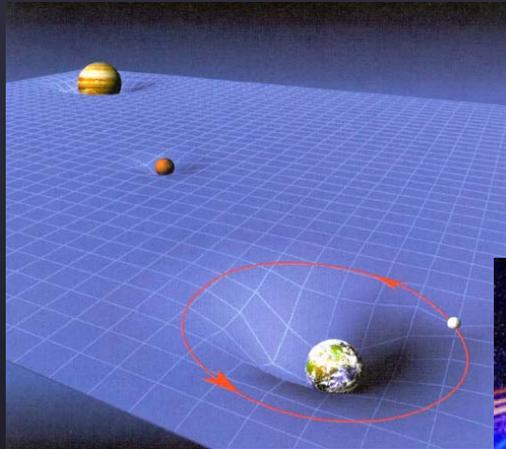
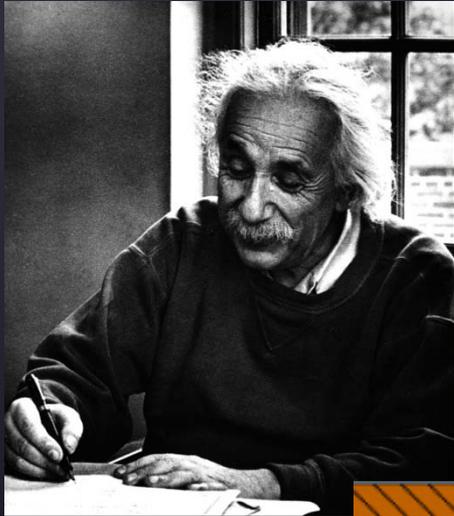


$E = m c^2$
Die „berühmteste
Formel der Welt“
und die Energieerzeugung
der Sonne

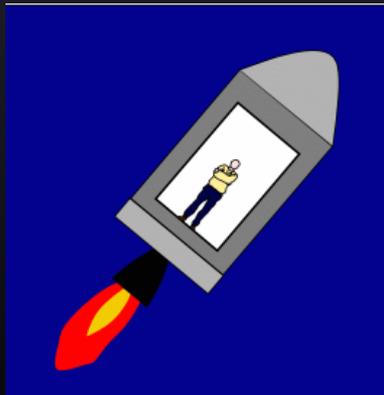


(4)

Einsteins Ideen: Allgemeine Relativitätstheorie



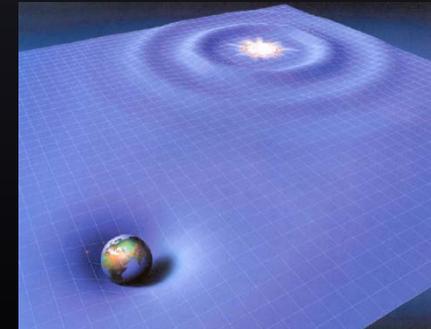
Massen krümmen den Raum:
- Gravitationslinsen
- Extremfall:
Schwarze Löcher



Eine
„geometrische“
Theorie
der
Gravitation
(1915/1916)

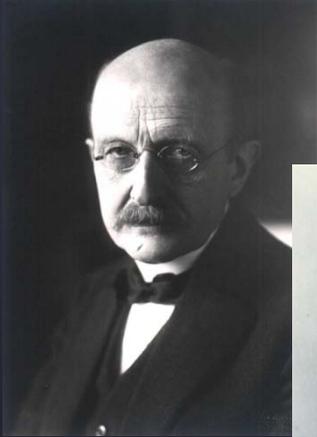


Vorhergesagt:
Gravitationswellen

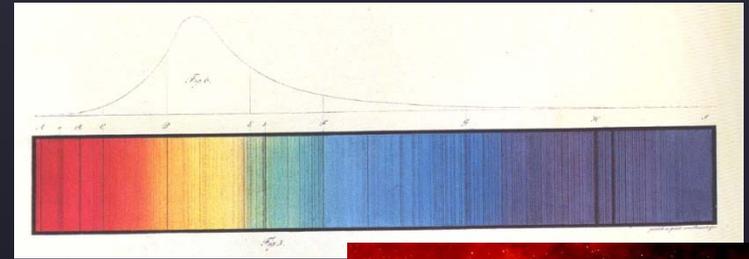


(5)

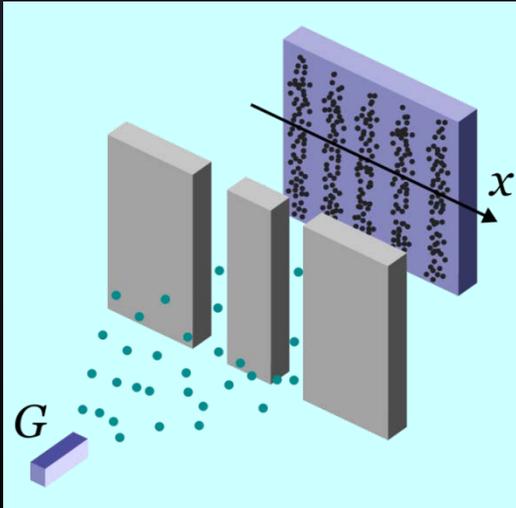
Vom Atom zum Sternenlicht: Quantenmechanik



Theorie mit Mikrokosmos –
mit Konsequenzen für das Universum



Planck, Bohr, Heisenberg...

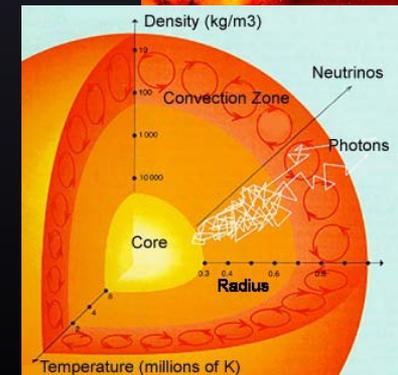


Das (Stern)Licht
und seine
Farben



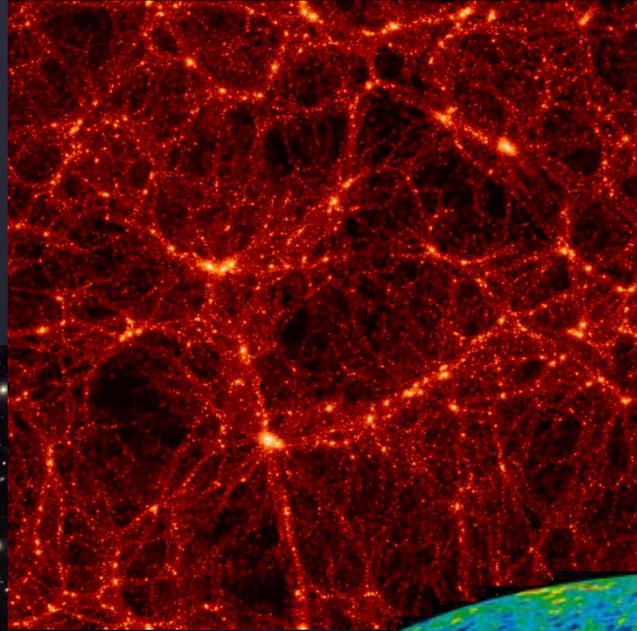
Was ist Licht?
Was ist Materie?
Welle oder Teilchen?

... und
wieder
die Sonne

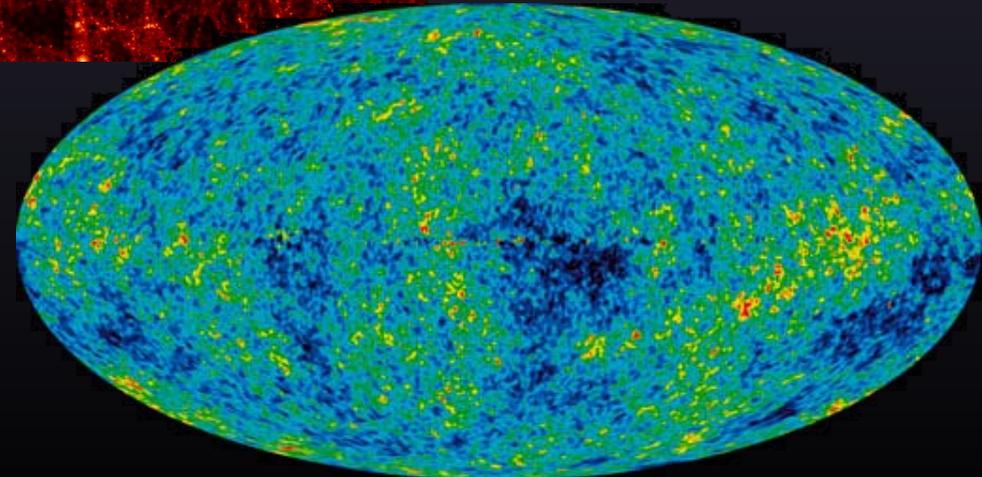


(6-1)

Die Welt im Großen sehen: Strukturbildung im Universum seit dem Urknall



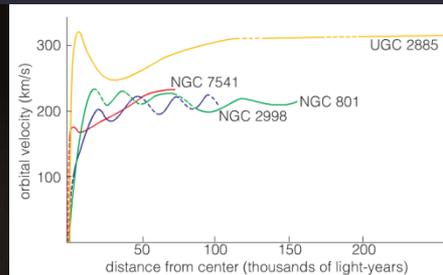
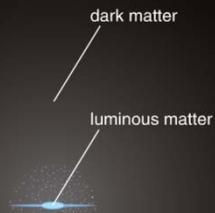
Der Anfang der Welt:
Die Spuren des
Urknalls, das frühe
Universum und die
Bildung der ersten
Strukturen



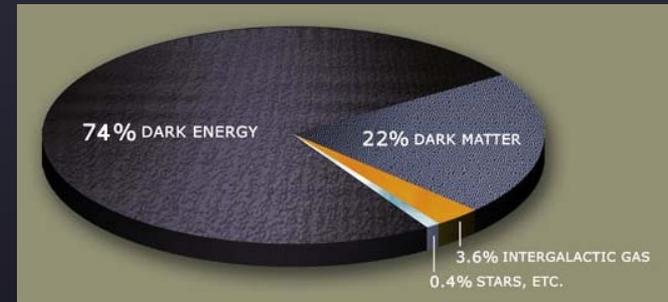
Galaxien nah und fern
Galaxienentwicklung: Eine Geschichte
über Milliarden Jahre

(6-II)

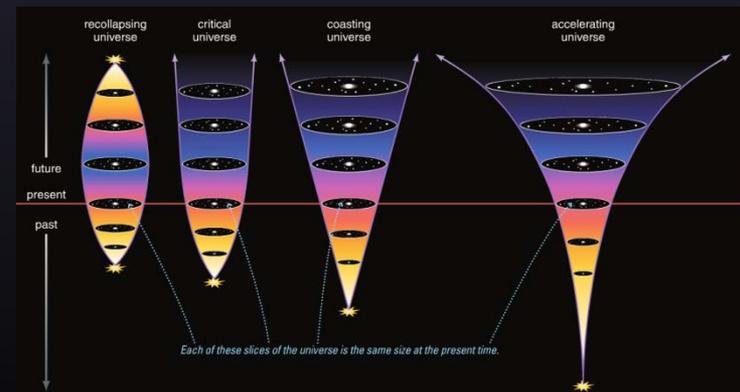
Die großen Rätsel: Dunkle Materie, Dunkle Energie und das Schicksal des Kosmos



Ebenfalls beobachtet: Einfluss
Dunkler Energie



Klare
Beweise:
Dunkle
Materie
existiert



Beide bestimmen die Zukunft des
Universums

(1) Der Kosmos



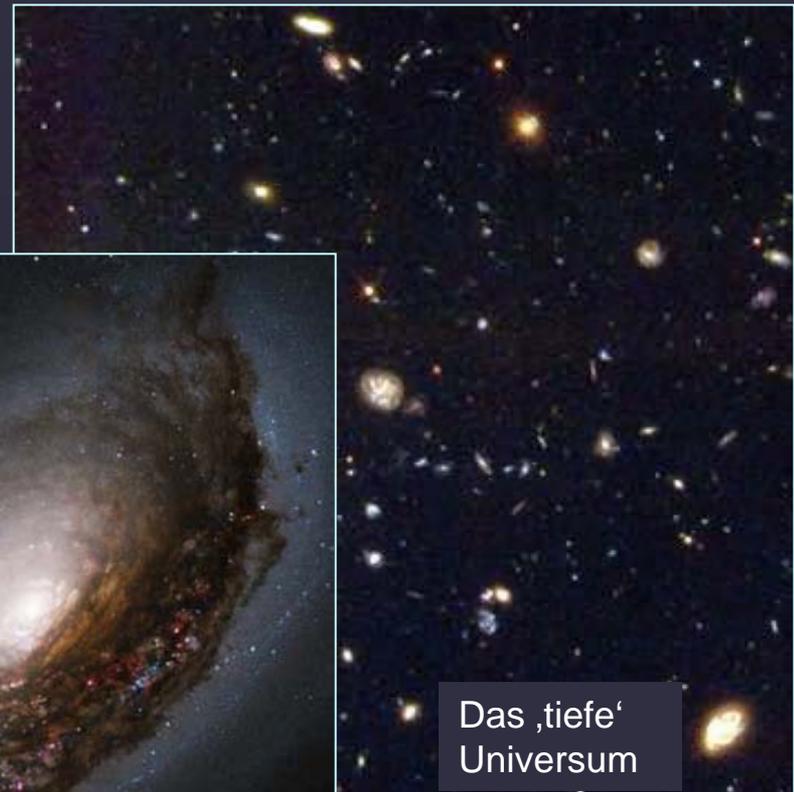
Planeten



Sterne



Galaxien



Das ,tiefe'
Universum



Im interstellaren Raum

Wir lernen das Objekt unseres
Interesses kennen

1.1

Zutaten und Größenverhältnisse

Sinnvolle Einheiten für Entfernungen im Kosmos:

Strecke, die das Licht in gegebener Zeit zurücklegt

Lichtgeschwindigkeit: $c = 299792 \text{ km/s}$
 $\approx 300000 \text{ km/s}$
 $= 3 \times 10^5 \text{ km/s} = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$

Beispiel: Einmal rund um die Erde ($d = 40000 \text{ km}$):

Das Licht braucht $t = d/c = 0.13 \text{ s}$

→ $40000 \text{ km} = 0.13 \text{ Lichtsekunden}$

1 Lichtminute $\approx 18 \text{ Millionen km} = 1.8 \times 10^7 \text{ km}$

1 Lichtjahr = 1 Ly $\approx 9.46 \text{ Billionen km} = 9.46 \times 10^{12} \text{ km}$

Im Sonnensystem sehr gebräuchliche Einheit:

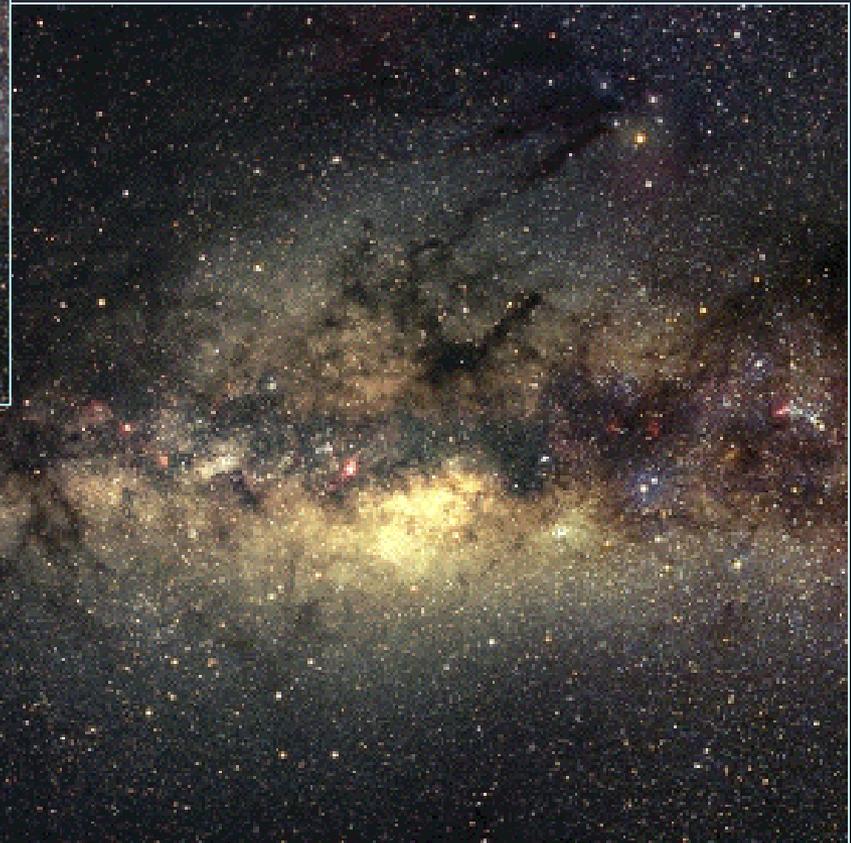
Entfernung Erde-Sonne $\approx 150 \text{ Millionen km} \approx 8.3 \text{ Lichtminuten}$
 $= 1 \text{ Astronomische Einheit} = 1 \text{ AU}$

Unter Astronomen: 1 parsec = 1 pc = 3.2616 Lichtjahre

Blick zum Himmel

Mit dem bloßen Auge:

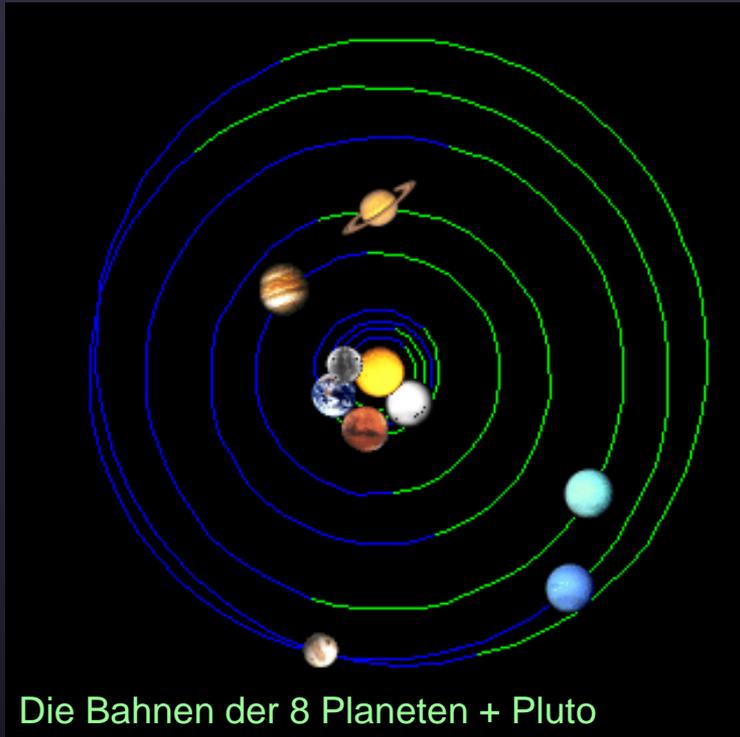
bis zu 9000 Sterne von
einem *sehr* dunklen Ort



Mit jeder Kamera
bei Langzeit-
belichtung:

um Zehner-
potenzen mehr!

Unser Sonnensystem



Acht große Planeten

Grundsätzliche Einteilung
in **zwei Gruppen**

4 Terrestrische (erdähnliche)
Planeten (Merkur, Venus,
Erde, Mars) innen

4 Gasplaneten (jupiterähnliche,
Planeten Jupiter, Saturn,
Eisriesen Uranus, Neptun) außen

5 Zwergplaneten (Ceres, Pluto,
Eris, Makemake, Haumea)

Entfernungen

Erde – Mond: ~380000 km = 1.3 Lichtsekunden

Sonne – Merkur: 0.38 AU

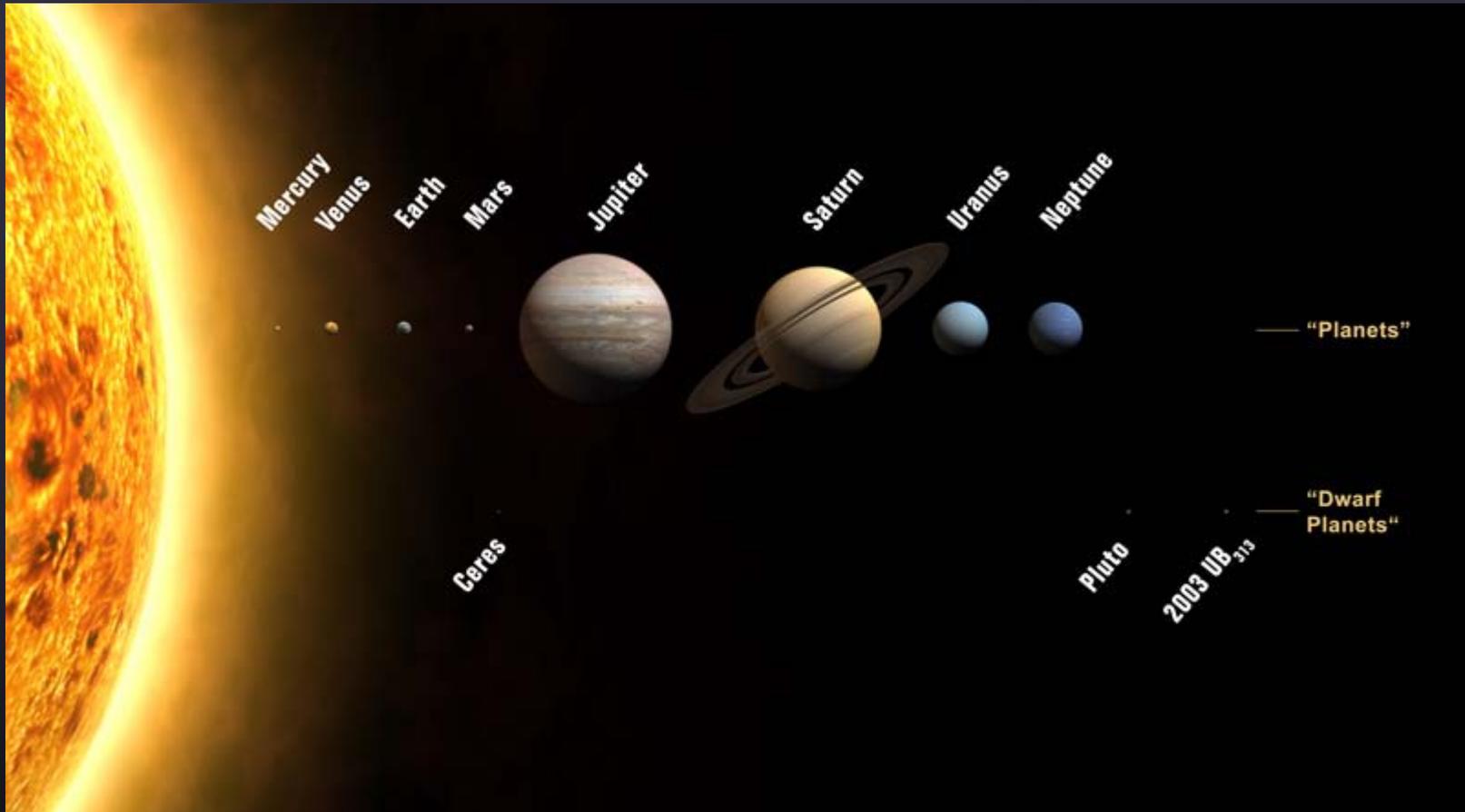
Sonne – Erde: 1 AU = 8.3 Lichtminuten

Sonne – Mars: 1.52 AU

Sonne – Jupiter: 5.2 AU

Sonne – Zwergplanet Pluto: ~40 AU = 5.5 Lichtstunden

Planeten: Größenvergleich



Radien im Vergleich:

Sonne: 700000 km

Erde: 6278 km

Mars: 4000 km

Jupiter: 71370 km

Volumina im Vergleich:

1.3 Millionen Erden

0.25 Erden

1200 Erden

Planeten und Sterne

Planeten, erreichbar mit Raumsonden

→

Methoden der Erkundung vergleichbar mit Erderkundung

Dagegen Sterne:

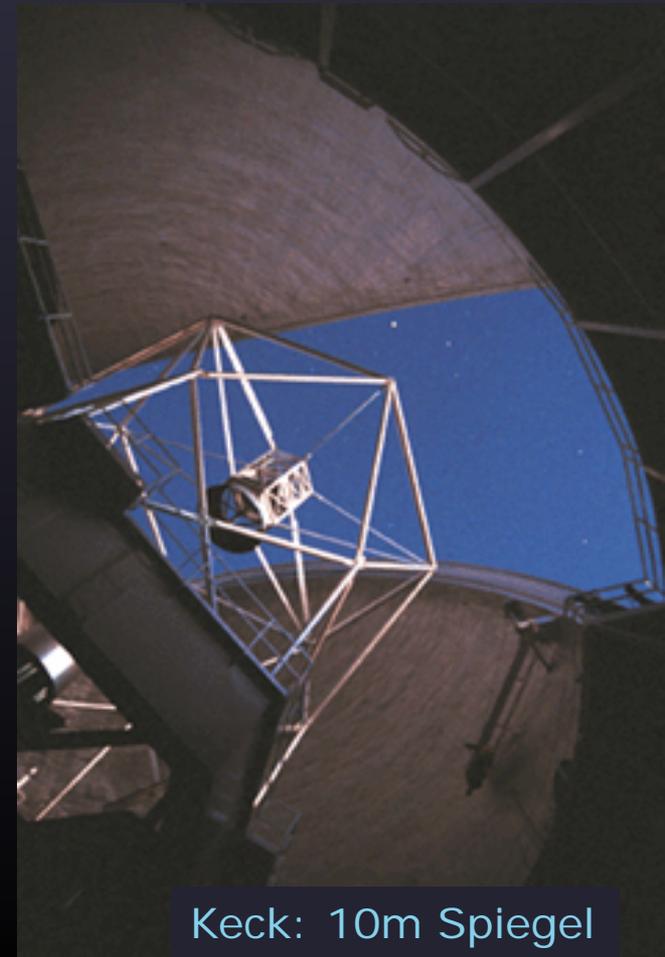
Entfernung misst sich (mindestens) in
Lichtjahren

→

Raumsonden würden selbst zum
(zweit)nächsten Stern
~ 100 000 Jahre benötigen

→

Also gibt es – vorerst – keine
Alternative zum möglichst
großen Teleskop . Die Beobachtung ist
„passiv“, klassische Experimente sind
nicht möglich



Keck: 10m Spiegel

Zu den Sternen

Sonnen wie unsere eigene,
manche sehr viel heller,
viele schwächer



Der nächste Stern:

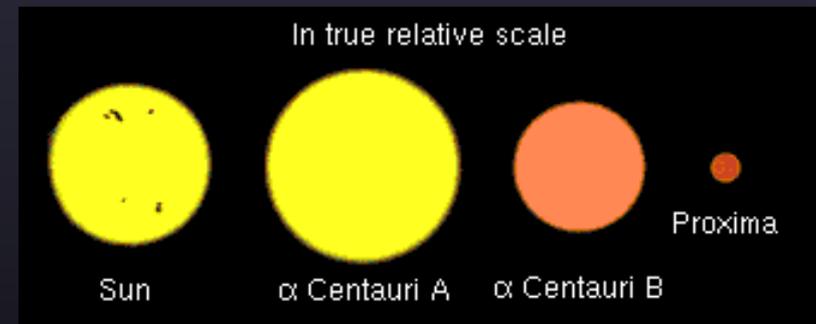
α Centauri (Rigel Kent)

Entfernung: 4.2 Ly

Sichtbar nur von Südhalbkugel

Eigentlich ein 3-fach System,
in dem uns der schwächste

Stern („Proxima Cen“, 7000 x schwächer als Sonne) 0.1 Ly näher
ist als die beiden hellen Partner (1.5 x heller bzw. $\frac{1}{2}$ so hell).



Nachbarschaft am Himmel \neq physische Nähe!

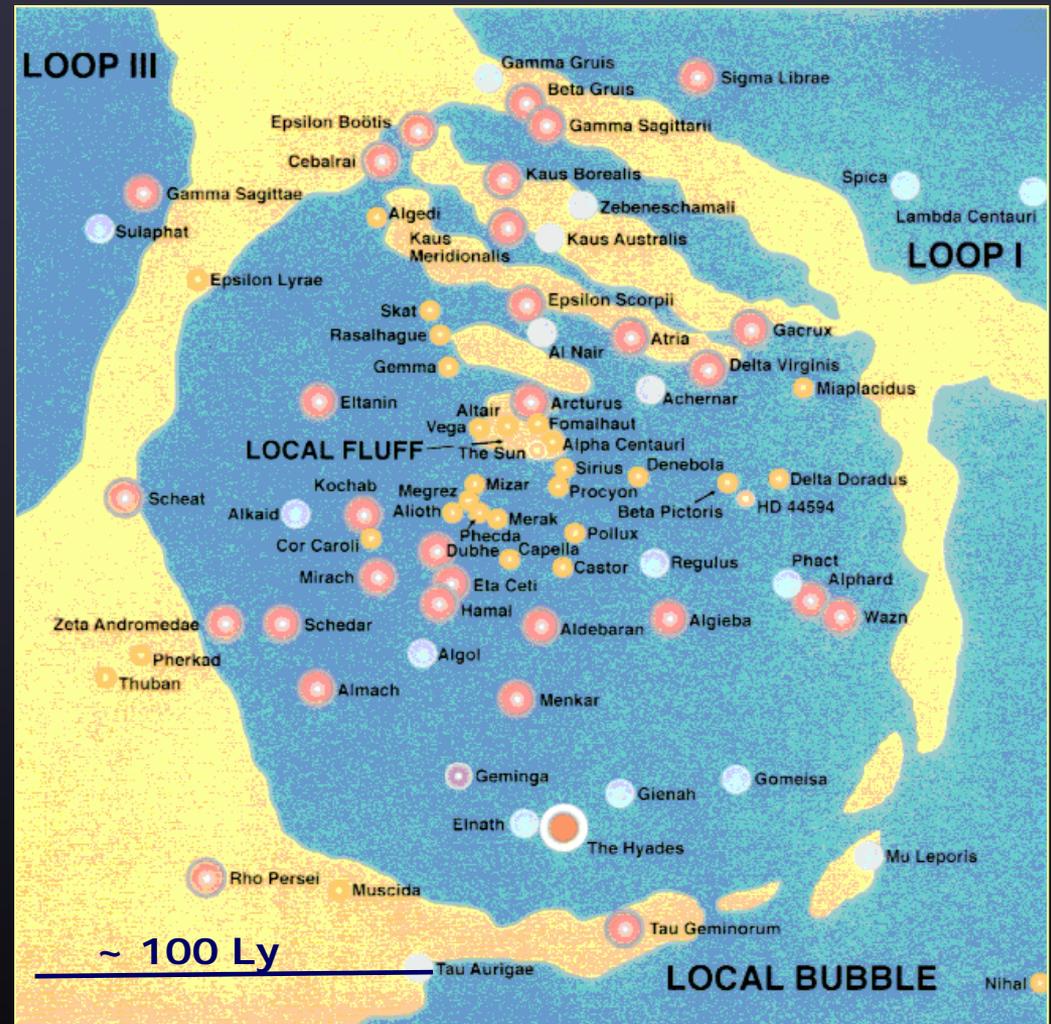
β Cen (Hadar):

Entfernung 525 Ly, 11200 x heller als die Sonne

Unsere Nachbarschaft

Von den 15 nächsten Sternen:

- 6 mit dem bloßen Auge sichtbar
- 3 davon von Deutschland aus:
 - # 5, Sirius
 - # 12, 61 Cygni
 - # 14, Procyon
- 10 Einzelsterne
 - 4 Doppelsterne
 - 1 Dreifach-System
- Nur 2 (Sirius und α Cen A) absolut heller als die Sonne



Die näheren hellen Sterne und das Interstellare Medium

Die Leere des Raumes



Unterwegs auf dem Bonner Planetenweg

Aber:

α Cen A:

$d = 1.6 \text{ m in } 40000 \text{ km} !!$

Der Raum dazwischen ist
nicht ganz, aber fast leer:
Im Interstellaren Raum
im Mittel $\sim 1 \text{ Atom pro cm}^3$

Es sei:

$1 \text{ Million km} = 1 \text{ m}$

Sonne:

Durchmesser $d = 1.4 \text{ m}$

Erde:

$d = 1.2 \text{ cm in } 150 \text{ m}$

Jupiter:

$d = 14 \text{ cm in } 778 \text{ m}$

Saturn:

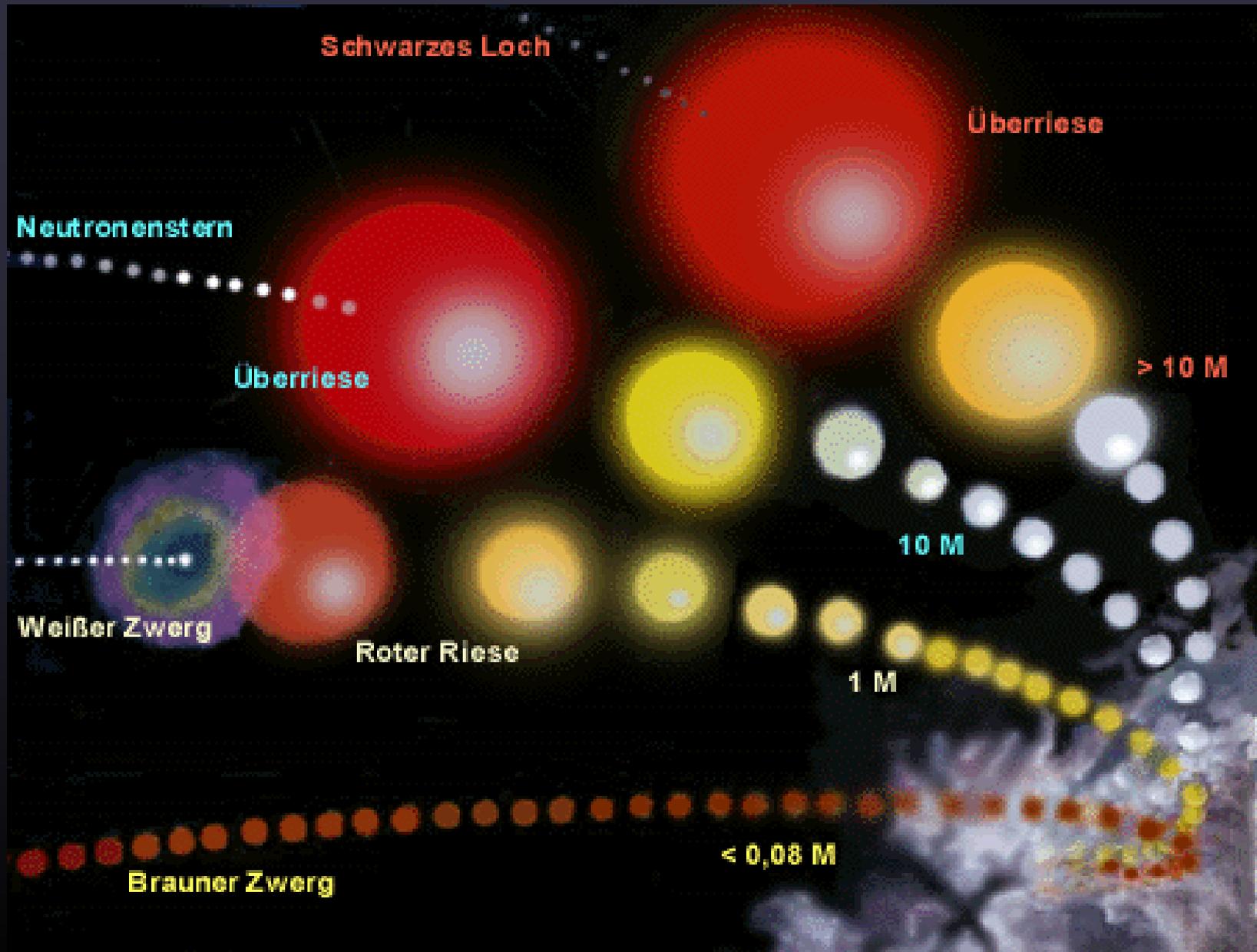
$d = 11 \text{ cm in } 1.4 \text{ km}$

Pluto:

$d = 0.2 \text{ cm in } 5.9 \text{ km}$

→ Dichte Asteroidenfelder
etc. gibt es nur im Film!

Sterne unterscheiden sich sehr...



Stern- Geburt

in Wolken
aus Gas
und Staub

Der Orion-
Nebel
(Komposit
Hubble/
Spitzer)

Entfernung
~ 1500 Lj



Sternleben



Je nach Masse:
Millionen oder Milliarden Jahre
Entfernung: $\sim 3000 - 30000$ Lj

Der Tod der Sterne



Sterne wie die Sonne: Ende als ‚Planetarischer‘ Nebel

Wir sind Sternenstaub

In massereichen
Sternen
entstehen alle
Elemente
(außer
Wasserstoff)
aus denen
die Erde – und
wir – bestehen.

Freigesetzt
in Supernova-
Explosionen



... und in die Sonne, unser Planetensystem und uns
,eingebaut'

→ Die Entwicklung von Sternen (und Galaxien, damit auch
des Kosmos als Ganzem) ist Bedingung unserer Existenz

Die Milchstraße

Von der Erde: Ein helles Band aus Sternen mit dunklen Filamenten



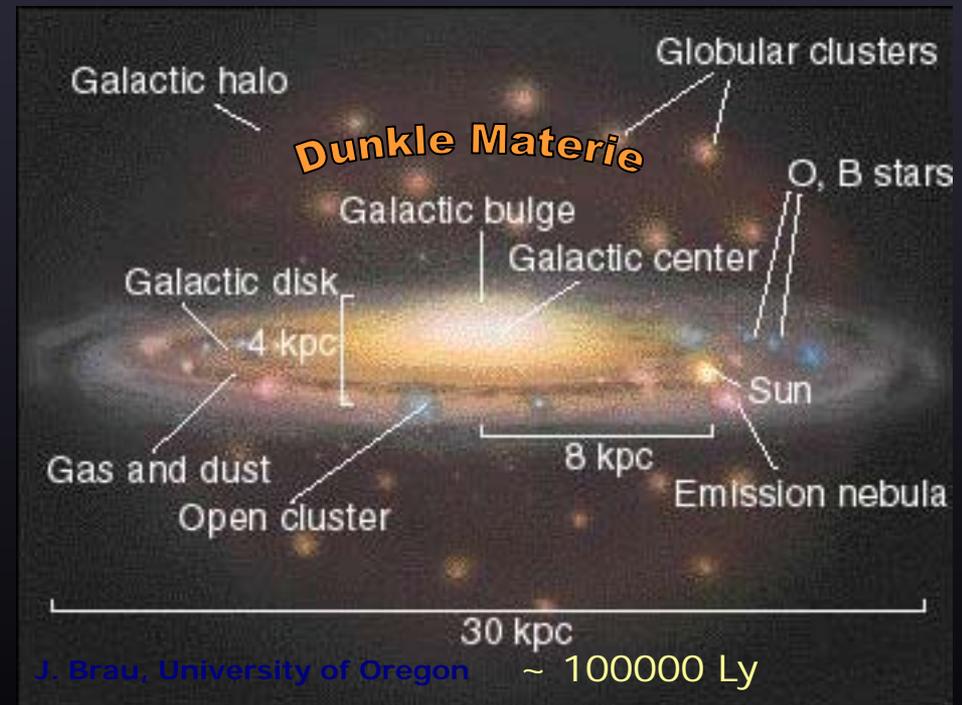
Ein System aus
~ 200 Milliarden Sternen

Scheibe, ‚Bulge‘ und Halo

Durchmesser: ~ 100000 Ly
Sonne – Zentrum: ~ 25000 Ly

Im Zentrum:
Ein Schwarzes Loch mit
~ 4 Millionen Sonnenmassen

(Vor allem) im Halo:
Geheimnisvolle Dunkle Materie



Schema der Struktur, Dimensionen
und Komponenten der Milchstraße

Galaxien

Im beobachtbaren Kosmos gibt es mindestens
100 Milliarden Galaxien – mehr oder weniger wie die Milchstraße



Der Andromedanebel:
 Die nächste große Spiralgalaxie
 (~ 2 Millionen Lichtjahre)
 Mit bloßem Auge zu sehen !

Die Große
 Magellansche
 Wolke, Begleiterin
 der Milchstraße
 (~ 200000 Ly)



Australian Observatory/Royal Observatory, Edinburgh.



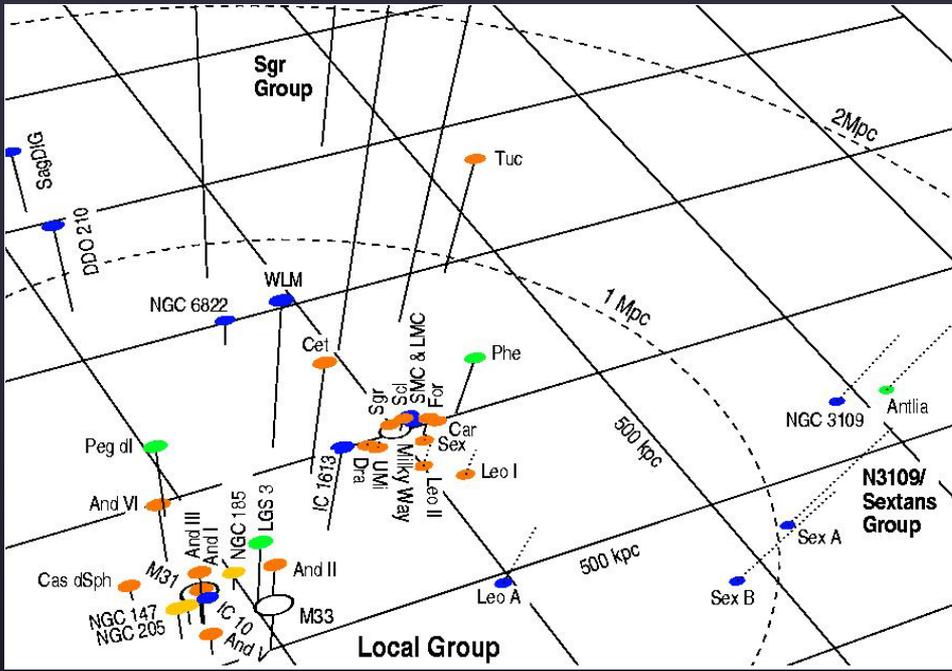
M87
 Elliptische Galaxie
 viel größer als
 die Milchstraße
 (~ 50 Millionen Ly)



Eine Spiralgalaxie

Entfernung: ~ 40 Millionen Lj

Galaxiengruppen und -haufen



Milchstraße:
 Teil einer **Galaxiengruppe**,
Lokale Gruppe
 ~ 30 Galaxien in etwa
 5 Millionen Lichtjahren (MLy),
 überwiegend kleine



Galaxienhaufen:

Zum Beispiel Coma,
 einige 1000 Galaxien in ~10 MLy,
 Entfernung ~ 250 MLy

→ Galaxien können miteinander
 wechselwirken, sogar
 verschmelzen – Sterne nicht!

Der Coma-Galaxienhaufen

Kollidierende Galaxien



Die Mäuse

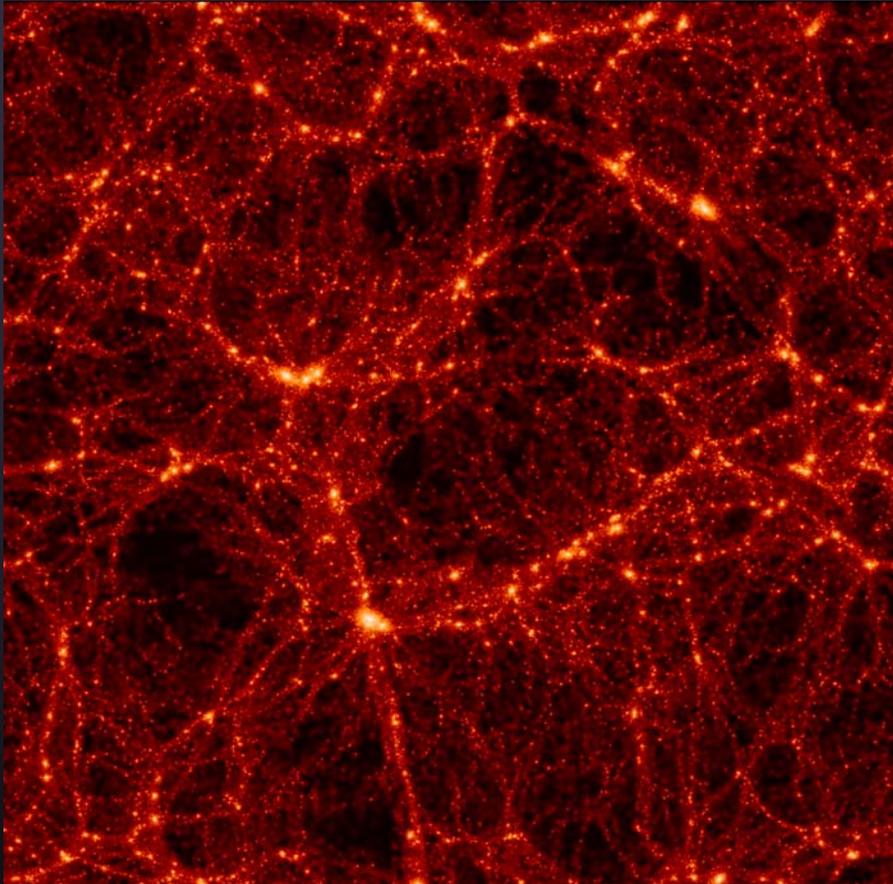
Entfernung ~ 300 Millionen Lj

Das Universum

Milliarden Lichtjahre
Mehr als 100 Milliarden Galaxien...



Die Struktur des Universums



Computersimulation der Struktur
des Universums
Skala: 1 Milliarde Ly

Galaxiengruppen und Haufen bilden Filamente, Blasen und Knoten in schwammartiger Struktur

Auf Skalen > 500 Millionen Ly: Universum hat keine unterscheidbare Struktur mehr: homogen und isotrop

„Größe“ des beobachtbaren Universums:

~ 13.7 Milliarden Ly

→ Universum ist

~ 13.7 Milliarden Jahre alt

Ein Blick in weite Ferne ist ein Blick in die Vergangenheit: Die Entwicklung des Kosmos ist beobachtbar!

1.2

Die Geschichte der Welt: Kurz skizziert

Eine sehr dynamische Entwicklung

Ansicht vergangener Jahrhunderte:

- Universum streng geordnet und statisch
- Planeten auf (möglichst) perfekten Bahnen
- ‚Fix‘sternsphäre unveränderlich



Anlass zur Beunruhigung

- Planetenbahnen nicht wirklich perfekte Kreisbahnen
- unerwartetes Auftauchen von
 - Kometen
 - ‚neuen‘ Sternen (meist Novae)

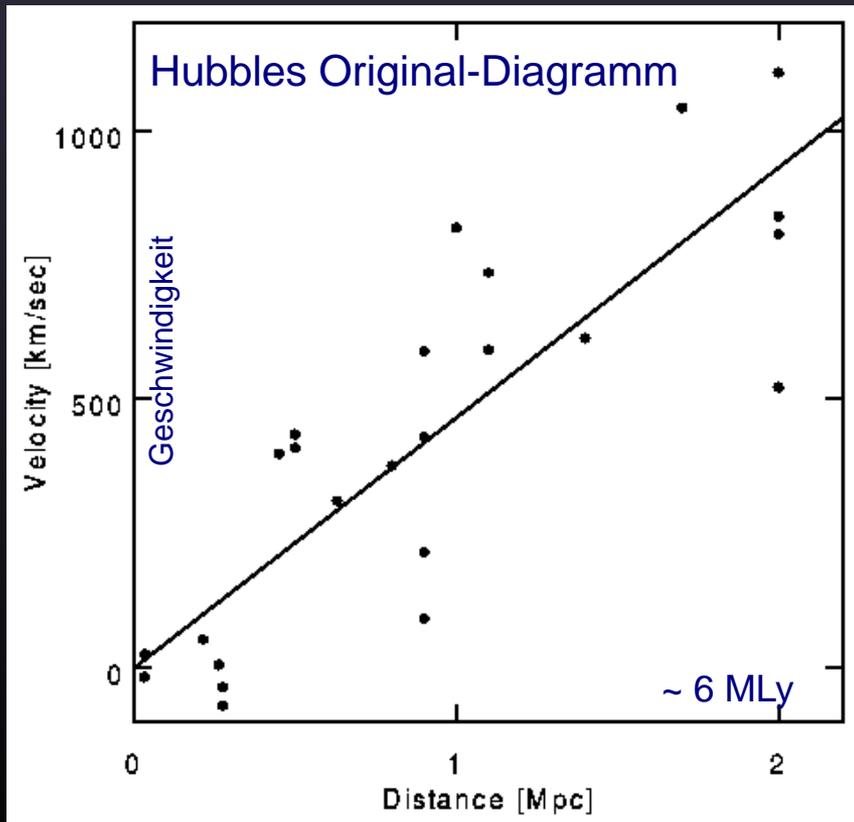


Urknall: Ein Anfang für die Welt

Erst im 20. Jahrhundert: Hinweise auf Entwicklung des Kosmos
Zwei Schlüsselbeobachtungen

Die erste (Hubble 1929):

Die Flucht der Galaxien



Eigentlich zu lokal
→ Ergebnis im Detail falsch

Idee aber richtig und wichtig:

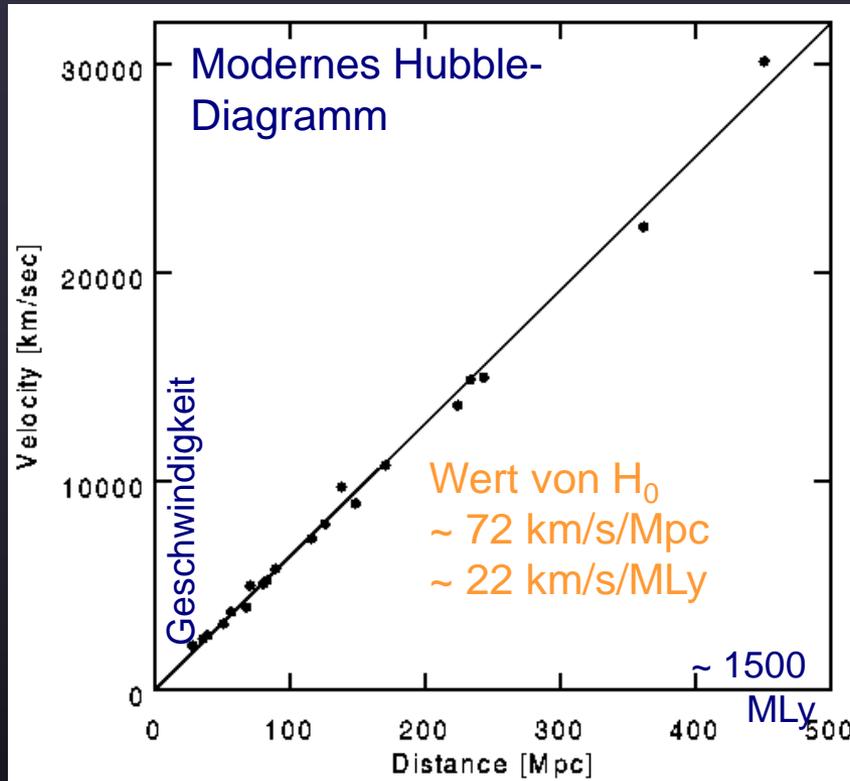
Messgröße: Rotverschiebung' z

Charakteristische Linien im Spektrum sind gegenüber Labor ins Rote verschoben

Interpretation: Analog zur Dopplerverschiebung von Schall, wenn auch nicht genauso:

Expansion des Universums

Die Expansion des Alls



Zunehmende Geschwindigkeit mit zunehmender Entfernung

Rate der Expansion:
Hubblekonstante H_0

Argument für dynamischen Kosmos:

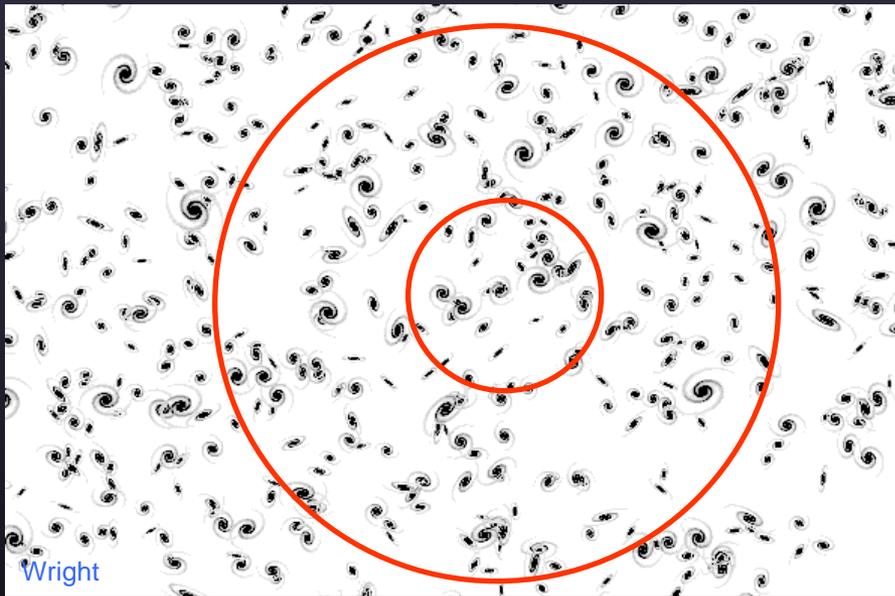
Expansion ‚zurückgeführt‘ ergibt Ausgangspunkt, also Anfang, Urknall

Aber: Aus der Flucht der Galaxien folgt nicht, dass wir uns in einer herausgehobenen Position befinden!

Analogien: ‚Luftballon‘ oder ‚Hefekuchen mit Rosinen‘ zeigen:
Der Urknall fand überall statt!

Kosmologisches Prinzip

Der Kosmos ist heute auf ganz großen Skalen,
jenseits der Galaxienhaufen, homogen und isotrop



Kleiner Kreis:
Nicht homogen und isotrop

Großer Kreis:
Homogen und isotrop

Also:
Von jedem Standort sieht
der Kosmos gleich aus

Verwandtes Kopernikanisches Prinzip:

Unser Standort ist gegenüber anderen durch nichts
ausgezeichnet

Das zweite Beobachtungsindiz für einen Anfang:

Die Kosmische Hintergrundstrahlung



1940er Jahre:

Vorhersage: Wenn es einen Urknall gab, sollte sein ‚Nachleuchten‘ beobachtbar sein. Wegen extremer Rotverschiebung ‚Licht‘ bei langen Wellenlängen (Mikrowellen) erwartet, Verteilung homogen und isotrop

1965: Penzias & Wilson entdecken eine ‚Störstrahlung‘, die sich schnell als Hintergrundstrahlung erweist

Thermische Strahlung mit Temperatur 2.7 Kelvin

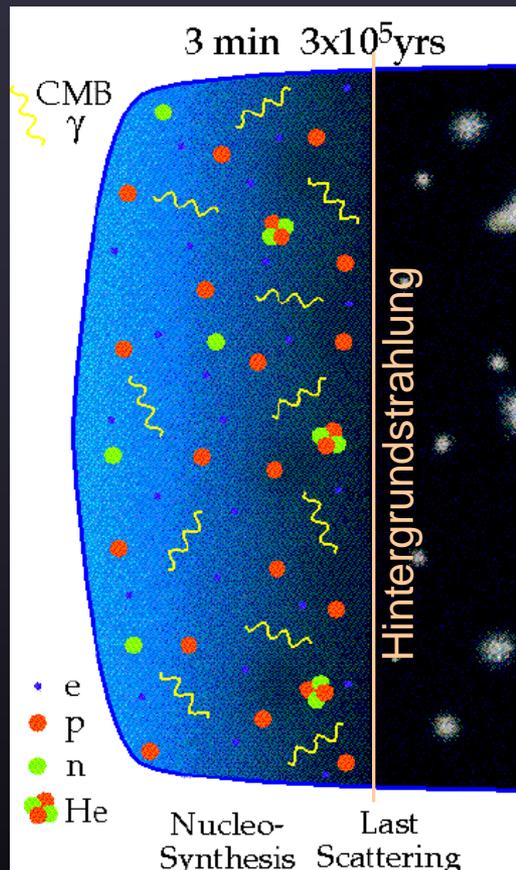
Der überzeugendste Beleg für einen Anfang des Alls in einem heißen Urknall

Seit den 1990er Jahren:

Satelliten suchen (und finden) Strukturen in der Hintergrundstrahlung als ‚Saat‘ und Ausgangspunkt für alle folgende Entwicklung



Das ganz frühe Universum



Die Hintergrundstrahlung:

Das früheste beobachtbare Zeugnis, aber nicht der Urknall selbst!

Davor:

Universum extrem heiß und dicht, Teilchen aus Materie und Licht existieren nicht unabhängig

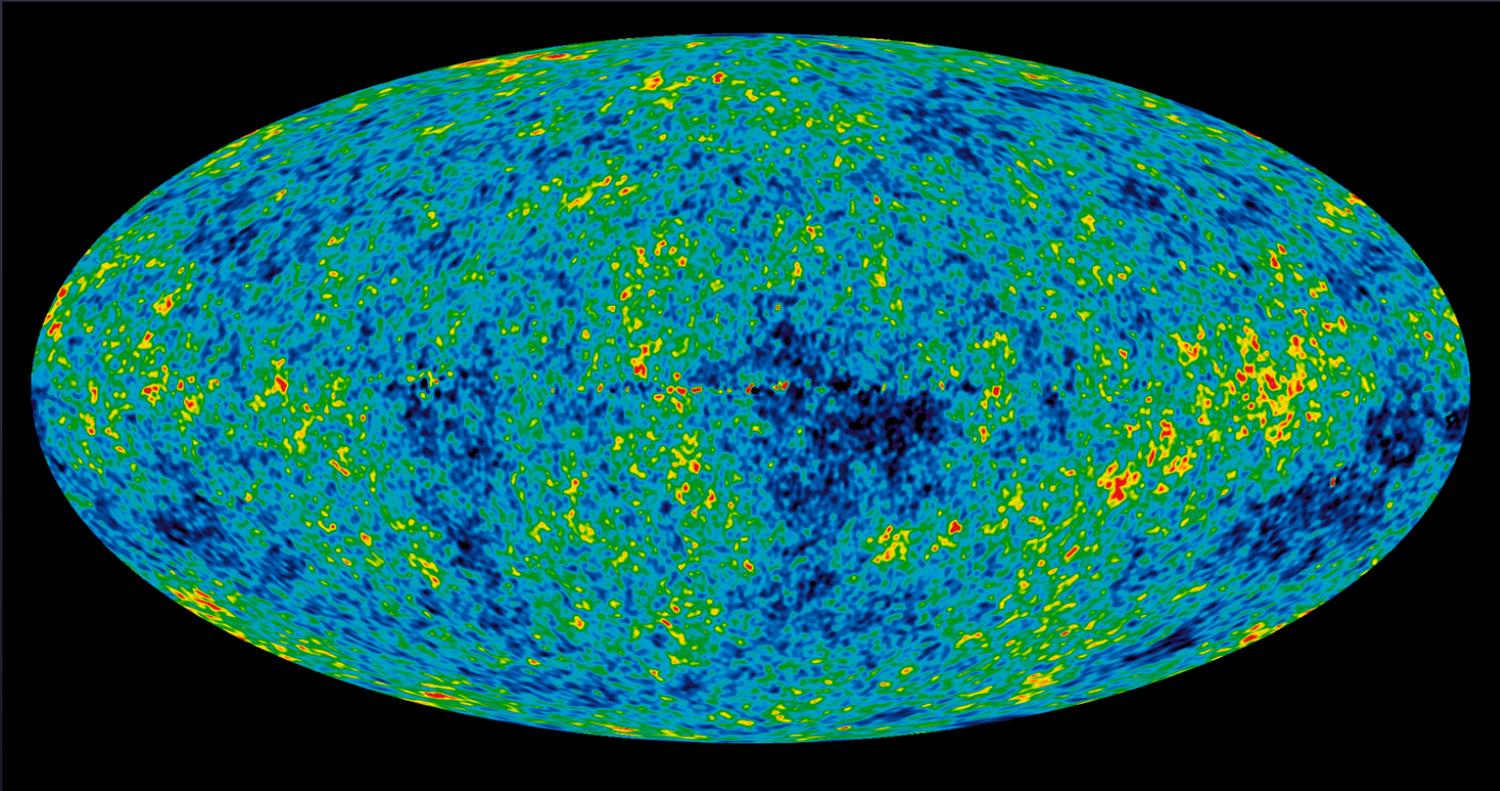
- 10^{-4} s, 10^{12} K: Protonen und Neutronen bilden sich
- 1s, $\sim 10^9$ K: Elektronen entstehen

Das Universum ist noch undurchsichtig: Strahlung kann sich nicht frei ausbreiten

- 379000 Jahre, 2970 K: Protonen und Elektronen vereinen sich zu neutralem Wasserstoff, All wird transparent für Strahlung

Hintergrundstrahlung kommt von diesem Zeitpunkt der Entkopplung von Strahlung und Materie.

Saatstrukturen



WMAP-Satellit
(Resultat
nach
7 Jahren,
Januar
2010):

Auflösung
von
Struk-
turen
 $\sim 0.2^\circ$

Strukturen in der Temperatur der Hintergrundstrahlung auf größeren und kleineren Skalen

Relative Unterschiede über ganzen Himmel nur im Bereich 10^{-6} ,

→ Ableitung von Strukturbildung und Schicksal des Kosmos aus Verteilung dieser Variationen!

Die ersten Galaxien

... scheinen sich nur 200 Millionen Jahre nach dem Urknall gebildet zu haben

Indizien und Modelle:

Sie waren wahrscheinlich sehr klein.

Vielleicht:

Nur massereiche, einzelne Sterne, die nur aus Wasserstoff und Helium bestanden – nur diese Elemente gab es seit dem Urknall

Dann:

Hierarchische Strukturbildung – Aus kleinen Strukturen wachsen größere

Hintergrund
(WMAP)

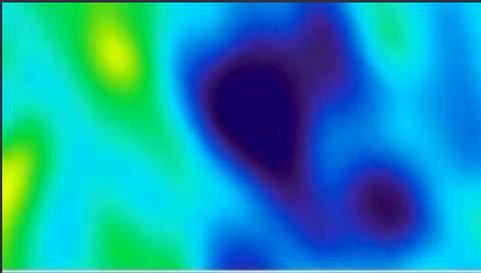
Dark
Matter-
Strukturen

Die ersten
Sterne

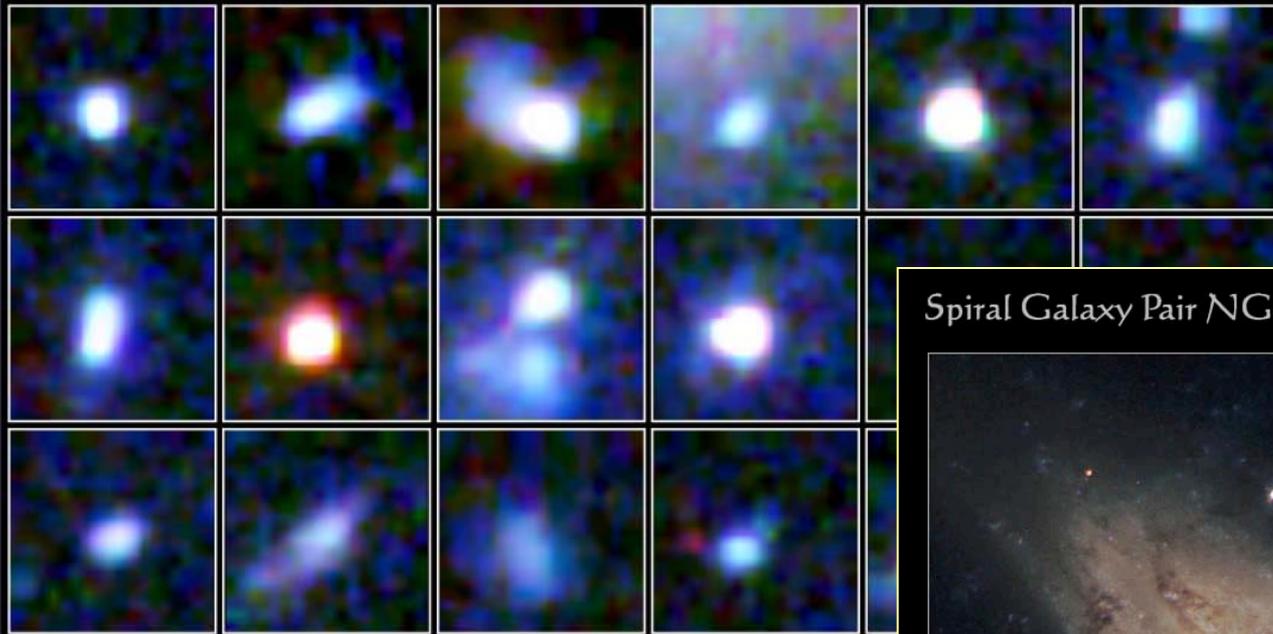
Proto-
Galaxien

heute

Aus einer Animation
der NASA (WMAP)



Hierarchische Strukturbildung



wechselwirkende
Protogalaxien im
wenige Gyr alten
Kosmos

Galaxy Building Blocks

Sich durchdringende
Spiralgalaxien

Große Galaxien entstehen
durch ‚Merger‘ aus kleineren –
dies gilt wohl auch für die
Milchstraße

Spiral Galaxy Pair NGC 3314



In der Gegenwart angekommen



...
,zu Hause'
in der
Milchstraße

NGC 3949 in
50 Mly
Entfernung –
der Milchstraße
recht ähnlich

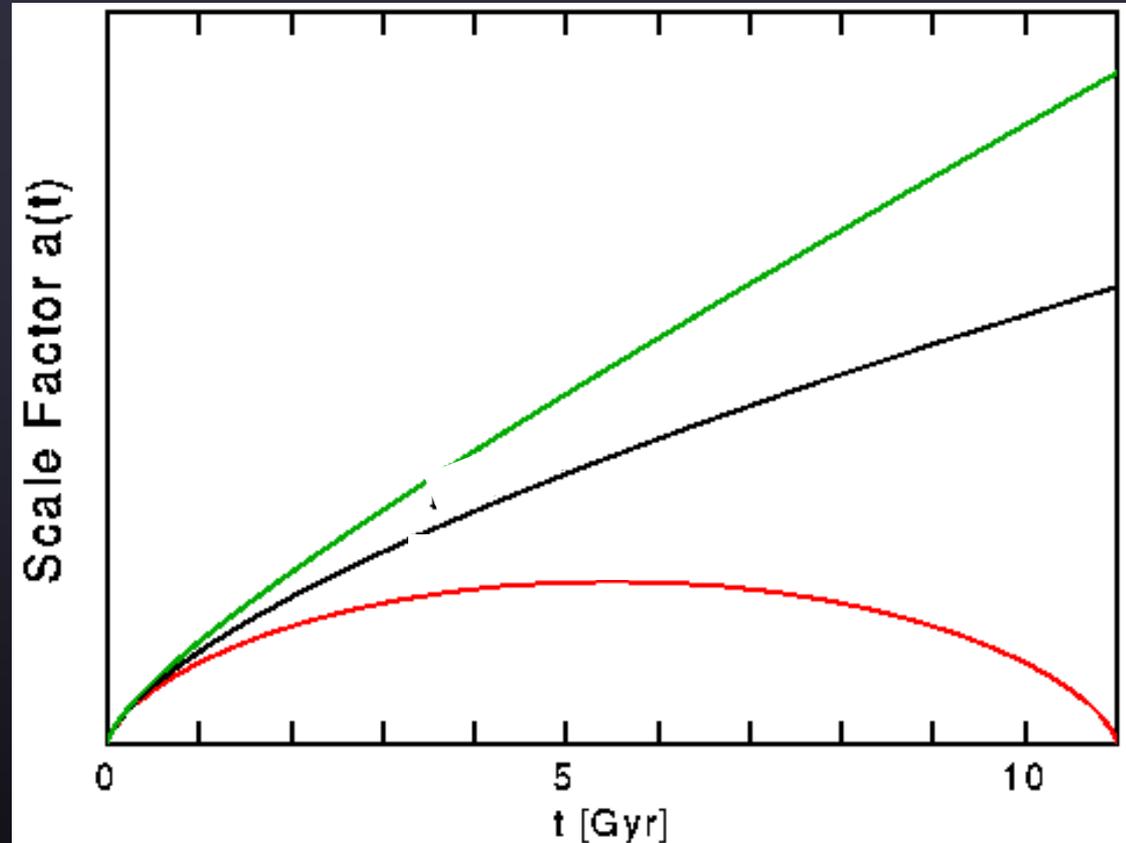
Geschichte des Kosmos bis hierher Bedingung unserer Existenz

Aber wie geht es weiter...?

Die Zukunft: Möglichkeiten

Ausgehend vom Urknall

- Umkehr der Expansion: ‚Big Crunch‘
- Stillstand erst im Unendlichen
- Expansion in alle Ewigkeit



Abhängig von:

Gehalt von Materie und Energie im Universum

Zum Beispiel: Viel Materie bremst die Expansion ab

Weit entfernte Supernovae

Lange angenommen: Expansion bremst sich ab und kommt nach unendlich langer Zeit zum Stillstand

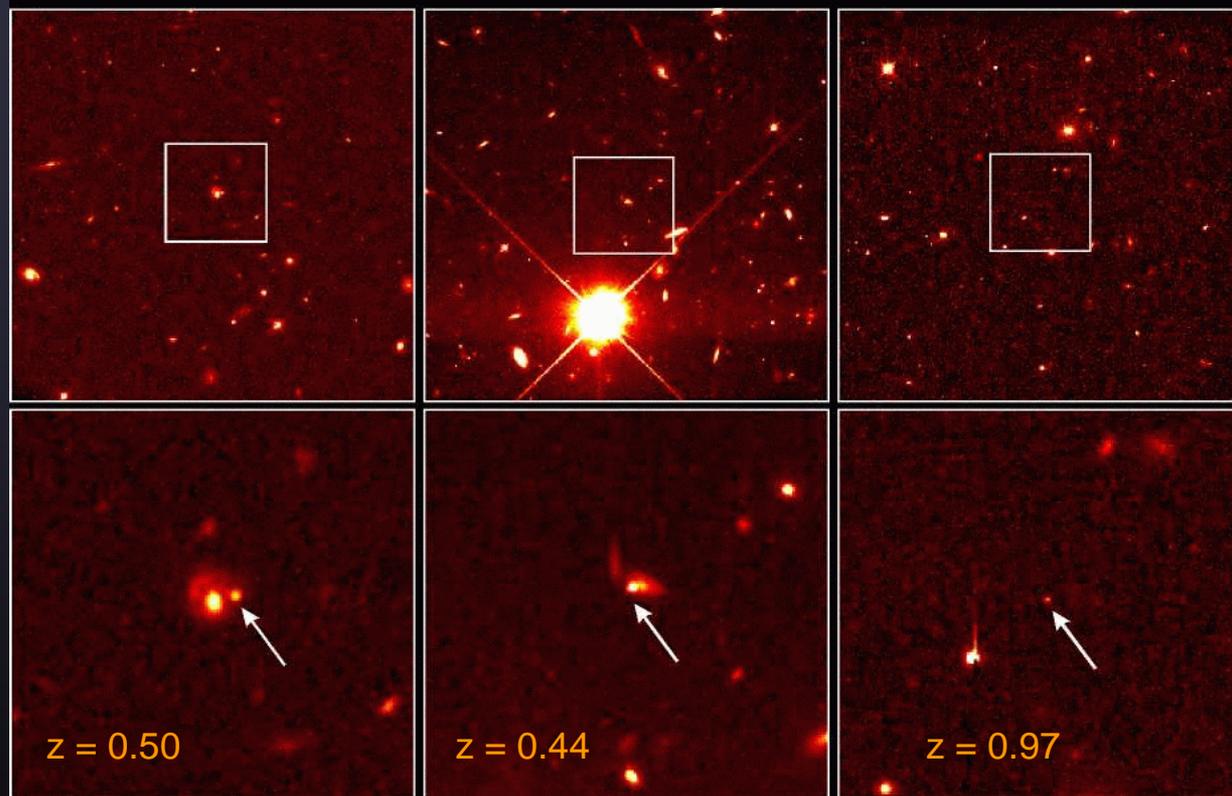
Ab 1996 ändert sich alles (Nobelpreis 2011!)

Supernovae des Typs Ia:

- Explodierende (Doppel)-Sterne Oder auch verschmelzende?
- Hoffentlich immer gleich hell
- Sichtbar durch das halbe Universum

Beobachtung scheinbarer Helligkeit

→ Entfernung:



Distant Supernovae

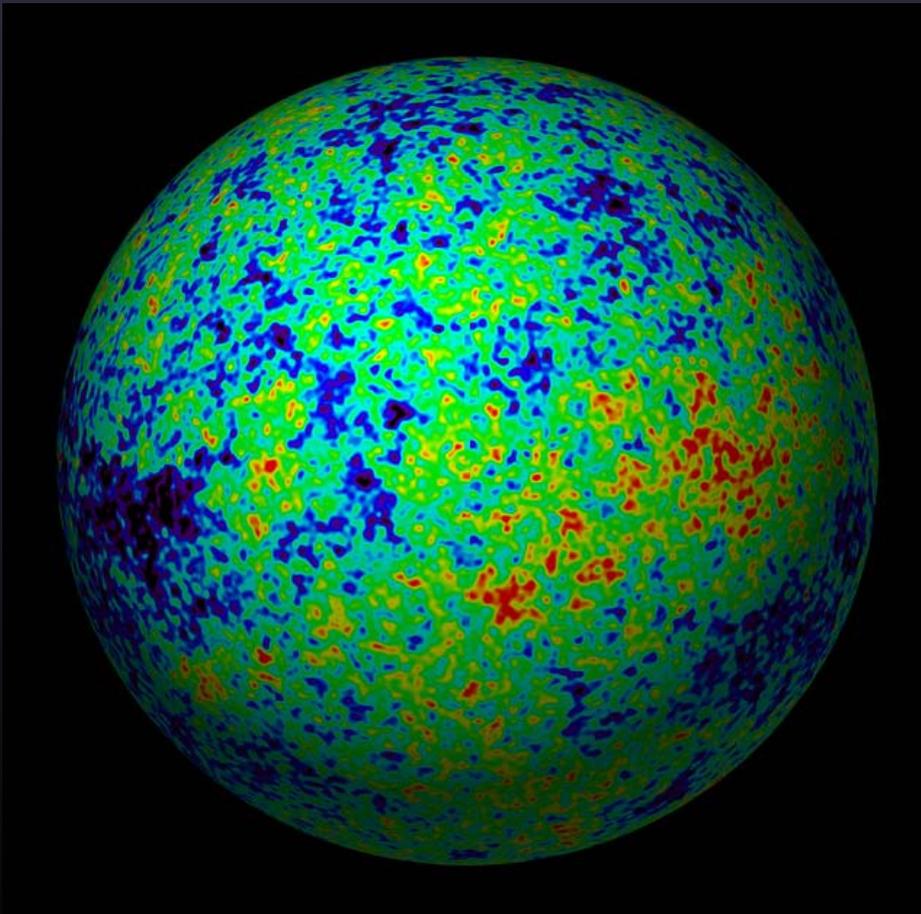
Hubble Space Telescope • Wide Field Planetary Camera 2

Die Supernovae sind zu weit weg! Eine Sensation...

Die Expansion

Schon die Supernova-Resultate legen nahe:

Universum scheint nicht nur für immer, sondern sogar beschleunigt zu expandieren!



Aber: Unabhängige Bestätigungen tun Not – und existieren.

Noch einmal Hintergrundstrahlung:

Perfekte Bestätigung:

Es existiert eine zusätzliche „Kraft“, die das Universum gegen den Einfluss der Schwerkraft auseinandertreibt

„Dunkle Energie“
(vielleicht Einsteins
„Kosmologische Konstante“?)

Ewige Expansion



- nur 4% des Inhalts des Universums: ‚Normale‘ Materie
- 23%: Dunkle Materie
- 73%: Dunkle Energie, die die beschleunigte Expansion treibt

- Die Materie verteilt sich immer mehr und irgendwann wird es im All kalt und dunkel.
- ... Allerdings: 96% des Inhalts des Universum verstehen wir nicht gut.
- Das letzte Wort ist noch nicht unbedingt gesprochen!