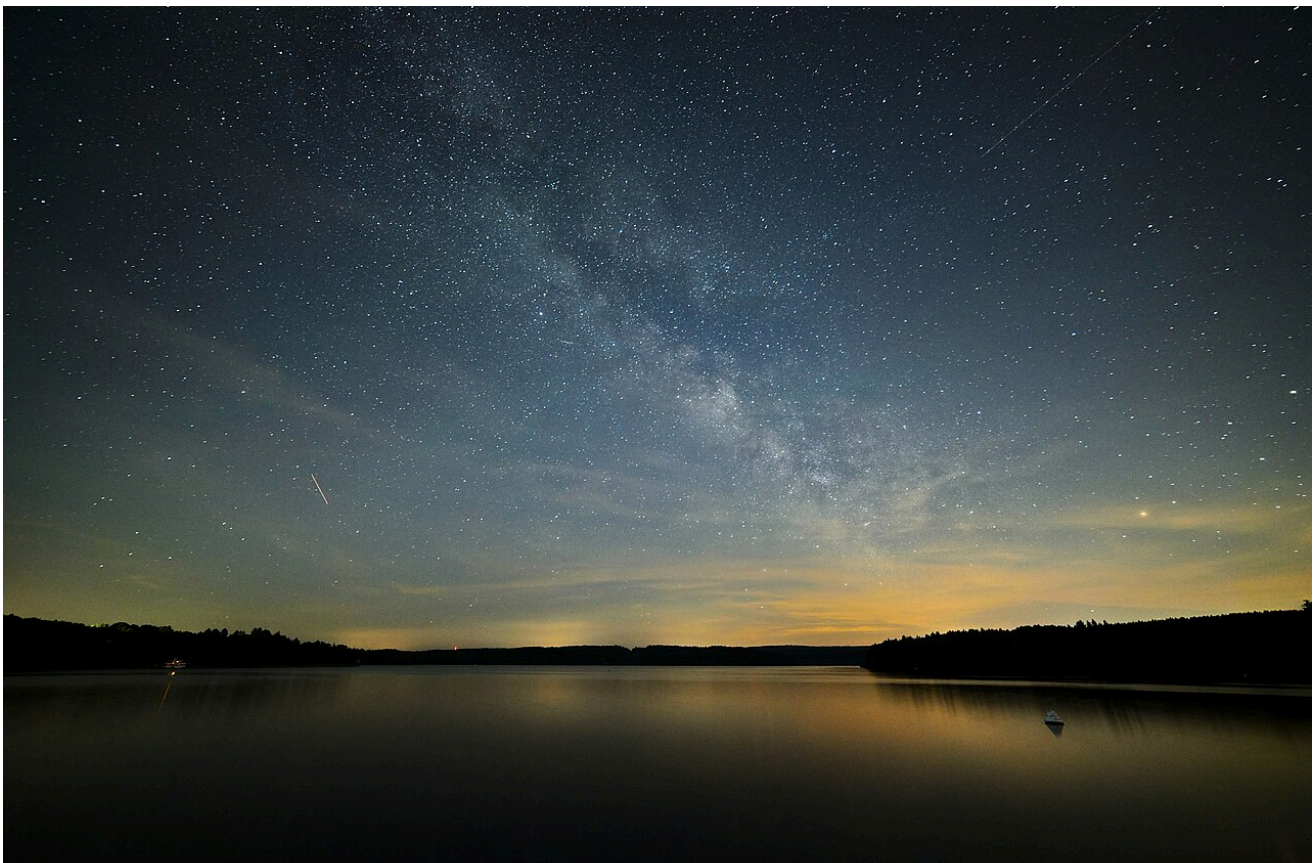
5. Der Kosmos

2024-11-23

Inhalt

- 5.1. Großstrukturen im Weltall
  - Unsere Milchstraße - Aufbau
  - Milchstraße und andere Galaxien
  - Standardkerzen
  - Die Galaxienflucht, das Hubblegesetz und die Entfernungsmessung
  - Galaxienhaufen, Quasare und Kosmologie
- Die Kosmologie
  - Zeitstrahl Urknall
  - Ergänzungen zur Dunklen Materie

5.1. Großstrukturen im Weltall



Quelle: wikimedia [1]

Unsere Milchstraße - Aufbau

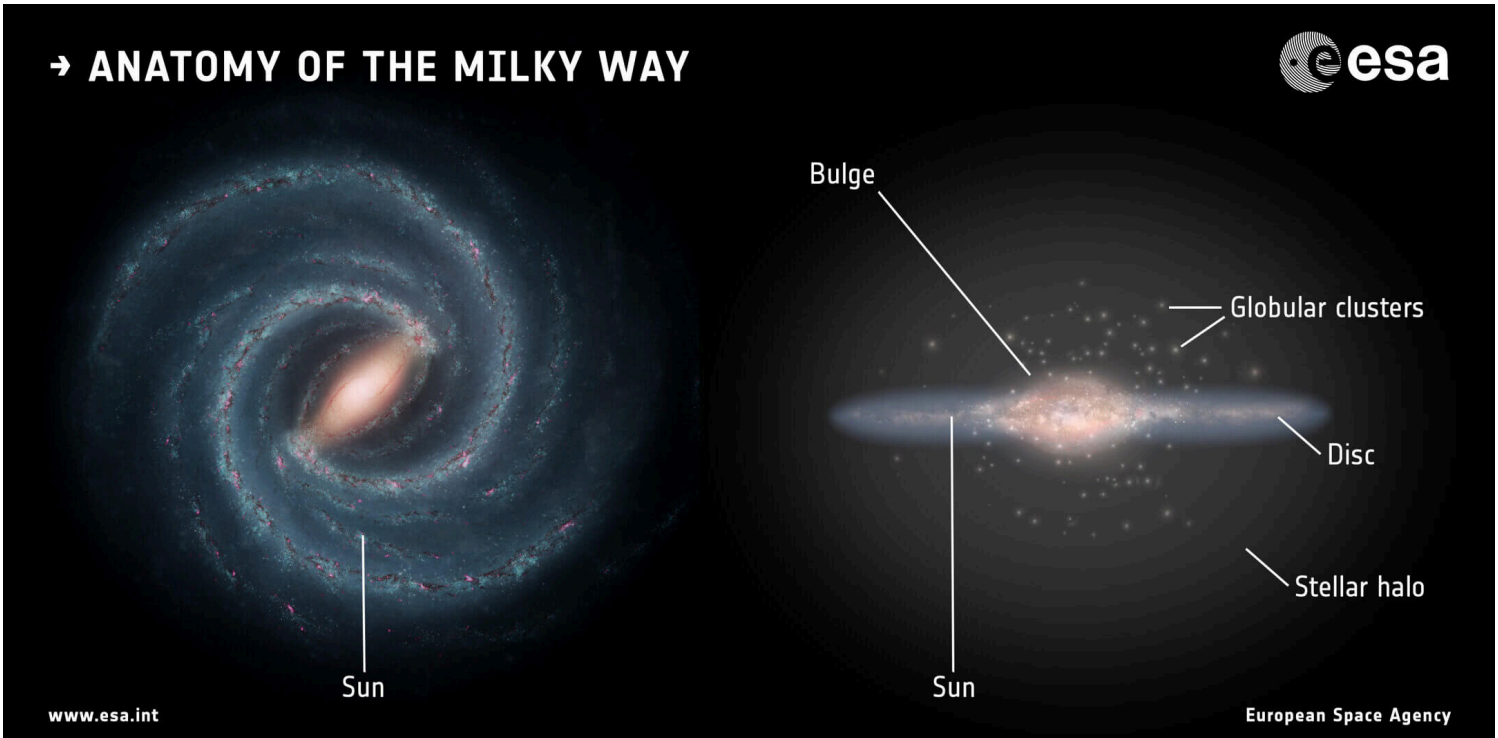
Selbstlernen mit dem Video von Prof. H. Lesch: ⇗ youtube (ca. 14min, auch gelegentlich über die Suchfunktion in der ARD-Mediathek zu finden). Notiere dir die wichtigsten Informationen. Bsp.:

- wie sieht man sie
- wo ist sie,
- wie ist sie aufgebaut (von oben und von der Seite gesehen),
- was ist der Bulge („Wulst“ im Video)
- was ist der galaktische Halo
- Durchmesser in Lj (Lichtjahren)
- woraus bestehen die Spiralarme
- wo sind Kugelsternhaufen (ca. 150 Stück)
- sieht man die Milchstraßen-Mitte
- was liegt im Zentrum der Milchstraße

- was ist mit „Galaxien sind Recycling-Anlagen“ gemeint
- ist die Milchstraße etwas besonderes oder ein eher üblicher Typ

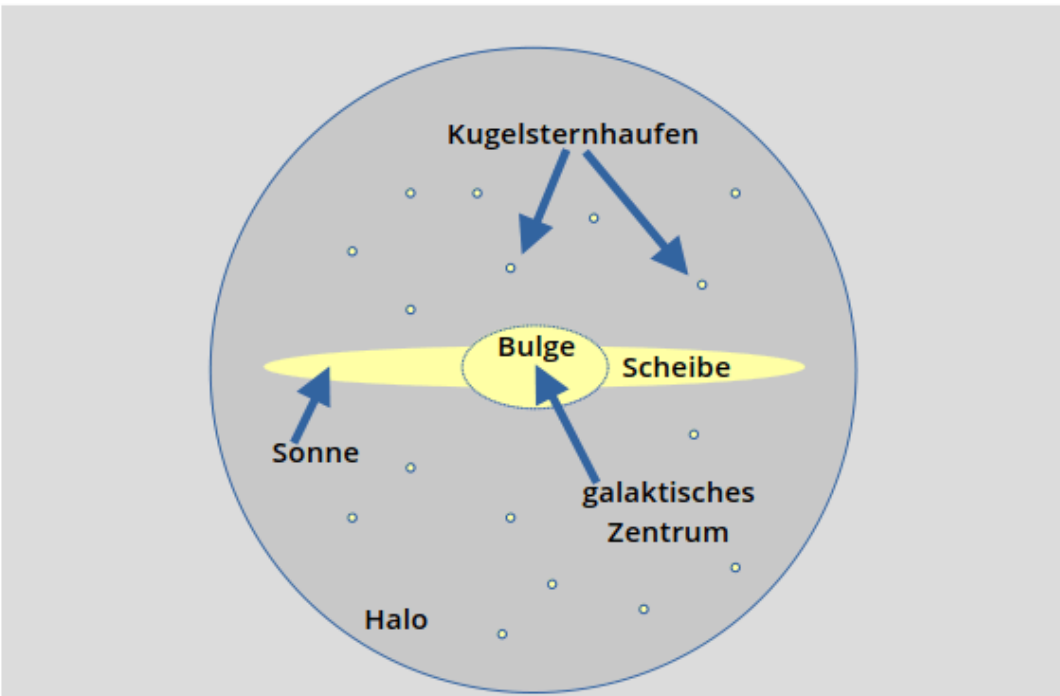
> “Stau auf der Autobahn” kann man sich auch als hindurchwandernde Druckwelle vorstellen. „Dunkle Materie Halo“ (12:30) ist kein Stoff.

Darstellung ESA



Quelle: ESA [2]

Skizze:



Quelle: biec [eigene Grafik, CC BY-NC-SA 4.0]

Zum Vergleich (da wir die Milchstraße natürlich nicht von außen fotografieren können) die **Andromeda-Galaxie** (m31) in einer beschrifteten ⇗ Abbildung mit weiteren Nachbargalaxien.

Milchstraße und andere Galaxien

(Im Buch das Kapitel 31, S 150)

Studiere das Kapitel. Hier nur einige Stichworte:

- Wer hat zuerst entdeckt, dass die MS aus Sternen besteht?
- Synonyme: Milchstraße und Galaxis
- Milliarden ähnlicher Sternsysteme: Galaxien
- Alle Galaxien haben wie die Milchstraße eine Scheibenform
    - Es gibt viele Spiralgalaxien wie die Milchstraße
    - Es gibt aber auch andere: Ellipsengalaxien, viele Zwerggalaxien und 5% irreguläre Galaxien.
- Was sind die Spiralarme?
- Was ist das Zentrum der Galaxis? Wie beobachtet man es?
- Was sind Kugelsternhaufen und wie alt sind sie? Und die Sterne in ihnen? Kannst du den Aufbau wiedergeben?

zu 31.7: Eher durchlesen als studieren, nur das Ergebnis ist für uns relevant.

zu 31.9: Die Details der Rotation (differentiell) interessieren uns nicht so, außer dass die Bewegung der Sonne in der Galaxis direkt deren Masse liefert.

Zusammenfassung Milchstraße

Die Daten	Durchmesser: 100 000 Lichtjahre Dicke außen: 3000 Lichtjahre 100 Milliarden Sterne Dicke im Kern: 15000 Lichtjahre
Aufbau	Scheibe mit Bulge in der Mitte Halo als Kugel herum Supermassives Schwarzes Loch im Zentrum (vermutlich in jeder Galaxie) mit über 4 Mio Sonnenmassen.
Die Spiralstruktur	ist wegen des interstellaren Staubs in der Galaxienebene am besten nachweisbar durch Radiostrahlung des Wasserstoffs. Die Spiralarme sind reich an **jungen hellen** Sternen und interstellarer Materie (Wasserstoff).

Das Zentrum der Galaxie weist eine riesige Massenansammlung (nur Größe eines Sonnensystems, aber 4 Millionen Sonnenmassen) auf, in Form eines riesigen „Schwarzen Lochs" (dort findet sich die kräftige Radioquelle Sgr A^*).

Unsere Sonne sitzt ziemlich am Rand unserer Galaxie (25000 – 30000 Lj vom Galaxienzentrum).

Ein Umlauf unserer Sonne um das Galaxienzentrum dauert etwa 250 Millionen Jahre (v = 225 km/s).

Im Halo, einem kugelförmigen Raum von etwa 150 000 Lichtjahren Durchmesser um unsere eigene Galaxis herum, findet man ca. 150 sog. **Kugelsternhaufen**, mit meist uralten Sternen (d = 30 - 300 Lj.; n = 10^5 - 10^6; fast nur Sterne der

ersten Generation, d.h. ohne schwere Elemente in der Photosphäre)

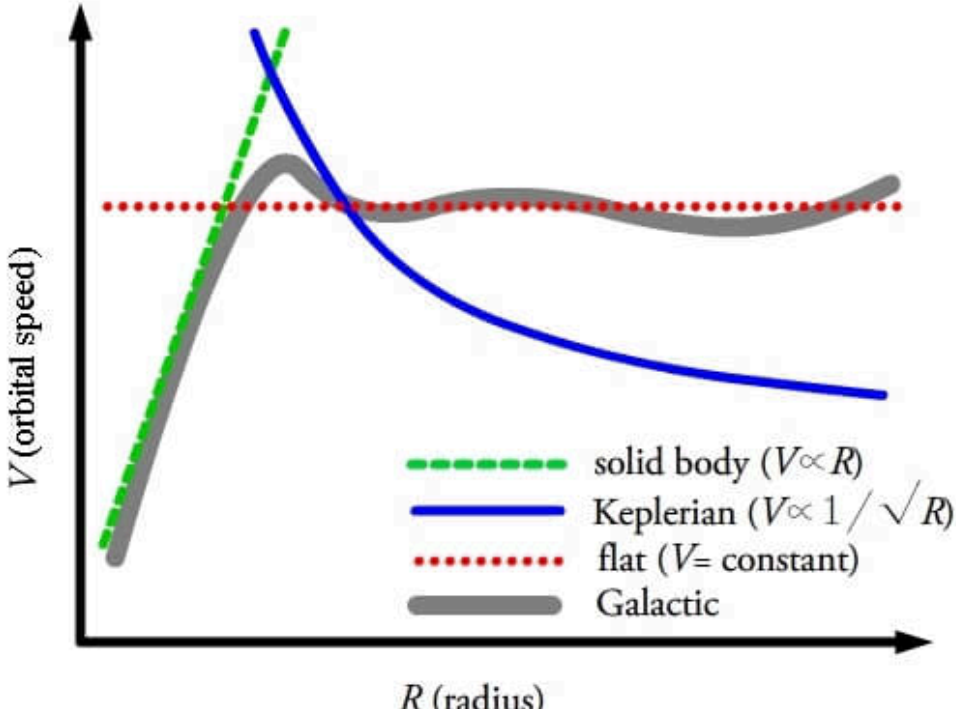
Entstehung

Wahrscheinlich sind vor mehr als 10 Milliarden Jahren aus einer riesigen rotierenden Materiewolke zuerst die Kugelsternhaufen kondensiert, später konzentrierte sich die verbleibende Materie auf die Scheibenform.

Rotationskurven

Die Kreisbahnen der Sterne um das Zentrum weisen nach außen zunächst zu- und weiter draußen wieder abnehmenden Geschwindigkeiten auf.

Konkret wäre wegen der Massenverteilung im inneren Bereich eine Drehung wie bei einer massiven Scheibe (ω=konst. also v linear mit R steigend) und weiter außen eine Art Kepler-Bewegung zu erwarten. Eine solche Kepler-Bewegung setzt man auch bei der Abschätzung der



Quelle: wikipedia [3]

Gesamtmasse
unserer Galaxie
voraus.

Die tatsächliche v-r-Kurve weicht von den theoretischen Erwartungen aber stark ab. Man postuliert daher unsichtbare „**dunkle Materie**” als Ursache.

Nachbarn

Unser nächster größerer Nachbar ist die uns sehr ähnliche Andromeda-Galaxie in 2,5 Millionen Lj Entfernung.
Zum Vergleich: Die Milchstraße hat ca. 0,1, die Andromedagalaxie sogar 0,22 Millionen Lj Durchmesser, also ca. 9% des Abstands.

Nun ein schöner Begriff der Astronomie:

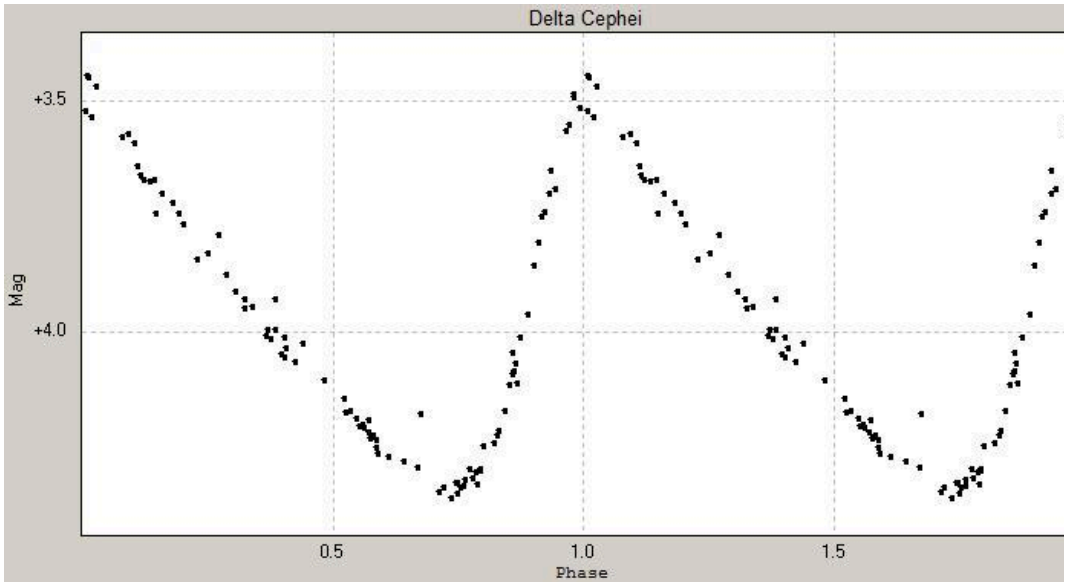
Standardkerzen

Würde ich im Kerzengeschäft Standardkerzen kaufen, so würde ich erwarten, dass die Standardkerzen Typ 31 untereinander alle absolut gleich hell sind und die vom Typ 93b zwar heller, aber untereinander wieder gleich hell brennen.

In der Astronomie nennt man Objekte, deren absolute Helligkeit man bereits aus physikalischen Gründen kennt (also ohne explizite Helligkeitsmessung) als **Standardkerzen**.

δ-Cepheiden

Die Astronomin Leavitt hat die **δ-Cepheiden** („Delta-zefe-iden“ ausgesprochen) untersucht. Dies sind Sterne mit pulsierender und erfreulich hoher Helligkeit. Zwischen der Pulsationsfrequenz und ihrer mittleren scheinbaren Helligkeit in der Kleinen



Quelle: wikipedia [4]

Magellanschen Wolke entdeckte sie einen festen Zusammenhang $(M \sim log\left(\frac{P}{d}\right))$.

Andere konnten das eichen, so dass wir nun direkt die absolute Helligkeit kennen.

Also: Pulsfrequenz messen → Formel → M bekannt.

Supernovae Ia

Eine andere, leider seltene Standardkerze ist die **Supernovae Typ Ia**. Sie entsteht ja durch ein langsames Anwachsen eines weißen Zwergs durch Massenzufuhr. Dies endet mit Kollaps und Explosion, wenn die Materie dem Gravitationsdruck nicht mehr standhält (Chandrasekhar-Grenze). Dies passiert aber immer bei derselben Masse und damit verlaufen alle Supernovae Typ Ia identisch. Kennt man von einer die absolute Helligkeit M, so kennt man sie von allen: **M = -19** !

genauer?

ok: Weiße Zwerge unterscheiden sich untereinander etwas in dem Gehalt an schwereren Elementen, so dass man Unterkategorien mit kleinen Unterschieden in Chandrasekhar-Grenze, Helligkeit und zeitlichem Ablauf bildet. Da man diese aber am Ablauf erkennt kommt man wieder zu einer ziemlich exakten absoluten Helligkeit.

Anwendung

Was macht man nun mit Standardkerzen?

- man errechnet ihre absolute Helligkeit oder liest sie aus einer Tabelle ab
- man misst ihre scheinbare Helligkeit
- man benutzt den Entfernungsmodul
- und schon hat man die Entfernung zwischen uns und dem Objekt bzw. aller seiner Nachbarn, z.B. einer Galaxie!

Damit haben wir ein weiteres Messverfahren neben der bereits gelernten spektroskopischen Entfernungsmessung (→ Schulaufgabe).

Nun zu einem weiteren Zusammenhang, der wieder in eine weitere und letzte Entfernungsmessung mündet:

Die Galaxienflucht, das Hubblegesetz und die Entfernungsmessung

(Detailreicher im Buch Kapitel 33, hier nur ein Überblick)

Galaxienflucht

- Bereits in den 1920er Jahren wurde herausgefunden, dass alle weit entfernten Galaxien sich von uns entfernen:
- Misst man das Spektrum von Galaxien, so sind typischerweise gut erkennbare Spektrallinien um den Faktor z verschoben aufzufinden. Die Erklärung mit dem Dopplereffekt besagt, dass die Galaxien eine Radialbewegung uns gegenüber machen.
- Dopplerformel (gültig, solange $v << c$ ist):

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c}$$

- Die meisten Galaxien, insbesondere alle, die über 100 Mpc entfernt sind, entfernen sich - sind also rotverschoben (*kosmologische Rotverschiebung*).
- Dieses Phänomen nennt man Galaxienflucht.

Hubble

Hubble erkannte in den Messwerten, dass sich Galaxien, je weiter sie entfernt sind, um so schneller von uns entfernen! Der Zusammenhang zwischen der Entfernung r und $v = z \cdot c$ ist linear. (Mpc sind Megaparsec)

$$v = r \cdot H_0 = r \cdot 74 \frac{km}{s \cdot Mpc}$$

> Anmerkung (kein Stoff): Der aktuelle Wert für H_0 ist als nicht-konstant anzusehen. Er durchlief in der Geschichte des Universums verschiedene Werte.
> Selbst im 21. Jhd. liegt der Zahlenwert von H_0 je nach Quelle zwischen 70 und 74, da die Messungen immer noch mit signifikanter Ungenauigkeit erfolgen und sich je nach Methode

deutlich unterscheiden. In Prüfungen verwenden wir den oben verwendeten Wert 74 aus der Formelsammlung.

Weltalter

Der Kehrwert der Hubble-Konstanten ist das sogenannte **Weltalter**, also die rückwärts extrapolierte Expansion bei angenommener Konstanz von H_0:

$$T = \frac{1}{H_0} = \frac{s \cdot Mpc}{74km} = \frac{s \cdot 3,1 \cdot 10^{19} km}{74km}$$
$$= 4,2 \cdot 10^{17} s \approx 13\ Mrd.\ Jahre$$

Rosinenkuchenmodell

Es ist nicht so, dass die Galaxien sich speziell von uns entfernen - sie entfernen sich genauso auch von einander. Genauso bewegen sich Rosinen in einem Hefeteig, der gleichmäßig aufgeht, von einander. Je größer ihr Abstand ist, um so größer ist die

Geschwindigkeit, mit der sie sich von einander entfernen. Stehst du im Teig und ortest in alle Richtungen Rosinen, so gibt es kein erkennbares Zentrum, solange du kein Teig-Ende siehst...

Im Universum sehen wir den Rand des Hefeteigs nicht - er ist außerhalb unserer Sichtweite.

Das Weltalter wäre die Zeit, vor der rechnerisch alle Rosinen an einem Platz gewesen wären.

Entfernungsmessung mit dem Hubblegesetz

Da der Zusammenhang nun als gegeben angesehen werden kann, können wir aus der Rotverschiebung einer Galaxie ihre Entfernung berechnen!

Bsp.: “Eine Spektrallinie ist um 20% nach rot verschoben. Berechne, wie weit ist der Stern entfernt ist!”

$$\rightarrow \; z = 0,2 \; \rightarrow \; v = 0,2c$$

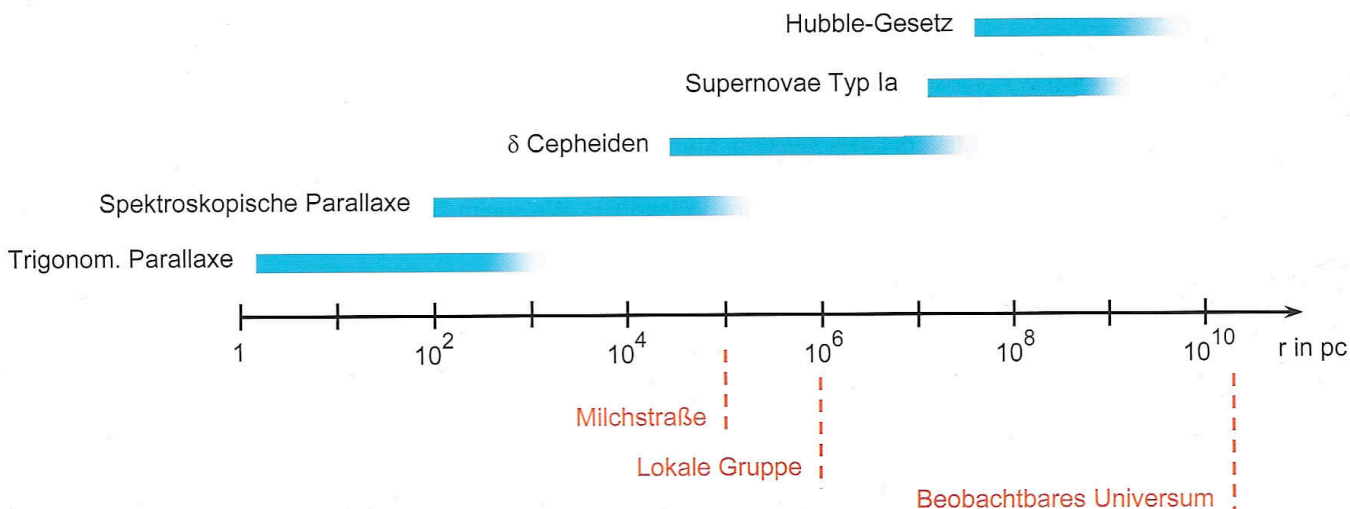
$$\rightarrow \; r = \frac{v}{H_0} = \frac{0,2 \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}}{74000 \frac{m}{s \cdot Mpc}} = 810 Mpc$$

Anmerkung: Hohe Werte für z wie z.B. 7 sind möglich. Dann gilt aber die Dopplerformel längst nicht mehr und die Erklärung mit einer Bewegung der Galaxie von uns weg ist nur noch ein Modell. In Wirklichkeit dehnt sich der Raum selbst aus, was sich auf die ihn durchquerende elektromagnetische Welle auswirkt. Z.B: bedeutet z=1 dass sich die Wellenlänge verdoppelt hat, weil sich seit dem Aussenden des Licht die Größe des Raums verdoppelt hat und die Welle entsprechend gestreckt wurde.

Außerdem gibt es eine aus dem Energieerhaltungssatz folgende ***gravitative*** *Rotverschiebung (Neutronenstern z.B. z=0,3). Mehr dazu unter allgemeine Relativitätstheorie...*

Die kosmische Entfernungsleiter

Je nach Entfernung versch. Methoden zu deren Bestimmung:



Quelle: unbekannt

Entfernungsbereiche der Methoden überlappen sich.

Galaxienhaufen, Quasare und Kosmologie

Galaxienhaufen

Einerseits ist es um unser Sonnensystem recht leer, trotzdem ist es Teil der Milchstraße.

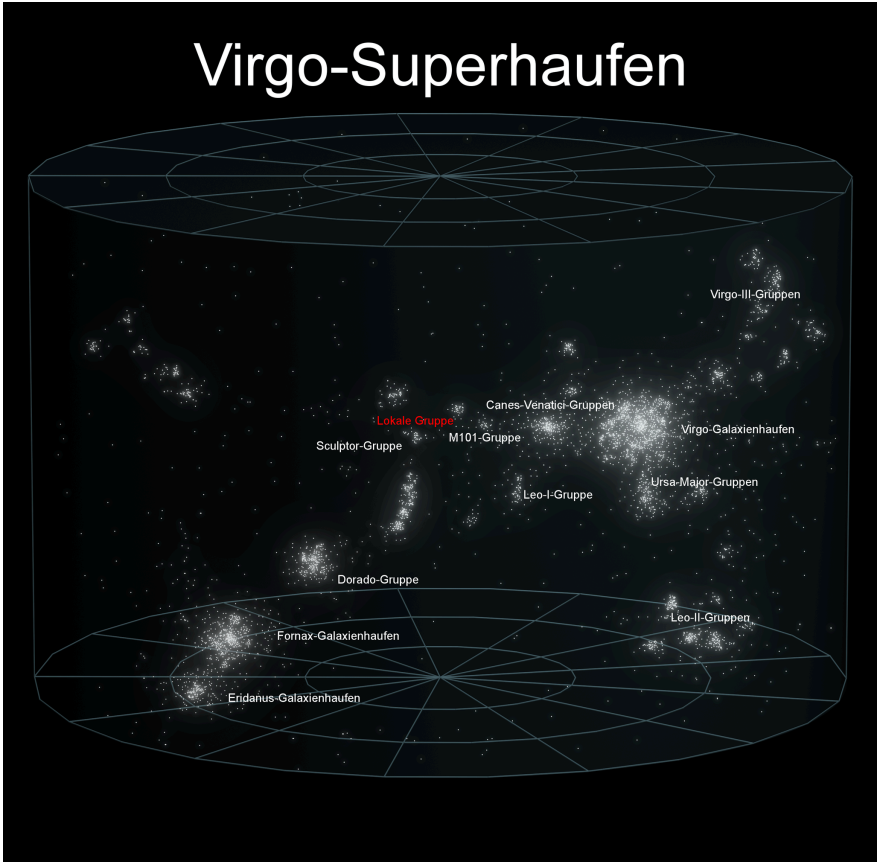
Auch um die Milchstraße herum ist es scheinbar sehr leer, aber es gibt ca. 35 bis 40 benachbarte Galaxien, welche immer noch miteinander und mit der Milchstraße gravitativ gebunden sind (→ sie können nicht weg, sind also auch nicht von der Galaxienflucht betroffen). Dies ist die sogenannte ***Lokale Gruppe*** - eine Galaxiengruppe (mit <50 Galaxien im Gegensatz zum Galaxienhaufen mit > 50 bis weit über 1000 Galaxien).

- Die beiden größten Galaxien in der Lokalen Gruppe sind die Milchstraße und die Andromedagalaxie.

- Die kleineren (z.B. die Magellanwolken, hier als LMC und SMC) gruppieren sich meist um diese beiden.
- Siehe dazu eine Fotomontage auf ⇗ andromedagalaxie.de.

Unsere Lokale Gruppe ist Teil des ***Virgo-Superhaufens***, der 100 bis 200 Galaxienhaufen und -gruppen enthält.

- Die Masse des gesamten Superhaufens beträgt ca. 10^{15} Sonnenmassen.
- Alleine der im Zentrum befindliche namensgebende ***Virgogalaxienhaufen*** enthält ca. 2000 Galaxien.



Quelle: wikipedia [5]

Selbst so ein Superhaufen wird aber noch durch die Gravitation größerer Superhaufen beeinflusst (aber nicht festgehalten) wie

dem „Großen Attraktor“ mit:

- 10^{16} Sonnenmassen in
- wenige 100 Mio Lichtjahre Entfernung.
- Erst bei größeren Entfernungen gilt dann die Hubble-Beziehung.

Betrachtet man die Materieverteilung in noch größerem Maßstab, so stellt man fest, dass es dichtere (mehr Galaxienhaufen) und weniger dichte Bereiche gibt. Siehe unten unter Kosmologie.

Quasare

Quasare sind ab 1963 entdeckte Objekte, die zunächst als starke Radiostrahler entdeckt wurden. Auch im sichtbaren Bereich sind sie *absolut* hundertfach heller als normale Galaxien, *scheinbar* aber nur sehr lichtschwach, da sie - bewiesen durch eine extreme Rotverschiebung - viele Milliarden Lichtjahre entfernt sind. Sie können nur Lichttage oder Lichtwochen im Durchmesser sein, da sie oft in Tagen oder Wochen Schwankungen unterworfen sind. Bei ihrer Entdeckung erschienen sie auf Fotoplatten als winzige Punkte, konnten aber wegen der Strahlungsstärke keine Sterne sein. Daher der Name Quasi-stellare Objekte. Es dürfte sich tatsächlich um die Kerne „aktiver Galaxien" handeln.

- Strahlung ist Synchrotronstrahlung mit Schwankungen → Erklärung aus Wikipedia:[6]
- haben keine λ_{max} im Spektrum, sondern viele Peaks (vgl. Röntgenspektrum)

- keine Absorptions- sondern Emissionslinien
- extrem hohe Rotverschiebung & Fluchtgeschw. (also weit entfernt)
- haben wie Neutronensterne & SL eine Akkretionsscheibe
- beim „Sturz“ der Materie wird Gravitations- zu Strahlungs-Enenergie
- vermutlich supermassive SL in Galaxienzentren (bei uns nicht, weil keine Materie, die ins SL kommt → keine Akkretionsscheibe)

Die Kosmologie

Die Kosmologie beschreibt unseren Kosmos als Ganzes. Dies ist schwierig, da wir nur einen geringen zeitlichen und räumlichen Ausschnitt beobachten können.

Insbesondere beschreibt die Kosmologie die Entwicklung unseres Kosmos’.

- Urknall
- Expansion
- Alter
- Größe

Grundannahmen der Kosmologie

- Der erforschte Teil der Welt ist typisch für das Ganze der Welt.
- Naturgesetze gelten universell
- Die für den beobachtbaren Raum nachgewiesenen Eigenschaften Homogenität und Isotropie besitzen Gültigkeit für das ganze Weltall (siehe → kosmologisches Prinzip).

- In diese Forderungen sind alle Eigenschaften des Weltalls einbezogen:
    - Materie ist überall gleich aufgebaut
    - Moleküle-Atome-Nukleonen-Elektronen
    - Problem: Dunkle Materie und ihre Struktur
- Strahlung hat überall die gleichen Eigenschaften
- gleichförmige Verteilung von Materie und Strahlung

Grundlage der Kosmologie:

- die Beobachtung
- die Gesetze der Physik

Das Kosmologische Prinzip

- Das Universum ist **homogen** (überall gleich aufgebaute Strukturen)
- Das Universum ist **isotrop** (es stellt sich dem Beobachter von jedem Beobachtungspunkt und Richtung gleich dar)

Zusammenfassung Kosmologie

- Grundsätzliche Frage war *vor* Entdeckung der Galaxienflucht: endlich? unendlich?
  - Ein *endliches statisches* Universum müsste infolge der Gravitation zusammenstürzen.
  - Ein *unendliches statisches* Universum müsste nachts am ganzen Himmel so hell sein wie eine Sternenoberfläche. (Olbers'sches Paradoxon 1823)
- Das Geschwindigkeitsverhalten der (scheinbar von UNS) „fliehenden" Galaxien spricht für eine Expansion des Raums selbst.
- Ein sich im dreidimensionalen Raum selbst ausdehnendes Universum hätte jedoch einen klar definierten Mittelpunkt (= Ort des „big bang"). Dies widerspricht dem von uns postulierten „kosmologischen Prinzip".

Anmerkung “Engelhardt”: Bei einer Ausdehnung unseres dreidimensionalen Raums in einer höheren Dimension gibt es keinen Mittelpunkt (der sich in unserem Raum selbst befindet). Ein solches in der 4. Dimension gekrümmtes Universum kann gleichzeitig *endlich* und trotzdem *un-begrenzt* sein (Luftballon-Modell).
TIPP: Silvestergespräche eines Sechsecks (Dionys Burger, 1957)
TIPP: Flatland - Eine phantastische Geschichte über viele Dimensionen (Abbott, 1884)*

- Endlich ist in jedem Fall der „beobachtbare” Teil des Universums (endliche Lichtgeschwindigkeit!). Das Licht der am weitesten entfernten Galaxien und Quasare, die wir beobachten, ist seit ca. 14 Milliarden Jahren zu uns unterwegs.
- Unsere Erde, unsere „Maß-Stäbe”, ja unsere ganze Lokale Gruppe nehmen nicht an dieser Ausdehnung teil. Sie findet nur „auf großen Skalen” statt.

Hintergrundstrahlung

Die 1965 von *Penzias und Wilson* rein zufällig entdeckte, gleichmäßig aus allen Richtungen kommende **3K-Hintergrundstrahlung** ist der verbliebene Rest des Ur-„Knalls”, der durch die Raumausdehnung extrem langwellig geworden ist.

3K-Strahlung elektromagnetische Strahlung, die der thermischen Strahlung eines 3 Kelvin „warmen” Körpers entspricht.

Man hat inzwischen in der 3K-Strahlung winzige Temperatur-Schwankungen entdeckt, die besser zu der extrem inhomogenen Struktur unseres Universums passen als eine absolut homogene Strahlung. Trotzdem ist die Entstehung der extremen Inhomogenität unseres Kosmos (Galaxienhaufen, Galaxien, Sterne) eine der großen ungelösten Fragen der modernen Astronomie.

Massenverteilung

Nach neuesten Messungen zeigt die Anordnung der Galaxien-Superhaufen eine blasenförmige Struktur, d.h. Materieansammlungen sind verbunden mit fadenartigen Gebilden („Filamente”), dazwischen gibt es riesige Leerräume („Voids”). Die dichteren Bereiche haben eine ähnliche Struktur wie die Kanten, die Seifenblasen im Schaum bilden.

Dunkle Materie

Wie schon erwähnt, lassen die Rotationskurven von Galaxien auf die Existenz einer **DUNKLEN MATERIE** schließen, die sich nur durch ihre Gravitationswirkung bemerkbar macht. Ferne Galaxienhaufen zeigen auch Lichtablenkungseffekte („Gravitationslinsen”), die zu stark sind, um durch die „normale” sichtbare Materie erklärt zu werden.

Dunkle Energie

Jüngere Entfernungsmessungen an fernen Galaxien mit Hilfe von Supernovae Typ Ia zeigen, dass unser Raum beschleunigt expandiert, trotz der gravitativen Bremswirkung von baryonischer Materie und dunkler Materie. Niemand weiß, wer oder was diese Anti-Gravitation bewirkt. Man spricht von der **DUNKLEN ENERGIE**.

Größenverhältnisse

Sichtb. Materie : Dunkle Materie : Dunkle Energie

4 : 23 : 73

Zeitstrahl Urknall

Zeit seit dem Urknall	Zustand
Bis $5{,}391 \cdot 10^{-44}$ s	Keine Aussage (Planckzeit)
Ca. 10^{-33} - 10^{-30} s	**Inflation**: Überlichtschnelle Ausdehnung des Universums um einen Volumen-Faktor von etwa 10^{30} - 10^{50} (von der Größe eines Protons auf die Größe eines Fußballs)
Nach 10^{-30} s	Temperatur nur noch 10^{25} K; Entstehung von Quarks und Antiquarks
Nach 10^{-6} s	Temperatur nur noch 10^{13} K; Entstehung der **Hadronen** (die Baryonen Proton und Neutron, aber auch z.B. Mesonen)

Zeit seit dem Urknall	Zustand
Nach 10 s	Temperatur nur noch 10^9 K; Entstehung von Deuterium- und Helium-**Kernen**
Nach 3 Minuten	Keine Fusion von Atomkernen mehr; restliche freie Neutronen (instabil) zerfallen in Protonen und Elektronen (25% He-Kerne, 75% H-Kerne)
Nach 380 000 Jahren	T = 3000 K; H- und He-**Atome** entstehen; Verschwinden der freien Elektronen macht das Weltall für Strahlung „durchsichtig". Diese Strahlung - damals hatte sie ihr Maximum im sichtbaren Bereich - „sehen" wir (extrem rotverschoben) heute als 3K-Strahlung

Zeit seit dem Urknall	Zustand
	Schwerere Elemente bis hin zum Eisen entstehen bekanntlich im Innern sehr massereicher Sterne, Elemente jenseits des Eisens nur bei Supernova-Explosionen
Ab 1 Million Jahre bis 1 Milliarde Jahre	Bildung großräumiger Strukturen (Galaxienhaufen, Galaxien, auch schon massereiche Sterne), initiiert und beschleunigt durch Dichteschwankungen insbesondere der Dunklen Materie

Ergänzungen zur Dunklen Materie

- Sie gibt kein Licht ab.
- Sie besteht teilweise aus **gewöhnlicher** Materie aus Baryonen (Neutronen und Protonen) sowie Leptonen (Elektronen).
- Sie besteht hauptsächlich aus **außergewöhnlicher** Materie (“nicht-baryonisch”, wie z.B. Neutrinos).

Abkürzungen

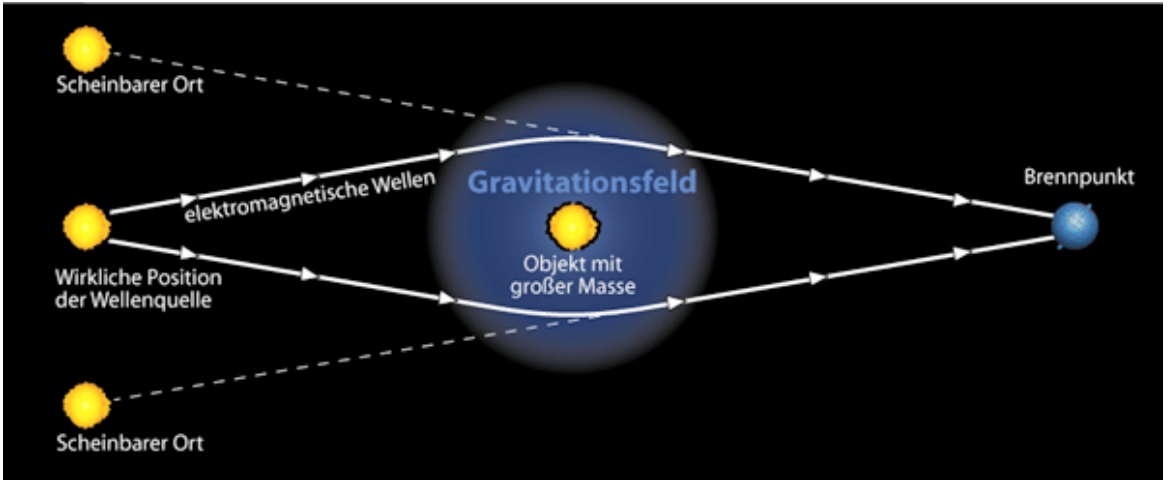
MACHOs	**ma**ssice **c**ompact **h**alo **o**bjects (baryonisch)
WIMPs	**w**eakly **i**nteracting **m**assive **p**articles (hypothetische Objekte aus einer Art langsamer, geklumpter Neutrino-ähnlicher Teilchen. Also nicht-baryonisch)

Auf der Suche I

Zur **baryonischen** Dunklen Materie gehören auch Planeten, Schwarze Löcher, braune Zwerge und verloschene weiße Zwerge. Davon finden sich durchaus einige im Halo der Galaxien - die **MACHO**s. Da man sie nicht sehen kann, entdeckt man sie nur über den Gravitationslinseneffekt.

Die gefundene und dann hochgerechnete Anzahl ist jedoch zu klein um die gesamte Dunkle Materie zu stellen.

Prinzip eine Gravitationslinse:



Quelle: wikipedia [7]

(Mikro-) Linseneffekt, z.B: Aufhellung.

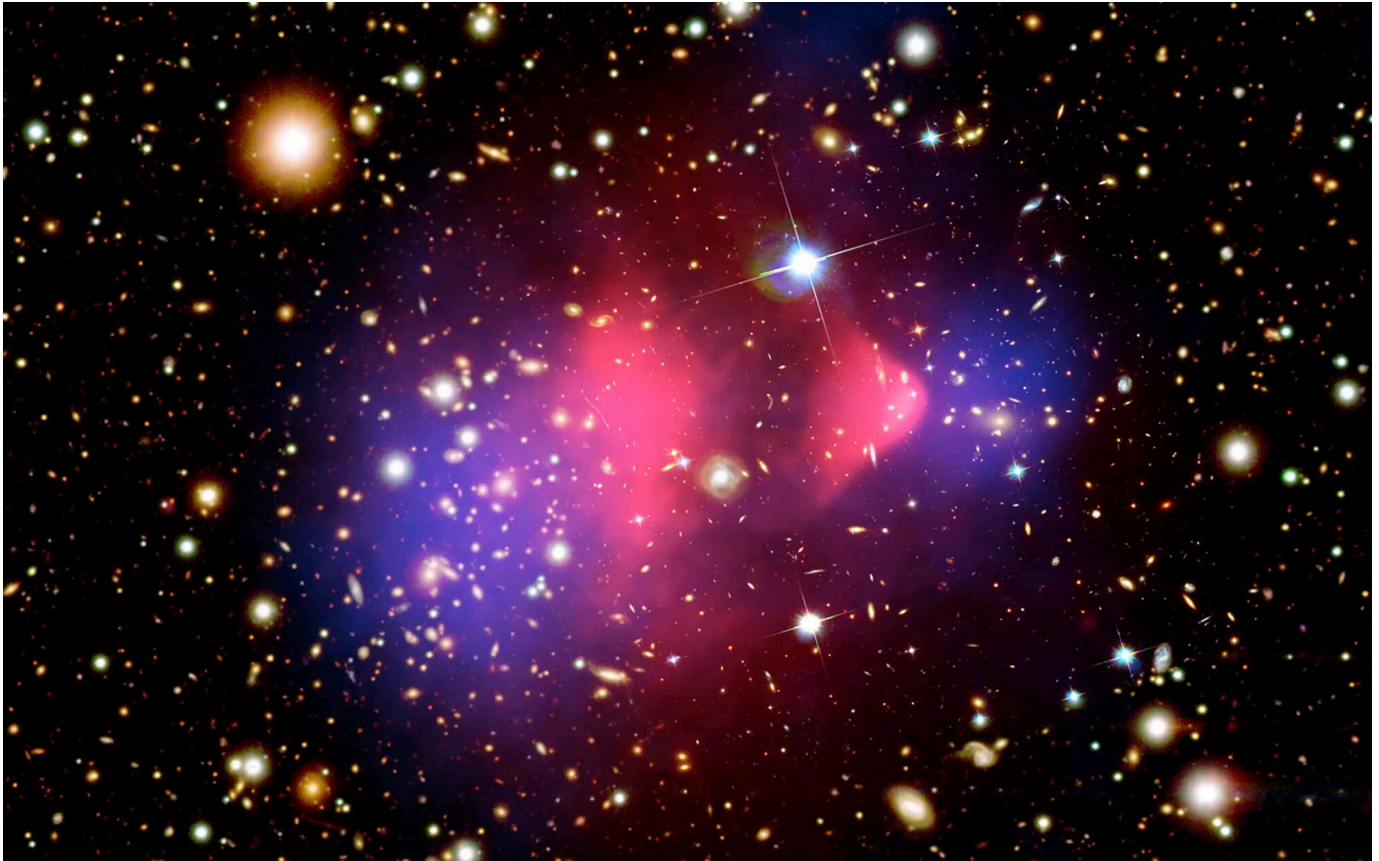
Auf der Suche II

“Bullet Cluster”

Kollisionsfeld zweier Galaxien**haufen**. Jetzt natürlich nach der Kollision zu sehen.
Darin eingefärbte Bereiche:

Blau: Orte starker Gravitation,
Nachweis: Gravitationslinseneffekt

Rot: Orte heißen Gases,
Nachweis: Röntgenstrahlung



Quelle: wikipedia, zugeschnitten [8]

Ergebnis:

- Die Galaxienhaufen enthalten weiter ihre individuelle Dunkle Materie, welche die dominierende Gravitationsquelle darstellt.
- Die Dunkle Materie kollidierte also nicht.
- Die Galaxienhaufen haben das Gas verloren, das nun zwischen ihnen geblieben ist.
- Das Gas hat mehr Masse als alle Sterne der Galaxienhaufen zusammen - ist aber offensichtlich trotzdem nicht primär für die Gravitation verantwortlich.

Bedeutung bei der Entstehung von Sternen und Galaxien

Entstehung dieser Strukturen durch

- Erhöhung der Dichte der normalen Materie,
- Abkühlen (Energieverlust) durch Strahlung
- Kollisionen (Energieumwandlung) -> Akkretionsscheibe.

Nicht-baryonische Dunkle Materie kann nicht strahlen und nicht kollidieren. Daher im gesamten Halo!

Da ihre Masse die der baryonischen Masse deutlich übersteigt: Durch ihre Gravitationskraft maßgeblich an der initialen Bildung beteiligt.

1. EvgeniT, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/wiki/File: Milchstra%C3%9Fe_%C3%BCber_M%C3%B6hnesee_fotografiert_von_der_M%C3%B6hnetalsperre.jpg>↩
2. ©ESA Left: NASA/JPL-Caltech; right: ESA; layout: ESA/ATG medialab , ⇗ https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2016/09/Anatomy_of_the_Milky_Way↩
3. LemonBalmer, CC BY-SA 3.0, ⇗ https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rotation_curve_eqs.jpg↩
4. ThomasK Vbg, CC BY-SA 3.0, ⇗ https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Delta_Cephei_lightcurve.jpg↩
5. Andrew Z. Colvin und Duff06, CC BY-SA 3.0, ⇗ https://de.wikipedia.org/wiki/Virgo-Superhaufen#/media/Datei:6_Virgo-Superhaufen_(beschriftet).png↩
6. "Als Synchrotronstrahlung bezeichnet man die elektromagnetische Strahlung, die tangential zur Bewegungsrichtung geladener Teilchen abgestrahlt wird, wenn diese aus einer geraden Bahn abgelenkt werden. Da die Ablenkung im physikalischen Sinne eine Beschleunigung (Änderung des Geschwindigkeitsvektors) darstellt, handelt es sich um eine besondere Form der Bremsstrahlung. Relevant wird die Synchrotronstrahlung bei relativistischen Geschwindigkeiten der Teilchen nahe der Lichtgeschwindigkeit. Der Name Synchrotronstrahlung rührt von ihrem Auftreten in Synchrotron-Teilchenbeschleunigern her, bei denen Teilchen auf Kreisbahnen auf solche Geschwindigkeiten beschleunigt werden. Heutzutage wird Synchrotronstrahlung vielfach verwendet zur Strukturaufklärung von verschiedensten Materialien. Ein Vorteil gegenüber vielen anderen Methoden ist die hohe Brillanz, mit der diese Strahlung erzeugt werden kann. Synchrotronstrahlung kann auch natürlich im Weltraum bei verschiedensten Prozessen entstehen. Eine natürliche Quelle für Synchrotronstrahlung im All ist z. B. Jupiter, der seine Monde mit dieser Art der Strahlung beschießt." (CC BY-SA, ⇗ https://de.wikipedia.org/wiki/Synchrotronstrahlung)↩
7. Horst Frank, public domain, ⇗ https://de.m.wikipedia.org/wiki/Datei:Gravitationslinse.gif↩
8. NASA-M.Weiss, public domain, ⇗ https://commons.wikimedia.org/wiki/File:1e0657_scale.jpg↩