

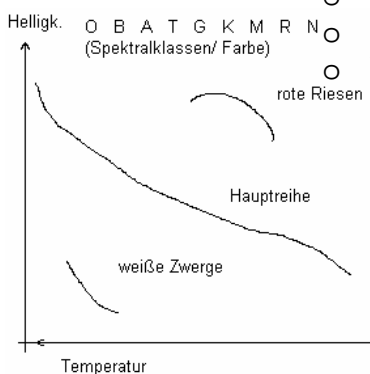
Zusammenfassung Astronomie II

Expansion und Alter des Universums:

- Weltall drifft auseinander: ständige Expansion: Rückrechnung möglich:
 $\tau_{\text{Weltall}}=12\dots20\text{Mrd. Jahre}$ heutige Rechnung: $\tau_{\text{Weltall}}=13.6\text{Mrd. Jahre}$
- Universum sollte homogen isotrop sein („schön verschmiert“)
- Größe: einige Mrd. Lichtjahre, typische Galaxie: 100Mrd Sterne
- Vor Urknall: $T, p \rightarrow \infty$ heute durch Ausdehnung: $T \sim 3\text{K}$
- Urknalltheorie sagt Hintergrundstrahlung und Häufigkeit der Elemente voraus
- Expansion messbar mit dem Dopplereffekt: $\lambda=c/f$ und $\Delta E=h*f$
 - o *Rotverschiebung*: Objekt entfernt sich vom Beobachter
 - $z = (\lambda - \lambda_0)/\lambda = v/c$ mit λ ...gemessene Wellenlänge, λ_0 ...tatsächl. Wellenlänge
 - o *Blauverschiebung*: Objekt bewegt sich auf Beobachter zu
 - o $1\text{pc}=3.26\text{ly}$
- *Hubble-Gesetz*: je weiter eine Galaxie von der Erde entfernt ist, desto höher ist auch die Geschwindigkeit, mit der sie sich von der Erde entfernt ($v \sim \Delta s$)
 - o $v = H_0 * \Delta s$ mit H_0 ...Hubblekonstante, Δs ...Entfernung von der Erde
 - o Abweichungen durch Gravitation
 - o Obere Grenze für das Weltalter = *Hubble-Zeit* H_0^{-1}
- Messungen kosmischer Entfernungen (nötig für Bestimmung der Hubblekonstante)
 - o Methode der *Trigonometrischen Parallaxen*:
 - Kommt ohne weitere Annahme aus
 - Basiert auf Vergleich mit kosmischer „Standardkerze“ (Helligkeitsvergleich theoretisch und tatsächlich ankommend)
 - Problem: Helligkeit nimmt durch Absorption quadr. mit Entfernung ab
 - Scheinbare jährliche Bewegung eines Sternes:
 $1\text{ pc} = \text{Stern hat eine jährliche Parallaxe von } 1''$ ($1\text{pc}=\text{rad}/1''=3\text{E}13\text{km}$)
 - o Weitere Methoden: Cepheid-Variable, Moving Cluster Methode
 - o *Tallye-Fisher Methode*: die 21cm H-Linie bei $f = 1420,4\text{Mhz}$, $\lambda = 21,1\text{cm}$
 - Spontaner Übergang von Spin-up zu Spin-down aller $t \sim 10^7\text{a}$
 - (da aber sehr viel H vorhanden, kommt dies sehr oft vor)
 - Breite der 21cm Linie ist ein Maß für die absolute Helligkeit einer Galaxie
 - o heute ist $H_0 = 70 \pm 7 \text{ km}/(\text{s}*\text{Mpc}) \rightarrow$ Universum ist 12-20Mrd Jahre alt

Das Alter der Welt:

- Methoden zur Bestimmung des Weltalters:
 - o *Kosmische Dynamik*: $t = H_0^{-1}$ (Zeitdimension): obere Grenze für das Weltalter, wenn das Standardmodell zugrunde gelegt wird: z.B. $H_0=75$: $t_H=13\text{E}9\text{a}$
 - o Nukleare Chronometer: langlebige Atomkerne, tw. Halbwertszeiten, wie das Weltalter (z.B. Jod): Messen von Isotopenverhältnissen in Meteoriten
 z.B. $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}=2.5$
 Theorie der Entstehung langlebiger Elemente: nur bei sehr großen Explosionen, wie Supernovae entstehen schwere Elemente
- *Hertzsprung-Russel-Diagramm*
 - o Kugelsternhaufen: Verbund von 100K Sternen, zur selben Zeit aus selber Mat. entstanden
 - o Lage auf der Hauptlinie = $f(\text{Massen})$: Diagramm ist für jeden Sternhaufen erstellbar
 - o Weiße Zwerge $r \sim 6000\text{km}$: sehr heiß, Masse bis 1.4Sonnenmassen
 - Heiß geboren: anschließend Abkühlung, max $14\text{E}9$ Jahre
 - Abkühlrate: Messung der Pulsrate der weißen Zwerge mittels Spektralanalyse
 - Im Spektrum charakteristische Linien abh. Von Temperatur



Das Kosmologische Prinzip und mittlere kosmologische Dichte:

= das Weltall ist homogen und isotrop, wenn die Massen verschmiert werden

= auf großen Längenskalen ist des Universum homogen und isotrop

- größter Hinweis auf Homogenität des Weltalls ist die kosmische Hintergrundstrahlung, da homogene Temperatur
- $v(t) = H(t) * r(t)$ $r(t)$...Abstand -> Abhängig von der Zeit, H...Hubblekonst.
 - o Bedeutung: Dichte des Weltalls sinkt !!
- *Newtonsche Kosmologie*: Bewegung von m im Verhältnis zur Sonne
 - o *Friedmann-Gleichung*: $a^2 = (8\pi G\rho_0 a_0^3)/3a - \kappa c^2$ (3 mgl Fälle für $\kappa \geq 0$)
- *Einsteinsche Kosmologie*: $p = \rho + 3p/c^2$, p...Druck, damit ist Bedeutung von κ anders
- *Hubble Zeit und Weltalter*: $a' = -4/3\pi\rho_0 G a_0^3/a^2$ (Beschleunigung), $a'/a < 0$ (streng negativ)
 - o Damit ist $a(t)$ eine konkave und $t_{\text{Weltall}} < t_{\text{Hubble}}$, Hubblezeit, also Obergrenze Unialter
- *Einsteinsche Gravitationstheorie*: Gravitation als f(Krümmung von Raum und Zeit)
 - o Vgl. Gummimembran mit schweren Kugeln
 - o Erklärung, dass Licht von der Sonne abgelenkt wird, Periheldrehung des Merkur
 - o *Dichteparameter Ω* : $\Omega > 1$...Weltall geschlossen, $\Omega = 1$...flach $\Omega < 1$...offen (Sattel)
 - für $\Omega > 1$: sphärisch: $a(t)$ =Urknall mit $a(t)=0$, dann max. Volumen (kritische Dichte), dann Zusammenfall des Universums und Kollaps: „Big Crunch“
 - wenn $\kappa=0$: $\rho_0 = 3/8\pi G*(a/a)^2$, dann $\rho = 10^{-29}(H_0/75) \text{ g/cm}^3$ -> wenn Dichte des Universums kleiner als kritische Dichte ($10xH$ pro cm^3): Kollaps des Universums

Problem der kosmischen Dichte:

- sichtbare Materie (leuchtend) + dunkle Materie (baryonisch+nichtbary.)
- Sichtbare Materie: Vorstellung gut machbar, DeepField Aufnahmen mit Hubbleteleskop
 - o Daraus Massen aus empirischen Leuchtkraftbeziehungen und Eintrag in Hubble-Diagramm für große Werte von $z = \Delta\lambda/\lambda$, $q_0 < 0.07$...Verzögerungsparameter
 - o Aus Galaxien, Galaxienhaufen
- Hinweise auf *dunkle Materie* seit 1933 durch Fritz Zwicky am Virgo Haufen:
 - o $v^2 = G*M/R$ G...Gravkonst, M...Körpermasse, R...Entferng. von Körper
 - o jede Spiralgalaxie ist von einem dunklem Halo umgeben (bis jetzt unbekannt)
 - könnte sein: nichtbaryonische Materie: Neutrinos (schwach wechselwirkende massive Teilchen) = WIMPs, magnetische Monopole, schwarze Löcher
 - baryonische Materie: der Massenanteil von He4, H2, He3, Li7 kann kaum berechnet und gemessen werden (innerhalb ersten 3min nach Urknall entstanden) -> $0.01 < \Omega(\text{Dichteparameter}) < 0.06$
 - Theoretiker hätten gern $\Omega=1$ (aus Modellen für Urknallmodellen, Galaxienentstehung, geringen Dichteschwankungen)
 - o damit Nachweis der dunklen Materie mittels Gravitationslinseneffekt:
 - zu jedem Zeitpunkt einen Stern außerhalb der Milchstraße beobachten: wenn Halo vorbei zieht, kann man Stern 2fach beobachten
- *Problem der dunklen Energie*: verläuft die Expansion des Universums beschleunigt?
 - o Entfernte Supernovae Typ1=gute Standardkerzen, leuchten aber schwächer als erwartet
 - o Moderne Physik: Vakuum hat eine von 0 verschiedene Energiedichte
 - =repulsives Vakuum, also Beschleunigte Expansions
- *der Casimir-Effekt*: 2 Platten als Randbedingung für Wellen im Vakuum (keine Teilchen vorhanden) -> außerhalb der Platten andere Wellen (höhere Energien)
- *Konkordanzmodell*: Weltall ist annähernd flach ($\Omega=1$) und expandiert bis in alle Zukunft, sichtbare Materie wird immer weiter rotverschoben und verschwindet hinter einem Horizont
- Endet das All das in einem Leeretod???

Kosmische Hintergrundstrahlung:

- Annahme: zu früheren Zeitpunkten war Materie und Strahlung im thermodynamischen Gleichgewicht
- 1. HS: $dE = -p * dV$ mit $p = p_s = 1/3 * \epsilon_{\text{Strahlung}}$ mit $\epsilon_{\text{Strahlung}} = T^4$, $\epsilon_{\text{Materie}} = n * k_B * T$
- $T \sim 1/a \rightarrow$ am Anfang ($a \rightarrow 0$) muß Universum sehr heiß gewesen sein, heute ca. 3K
- Experimente WMAP zeigten: 4% leuchtende Mat, 23% dunkle, 73% Vakuum, $\Omega=1$, Weltalter 13,7Mrd Jahre und die ersten Sterne entstanden bereits 200Mio Jahre nach dem Urknall

Galaxien und Geburt der Sterne:

- Entstehung der Materie: in „normalen“ Sternen Fusion von H bis Fe, schwerere Elemente gebildet durch Explosion massereicher Sterne: Supernovae Typ II
- durch relativ einfache Beobachtungen verschiedener Spektralbereiche sind Gegenden von Sterngeburten zu sehen: Fe/H – Verhältnis = kosmische Uhr
- Modell des doppelten Gaseinfall: Zustrom neuen Gases in Galaxie wahrscheinlich noch nicht beendet: Zentrum einer Spiralgalaxie: Spiralarms aus gleichen Sternen und damit Dichtewelle um das Galaktische Zentrum und Anlass zur Entstehung neuer Sterne
- Hertzsprung-Russel-Diagramm: *Spektralklassen (OhBeAFineGirlKissMe)* Sonne=G, Temp↓
 - o Farbe hängt von Temperatur ab, jede Klasse hat charakteristische Eigenschaften
 - o Helligkeit m der Sterne in 5 Größenklassen mit Unterschied Faktor 100 der scheinbaren Helligkeit $m_1 - m_2 = -2.5 * \lg(I_1/I_2)$, Zusammenhang abs. Helligkeit M, scheinbare Helligkeit m und Entfernung r in pc: $M = m + 2.5 * \lg(10/r^2) = m + 5 - 5 * \lg r$
 - o Masse-Radius-Temp-Leuchtkraftbeziehung: Radius=const.: $L \sim T^4$, Temp. Bzw. Leuchtkraft=const.: $T \sim R^2$, damit ist auch $L \sim R^2$

Sternentstehung:

- Auslösung vermutlich durch Dichtewellen \rightarrow junge Sterne in den Spiralarms: Supernovae ---- \rightarrow Schockwelle \rightarrow Sternentstehung
- Sternbildung in offenen Sternhaufen typ. 100-1000Sterne
- Interstellare Gaswolke kontrahiert, wenn Gravitation > Gasdruck
- *Jeans-Kriterium*: $M > M_J = 3 * 10^4 * \sqrt{T^3/n} * M_{\text{Sonne}}$ mit T in K, Dichte n in Atomen/m³
- Ablauf: Anfangsausdehnung ca. 10pc \rightarrow Gravitationsenergie wird abgestrahlt, da optisch dünn \rightarrow keine Aufheizung \rightarrow Dichte nimmt zu \rightarrow M_J nimmt ab \rightarrow Wolke zerfällt in Teile die unabhängig kontrahieren \rightarrow Dichte nimmt weiter zu usw.: Dieser Prozess endet, wenn Dichte der Einzelfragmente so groß ist, dass sie optisch dick werden \rightarrow Gravitationsenergie kann nicht mehr durch Strahlung weggeschafft werden \rightarrow Temperatur und M_J steigen \rightarrow keine weitere Fragmentation, Druck steigt und Kontraktion kommt zum Stillstand \rightarrow Protosternentstehung
- *Protostern* hauptsächlich aus H₂, Temperatur < 1800K, T>1800K: H₂ \rightarrow H+H erfordert Energie, Temperatur und Druck steigen langsamer an \rightarrow Kontraktion nimmt zu \rightarrow T>10⁴K: H \rightarrow H⁺+e⁻ erfordert Energie s.o., bei 10⁵K alles Ionisiert \rightarrow Stern bildet hydrostat. Gleichgewicht
- Protostern ist kühl und schwach: im HRD unten rechts \rightarrow wandert in der Kontraktionsphase auf der Hauptlinie im HRD und erreicht je nach Masse einen Punkt auf der *Hayashi-Linie* (Linie der vollständig konvektiven Sterne)

Woher kommt die Energie der Sonne?

- gravitive Energie liefert Leuchtkraft nur für ca. 0.5h, Wärmeenergie für ca. 20Mio Jahre
- *thermonukleare Fusionsenergie*: 10% der Gesamtmasse kann an Wasserstoff zu He fusioniert werden, H-Fusion setzt 0.7% der Ruhemasse in Energie (*Massendefekt*) um und kann mehr als 10Mrd Jahre die Sonnenenergie liefern, danach andere Prozesse: auch Fusion bis Fe
- *Proton-Proton-Kette*: $^1\text{H} + ^1\text{H} \rightarrow ^2\text{H} + e^+ + \nu_e$ alle 10¹⁰ Jahre in der Sonne
- Energietransport vom Inneren zum Äußeren der Sonne durch: Strahlungstransport, Konvektion

Tod der Sterne:

- Lebensdauer eines Sterns hängt hauptsächlich mit seiner Masse zusammen: je größer seine Masse, desto kürzer ist seine Embryonalphase und seine Lebensdauer
- $>20M_{\text{Sonne}}$: Neutronenstern mit Neutrinokühlung und Stoßweiterleitung: schwarzes Loch
- $>18M_{\text{Sonne}}$: Fe zu groß, Schockwelle, Stoßweiterleitung, Explosion des Sterns
- $12-18M_{\text{Sonne}}$: Fe klein, Schockwelle führt zu Explosion
- $<15M_{\text{Sonne}}$: heißer Neutronenstern
- Wenn geringe Masse: friedlicher Tod: Aufblähen \rightarrow Roter Riese und Abschleudern der äußeren Hülle \rightarrow dann weißer Zwerg
- Endstadium eines Sterns als weißer Zwerg mit $r=6000\text{km}$ und Dichte ca. 1t/cm^3
- Sonne fällt wegen des Wärmedruckes nicht zusammen
- Bei entarteter Materie, z.B. weißer Zwerg, wird Druck nicht mehr durch die Wärme aufgebaut
- Weiße Zwerge werden durch den *FERMI-Druck* stabilisiert
- Kollaps und *Chandrasekhar-Masse*: falls Masse des Fe-Kerns $>$ als Chandrasekhar-Masse ($\sim 1.4M_{\text{Sonne}}$): Kollaps des Sterns aus dem Inneren heraus mittels Schockwelle
- $m_{\text{krit}}=1.6m_{\text{Sonne}}$ \rightarrow Chandrasekhar – Masse stellt Obergrenze für jeden kalten Stern dar, wenn die Masse größer ist, entsteht schwarzes Loch
- wenn hohe Masse: *Supernovae*: eine Supernovae kann so hell wie 10^{11} Sonnen sein
 - o Unterteilung in Klassen je nach H oder kein H, z.B. Ia thermonukleare Explosion eines weißen Zwerges ohne Überreste, Ib/Ic/II Kernkollaps, Neutronenstern, schwarzes Loch

Neutronensterne und Schwarze Löcher:

- *Neutronensterne*: Radius ca. 10km , Masse: M_{Sonne} , Dichte 10^8t/cm^3 (nahezu Atomkerndichte)
 - o Zeigen sich als Röntgenpulsare oder Radiopulsare (haben keine Begleiter)
 - *Radiopulsare*: Neutronensterne weisen riesiges Magnetfeld in Form eines Dipols auf: Abstrahlung in Richtung der magnetischen Dipolachse, Rotation bis zum $1000/\text{s}$, Aufgrund von hoher elektrischer Spannung bis zu 10^{12}V zwischen Äquator und Pol werden Teilchen weggeschleudert
 - *Röntgenpulsare*: Bsp: Hercules X1, Röntgenpulse im Abstand von 1.24s , alle 1.7d fällt Röntgenfluß für $5,7\text{h}$ aus \rightarrow Hinweis, dass Neutronenstern um einen „normalen“ Stern herum läuft, Aus der „accretion-disc“ fallen Teilchen mit 40% der Lichtgeschwindigkeit auf den Neutronenstern \rightarrow riesige Röntgenquelle beim Abbremsen ($T=10^8\text{K}$, 10^{30}W)
- Schwarze Löcher: 1799 Laplace: Beweis, dass attraktive Kraft eines Himmelskörpers so groß sein kann, das Licht von jenem nicht mehr entweichen kann
 - o *Schwarzschildradius*: $r_s = 2G \cdot M / c^2 = 3\text{km} (M/M_{\text{Sonne}}) \rightarrow$ ein stationäres schwarzes Loch wird eindeutig durch nur 3 Parameter charakterisiert (Masse M , Ladung Q , Drehimpuls L)
 - o Theorie isolierter schwarzer Löcher: Ereignishorizont: Fläche unendlicher Rotverschiebung, bei Sternenkollaps $R \rightarrow r_s$ nur für $t \rightarrow \infty$ „frozen star“, Gezeitenkräfte $\rightarrow \infty$; Lebensdauer, wenn r_s erreicht: $\tau_{\text{max}} = 1.54 \cdot 10^{-5} \text{s} \cdot (M/M_{\text{Sonne}})$, bevor man Singularität bei $r = 0$ erreicht
 - o Entropie im Schwarzen Loch nimmt bis zum unendlichen zu
- QSO's = Quasistellare Objekte mit großer Rotverschiebung, sehr Hell, kleine Ausdehnung, v bis zu $0.9c$

Das Ende der Welt: „Big-Crunch“

- *2E10a vor BC*: heutiger Wert der Energiedichte; *1E6a vor BC*: Dissoziation von H_2 ; *1a vor BC*: Aufbrechen der Sterne; *3min vor BC*: Supermassive SL vereinigen sich, *BC*: Tod des einzigen SL
- *noch 1E14a*: Sterne haben keinen Brennstoff mehr; *1E17a*: Verlust von Planeten in Sonnensystemen; *1E18a*: Sterne Tod+Auflösung der Galaxien; *1E33a*: Universum besteht aus SL, e^- , e^+ , γ ; *1E108a*: SL von sagenhaften Massen verdampfen: e^+ und e^- Plasmen dominieren