

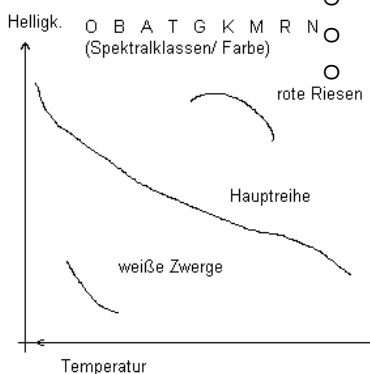
# Zusammenfassung Astronomie II

## 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  $\lambda$ ...gemessene Wellenlänge,  $\lambda_0$ ...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,  $\Delta s$ ...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 Sternenhaufen 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  $\kappa$  anders
- *Hubble Zeit und Weltalter*:  $a^{\cdot} = -4/3\pi\rho_0 G a_0^3/a^2$  (Beschleunigung),  $a^{\cdot}/a < 0$  (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  $\Omega$* :  $\Omega > 1$ ...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  $\text{cm}^3$ ): 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:  $dE = -p \cdot dV$  mit  $p = p_s = 1/3 \cdot \epsilon_{\text{Strahlung}}$  mit  $\epsilon_{\text{Strahlung}} = T^4$ ,  $\epsilon_{\text{Materie}} = n \cdot k_B \cdot T$
- $T \sim 1/a \rightarrow$  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  $m_1 - m_2 = -2.5 \cdot \lg(I_1/I_2)$ , Zusammenhang abs. Helligkeit M, scheinbare Helligkeit m und Entfernung r in pc:  $M = m + 2.5 \cdot \lg(10/r^2) = m + 5 - 5 \cdot \lg r$
  - 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*:  $M > M_J = 3 \cdot 10^4 \cdot \sqrt{T^3/n} \cdot M_{\text{Sonne}}$  mit T in K, Dichte n in Atomen/m<sup>3</sup>
- 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 H<sub>2</sub>, Temperatur < 1800K, T>1800K: H<sub>2</sub> $\rightarrow$ H+H erfordert Energie, Temperatur und Druck steigen langsamer an  $\rightarrow$  Kontraktion nimmt zu  $\rightarrow$  T>10<sup>4</sup>K: H $\rightarrow$ H<sup>+</sup>+e<sup>-</sup> erfordert Energie s.o., bei 10<sup>5</sup>K 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 10<sup>10</sup> 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.  $1\text{t/cm}^3$
- 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.  $10\text{km}$ , Masse:  $M_{\text{Sonne}}$ , Dichte  $10^8\text{t/cm}^3$  (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  $10^{12}\text{V}$  zwischen Äquator und Pol werden Teilchen weggeschleudert
    - *Röntgenpulsare*: Bsp: Hercules X1, Röntgenpulse im Abstand von  $1.24\text{s}$ , alle  $1.7\text{d}$  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 ( $T=10^8\text{K}$ ,  $10^{30}\text{W}$ )
- 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  $\text{H}_2$ ; *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,  $e^-$ ,  $e^+$ ,  $\gamma$ ; *1E108a*: SL von sagenhaften Massen verdampfen:  $e^+$  und  $e^-$  Plasmen dominieren