

→ minél nagyobb a galaxis centrális dudája,
annál nagyobb a középső ellipt. sz. m. h.
=> együtt alakulhattak ki
ha a fotonde kömgomide az összes foton
leáll a csillagképződés, de nem is ut
vább a centr. dudor sem.

- üregek (gravities): részecskéi kömgom-
jok a forró gáz a körből
- a jétek nem hagyják, hogy kifújják a
forró gáz, mert turbulenciát hoz-
nak, ezzel energiát táplálnak bele

x1.05. csillagok szerkezete

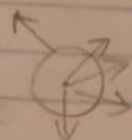
$$M_{\odot} = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$$

$$R_{\odot} = 696000 \text{ km}$$

$$AU = 150 \cdot 10^6 \text{ km}$$

$$L_{\odot} = 2 \cdot 10^{33} \frac{\text{erg}}{\text{sec}} = 4\pi r^2 F$$

(luminositás)



$L \rightarrow$ energiafluxus

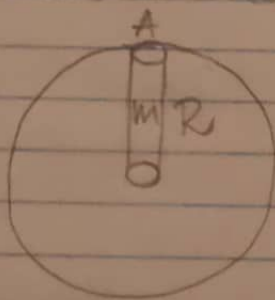
$$F = \sigma T^4$$

$$T = 5800 \text{ K}$$

$\frac{\text{J}}{\text{m}^2 \text{ s}}$

(feladni, a belső fúzióhoz sokkal
magasabb T kell, nem látjuk
a Nap belső szerkezetét)

diffúzióval jut ki a foton,
mindig szóródik, feloszlal
hőm. i egyensúly a felszín-foton közt



$$M = \rho A R$$

$$F = \frac{GMm}{R^2} = \frac{G\rho A R M}{R^2}$$

$$P = \frac{F}{A} = \frac{G\rho M}{R} \equiv nkT \text{ gáznyomás}$$

$L \rightarrow$ számcsinálás

$$n = \frac{\rho}{m_p}$$

$$T = \frac{GM_p}{kR} = 23 \cdot 10^6 \text{ K}$$

15.10⁶ K korrekció

de! elhanyagoltuk a sugárzás nyomását

$$p = nkT + \frac{a}{3} T^4$$

$$a = \frac{4\sigma_{SB}}{c}$$

sugárzási konstans

kisebb csillagokban: gáz nyomása dominál
nagyobbakban: foton nyomása

fotonok: véletlen bolyongás a csill. belsejében

l: közepes szabad úthossz $l = \frac{1}{n\sigma}$

sűrűség $\rightarrow$ hatáskeresztmetszet

$$N_{\text{fotó}} = \left(\frac{R}{l}\right)^3$$

$$t = \frac{l}{c} N_{\text{fotó}} = \frac{l}{c} \frac{R^3}{l^3} = \frac{R^3}{c l^2} = \frac{R^3}{c} \frac{1}{l^2}$$

energiasűr.

kijutás ideje

$$L = \frac{E}{t} = \frac{\sigma T^4 R^3}{\frac{R^3}{c l^2}} = \frac{c \sigma T^4 R^3}{1} =$$

$$= \frac{c \sigma}{\sigma} \frac{GM_p^5 R^4}{k^4 R^4 M} = \frac{c \sigma}{k^4} \frac{GM_p^5}{M^3}$$

σ : Thomson-hatáskeresztmetszet

Általános egyenletek

- gömbszimmetrikus

99%-a 10⁻⁵ pontossággal
1% akkréciós környék

- r és t fv.-e

- ρ sűrűség

- T hőmérséklet

- X_i kémiai összetétel, ahol $i=1,2,3,\dots$

minden termodinamikai mennyiség
(ρ, T, X_i) fv.-e

$\rho(\rho, T, x_i)$
 $u(\rho, T, x_i)$ energia térfogati sűrűség
 $s(\rho, T, x_i)$ entropia tömegsűrűség
 $\lambda(\rho, T, x_i)$ hővezető képesség-térf. sűrűség
 $\varepsilon(\rho, T, x_i)$ hőforrás
 $\mathbf{F}$ hőfluxus

termo 1. főtétel $\rho T \frac{ds}{dt} = \rho \varepsilon - \text{div} \mathbf{F}$
 // kont. egy. $\mathbf{F} = -\lambda \nabla T$

Navier-Stokes $\frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} + \frac{1}{\rho} \nabla p + \nabla V = 0$
 $\hookrightarrow$ potenciál

Poisson $\nabla^2 V = 4\pi G \rho$

$\frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial \mathbf{r}} + \frac{\partial V}{\partial \mathbf{r}} = 0$

$t = \text{all.}$ fix időben (azért nem $\frac{dp}{dt}$)

$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \frac{\partial V}{\partial r}) = 4\pi G \rho$

$\mathbf{F} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial \mathbf{r}}$

$\rho T \frac{ds}{dt} = \rho \varepsilon - \frac{\partial (r^2 \mathbf{F})}{\partial r} \frac{1}{r^2}$

$M_r = \int_0^r 4\pi r'^2 \rho dr' = M(r < r)$ új változó
 a tömeg függése

r -nél kisebb sugár rész tömege
 $r(M_r)$: tömegfüggő sugár

$\frac{\partial M_r}{\partial r} = 4\pi r^2 \rho$ $\frac{\partial r}{\partial M_r} = \frac{1}{4\pi r^2 \rho}$

$\frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial M_r}{\partial t} \frac{\partial}{\partial M_r}$ (differenciál)
 új deriv. bevezetése

$$\frac{d^2 r}{dt^2} + \left[\frac{1}{8} 4\pi r^2 g \frac{\partial}{\partial M_r} p + \frac{GM_r}{r^2} \right] = 0 \quad \left| \frac{\partial p}{\partial M_r} = -\frac{GM_r}{4\pi r^4} \right.$$

$$L_r = 4\pi r^2 F \quad \text{fluxus helyett, luminó-
zitásra való áttérde}$$

$$L = -4\pi r^2 \lambda \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$4\pi g T \frac{ds}{dt} = 4\pi g E - \frac{\partial(r^2 T)}{\partial r} 4\pi \frac{1}{r^2}$$

$$\frac{\partial L_r}{\partial t} = 4\pi g E - 4\pi g T \frac{ds}{dt}$$

$$4\pi r^2 g \frac{\partial L_r}{\partial M_r} = 4\pi r^2 g E - 4\pi r^2 g T \frac{ds}{dt}$$

$$\boxed{\frac{\partial L_r}{\partial M_r} = E - T \frac{ds}{dt}}$$

peremfeltételek $r(0)=0$ $M_r=0$ $L_r=0$, $p(r)=p_c$, $T(r)=T_c$
 $M_R=M$ $L_R=L$, $g(r=R)=0$, $T(R)=T_0$

hidrosztatikai egyensúly $\frac{dr}{dt}=0$
 lokális termikus egyensúly $\frac{ds}{dt}=0$

$E \sim T^4$ kis tömegű csillag
 $\sim T^{17}$ nagy tömeg esetén

$$E \sim \frac{T^4}{\rho^2 \mu^2} \quad \text{CNO ciklus}$$

(log-log skála)

optikai mélység

$$\tau = \int \kappa \rho dx$$

$$\lambda = \frac{4acT^3}{3gK}$$

$$\hookrightarrow \text{opacitás } I(x) = I_0 e^{-\kappa \rho x}$$

állandó opacitási közeg-
 ben (egy csőben a
 fényintenzitás)

$$\frac{dI(x)}{dx} = -I \cdot \kappa \rho$$

$$K = \frac{5\pi h}{m_p} \quad \text{elektronstörés}$$

nagy hőm., ionizált közeg

$$\text{Kramer-opacitás: } K = K_0 g T^{-3.5}$$

adiabátikus törlítés: $p = K \rho^{\gamma}$ $\gamma = 5/3$

$$\frac{\partial p}{\partial M} = - \frac{GM}{4\pi R^4}$$

$$\frac{4}{3} K \rho^{\frac{1}{3}} \frac{\partial \rho}{\partial M} = - \frac{GM}{4\pi R^4}$$

$$\rho(M) \sim \rho_0 \left(\frac{M}{M_0} \right)^a$$

1.12. Csillagok szerkezete - nukleoszintézis

Napsütés - Miert fogyni el?

→ grav. kontrakció (összehúzódás) X

$$\frac{E}{t} = L_{\odot} = 3.8 \cdot 10^{26} \text{ W}$$

$$E = \frac{GM^2}{r} \quad t = \frac{GM^2}{r L_{\odot}} = \frac{6.6 \cdot 10^{24} \cdot (2 \cdot 10^{30})^2}{0.7 \cdot 10^9 \cdot 3.8 \cdot 10^{26}} = \frac{6.6 \cdot 2^2}{1.5 \cdot 3.8} \cdot 10^{16-9-26} = 10^{15} \text{ s} = 10^8 \text{ yr}$$

nem lehet, már elfogyt volna

→ kémiai reakciók → 10^4 eV X

→ nukleoszint. ✓ - 10^{15} eV

$p^+ - p^+$ találkozás

H → He { CNO-ciklus → nehéz csillagokban
Triple-Alpha process

→ spektrum

→ nuclear fusion → csak a belső 10%-a a Nap tömegének

$$M = N \cdot 4 m_p$$

$$E = N (m_{\text{He}} - m_p) c^2$$

$$t = \frac{E}{L_{\odot}} = \frac{M_0 \left(\frac{m_{\text{He}} - m_p}{m_p} \right)}{L_{\odot}}$$

$\rightarrow p^+ - p^+ \rightarrow$ plazma állapotban
 $\hookrightarrow$ le kell győzni a Coulomb-erőt
 $\hookrightarrow$ magas hőm. p.

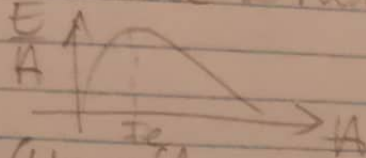
vannak legnagyobb kötési energiája, addig
 volt kevés kérejművi csillagok belsőjében
 az anyag; a fölött szupernovamutatók /
 néhány csillagok ütközése során.

$H = 71\%$

$He = 27\%$

$Z = 2\%$

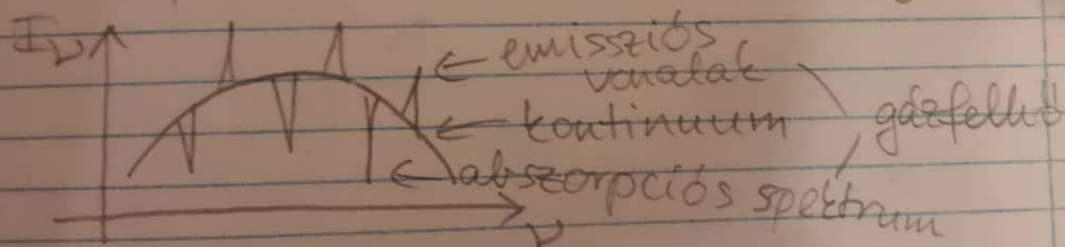
"fém" (He-nál nagyobb tömegszámú anyag)
 "minden más"



hőm. sug. $hf = kT$

$\lambda = \frac{c}{f}$

Stefan-Boltzmann $L_{\odot} = \sigma T^4 4\pi R^2 \Rightarrow R_{\odot}$
 Wien-féle eltolódási tv. $\lambda_{max} = \frac{b}{T}$



gázfelhő: - látszó, kevés szóródás
 - meleg: emissziós
 - hideg: abszorpciós

Hydrogen series

$\rightarrow n=1$ -re $\left. \begin{matrix} 2\text{-ről } \alpha \\ 3\text{-ról } \beta \\ 4\text{-ról } \gamma \end{matrix} \right\}$ Lyman-sorozat

$\rightarrow n=2$ Balmer
 $\rightarrow n=3$ Paschen
 $\rightarrow n=4$ Brackett
 $\rightarrow n=5$ Pfund

ha ezek a sugárzások eltolódtak sárga
vörös (Lyman-sorozat pl. vörös), az UV-tól is
hátrébb tartományba kerül

tömeg szerinti klasszifikáció

O	>30
B	5
A	7-2
F	
G	1
K	
M	L
R, N, S	

színképosztály

a hirtelen belül

1-től 10-ig

↑

↑

fényselejt gyengül

On Be A Fine Girl, Kiss Me
Guy

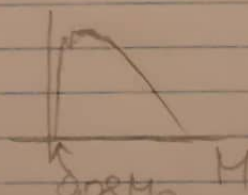
My Lips
Right
Now
Sweetie

$$\frac{dN}{dM} \propto M^{-2.35}$$

$$L \propto M^{3.5}$$

$$t \sim \frac{M}{L} \sim M^{-2.5}$$

ez alatt nem sugároz
barna törpe

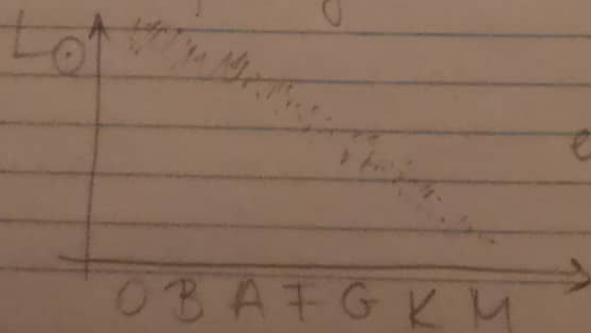


Hőmérsékletmérés: spektrumvonalak

a spektrum hőmérséklet függő

az absz. vonalak alatti terület lényegesen

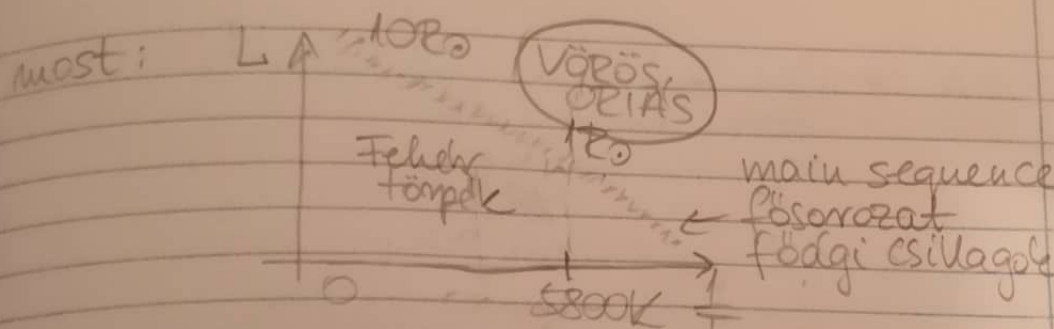
Hertzsprung-Russell-diagram



eredetileg

$$\frac{M}{M_{\odot}} = 10$$

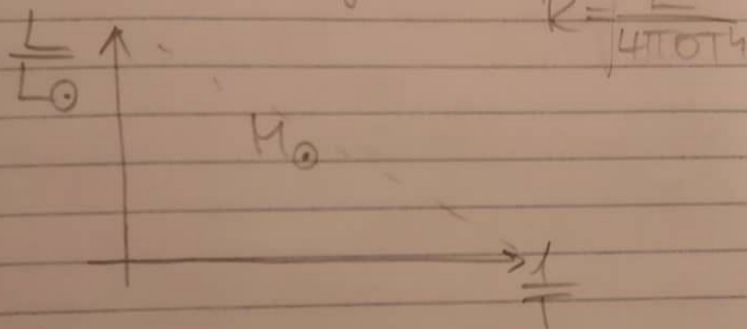
$$\ln R = \frac{1}{2} \ln$$



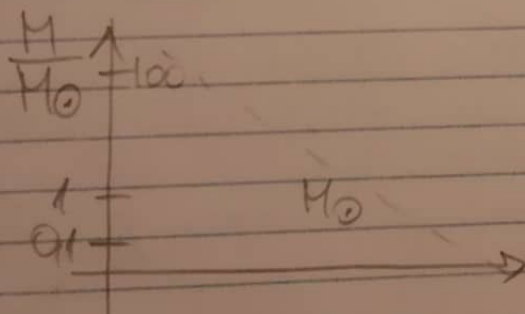
M : magnitudo $M \sim \log L$

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

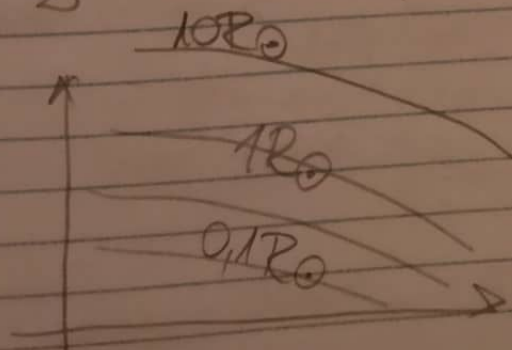
csak kettős csillagok



$$R = \sqrt{\frac{L}{4\pi\sigma T^4}}$$

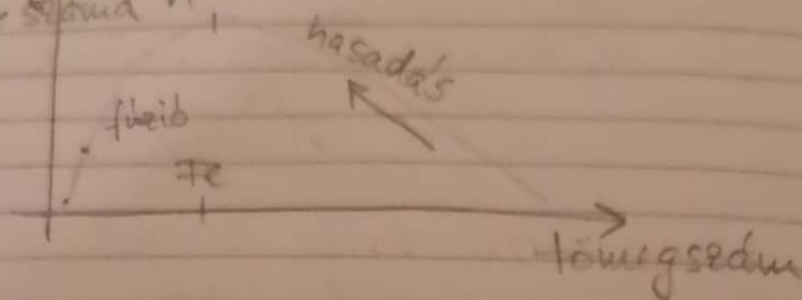


$$\ln R = \frac{1}{2} \ln L + 2 \ln \frac{1}{T} - \text{konst.}$$



XI.19.

lőési energia E
 nukleonszám N



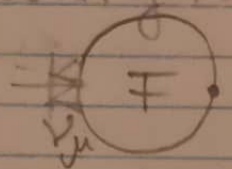
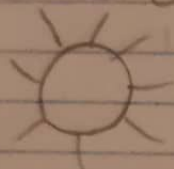
Nap neutrínó probléma

Davis 1960

$\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau \rightarrow$ képesek egymásba alakulni

1998 Kamiokanda

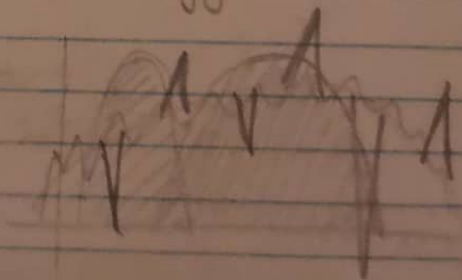
2002 Sudbury Neutrino Observatory



péntek 11:00 1003
 Carol Mundell

Csillagok születése és halála

$0,08 M_\odot < M < 100 M_\odot$ csillagok tömege,
 ez alatt nem tud "begyulladni"
 HR-diagram



konvergen-
 cia egy-
 massza

szinkronizáció OBAFGKM
 szín(index)

$\rightarrow$ lum. két szűrővel és a
 kettő különbsége

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

$$R \sim \frac{1}{T^2} \quad L = \text{dtt. eseten}$$

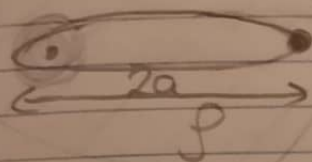
Csill. keletke.

- nagy sűrűség kell, különben nem lehet.
- de hogyan tud sűrűsödni?
- sugárzás miatt; kontrakció
- először hűl.
- hi molekula

→ krit. tömeg felett grav. miatt összenylik a vegülér (Jeans-tömeg)

→ időskála

- gravitációs dinamikai ~
- fénnyel / hang-áthaladási ~



mennyi idő alatt esik bele?
 → ellipszoid ell. pálya
 → Kepler-törvények

grav.

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{r^3}{GM}} \quad M = \rho r^3$$

$$\omega^2 r = \frac{v^2}{r} = \frac{GM}{r^2} = \sqrt{\frac{r^3}{G\rho r^3}} = \frac{1}{\sqrt{G\rho}}$$

$$v = \omega r$$

hangseb. $mc_s^2 = kT$

$$p = \frac{\rho}{m} kT$$

$$c_s = \sqrt{\frac{kT}{m}} = \frac{dp}{d\rho} = \sqrt{\frac{p}{\rho}} \quad \frac{\rho}{m}: \text{számsűrűség}$$

grav. instabilitás: Jeans-hossz

$$\frac{1}{\sqrt{G\rho}} < \frac{r}{c_s} \quad r = \frac{c_s}{\sqrt{G\rho}} = \sqrt{\frac{kT}{Gm\rho}}$$

$$M = \rho r^3 = \frac{c_s^3}{G^{3/2} \rho^{1/2}} = \frac{k^{3/2} T^{3/2}}{m^{3/2} G^{3/2} \rho^{1/2}}$$

mai álláspont:

minden csillag csillaghalázból keletkezett; csak nem tudjuk, hogy melyikorában

keletke. után kölcsönhatnak egymással és kilökdösi egymást a halmazból

→

→ az anyag az űrben ionizált
 Big Bang: ionizált
 utána rekombinálódás, semleges
 atomok, molekulák létrejötte
 most: megint ion.

csillagklaszterek instabilak → sötét anyag bennük
 gömbhaluak: nagyon nagy cs. klaszterek
 nyílt haluak → ~100 millió

→ az evap. időskála lehet hosszabb,
 mint az univerzum élettartama

$$T = \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{-2.5} 10 \text{ Gyr} \quad L \sim M^{-3.5}$$

élettartam
 mennyi idő alatt
 ég fel az összes
 tartalmát

$\frac{Mc^2}{L}$

csillagköd → ha $8 M_{\odot}$ -nál nagyobb tömegű
 a csillag, akkor szupernovárobbanás
 $1.4 M_{\odot}$ Chandrasekhar-tömeg:
 degenerációs nyomás tart ellent

egy új ötlet: két fehér törpe frontális
 ütközése adja az egyik típust
 (Ch.-tömeges) szupernórákat.