

Zvaigznes: fenomenoloģija

Astronomija un astrofizika, kurss 3F studentiem, 2009

Ilgonis Vilks un Dmitrijs Docenko

October 18, 2009

Lekcijas plāns

- 1 Zvaigžņlielumi
 - Redzamais un absolūts zvaigžņlielums
 - Krāsu indeksi
 - Starpzvaigžņu absorbcija
- 2 Harvarda spektrālā klasifikācija
- 3 Hercšprunga-Rasela diagramma
- 4 Zvaigžņu spektru interpretācija: pamati
 - Starojuma pārnese
 - Gravitācijas paātrinājums un auguma līkne
- 5 Galvenie zvaigžņu parametri
 - Zvaigžņu rādiusi un masas
 - Sakarības starp M , L un T
 - Ķīmisko elementu daudzums

Outline

- 1 Zvaigžņlielumi
 - Redzamais un absolūts zvaigžņlielums
 - Krāsu indeksi
 - Starpzvaigžņu absorbcija
- 2 Harvarda spektrālā klasifikācija
- 3 Hercšprunga-Rasela diagramma
- 4 Zvaigžņu spektru interpretācija: pamati
 - Starojuma pārnese
 - Gravitācijas paātrinājums un auguma līkne
- 5 Galvenie zvaigžņu parametri
 - Zvaigžņu rādiusi un masas
 - Sakarības starp M , L un T
 - Ķīmisko elementu daudzums

Ar ko ir visvieglāk raksturot zvaigznes?



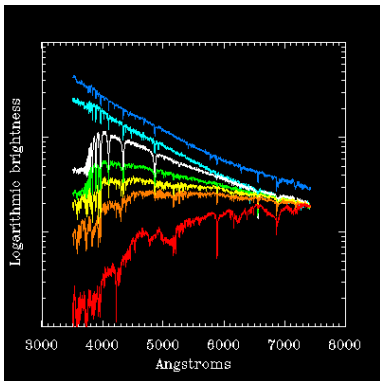
Redzamais zvaigžņlielums

Astronomiskā objekta **redzamais zvaigžņlielums** (*spožums*) uz frekvences ν tiek definēts kā

$$m_\nu = -2.5 \lg \left(\frac{f_\nu}{f_{\nu(\text{ref.})}} \right)$$

- Te f_ν ir gaismas plūsma no objekta (SI: $\text{W}/\text{m}^2/\text{Hz}$)
- Parasti izmanto **Vegas sistēmu**, kurā Vegas (Liras α) zv.l. ir 0 pēc definīcijas
- Pēdējos gados arvien plašāk izmanto t.s. **AB sistēmu**, kurā $f_{\nu(\text{ref.})} = 3.6308 \times 10^{-23} \text{ W}/\text{m}^2/\text{Hz}$.
- Vegas un AB sistēmas zv.l. sakrīt uz 550 nm.
- Skala tika izvēlēta tā, lai aptuveni sakristu ar tradicionālu skalu, kad zv.l. 0^m ir spožākām zvaigznēm, bet 6^m atbilst zvaigznēm, tikko saskatāmām ar neapbruņotu aci.

Zvaigžņlielums nav viens skaitlis!



- Kā mēs redzējam, zvaigznēm mēdz būt dažādas krāsas
 - Dažāds enerģijas sadalījums optiskā spektrā
- Zvaigžņlielums ir atkarīgs no frekvences!

Zvaigžņlielums dažādos filtros

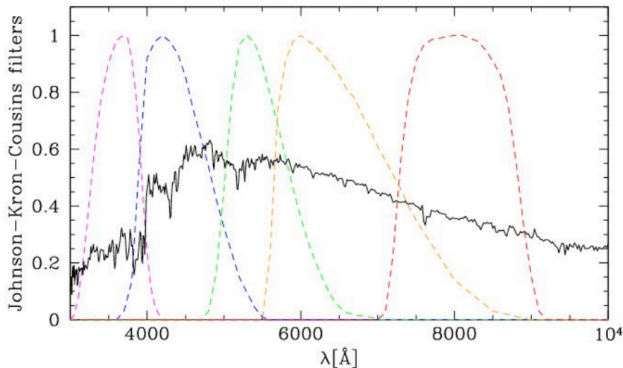
- Ja zv.l. aprēķina nevis uz vienas frekvences ν (kas ir no praktiskā viedokļ gan grūti, gan arī bezjēdzīgi), bet skatoties caur kādu filtru x (piemēram, aci), tad tā aprēķinam izmanto loģisko formulu

$$m_x = -2.5 \lg \frac{\int f_\nu T_x(\nu) d\nu}{\int f_\nu(\text{ref.}) T_x(\nu) d\nu},$$

kur $T_x(\nu)$ ir filtra x caurlaidības funkcija

- Plaši tiek izmantoti filtri
 - U B V R I J H K L M N (Džonsona sistēma)
 - u' g' r' i' z' (SDSS sistēma)
- Katrā filtrā var noteikt zvaigznes zv.l.; no to kopas (īpaši no starpībām) par zvaigzni var pateikt diezgan daudz (sk. tālāk)

Filtru caurlaidības līknes



Te ir parādītas caurlaidības līknes $T(\nu)$ Džonsona sistēmas filtriem U (ultraviolet), B (blue), V (visible), R (red), I (infrared). Fonā parādīts Saulei līdzīgas zvaigznes spektrs.

Absolūts zvaigžņlielums

- Skaidrs, ka redzamais zv.l. ir atkarīgs no attāluma līdz zvaigžnei: $f_v \sim R^{-2}$
- Lai raksturotu pašas zvaigznes spožumu, ievēdīsim **absolūto zvaigžņlielumu** M
 - *Definīcija*: redzamais zv.l., kāds būtu zvaigžnei, ja tā atrastos “standartattālumā” no mums.
 - **Standartattālums** ir $D_0 = 10$ pc
- Piemēri
 - Saules redzamais un absolūtais spožums ir -26.7^m un $+4.8^m$
 - Vega: 0.0^m un 0.6^m
 - Andromēdas galaktikai: 4.4^m un -20.0^m

Parseks (pc)



- Starp citu, kas ir **parseks (pc)**
- *Definīcija*: attālums, no kura Zemes orbītas lielā pusass ir redzama zem leņķa 1".
 - Tipiskais attālums starp zvaigznēm Saules tuvumā
 - Visplašāk izmantojamā attāluma vienība astronomijā
- $1 \text{ pc} = 206265 \text{ a.v.} = 3.08 \times 10^{16} \text{ m}$
 - Lieto arī kpc, Mpc, Gpc

Absolūts zvaigžņlielums: 2

- Izvedīsim formulu, kas saistītu redzamo un absolūto zv.l.
- Tam pieņēmsim, ka gaismas plūsma $f \sim D^{-2}$, tas ir,
 $f(D_0) = f(D) \times (D/D_0)^2$
 - Šis pieņēmums astronomijā ir nepareizs!
 - Ir iespējams ievest papildus korekciju uz “starpzvaigžņu nosarkumu”

$$M = -2.5 \lg \left(\frac{\int f_\nu T_x(\nu) d\nu}{\int f_\nu(\text{ref.}) T_x(\nu) d\nu} \times \left(\frac{D}{D_0} \right)^2 \right),$$

$$M = m - 5 \lg \left(\frac{D}{D_0} \right) \quad \text{vai} \quad M = m - 5 \lg \left(\frac{D}{D_0} \right) - A,$$

kur A ir starpzvaigžņu vides izsauktās absorbcijas korekcija.

Saikne starp zv.l. un starjaudu

- Absolūtos zvaigžņlielumus var izmantot, lai noteiktu zvaigznes starjaudu Saules starjaudas vienībās $\frac{L}{L_{\odot}}$:

$$M_x - M_{\odot,x} = -2.5 \lg \left(\frac{L}{L_{\odot}} \right)$$

- Saules absolūtie spožumi: $M_{\odot,B} = 5.48^m$, $M_{\odot,V} = 4.83^m$, $M_{\odot,K} = 3.33^m$, ...

Cita formula zvaigžņlielumam

- No redzamā zv.l. definīcijas var viegli iegūt to “skolas formu”

$$m_2 - m_1 = 2.5 \log \left(\frac{f_1}{f_2} \right) \text{ vai } \frac{f_1}{f_2} = 10^{0.4(m_2 - m_1)}$$

- To var izmantot nezinot “atskaites punktu”
- Protams, tāda paša formula ir spēkā arī priekš absolūtā zv.l.:

$$M_2 - M_1 = m_2 - m_1$$

- Tas parāda, ka redzamo zv.l. starpība nav atkarīga no attāluma!
 - Nav **visa** taisnība: to izmaina starpzvaigžņu absorbcija

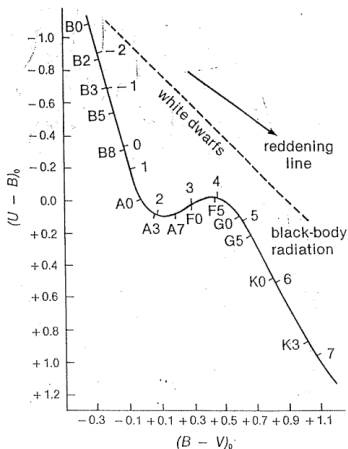
Krāsu indeksi

- Divu redzamo zvaigžņlielumu starpība (**krāsu indekss**) nav (tieši) atkarīga no attāluma:

$$m_2 - m_1 = -2.5 \log \left(\frac{f_1}{f_2} \right)$$

- Atkarīga no novērojamo gaismas plūsmu attiecības:
 - spektra formas
 - starpzvaigžņu absorbcijas
- Visbiežāk lieto krāsu indeksus $m_B - m_V = B - V$ un $m_U - m_B = U - B$.

Krāsu-krāsu diagramma



- Tipiskā krāsu-krāsu diagramma.
- Pozitīvās krāsas nozīmē “sarkanus” objektus šajās krāsās.
- Zvaigžņu klases (B, A, F, ...) tiks ievesti nedaudz tālāk.
- Ir parādīts arī virziens, kurā objekta krāsu nobīda starpzvaigžņu nosarkums.

Starpzvaigžņu absorbcija

- Gaismas plūsmu no astronomiskiem objektiem samazina absorbcija starpzvaigžņu telpā
- Zvaigžņu gaismu absorbē putekļu graudi un gāze, kas atrodas Galaktikā starp mums un novērojamo objektu
- No novērojumiem ir zināms, ka kopējo Galaktikas absorbciju labi raksturo infrasarkanā gaismā spoži starpzvaigžņu mākoņi (t.s. *infrared cirrus*)

Spālvu mākoņi (*cirrus*)



Zvaigžņlielumi

Harvarda spektrālā klasifikācija

Hercšprunga-Rasela diagramma

Zvaigžņu spektru interpretācija: pamati

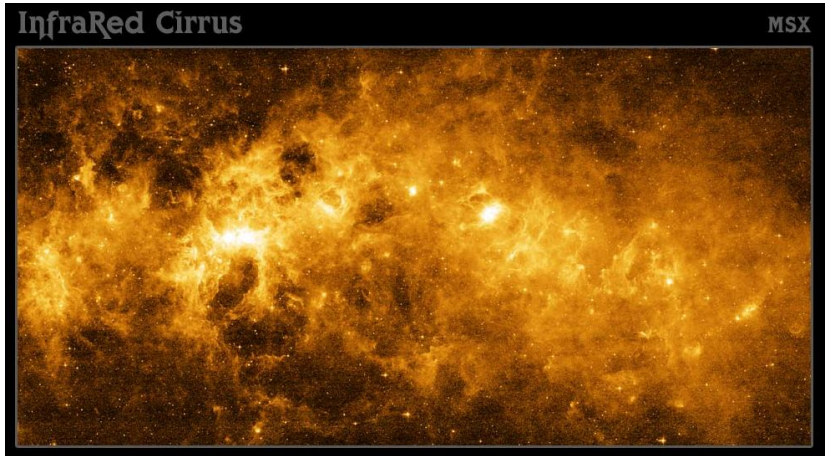
Galvenie zvaigžņu parametri

Redzamais un absolūts zvaigžņlielums

Krāsu indeksi

Starpzvaigžņu absorbcija

Starpzvaigžņu mākoņi (*infrared cirrus*)



Starpzvaigžņu absorbcija: raksturlielumi

- Raksturo caur zvaigžņlieluma izmaiņu šīs absorbcijas dēļ.
Parasti izmanto V filtra izmaiņas

$$m_{V,obs} = m_{V,0} + A_V$$

- No optiskiem novērojumiem absorbciju novērtē pēc parametra E_V (**krāsu pārpalikums**, *color excess*)

$$E_{B-V} = (B - V)_{obs} - (B - V)_0$$

- $(B - V)_0$ var noteikt no krāsu-krāsu diagrammas, kas tika uzbūvēta mums tuviem objektiem (kur A_V un E_{B-V} ir nulles)
- Galaktikā ir spēkā sakarība $A_V = 3.1 E_{B-V}$. Koeficientu nosaka starpzvaigžņu vides putekļu daudzums un ķīmiskais sastāvs.
- Tālu no Galaktikas plaknes $A_V < 0.1^m$, bet tuvu tai pieaug.
Galaktikas centram $A_V = 30^m$!

Zvaigžņlielumi

Harvarda spektrālā klasifikācija

Hercšprunga-Rasela diagramma

Zvaigžņu spektru interpretācija: pamati

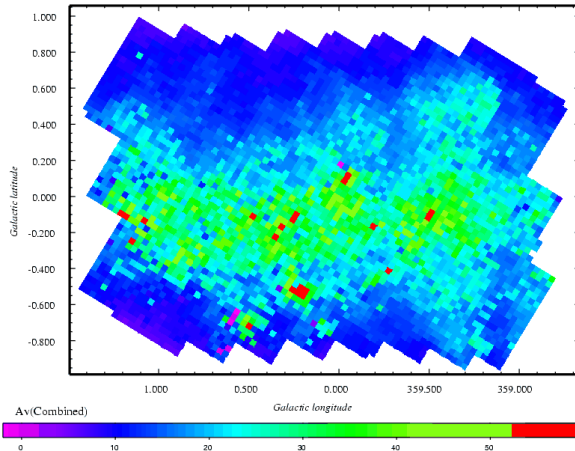
Galvenie zvaigžņu parametri

Redzamais un absolūts zvaigžņlielums

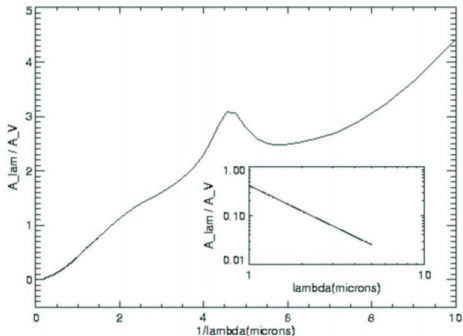
Krāsu indeksi

Starpzvaigžņu absorbcija

Galaktikas centra A_V



Starpzvaigžņu absorbcijas līkne



- Ka redzams, starpzvaigžņu vide vairāk absorbē zilo gaismu; tāpēc to sauc arī par starpzvaigžņu nosarkumu (*межзвездное покраснение, interstellar reddening*).

Zvaigžņlielumu rēķini: apkopojums

- *Redzamais zvaigžņlielums m* neraksturo objektu
 - Atkarīgs no attāluma, starpzvaigžņu vides blīvuma, viļņa garuma
- *Absolūts zvaigžņlielums M* raksturo objekta starjaudu
 - Atkarīgs no viļņa garuma; parasti izmanto M_V (V filtrā)
- Redzamā zvaigžņlieluma starpības (*krāsu indeksi*) nav atkarīgi no attāluma
- Zvaigžņlielumu rēķini:
 - Zinot m un D , novērtē M (pieņemot, ka $A = 0$)
 - Zinot m , D un M , aprēķina starpzvaigžņu absorbciju A
 - Zinot m , M un A aptuvenas vērtības, novērtē D

Outline

- 1 Zvaigžņlielumi
 - Redzamais un absolūts zvaigžņlielums
 - Krāsu indeksi
 - Starpzvaigžņu absorbcija
- 2 Harvarda spektrālā klasifikācija
- 3 Hercšprunga-Rasela diagramma
- 4 Zvaigžņu spektru interpretācija: pamati
 - Starojuma pārnese
 - Gravitācijas paātrinājums un auguma līkne
- 5 Galvenie zvaigžņu parametri
 - Zvaigžņu rādiusi un masas
 - Sakarības starp M , L un T
 - Ķīmisko elementu daudzums

Vēsture

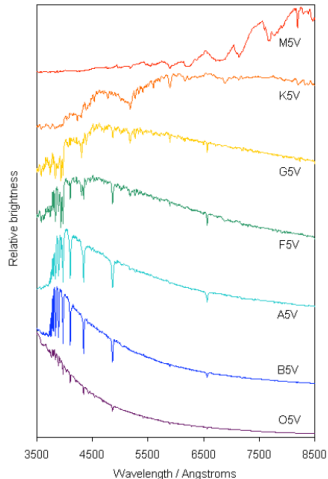
- Pirmie Saules spektra novērojumi: Ņūtons (*Newton*), 1672
- Pirmie Saules absorbcijas līniju novērojumi: Vollaštons (*Wollaston*), 1806
- Saules spektrālīniju “katalogs”: Fraunhofers (*Fraunhofer*), 1817
- Saistība ar ķīmisko sastāvu: Kirhofs un Bunsens (*Kirchoff, Bunsen*) identificē D-līnijas ar nātriju, 1859
- Zvaigžņu spektrālā klasifikācija tiek iesākta ap 1880. gadu

$$\begin{array}{ccccccccccc} & & & & & & & S & & & \\ & & & & & & & / & & & \\ O & - & B & - & A & - & F & - & G & - & K & - & M & - & L & - & T \\ & & & & & & & \backslash & & & \\ & & & & & & & R-N & & & \end{array}$$

Colour:	blue	white	yellow	red	Infrared
B – V:	-0.3	0.0	0.4	0.8	1.5

- Šajā secībā pakāpeniski mainās: zvaigžņu krāsa, virsmas temperatūra un absorbcijas līniju stiprums
- Šī secība aizvietoja sākotnējo secību A-B-C..., kura raksturoja H līniju stiprumu
- Sīkāks iedalījums ir ar cipariem: O5, O6, ..., A8, A9, F0, F1, ...
- Veids atcerēties: Oh, Be A Fine Girl, Kiss Me (Right Now)

Zvaigžņu spektri



Zvaigžņu temperatūra un starjaua

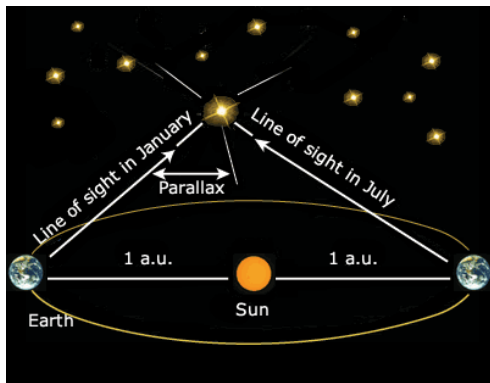
Klase	T, kK	Krāsa
O	30 - 60	Zilgana
B	10 - 30	Balti-zilgana
A	7.5 - 10	Balta
F	6.0 - 7.5	Dzelten-balta
G	5.0 - 6.0	Dzeltena
K	3.5 - 5.0	Oranža
M	3.0 - 3.5	Sarkana

- Vīna nobīdes likums:
 $\lambda_{max} [\text{\AA}] \approx 3 \times 10^7 / T[K]$
- Efektīvā temperatūra: no izteiksmes $L = \sigma T_{eff}^4 \times 4\pi R^2$.
 - $L \sim T_{eff}^4$: divreiz karstāka tāda paša izmēra zvaigzne ir 16 reizes spožāka
 - $L \sim R^2$: divreiz lielāka tādas pašas temperatūras zvaigzne ir četras reizes spožāka

Outline

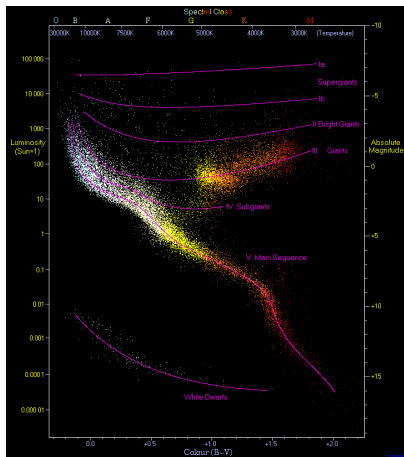
- 1 Zvaigžņlielumi
 - Redzamais un absolūts zvaigžņlielums
 - Krāsu indeksi
 - Starpzvaigžņu absorbcija
- 2 Harvarda spektrālā klasifikācija
- 3 **Hercšprunga-Rasela diagramma**
- 4 Zvaigžņu spektru interpretācija: pamati
 - Starojuma pārnese
 - Gravitācijas paātrinājums un auguma līkne
- 5 Galvenie zvaigžņu parametri
 - Zvaigžņu rādiusi un masas
 - Sakarības starp M , L un T
 - Ķīmisko elementu daudzums

Attāluma noteikšanas pēc paralakses



- Gada paralakse
 $p["] = 1/D[pc]$
- Reāli var izmērīt p līdz $0.01'' = 10 \text{ mas}$
- Nākotnē GAIA dos p precizitāti līdz 0.1 mas
- Zinot attālumu, zvaigznēm var masveidi noteikt absolūtos zv.l.

Hercšprunga-Rasela diagramma



- Zinot zvaigznes spektra klasi (krāsu indeksu) un absolūto zv.l., var uzbūvēt Hercšprunga-Rasela diagrammu
 - Bieži vien asīs lieto temperatūru un starjaudu
- H-R diagramma dod iespēju sadalīt zvaigznes fizikālās klasēs
- No zvaigznes pozīcijas uz H-R diagrammas var nolasīt tās “spožuma klasi”

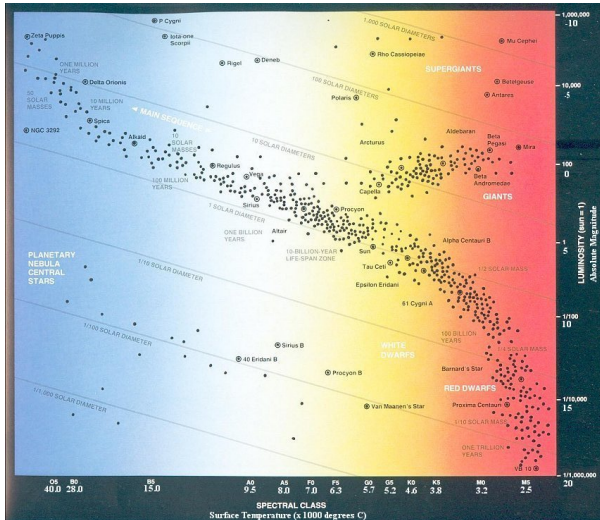
Zvaigžņu spožuma klases

Klase	Nosaukums
Ia	Spožaki pārmilži
Ib	Vājāki pārmilži
II	Spožie milži
III	Normālie milži
IV	Zemmilži
V	Punduri (galvenā secība)
VI	Zempunduri
WD	Baltie punduri

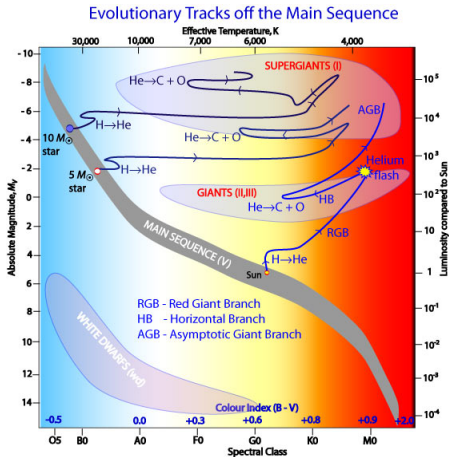
- Šī ir Morgana-Kīnana shēma
 - Tātad, (normālo) zvaigžņu pilnā klasifikācija ietver sevī **spektra klasi** (O, B, ...), **spektra apakšklasi** (0..9) un **spožuma klasi** (I, II, ..)
 - Saule ir G2V tipa zvaigzne, Vega ir A0V, ...
 - Papildus klases: Volfa-Rajē (WR) zvaigznes, TT Vērša, ...
 - Problēma: iekšējā absorbcija

Zvaigžņlielumi
Harvarda spektrālā klasifikācija
Hercšprunga-Rasela diagramma
Zvaigžņu spektru interpretācija: pamati
Galvenie zvaigžņu parametri

Hercšprunga-Rasela diagramma: 2



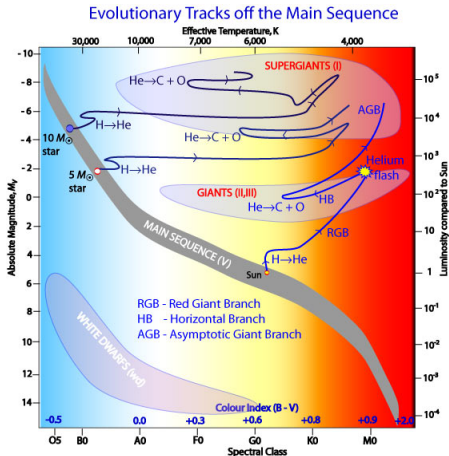
Hercšprunga-Rasela diagramma: evolūcijas treki



• Zvaigžņu “bīlumu” uz H-R diagrammas nosaka

- Zvaigznes dzīves laiks uz treka ar šiem parametriem (L , T)
- Zvaigznes ar masu M dzimšanas varbūtība
- Zvaigžņu sistēmas vecums
- Zvaigznes spožums (vājās zvaigznes ir redzamas tikai no neliela attāluma)

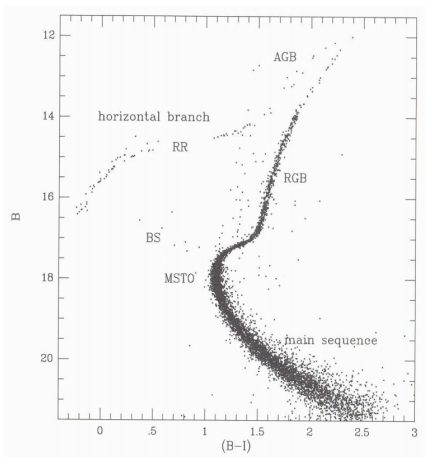
Hercšprunga-Rasela diagramma: evolūcijas treki



• Zvaigžņu “bīlumu” uz H-R diagrammas nosaka

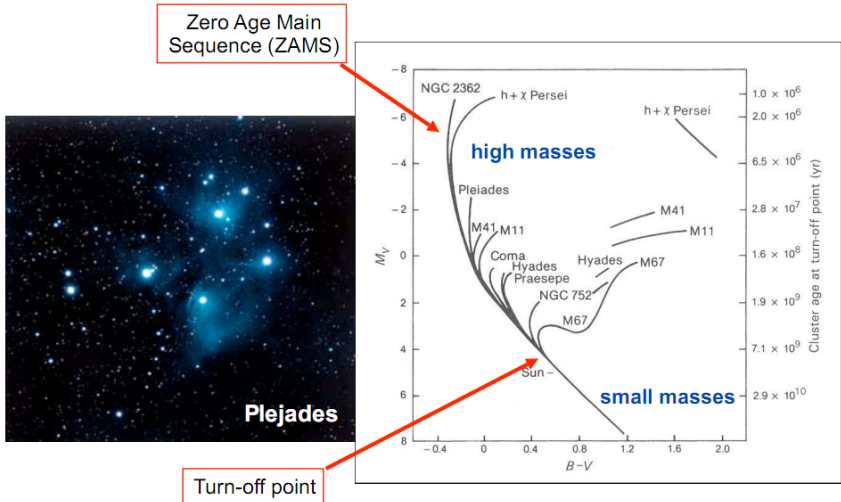
- Zvaigznes dzīves laiks uz treka ar šiem parametriem (L , T)
- Zvaigznes ar masu M dzimšanas varbūtība
- Zvaigžņu sistēmas vecums
- Zvaigznes spožums (vājās zvaigznes ir redzamas tikai no neliela attāluma)

Lodveida zvaigžņu kopas H-R diagramma



- Lodveida zvaigžņu kopas zvaigznēm ir vienāds vecums
 - Vienāds attālums: $\Delta m = \Delta M$
- Jo vecāka ir zvaigžņu kopa, jo tālāk uz sarkano pusi ir galvenās secības pagrieziens
 - Pēc pagrieziņa punkta krāsas novērtē zvaigžņu kopas vecumu
- **MSTO**: *main sequence turnoff*, **BS**: *blue stragglers* ("atpalikušās zvaigznes"), **RR**: RR Liras tipa mainzvaigznes

H-R diagrammas dažāda vecuma vaļējām zvaigžņu kopām



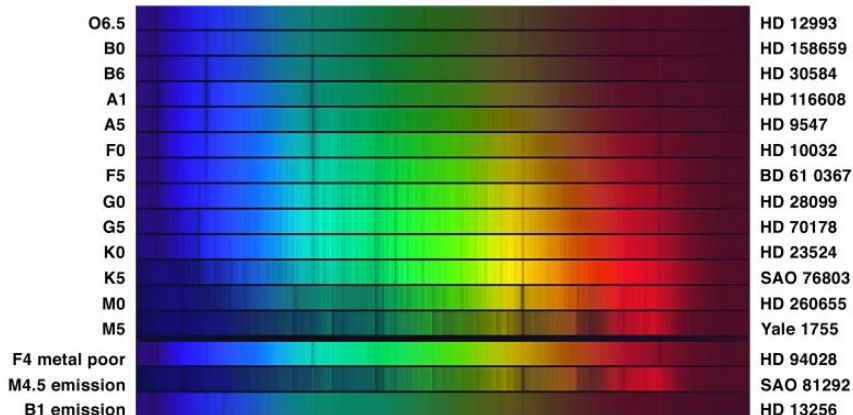
Outline

- 1 Zvaigžņlielumi
 - Redzamais un absolūts zvaigžņlielums
 - Krāsu indeksi
 - Starpzvaigžņu absorbcija
- 2 Harvarda spektrālā klasifikācija
- 3 Hercšprunga-Rasela diagramma
- 4 Zvaigžņu spektru interpretācija: pamati
 - Starojuma pārnese
 - Gravitācijas paātrinājums un auguma līkne
- 5 Galvenie zvaigžņu parametri
 - Zvaigžņu rādiusi un masas
 - Sakarības starp M , L un T
 - Ķīmisko elementu daudzums

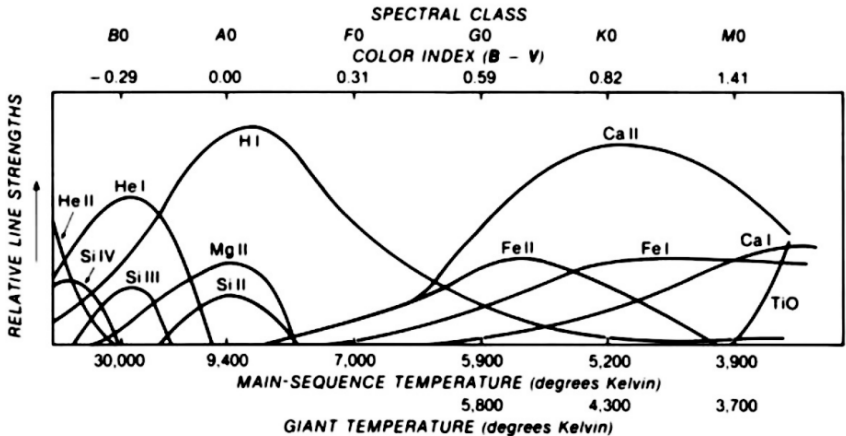
Informācija no zvaigžņu spektroskopijas

- Pētot zvaigznes spektru, var iegūt informāciju par
 - Fotosfēras temperatūru T : no zvaigznes krāsu indeksiem un jonu stāvokļu apdzīvotības sadalījuma
 - Spiedienu fotosfērā p : no dziļo absorbcijas līniju spārniem
 - Fotosfēras blīvumu ρ un gravitācijas paātrinājumu $g = GM/R^2$: no atomu jonizācijas stāvokļu sadalījuma
 - Ķīmisko sastāvu: no dažādu elementu līniju intensitātēm
 - Zvaigznes vēju
 - Zvaigznes rotāciju
 - ...

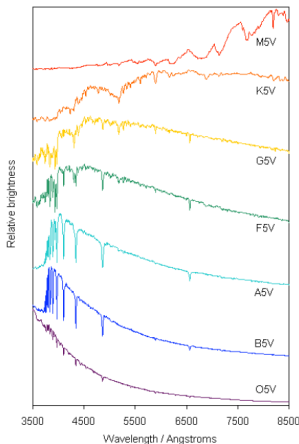
Zvaigžņu spektru piemēri



Līnijas zvaigžņu spektros



Spektru salīdzinājums: līnijas un lēcieni



- Fotosfēras **temperatūru** var novērtēt no
 - spektra formas (krāsas temperatūra)
 - spožuma (efektīvā temperatūra, zvaigznēm neder)
 - spektrālīniju intensitātes
- Fotosfēras **spiedienu** var novērtēt no
 - Līniju platuma (Lorenca forma, spiediena paplašinājums)
 - Dažu līniju relatīvās intensitātes

Starojuma absorbcija

- Izejot videi cauri, gaismas intensitāte mainās: sākotnējs tiek absorbēts, vide staro pati
- Kamēr starojums pats nemaina vides parametrus, **absorbcijai** ir jābūt proporcionālai pašai intensitātei un ceļa garumam:

$$dl_{V,abs} = -\kappa_V l_V dl$$

- Šeit κ_V definē **absorbcijas koeficientu** (dimensija: cm^{-1})
- **Optiskais dziļums** tiek definēts kā $d\tau_V = \kappa_V dl$
- Integrējot šo izteiksmi homogēnā vidē, iegūsim pazīstamo Bugera-Lamberta-Bēra likumu

$$I_V = I_{V,0} \exp[-\kappa_V l] = I_{V,0} \exp[-l/l_{V,0}] = I_{V,0} e^{-\tau_V}, \text{ kur}$$

$l_{V,0}$ ir “brīvā ceļa garums” vai “absorbcijas garums”.

Starojuma emisija

- Gaismas emisijai ir jābūt proporcionālai ceļa garumam:
 $dl_{\nu,em} = \varepsilon_{\nu} dl$
 - ε_{ν} mērvienība ir J/s/m³/Hz/sr
- Ievērojot gan emisiju, gan absorbciju, iegūsim starojuma pārnese vienādojumu:

$$dl_{\nu} = -\kappa_{\nu} l_{\nu} dl + \varepsilon_{\nu} dl$$

- Pāriesim uz optiskā dziļuma mainīgo: $\frac{dl_{\nu}}{d\tau_{\nu}} = -l_{\nu} + \frac{\varepsilon_{\nu}}{\kappa_{\nu}}$
- Definēsim **avota funkciju** kā $S_{\nu} = \frac{\varepsilon_{\nu}}{\kappa_{\nu}}$, tātad

$$\boxed{\frac{dl_{\nu}}{d\tau_{\nu}} = -l_{\nu} + S_{\nu}}$$

- Tas ir **starojuma pārnese vienādojums** (bez izkliedes)

Starojuma pārnese vienādojums

- Nointegrēsim homogēnā vidē. Integrējošais reizinātājs ir e^{τ_v} , integrācijas konstanti apzīmēsim ar $(I_{v,0} - S_v)$, rezultāts ir

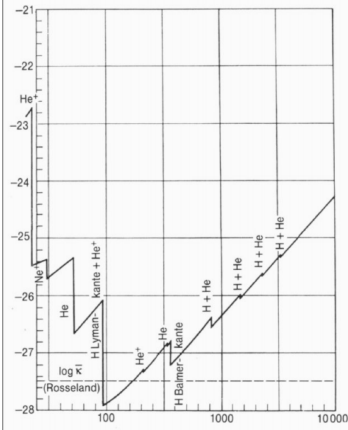
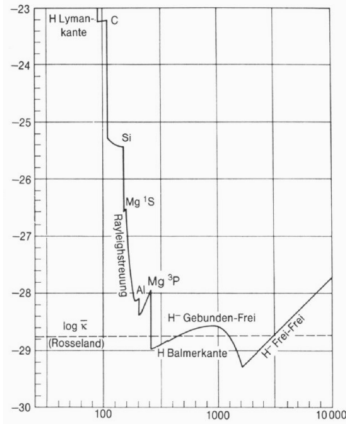
$$I_v = I_{v,0} e^{-\tau_v} + S_v (1 - e^{-\tau_v})$$

- Atrisinājuma analīze: pie $\tau_v \gg 1$ intensitāte tiecas uz S_v
- Globālā termodinamiskā līdzsvara gadījumā S_v var identificēt ar Planka funkciju B_v
 - Taču šāda identifikācija nevar būt atkarīga no fizikāliem apstākļiem
 - Tātad, emisijas koeficients ir proporcionāls absorbcijas koeficientam: $\varepsilon_v = \kappa_v B_v$

Spektrālīnijas un kontinūms

- Absorbcijas koeficientu nosaka elementāro procesu ātrumi (t.s. **varbūtības**, sek^{-1}) un enerģētisko līmeņu apdzīvotības
- Elementārie procesi:
 - Pārejas atomos (vai jonos) starp saistītiem stāvokļiem (*saistīti-saistītas pārejas*): **veido līnijas**
 - Atomu jonizācija un rekombinācija (*saistīti-brīvas pārejas*): **veido kontinuumu**
 - Bremzes starojums (*brīvi-brīvas pārejas*): **veido kontinuumu**
- Apdzīvotības un jonizāciju nosaka vielas temperatūra un blīvums caur Bolcmaņa un Sahā vienādojumiem
 - Arī ķīmiskais sastāvs!

Absorbcijas koeficients



$\kappa_v/\mu\rho$ Saules ($T=6000$ K) un τ Sco ($T=28000$ K) fotosfērai.

Spektrālīniju platums: dabisks paplašinājums

Spektrālo līniju platumu nosaka vairāki faktori:

- **Dabisks paplašinājums**

Atomam ir galīgs dzīves laiks ierosinātā līmenī. Tāpēc Heizenberga nenoteiktības principa ($\Delta E \Delta t \geq h$) dēļ ierosinātiem līmeņiem ir platums $\Delta \nu_{nat} = A_{ul}/2$, kur A_{ul} ir pārejas varbūtība [sek^{-1}].

Rezultējošai līnijas formai $\varphi(\nu)$ ir Lorenca profils:

$$\varphi_N(\nu) = \frac{2}{\pi} \frac{A_{ul}/2}{(\nu - \nu_0)^2 + (A_{ul}/2)^2}$$

Parasti dabisks paplašinājums ir neievērojami mazs.

NB: Līnijas absorbcijas koeficients ir proporcionāls $\varphi(\nu)$.

Spektrālīniju platums: spiediena paplašinājums

- Spiediena paplašinājums

Klasiskā aina: starojuma fāze dažreiz pēkšņi mainās daļiņu sadursmes dēļ.

Kvantu aina: līmeņi tiek sašķelti ārējo lādēto (Štarka paplašinājums) vai nelādēto (van der Vālsa paplašinājums) daļiņu elektriskā laukā
Rezultējošai līnijas formai $\varphi(v)$ arī ir Lorencas profils:

$$\varphi_S(v) = \frac{2}{\pi} \frac{\Gamma_0/2}{(v-v_0)^2 + (\Gamma_0/2)^2}$$

Spektrālīniju platums: Doplera paplašinājums

- Doplera paplašinājums

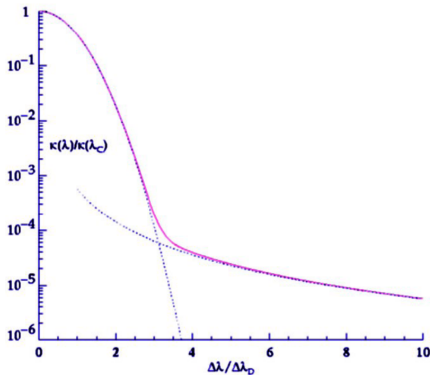
Būtiskā atšķirība: katrs atoms staro Lorenca profila līniju, bet dažādu atomu grupu līnijas ir nobīdītas attiecībā viena pret otru Doplera efekta dēļ, un to centri veido Gausa profilu.

$$\varphi_D(v) = \frac{1}{\Delta v_D \sqrt{2}} \exp \left[- \left(\frac{v - v_0}{\Delta v_D} \right)^2 \right].$$

kur $\Delta v_D = v \frac{v_{\perp}}{c} = v \sqrt{\frac{2kT}{m_{atom} c^2}}$ (siltuma kustību gadījumā).

Summējas divas ātruma “komponentes”: mikroskopisko (temperatūra) un makroskopisko (turbulence) kustību dēļ

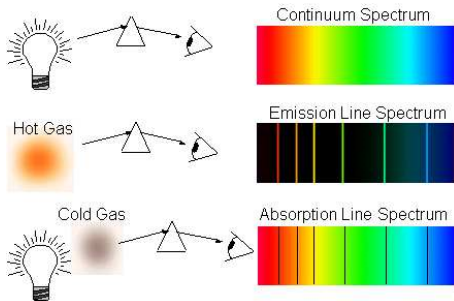
Foigta profils



- Līnijas kodols: Gausa forma
- Līnijas spārni: Lorenca forma
- Kopējā forma: tā sauktais **Foigta profils (Voigt)**, Gausa un Lorenca profila konvolūcija

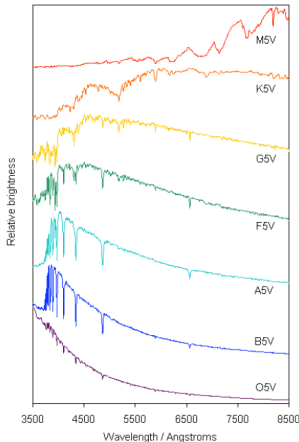
$$\varphi_V(x) = \int \varphi_D(x') \varphi_{L+N}(x - x') dx'$$

Emisijas un absorbcijas līnijas



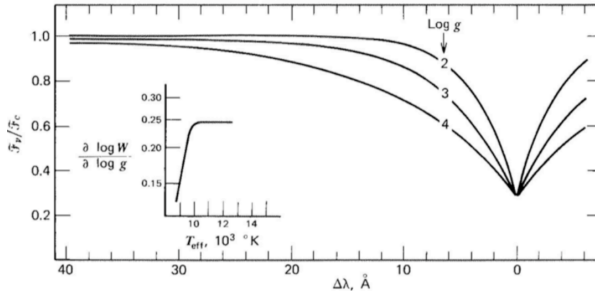
- Visā spektrā $\tau \gg 1$
neatkarīgi no $I_{\nu,0}$:
kontinūma spektrs
- $I_{\nu,0} \ll B_{\nu}$, $\tau \ll 1$: emisijas
līniju spektrs
- $I_{\nu,0} > B_{\nu}$, $\tau \ll 1$:
absorbcijas līniju spektrs

Spektru salīdzinājums: līnijas un lēcieni



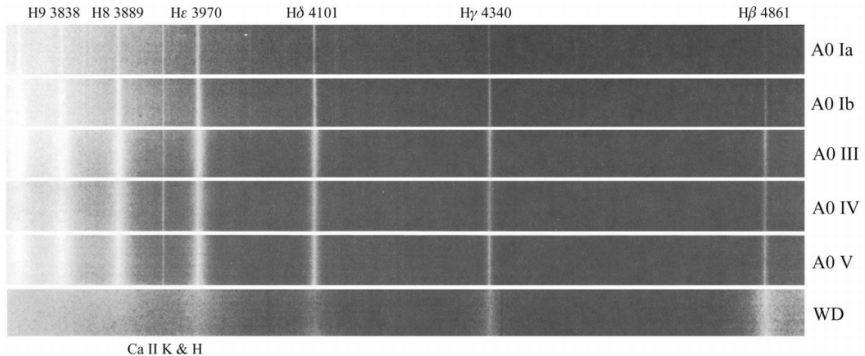
- Lēcieni veidojas tādēļ, ka absorbcijas koeficients virs jonizācijas robežas pēkšņi palielinās (kļūst iespējams jauns elementārs process: jonizācija)
- Efekts līdzīgs līnijai, bet plašākā spektrālā diapazonā

Gravitācijas paātrinājums: 2



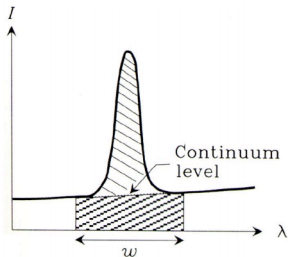
- Pie $T = \text{const}$ līnijas platums ir atkarīgs no spiediena p un, kā sekas, no g .
 - Saules $g = 275 \text{ m/s}^2$, t.i., $\log g = 2.4$
 - Uz galvenās secības $g \approx \text{const}$.

Līnijas platuma maiņa atkārbā no g



- Šeit tiek ilustrēts, kādā veidā no zvaigžņu spektra var noteikt tās gravitācijas paātrinājumu un spožuma klasi

Ekvalentais platums: definīcija

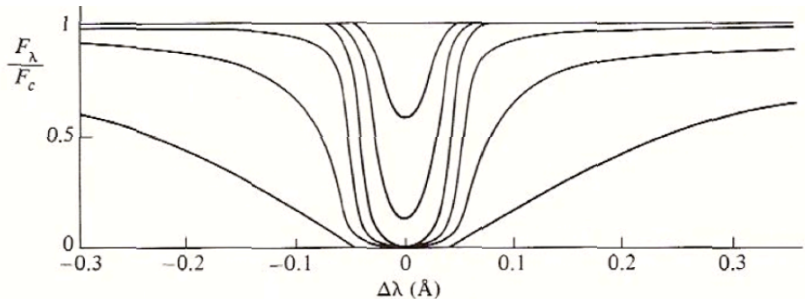


- Astronomijā spektrālīnijas relatīvās intensitātes noteikšanas bieži tiek lietots t.s. ekvalentais platums w .
 - Definīcija: ekvalentais platums ir tāds nepārtrauktā starojuma spektrāls intervāls, kura plūsma ir tāda pati kā novērotai līnijai
- Atbilstošā formula: $w = \left| \int_{linija} \frac{I_{linija} - I_{fons}}{I_{fons}} \right|$, kur fons tiek ņemts tuvu līnijai
- Galvenās problēmas: mainīgs fons, līniju pārklāšanās

Līnijas formas maiņa

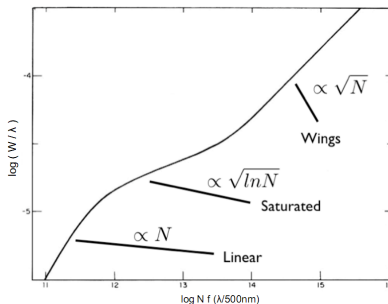
- Parasti zvaigžņu atmosfērās Lorenca platums ir daudz mazāks par Gausa platumu
 - Spārni ir novērojami tikai ja kodols ir jau piesātināts
- Kamēr līnija ir optiski plāna priekš starojuma (t.i., vai nu f ir mazs, vai nu ir maz atomu dotajā sākumstāvoklī), tās spārni nav saskatāmi un ekvalents platums aug lineāri ar atbilstošu atomu skaitu N
- Pieaugot atomu skaitam, līnijas kodols kļūst piesātināts, bet spārni vēl ir vāji: līnijas ekv. platums maz mainās ar atomu skaitu
- Kad pat spārni sāk pieaugst ar atomu skaitu, ekv. platums pieaug kā $\sqrt{N}$
- *NB: Uz attēla katra nākamā līkne atbilst 10-kārtīgām jona daudzuma pieaugumam*

Līnijas forma: kodols un spārni



- Līnijas kodolam ir Gausa forma, līnijas spārniem ir Lorencas forma
- Kopējā forma: **Foigta profils**

Auguma līkne



- No auguma līknes (*curve of growth*), ko uzbūvē dažādu f līnijām, var noteikt starojošās vielas spiedienu un turbulences kustības ātrumu
- No dažādu jonu un elementu auguma līknēm var noteikt fotosfēras jonizācijas pakāpes un ķīmisko sastāvu

Outline

- 1 Zvaigžņlielumi
 - Redzamais un absolūtais zvaigžņlielums
 - Krāsu indeksi
 - Starpzvaigžņu absorbcija
- 2 Harvarda spektrālā klasifikācija
- 3 Hercšprunga-Rasela diagramma
- 4 Zvaigžņu spektru interpretācija: pamati
 - Starojuma pārnese
 - Gravitācijas paātrinājums un auguma līkne
- 5 Galvenie zvaigžņu parametri
 - Zvaigžņu rādiusi un masas
 - Sakarības starp M , L un T
 - Ķīmisko elementu daudzums

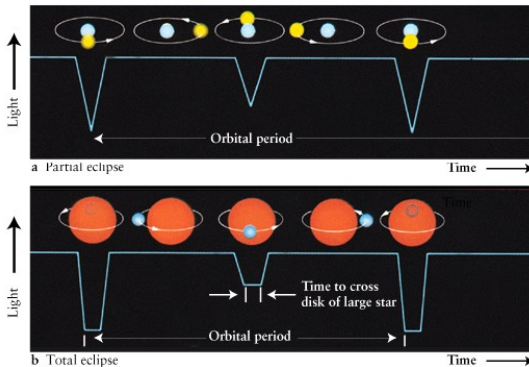
Zvaigžņu parametri

- Zvaigzni raksturo vairāki parametri: masa, rādiuss, temperatūra, starjaua un ķīmiskais sastāvs
 - Mazāku ietekmi uz novērojamiem parametriem dod vēja blīvums, rotācija un magnētiskais lauks
- Pagaidām esam apskatījuši to, kā noteikt temperatūru, starjauu un ķīmisko sastāvu.
 - Zvaigžņu modeļu ietvaros no tām tiek noteikti rādiuss un masa
- Apskatīsim, kā noteikt zvaigžņu rādiusus un masas no novērojumiem

Rādiusu noteikšana: tiešā metode

- Novērtēsim iespēju noteikt zvaigznes izmērus no parastiem novērojumiem
 - Teleskopu difrakcijas izšķirtspēja ir $\alpha \approx 1.2 \frac{\lambda}{D} \approx 0'' \cdot 1 \frac{(\lambda/400 \text{ nm})}{(D/1 \text{ m})}$
 - Saule attālumā 1 pc būtu ap 10 mas ($0.01''$) liela
 - Tuvākā Saulei zvaigzne (Centaurs α) atrodas 1.3 pc attālumā
- Kā redzams, tas nav iespējams
- Pastāv divas metodes, bet arī tās var pielietot tikai dažām zvaigznēm
 - Interferometriskie novērojumi
 - Aptumsuma maiņzvaigžņu novērojumi

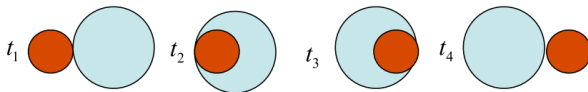
Aptumsuma maiņzvaigžņu novērojumi



Starp citu, vai zīmējums ir pareizs? Kurš no spožuma samazinājumiem ir mazāks?

Aptumsuma maiņzvaigžņu novērojumi: metode

- Tiek izmērīti četru kontaktu momenti: t_1 , t_2 , t_3 un t_4 .

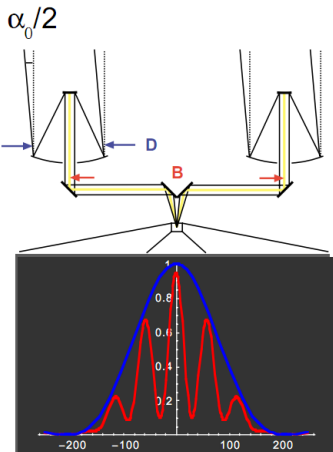


- Lai zvaigžņu relatīvs ātrums ir v , lielākas un mazākas zvaigznes izmēri ir R un r . Tad

$$R = v \left(\frac{t_4 - t_3}{2} - \frac{t_2 - t_1}{2} \right) \text{ un } r = v \frac{t_2 - t_1}{2}$$

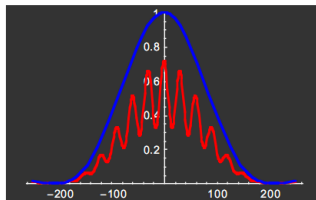
- Kustības ātrumu var noteikt no zvaigžņu spektrālīniju Doplera nobīdes starp aptumsumiem
- Dažreiz dubultzvaigznes komponentes var tieši novērot, kad tie attālinās. Tad var noteikt attālumu līdz sistēmai.
- Ja ir zināmas T_{eff} , tad no m un M arī var noteikt attālumu

Interferometriskā metode: Maikelsona interferometrs

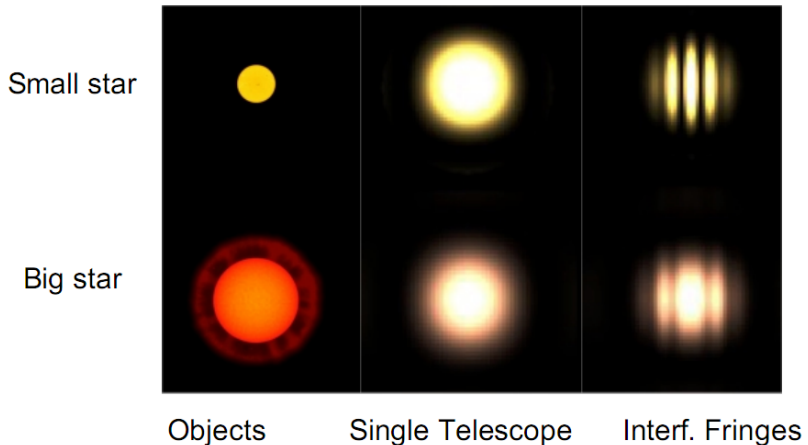


B_1 and α_0 (Movies used for illustration)

- Stellar source with angular size α_0
- Add fringe patterns (i.e. intensities) between $\pm\alpha_0/2$
- Resulting fringe pattern shows reduced contrast
- Reduced contrast depends on B – and on α_0



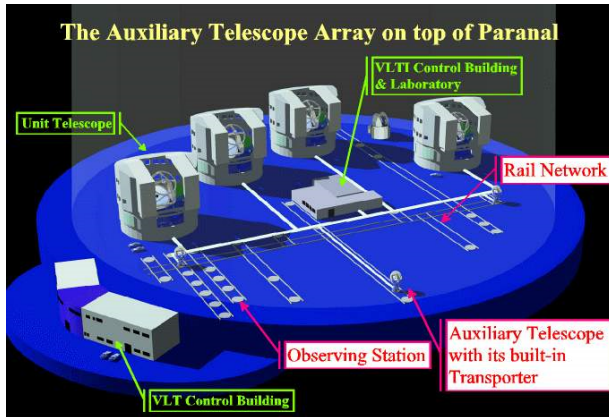
Interferometriskā metode: ideāli attēli



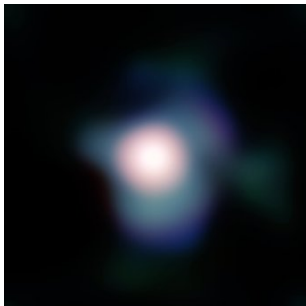
Interferometriskā metode: piezīmes

- Maksimālā izšķirtspēja, ko var iegūt, ir ar kārtu λ/B
 - Tā ir izšķirtspēja tikai vienā virzienā
 - Ja grib iegūt attēlu, tad ir jākombinē vairāki teleskopi, vai/un jāsavāc datus vairāku stundu garumā, lai Zeme pagriež teleskopus
 - Parasti iegūst t.s. “redzamības funkciju”, un tad tai piedzin dažādus teorētiskos modeļus
- Plaši zināms optiskais interferometrs: VLTi (*Very Large Telescope Interferometer*, ESO), kas atrodas Čīlē
 - Bāzes līnijas līdz 200 metriem

VLT shēma

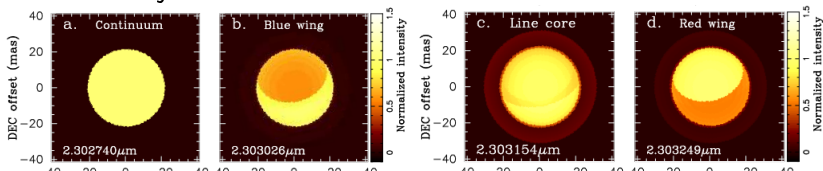


Tiešā metode: Betelgeize



- Betelgeize (α Ori): attālums ap 170 pc
- Izmērs ap $1000 R_{\odot}$
- Leņķiskais izmērs ap 55 mas (samazinās!)
- Var novērot tieši! Izšķirtspēja ir 37 mas (VLT, NACO, "lucky imaging"), lauks ap $0''.5$
- Vienas nehomogēni izplūst no zvaigznes

Interferometrijas rezultāti:



Zvaigžņu rādiusi no mērījumiem

Tips	T_{eff} , K	Rādiuss, $R_{\odot}$
Galvenā secība		
M5V	3100	0.3
M0V	3800	0.6
G0V	6000	1.1
A0V	10 000	2.6
B0V	30 000	7
O5V	45 000	18

Tips	T_{eff} , K	Rādiuss, $R_{\odot}$
Pārmilži		
M0Ia	3700	500
G0Ia	5800	200
A0Ia	9400	100
B0Ia	27 000	30
O5Ia	40 000	25
Baltie punduri		
WD	jebkura	0.01

- Uz galvenās secības R pieaug ar T_{eff} , pārmilžiem ir pretēja sakarība

Zvaigžņu masu noteikšana

- Zinot rādiusu R un $g = GM/R^2$ (no spektrālās analīzes), var noteikt zvaigznes masu
 - Precizitāte ap 2x
- Zinot attālumu līdz dubultzvaigznei un abu komponentu kustību, var noteikt to masas no trešā Keplera likuma
 - $M_1 + M_2 = \frac{4\pi}{G} \frac{a^3}{T^2}$, kur $a = a_1 + a_2$ ir lielo pusasu summa
 - Masas centra nosacījums: $M_1 a_1 = M_2 a_2$
- Trešais variants: masas noteikšana aptumsuma dubultzvaigznēm

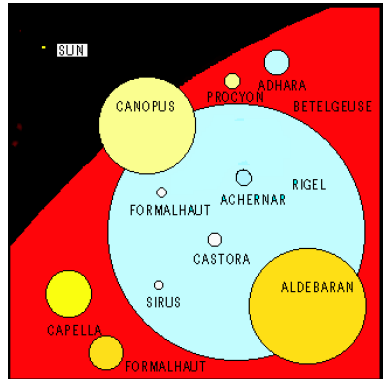
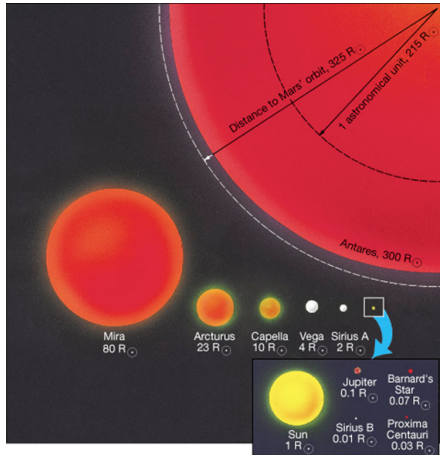
Zvaigžņu masas no aptumsuma dubultzvaigznēm

- No aptumsumu novērojumiem iegūst T
- No Doplera nobīdes novērojumiem iegūst v_1 un v_2
- Tad, riņķveida orbītas gadījumā tās plaknē iegūsim pusasu vērtības: $v_{1,2} = 2\pi a_{1,2} / T$
- No trešā Keplera likuma $M_1 + M_2 = \frac{4\pi}{G} \frac{a^3}{T^2}$ un $a = a_1 + a_2$ iegūsim kopējo masu
- No masas centra nosacījuma $M_1 a_1 = M_2 a_2$ iegūsim komponentu masas
- Ieslīpo orbītu gadījumā masas vietā iegūst $M / \cos i$.

Sakarības starp zvaigžņu parametriem

- Galvenās secības zvaigznēm ir spēkā aptuvenās sakarības
 - $L \sim M^4$, ja $M > 0.6 M_{\odot}$
 - $L \sim M^2$, ja $M < 0.6 M_{\odot}$
 - $R \sim M^{3/5}$
 - $L \sim T^7$
 - $g \approx \text{const}$
- Baltiem punduriem ir spēkā sakarība: $R \sim M^{-1/3}$, R nav atkarīgs no temperatūras

Zvaigžņu daudzveidība



Ķīmisko elementu daudzums

- Smago (t.i., smagāko par hēliju) elementu daudzums Z zvaigznēs var ietekmēt tās struktūru un evolūciju
- Saules $Z = Z_{\odot} = 0.02$ ir diezgan tipisks priekš mūsu Galaktikas
- Vecām zvaigznēm parasti ir mazāks Z (ir zināmas zvaigznes ar $10^{-3} Z_{\odot}$ un pat vēl mazāk), jaunām zvaigznēm ir novērojams līdz $5Z_{\odot}$
- Smago elementu daudzums ir atkarīgs no
 - Smago elementu daudzuma zvaigznes dzimšanas brīdī ap to
 - Zvaigznes vecuma (lielāks vecums: vairāk elementu pārstrādāts)