

# Херцшпрунг-Раселов дијаграм

Лука Марковић

Математички факултет Универзитета у Београду

Септембар 2025.

- 1 Класификација звезда према површинској температури
- 2 Привидни и апсолутни сјај звезде, луминозност
- 3 Мерење растојања

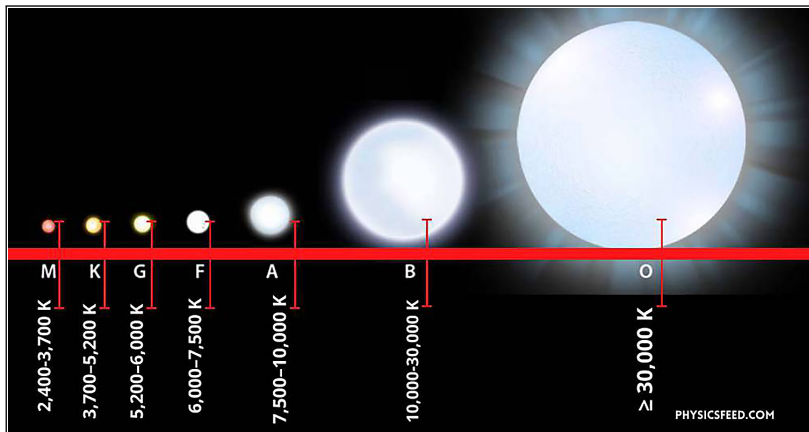
# Какве све звезде постоје?

- Не постоје две идентичне звезде.
- Звезде се разликују по маси, величини, површинској температури, боји, сјају и количини енергије коју емитују у јединици времена.
- Да ли је свака комбинација ових параметара могућа?
- Нека ограничења сигурно постоје: не постоје зелене или љубичасте звезде.
- Везе између наведених величина морају бити ”апсолутне”, независне од места посматрача.
- Нека својства звезда могуће је лако утврдити: типичан пример је боја звезде.
- Нека друга својства је много теже измерити.
- Тако, на пример, количина енергије коју звезда емитује зависи од њене величине и апсолутног сјаја.
- Са Земље, међутим, лако можемо да утврдимо само привидни сјај звезде.
- Привидни сјај звезде зависи од апсолутног сјаја али и од растојања на коме се звезда налази.

# Класе звезда

- Све звезде деле се на класе према тзв. Морган-Кинановом систему разрађеном на Харварду почетком XX века.
- Класа се одређује мерењем ширине карактеристичних Фраунхоферових линија водоника, хелијума, калцијума и титанијум-оксида у апсорпционом спектру звезде.
- Што је звезда топлија, ширина Фраунхоферових линија је већа.
- Прво су дефинисане класе **O**, **B**, **A**, **F**, **G**, **K** и **M**.
- Површинска температура звезде опада од класе **O** (најтоплије звезде) до **M** (најхладније).
- Свака класа има десет поткласа (0-9) у зависности од температуре. Сунце се налази у класи **G2**.
- Касније су додате класе **D** (бели патуљци), **L** и **T** (смеђи патуљци), **S** и **C** (угљеничне звезде).
- Овај систем користи се и даље али постоје и други, прецизнији, квантитативни системи.

# Графички приказ звезданих класа



Главне спектралне класе са одговарајућим температурама, апроксимативним бојама и релативним величинама звезде

# Индекс температуре звезде $B - V$

- $B - V$  индекс одређује се посматрањем сјаја звезде кроз два филтера.
- $B$ -индекс одређује се посматрањем сјаја звезде кроз  $UB$ -филтер осетљив на ултраљубичасту и плаву боју.
- $V$ -индекс одређује се посматрањем сјаја звезде кроз  $VB$ -филтер осетљив на већи део видљивог спектра (плаву, жуту и зелену боју).
- $B - V$  индекс представља разлику ова два индекса. Систем је тако баждарен да звезда Вега има  $B - V$  индекс једнак нули.
- Мање вредности индекса одговарају топлијим звездама, веће вредности - хладнијим.
- $B - V$  индекс за Сунце износи 0,656, а за плавичасти Ригел -0,03.
- Из овог индекса може се директно израчунати температура површине звезде:

$$T = 4600\text{K} \cdot \left[ \frac{1}{0,92(B - V) + 1,7} + \frac{1}{0,92(B - V) + 0,62} \right]$$

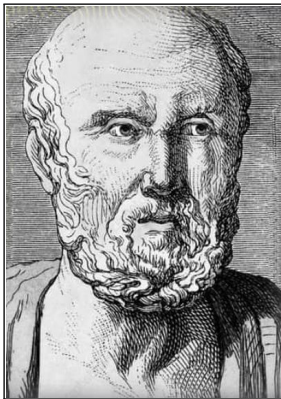
# Детаљи спектралне класификације

- Класа звезде, њена температура и индекс боје су три еквивалентне величине.

| Класа | Температура (К) | Боја         | Маса ( $M_{\odot}$ ) | Водоничне линије спектра | Друге линије спектра                                   | Проценат звезда |
|-------|-----------------|--------------|----------------------|--------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------|
| O     | > 33.000        | плава        | > 16                 | слабе                    | вишеструко јонизовани атоми                            | 0,0003%         |
| B     | 10.000 - 33.000 | плава/бела   | 2,1 - 16             | средње                   | неутрални хелијум                                      | 0,1%            |
| A     | 7.500 - 10.000  | бела/плава   | 1,4 - 2,1            | јаке                     | јонизовани калцијум, неутрални хелијум                 | 0,6%            |
| F     | 6.000 - 7.500   | бела         | 1,0 - 1,4            | средње                   | јонизовани калцијум, метали                            | 3%              |
| G     | 5.200 - 6.000   | жута         | 0,8 - 1,0            | слабе                    | јаке линије метала                                     | 7,5%            |
| K     | 3.700 - 5.200   | жута/оранж   | 0,45 - 0,8           | врло слабе               | неутрални калцијум, титан-оксид                        | 12%             |
| M     | < 3.700         | оранж/црвена | < 0,45               | врло слабе               | јаке линије калцијума и титан-оксида, неутрални метали | 76%             |

- 1 Класификација звезда према површинској температури
- 2 Привидни и апсолутни сјај звезде, луминозност**
- 3 Мерење растојања





Хипарх, један од највећих античких астронома

- Довољан је један поглед на ноћно небо па да утврдимо да звезде сјаје различитим интензитетом.
- Хипарх је 135. године п.н.е направио каталог са 850 звезда у коме је свакој звезди доделио број од 1 до 6, у зависности од сјаја (магнитуде).
- Најсјајније звезде имале су ознаку 1 док су оне једва видљиве имале ознаку 6.
- Развој телескопа и фотометрије омогућио је да се сјај звезда објективно измери.
- У исто време утврђено је да људско око детектује промене у интензитету светлости по логартиамској скали.
- Такође је утврђено да звезде са ознаком 1 имају 100 пута мањи сјај од звезде са ознаком 6.

# Савремена скала звезданих магнитуда

- Хипархов систем, уз незнатне измене, користи се и данас!
- Суштински, користи се чињеница да, према Хипарховој логаритамској скали, разлика у магнитуди величине 5 одговара 100 пута јачем или слабијем интензитету светлости.
- То значи да је звезда која има магнитуду за један број мању од друге сјајнија од ње  $\sqrt[5]{100} \approx 2,5$  пута.
- Хипархов у међувремену је рекалибрисан:
  - Звезда Вега има магнитуду 0.
  - Задржано је старо емпиријско правило да 100 пута сјајнија (тамнија) звезда има магнитуду мању (већу) за 5.
- С обзиром да на небу постоје објекти сјајнији од Веге (Сунце, Месец, Венера, Сиријус...), њихова магнитуда је негативна!
- Овако измерене магнитуде називају се **привидним** јер зависе од растојања посматраног објекта од нас.

# Сјај неких небеских тела

- Сунце: -26,5
- Пун Месец: -12,5
- Венера: -4,3
- Марс и Јупитер: -3
- Меркур: -2
- Сиријус: -1,44
- Вега, Сатурн: 0
- Антарес: 1
- Северњача: 2
- Уран: 5
- Лимит голог ока: 6,5
- Церес: 7
- Нептун: 8
- Лимит двогледа: 10
- Проксима кентаури: 11,1
- Плутон: 14
- Лимит телескопа (8m): 28
- Лимит телескопа "Хабл": 32

# Апсолутна магнитуда (сјај) звезде

- Привидна магнитуда не говори много о количини енергије коју звезда емитује. Неке звезде изгледају сјајније јер су нам ближе а не зато што емитују велику количину енергије.
- Зато је неопходно увести апсолутну магнитуду (сјај) која зависи само од снаге звезданог извора енергије.
- Апсолутна магнитуда дефинисана је као привидна магнитуда измерена са растојања од 10 парсека (1 парсек  $\approx 3.26$  светлосних година).
- Означимо апсолутну магнитуду са  $M$ , привидну магнитуду са  $m$  а наше растојање до звезде мерено у парсецима са  $d_{pc}$ .
- Када се узме у обзир да енергетски флукс звезде опада са квадратом растојања и да 100 пута сјајнији светлосни извор има магнитуду мању за 5, добија се следећа једначина:

$$M = m - 5(\log_{10} d_{pc} - 1)$$

- Одређивање апсолутне магнитуде своди се на мерење растојања до светлосног извора  $d_{pc}$ .

# Луминозност

- По дефиницији, луминозност звезде  $L$  представља количину енергије коју звезда емитује у јединици времена.
- Уместо апсолутне вредности, луминозност се најчешће исказује релативно у односу на луминозност Сунца  $L_{\odot}$ .
- Ако апсолутну магнитуду звезде означимо са  $M$  а апсолутну магнитуду Сунца са  $M_{\odot}$ , онда се релативна луминозност звезде може срачунати формулом:

$$\frac{L}{L_{\odot}} = 100^{\frac{M_{\odot} - M}{5}}$$

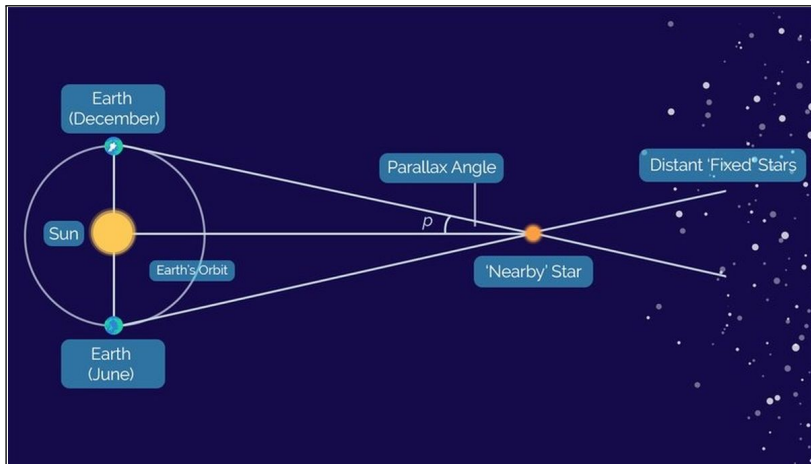
- Референтне вредности за Сунце су:  $L_{\odot} = 3,84 \times 10^{26} \text{W}$ ,  $M_{\odot} = 4,75$ . Нижим апсолутним магнитудама одговара већа луминозност (снага) звезде.
- Многе звезде имају много нижу апсолутну магнитуду од Сунца, самим тим и много већу луминозност: Бетелгез (-5,6), Наос (-6,0), Ригел (-7,0), Денеб (-7,2), Сиријус (1,4)...

- 1 Класификација звезда према површинској температури
- 2 Привидни и апсолутни сјај звезде, луминозност
- 3 Мерење растојања

# Зашто је мерење растојања битно

- На претходним слајдовима показано је како се на основу привидне магнитуде звезде и растојања до ње може израчунати апсолутна магнитуда звезде.
- Такође је показано како се из апсолутне магнитуде може израчунати луминозност звезде.
- Сходно томе, за одређивање луминозности звезде потребна су само два улазна податка: привидна магнитуда звезде и растојање до ње.
- Привидна магнитуда звезде мери се врло лако.
- Међутим, мерење растојања до звезда и галаксија далеко је компликованије.
- Данас се користи више различитих метода за мерење растојања у космичком простору.
- Не постоји универзална метода која би се могла употребити у свим случајевима.

# Метода паралаксе, концепт



Угао паралаксе приказан на слици у стварности је знатно мањи



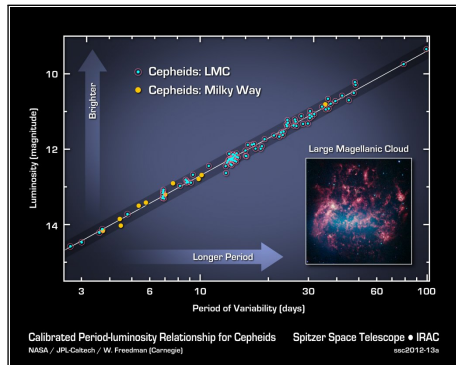
# Метода паралаксе, коришћење и примена

- Звезде које се налазе врло далеко од нас изгледају потпуно непомично, без обзира на кретање Земље око Сунца.
- За релативно блиску звезду, промена тачке посматрања доводи до привидног померања звезде у односу на непомичну звездану позадину.
- Осмотрено померање је највеће ако се посматрања врше у размаку од 6 месеци, са два супротна краја Земљине путање.
- Измерено померање представља двоструки угао паралаксе  $p$  из кога се може израчунати растојање  $d_{pc}$  до звезде:

$$d_{pc} = \frac{1}{p}$$

- Када је угао паралаксе у степенима, растојање до звезде изражено је у парсецима.
- Са Земље се могу измерити углови паралаксе не мањи од 0.01 секунде, са телескопа "Хабл" и до 0.001. Зато се метода паралаксе користи само за блиске звезде на растојању 100-1000 парсека, што је свега неколико процената пречника Млечног пута.

# Цефеиде, променљиве звезде



Линеарна веза између периода промене сјаја и луминозности за цефеиде унутар Млечног пута и Великог Магелановог облака

- Звезде које током времена мењају свој сјај називају се променљивим звездама.
- У ту групу спадају и цефеиде чији се сјај мења врло правилно, са периодом који износи од једног до 100 дана.
- Током једног циклуса цефеиде мењају луминозност (апсолутну магнитуду), полупречник и температуру.
- Оно што цефеиде чини тако специјалним је чињеница да постоји линеарна веза између њихове луминозности (којој одговара апсолутна магнитуда) и периода.

