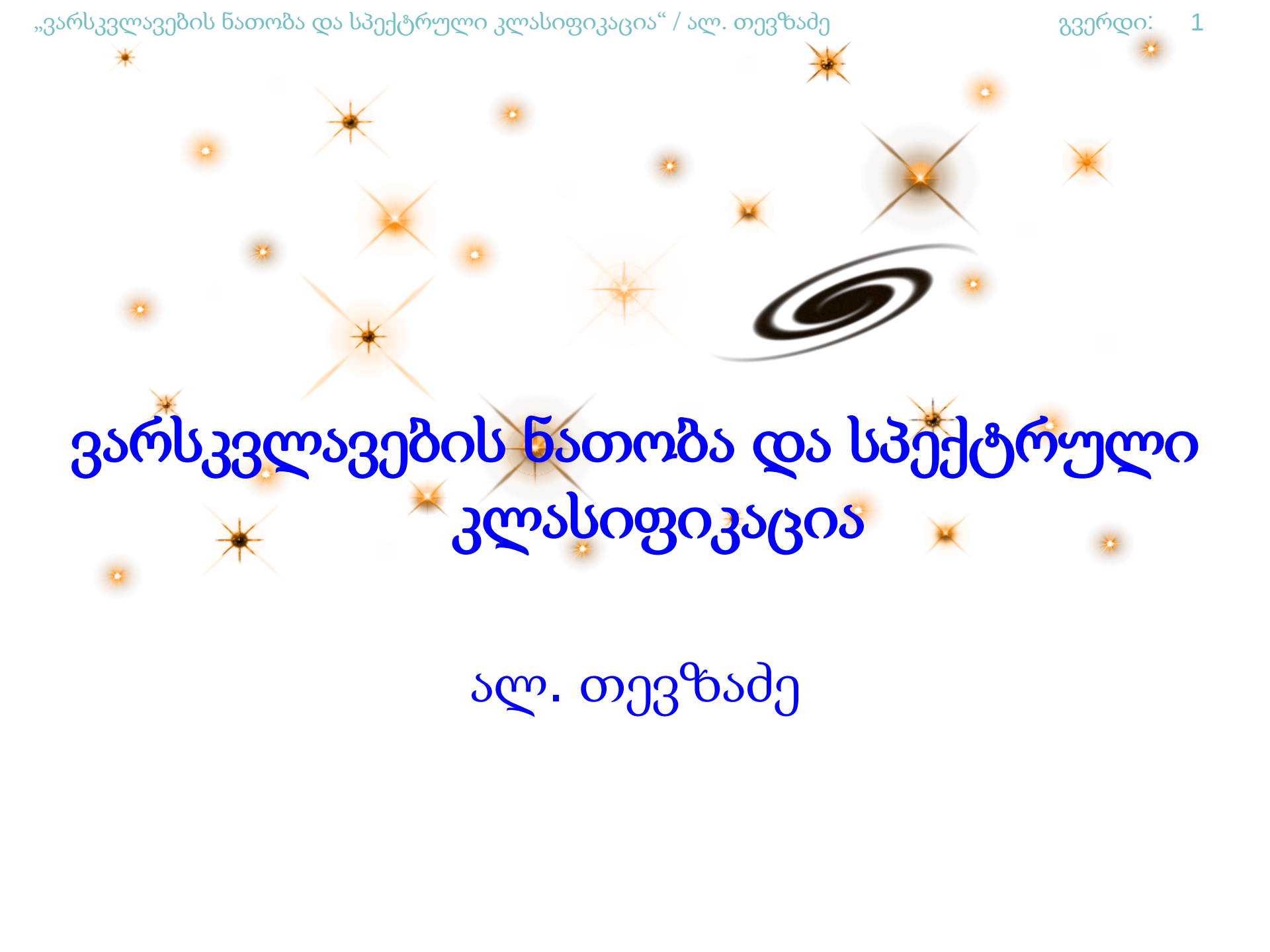




ვარსკვლავების ნათობა და სპექტრული კლასიფიკაცია

ალ. თევზაძე

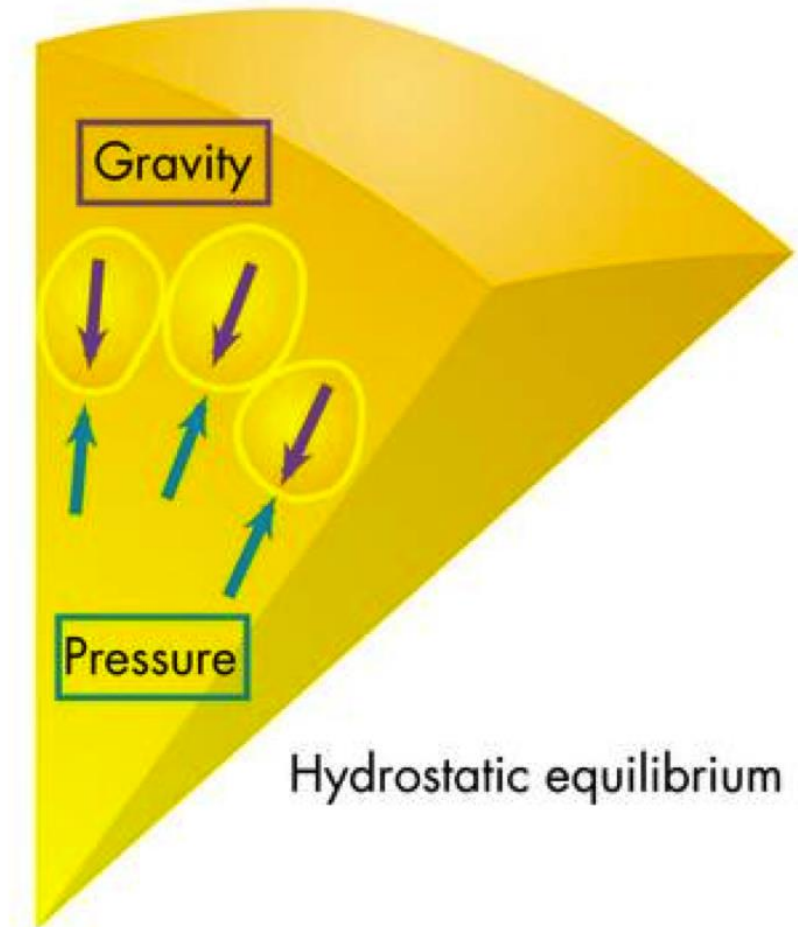
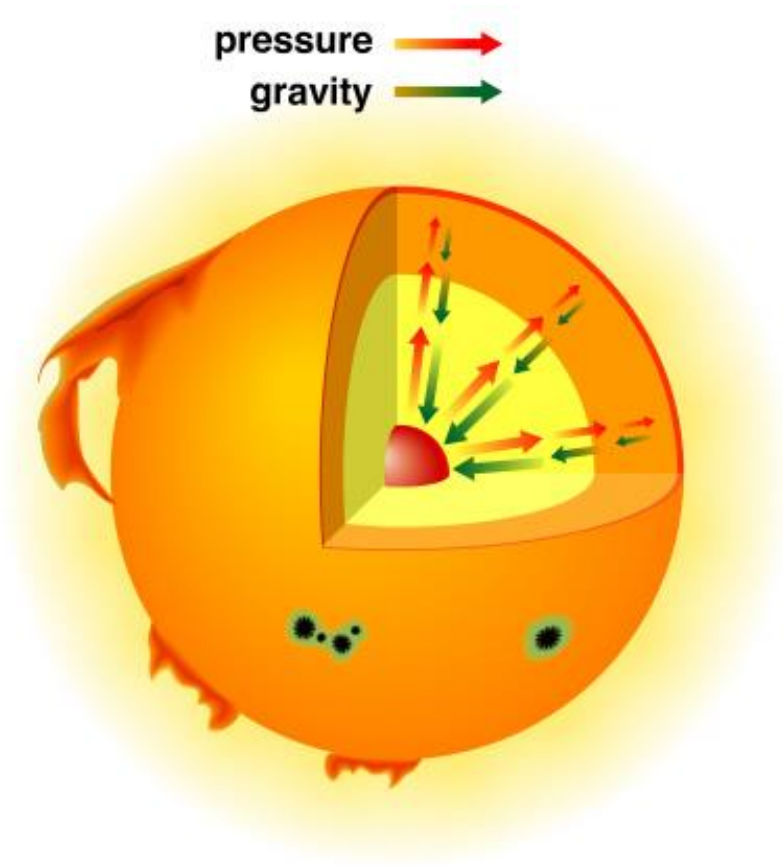
ვარსკვლავები



სხვადასხვა სიკაშკაშის და ფერის ობიექტები

ვარსკვლავები

ჰიდროსტატიკური წონასწორობა



ნათობის ენერგიის წყაროები

უძრავობის ენერგია: $E_0 = m C^2$

ბირთვული დაშლა (ურანი) $\sim 0.1\% E_0$

თერმობირთვული სინთეზი (წყალბადი) $\sim 0.5\% E_0$

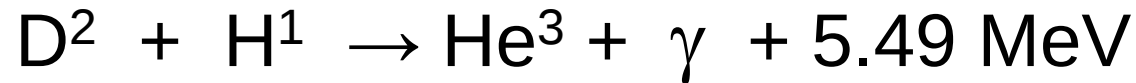
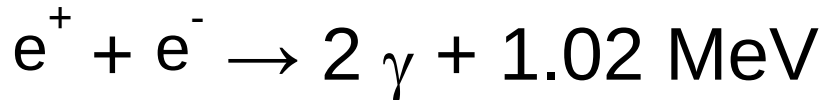
მსუბუქი ელემენტების ბირთვული შერწყმა
და მძიმე ქიმიური ელემენტების სინთეზი
ენერგიის გამოყოფით

ვარსკვლავური თერმობირთვული სინთეზი

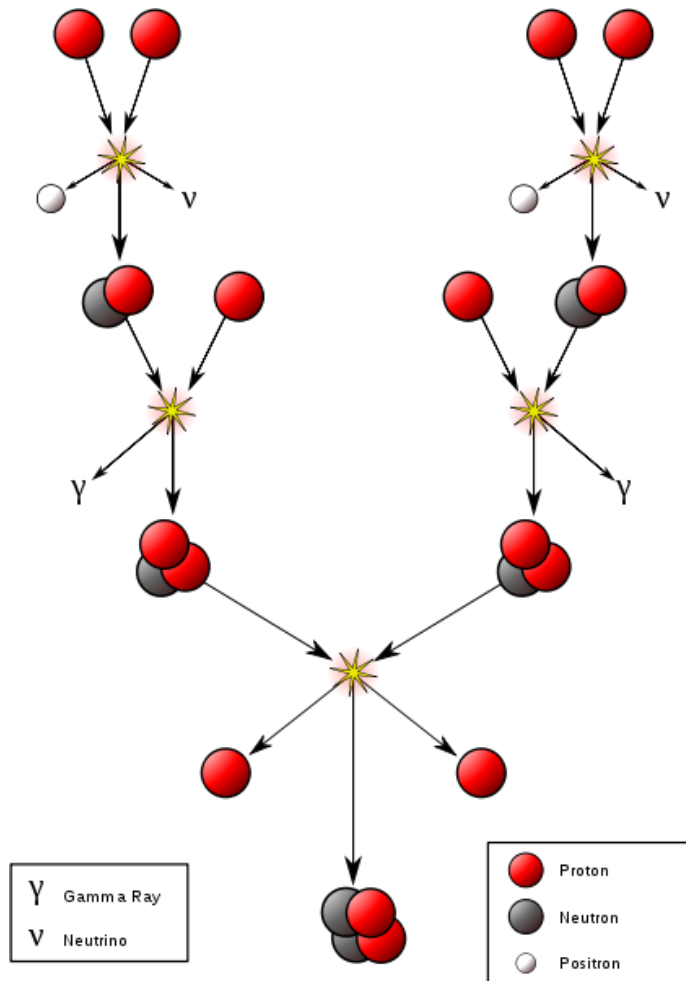
პროტონ პროტონული (p-p) ჯაჭვი

ტემპერატურა ვარსკვლავის ცენტრში: **$5 - 15 \times 10^6 \text{ K}$**

პროტონ-პროტონული ჯაჭვი



წყალბადი $\rightarrow$ ჰელიუმი + ენერგია



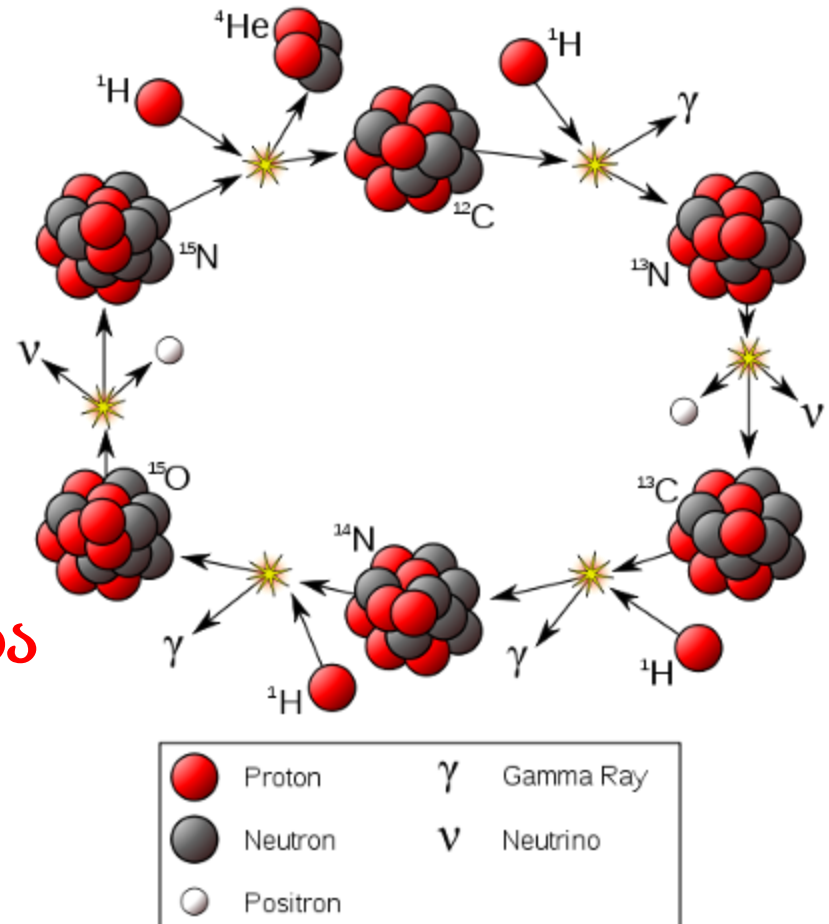
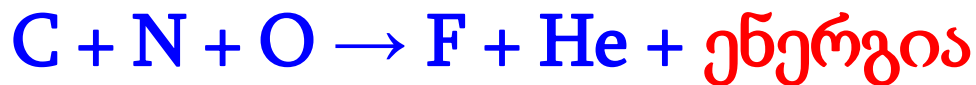
CNO ციკლი ($M > 1.5 M_{\odot}$)

ტემპერატურა ვარსკვლავის ცენტრში: $> 20 \times 10^6 \text{ K}$

C - ნახშირბადი

N – აზოტი

O - ჟანგბადი



ვარსკვლავების ნათობა

უარყოფითი სითბოტევადობის ობიექტები

$$C < 0$$

ენერგიის წარმოების ფუნქცია: $E \sim T^n$ ($n=4.6-16.7$)

PP-Chain Parameters

$$\epsilon_{pp} = \rho X^2 \epsilon_{0_{pp}} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{n_{pp}}$$

$$n_{pp} = 4.6$$

$$X = 0.71$$

$$\epsilon_{0_{pp}} = 0.068 \text{ erg g}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

$$T_0 = 10^7$$

CNO-Cycle Parameters

$$\epsilon_{CNO} = \rho X X_{CNO} \epsilon_{0_{CNO}} \left(\frac{T_6}{25} \right)^{n_{CNO}}$$

$$n_{CNO} = 16.7$$

$$X_{CNO} = \frac{2}{3} Z \quad Z = 0.02$$

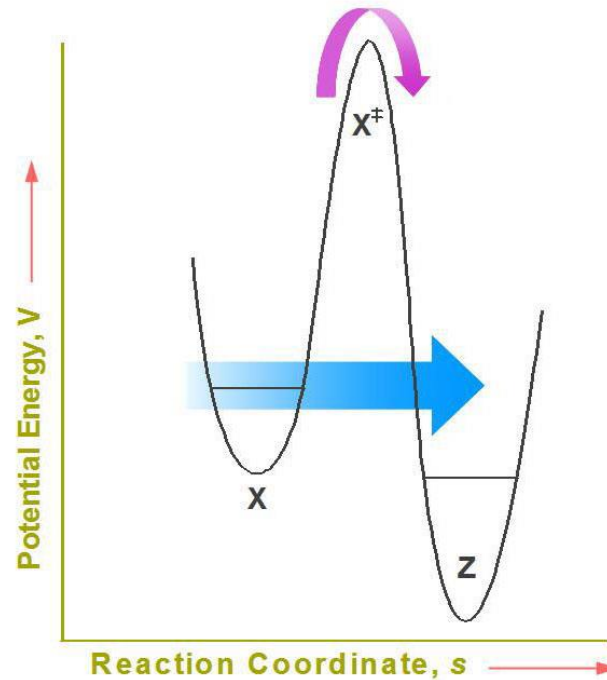
$$\epsilon_{0_{CNO}} = 2.2 \times 10^4 \text{ erg s}^{-1} \text{ g}^{-1}$$

ქვეკრიტიკული თერმობირთვული სინთეზი

$$T < T_{cr}$$

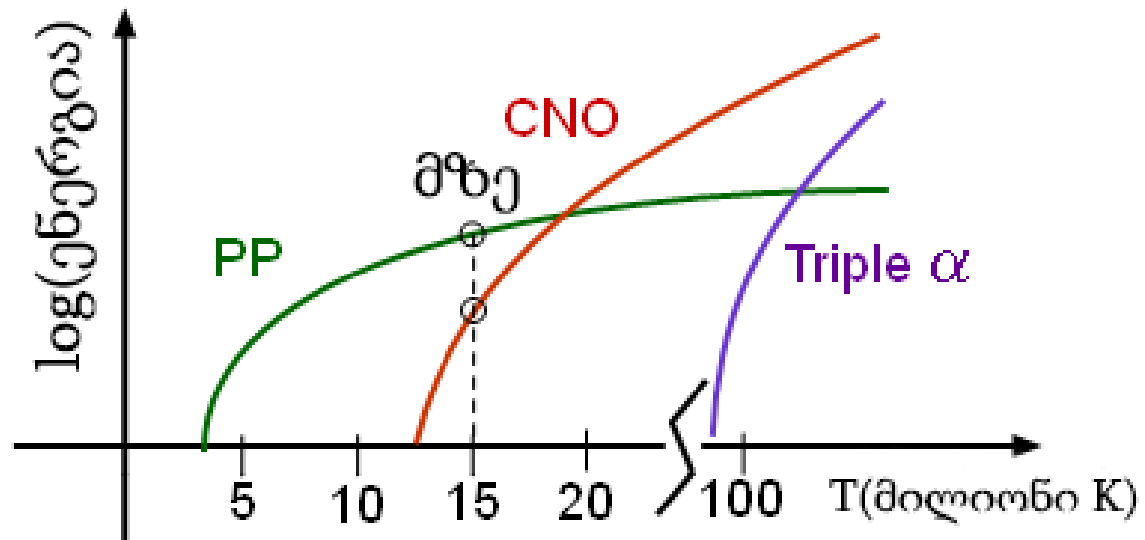


კვანტურ
მექანიკური
ტუნელირება



თერმობირთვული სინთეზი

ვარსკვლავების
თერმობირთვული
ენერგიის წყაროები



PP და CNO ჯაჭვების წარმოებული ენერგიების
ტოლობა: $T = 18 \cdot 10^6 \text{ K}$

მზეში CNO ციკლით გიღებული ენერგია ($15 \cdot 10^6 \text{ K}$):

საერთო ენერგიის 2 – 7%.

ვარსკვლავების დაკვირვებადი თვისებები

სიკაშკაშე

(აბსოლუტური ნათობა, მასა, რადიუსი)

ფერი

(ზედაპირული ტემპერატურა, სპექტრი, ქიმიური შემადგენლობა, ...)

მანძილი დედამიწამდე

(მდებარეობა, ხილული ნათობა)

ოპტიკური სისტემატიზაცია

აბსოლუტური ნათობა:

ვარსკვლავის ოპტიკური გამოსხივება;

ხილული ნათობა:

დედამიწამდე მოსული სინათლე;

დედამიწიდან დაკვირვებები:

მანძილი დედამიწამდე + ატმოსფერული შთანთქმა

ჰიპარქოს სისტემა: 6 სიდიდის ვარსკვლავები;

თანამედროვე სისტემა: **ვარსკვლავიერი სიდიდე**

ვარსკვლავიერი სიდიდე

ვარსკვლავის ზილული ნათობის მახასიათებელი
სიდიდე

$$m = -2.5 \log (F/F_0)$$

m – ვარსკვლავიერი სიდიდე

F – ოპტიკური ნაკადი

F_0 – ნორმირება საყრდენ ვარსკვლავზე

საყრდენი ვარსკვლავი: ვეგა

ლოგარითმული სკალა

$$m_1 - m_2 = -5, \quad F_1 / F_2 = 100$$

$$m_1 - m_2 = -10, \quad F_1 / F_2 = 10000$$



ზოგიერთი ვარსკვლავიერი სიდიდე

-26.73	მზე
-12.774	სავსე მთვარე ($L_{\text{მზე}} / 450\,000$)
-4.67	ვენერა (მაქს. ხილული სიდიდე)
-4	დღის განმავლობაში დანახვადი სიდიდე: დღის ცის (ცისფერი) ნათება
-2.94	იუპიტერი
-2.91	მარსი

ზოგიერთი ვარსკვლავიერი სიდიდე

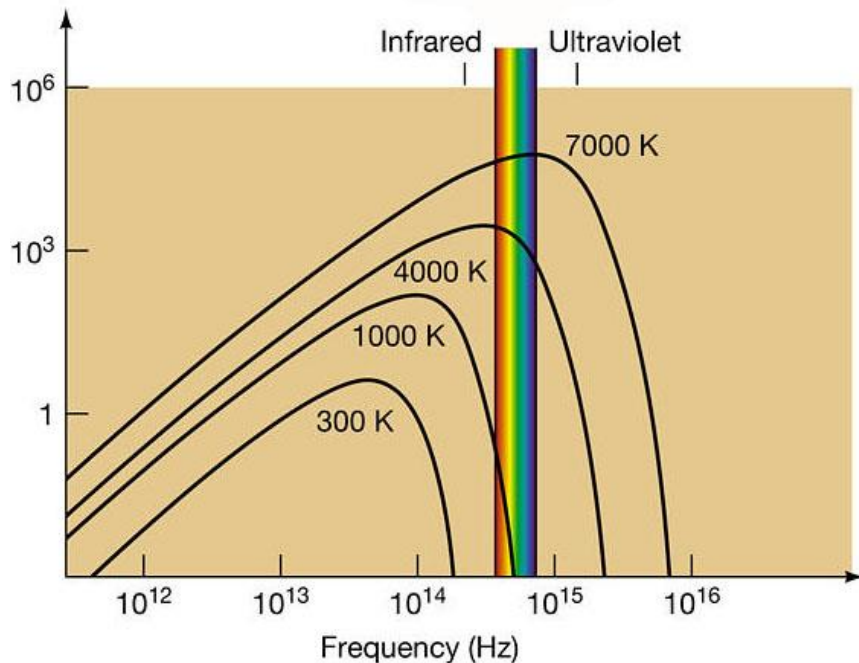
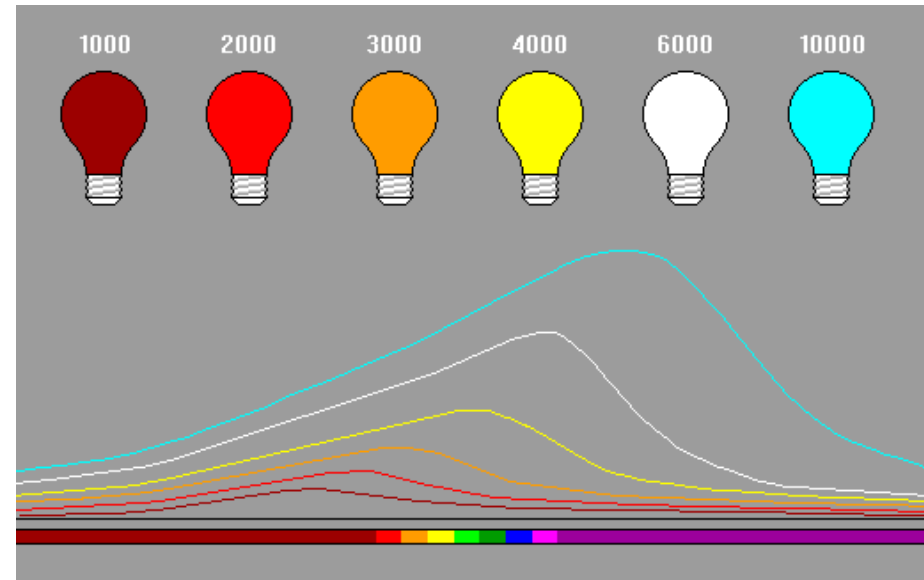
- 1.47 სირიუსი (მზის შემდეგ ყველაზე კაშკაშა ვარსკვლავი)
- 0 ვეგა (საყრდენი ხილული სიდიდე)
- 3...4 ქალაქიდან შეუიარაღებული თვალით ხილვის ზღვარი
- 5.42 ურანი (პლანეტა, მაქს. ნათობა)
- 6.5 ღამის ცაზე თვალით ხილვის ზღვარი

ზოგიერთი ვარსკვლავიერი სიდიდე

7.78	ნეპტუნი (პლანეტა, მაქს. ნათება)
13.67	პლუტონი (ჯუჯა პლანეტა, მაქს. ნათება)
27	8 მეტრიანი ოპტიკური ტელესკოპით დედამიწის ზედაპირიდან შეღწევადობის ზღვარი
31.5	ჰაბლის კოსმოსური ტელესკოპის შეღწევადობის ზღვარი

ვარსკვლავთა სითბური გამოსხივება

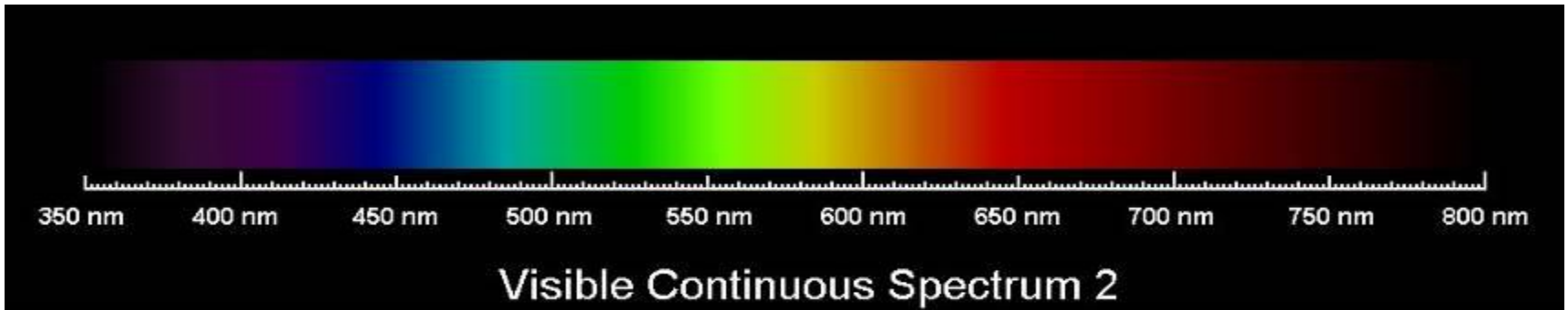
ვარსკვლავის ფერი:
ეფექტური ტემპერატურა
ვარსკვლავის ზედაპირზე



გამოსხივების სპექტრი:
გამოსხივების ინტენსივობა
სხვადასხვა ტალღის
სიგრძეზე (სიხშირეზე)

სითბური გამოსხივების სპექტრი

უწყვეტი სპექტრი (სითბური გამოსხივება)



სხეულის გამოსხივების ფერი მიგვანიშნებს მის ტემპერატურაზე



სითბური გამოსხივების თვისებები

სტეფან-ბოლცმანის (*Stefan-Boltzmann*) კანონი:

$$F \sim T^4$$

ვინის (*Wien*) კანონი:

$$\lambda_{\text{პიკი}} \sim 1/T$$

F - გამოსხივების ინტენსივობა;

T - სხეულის ტემპერატურა;

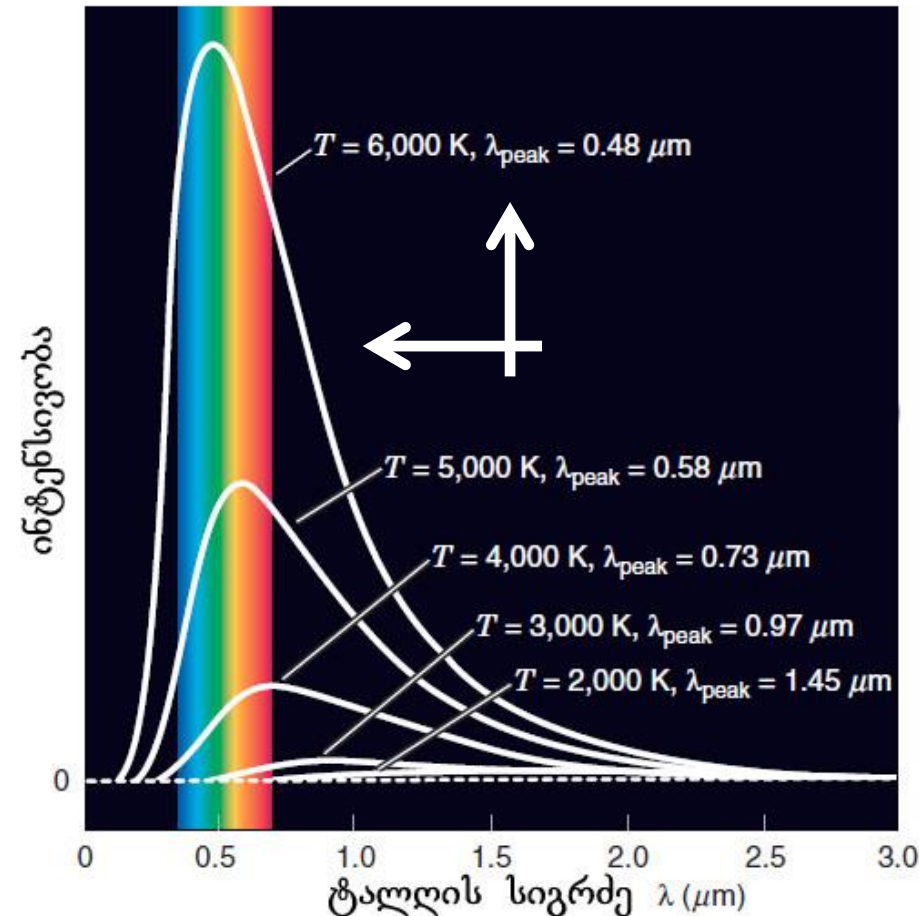
$\lambda_{\text{პიკი}}$ - გამოსხივების პიკის ტალღის სიგრძე;

ვარსკვლავის ტემპერატურის 2-ჯერმატება იწვევს
გამოსხივების ინტენსივობისმატებას 16-ჯერ

სითბური გამოსხივების თვისებები

სხეულის გაცხელება იწვევს მისი სითბური გამოსხივების სპექტრის:

1. ინტენსივობის ზრდას;
2. ინტენსივობის პიკის წანაცვლებას მოკლე ტალღის სიგრძეებისაკენ (სპექტრის იისფერი კიდე)
„სპექტრის გაღურჯება“

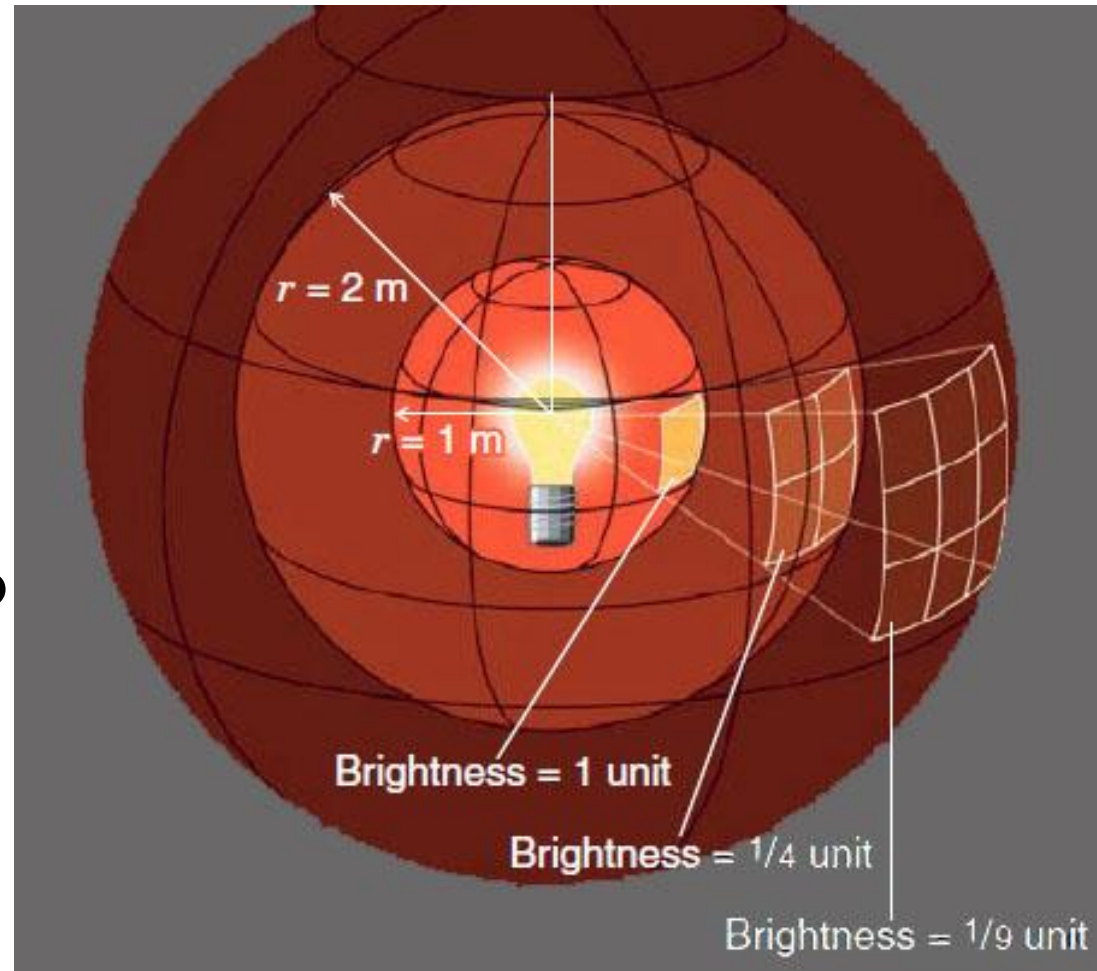


ვარსკვლავის ფერის ფორმირება

ვარსკვლავის ფერი
განისაზღვრება
მისი ზედაპირის
ტემპერატურით.

ვარსკვლავის ცენტრში
მუდმივი
ტემპერატურის
პირობებში
ზედაპირის

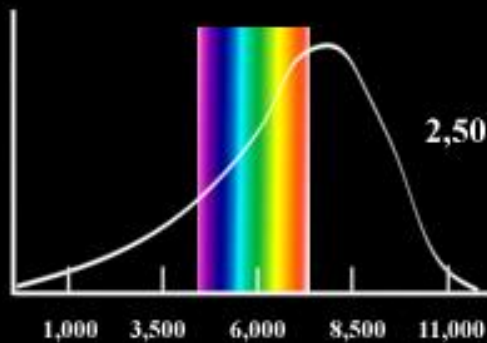
ტემპერატურა კლებულობს ვარსკვლავის რადიუსის
ზრდასთან ერთად (მაგ. წითელი გიგანტები)



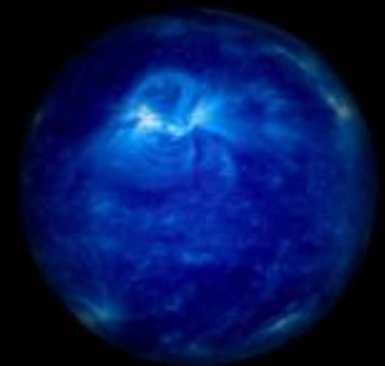
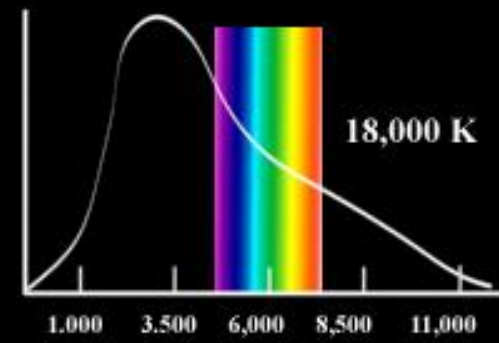
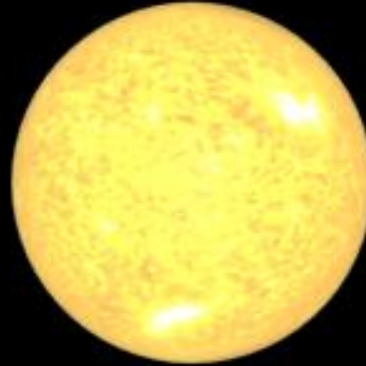
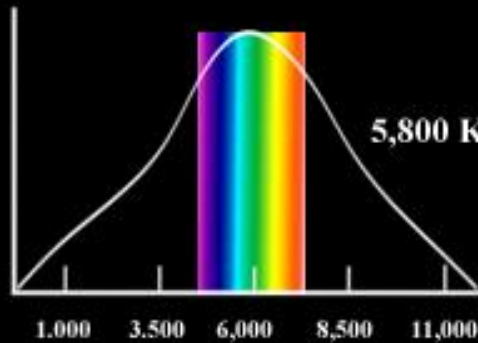
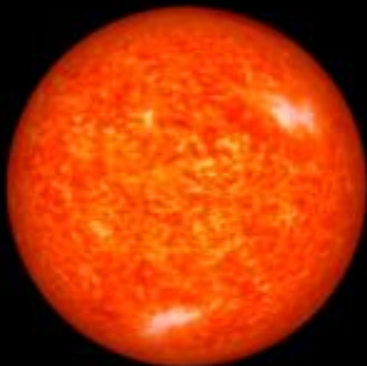
ვარსკვლავის ფერის ფორმირება

ვარსკვლავის ფერს განსაზღვრავს თუკი მისი გამოსხივების რა ნაწილი თავსდება სპექტრის ოპტიკურ (ხილულ) უბანში.

ფერები გაზვიადებულია



ტალღის სიგრძე



სპექტრული ხაზების სერიები

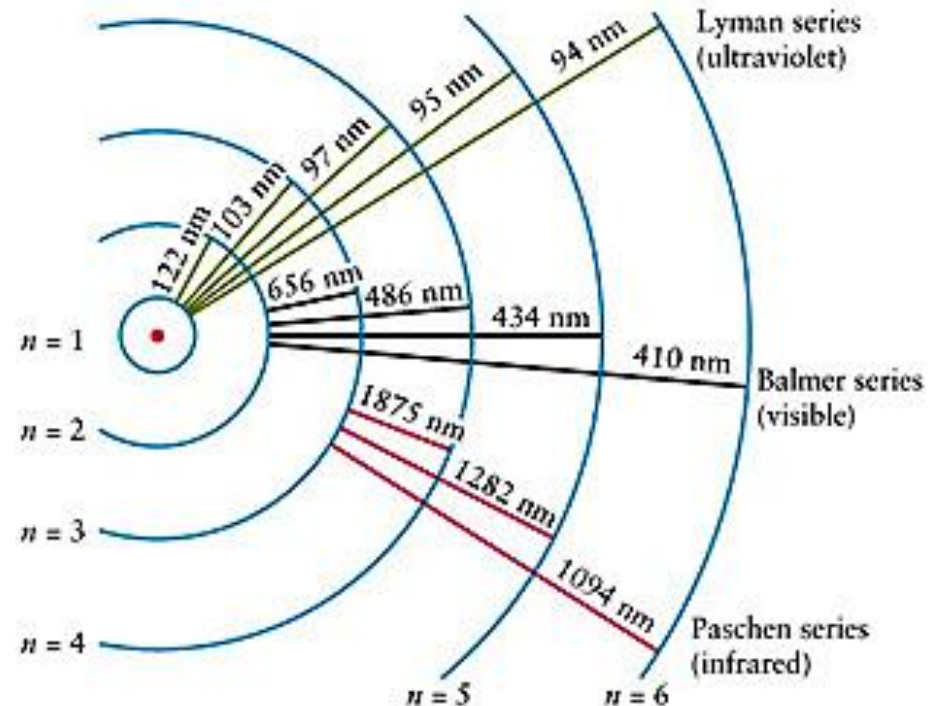
სპექტრული ხაზი:
ელექტრონის ერთი
ორბიტიდან მეორეზე
გადასვლა

ორბიტები და ხაზები:
დისკრეტული
სერიები:

ლაიმანის, ბალმერის, პაშენის.

ფოტონის ენერგია: $E = h\nu = h C/\lambda$

h - პლანკის მუდმივა;



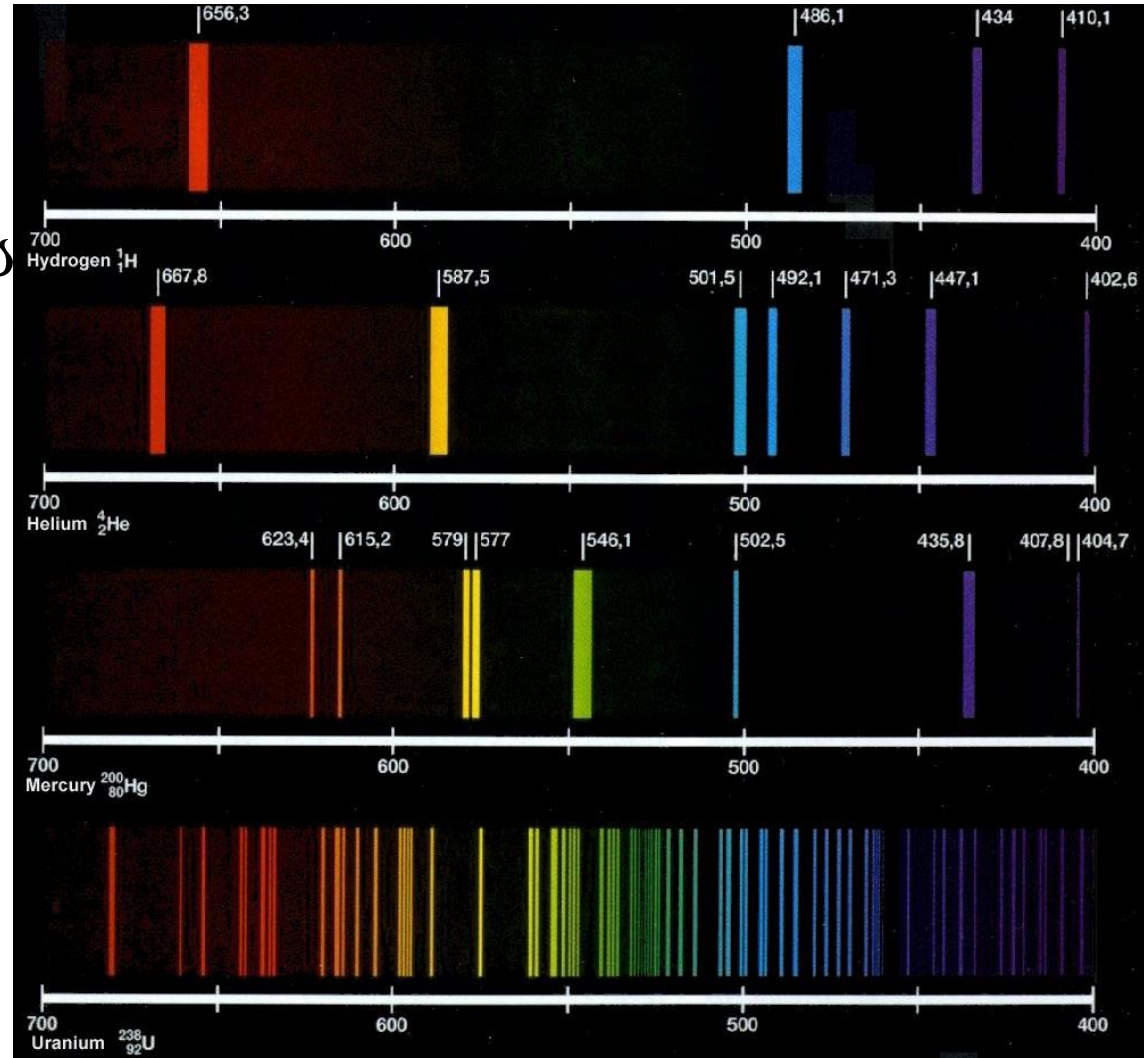
წყალბადის ატომის ბალმერის სერია

გამოსხივების სპექტრი

სპექტრული ხაზები (ქიმიური შემადგენლობა)

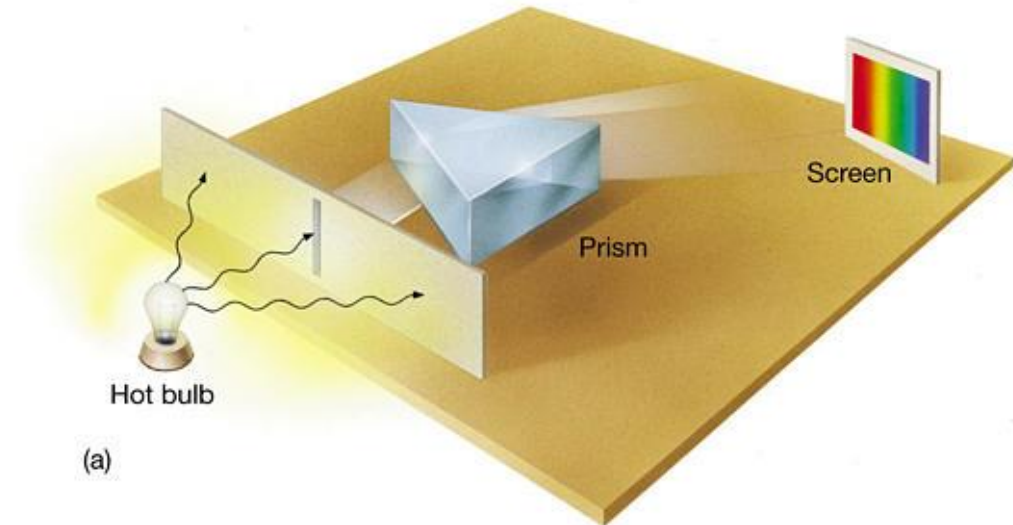
ყოველ ქიმიურ
ელემენტს ახასიათებს
ხაზების უნიკალური
თანმიმდევრობა

სპექტრული ხაზები
სხვადასხვა
სიხშირეებზე



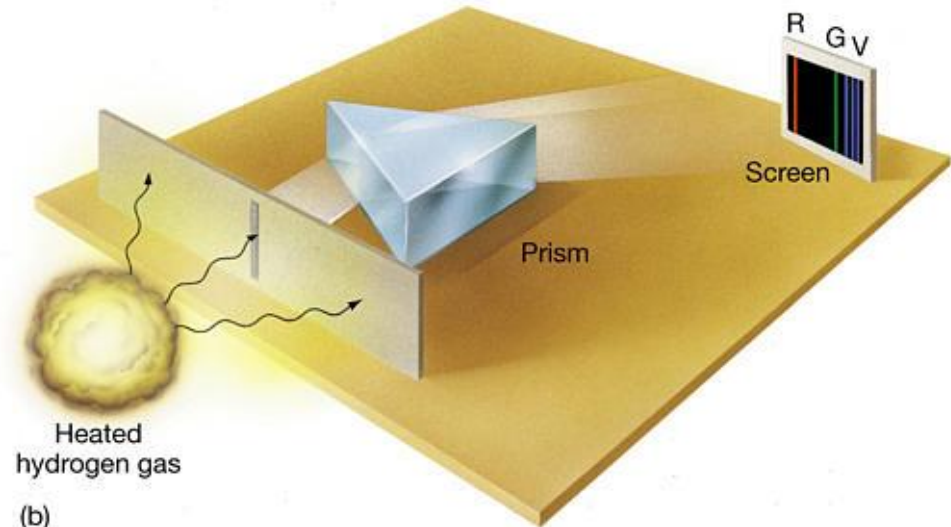
სპექტრული ანალიზი

გავარვარებული
ნათურის გამოსხივება:
უწყვეტი სპექტრი



(a)

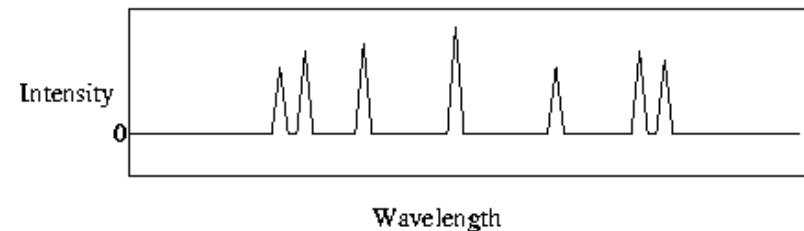
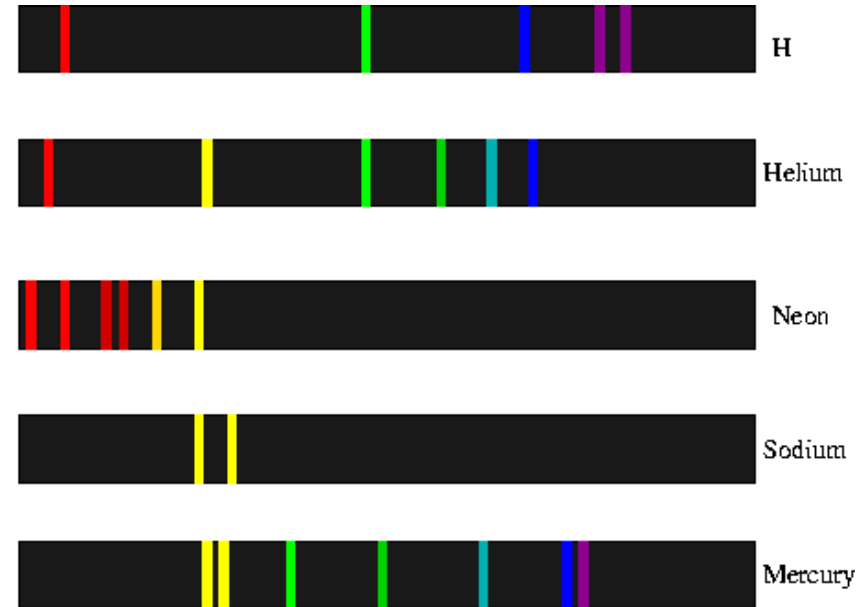
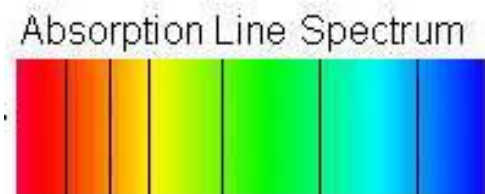
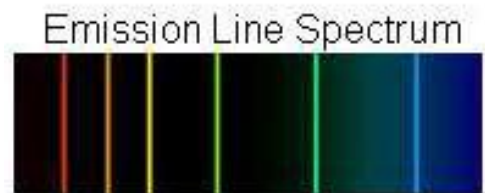
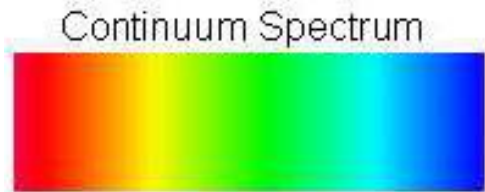
ცხელი წყალბადის
აირის გამოსხივება:
სპექტრული ხაზები



(b)

სპექტრული ანალიზი

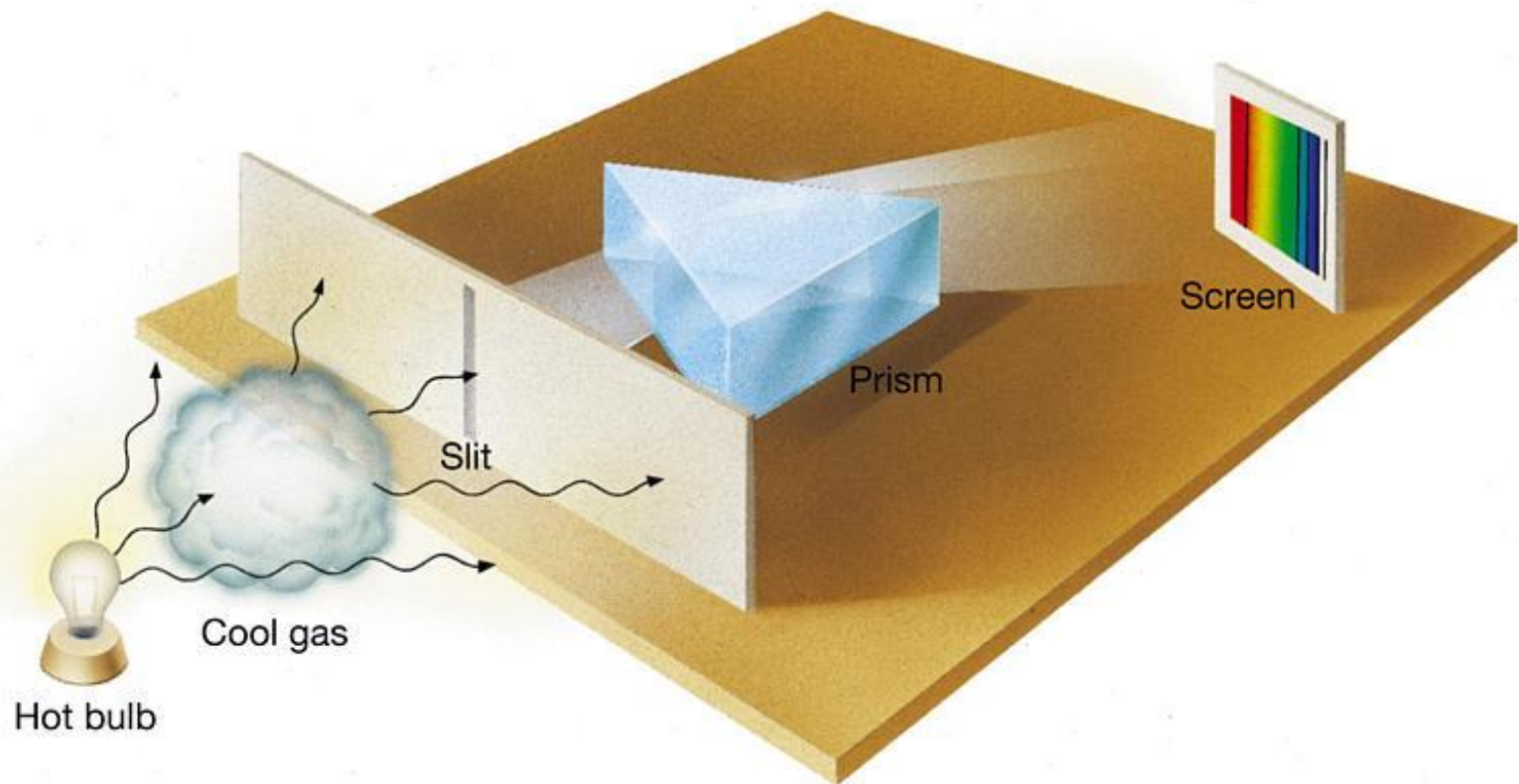
სპექტრული ხაზები:
გამომსხივებელი გარემოს
ქიმიური შემადგენლობა



გამოსხივების და
შთანთქმის ხაზები

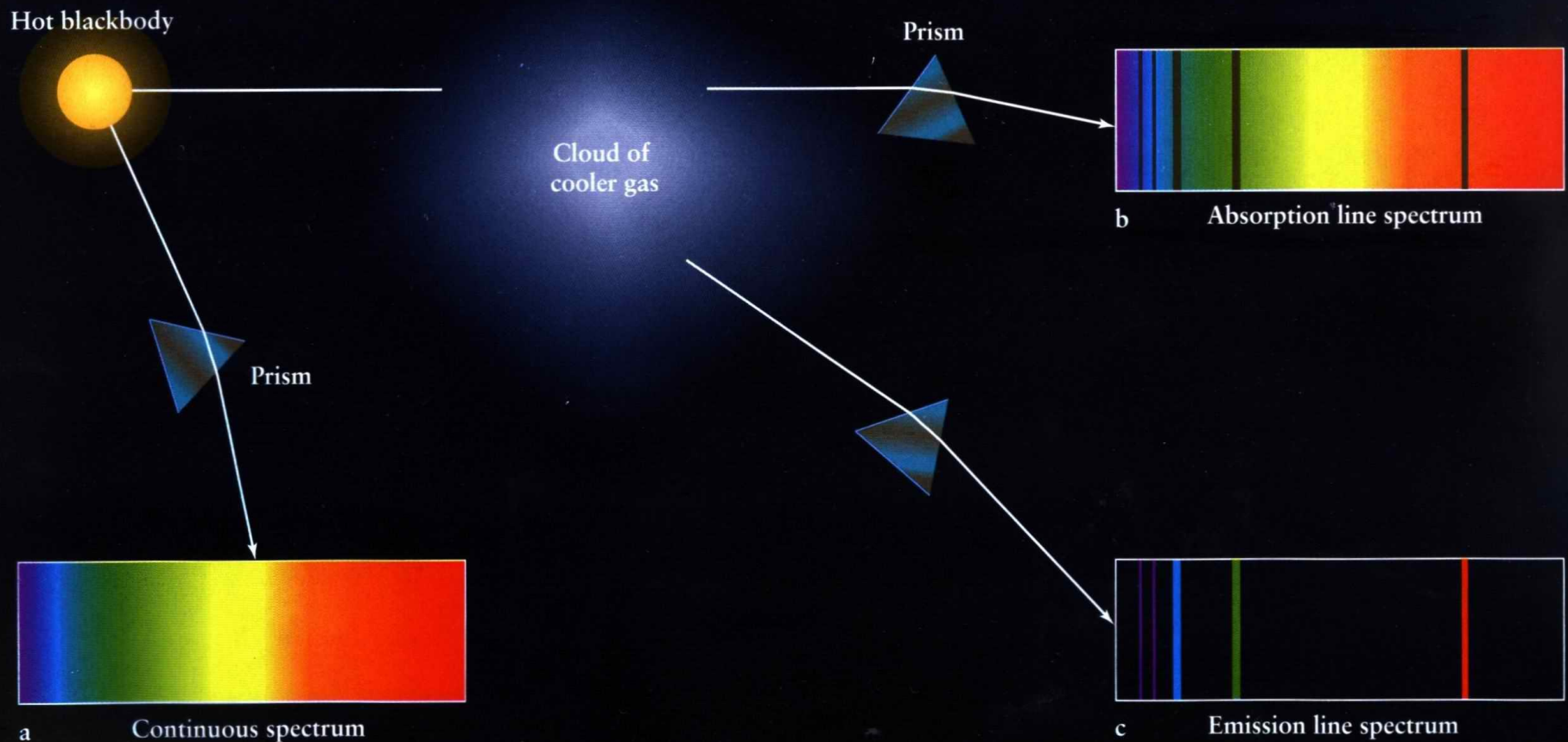
გამოსხივების და შთანთქმის ხაზები

უწყვეტი სპექტრის სინათლის განჭოლა ცივი წყალბადის აირში: უწყვეტი სპექტრი და წყალბადის შთანთქმის ხაზები



ციური სხეულების სპექტრი

სპექტრი იძლევა ინფორმაციას როგორც წყაროზე უფრო ცხელი, ასევე უფრო ცივი გარემოს შესახებ



იზოლირებული ვარსკვლავის სპექტრები

ფერი:

ვარსკვლავის
ეფექტური
ტემპერატურა

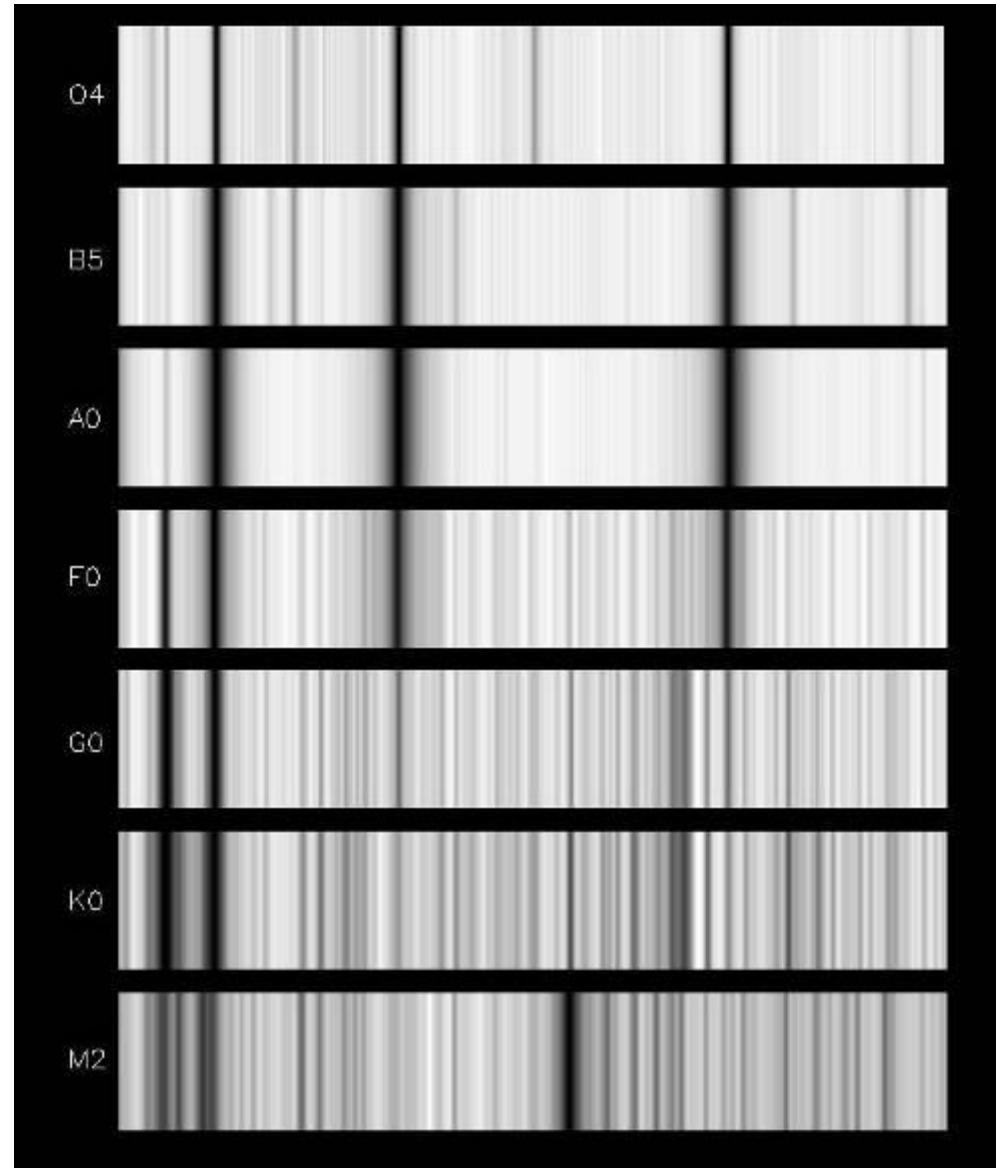
სპექტრი:

ქიმიური შემადგენლობა

წყალბადი;

მძიმე ელემენტები;

“მეტალურობა”

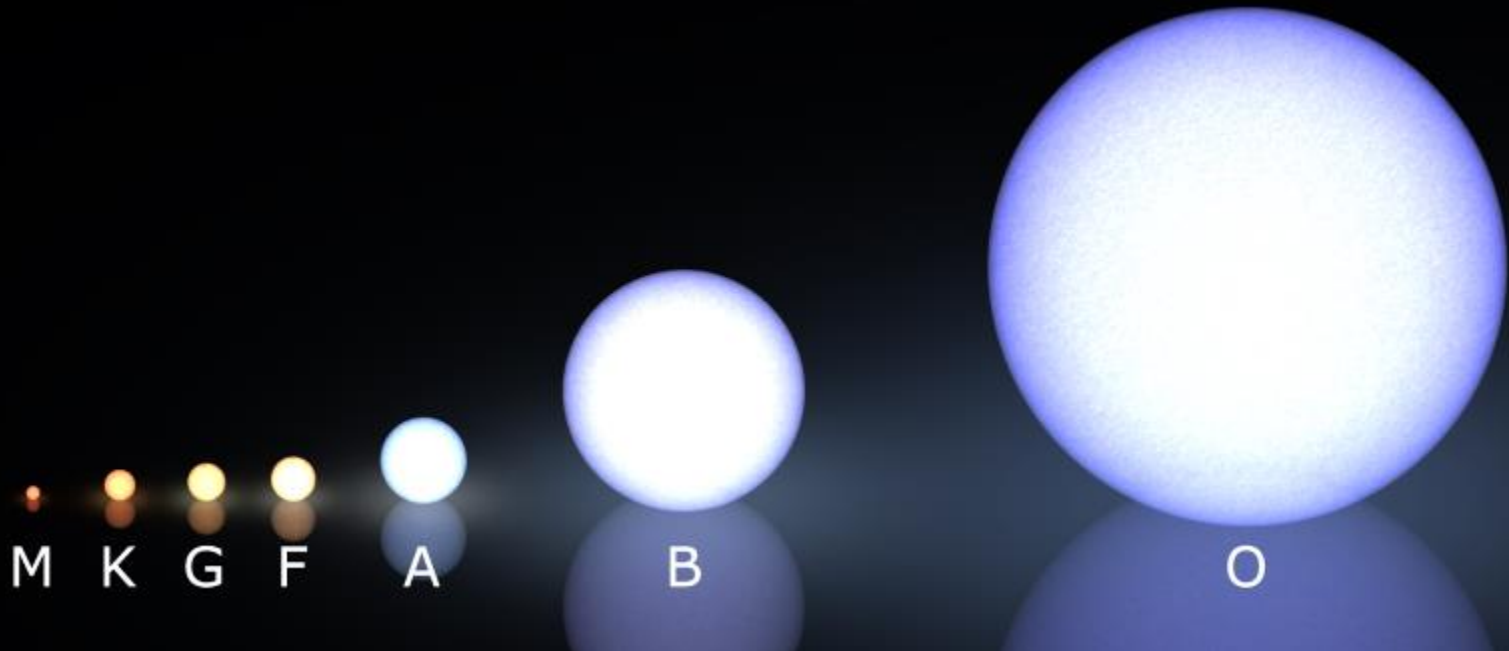


სპექტრული კლასიფიკაცია

	კლასი	ტემპერატ. ზერი	მასა რად.						
	Spectral Class	Effective Temperature (K)	Colour	H Balmer Features	Other Features	M/M_{Sun}	R/R_{Sun}	L/L_{Sun}	Main Sequence Lifespan
O	O	28,000 - 50,000	Blue	weak	ionised He ⁺ lines, strong UV continuum	20 - 60	9 - 15	90,000 - 800,000	1 - 10 Myr
B	B	10,000 - 28,000	Blue-white	medium	neutral He lines	3 - 18	3.0 - 8.4	95 - 52,000	11 - 400 Myr
A	A	7,500 - 10,000	White	strong	strong H lines, ionised metal lines	2.0 - 3.0	1.7 - 2.7	8 -55	400 Myr - 3 Gyr
F	F	6,000 - 7,500	White-yellow	medium	weak ionised Ca ⁺	1.1 - 1.6	1.2 - 1.6	2.0 - 6.5	3 - 7 Gyr
G	G	4,900 - 6,000	Yellow	weak	ionised Ca ⁺ , metal lines	0.85 - 1.1	0.85 - 1.1	0.66 - 1.5	7 - 15 Gyr
K	K	3,500 - 4,900	Orange	very weak	Ca ⁺ , Fe, strong molecules, CH, CN	0.65 - 0.85	0.65 - 0.85	0.10 - 0.42	17 Gyr
M	M	2,000 - 3,500	Red	very weak	molecular lines, eg TiO, neutral metals	0.08 - 0.05	0.17 - 0.63	0.001 - 0.08	56 Gyr

სპექტრული კლასები

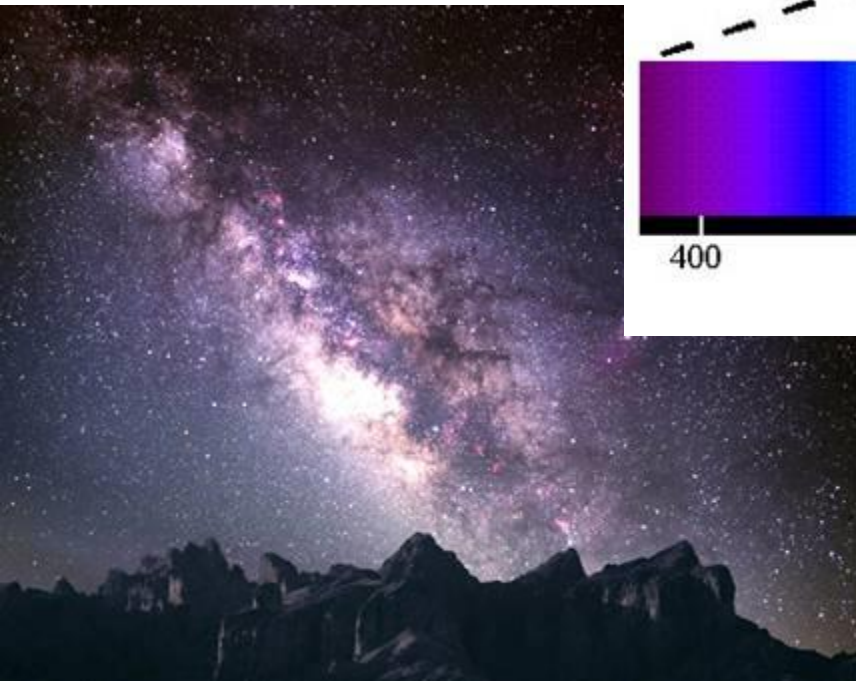
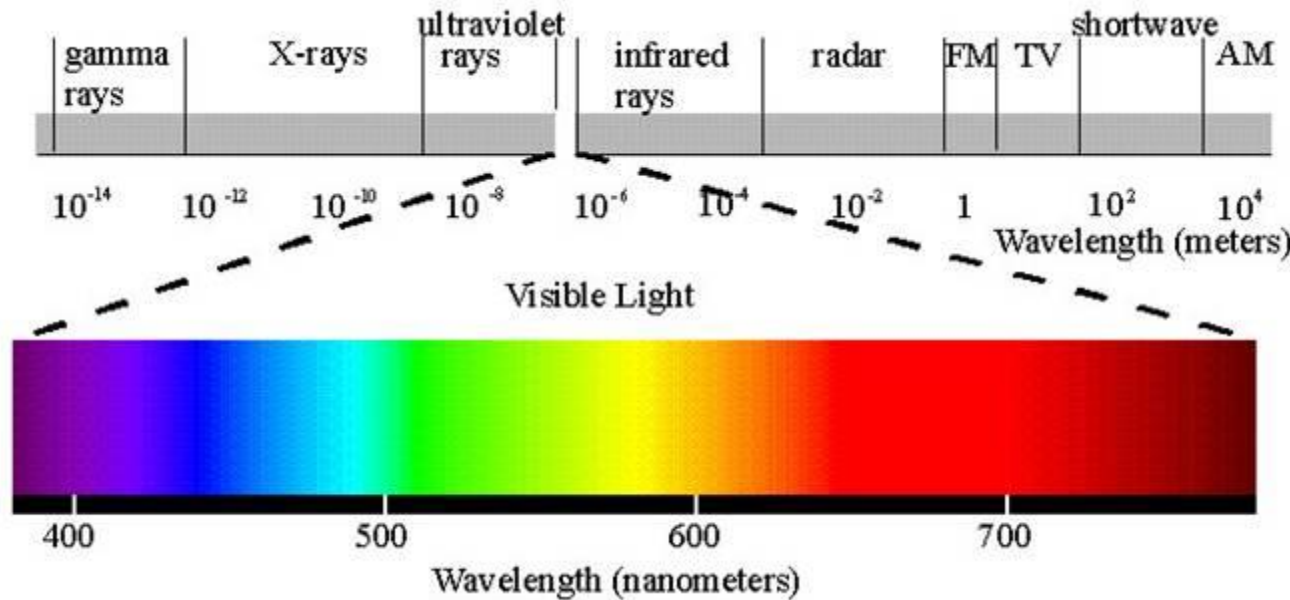
სხვადასხვა სპექტრული კლასის ვარსკვლავების
მასის, ფერის და ზომის პირობითი ვიზუალიზაცია



ხილული სამყარო

ადამიანის თვალი ხედავს ელექტრომაგნიტური სპექტრის მხოლოდ მცირე უბანს:

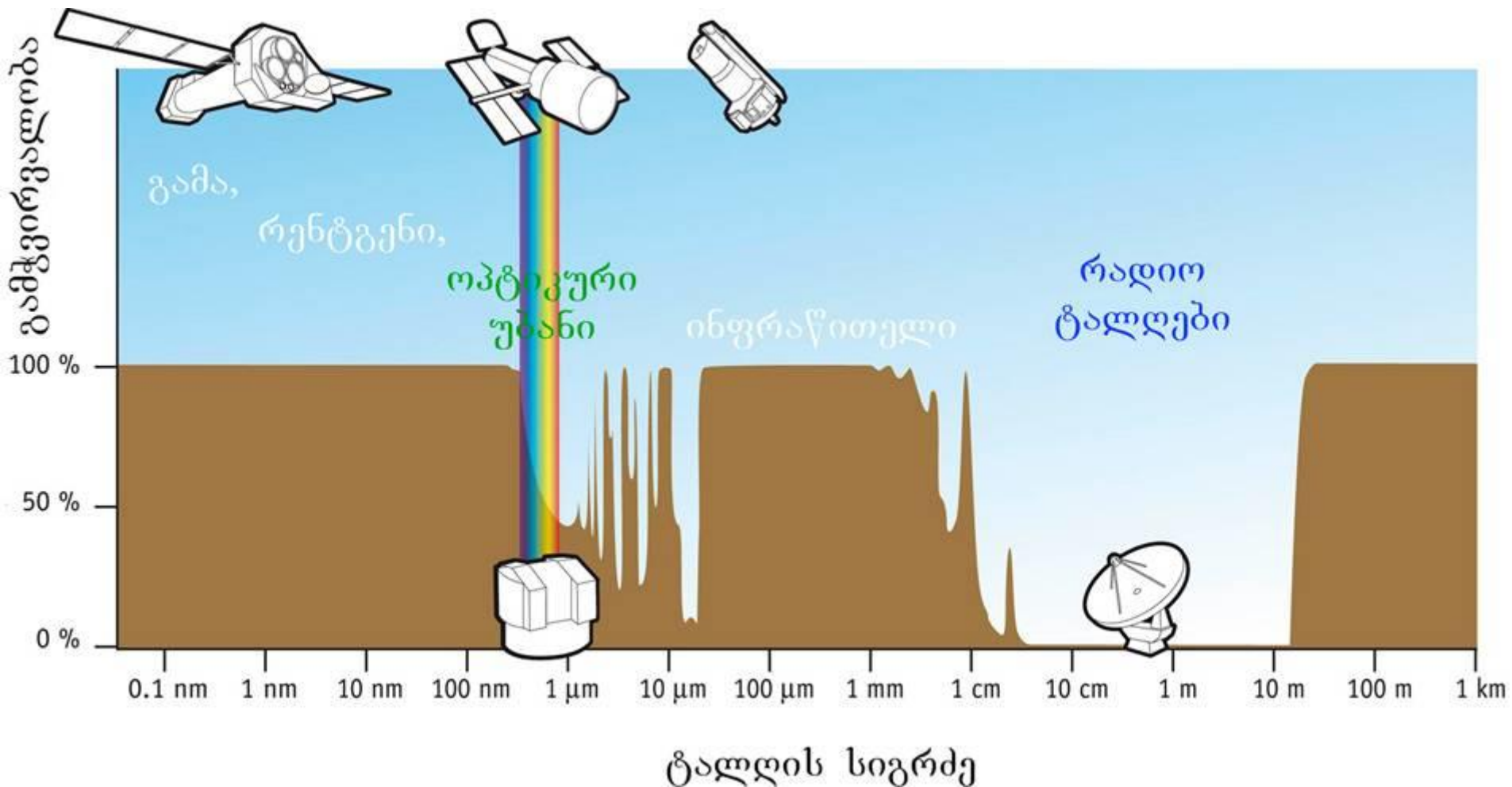
ოპტიკური
უბანი



ცის ოპტიკური გამოსახულება
ინფორმაციის მცირე ნაწილი

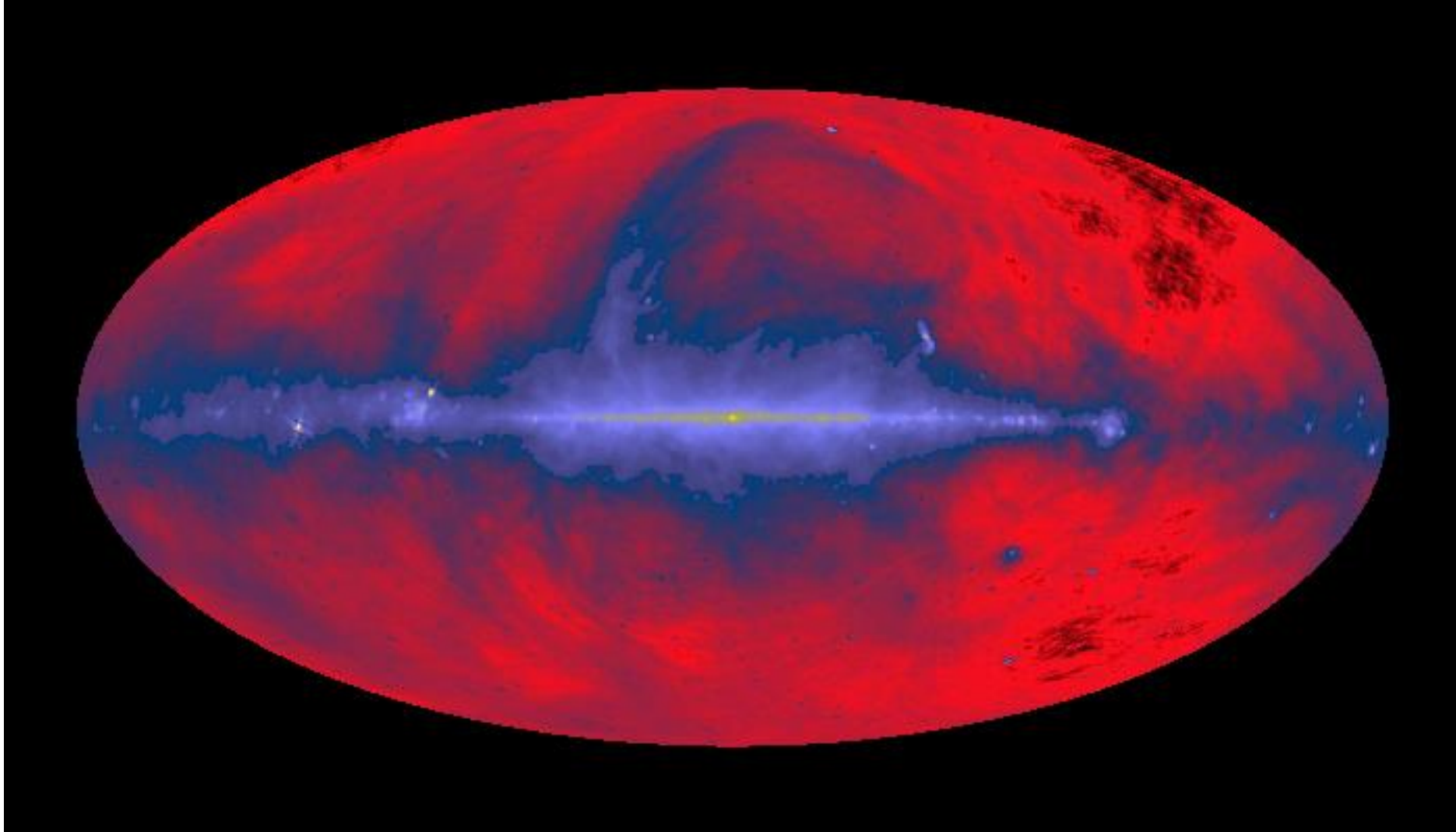
დაკვირვებები დედამიწიდან

ატმოსფეროს გამჭვირვალობა ელექტრომაგნიტური ტალღების სხვადასხვა დიაპაზონში



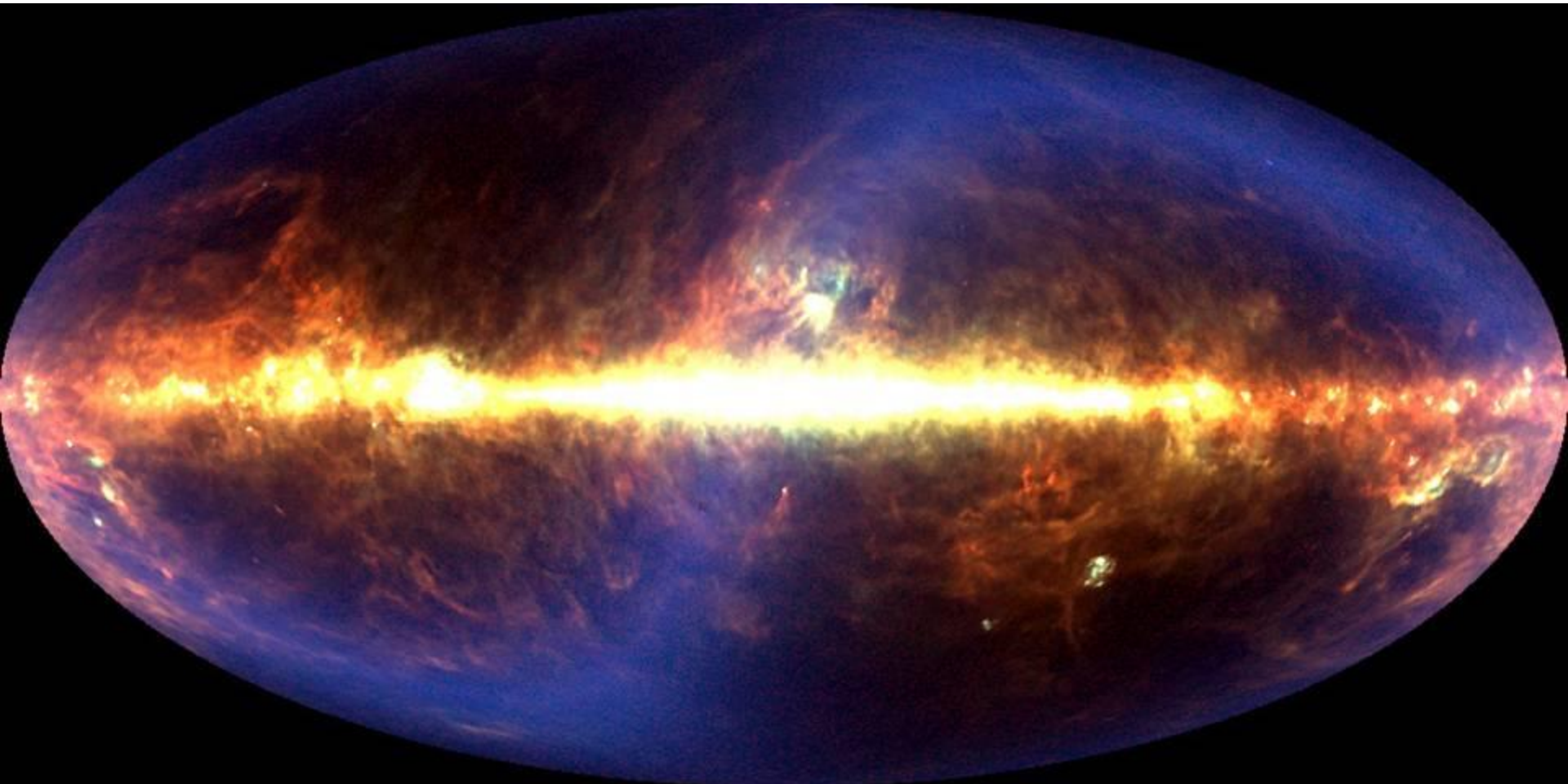
რადიო დიაპაზონი

ობიექტების ეფექტური ტემპერატურა: $\sim 1\text{K}$



ინფრაწითელი დიაპაზონი

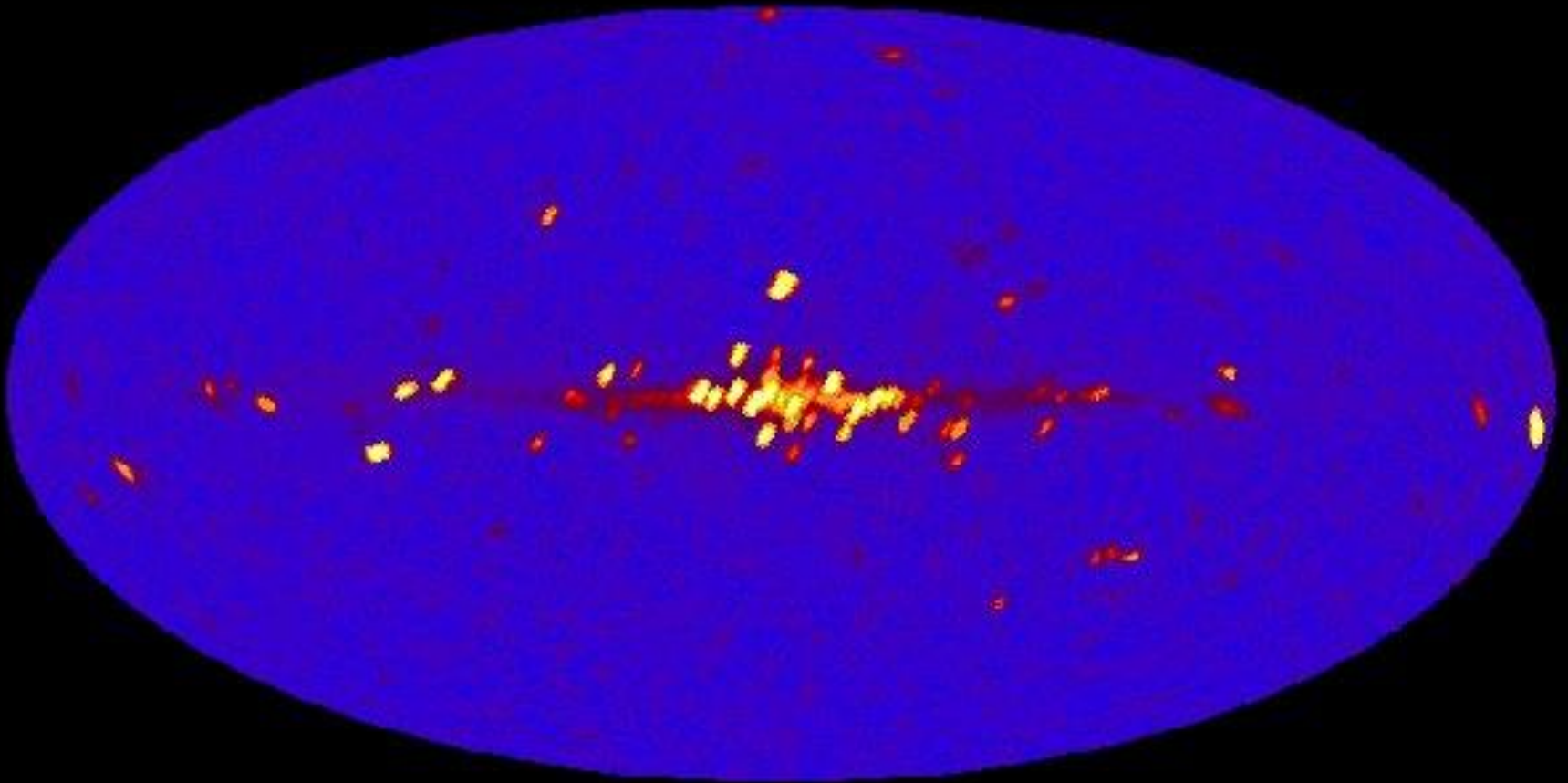
ობიექტების ეფექტური ტემპერატურა: $\sim 100\text{K}$



რენტგენული დიაპაზონი (X-ray)

ფოტონის ენერგია: 10^3 – 10^4 eV

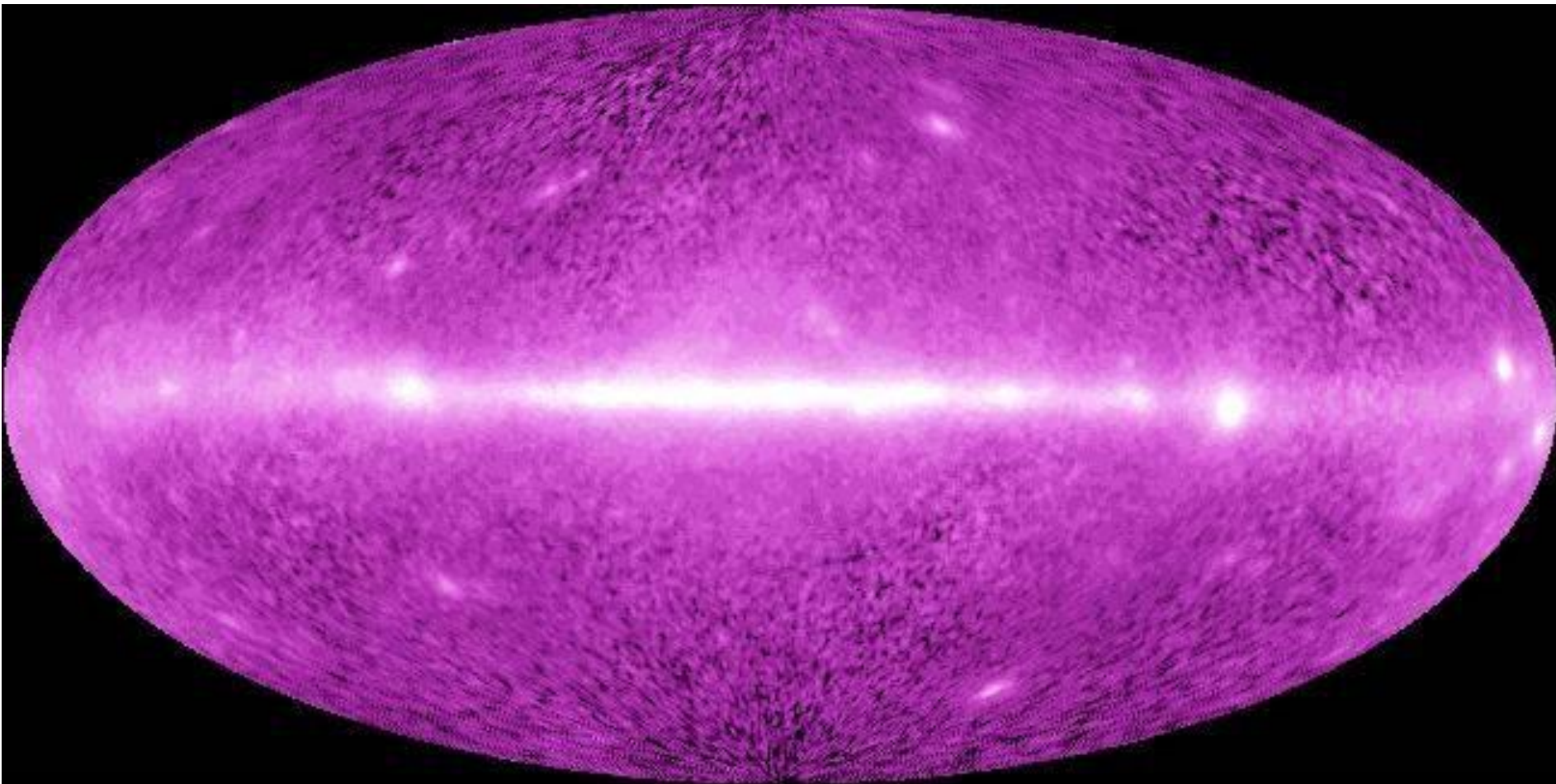
ობიექტების ეფექტური ტემპერატურა: ($\sim 10^8$ K)



გამა დიაპაზონი

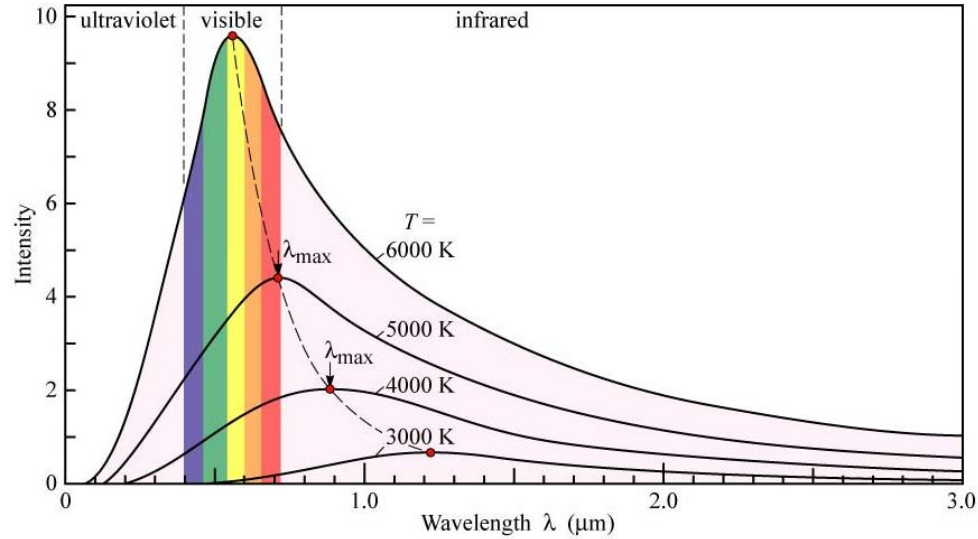
ფოტონის ენერგია: 10^6 – 10^9 eV

ობიექტების ეფექტური ტემპერატურა: ($\sim 10^{13}$ K)

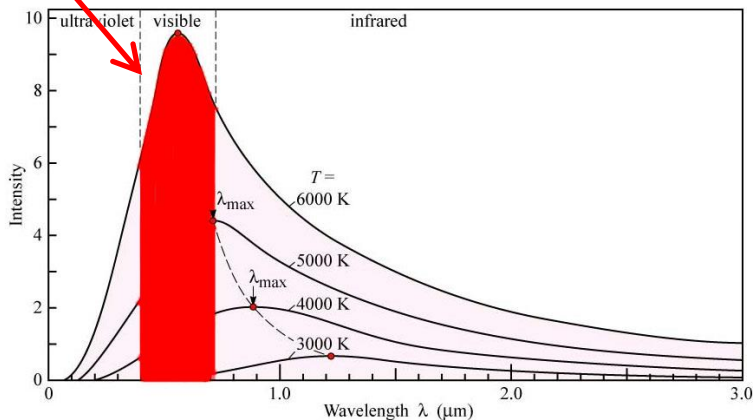


ვარსკვლავების გამოსხივება

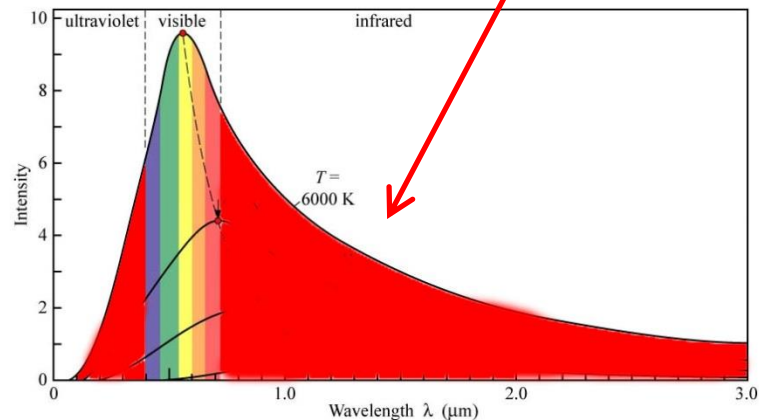
ვარსკვლავების გამოსხივება
მოიუცავს როგორც ხილულ,
ასევე ელ.მაგ. სპექტრის
სხვა უბნებს:



ხილული ნათობა;



უხილავი სპექტრი;



ბოლომეტრული სიდიდე

m - ვარსკვლავიერი სიდიდე:

ხილული ოპტიკური ნათობის საზომი ერთეული;

M - ბოლომეტრული სიდიდე;

ელ.მაგ. ტალღების ყველა დიაპაზონში მოსული
ჯამური ენერგიის საზომი ერთეული;

Δm - ბოლომეტრული შესწორება;

$$M = m + \Delta m$$

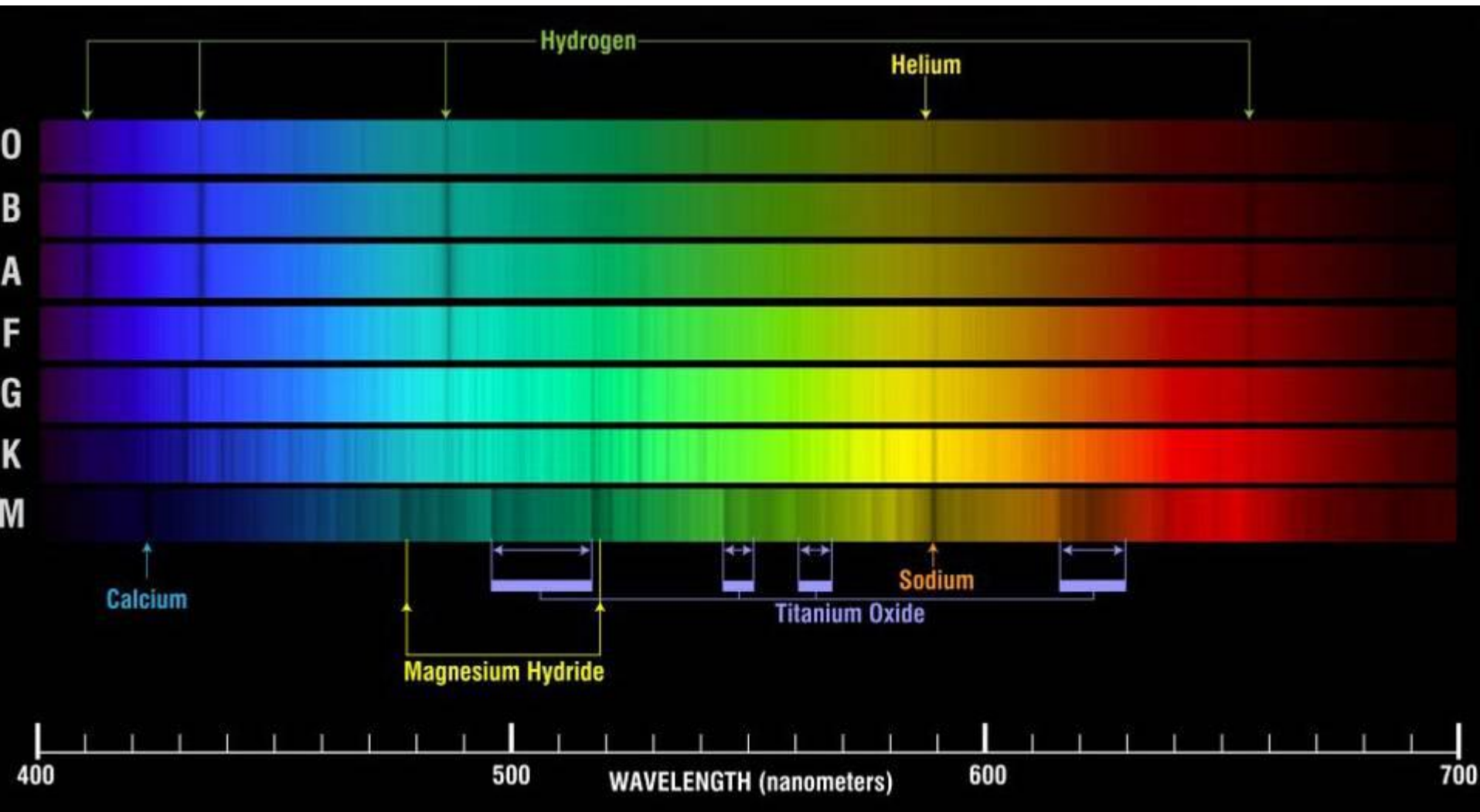
ბოლომეტრული შესწორება დამოკიდებულია
ვარსკვლავის ზედაპირის ტემპერატურაზე;

ბოლომეტრული შესწორებები

ბოლომეტრული შესწორებები სხვადასხვა სპექტრული კლასის ვარსკვლავებისათვის:

სპექტრული კლასი	ძირითადი თანმიმდევრობა	გიგანტები
O3	-4.3	-4.2
G0	-0.10	-0.13
G5	-0.14	-0.34
K0	-0.24	-0.42
K5	-0.66	-1.19
M0	-1.21	-1.28

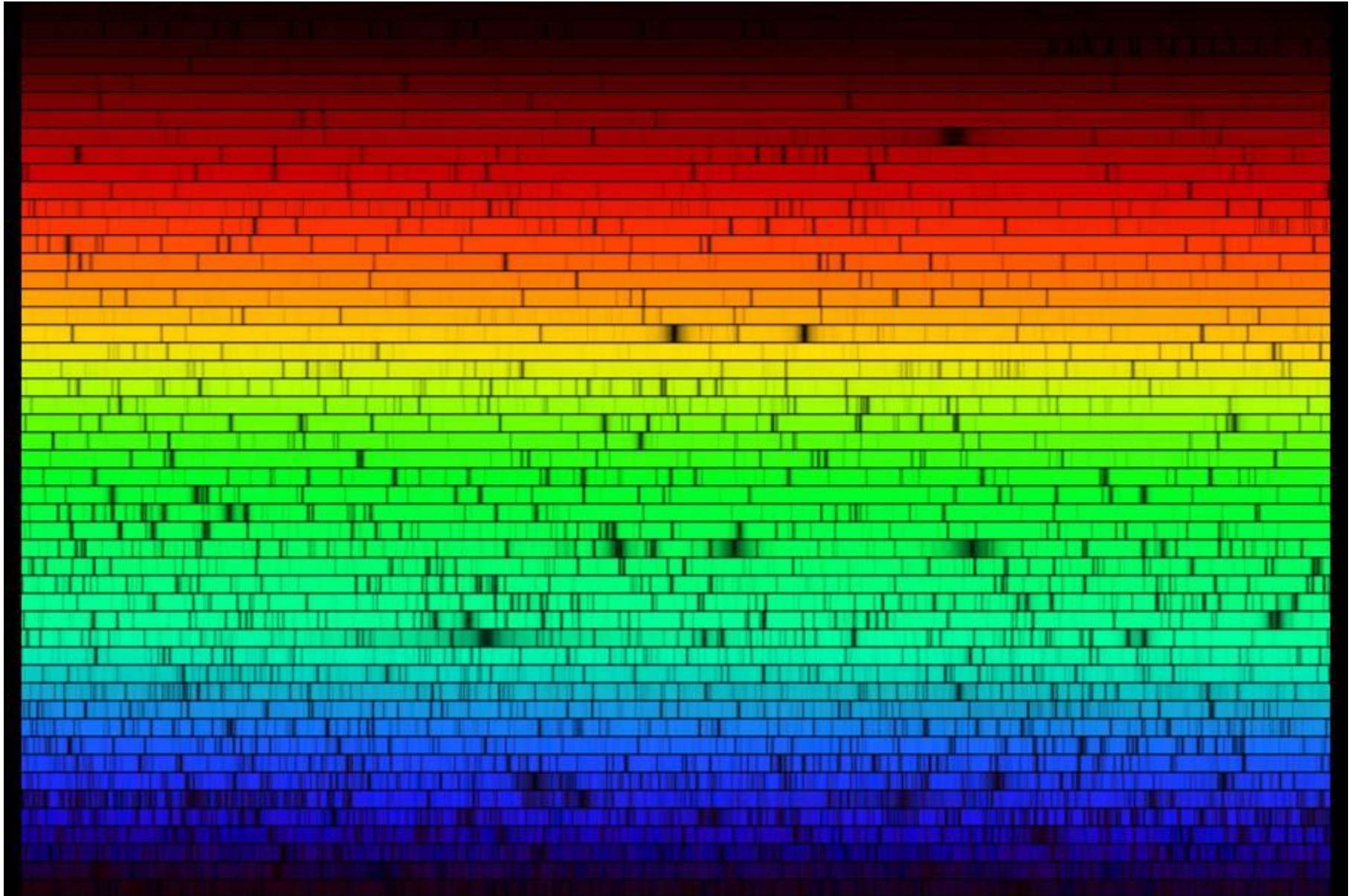
ტიპური სპექტრები



ვარსკვლავების ნათობის კლასები

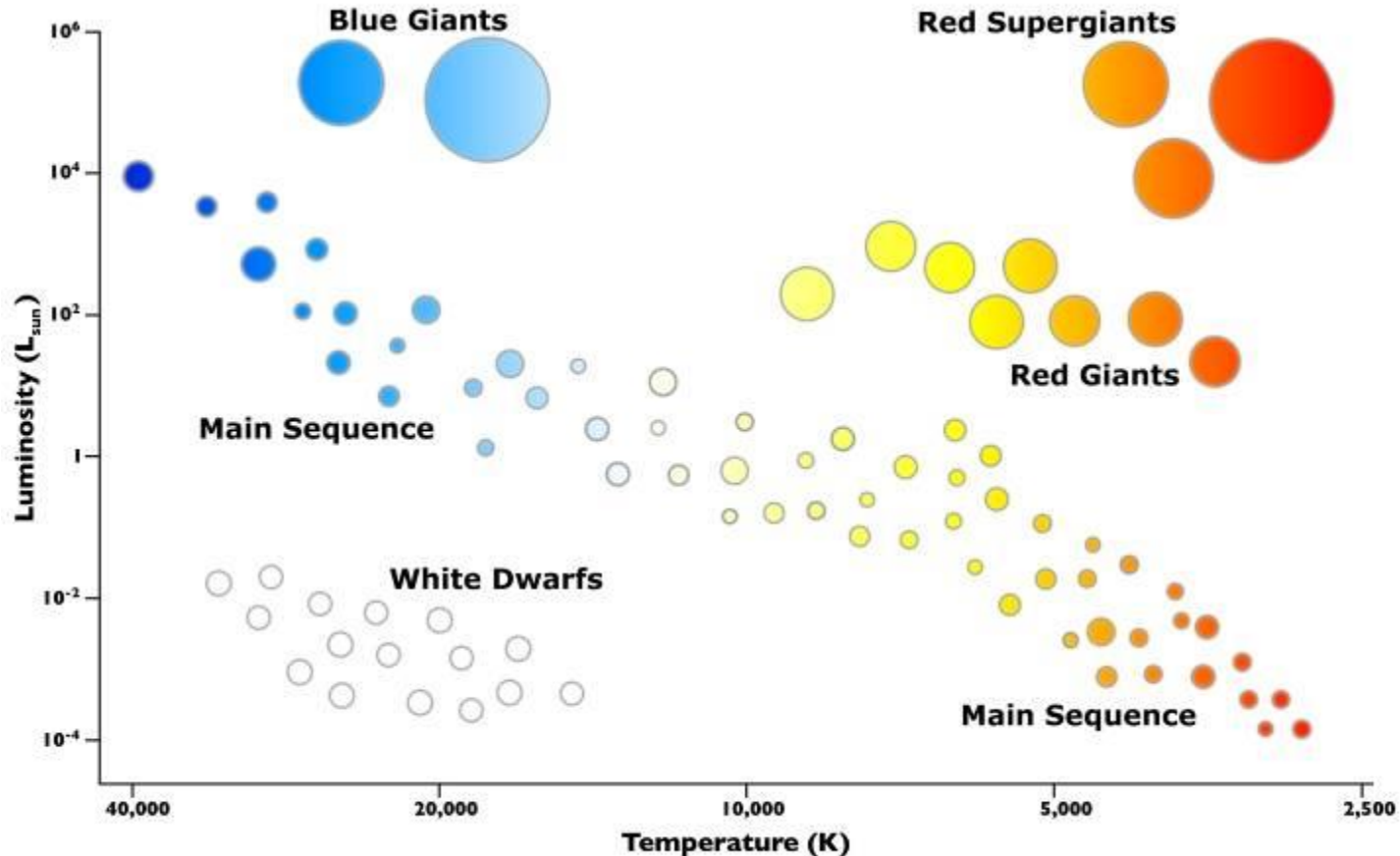
0	ექსტრემალური გიგანტები
Ia	კაშკაშა სუპერგიგანტები
Ib	სუპერგიგანტები
II	კაშკაშა გიგანტები
III	გიგანტები
IV	სუბ–გიგანტები (ქვეგიგანტები)
V	ძირითადი თანმიმდევრობის ვარსკვლავი
SD	სუპერ ჯუჯა
D	ჯუჯა

მზის გამოსხივების სპექტრი (G2V)



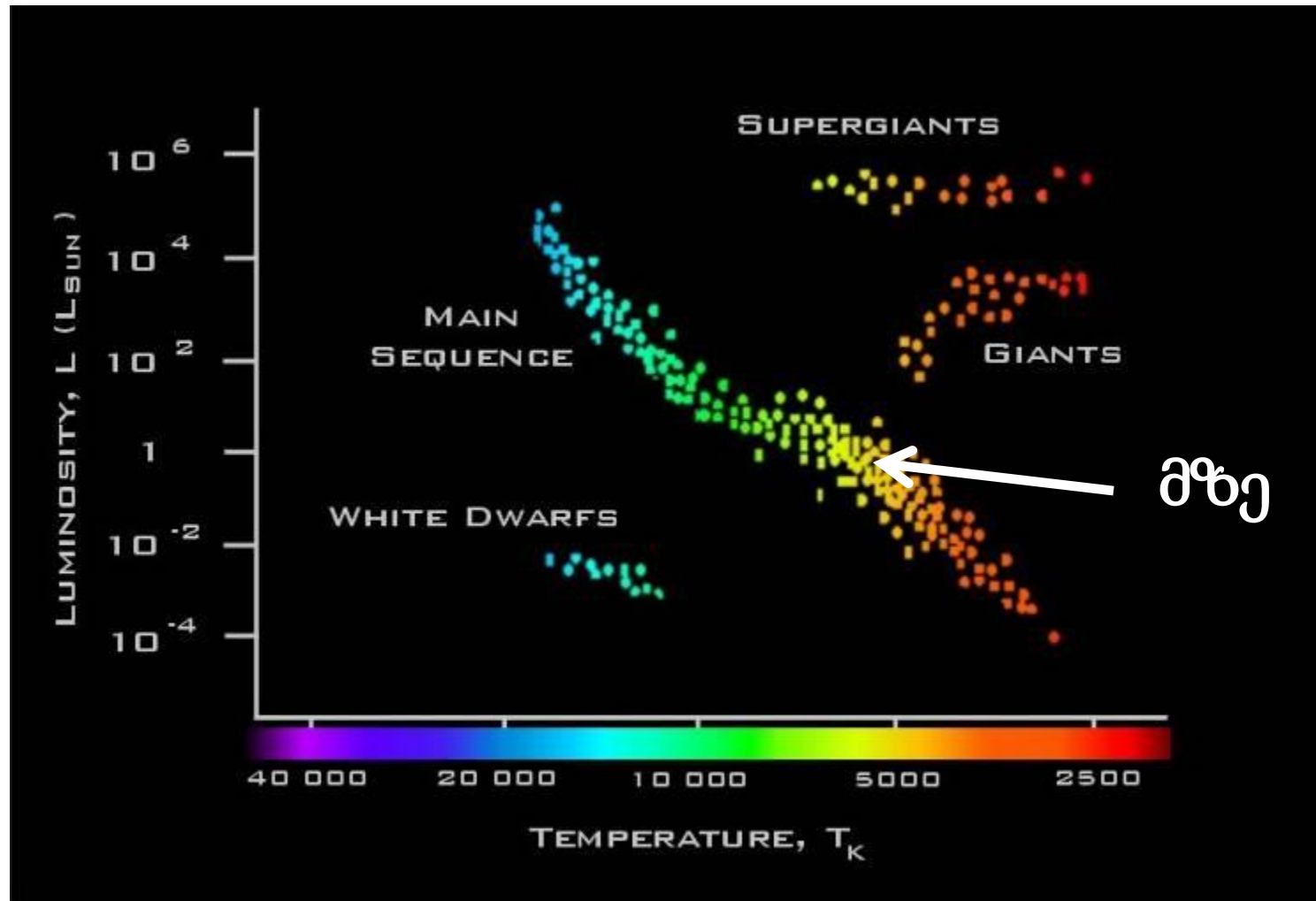
ჰერცშპრუნგ–რასელის (HR) დიაგრამა

აბსოლუტური ნათობისა და სპექტრული კლასის
(ტემპერატურის) დამოკიდებულება

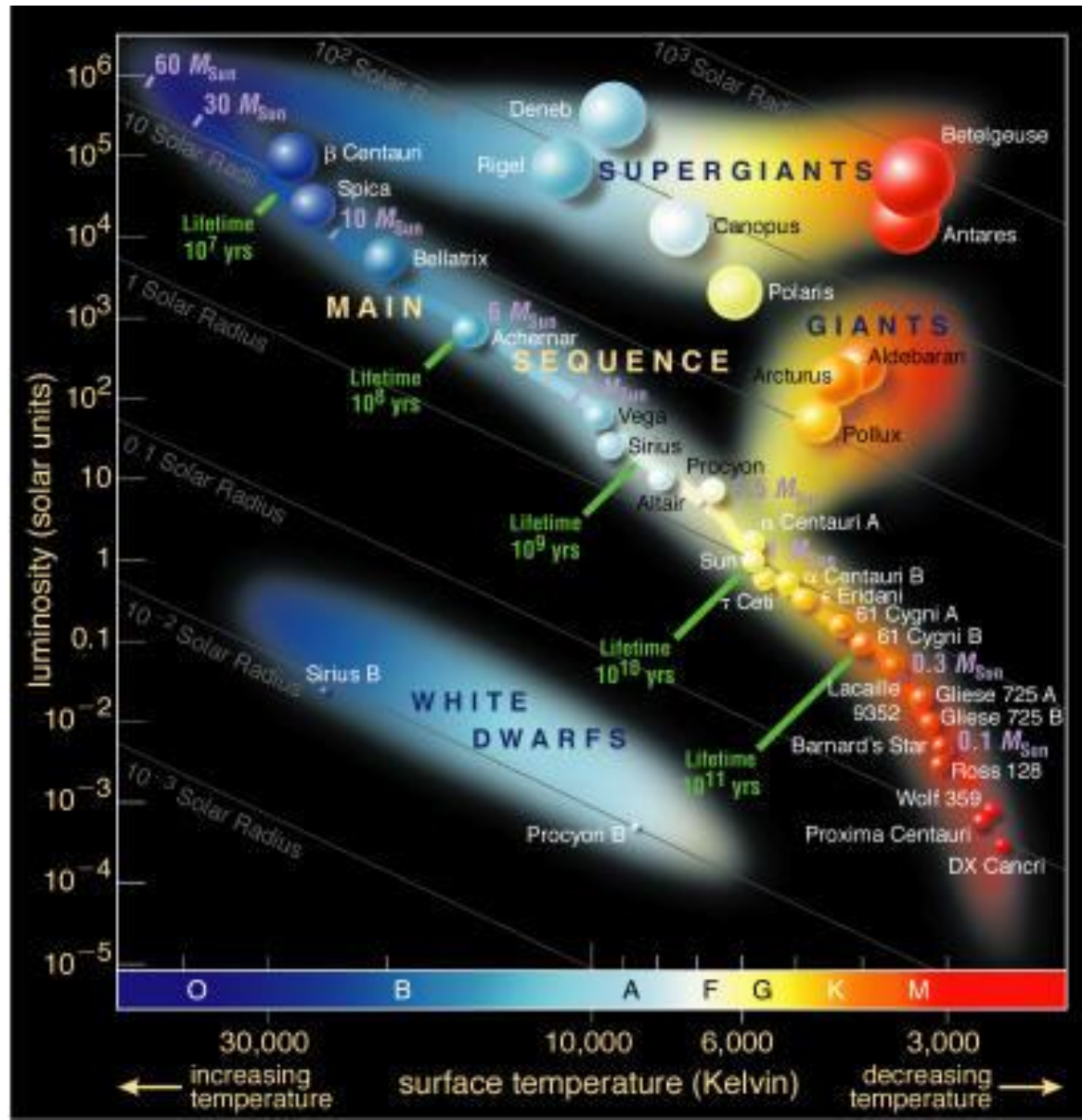


ჰერცშპრუნგ–რასელის დიაგრამა

ძირითადი თანმიმდევრობის ვარსკვლავები, ჯუჯები
და გიგანტები



HR ფიზიკური ვიზუალიზაცია

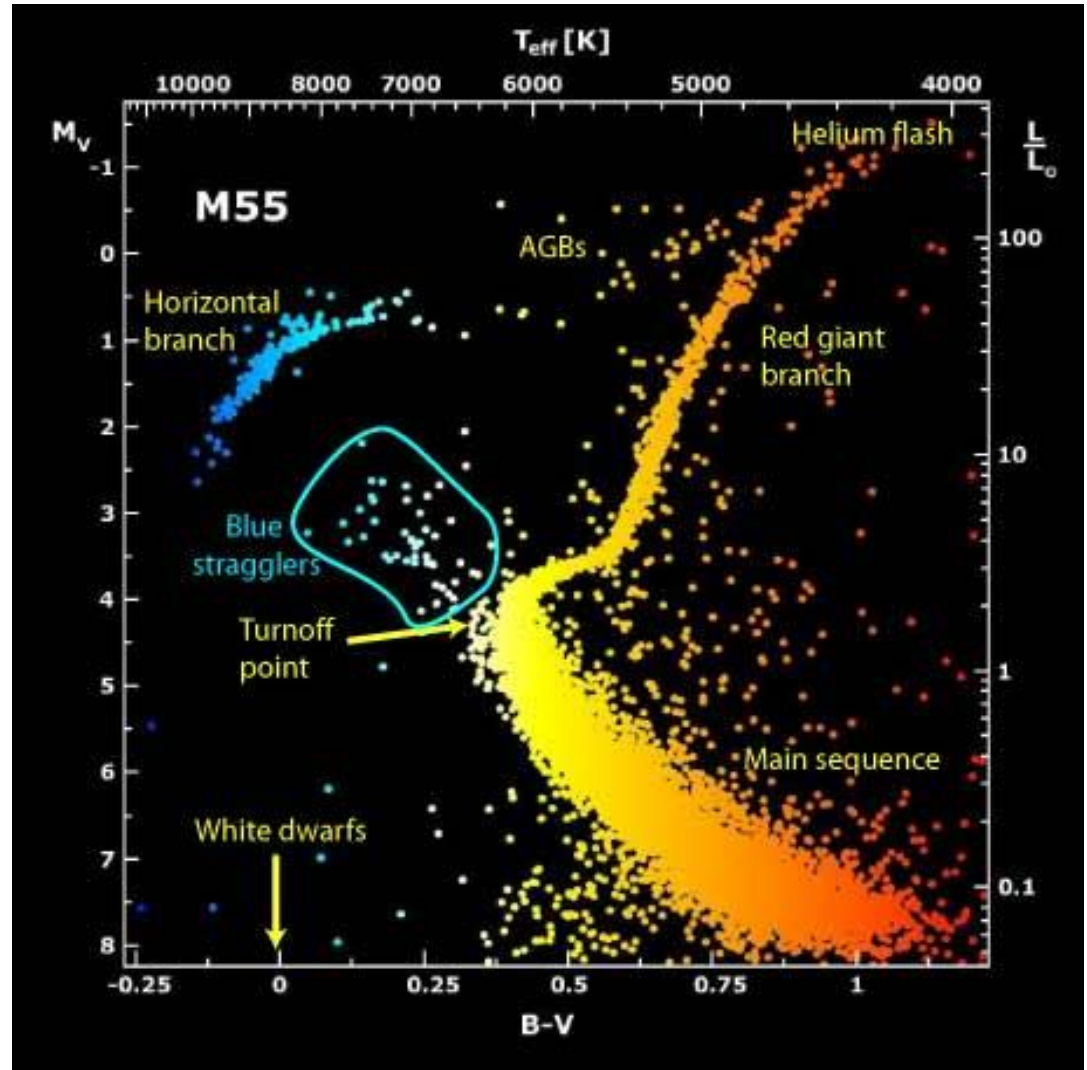


ვარსკვლავების გროვების დიაგრამები

წარმოშობის
ისტორია და
ფიზიკა

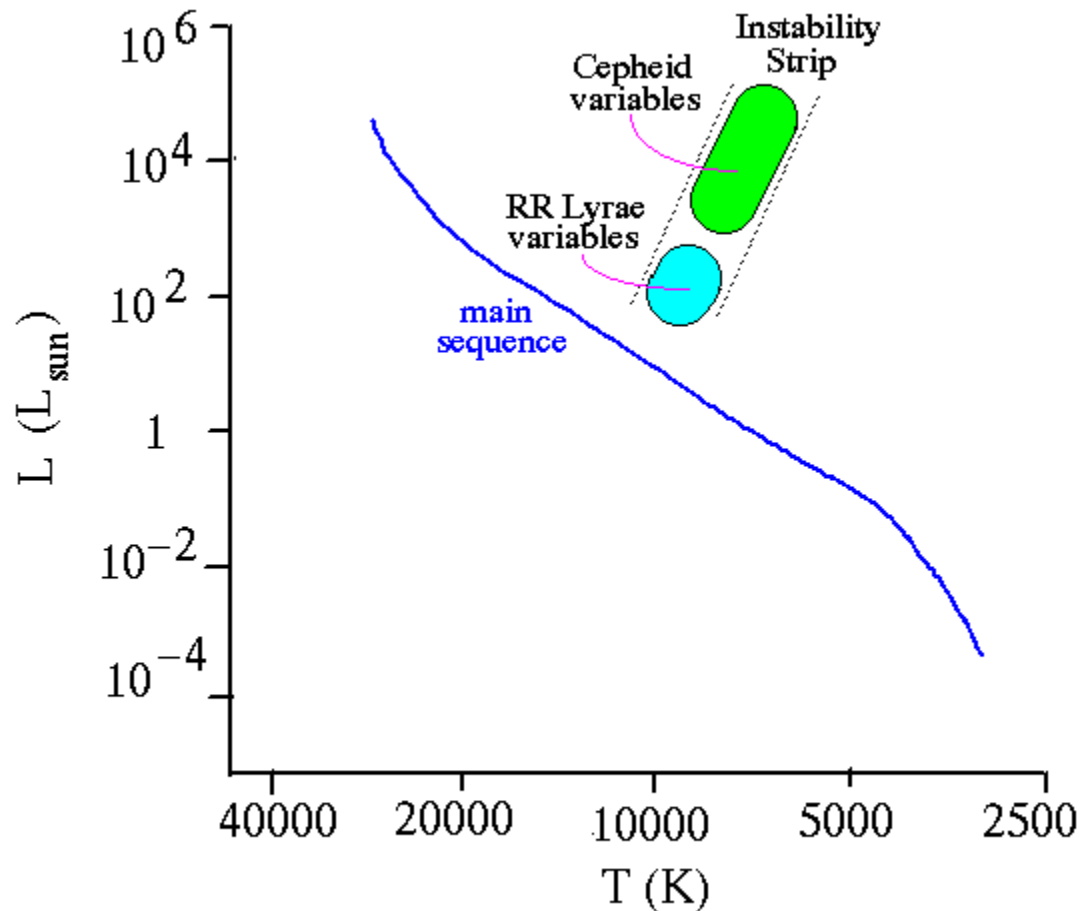
გალაქტიკა M55

მცირე ქვეკლასები



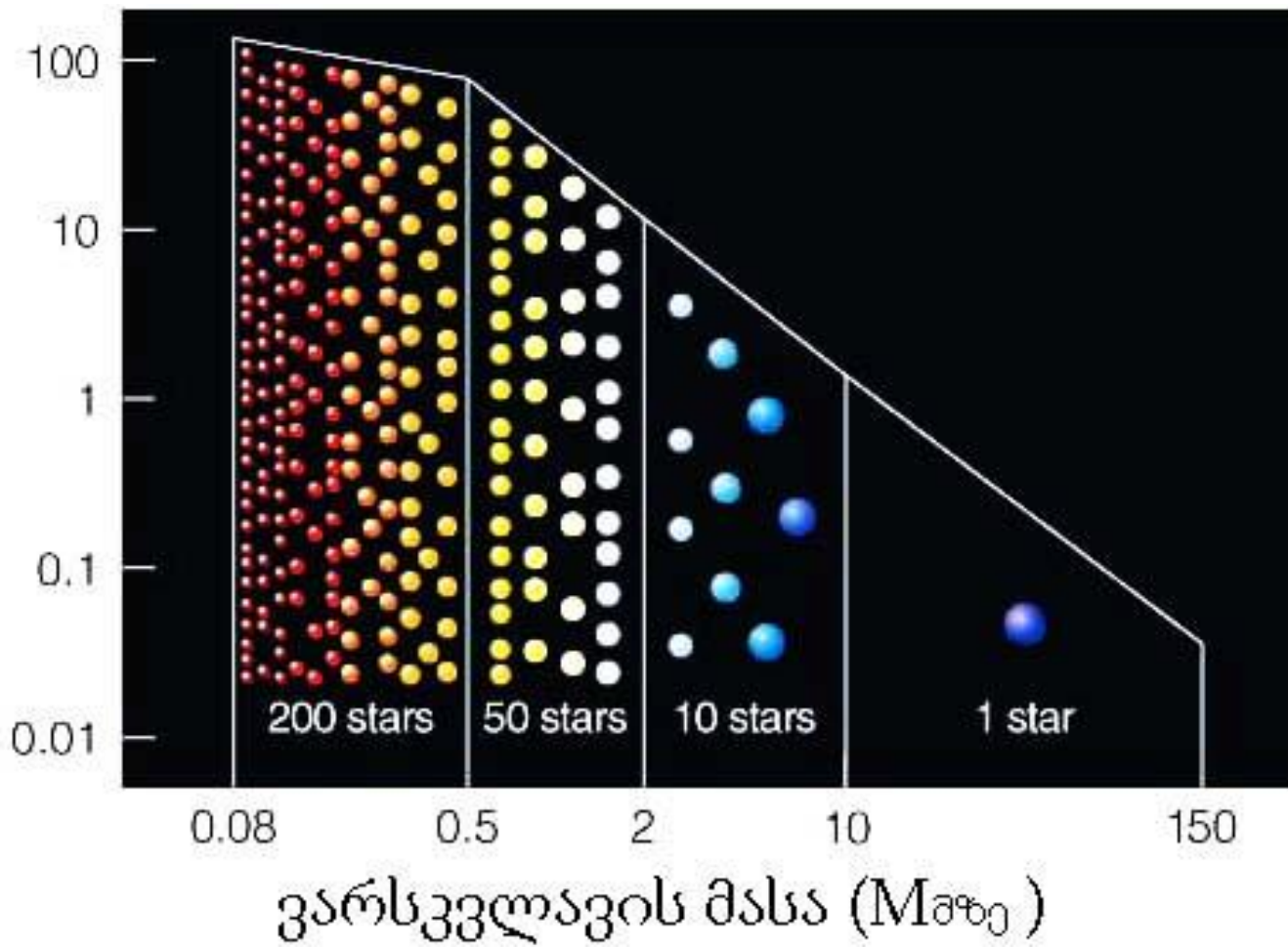
არამდგრადობის ზოლი

პულსირებადი ვარსკვლავები



ჩვენი გალაქტიკის ვარსკვლავები

ვარსკვლავების განაწილება გალაქტიკურ დისკში
მასების მიხედვით



მინიმალური მასის ვარსკვლავი

ვარსკვლავის მინიმალური მასა განისაზღვრება იმ მინიმალური გრავიტაციის ძალით, რომელიც საჭიროა ვარსკვლავის ცენტრში კრიტიკული ტემპერატურის მისაღწევად რომ ჩაირთოს თერმოზირთვული რეაქციები და ობიექტი გახდეს მნათობი.

$$M_{\text{მინ}} \sim 50-80 M_{\text{იუპიტერი}}$$

(~ 0.01 მზე)



მაქსიმალური მასის ვარსკვლავი

გიგანტური მასის ვარსკვლავებს გააჩნიათ ზემდგომი გამოსხივება;

გამოსხივების წნევა მოქმედებს ვარსკვლავის გარეშე ფენებზე და მიმართულია ცენტრიდან გარე მიმართულებით;

მასის შემდგომი ზრდა შეუძლებელია – ვარსკვლავის გარე ფენები იფანტება კოსმოსში

$$M_{\text{მაქს}} \sim 150 - 200 M_{\text{მზე}}$$

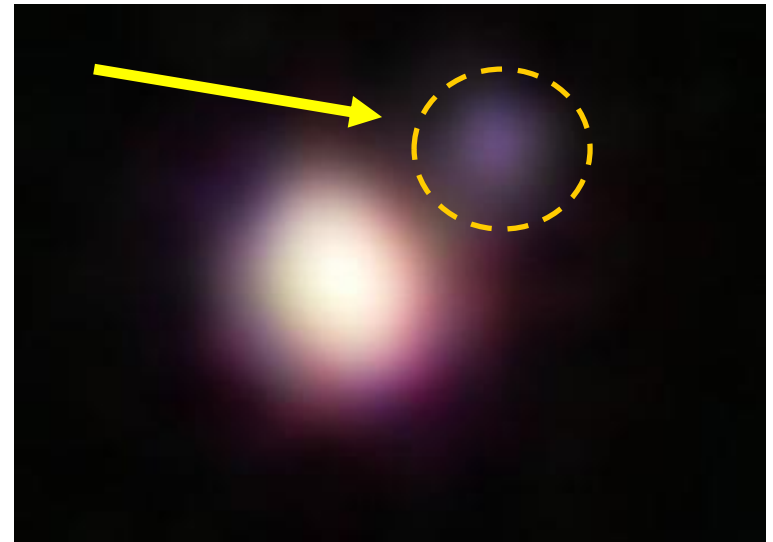
ანომალური მასის ვარსკვლავი: $265 M_{\text{მზე}}$

ჩვენი გალაქტიკის ვარსკვლავები

წითელი და ყავისფერი ჯუჯა ვარსკვლავები
შეადგენენ ჩვენი გალაქტიკის ვარსკვლავების
ნახევარზე მეტს.

მათი დანახვა ჩვეულებრივ პირობებში
შეუძლებელია

ყავისფერი ჯუჯა
პირველი პირდაპირი
დაკვირვება: 1989

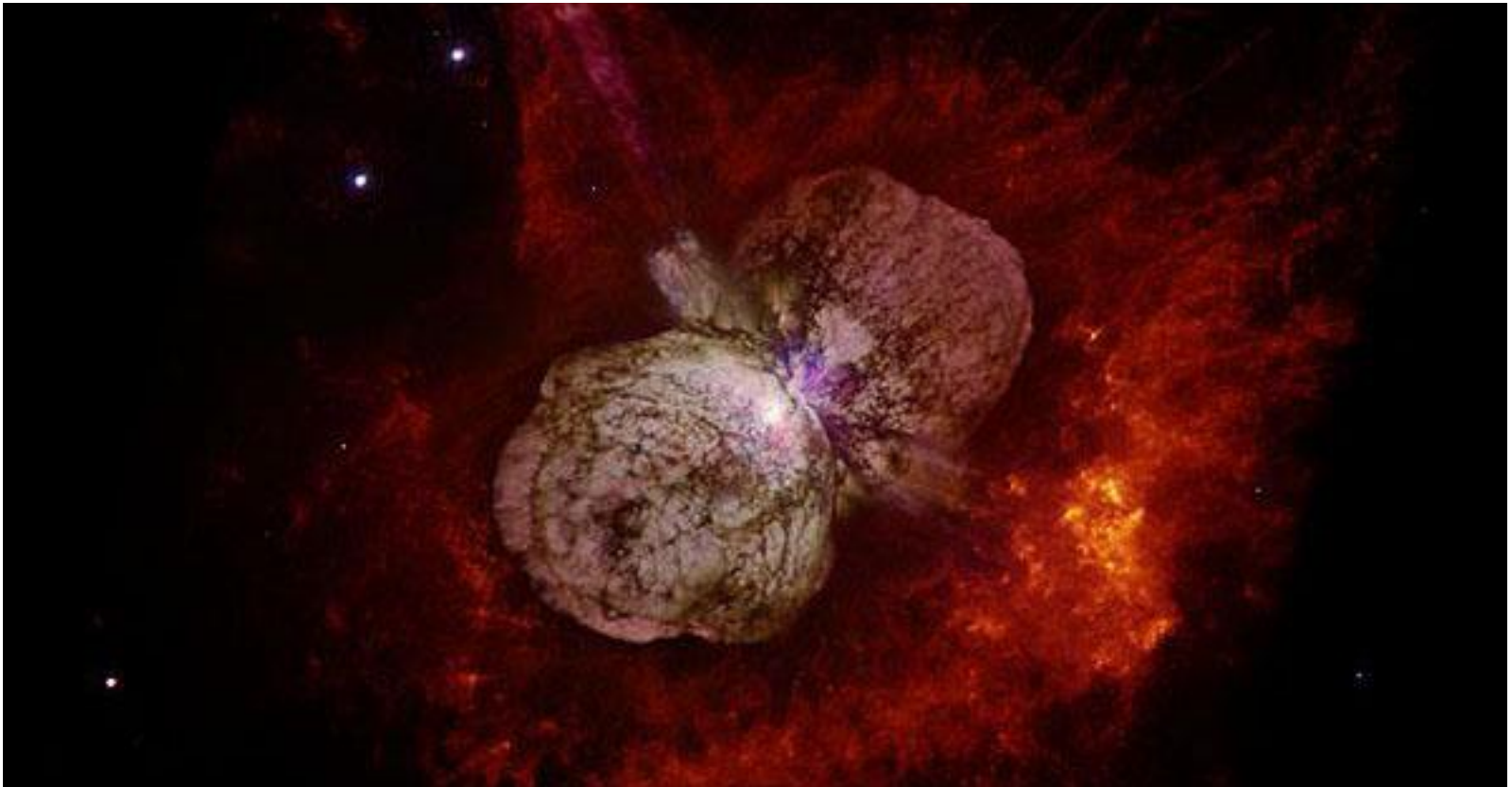


მაქსიმალური მასის ვარსკვლავი

ეტა კარინა

მანძილი დედამიწიდან: 8000 ს.წ.

მასა: 120–150 მზის მასა



ჰიპერგიგანტი

სპექტრალური კლასი: O

მასა: $> 100 M_{\odot}$

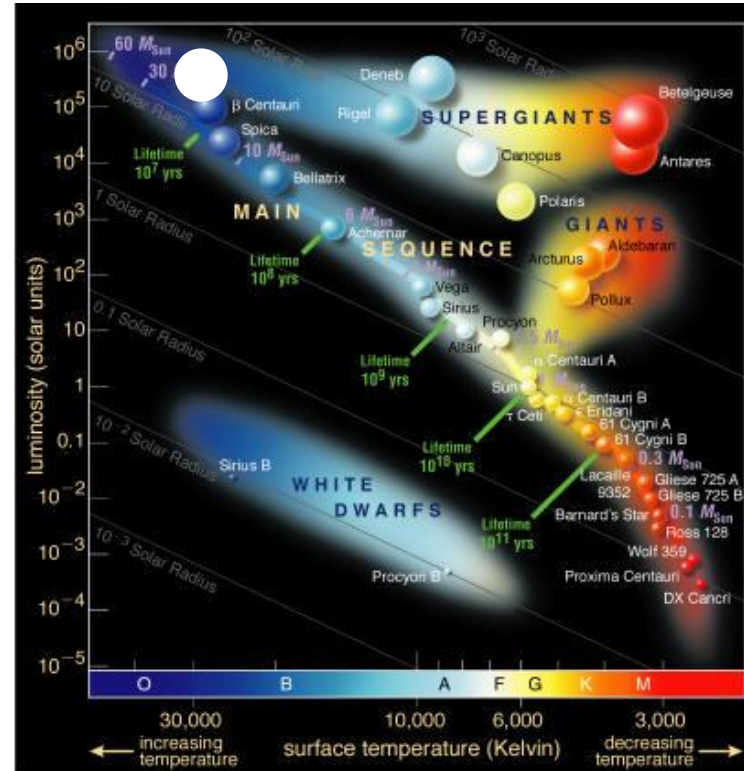
დიამეტრი: $\sim 1000 M_{\odot}$

ნათობა:
 $\sim 2-40$ მილიონი $L_{\odot}$

სიცოცხლის

ხანგრძლივობა:

~ 1 მილიარდი წელი



ლურჯი გიგანტი

სპექტრალური კლასი: O-B

მასა: $< 100 M_{\odot}$

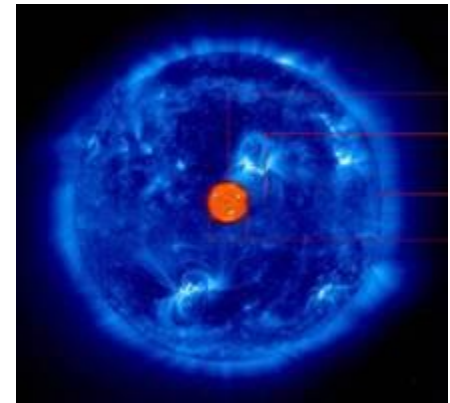
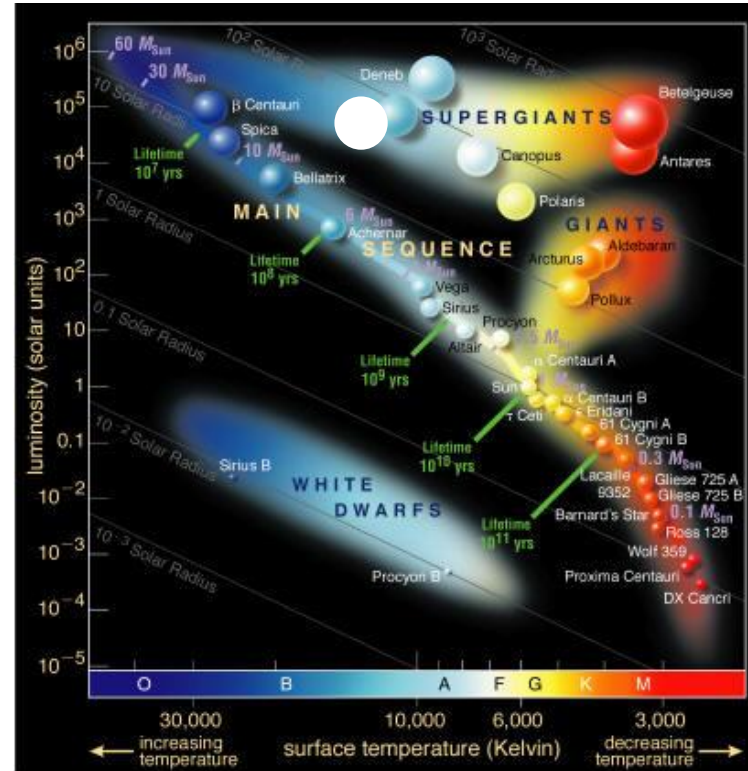
დიამეტრი: $\sim 500 M_{\odot}$

ნათობა: $\sim 10\,000 L_{\odot}$

სიცოცხლის

ხანგრძლივობა:

~ 2 მილიარდი წელი



წითელი გიგანტი

სპექტრალური კლასი: K,M

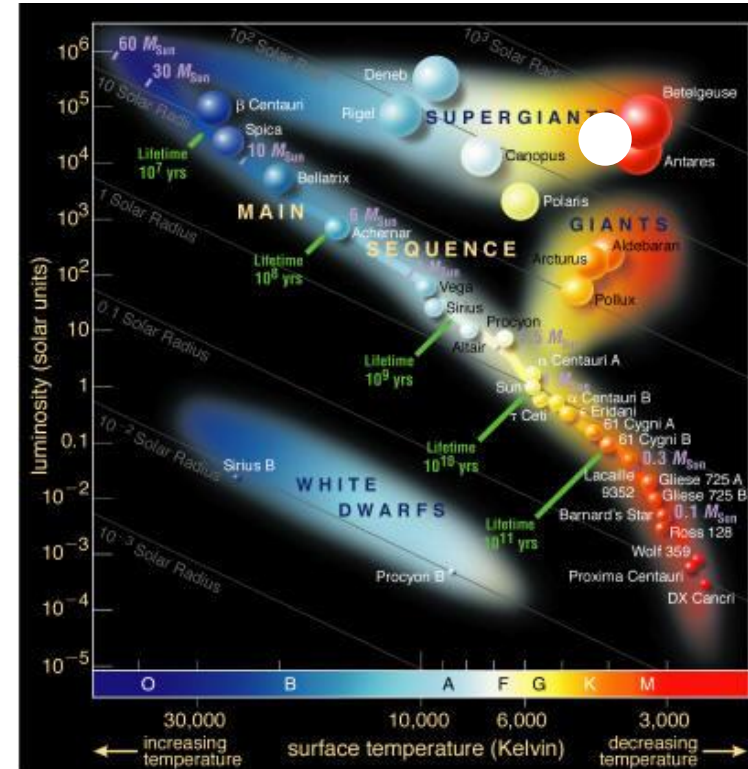
მასა: $\sim 10 M_{\odot}$

ნათობა: $\sim 1\,000 L_{\odot}$

სიცოცხლის

ხანგრძლივობა:

~ 1 მილიარდი წელი



ძირითადი მიმდევრობის ვარსკვლავი

სპექტრალური კლასი: F, G, K

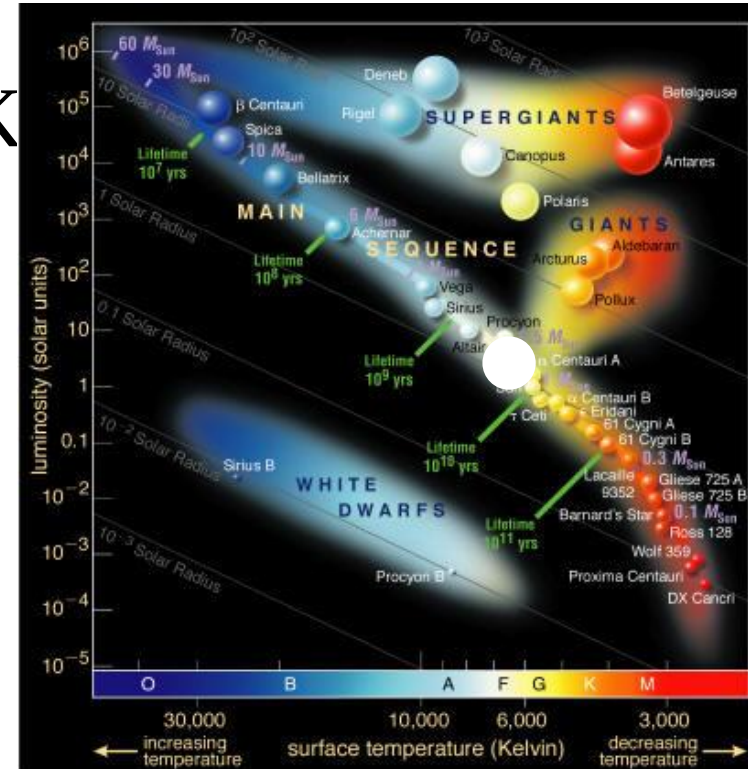
მასა: $\sim M_{\odot}$

ნათობა: $\sim L_{\odot}$

სიცოცხლის

ხანგრძლივობა:

~ 10 მილიარდი წელი



წითელი ჯუჯა

სპექტრალური კლასი: M

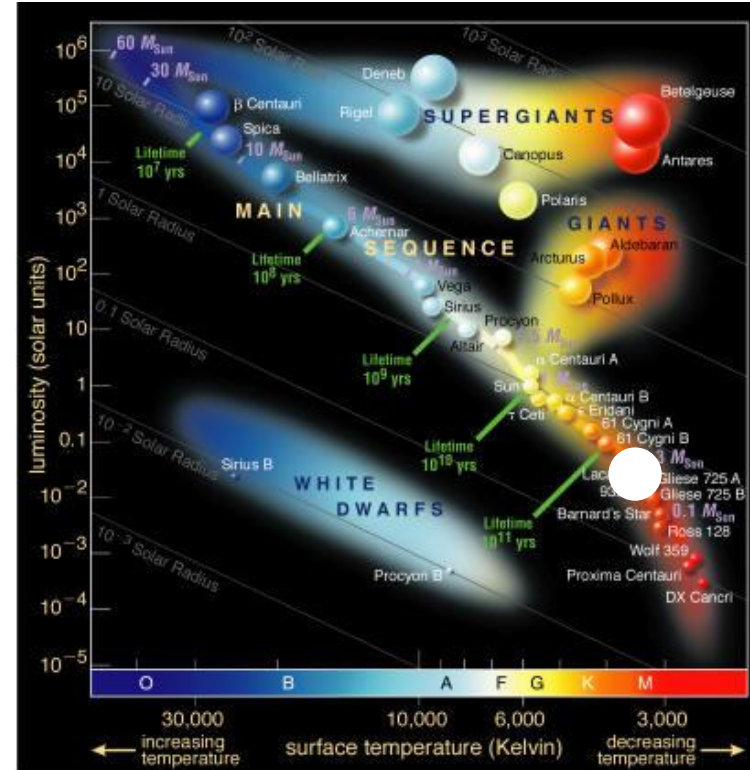
მასა: $< 0.5 M_{\odot}$

ნათობა: $< 0.01 L_{\odot}$

სიცოცხლის

ხანგრძლივობა:

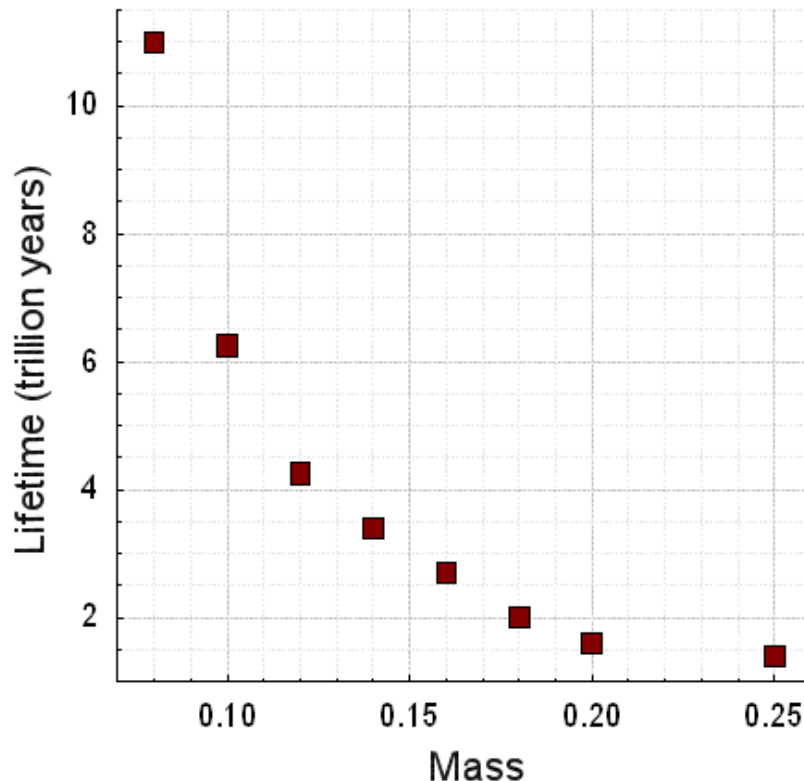
> 20 მილიარდი წელი



წითელი ჯუჯა

წითელი ჯუჯა ვარსკვლავის სიცოცხლის ხანგრძლივობა დამოკიდებულია თერმობირთვული რეაქციის მიმდინარეობის სიჩქარეზე. დაბალი მასის ვარსკვლავში პროცესი ნელია.

ათასი
მილიარდი
წელი



ობიექტის მასა ($M_{\odot}$)

ვარსკვლავების სიცოცხლის ხანგრძლივობა

ვარსკვლავის სიცოცხლის ხანგრძლივობა:

$$T \sim M/L$$

M - ვარსკვლავის (საწვავის) მასა

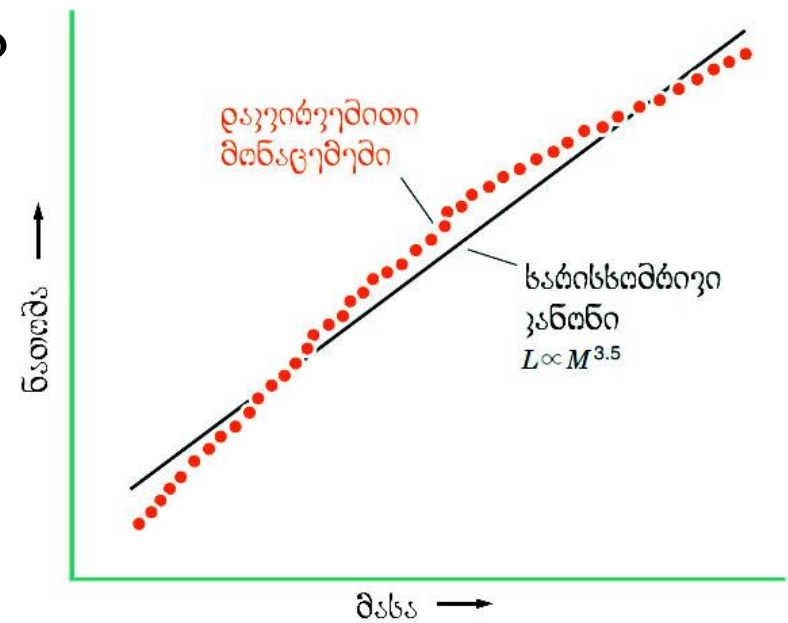
L - ვარსკვლავის ნათობა

მასის მატება იწვევს
ვარსკვლავის ნათობის

ზრდას: $L \sim M^{3.5}$

მაღალი მასის ვარსკვლავები

ცოცხლობენ ცოტა ხანს: $T \sim M^{-2.5}$

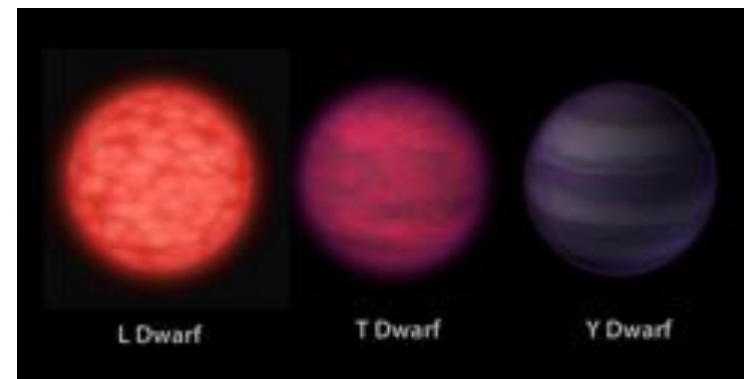
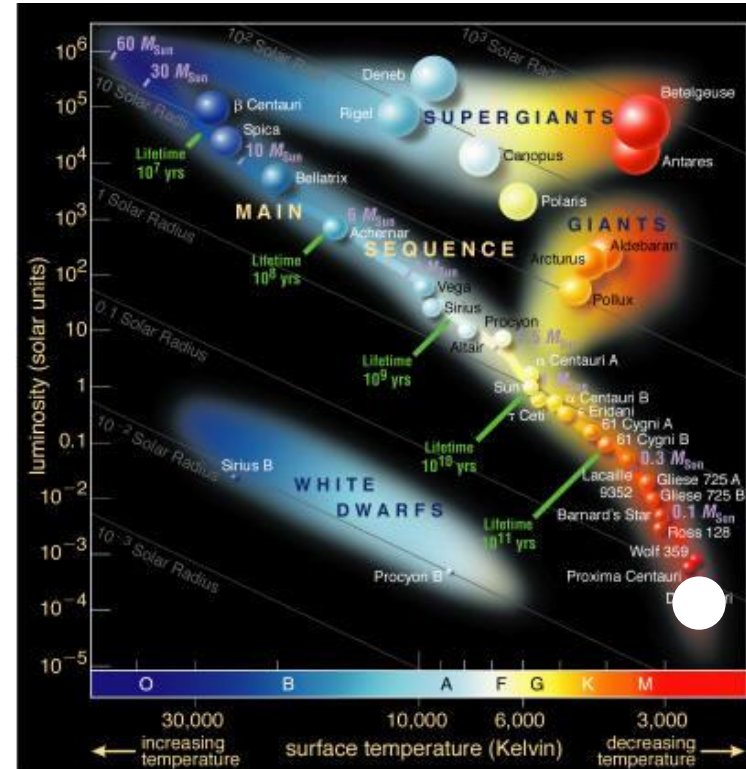


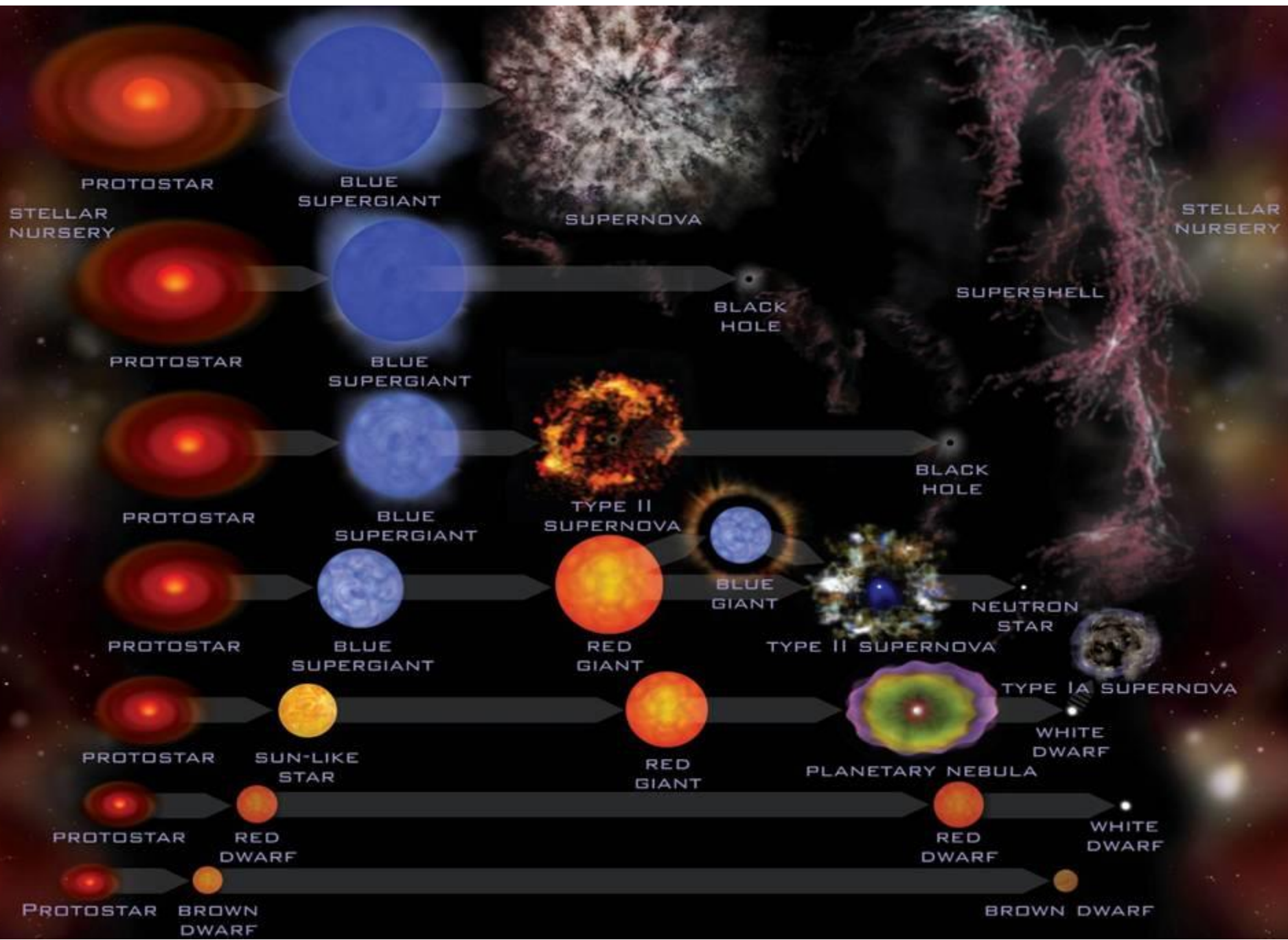
ყავისფერი ჯუჯა

დაბალი მასის ობიექტები,
რომლებშიც არ მიმდინარეობს
p-p თერმობირთვული
რეაქციები (შესაძლოა d-d)

ობიექტები თითქმის არ
ასხივებენ

სიცოცხლის ხანგრძლივობა:
შემოუსაზღვრავი





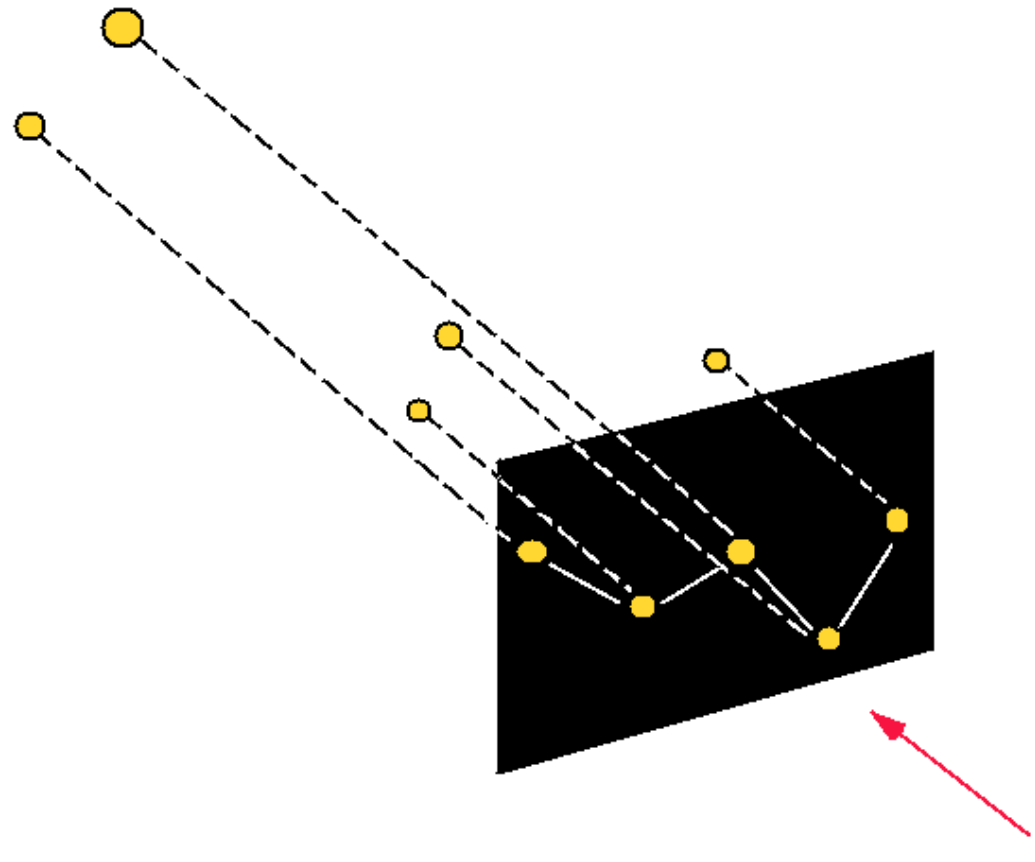
შეკითხვები?



ვარსკვლავები

ვარსკვლავის **ხილული ნათობა** დამოკიდებულია მის **აბსოლუტურ ნათობასა** და **მანძილზე**, რომლითაც იგი ჩვენგან არის დაშორებული

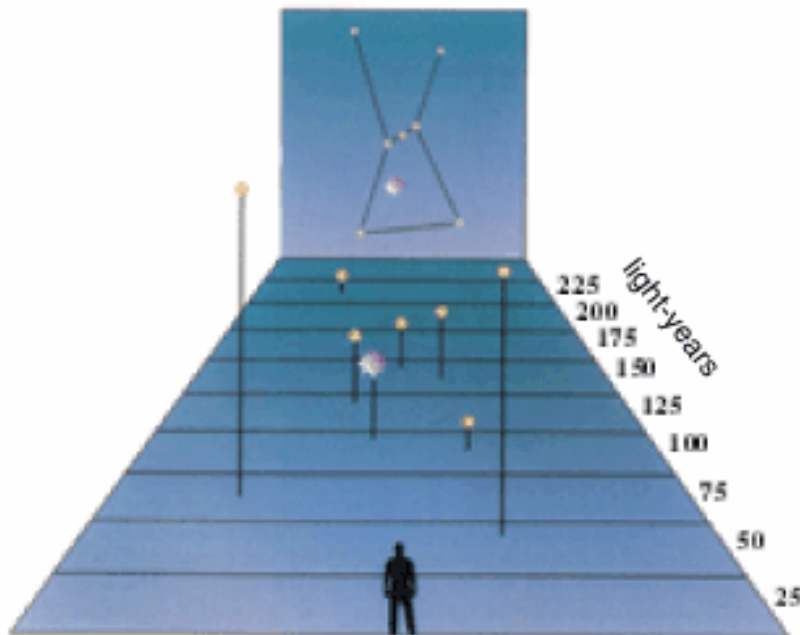
დედამიწიდან
ვაკვირდებით
ვარსკვლავების
გამოსახულებას
(პროექციას)
ცის თაღზე



ორიონის თანავარსკვლავედი

თანავარსკვლავედი: ერთმანეთს დაშორებული ვარსკვლავები, რომელებიც ახლოს არიან მხოლოდ ცის თაღზე ვიზუალურად.

ორიონის თანავარსკვლავედი



დოპლერის ეფექტი

ტალღის სიგრძის (სიხშირის) ცვლილება
წყაროს და დამკვირვებლის ერთმანეთის მიმართ
მოძრაობის დროს

ტალღის სიგრძე **მცირდება**
თუ დამკვირვებელი და წყარო
ერთმანეთს **უახლოვდებიან**
და **იზრდება** თუ **შორდებიან**



დოპლერის ეფექტი

ტალღის სიგრძის ცვლილება დამოკიდებულია ტალღის სიჩქარესა და წყარო-დამკვირვებლის ერთმანეთის მიმართ მოძრაობის სიჩქარეზე

რაც მეტია მოძრაობის სიჩქარე, მით მეტია

დოპლერის წანაცვლება

ბგერითი ტალღა: სიხშირის ცვლილება:

ბგერის ტონის მომატება ან დაკლება

ელექტრომაგნიტური ტალღა: სიხშირის ცვლილება

სინათლის “ფერის” ცვლილება

წითელი და **ლურჯი** წანაცვლება

სპექტრული ხაზები

წანაცვლება: (დოპლერის ეფექტი)

ლურჯი წანაცვლება: დაახლოება

წითელი წანაცვლება: დაშორება

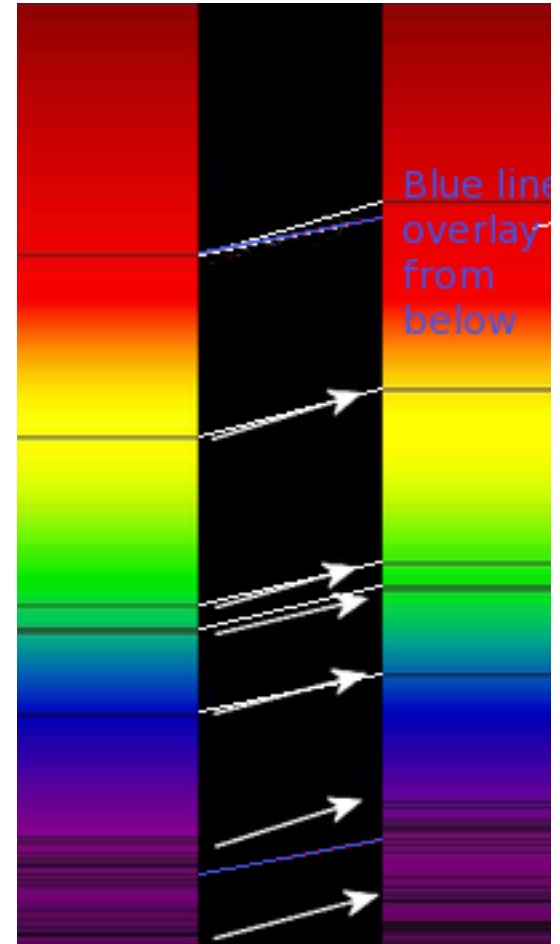
ხაზის გაფართოება:

ატომების ქაოსური მოძრაობები

სითბური; ტურბულენტური;

ხაზის გახლეჩვა:

(ელექტრომაგნიტური ველი)



წითელი წანაცვლების მაგალითი

ორჯერადი სისტემის სპექტრი

ორი ვარსკვლავის
ბრუნვა
ერთმანეთის
გარშემო

სპექტრული
ხაზების
მკაცრად
პერიოდული
გაზღვრვა

