

გამოსხივების წყაროები - სითბური და ატომური გამოსხივება

1. სითბური გამოსხივების თვისებები

- ელექტრომაგნიტური ტალღების გამოსხივება
- სითბური გამოსხივება სამყაროში
- ვარსკვლავის ფერის ფორმირება
- სამყარო სხვადასხვა ელ.მაგ. დიაპაზონში

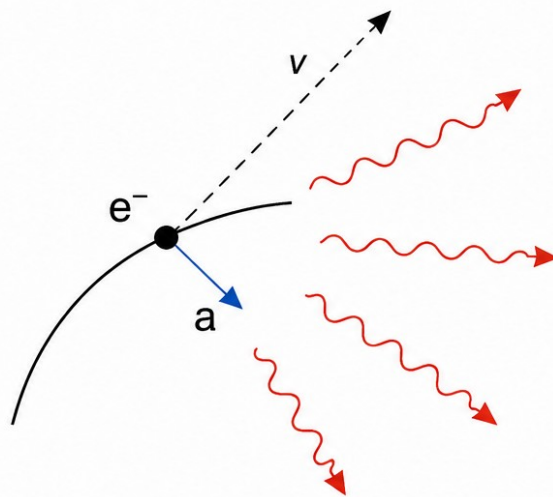
2. ატომური გამოსხივების მექანიზმები

- ატომების გამოსხივება
- სპექტრული ანალიზის ელემენტები
- ელ.მაგ. ველის გავლენა გამოსხივების წყაროებზე

ელ.მაგ. ტალღების გამოსხივება

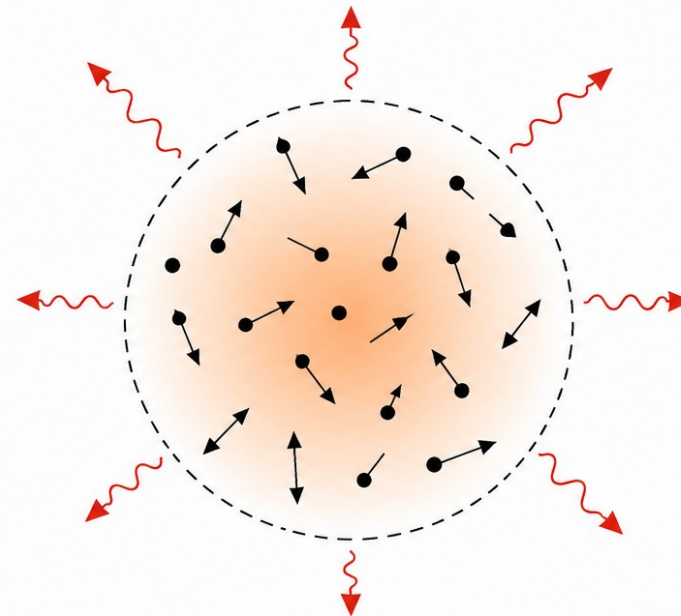
მუხტის აჩქარებული მოძრაობა იწვევს ელექტრომაგნიტური ტალღის გამოსხივებას

1. ერთი მუხტის გამოსხივება



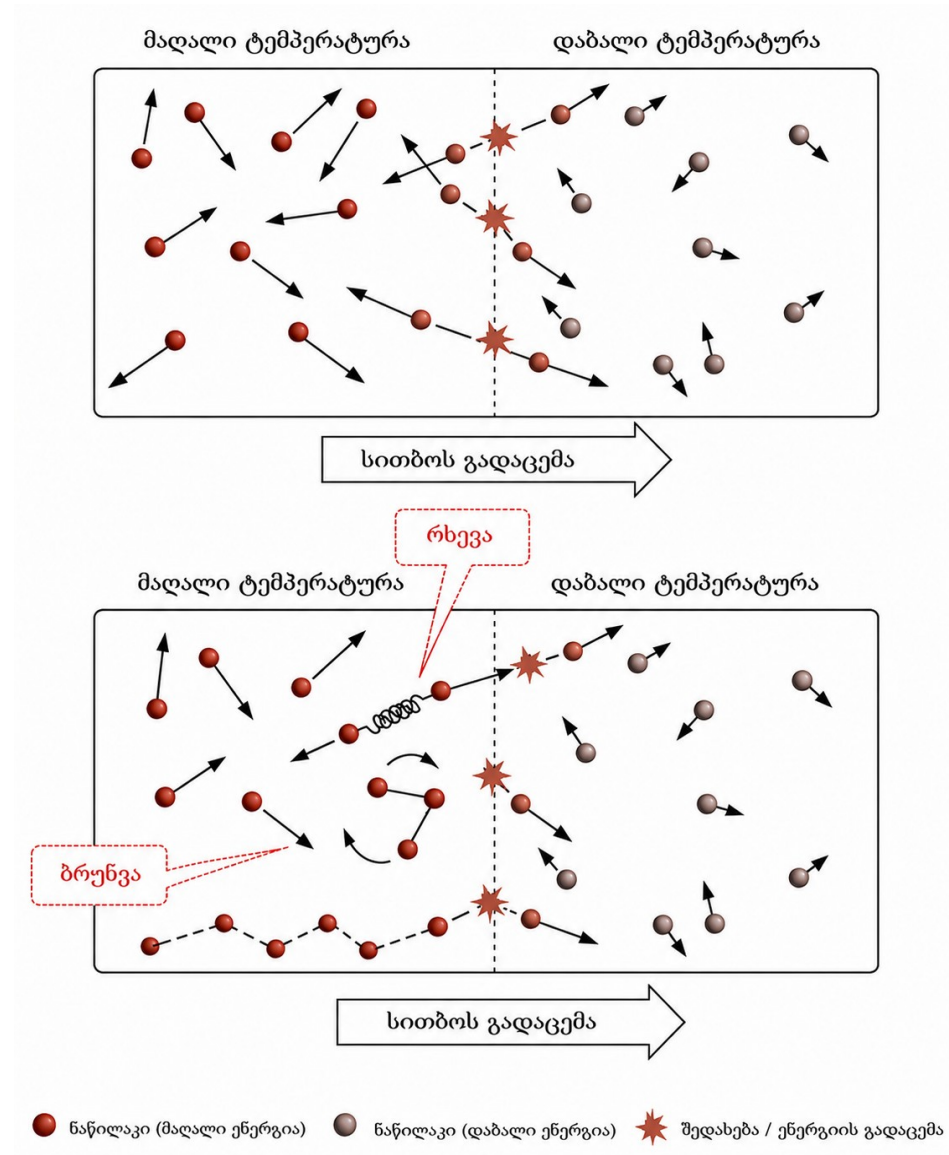
$a \neq 0 \rightarrow$ ე.მ. გამოსხივება

2. მუხტების სისტემის სითბური გამოსხივება



$\langle E_k \rangle \rightarrow T \rightarrow$ ე.მ. გამოსხივება

გარემოს სტატისტიკური აღწერა: თერმოდინამიკა



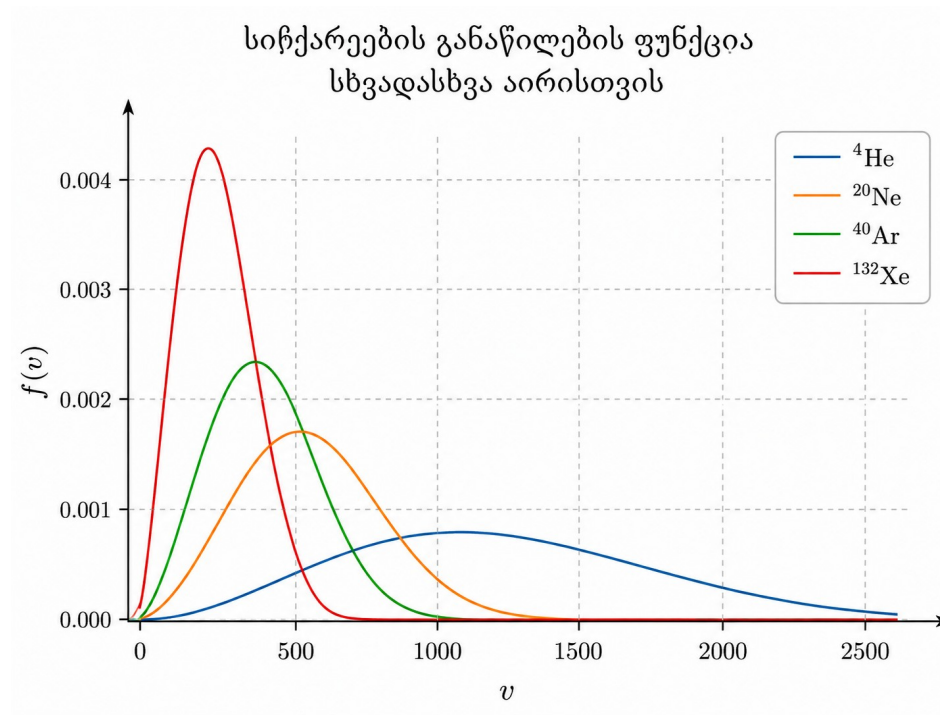
სითბური წონასწორობა

ბოლცმანის კინეტიკური თეორია:

$$\frac{3}{2}kT = \left\langle \frac{mv^2}{2} \right\rangle$$

მაქსველ-ბოლცმანის (კინეტიკური) განაწილება:

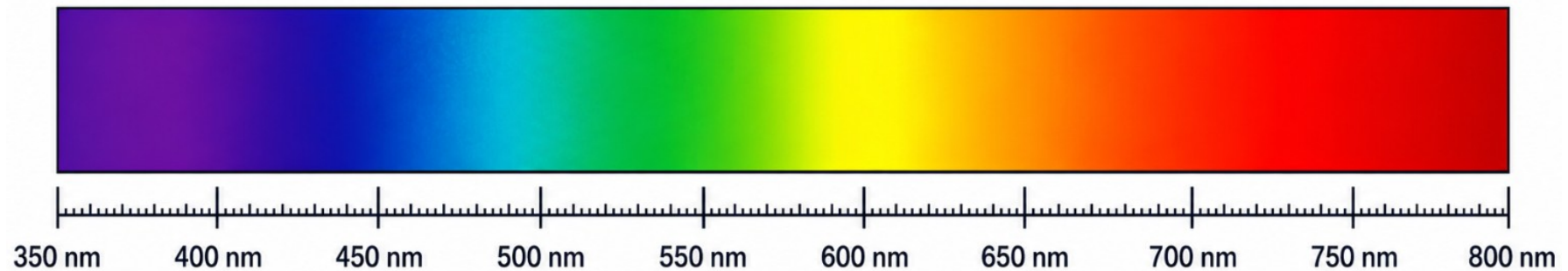
$$f(\mathbf{v}) d^3\mathbf{v} = \left[\frac{m}{2\pi k_B T} \right]^{3/2} \exp\left(-\frac{mv^2}{2k_B T}\right) d^3\mathbf{v}$$



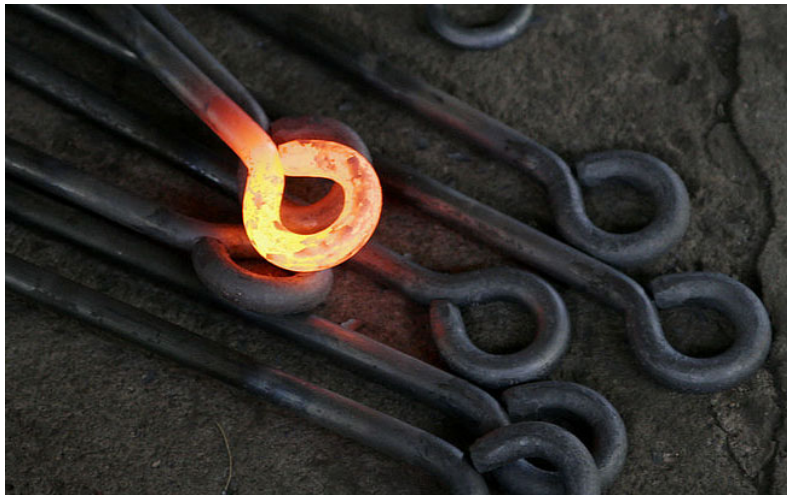
სითბური გამოსხივება

სითბურ წონასწორობაში მყოფი სხეული

სითბური გამოსხივების სპექტრი: უწყვეტი სპექტრი ხილულ უბანში



სხეულის სითბური გამოსხივების ფერი მიგვანიშნებს მის ტემპერატურაზე



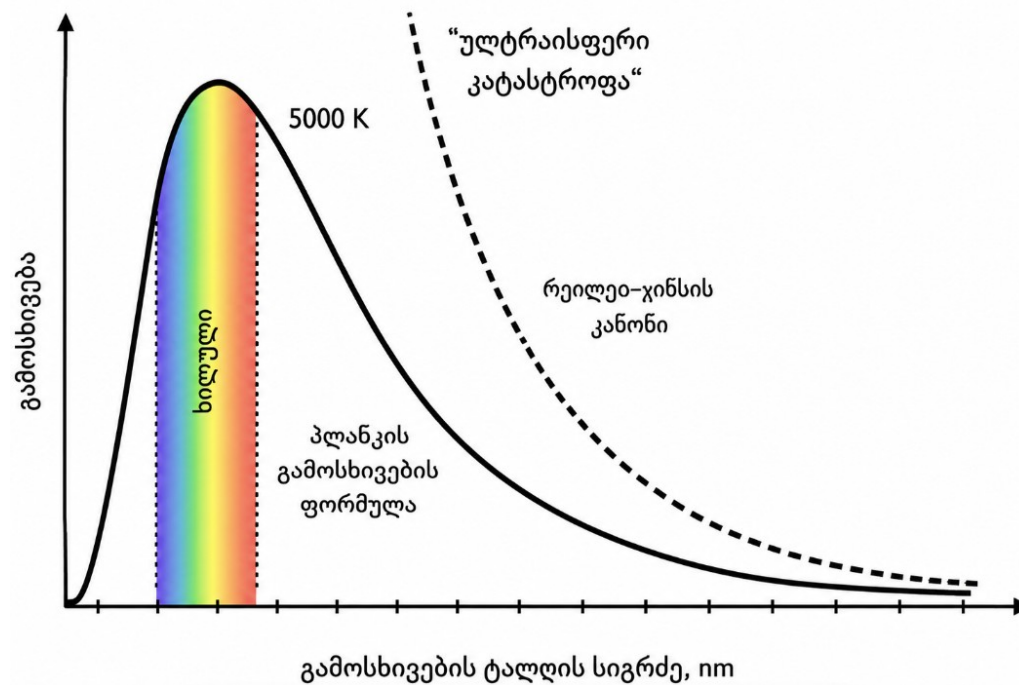
სითბური გამოსხივების თვისებები

სტეფან-ბოლცმანის (Stefan-Boltzmann) კანონი:
 ვინის (Wien) კანონი:

$$F = \sigma T^4$$

$$\lambda_{\max} \sim 1/T$$

- F - გამოსხივების ინტენსივობა;
 σ - სტეფან-ბოლცმანის მუდმივა;
 T - სხეულის ტემპერატურა;
 $\lambda_{\max}$ - გამოსხივების პიკის ტალღის სიგრძე;



$$B_\nu(T) = \frac{2\nu^2 k_B T}{c^2},$$

„შავი სხეულის“ გამოსხივება

პლანკის კანონი: შავი სხეულის გამოსხივების სპექტრული ინტენსივობის განაწილება

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/(k_B T)} - 1}$$

B_ν - სპექტრული ინტენსივობა

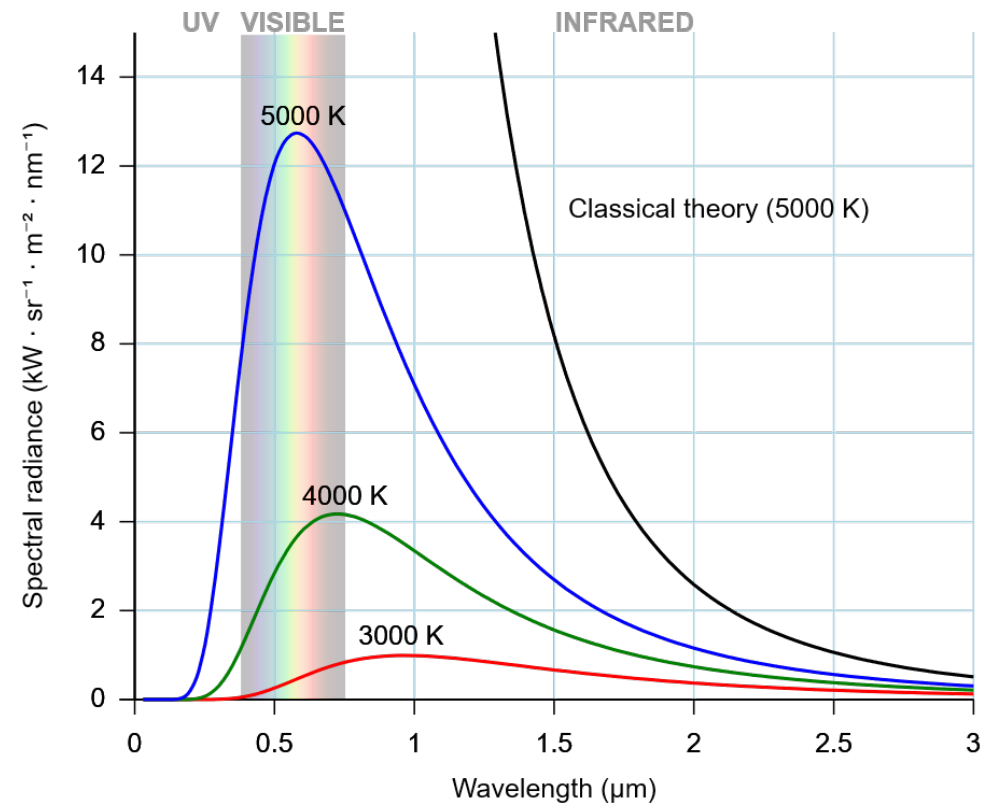
k_B - ბოლცმანის მუდმივა

h - პლანკის მუდმივა

c - სინათლის სიჩქარე

➤ ფოტონის კვანტური ბუნება ($E = h\nu$)

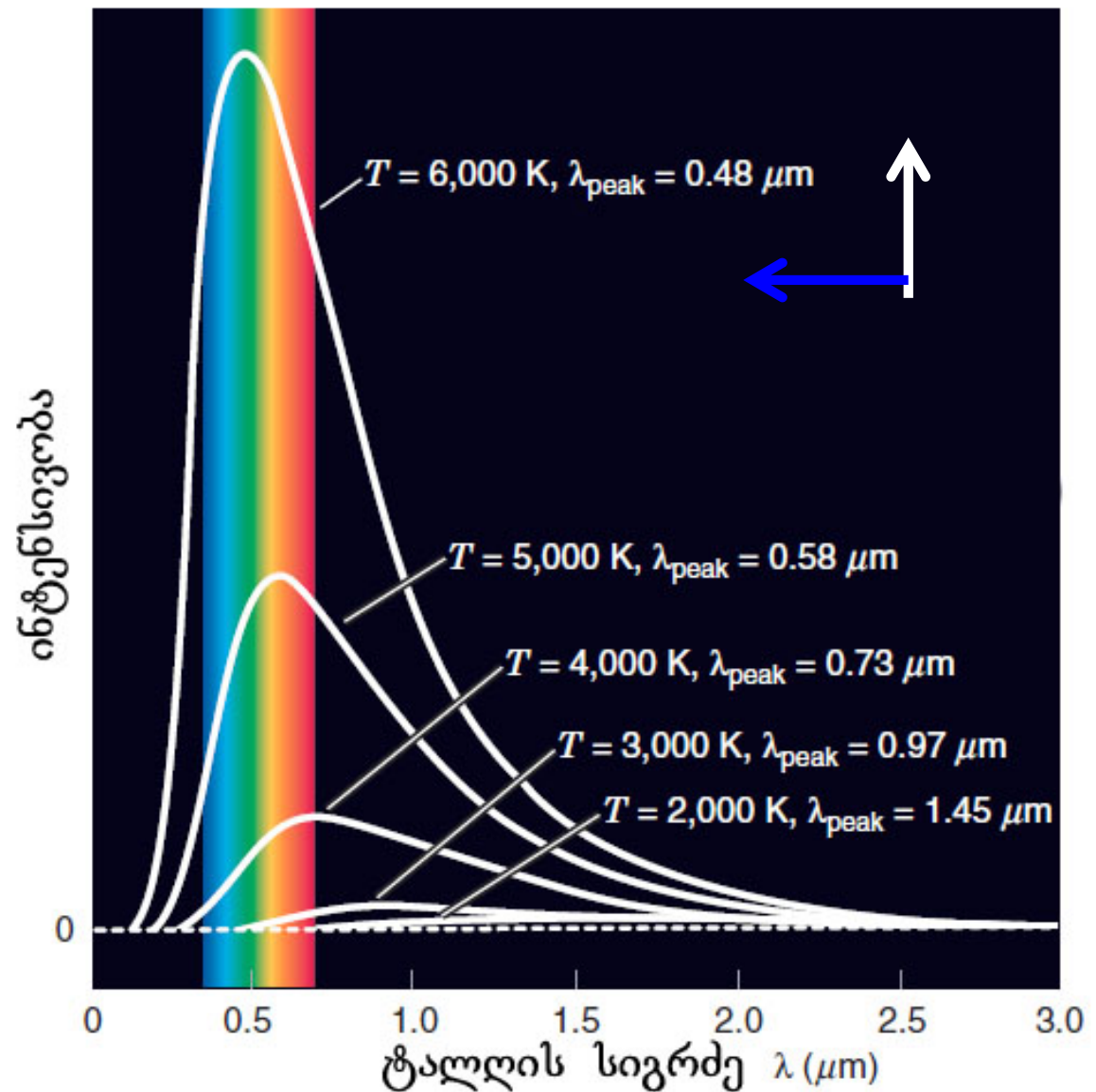
➤ კლასიკური ფიზიკა



სხეულის **ტემპერატურის ზრდა** იწვევს მისი სითბური გამოსხივების სპექტრის:

1. ინტენსივობის ზრდას;

2. ინტენსივობის პიკის
წანაცვლებას მოკლე
ტალღის სიგრძეებისაკენ
„სპექტრის გალურჯება“



სითბური გამოსხივების პიკი

პლანკის განაწილება **სიხშირისა** და **ტალღული რიცხვის** მიხედვით:

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1},$$

$$B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}.$$

ინდივიდუალური ელ.მაგ. ტალღისთვის:

$$\lambda = c / \nu$$

სითბური გამოსხივება კოლექტიური პროცესია!

$$\lambda_{\max} \neq \frac{c}{\nu_{\max}}$$

გამოსხივების ინტენსივობა სიხშირის და ტალღის სიგრძის ერთეულზე:

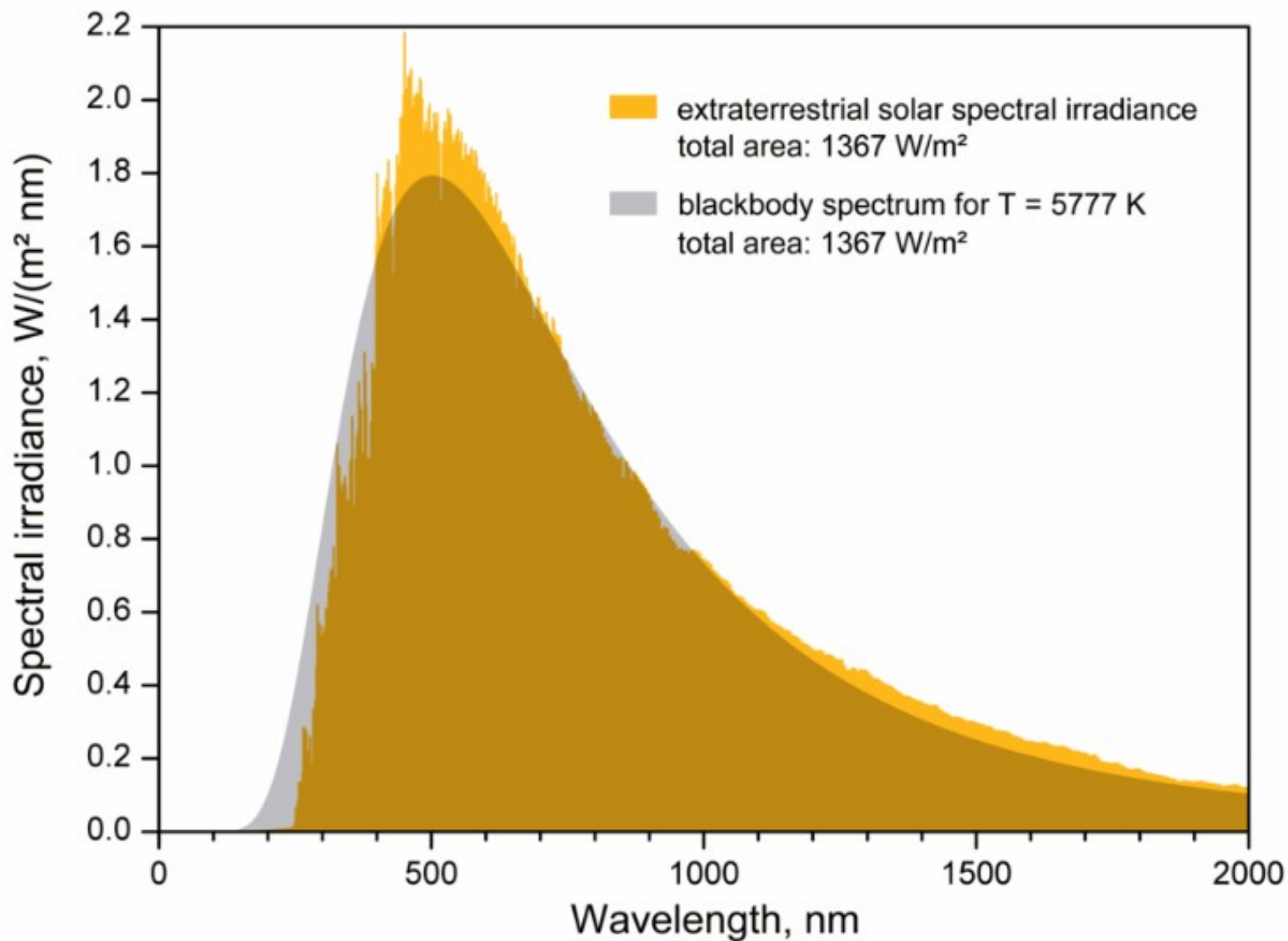
$$B_\nu |d\nu| = B_\lambda |d\lambda|$$

სითბური გამოსხივების პიკისთვის:

$$\lambda_{\max} \nu_{\max} = 0.568 c \neq c$$

გამოსხივების სპექტრი: სითბური წონასწორობის მახასიათებელი

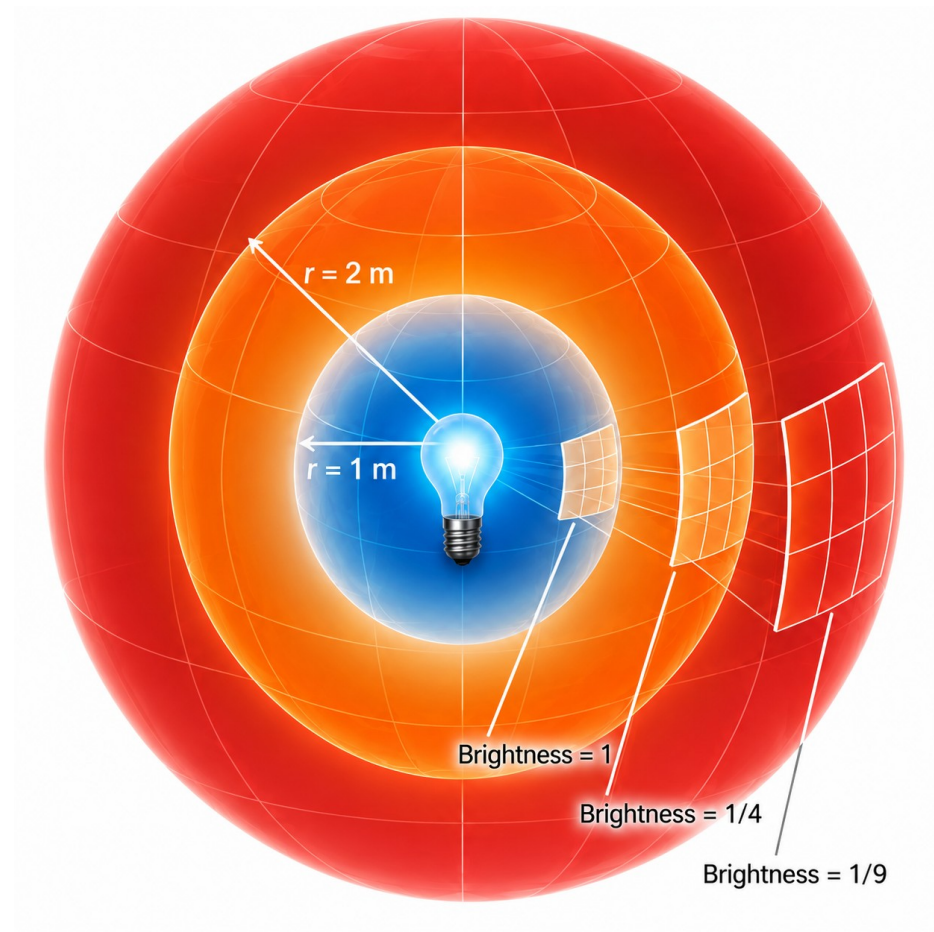
მზის გამოსხივება: უწყვეტი სპექტრი? პლანკის განაწილება?



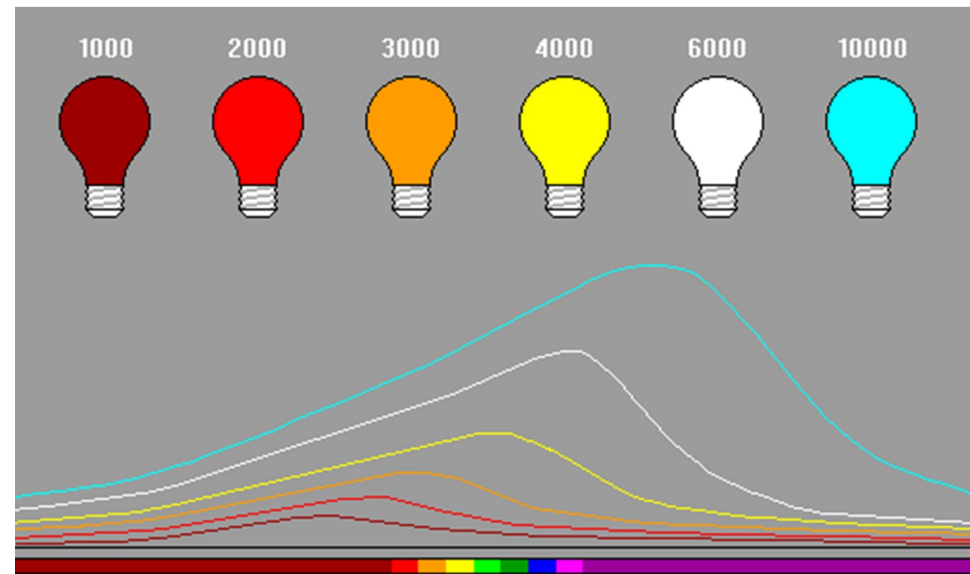
ვარსკვლავის ფერის ფორმირება

ვარსკვლავის ფერი განისაზღვრება მისი ზედაპირის ტემპერატურით.

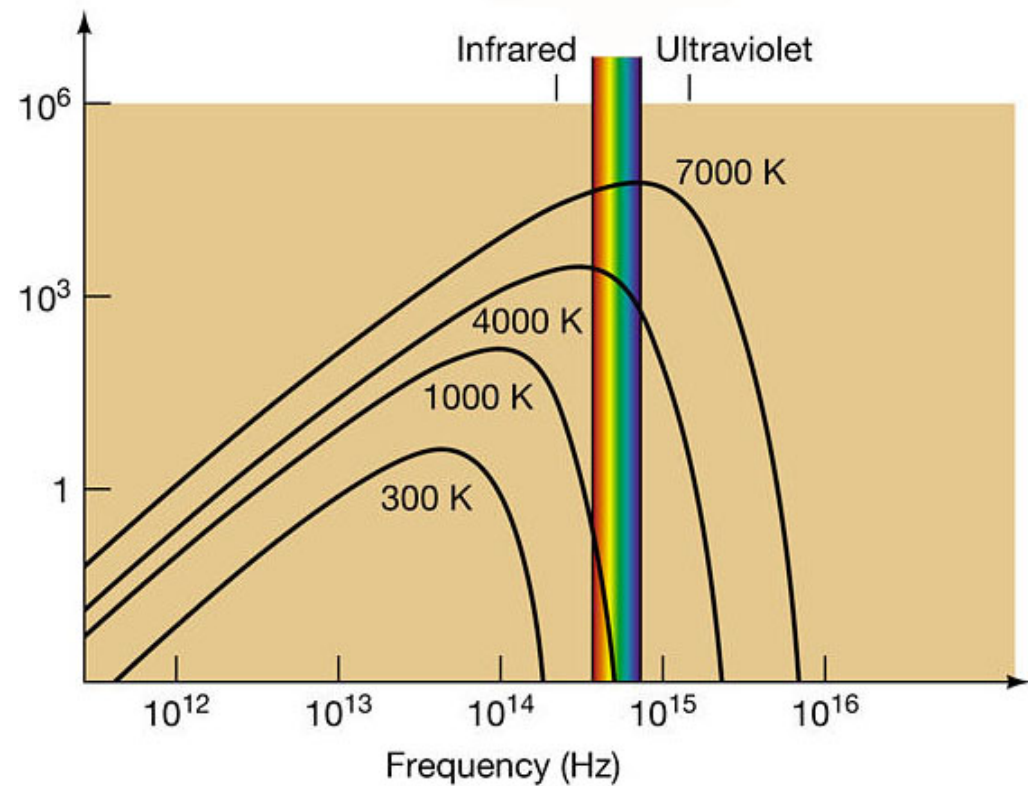
ვარსკვლავის ცენტრში ფიქსირებული ტემპერატურის პირობებში ზედაპირის ტემპერატურა კლებულობს ვარსკვლავის რადიუსის ზრდასთან ერთად (მაგ. წითელი გიგანტები)



ვარსკვლავთა სითბური გამოსხივება
ვარსკვლავის ფერი:
ეფექტური ტემპერატურა
ვარსკვლავის ზედაპირზე

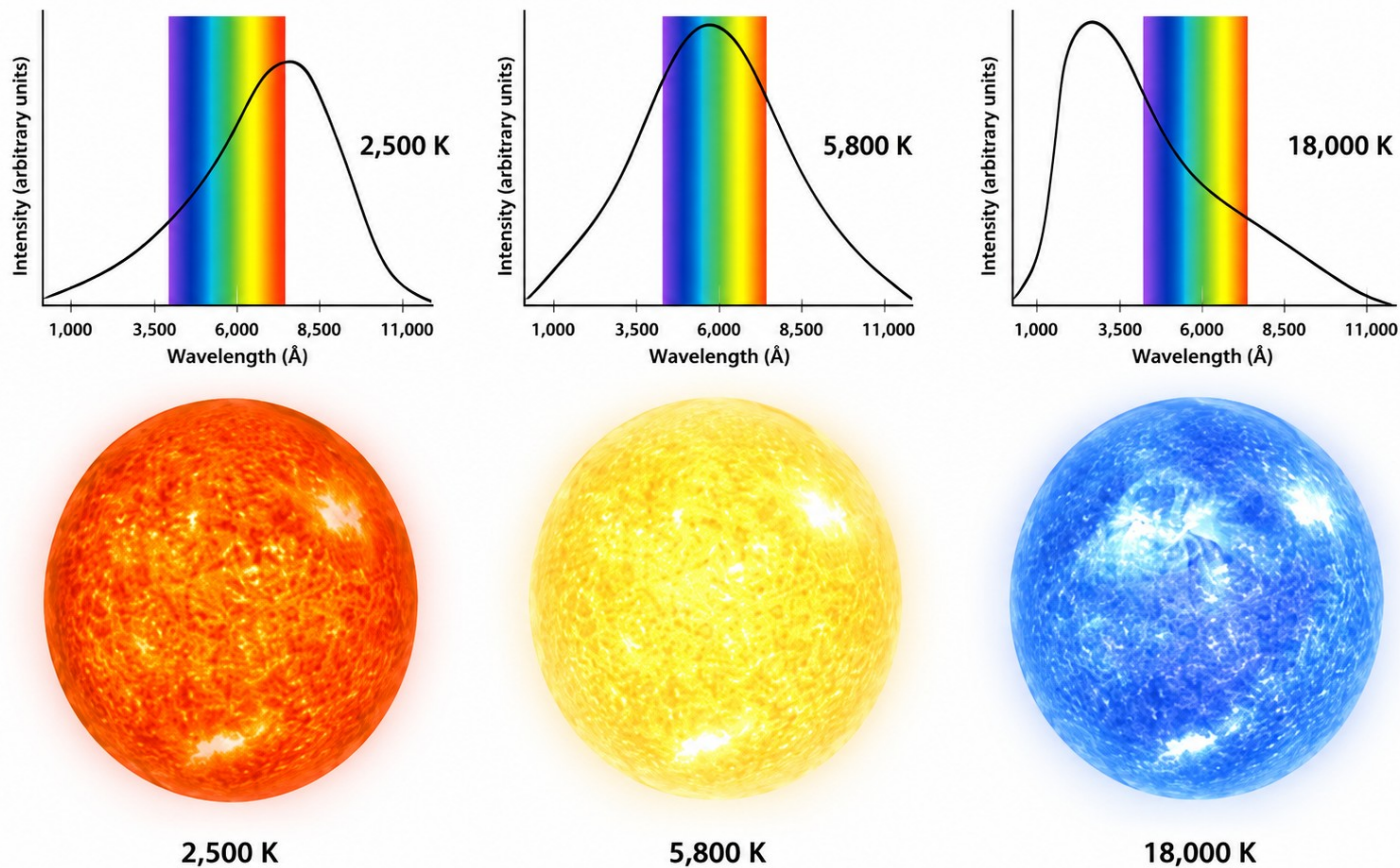


გამოსხივების სპექტრი:
გამოსხივების ინტენსივობა
სხვადასხვა ტალღის
სიგრძეზე (სიხშირეზე)



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

(ფერები გაზვიადებულია)

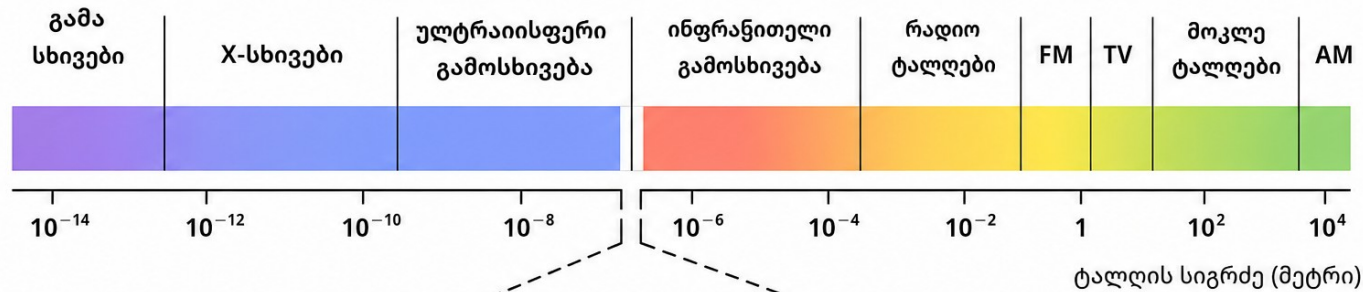


რატომ არ არსებობენ ძვანე ვარსკვლავები?

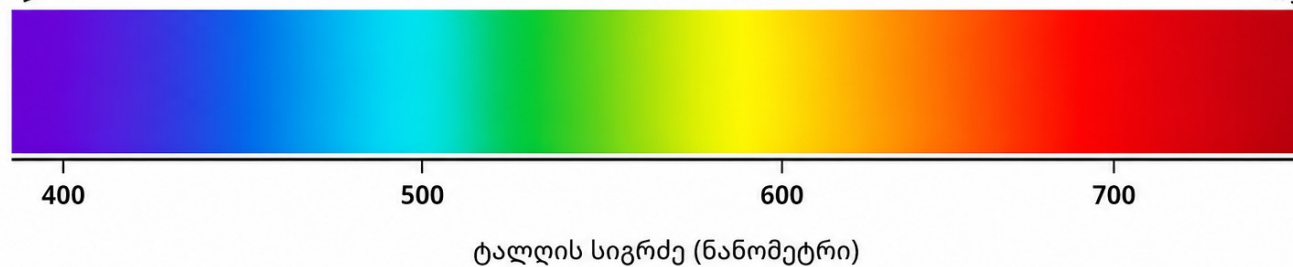
ხილული სამყარო

ჩვენ ვხედავთ ელექტრომაგნიტური სპექტრის მხოლოდ ოპტიკურ უბანს:

ელექტრომაგნიტური სპექტრის დიაპაზონები



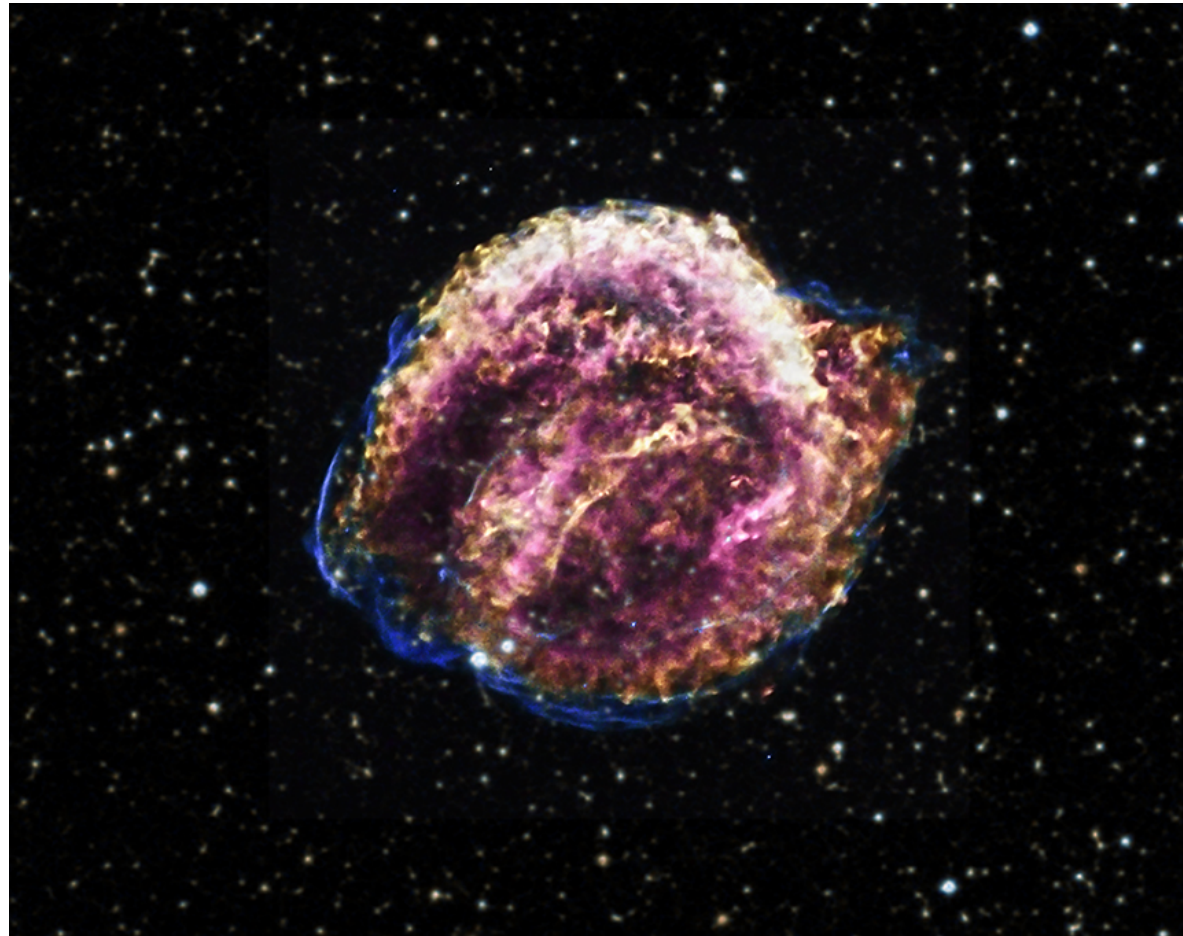
ხილული სინათლე



ცის ოპტიკური გამოსახულება:
ინფორმაციის მცირე ნაწილი



ფრთხილად - „ცრუ ფერი“ (false color)

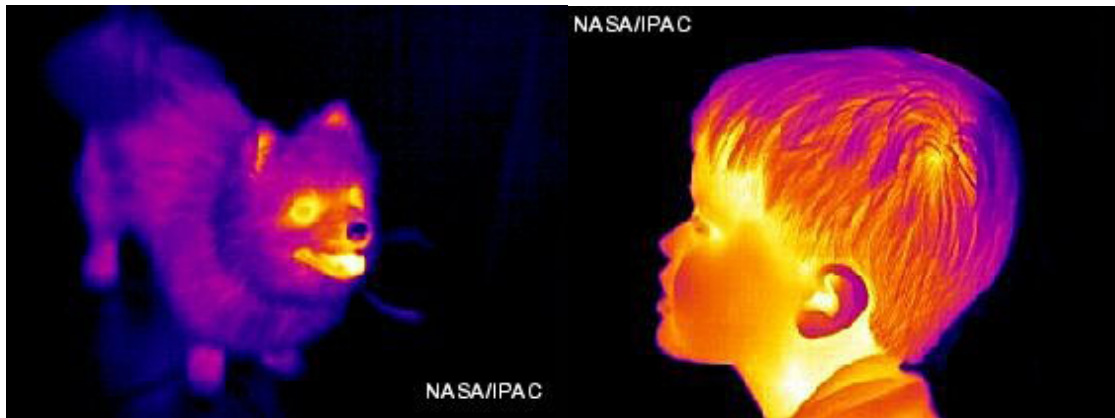
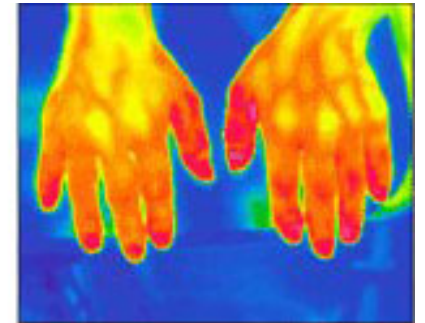
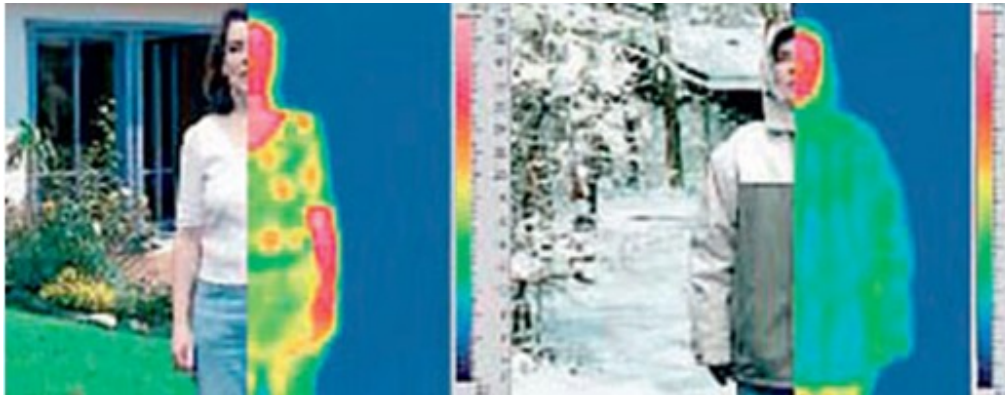


კეპლერის ზეახალის ნარჩენი SN1604

Colorcode: (ფსევდო, არა სითბური!)

X-ray: (Red=0.7-0.9 keV, Orange=1.6-2.1 keV, Green=2.7-3.4 keV, Blue=4-6 keV, Magenta=6-6.8 keV);

ინფრაწითელი დიაპაზონი

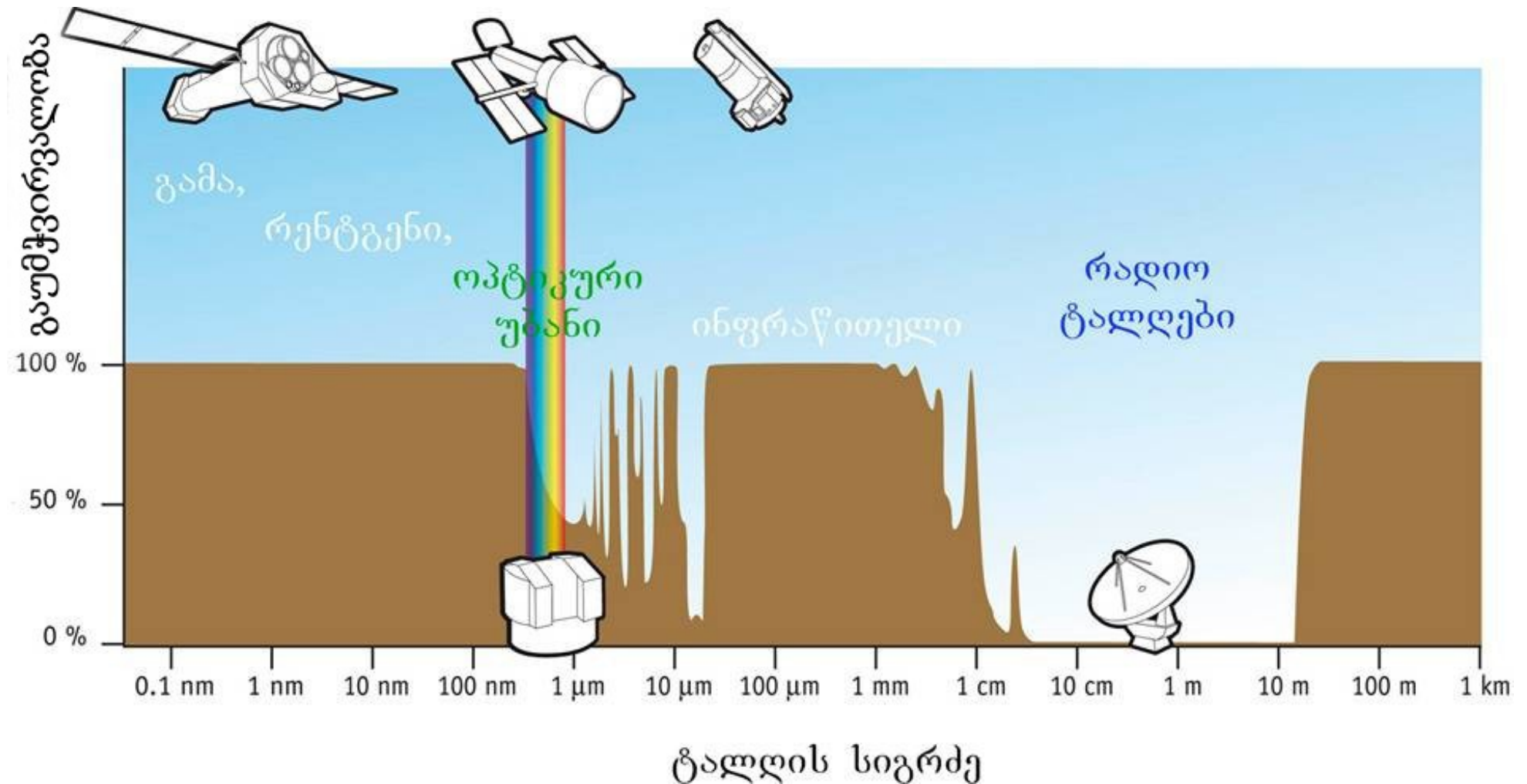


რენტგენული დიაპაზონი



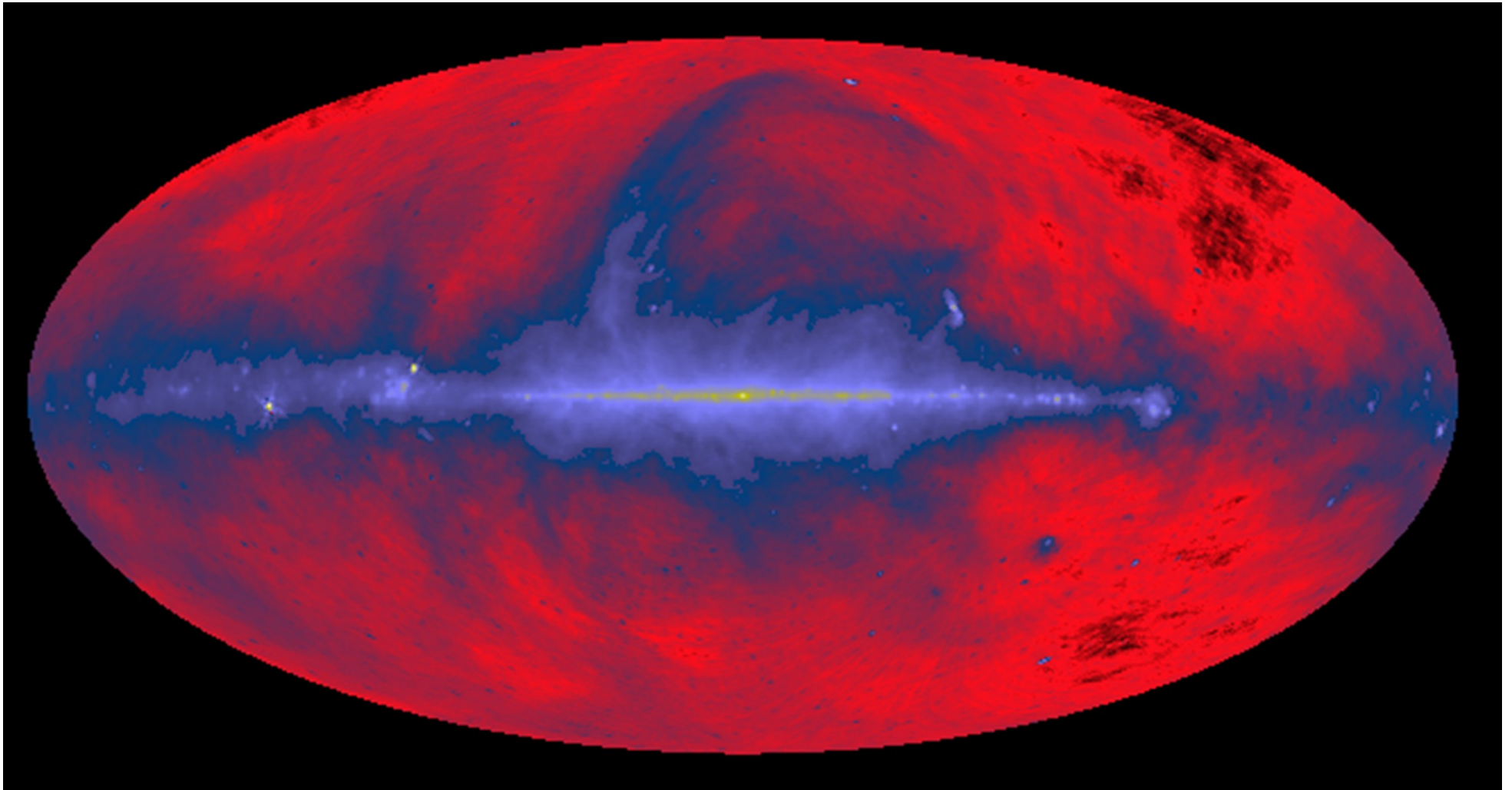
დაკვირვებები დედამიწიდან

ატმოსფეროს გაუმჭვირვალობა (opacity) ელექტრომაგნიტური ტალღების სხვადასხვა დიაპაზონში

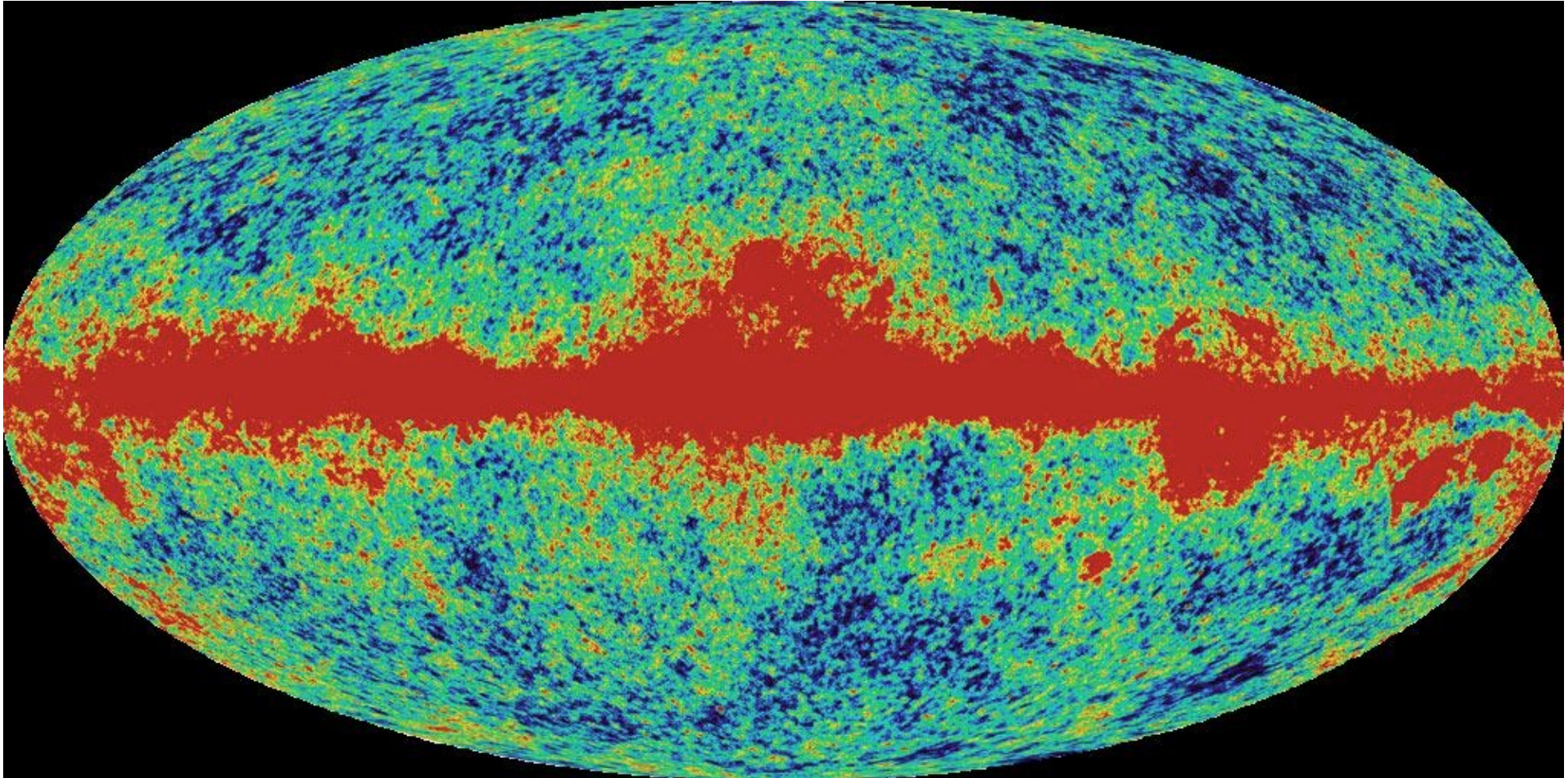


რადიო დიაპაზონი

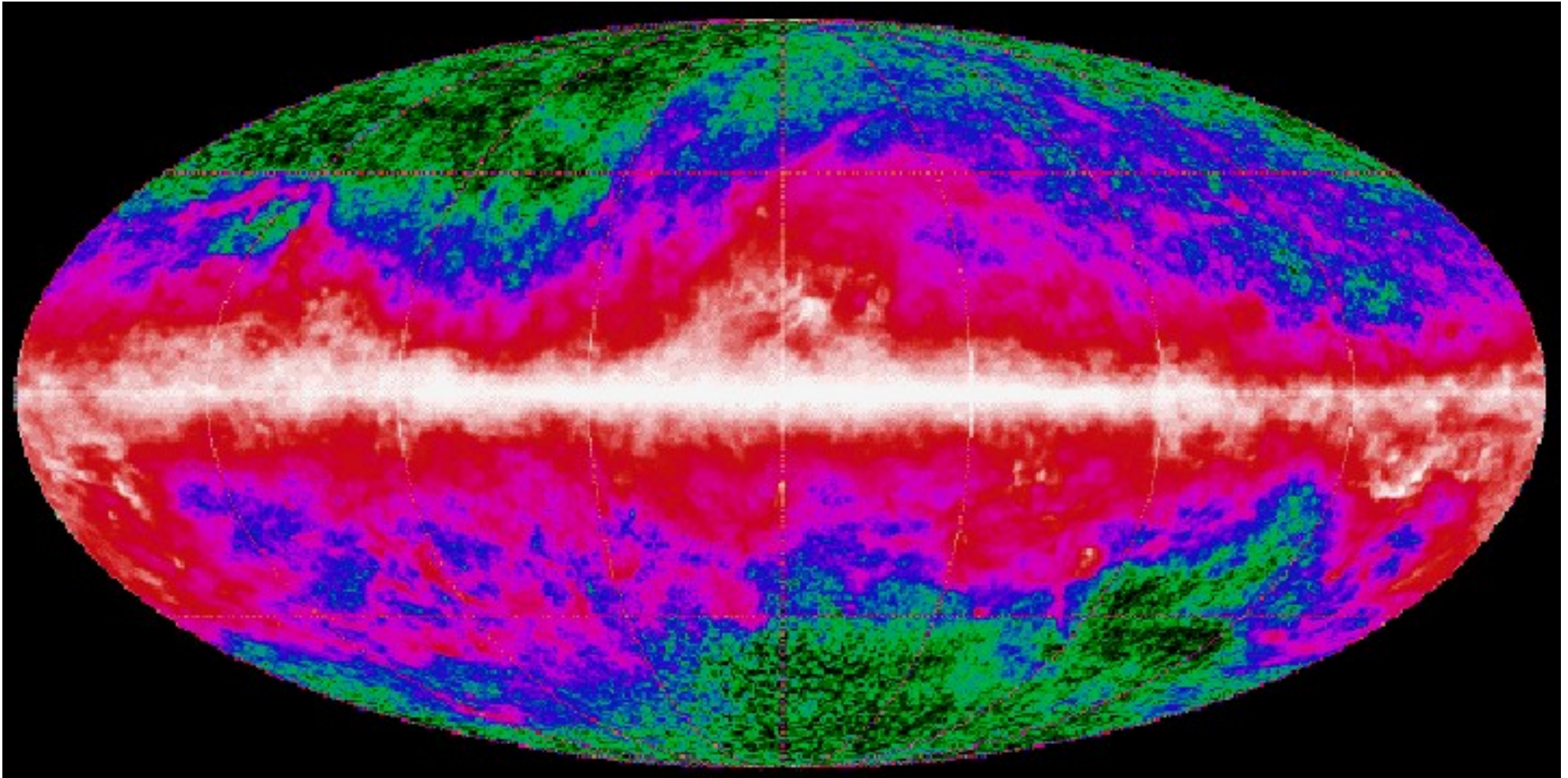
გარემოს ეფექტური ტემპერატურა: $E \sim 1.7 \cdot 10^{-6} \text{ eV}$ ($T=0.02\text{K}$)



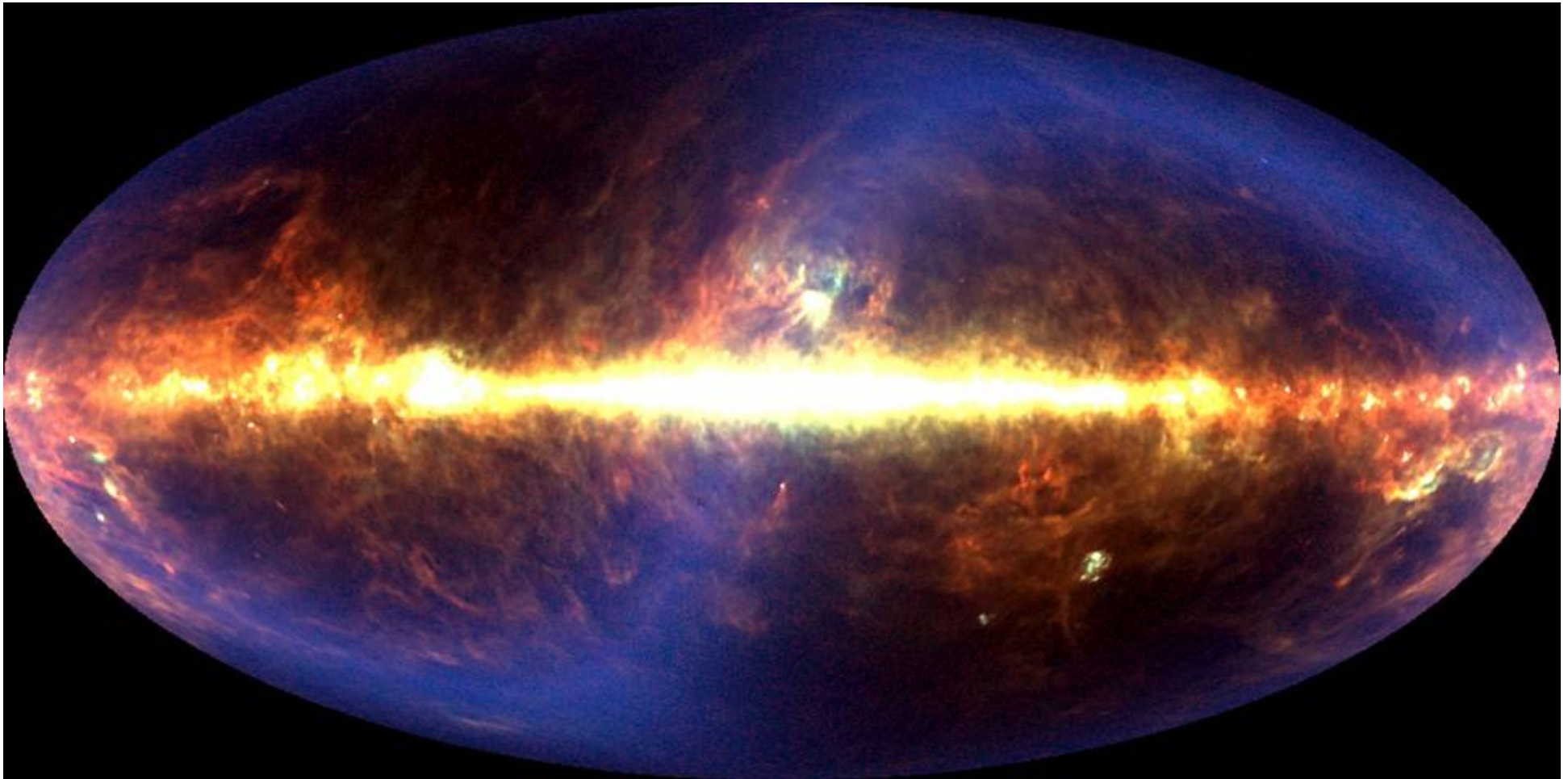
გარემოს ეფექტური ტემპერატურა: 2.725K



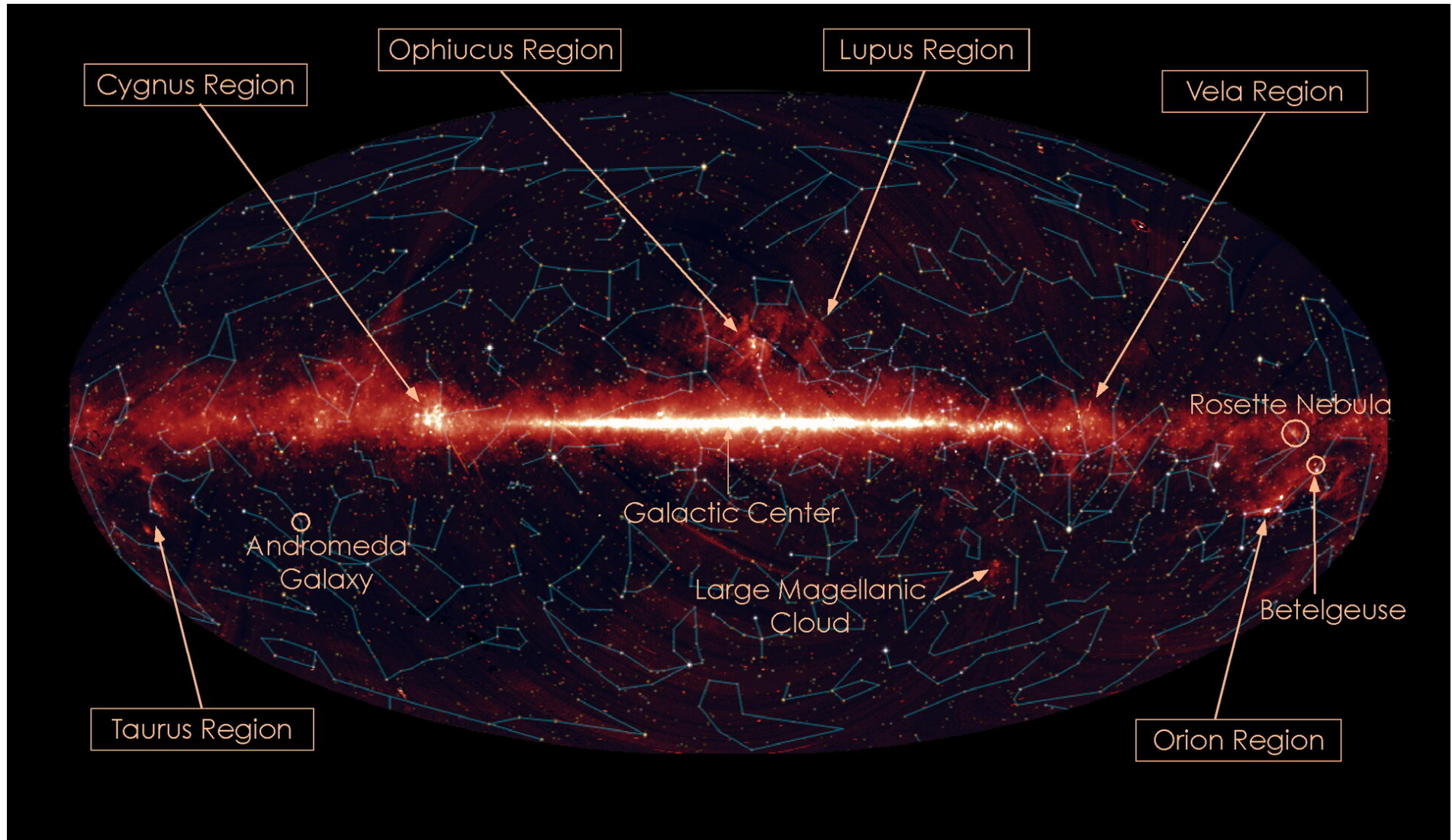
გარემოს ეფექტური ტემპერატურა: $E \sim 5 \cdot 10^{-3}$ eV ($T=40$ K)



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

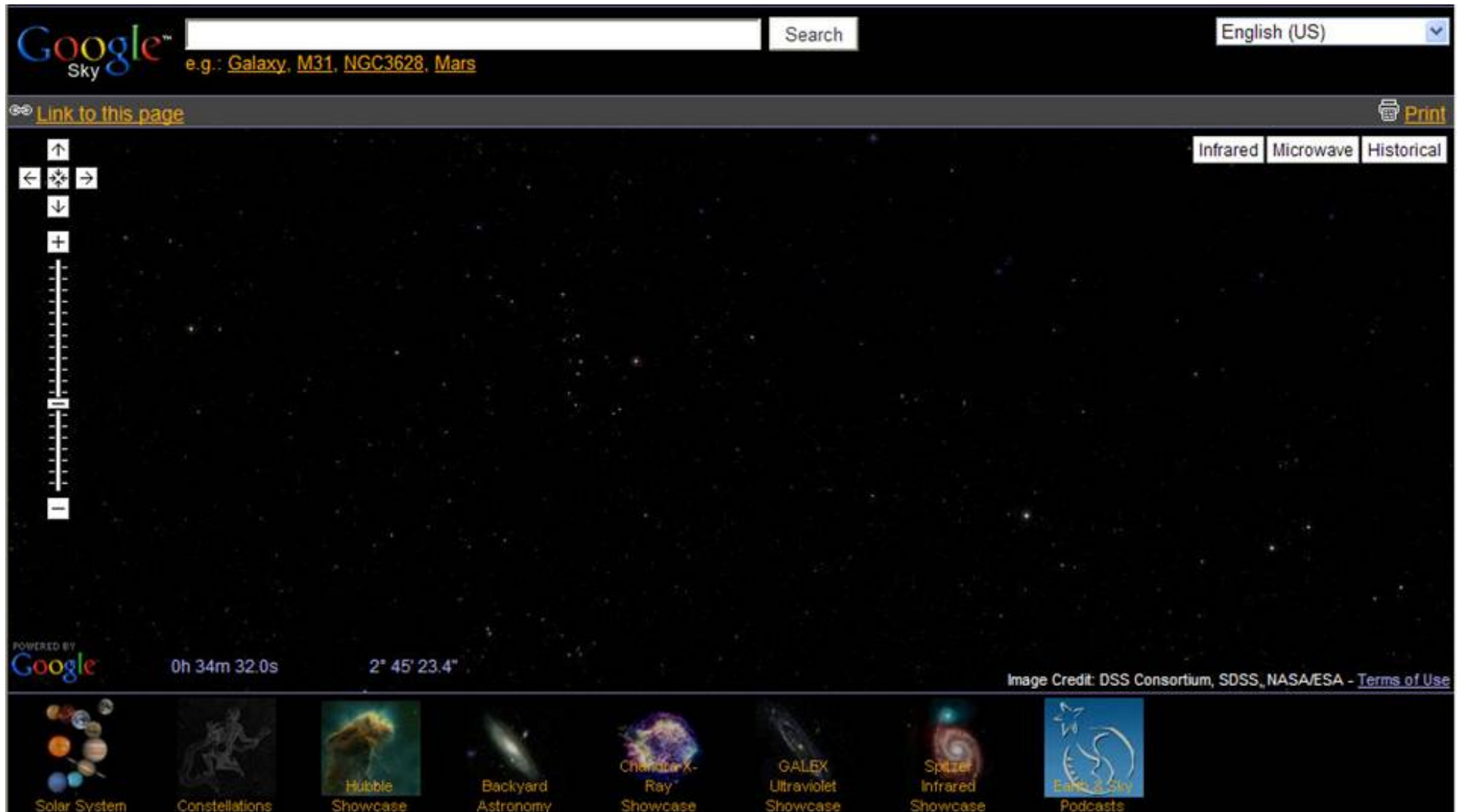


ჩვენი გალაქტიკა ინფრაწითელ დიაპაზონში

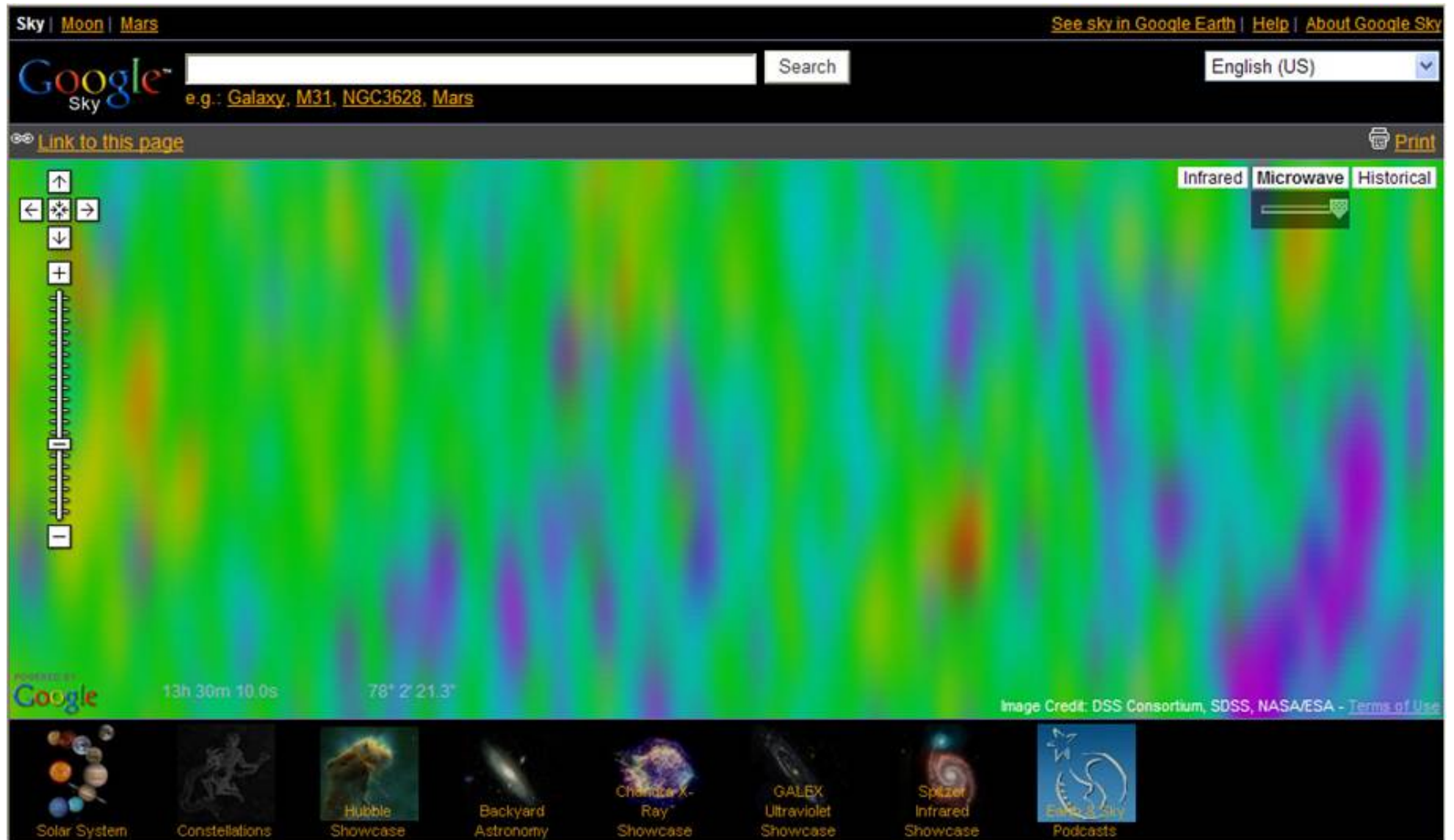


ოპტიკური დიაპაზონი

ობიექტების ეფექტური ტემპერატურა: $\sim 900\text{K}+$



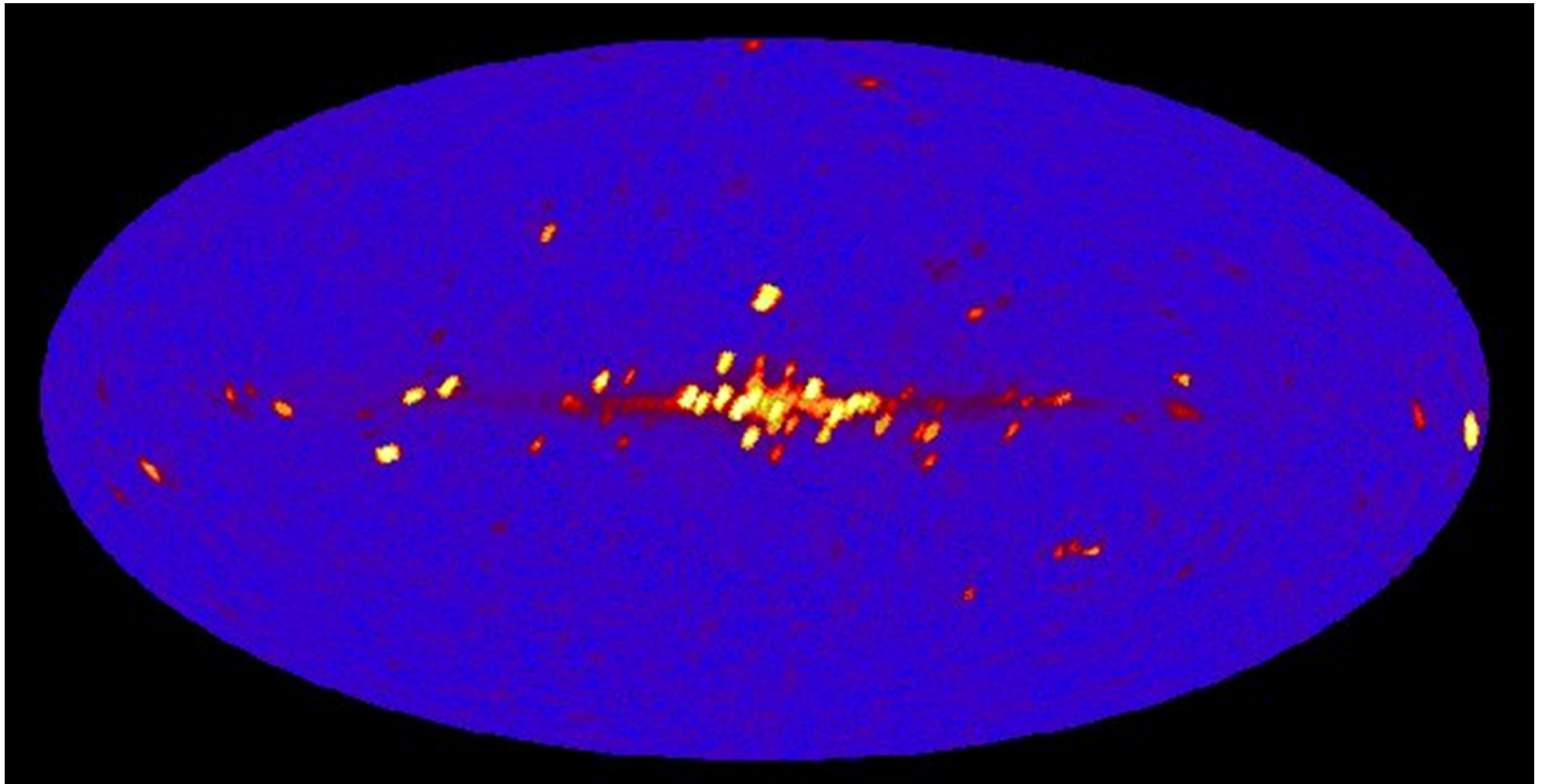
ინფრაწითელი + მიკროტალღოვანი



რენტგენული დიაპაზონი (X-ray)

ფოტონის ენერგია: $10^3 - 10^4 \text{ eV}$

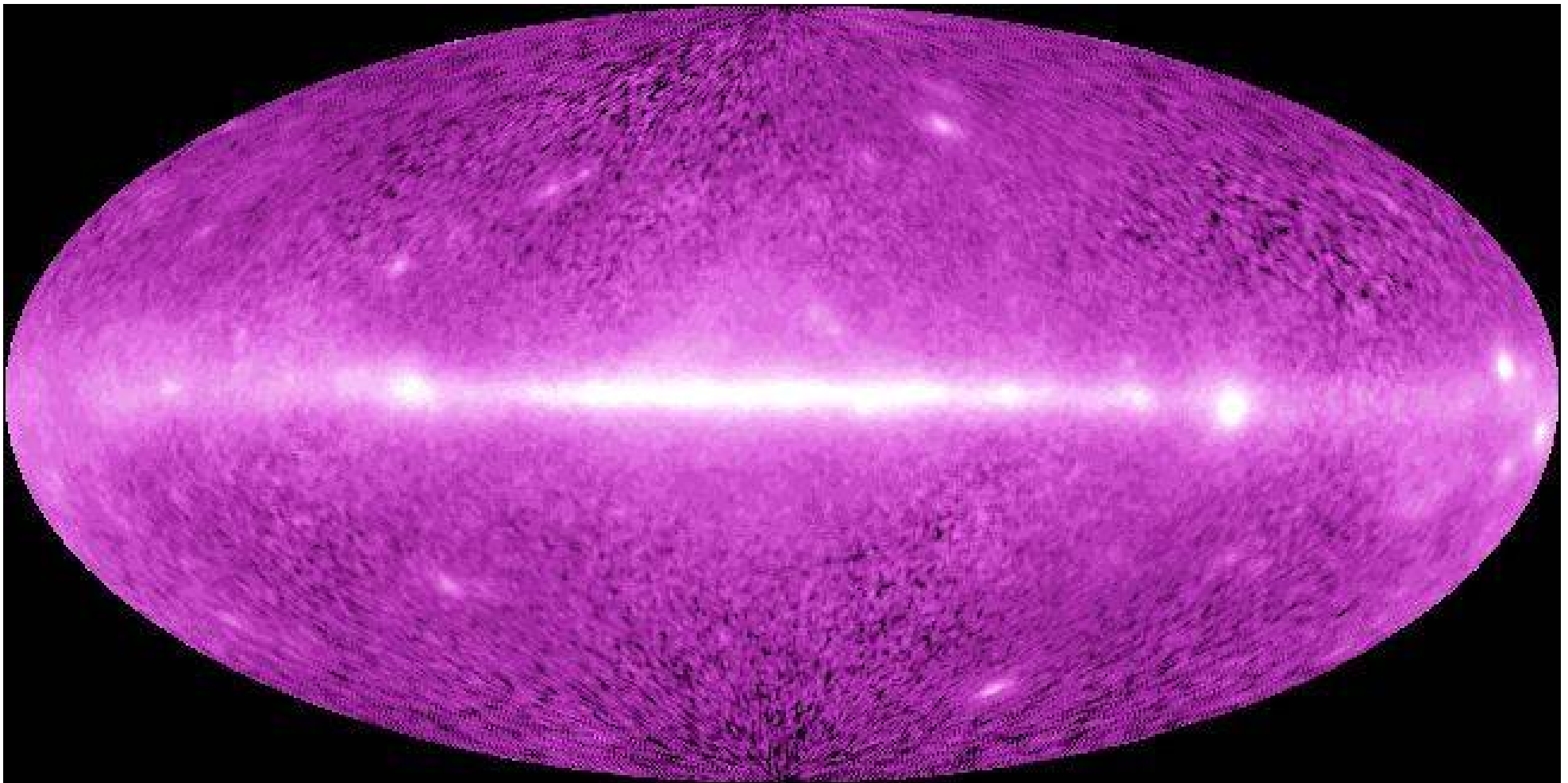
ობიექტების ეფექტური ტემპერატურა: $\sim 10^8 \text{ K}$



გამა დიაპაზონი

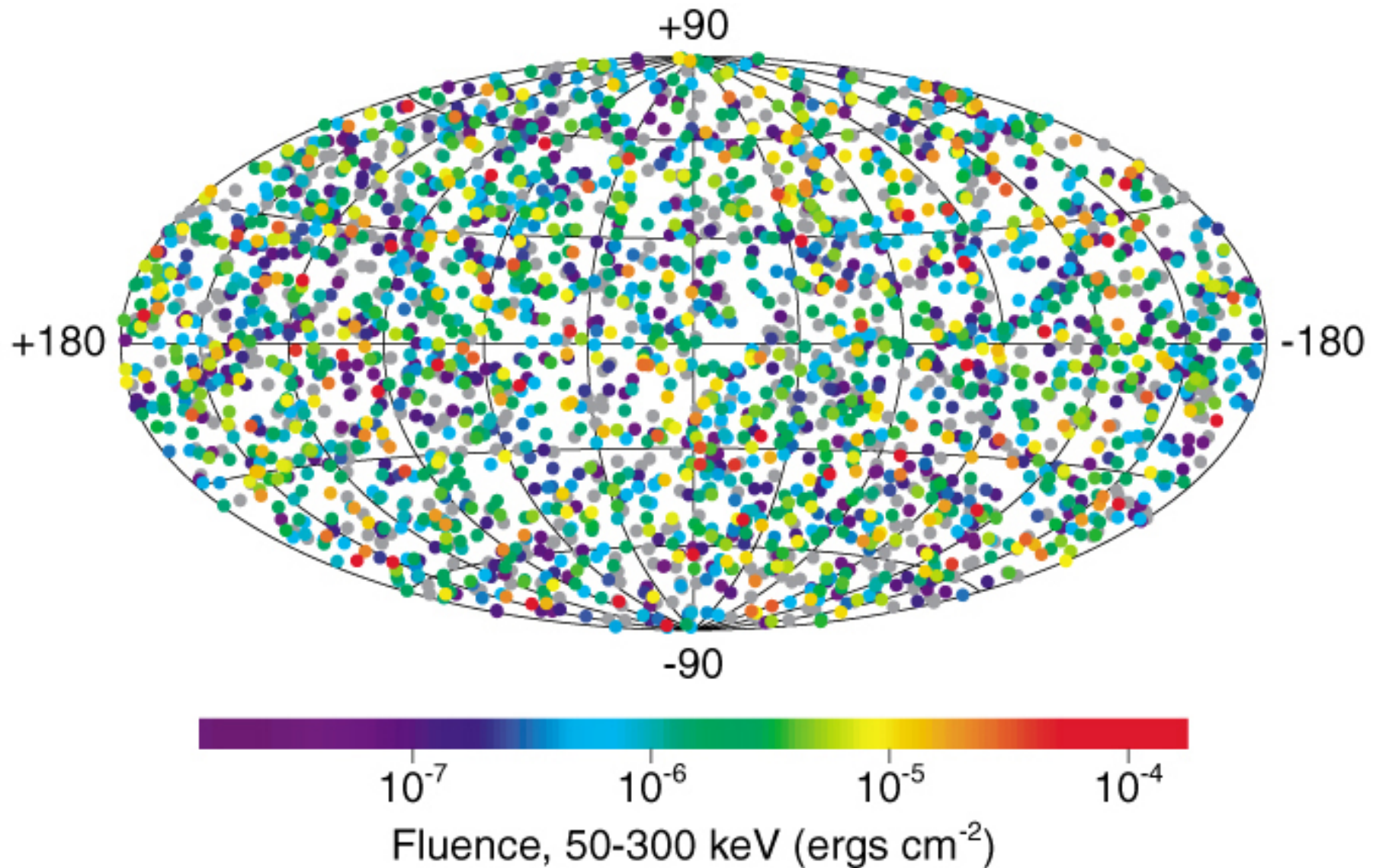
ფოტონის ენერგია: $10^6 - 10^9 \text{ eV}$

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



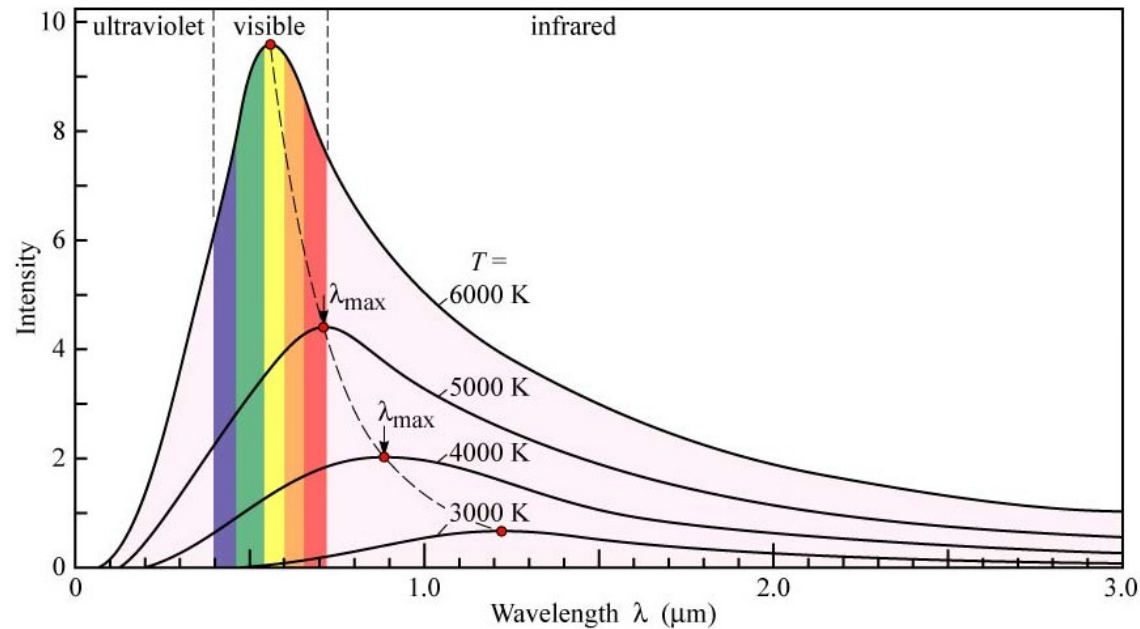
გამა დიაპაზონი

გამოსხივების გაელვებები („ჩქაფები“) ~ 0.2 წმ
სამაროში ყველაზე მაღალენერგეტიკული წყაროები

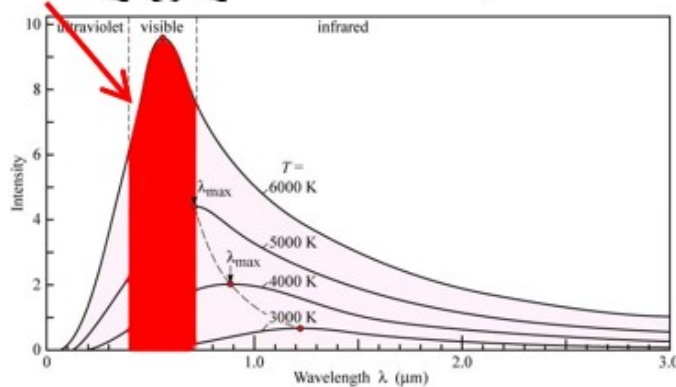


ვარსკვლავების სითბური გამოსხივება

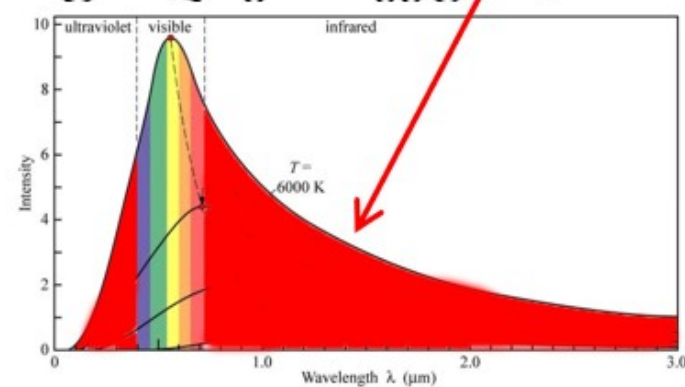
ვარსკვლავების გამოსხივება მოიცავს როგორც ხილულ, ასევე ელ.მაგ. სპექტრის სხვა უბნებს:



ხილული ნათობა;



უხილავი სპექტრი;



ვარსკვლავის გამოსხივების ბოლომეტრული სიდიდე

ვარსკვლავის გამოსხივების ენერგია:

- ოპტიკური დიაპაზონი;
- არა ოპტიკური უბნები;

ვარსკვლავის გამოსხივების დაკვირვებითი მახასიათებელი: **ვარსკვლავიერი სიდიდე**

ვარსკვლავის აბსოლუტური ნათობის შედარება ნორმირების სიდიდესთან ($\sim F_{\text{Vega}}$) ნათებასთან შებრუნებულ ლოგარითმულ სკალაზე;

$$m = -2.5 \log_{10} \left(\frac{F}{F_0} \right)$$

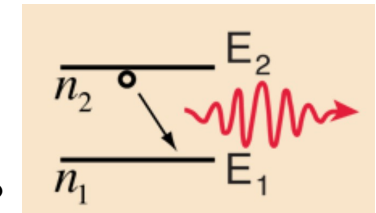
- m** - ვარსკვლავიერი სიდიდე
 Δm - ბოლომეტრული შესწორება
 $M = m + \Delta m$ - ბოლომეტრული სიდიდე

ბოლომეტრული შესწორება დამოკიდებულია ვარსკვლავის ზედაპირის ტემპერატურაზე.

ატომური გამოსხივების ხაზები

შროდინგერის განტოლება: ელექტრონები დისკრეტული დონეებზე $n=1,2,3\dots$

ფოტონის გამოსხივება: ელექტრონის ერთი დონიდან მეორეზე გადასვლა



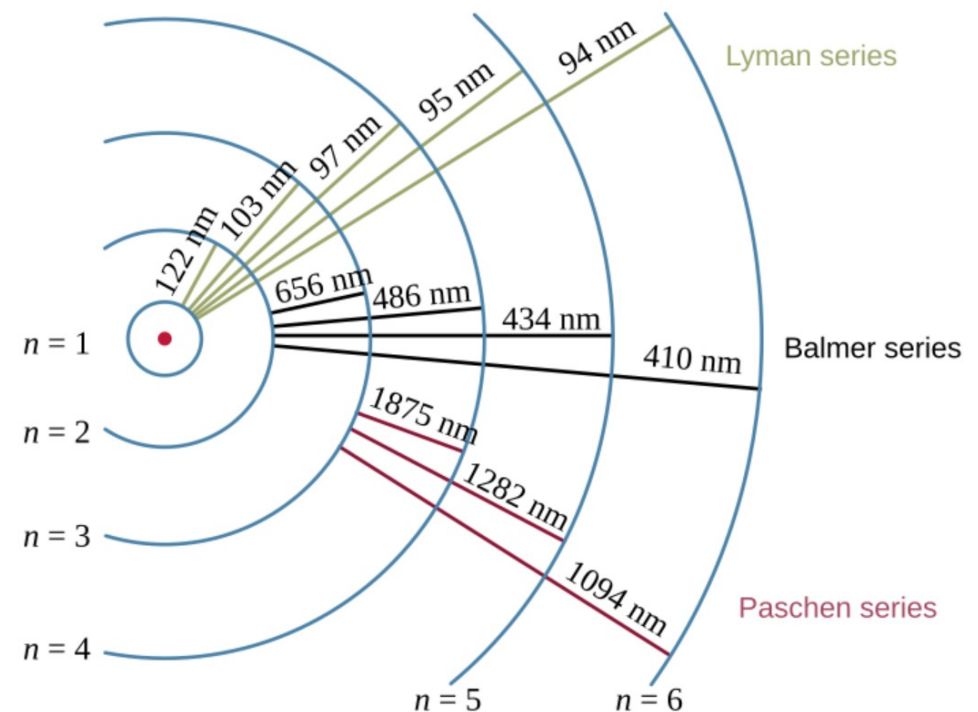
გამოსხივებული ფოტონის ენერგია: $E = h\nu = h C/\lambda$

გამოსხივების ხაზების სერიები:

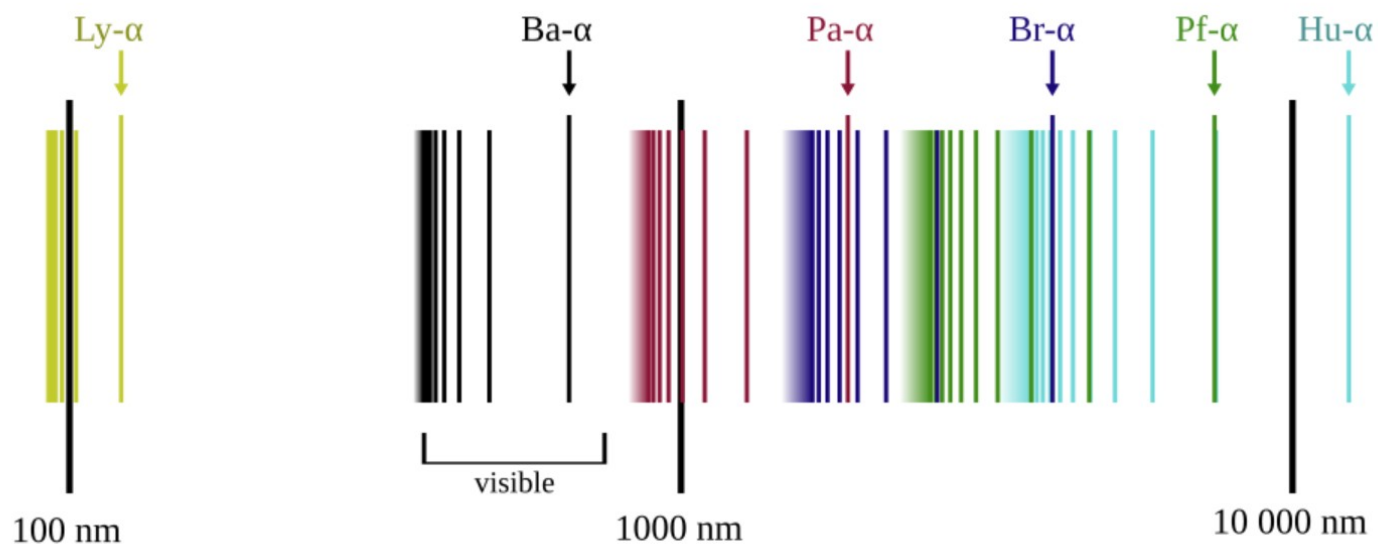
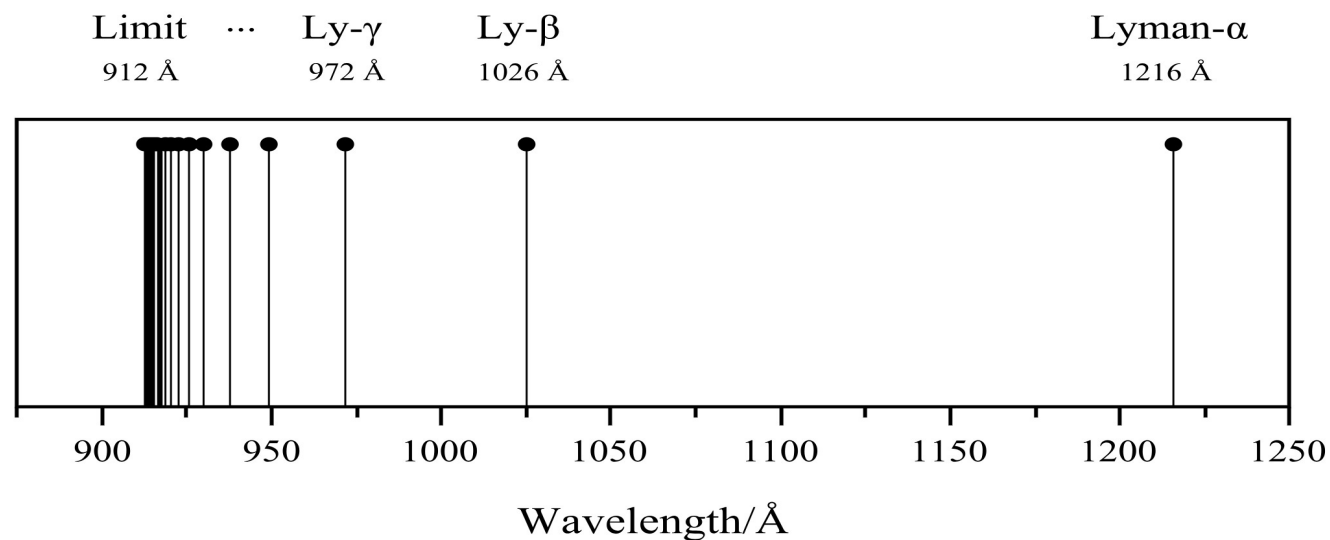
- $n=1$ - ლაიმანის;
- $n=2$ - ბალმერის;
- $n=3$ - პაშენის;
- $4/5/6$ - Brackett/Pfund/Humphreys



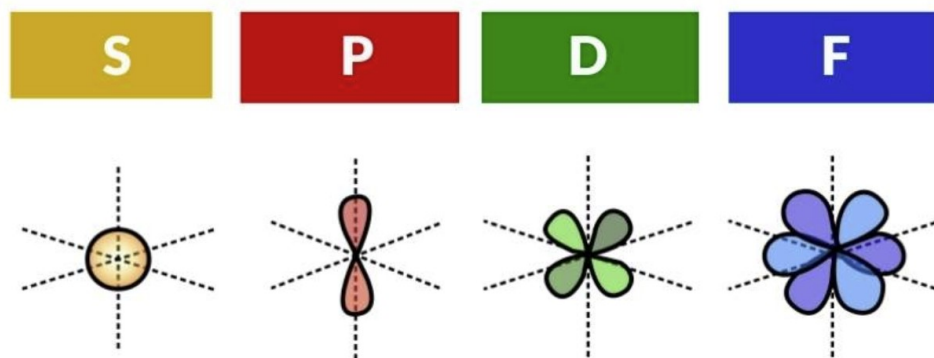
წყალბადის ატომის ბალმერის სერია



წყალბადის ატომის გამოსხივების/შთანთქმის სპექტრი



ელექტრონების ორბიტალები



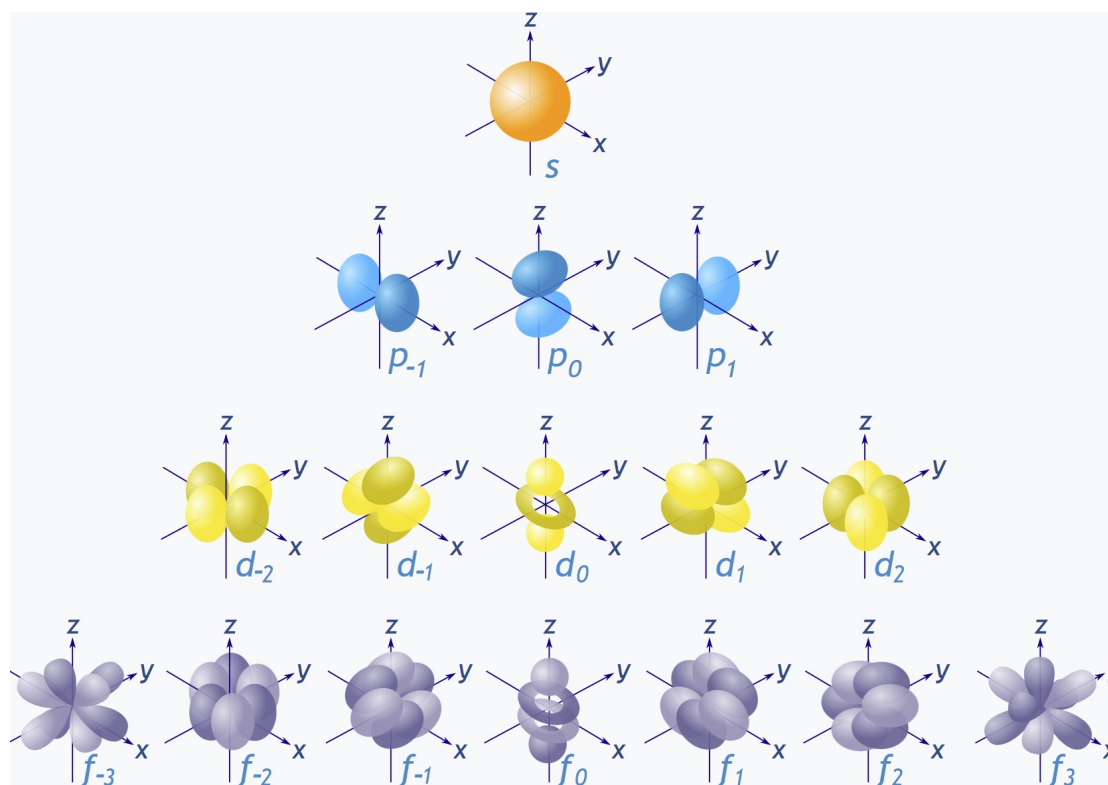
Orbital Types in Energy Levels

$n = 1$ 1s

$n = 2$ 2s 2p

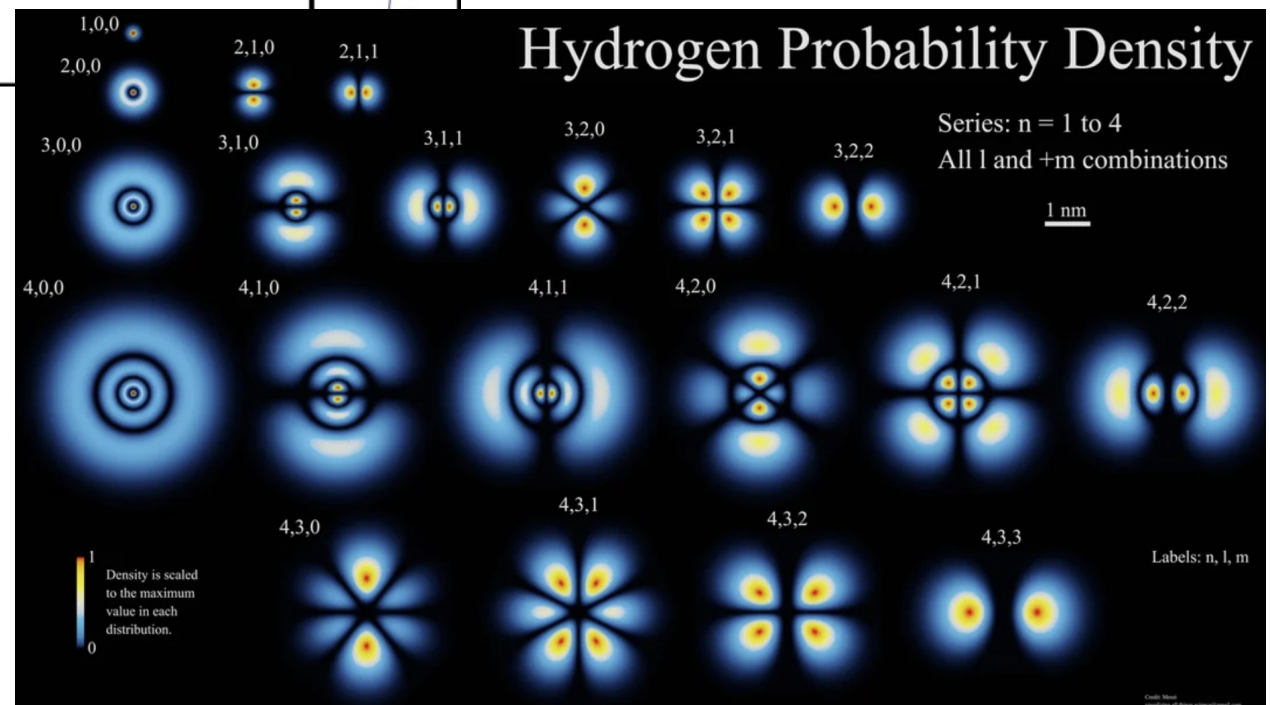
$n = 3$ 3s 3p 3d

$n = 4$ 4s 4p 4d 4f



ელექტრონული დრუბლის გეომეტრია

TYPE	SET	INDIVIDUAL ORBITALS	COLLECTIVE
f	Cubic		
	General		
d	Common		
	"Tri-torus"		
p			
s			

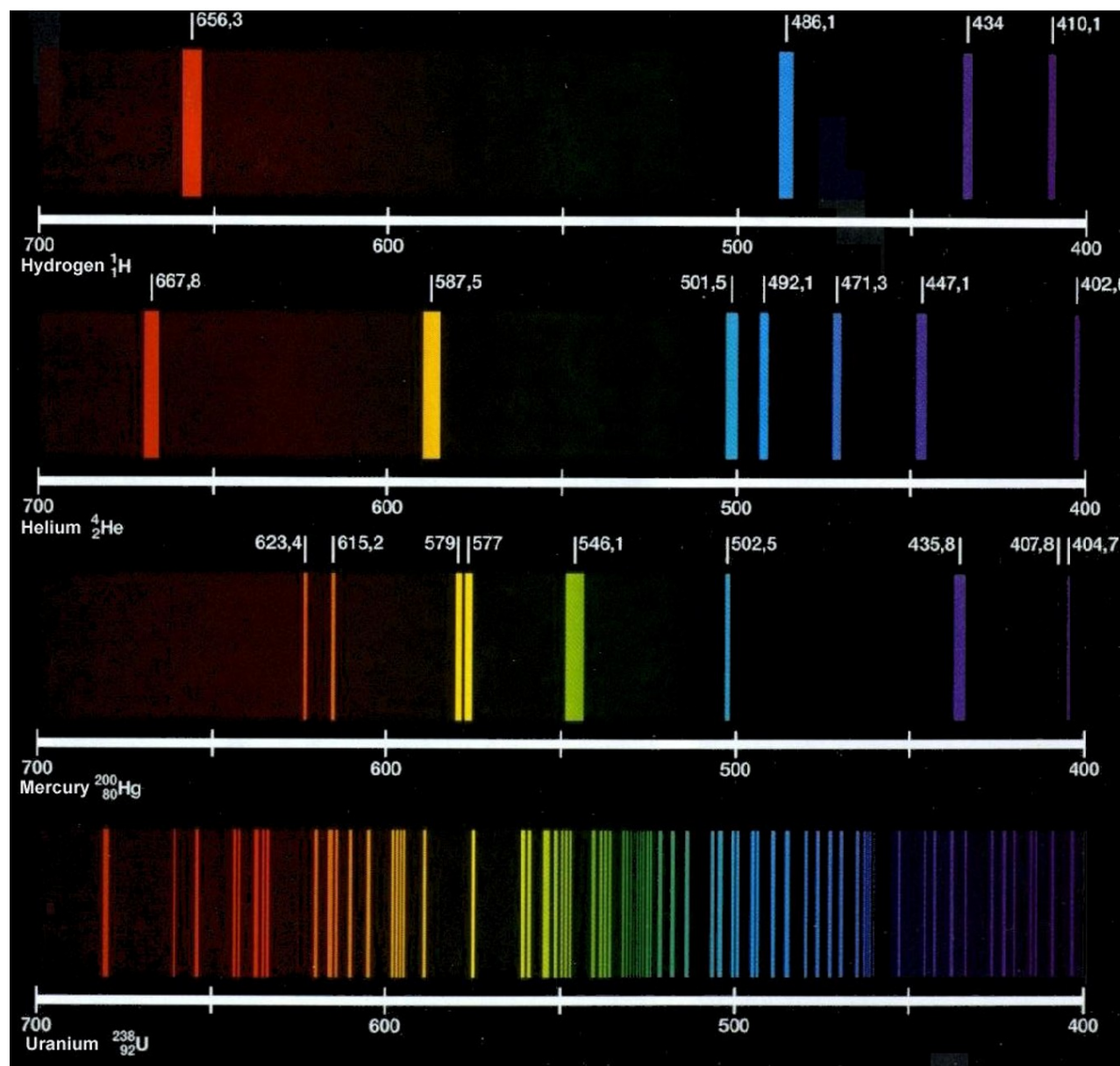


სპექტრული ხაზები

ქიმიური შემადგენლობა

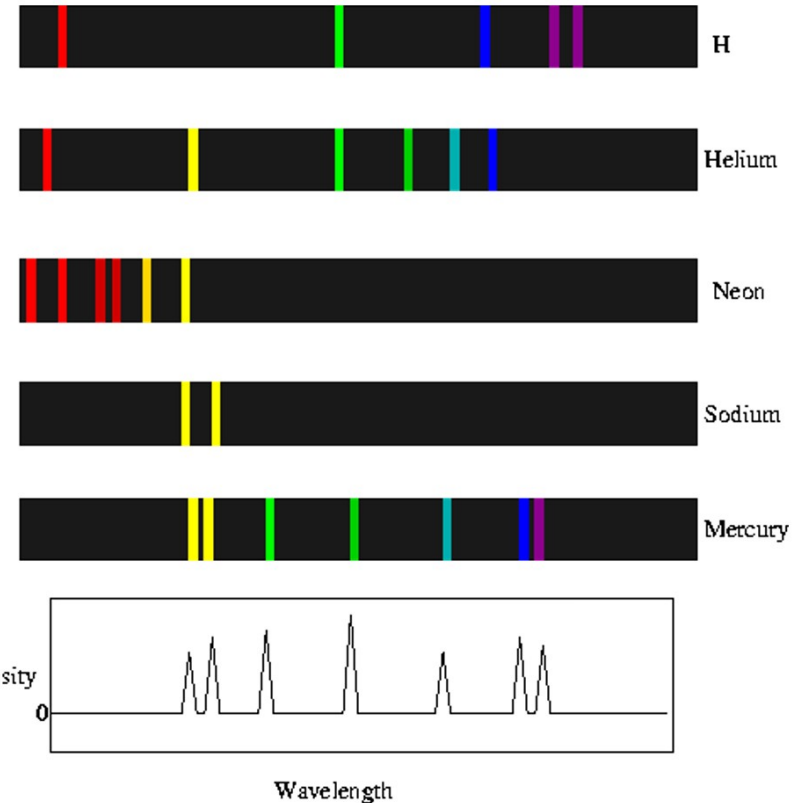
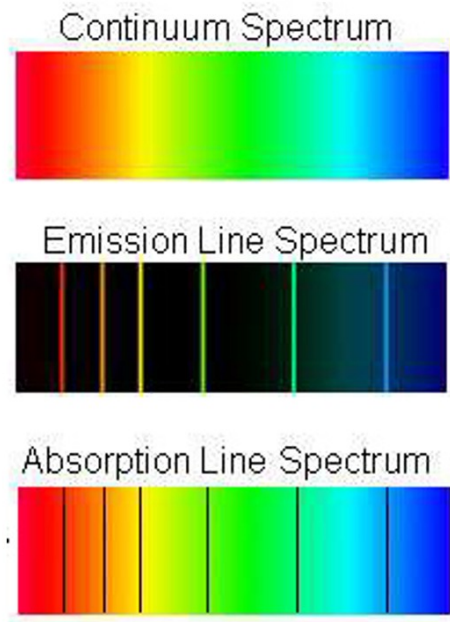
ყოველ ქიმიურ
ელემენტს ახასიათებს
ხაზების უნიკალური
თანმიმდევრობა

“სპექტრული ანალიზი”



სპექტრული ანალიზი

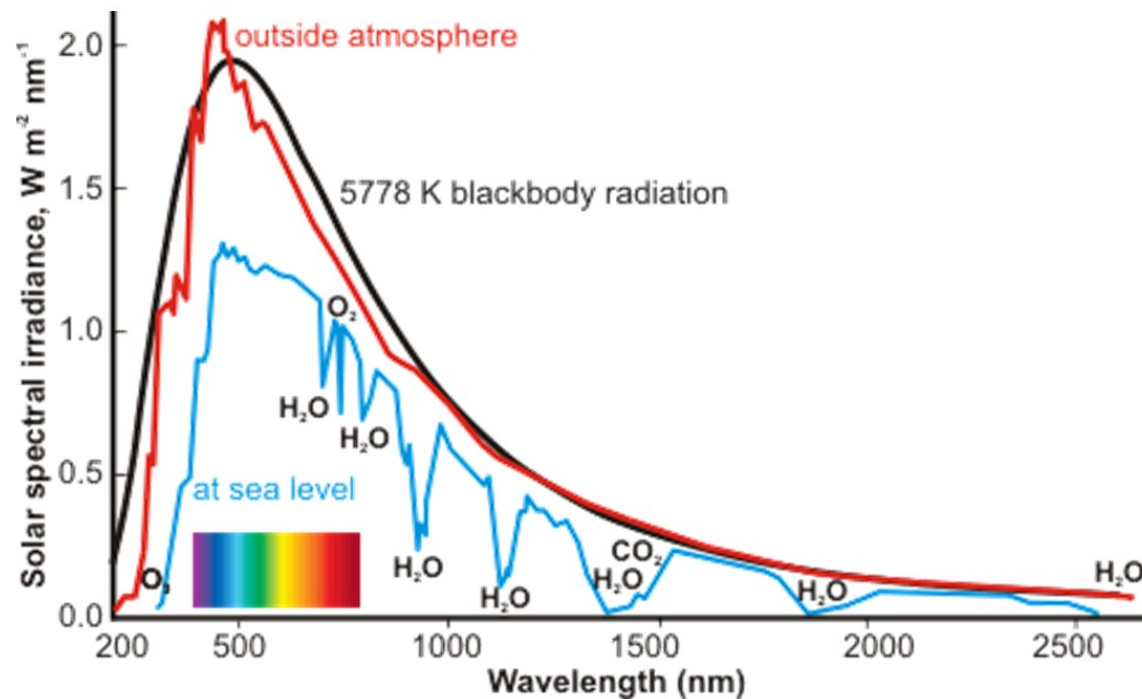
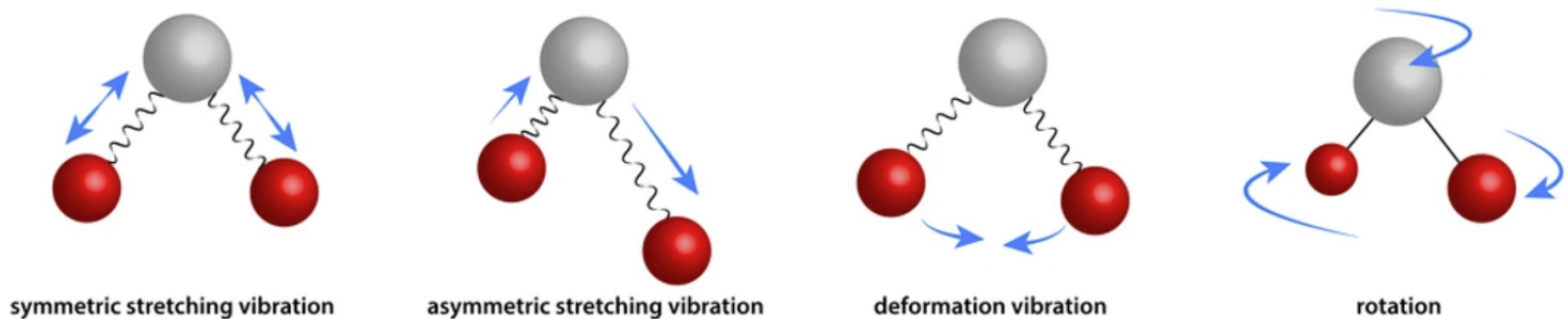
სპექტრული ხაზები:
გამომსხივებელი გარემოს
ქიმიური შემადგენლობა



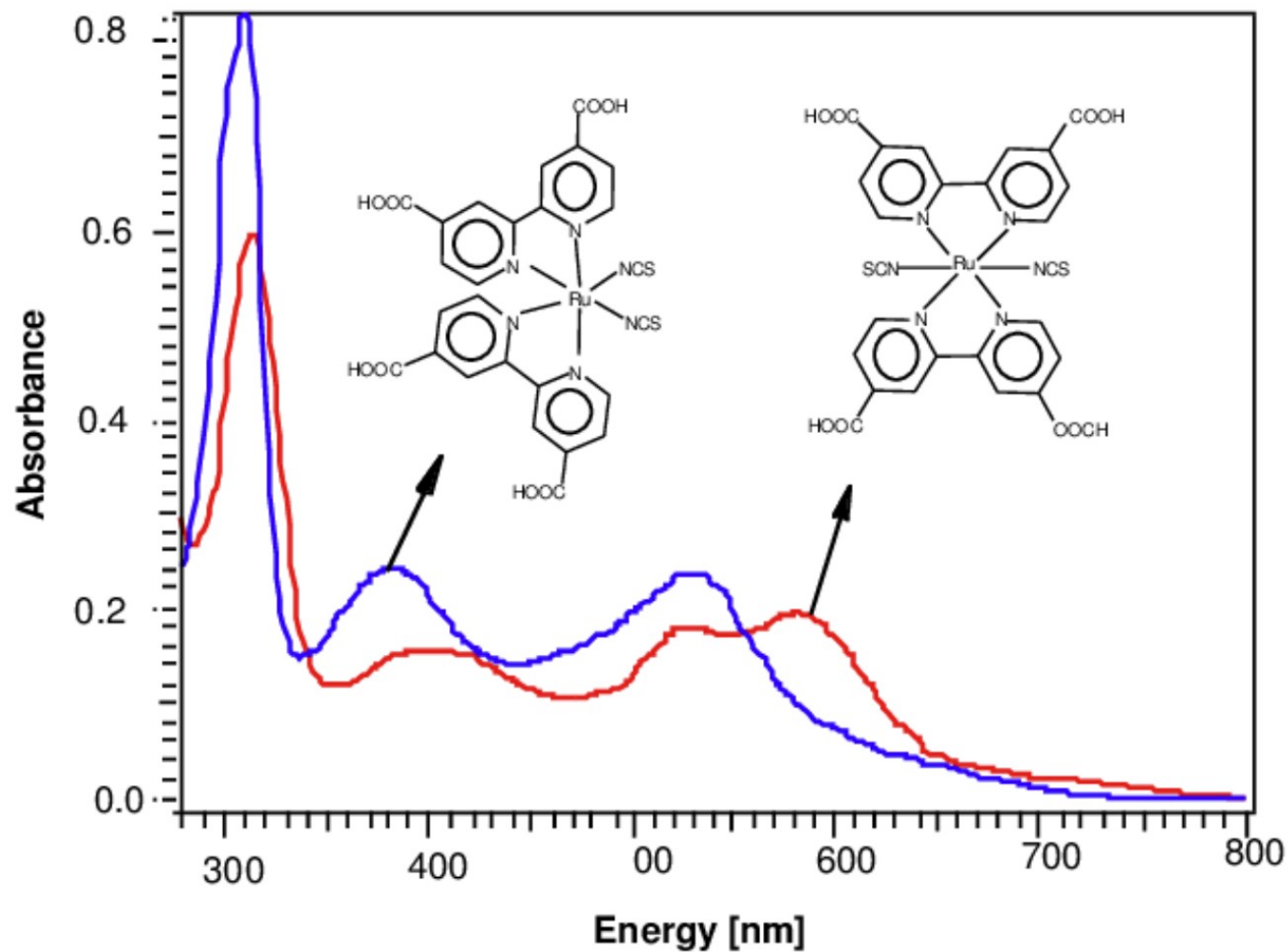
გამოსხივების და
შთანთქმის ხაზები

მოლეკულური ხაზები

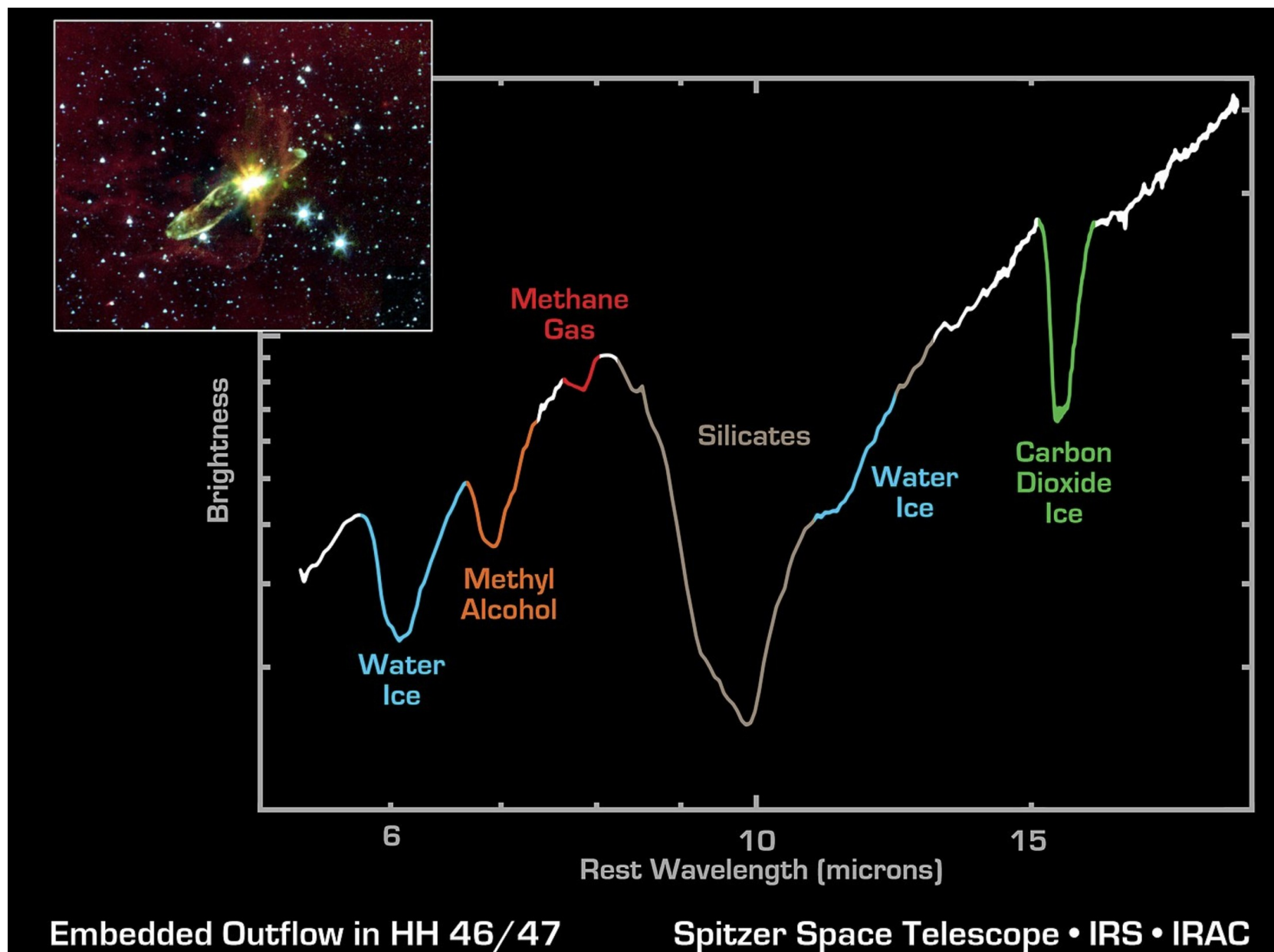
მოლეკულის მოძრაობის თავისუფლების ხარისხები: რხევითი/ბრუნვითი/ვიბრაციის ენერგია ფოტონების გამოსხივების მექანიზმი იონიზაცია/რეკომბინაციის გარეშე



რთული მოლეკულების სპექტრული ანაბეჭდი



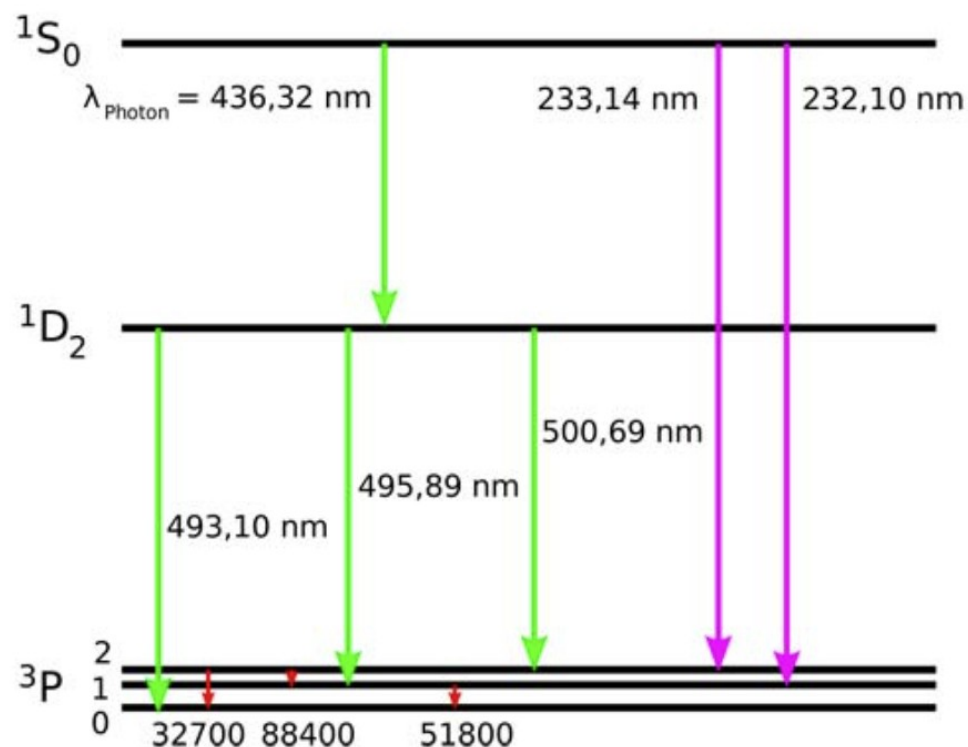
SST (Spitzer Space Telescope) – HH46/47 ჯეტი



აკრძალული ხაზები

ელექტრონის ერთი მეტასტაბილური ორბიტიდან მეორეზე „გადახტომა“: არასტაციონალური პროცესი

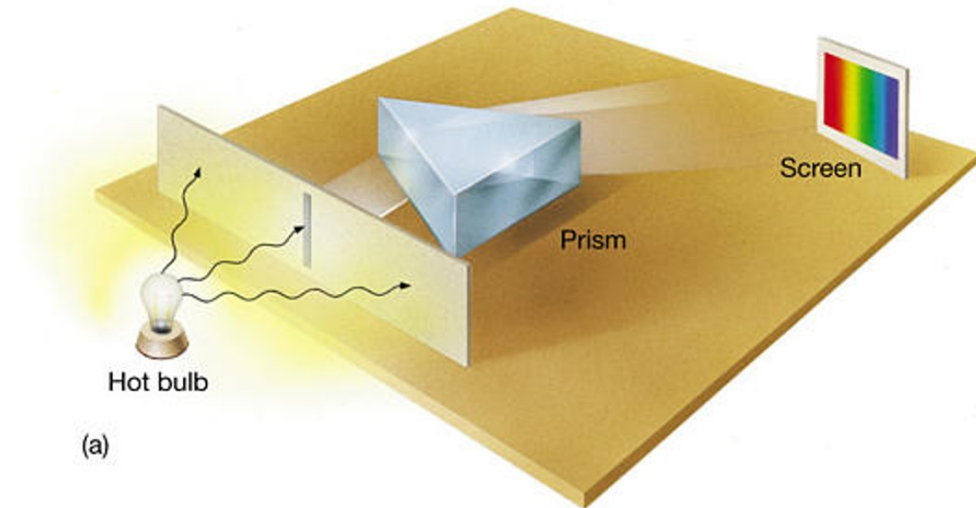
ძალიან დაბალი სიმკვრივე: ატომების დაჯახებებს შორის დროის ინტერვალი: 10-10,000 წმ
 ახალი ელემენტი: „nebulium“??



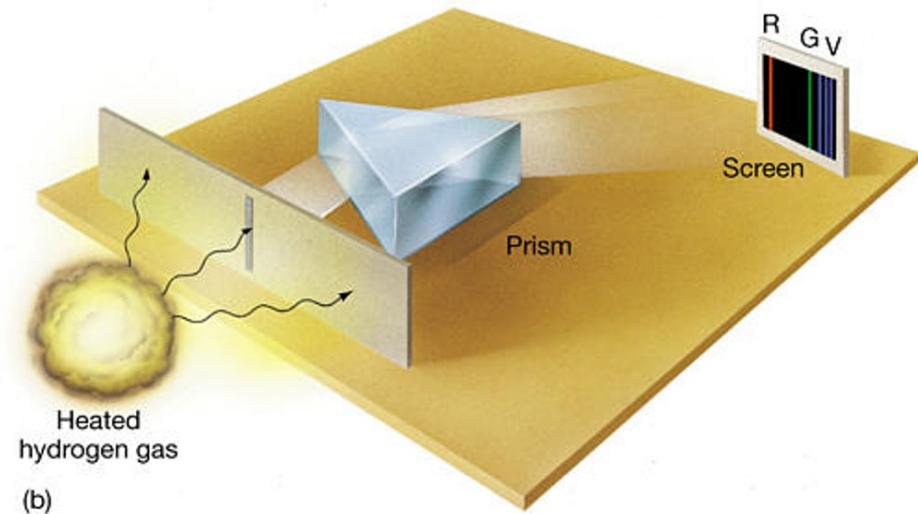
Electron transitions of doubly ionized oxygen:
 forbidden transitions in the visible spectrum are
 shown in green.

სპექტრული ანალიზი

გავარვარებული
ნათურის გამოსხივება:
უწყვეტი სპექტრი

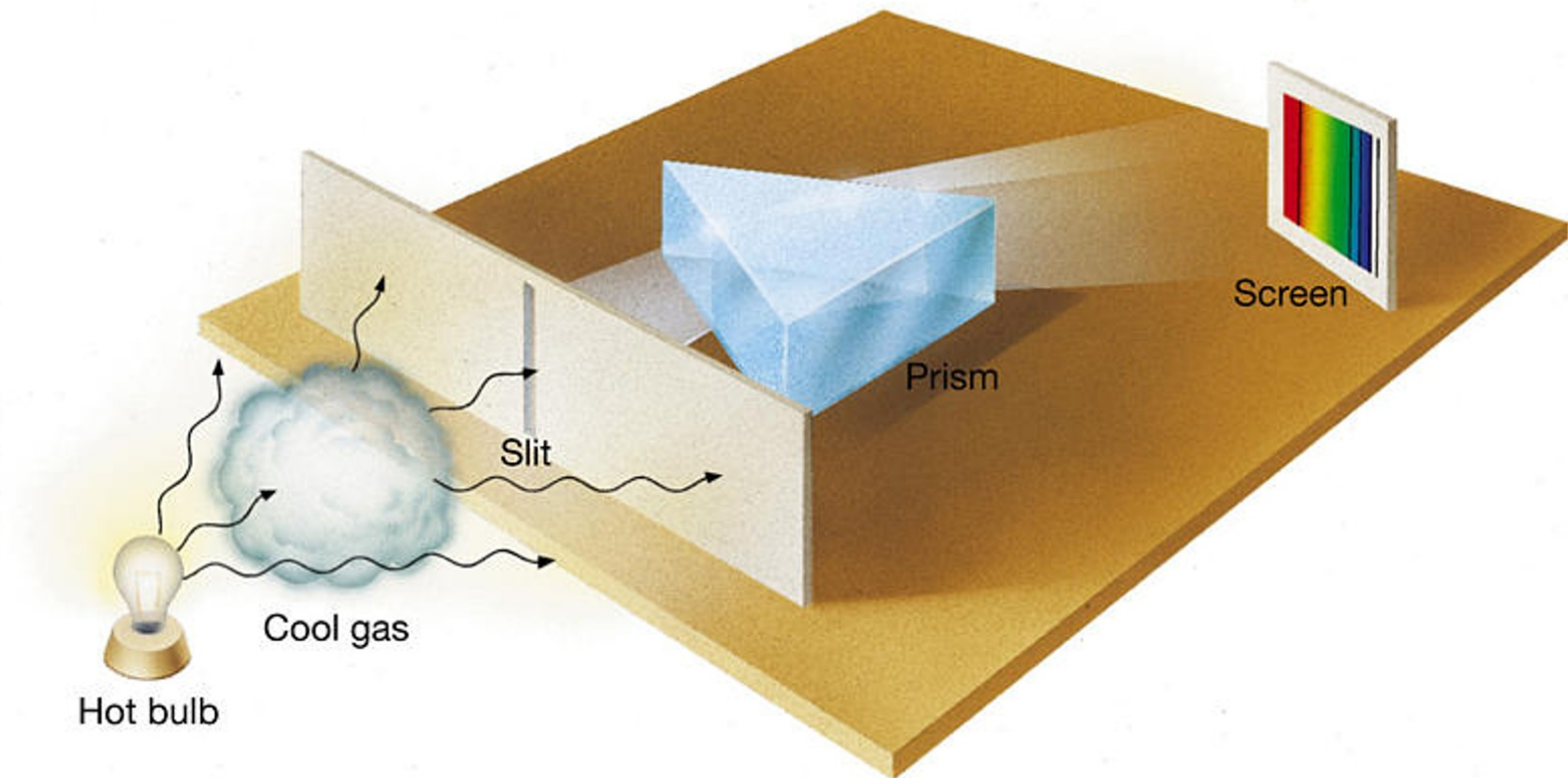


ცხელი წყალბადის
აირის გამოსხივება:
სპექტრული ხაზები

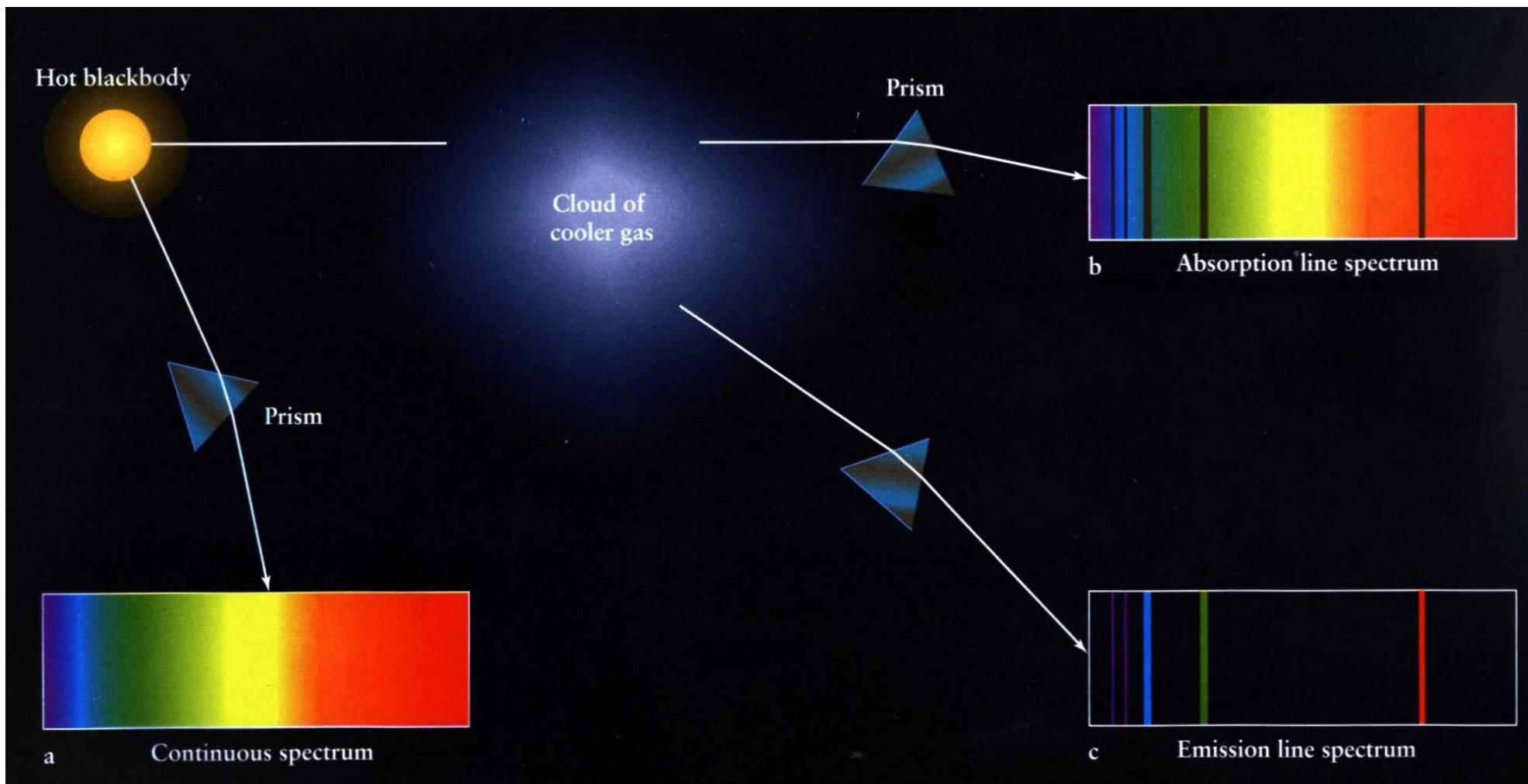


გამოსხივების და შთანთქმის ხაზები

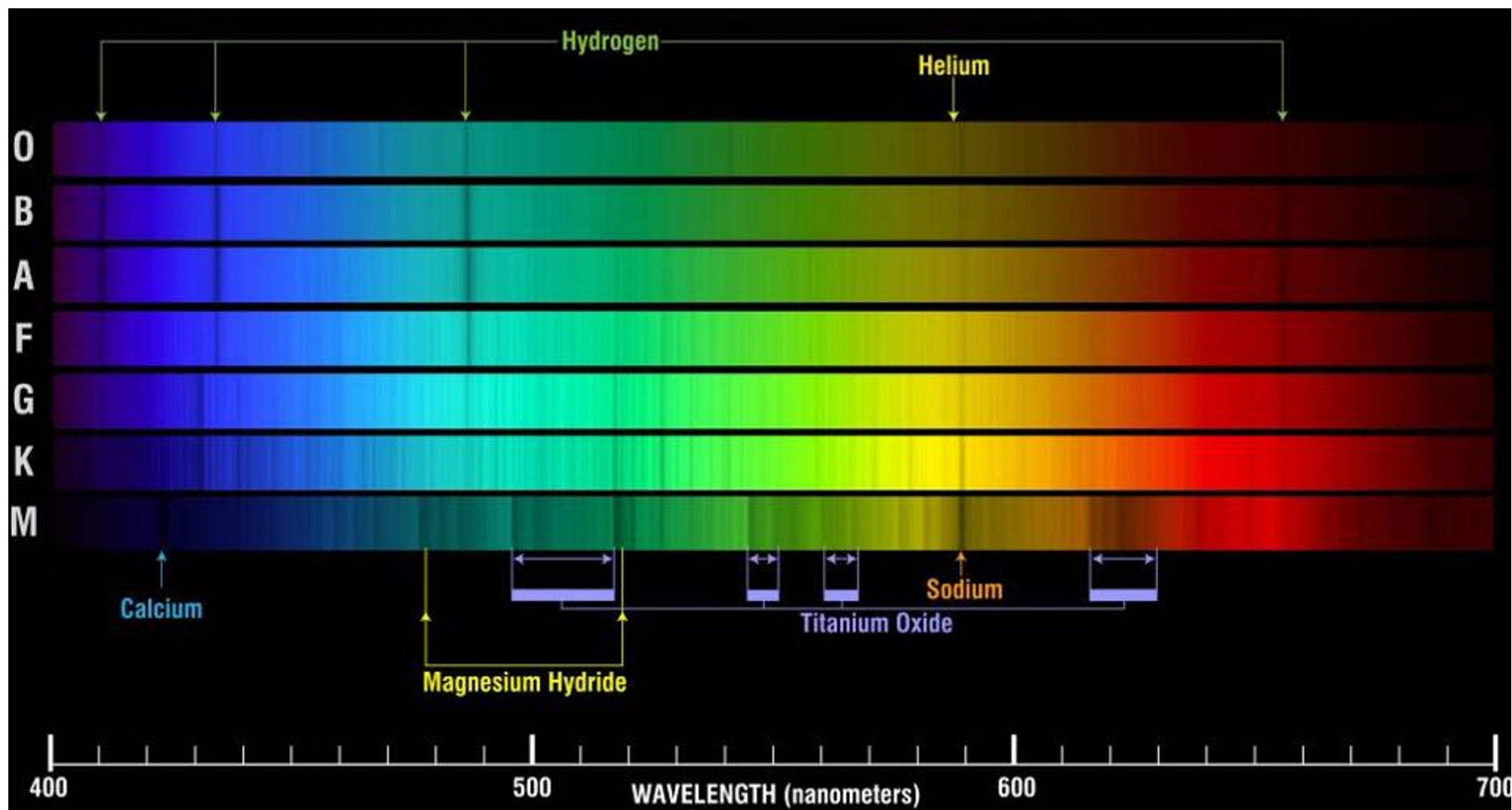
უწყვეტი სპექტრის სინათლის განქოლა ცივი წყალბადის აირში:
 უწყვეტი სპექტრი და წყალბადის შთანთქმის ხაზები



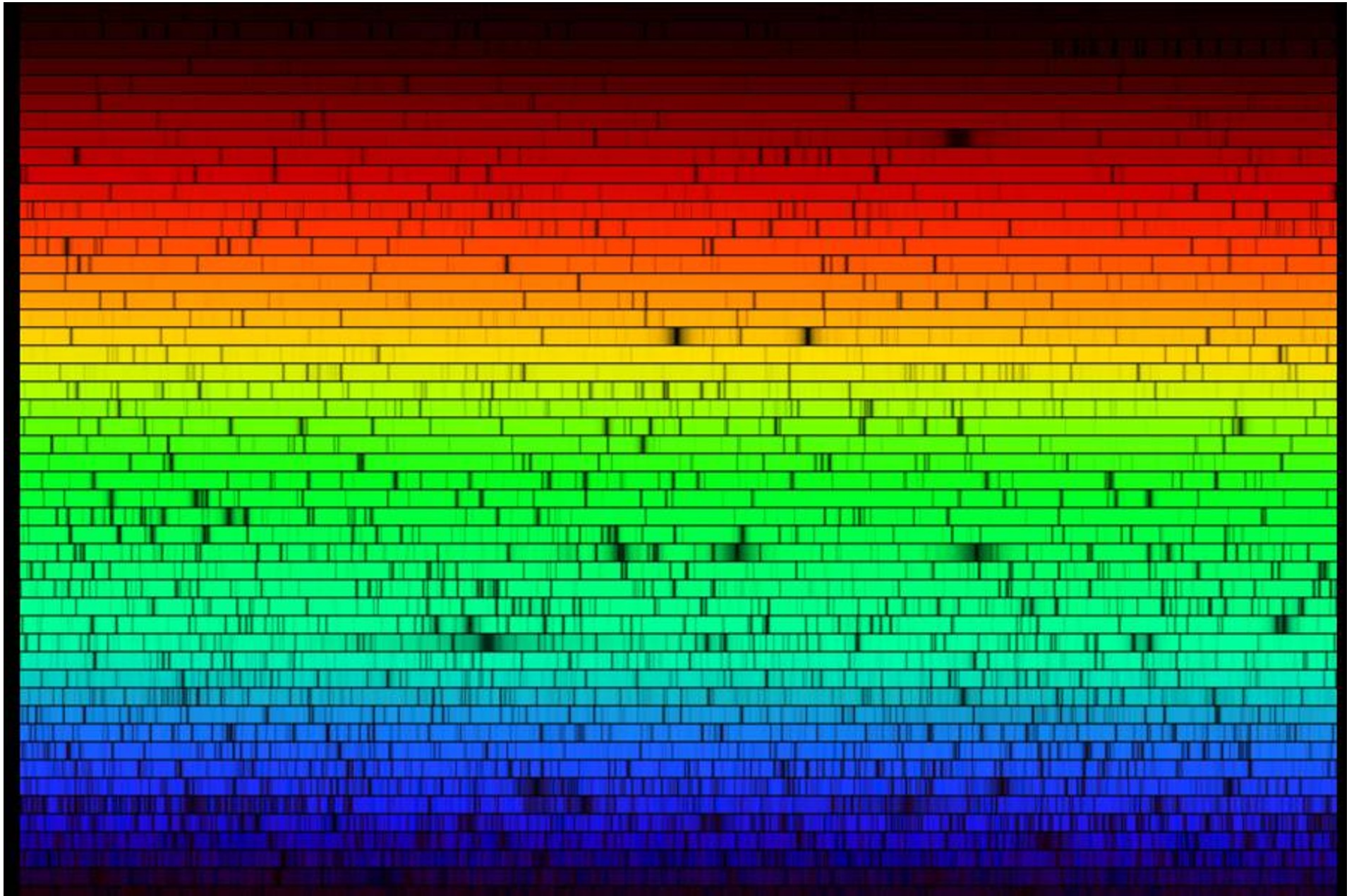
ციური სხეულების სპექტრი



სხვადასხვა სპექტრული კლასის ვარსკვლავები



მზის გამოსხივების სპექტრი (G2V)



სპექტრული ხაზები და “კინემატიკა”

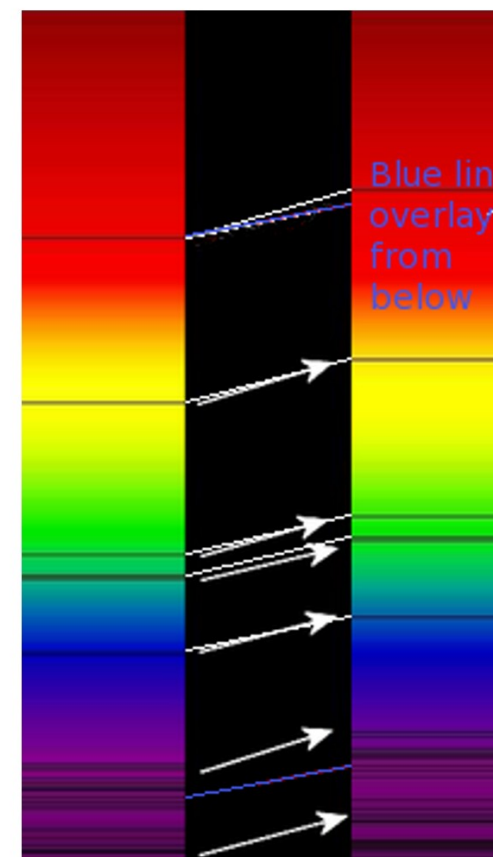
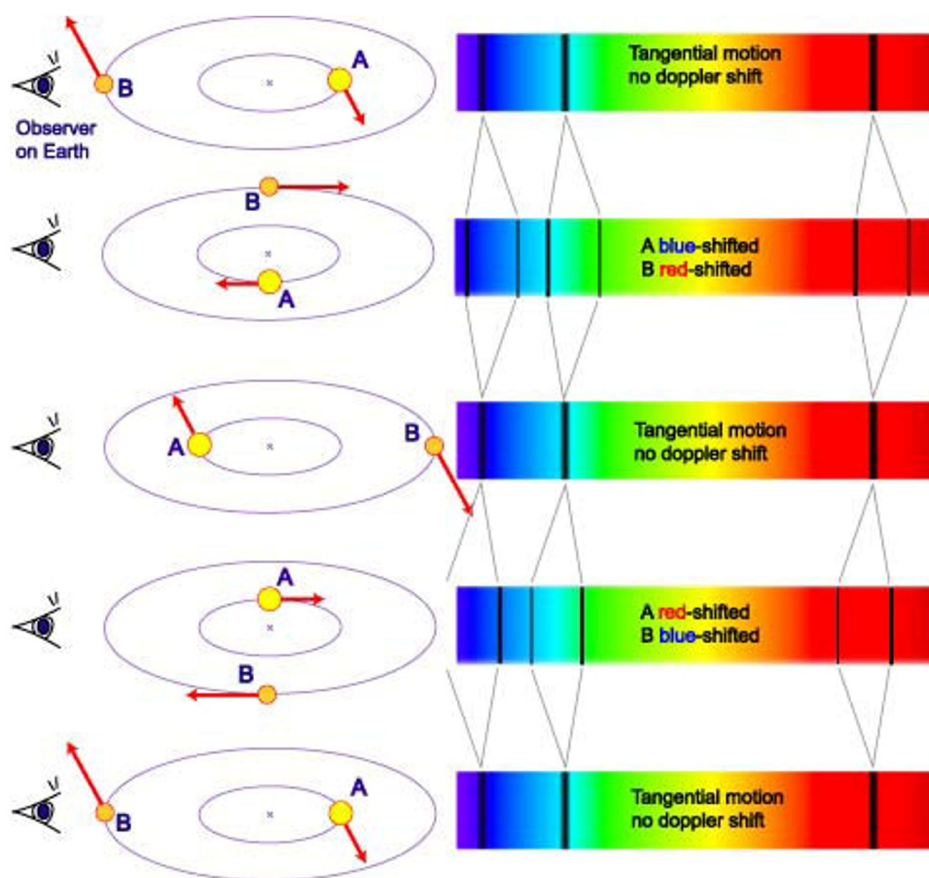
სპექტრული ხაზის წანაცვლება: (დოპლერის ეფექტი)

ლურჯი წანაცვლება: წყაროს დამკვირვებლის მიმართ დაახლოება

წითელი წანაცვლება: წყაროს დამკვირვებლის მიმართ დაშორება

ორჯერადი სისტემის სპექტრი:

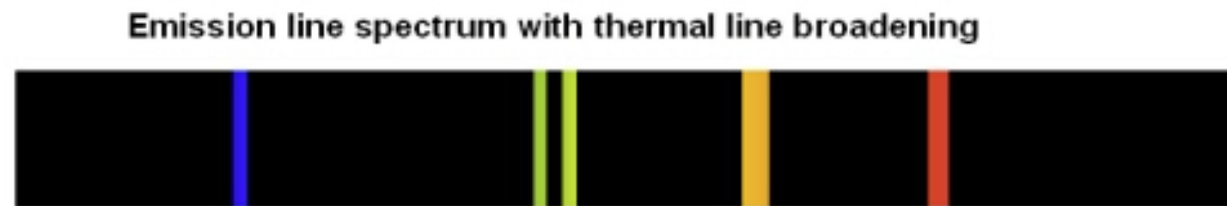
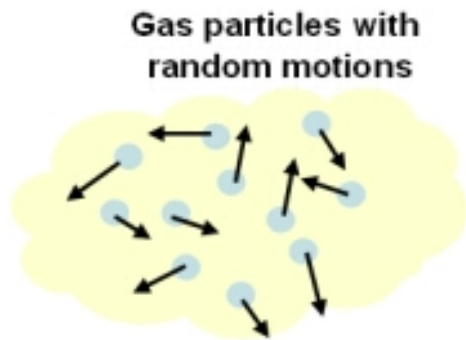
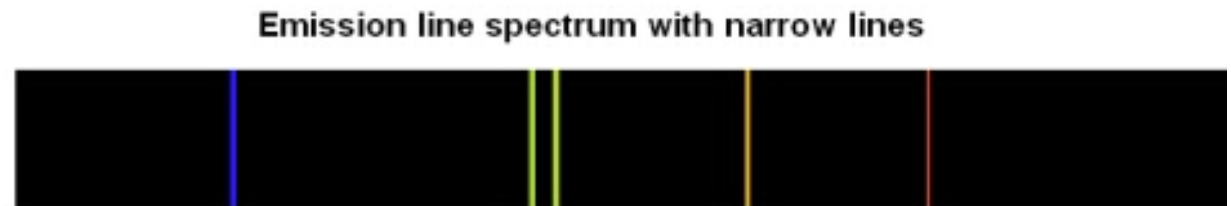
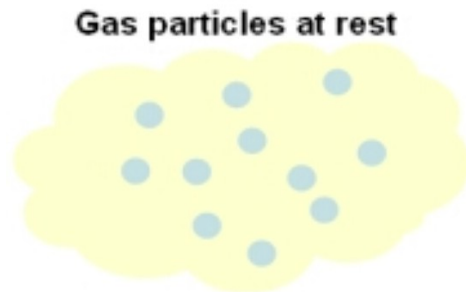
სპექტრული ხაზების მკაცრად პერიოდული გახლეჩვა



წითელი წანაცვლების მაგალითი

სპექტრული ხაზების სითბური გაფართოება

ატომების ქაოსური სითბური მოძრაობა: ლოკალური დოპლერის ეფექტი



$$\omega = \omega_0 \left[1 \pm \frac{v}{c} \right]$$

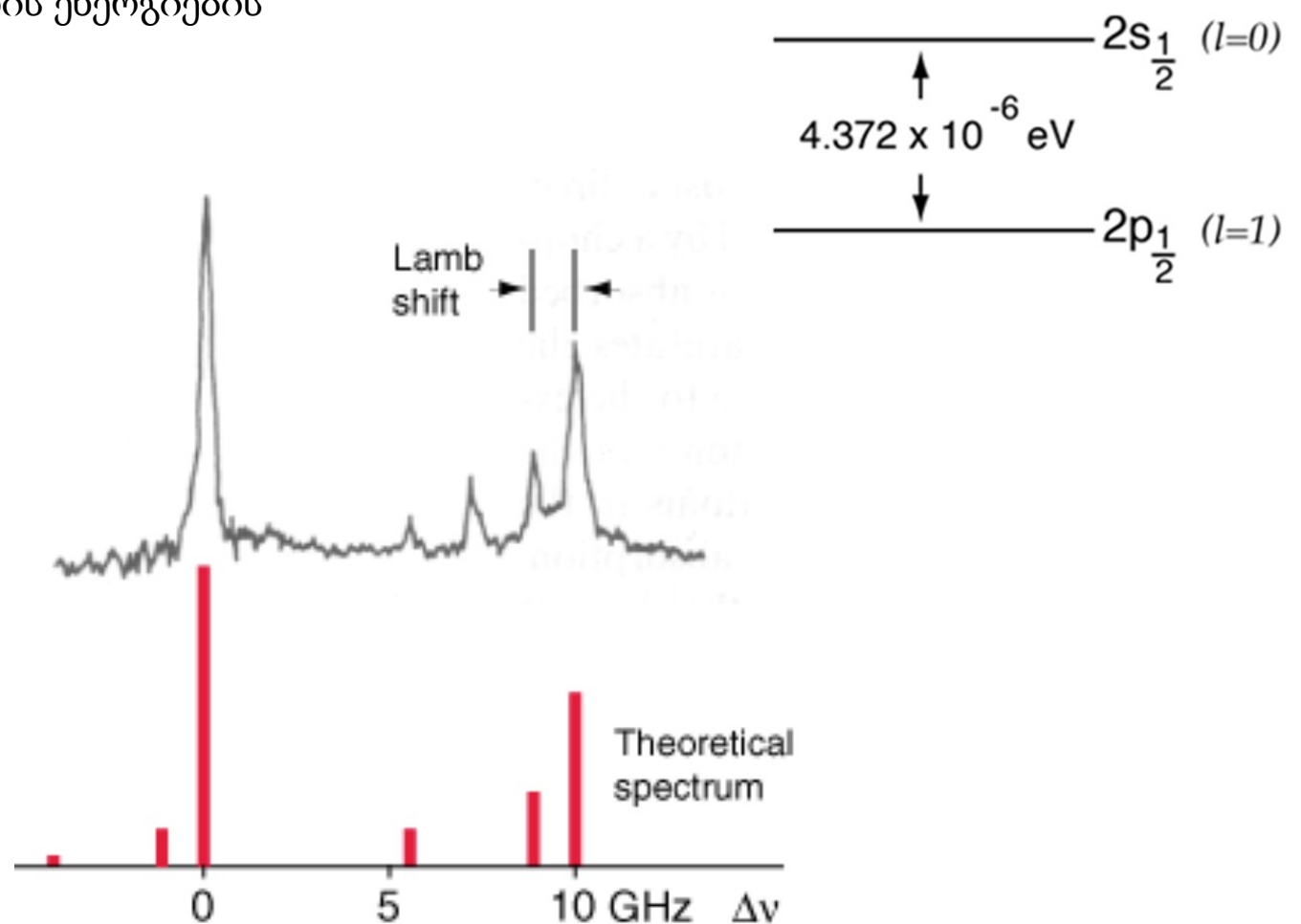
$$\Delta\omega_{Doppler} = \frac{2\omega_0}{c} \sqrt{2 \ln 2 \frac{kT}{m_0}}$$

ლამბის წანაცვლება

ელექტრონის ენერგეტიკული დონე დამოკიდებულია არა მხოლოდ ორბიტალურ კვანტურ რიცხვზე n არამედ ორბიტის ფორმაზეც.

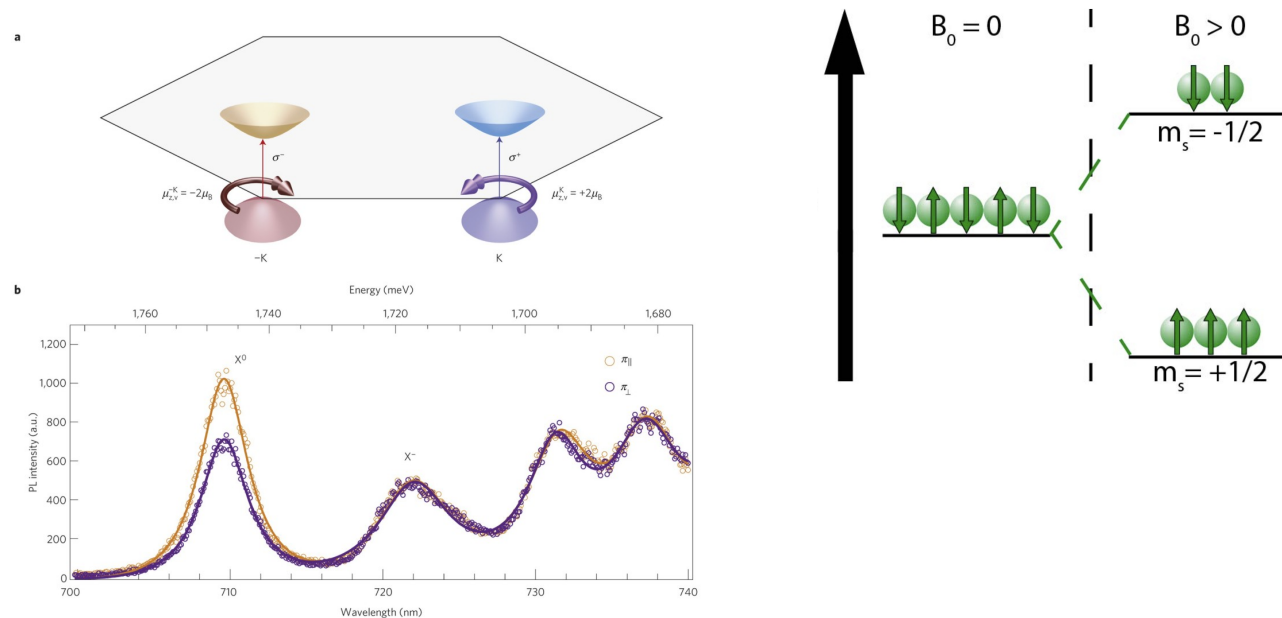
ორბიტალებზე ელექტრონის ენერგიების
ანომალური გადახრა.

სითბური გაფართოება +
ლამბის წანაცვლება



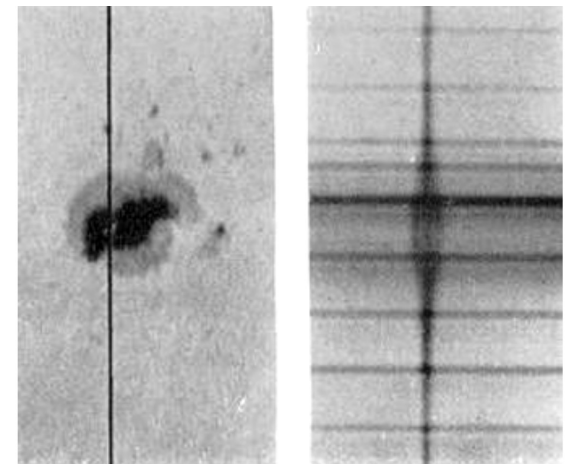
ატომები მაგნიტურ ველში: ზეემანის ეფექტი

გარეშე მაგნიტური ველის და ელექტრონის (წრიული დენის) მაგნიტური დიპოლური მომენტის ურთიერთქმედება



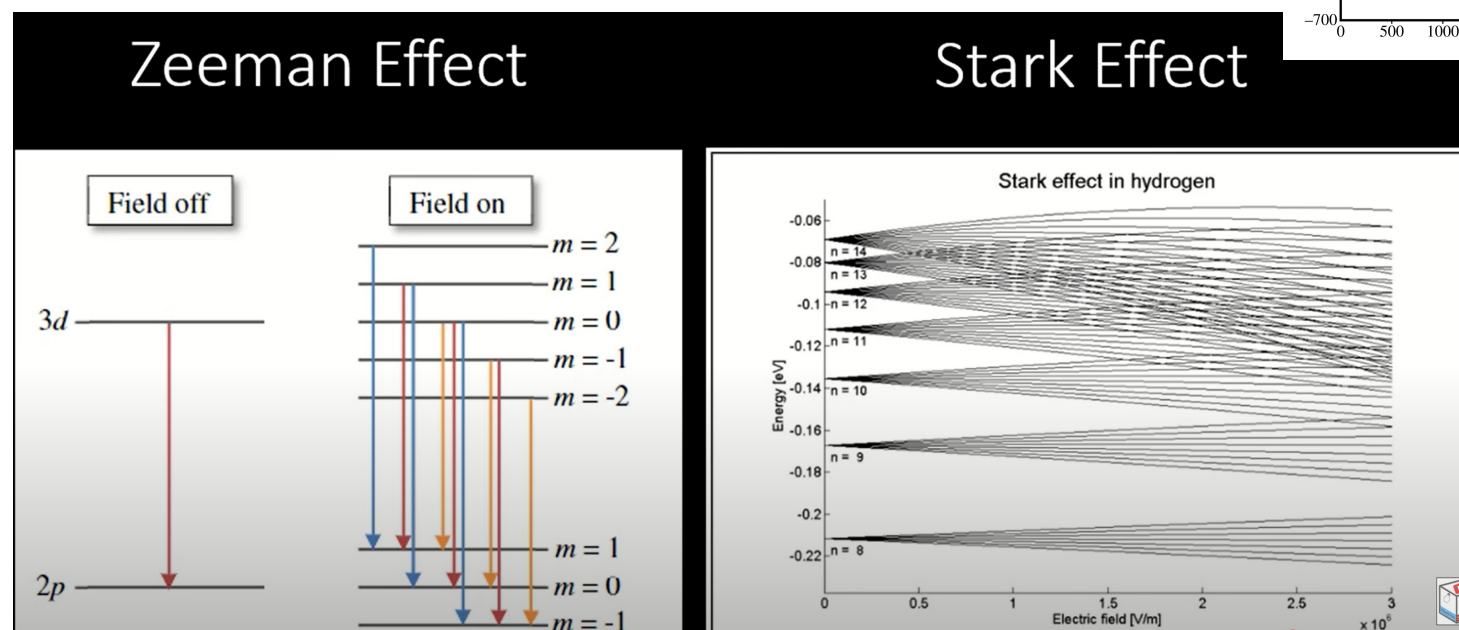
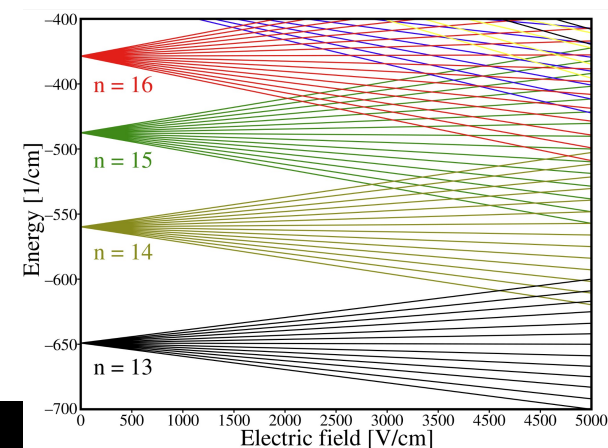
ანომალური ზეემანის ეფექტი:

ორბიტალური მაგნიტური მომენტი + ელექტრონის სპინი



ატომები ელექტრულ ველში: შტარკის ეფექტი

გარე ელექტრული ველის ზემოქმედება
ატომში ორბიტალურ ელექტრონებზე
(ელექტრულ დიპოლურ მომენტზე)



ლოკალური (მიკროსკოპული) შტარკის ეფექტი: პლაზმაში სპექტრული ხაზების გაგანიერება;
არა-სითბური გამოსხივების მექანიზმები

გამოსხივების ტიპი	მექანიზმი / ეფექტი	სპექტრული მახასიათებელი	ტიპური ასტროფიზიკური წყარო
სითბური	შავი სხეულის გამოსხივება	უწყვეტი სპექტრი	ვარსკვლავები, პლანეტები
სითბური	სამუხრუჭე გამოსხივება (Bremsstrahlung)	უწყვეტი სპექტრი	ცხელი პლაზმა
ატომური	ატომური გადასვლები	გამოსხივებისა და შთანთქმის ხაზები	ვარსკვლავები, ნისლეულები
ატომური	აკრძალული გადასვლები	ვიწრო სპექტრული ხაზები	გაიშვიათებული პლაზმა, ნისლეულები
ატომური	ზეემანის ეფექტი	ხაზების გახლეჩა მაგნიტურ ველში	მაგნიტური ვარსკვლავები
ატომური	შტარკის ეფექტი	ხაზების გახლეჩა/გაგანიერება ელექტრულ ველში	მკვრივი პლაზმა

არასითბური	ციკლოტრონული გამოსხივება	ჰარმონიული სპექტრული კომპონენტები	მაგნიტოსფეროები
არასითბური	სინქროტრონული გამოსხივება	ფართოზოლოვანი, პოლარიზებული სპექტრი	ჯეტები, პულსარები
არასითბური	კომპტონის გაბნევა	ფოტონის ენერგიის ცვლილება	მაღალენერგეტიკული წყაროები
არასითბური	ჩერენკოვის გამოსხივება	ფართოზოლოვანი ოპტიკური გამოსხივება	ატმოსფერული კასკადები, დეტექტორები