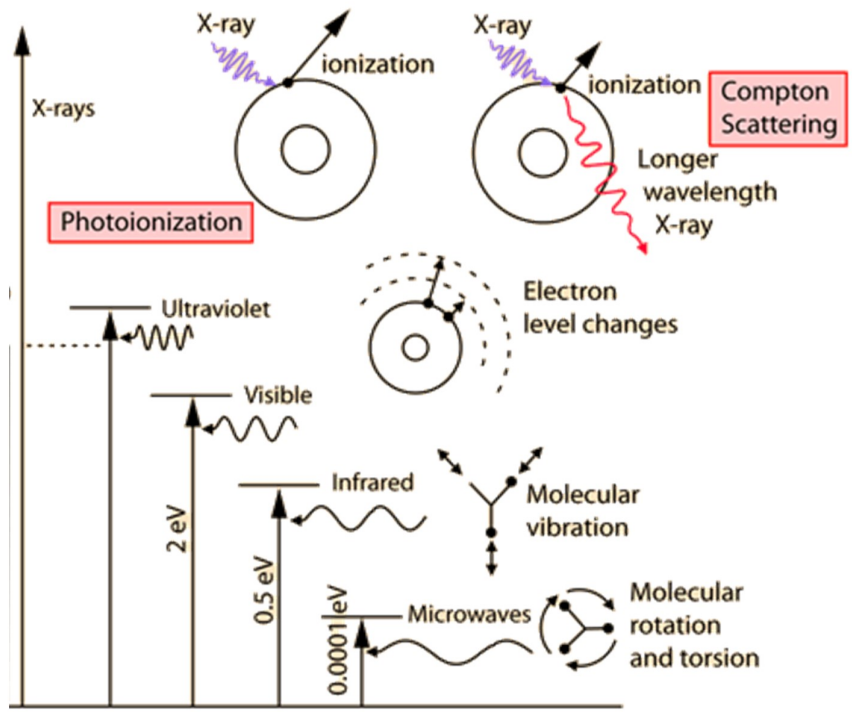
გამოსხივების თეორია - შესავალი - 1

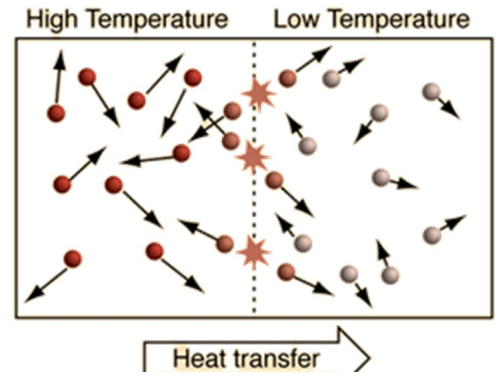
ელ.მაგ. ტალღების გამოსხივება 2
სითბური წონასწორობა 3
სითბური გამოსხივება 4
ვარსკვლავის ფერის ფორმირება 8
ატომური გამოსხივების ხაზები 31
წყალბადის ატომის გამოსხივების/შთანთქმის სპექტრი 32
ელექტრონების ორბიტალები 33
სპექტრული ხაზები 34
სპექტრული ანალიზი 36
აკრძალული ხაზები 39
ციური სხეულების სპექტრი 43
სპექტრული ხაზები და “კინემატიკა” 46
სპექტრული ხაზების სითბური გაფართოება 47
ლამბის წანაცვლება 48
ატომები მაგნიტურ ველში: ზეემანის ეფექტი 49
ატომები ელექტრულ ველში: შტარკის ეფექტი 50
არა-სითბური გამოსხივების მექანიზმები 51

ელ.მაგ. ტალღების გამოსხივება

მუხტის აჩქარებული მოძრაობა იწვევს ე.მ. ტალღის გამოსხივებას: e^- , e^+ , p^+

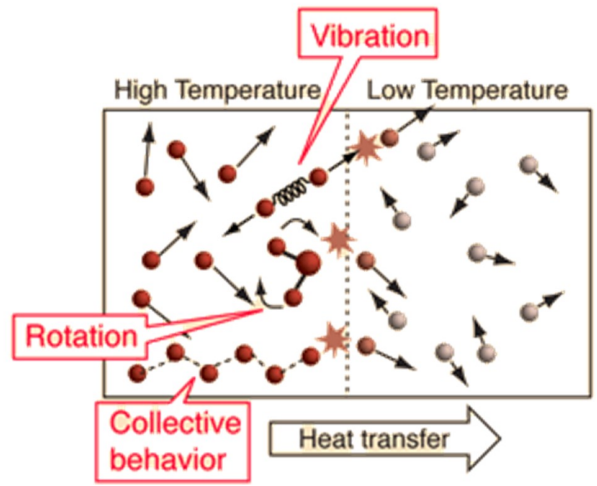


სითბური წონასწორობა



ბოლცმანის კინეტიკური თეორია:

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



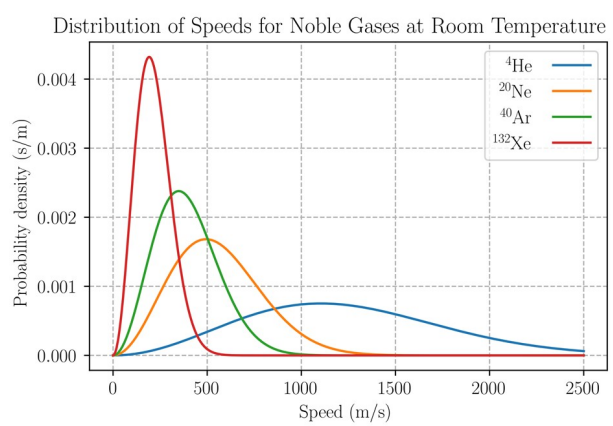
ერთ ატომიანი აირი

$$\frac{1}{T} \equiv \left(\frac{\partial S}{\partial U}\right)_{N,V}$$

Change in entropy

Number of particles N and volume V constant

Change in internal energy



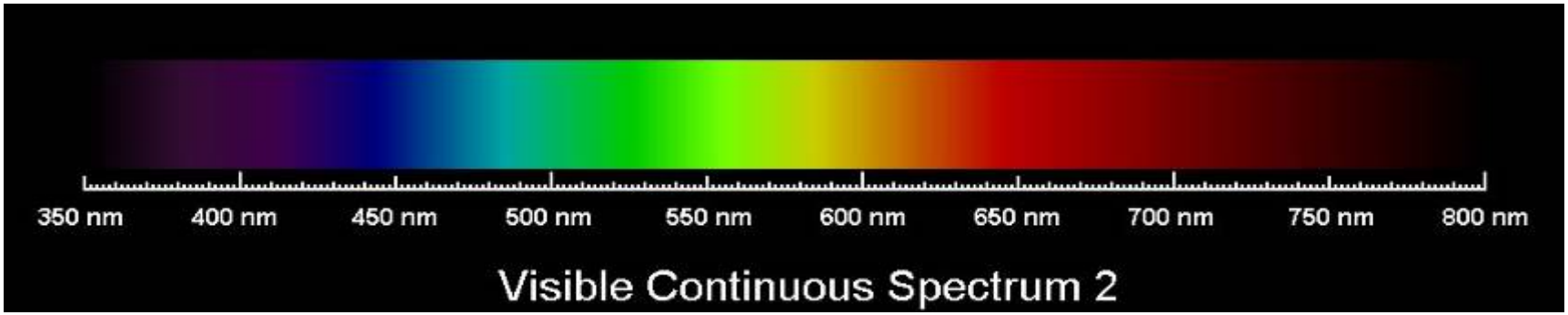
მაქსველ-ბოლცმანის განაწილება:

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

სითბური გამოსხივება

სითბურ წონასწორობაში მყოფი სხეული

სითბური გამოსხივების სპექტრი: უწყვეტი სპექტრი

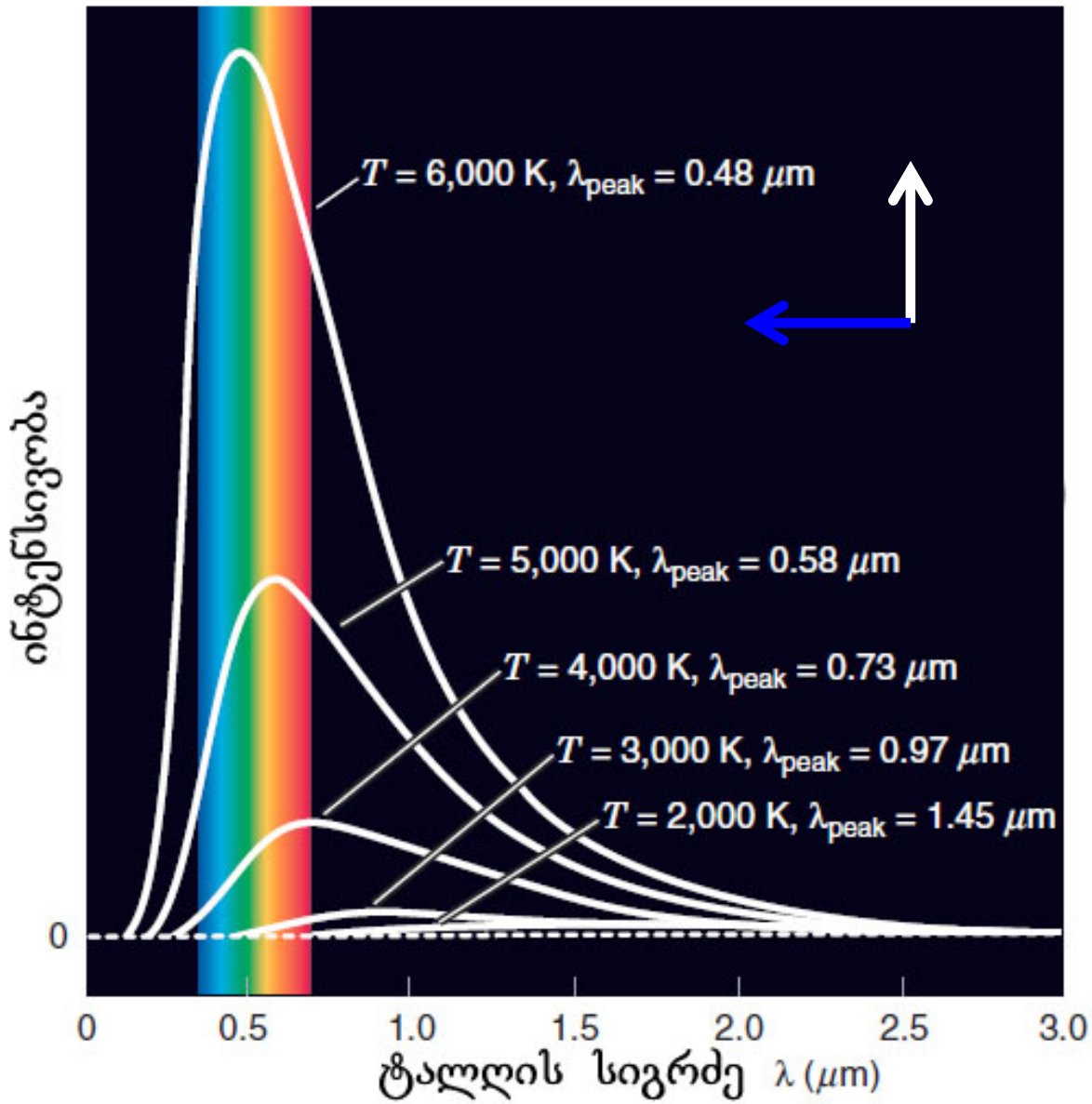


სხეულის სითბური გამოსხივების ფერი მიგვანიშნებს მის ტემპერატურაზე

სხეულის გაცხელება იწვევს მისი სითბური გამოსხივების სპექტრის:

1. ინტენსივობის ზრდას;

2. ინტენსივობის პიკის წანაცვლებას მოკლე ტალღის სიგრძეებისაკენ (სპექტრის იისფერი კიდე) *„სპექტრის გალურჯება“*



სითბური გამოსხივების თვისებები

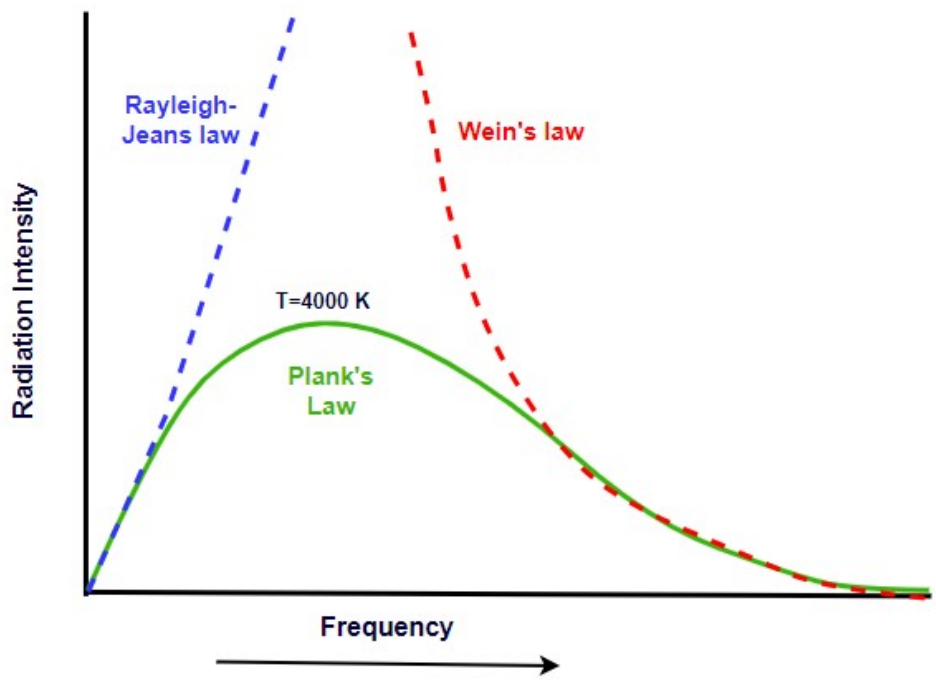
სტეფან-ბოლცმანის (Stefan-Boltzmann) კანონი: $F \sim T^4$

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-ჯერ მატება იწვევს გამოსხივების ინტენსივობის მატებას 16-ჯერ

"ულტრა იისფერი კატასტროფა"



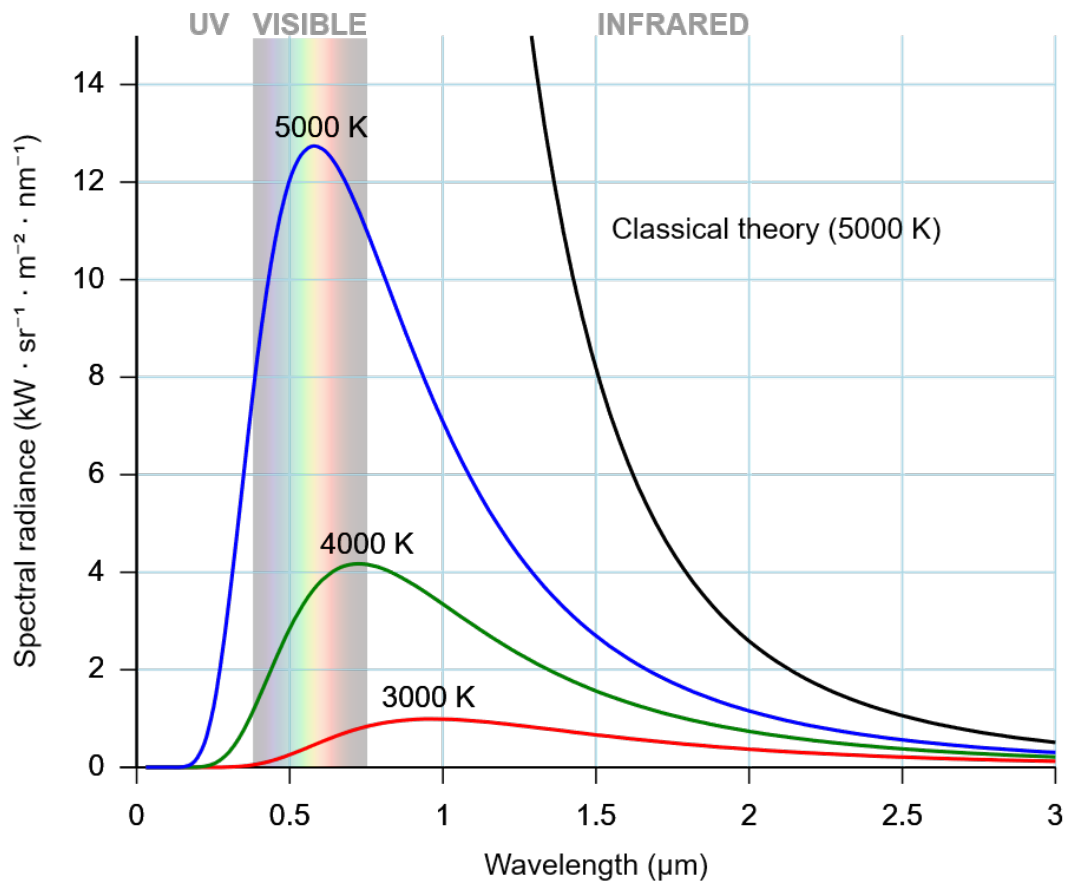
“შავი სხეულის“ გამოსხივება

პლანკის კანონი:

$$L(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp(h\nu/KT) - 1}$$

K - ბოლცმანის მუდმივა
h - პლანკის მუდმივა
c - სინათლის სიჩქარე

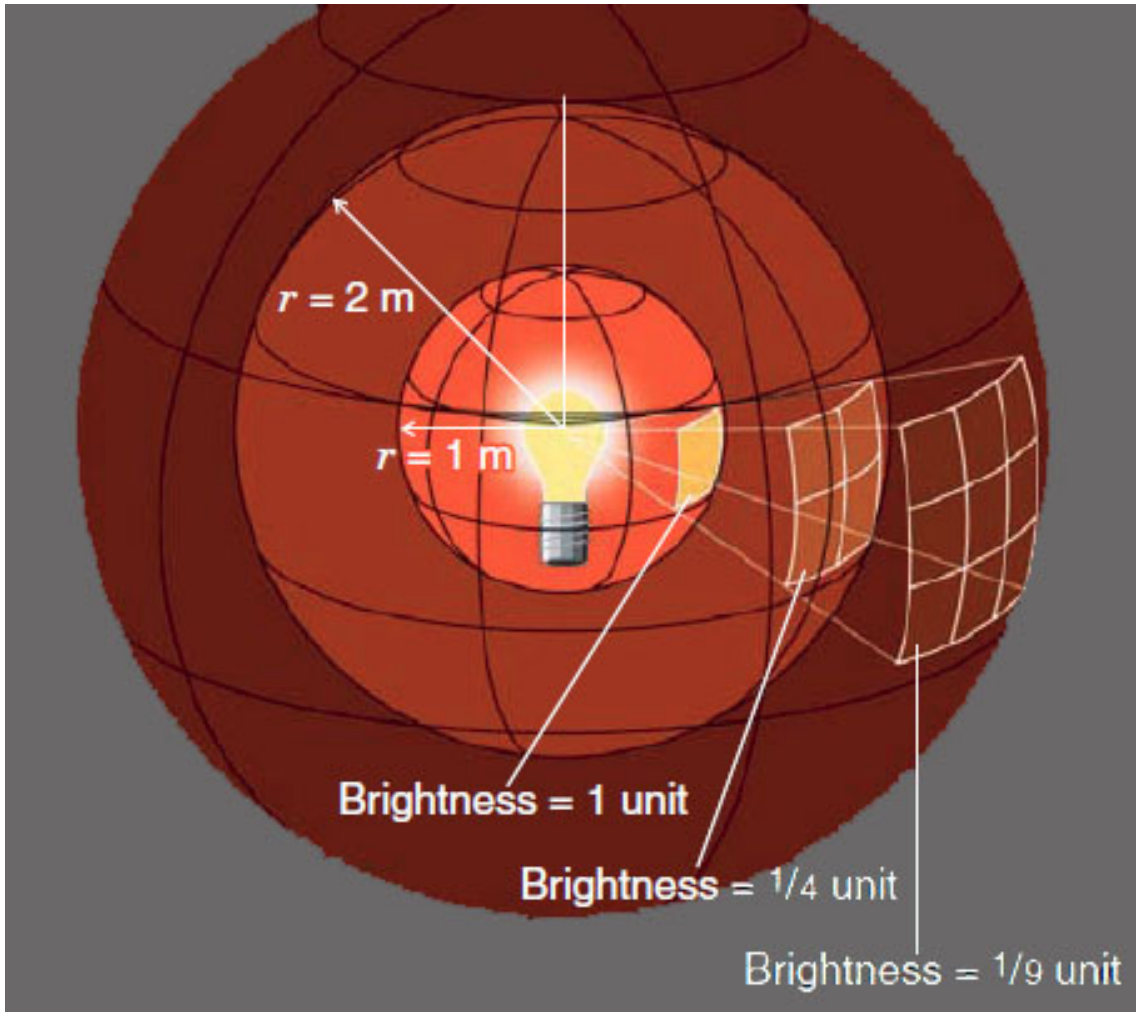
ქვანტური სტატისტიკა
+კლასიკური ფიზიკა



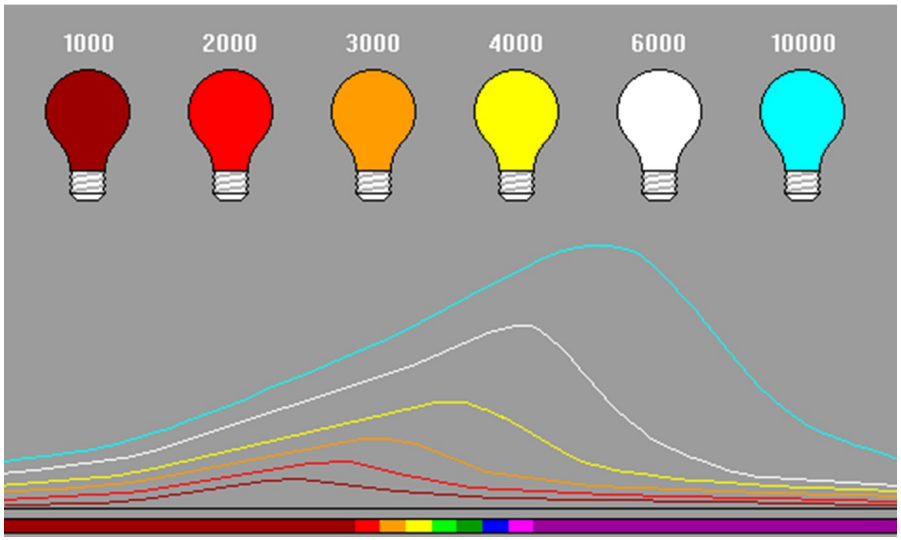
ვარსკვლავის ფერის ფორმირება

ვარსკვლავის ფერი განისაზღვრება მისი ზედაპირის ტემპერატურით.

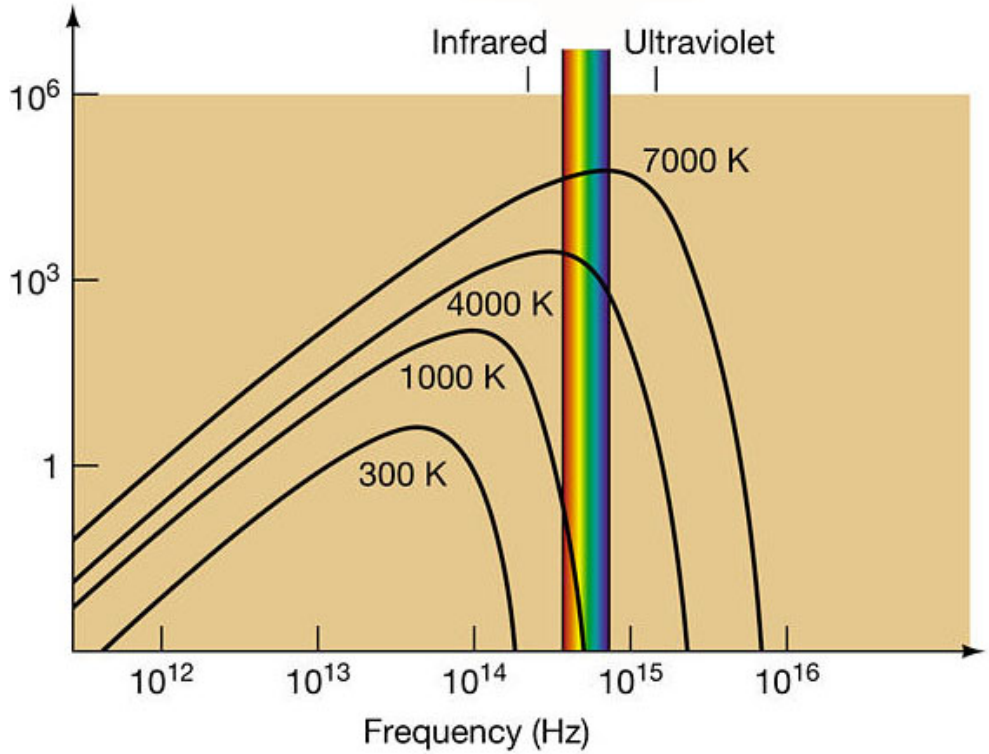
ვარსკვლავის ცენტრში ფიქსირებული ტემპერატურის პირობებში ზედაპირის ტემპერატურა კლებულობს ვარსკვლავის რადიუსის ზრდასთან ერთად *(მაგ. წითელი გიგანტები)*



ვარსკვლავთა სითბური გამოსხივება
ვარსკვლავის ფერი:
ეფექტური ტემპერატურა
ვარსკვლავის ზედაპირზე

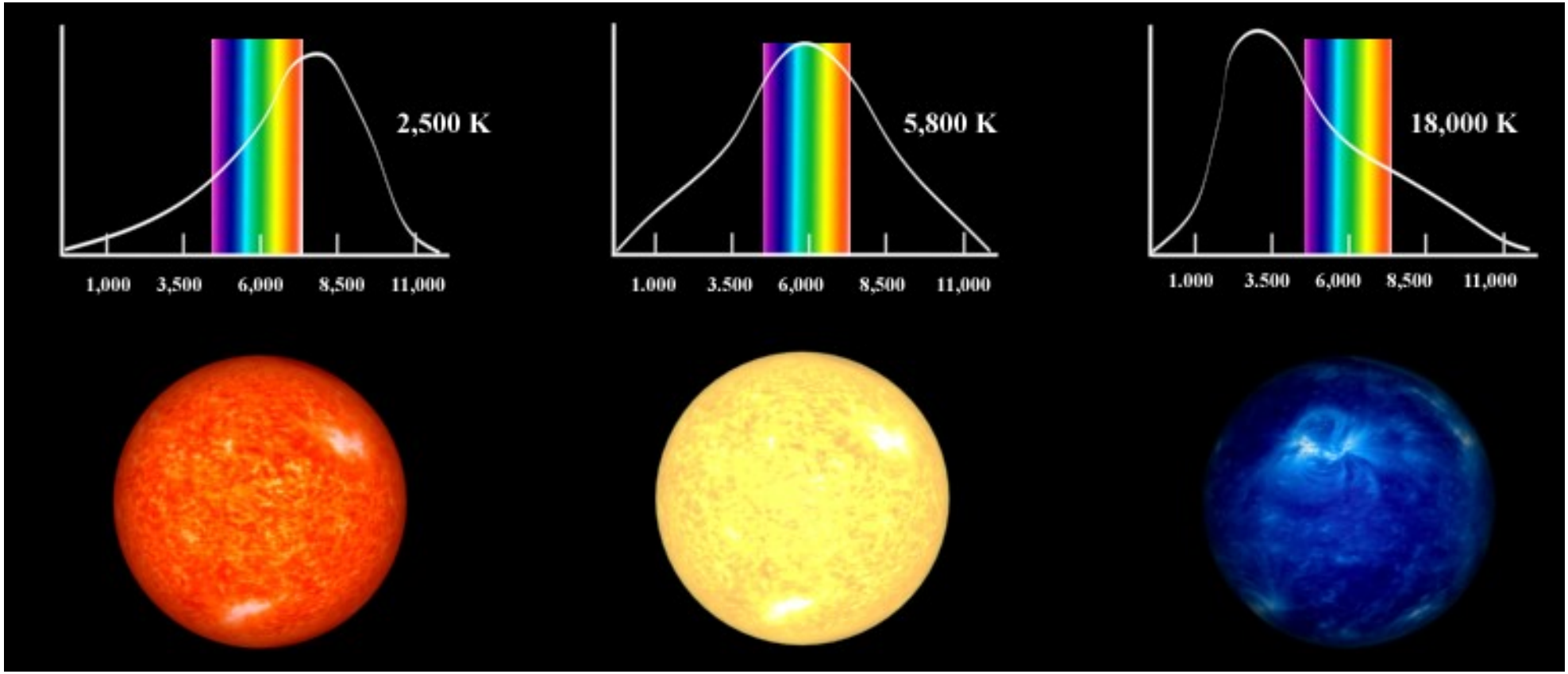


გამოსხივების სპექტრი:
გამოსხივების ინტენსივობა
სხვადასხვა ტალღის
სიგრძეზე (სიხშირეზე)



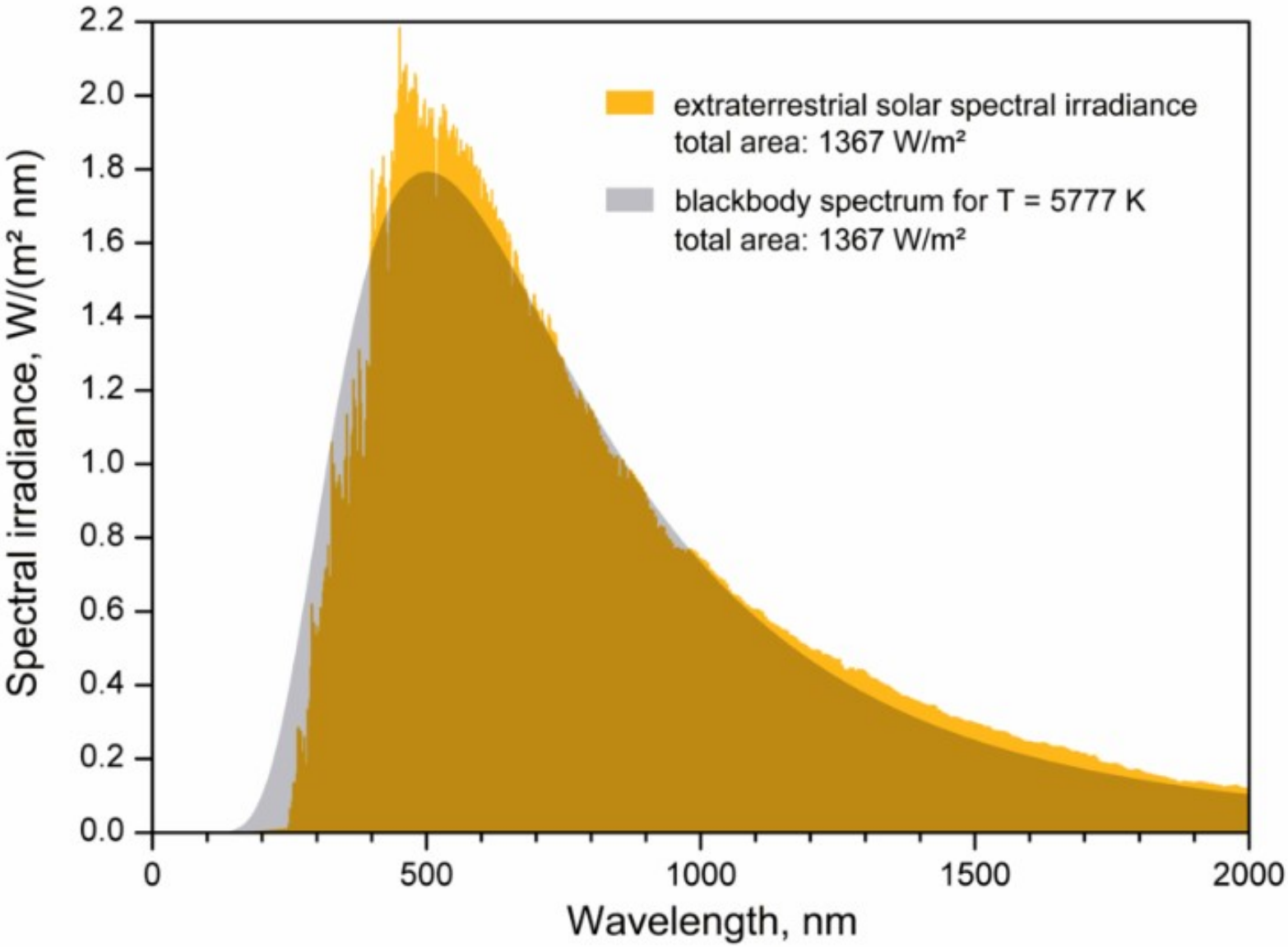
ვარსკვლავის ფერს განსაზღვრავს თუკი მისი გამოსხივების რა ნაწილი თავსდება სპექტრის ოპტიკურ (ხილულ) უბანში.

(ფერები გაზვიადებულია)



რატომ არ არსებობენ მწვანე ვარსკვლავები?

მზის გამოსხივება: სითბური წონასწორობა?



ამოცანა 1: სითბური გამოსხივების ფოტონები

ვარსკვლავის სითბური გამოსხივების ინტენსივობის სპექტრული განაწილებაა (პლანკის ფორმულა):

$$L(\nu,T)=\frac{2h\nu^3}{c^2}\frac{1}{\exp(h\nu/KT)-1}$$

გამოიყენეთ დამხმარე ტრანსცენდენტული განტოლების რიცხვითი ამონახსნი *1-*exp*(-x)=x/3* და იპოვეთ სითბური გამოსხივების მაქსიმუმის სიხშირის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე:

$$\nu^L_{\max}=\nu^L(T)$$

ექსტრემუმის პირობის გამოყენებით:

$$\left.\frac{\partial L(\nu,T)}{\partial\nu}\right|_{\nu=\nu_{\max}}=0$$

.

დაკვირვებებისას მუხტ-კავშირიანი მიმღები აფიქსირებს დაცემული ფოტონების რაოდენობას.

$$N(\nu)=\frac{L(\nu,T)}{h\nu}$$

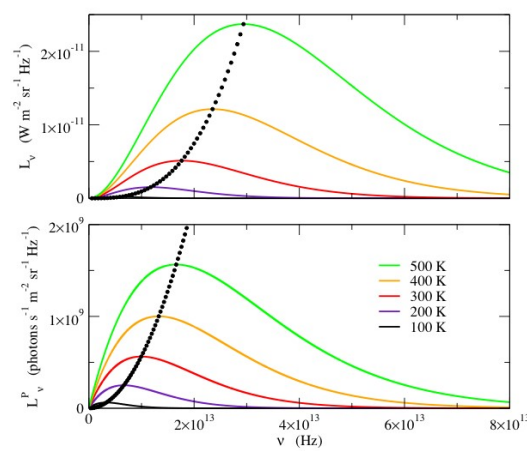
.

შესაბამისად ფოტონების რაოდენობის მაქსიმუმი მოდის სხვა სიხშირეზე:

$$\nu^P_{\max}=\nu^P(T)$$

1. იპოვეთ ინტენსივობის მაქსიმუმისა ν^T_{max} და ფოტონების რაოდენობის მაქსიმუმის ν^P_{max} ტემპერატურაზე დამოკიდებულების ფუნქციის სახე.

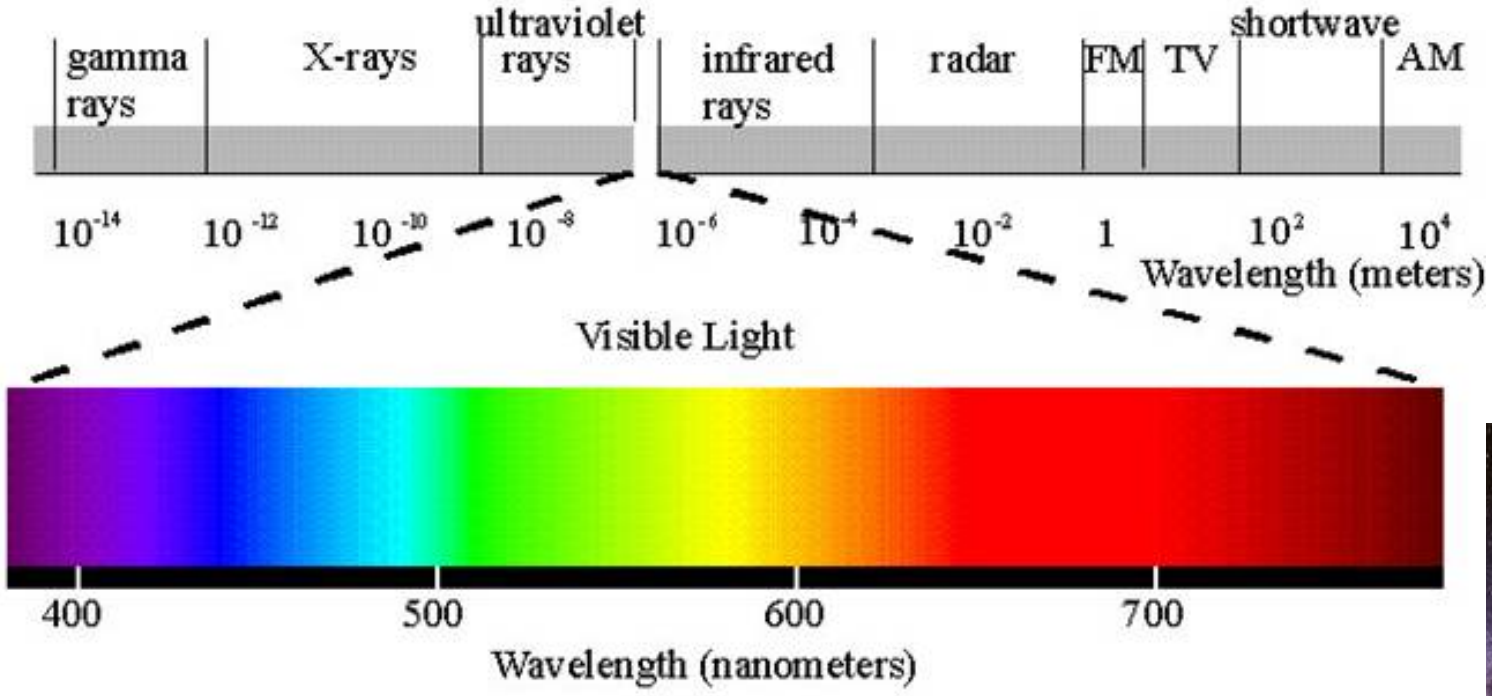
2. T=100,200,300,400,500K ტემპერატურებისათვის დახაზეთ გამოსხივების ინტენსივობის და ფოტონების რაოდენობის სპექტრული განაწილებები, ხოლო ინტენსივობის და ფოტონების რაოდენობის მაქსიმუმები ააგეთ იგივე ტემპერატურულ ინტერვალში 25 მნიშვნელობის გამოყენებით (იხ. ნახაზი).

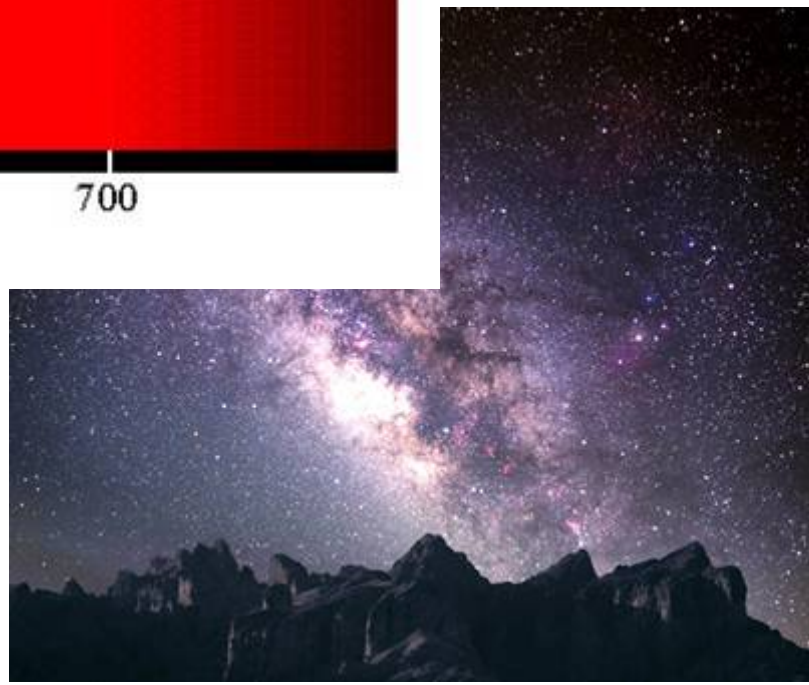


h = 6.26 10^{-34} Js , C = 3 10^8 m/s , K = 1.38 10^{-23} JK^{-1} .

ხილული სამყარო

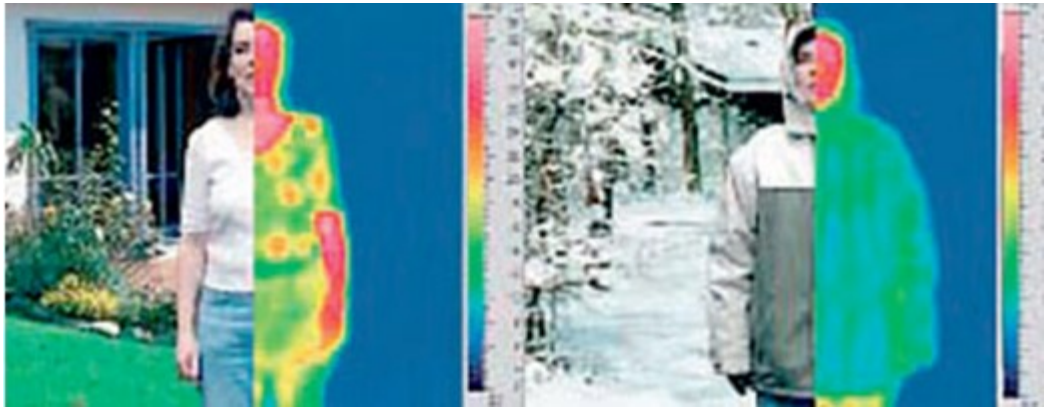
ადამიანის თვალი ხედავს ელექტრომაგნიტური სპექტრის მხოლოდ მცირე უბანს:
ოპტიკური უბანი

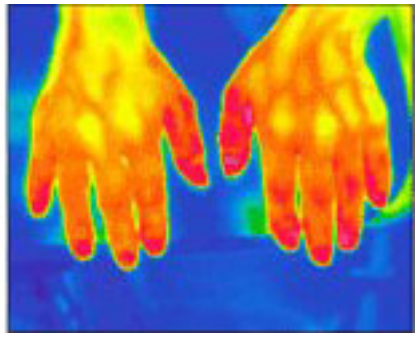


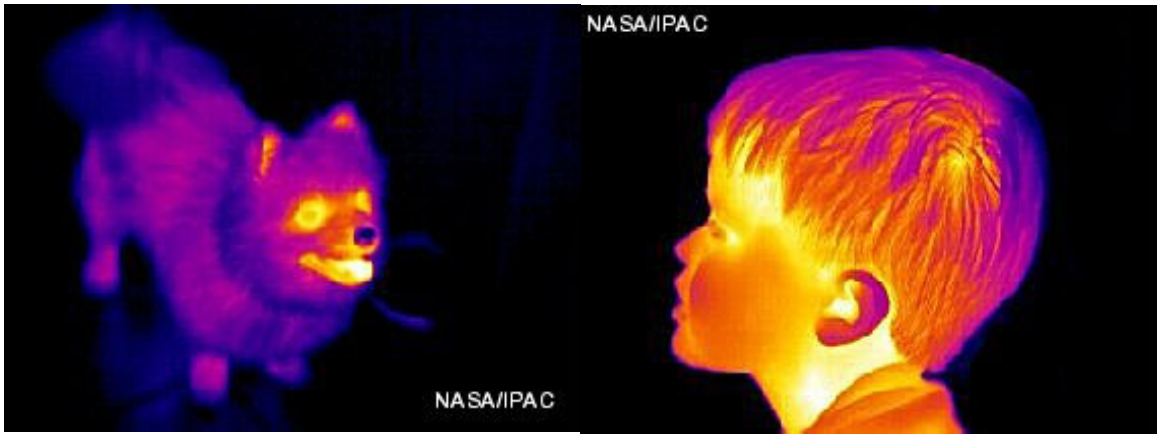


ცის ოპტიკური გამოსახულება:
ინფორმაციის მცირე ნაწილი

ინფრაწითელი სამყარო



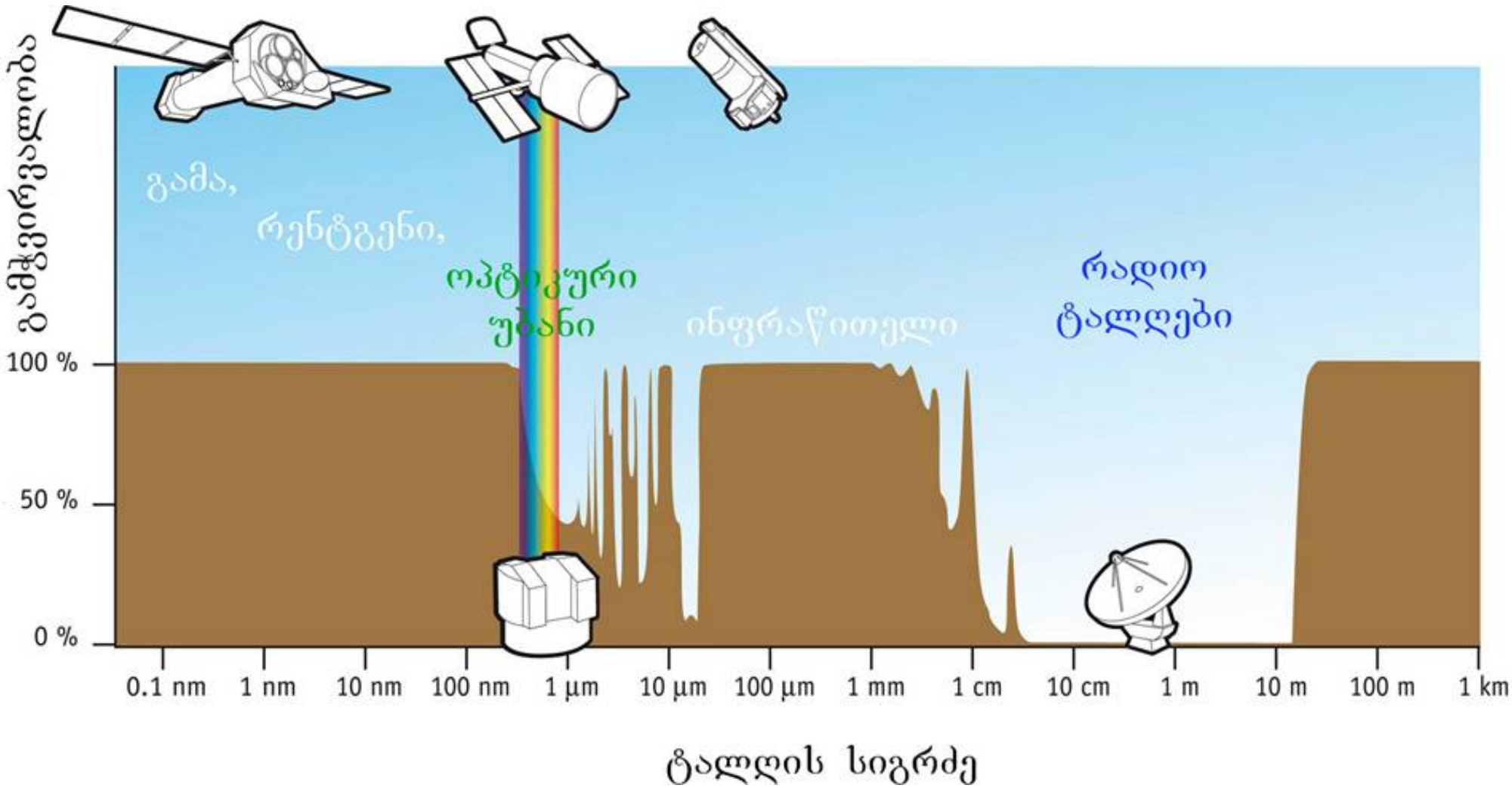




რენტგენული დიაპაზონი

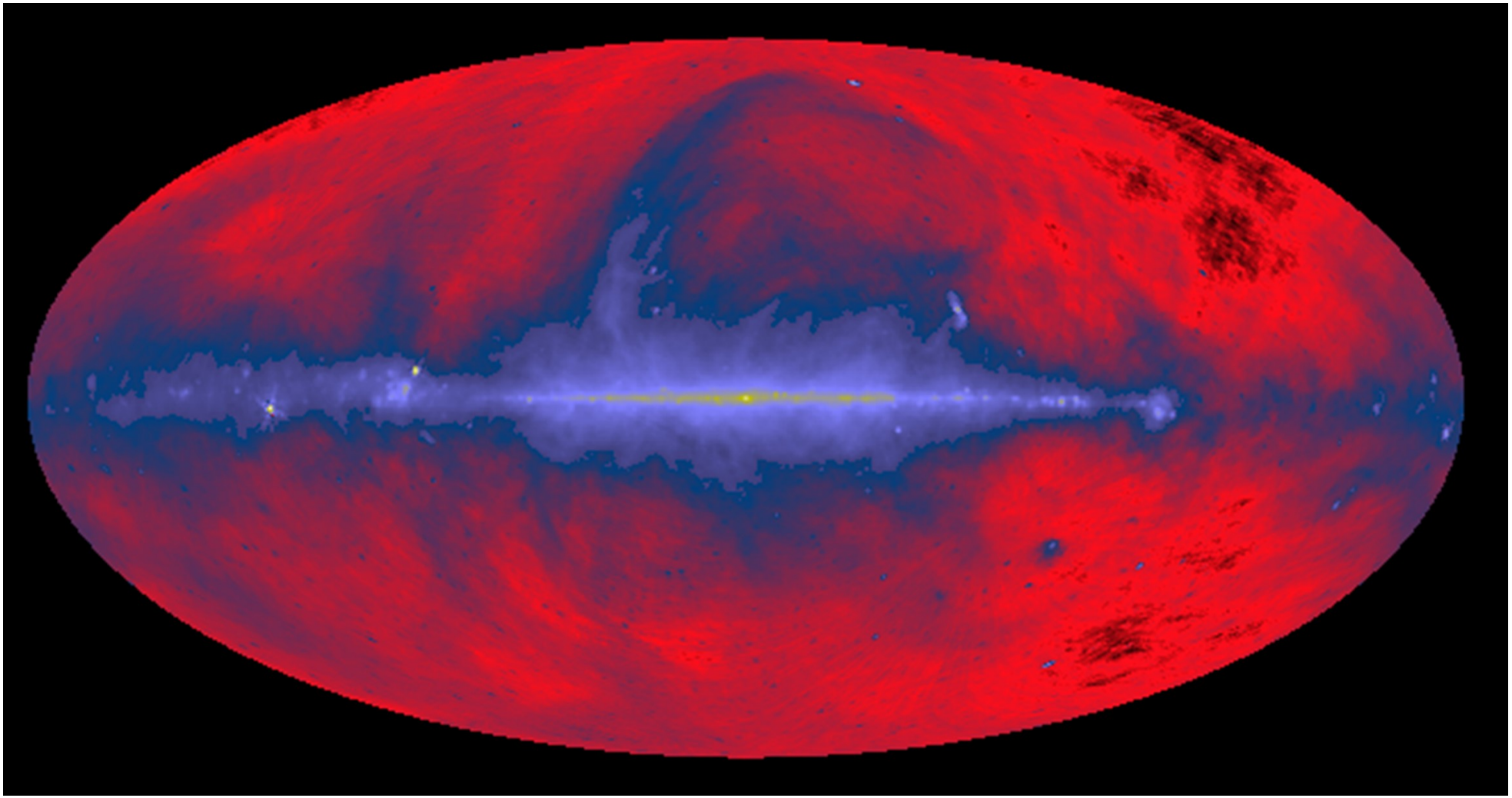
დაკვირვებები დედამიწიდან

ატმოსფეროს გამჭვირვალობა ელექტრომაგნიტური ტალღების სხვადასხვა დიაპაზონში

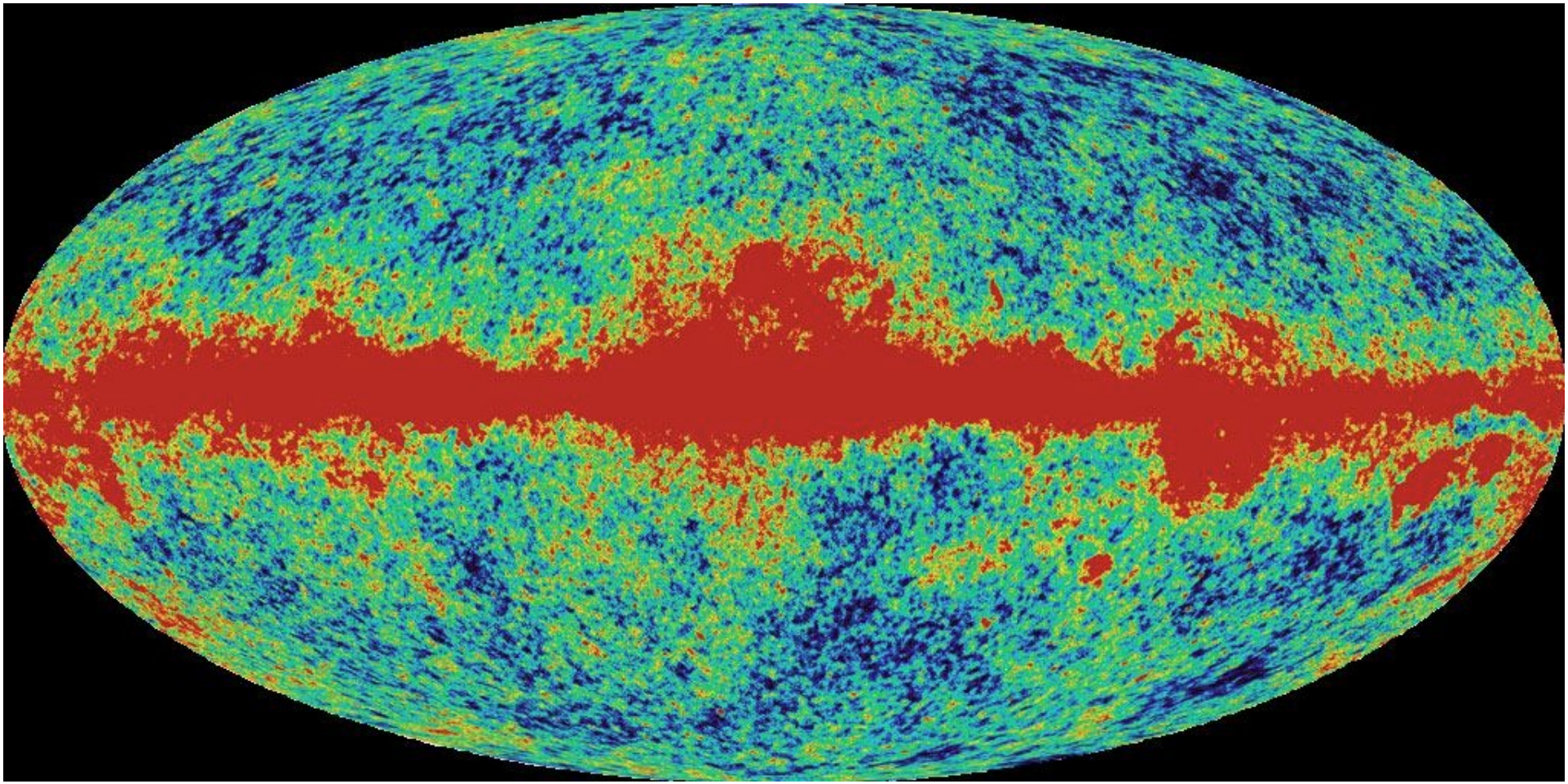


რადიო დიაპაზონი

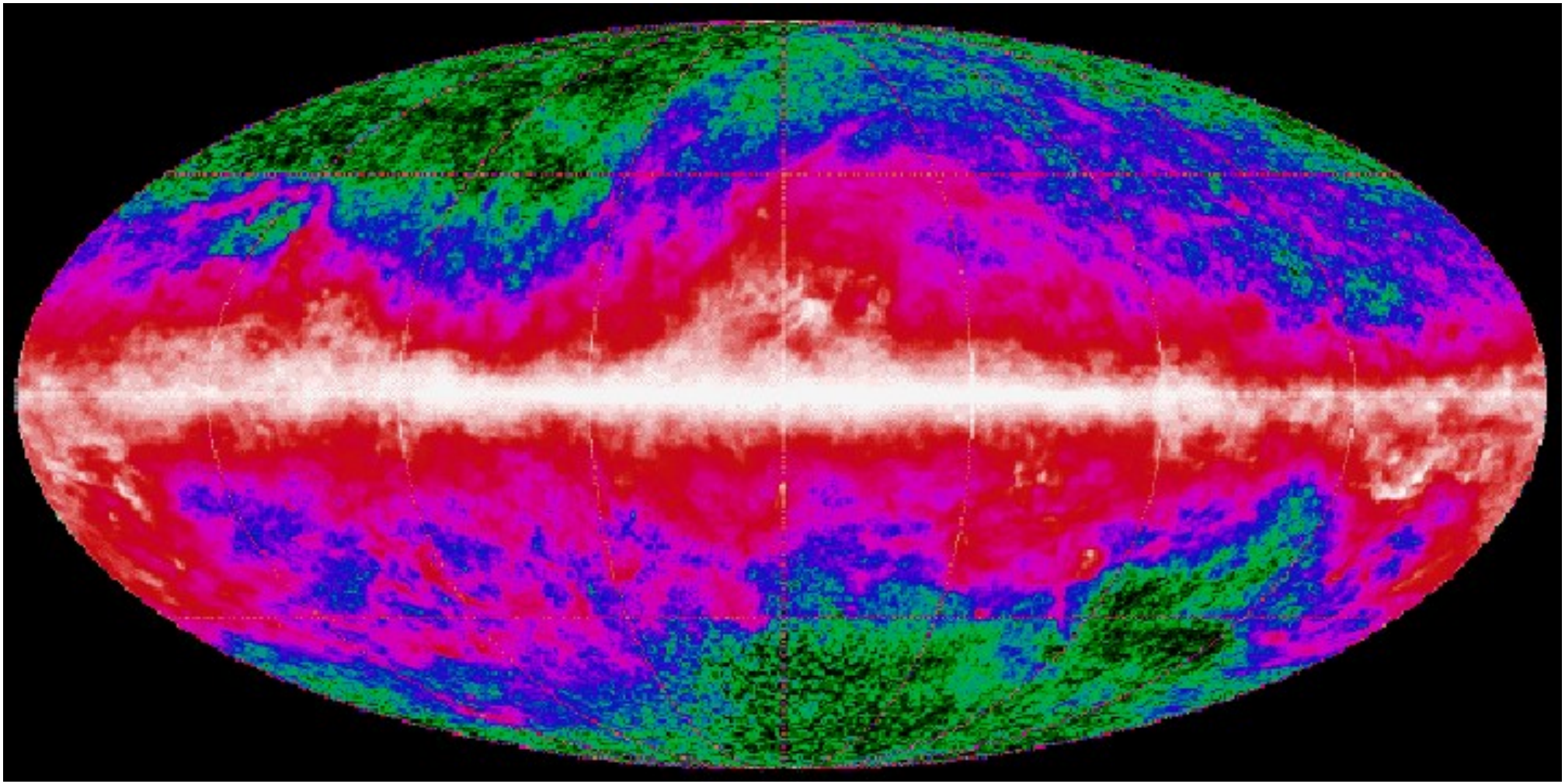
გარემოს ეფექტური ტემპერატურა: E~1.7 10^{-6} EV (T=0.02K)



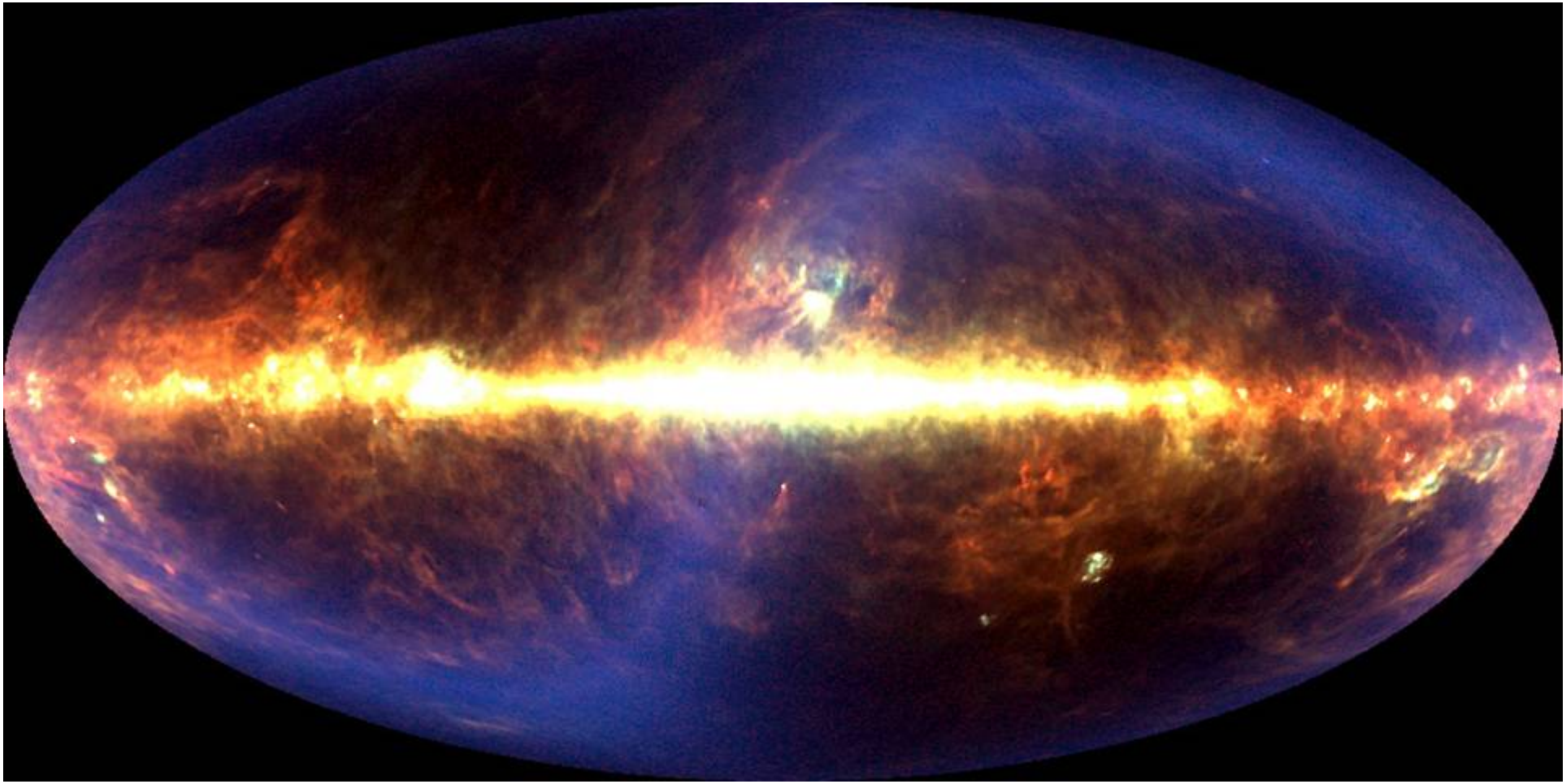
გარემოს ეფექტური ტემპერატურა: 2.725K



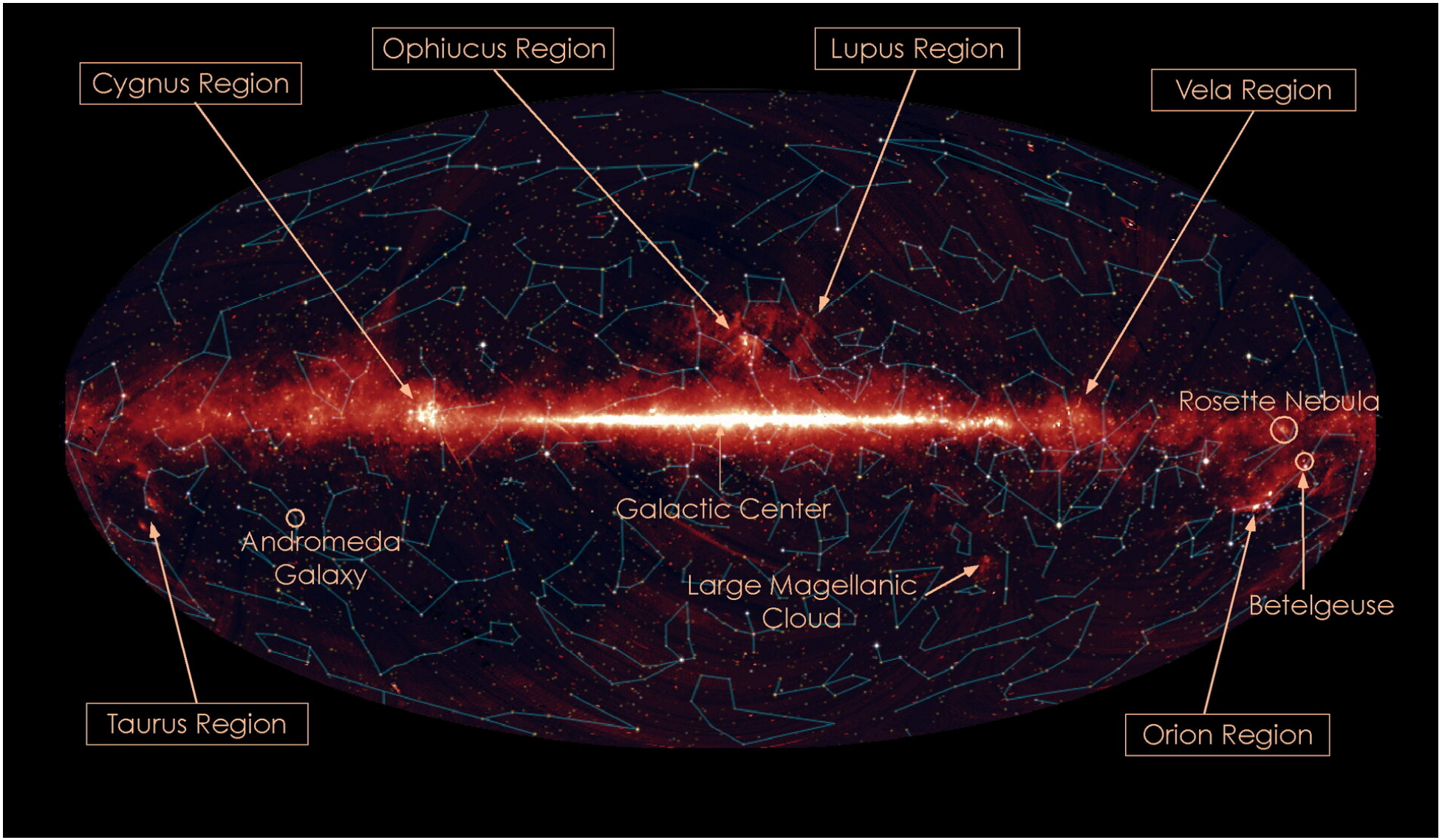
გარემოს ეფექტური ტემპერატურა: E~5 10^{-3} EV (T=40 K)



გარემოს ეფექტური ტემპერატურა: ~100K

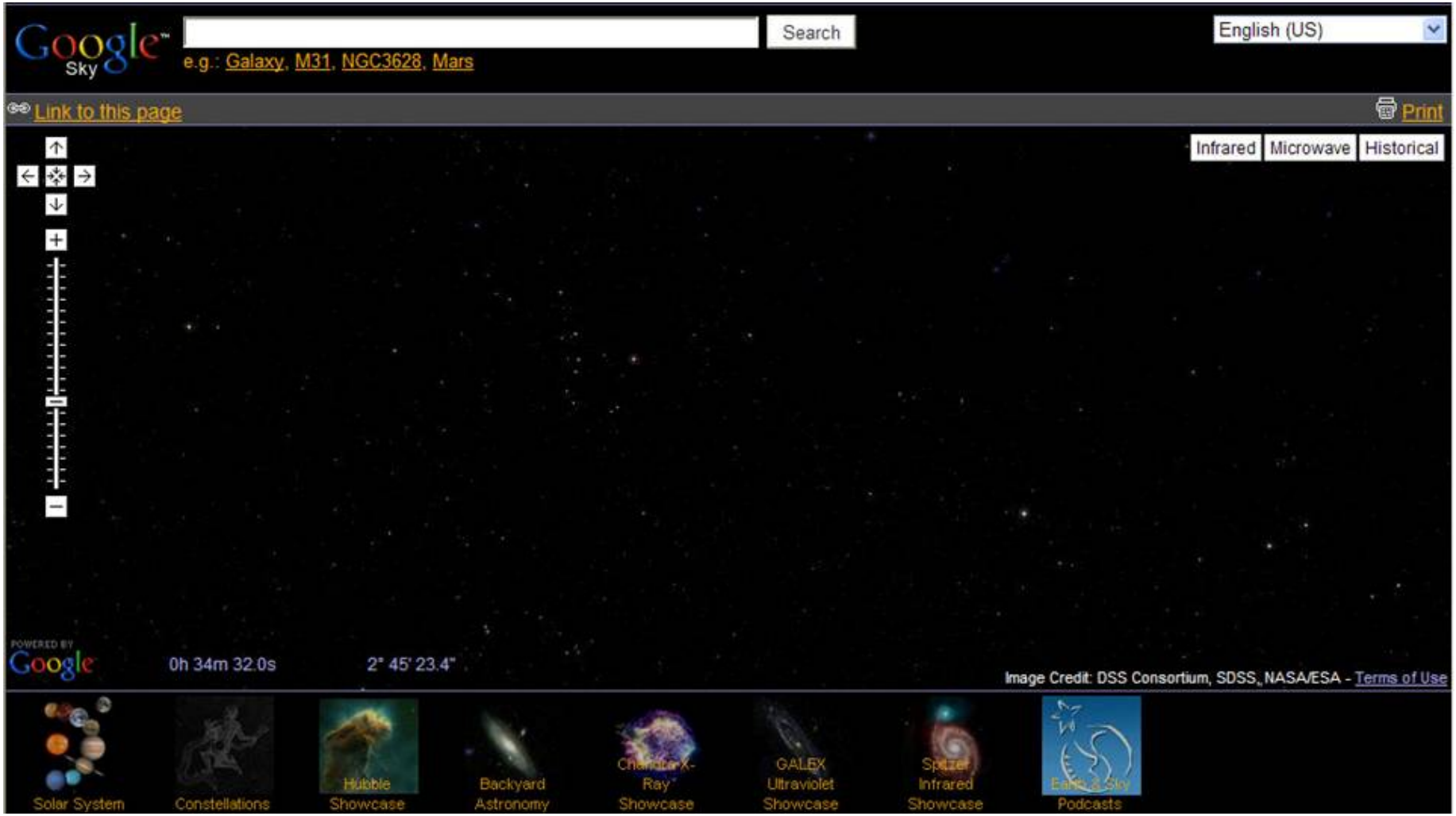


ჩვენი გალაქტიკა ინფრაწითელ დიაპაზონში

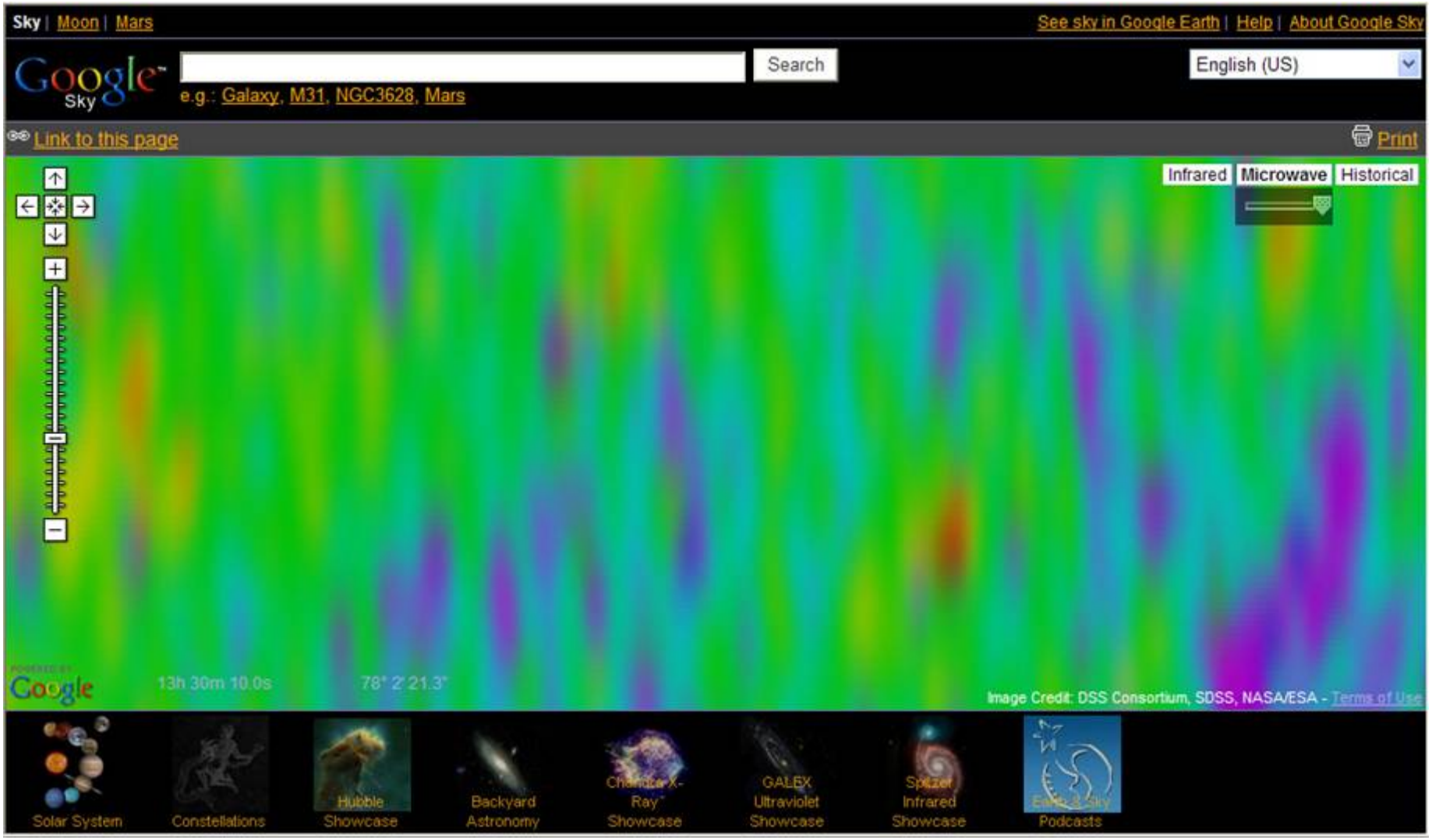


ოპტიკური დიაპაზონი

ობიექტების ეფექტური ტემპერატურა: ~900K+

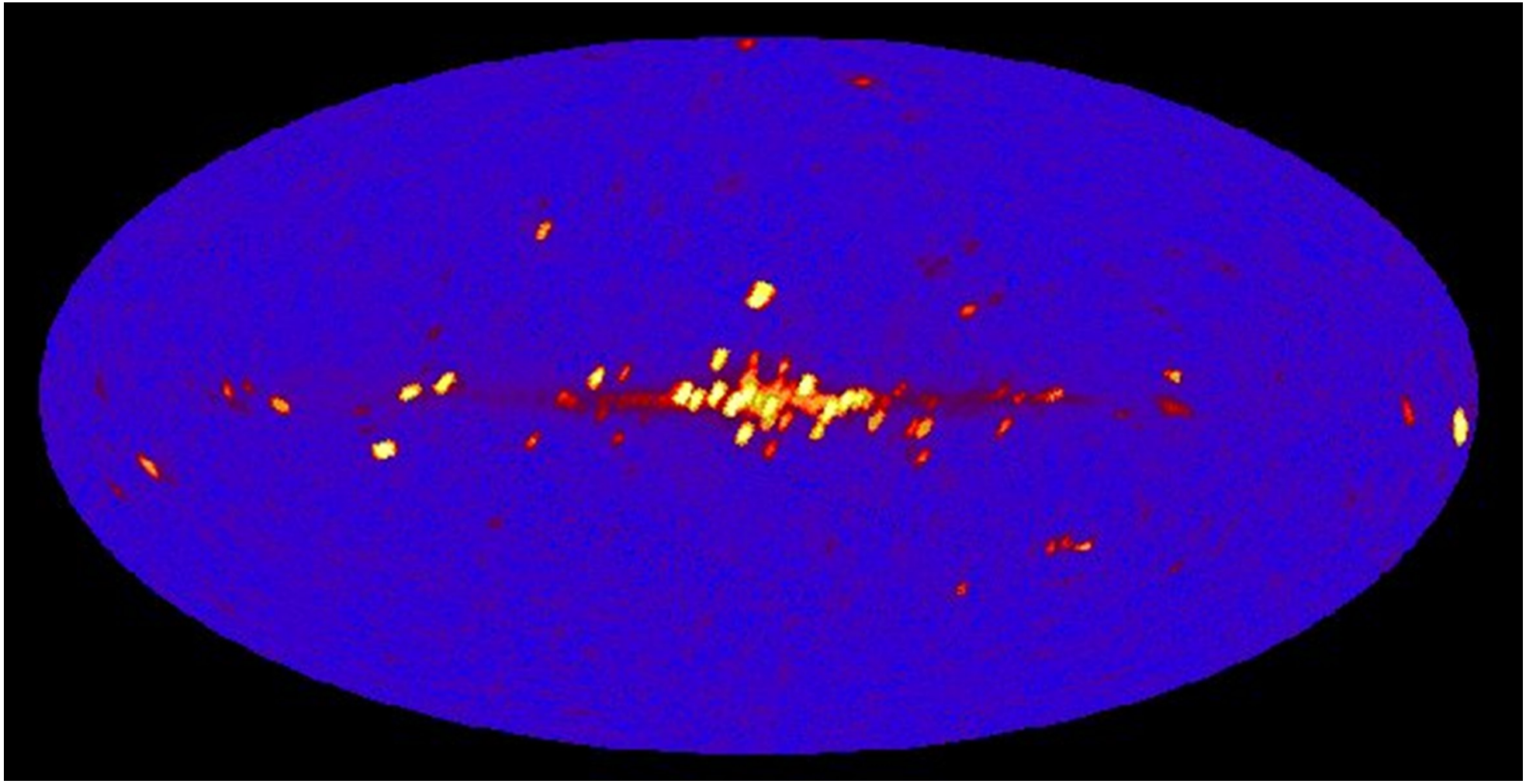


ინფრაწითელი + მიკროტალღოვანი



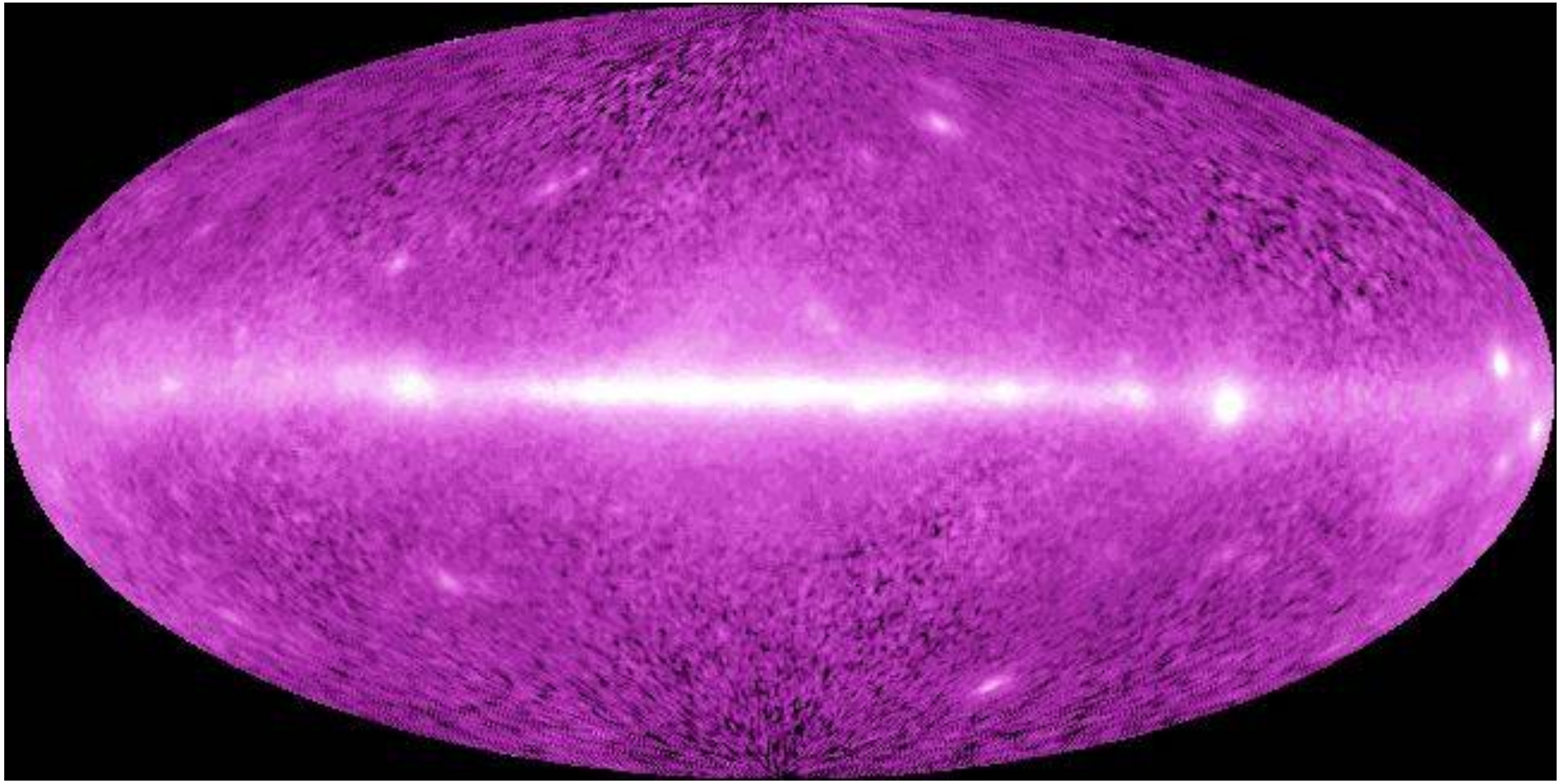
რენტგენული დიაპაზონი (X-ray)

ფოტონის ენერგია: 10^3–10^4 eV
ობიექტების ეფექტური ტემპერატურა: ~10^8 K



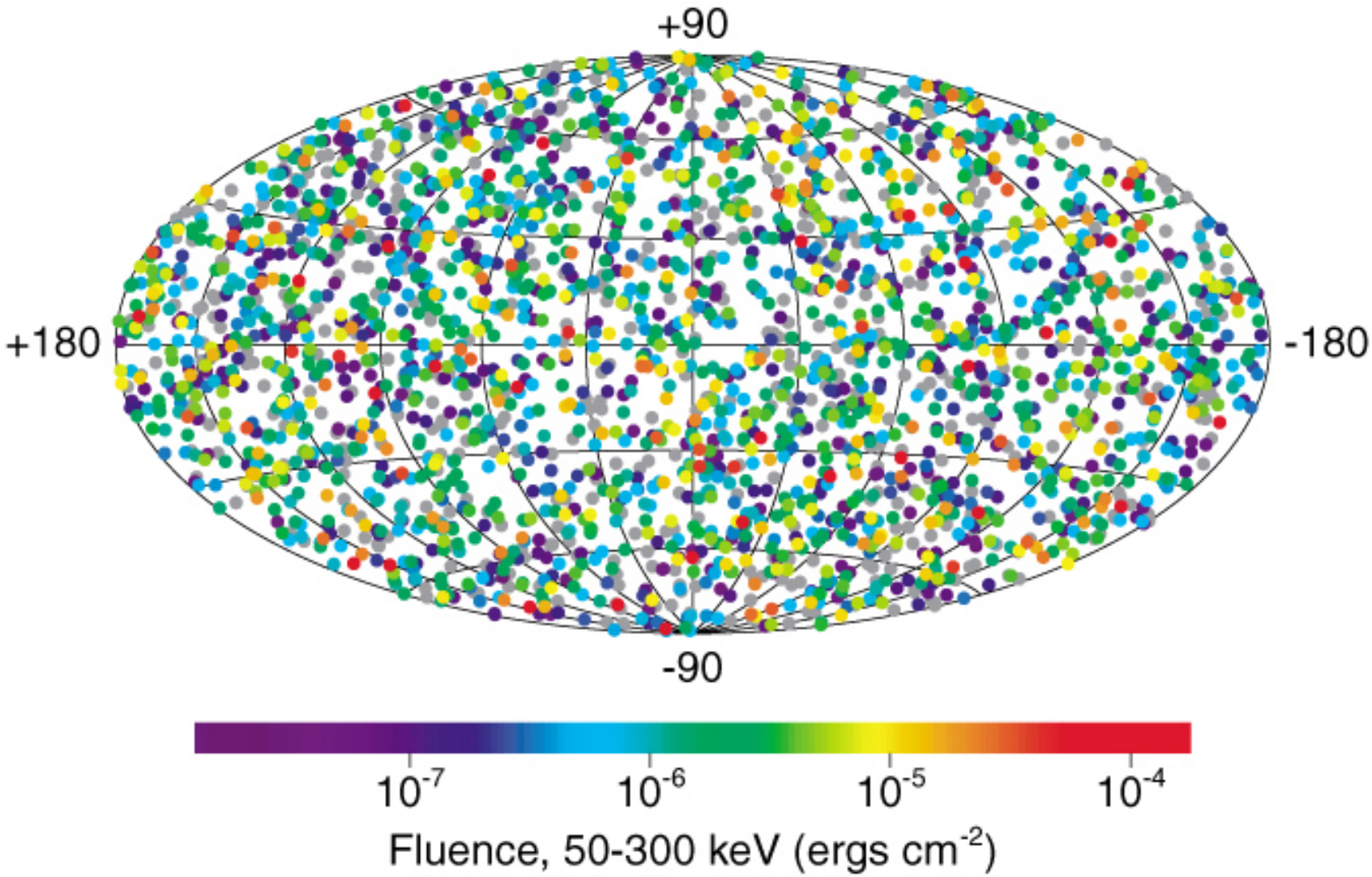
გამა დიაპაზონი

ფოტონის ენერგია: 10^6–10^9 eV
ობიექტების ეფექტური ტემპერატურა: ~10^{13} K



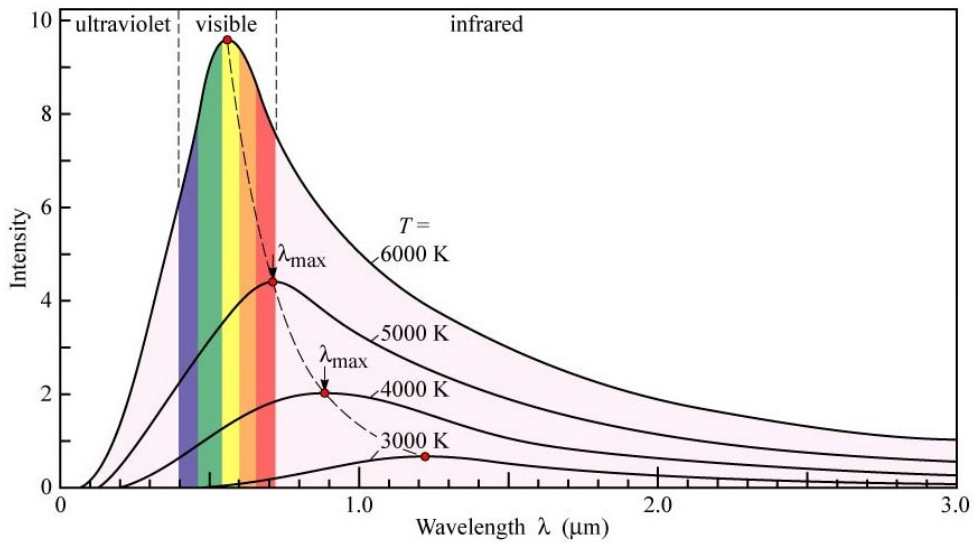
გამა დიაპაზონი

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

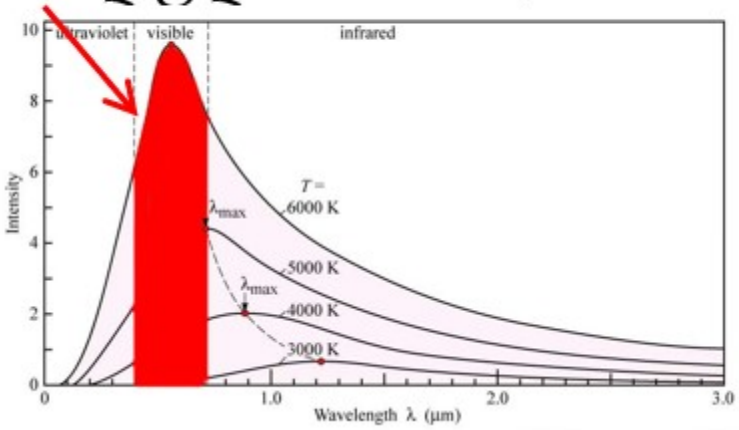


ვარსკვლავების სითბური გამოსხივება

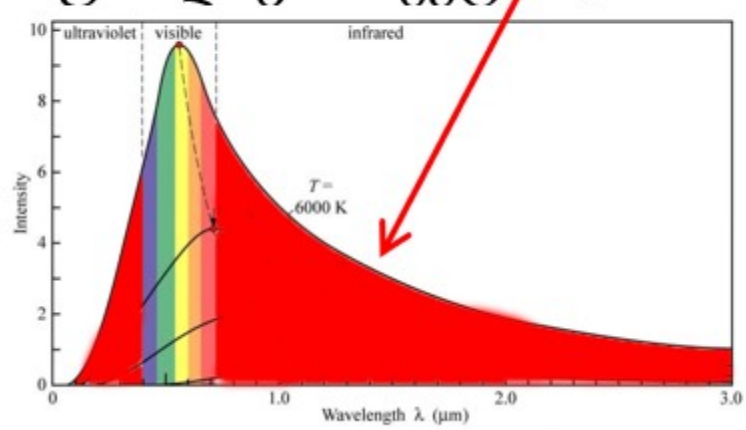
ვარსკვლავების გამოსხივება მოიუცავს როგორც ხილულ, ასევე ელ.მაგ. სპექტრის სხვა უბნებს:



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

ამოცანა 2. ვარსკვლავების გამოსხივების ბოლომეტრული სიდიდე

T ტემპერატურის ვარსკვლავის გამოსხივების ზედაპირული ინტენსივობის სპექტრული განაწილებაა (პლანკის ფორმულა):

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

სტეფან-ბოლცმანის კანონის მიხედვით ფართობის ერთეულზე გამოსხივებული ენერგია გამოითვლება როგორც:

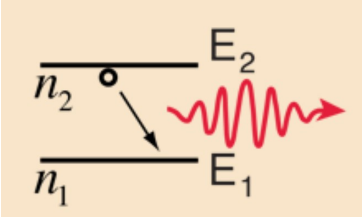
$$W(T) = \int_0^\infty B_\nu(T)d\nu = \frac{\sigma_B}{\pi}T^4$$

სადაც σ_B სტეფან-ბოლცმანის მუდმივაა.

1. გამოთვალეთ სტეფან ბოლცმანის მუდმივა კვადრატურებით ინტეგრების გამოყენებით შესაძლო სიზუსტით;
2. გამოთვალეთ სტეფან ბოლცმანის მუდმივა მონტე-კარლოს მეთოდით ინტეგრების გამოყენებით;
3. გამოთვალეთ მზის ზედაპირიდან გამოსხივებული ოპტიკური და ბოლომეტრული ნაკადების ფარდობა $\eta_\odot$
4. გამოთვალეთ ოპტიკური და ბოლომეტრული ნაკადების ფარდობის დამოკიდებულება ვარსკვლავის ზედაპირულ ტემპერატურაზე $\eta = \eta(T)$ ინტერვალში 500 K-15 000 K;
5. იპოვეთ $\eta = \eta(T)$ ფუნქციის 8 მნიშვნელობა ლოგარითმული ბიჯის ბადეზე ინტერვალში 500 K-15 000 K. აღადგინეთ ფუნქციის სახე უწყვეტი ინტერპოლაციის გამოყენებით;
6. იპოვეთ $\eta = \eta(T)$ ფუნქციის 16 მნიშვნელობა ლოგარითმული ბიჯის ბადეზე. აღადგინეთ ფუნქცია უბან-უბან კუბური ერმიტული ინტერპოლაციის გამოყენებით. მიღებული მრუდი უნდა შეიცავდეს 500 წერტილს;

ოპტიკური ფანჯარა: 400-789 THz , $\sigma_B = 5.67036713 \times 10^{-8}$ W m^{-2} K^{-4} , $T_\odot = 5778$ K

ატომური გამოსხივების ხაზები



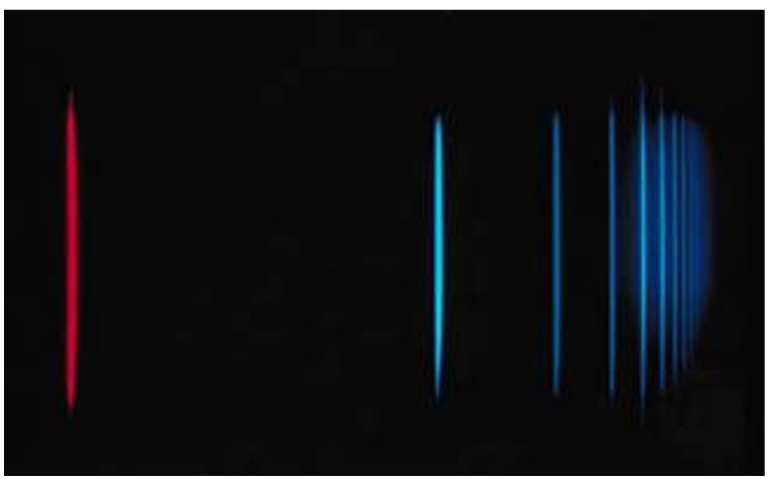
შროდინგერის განტოლება: ელექტრონები დისკრეტული დონეებზე n=1,2,3...

ფოტონის გამოსხივება: ელექტრონის ერთი დონიდან მეორეზე გადასვლა

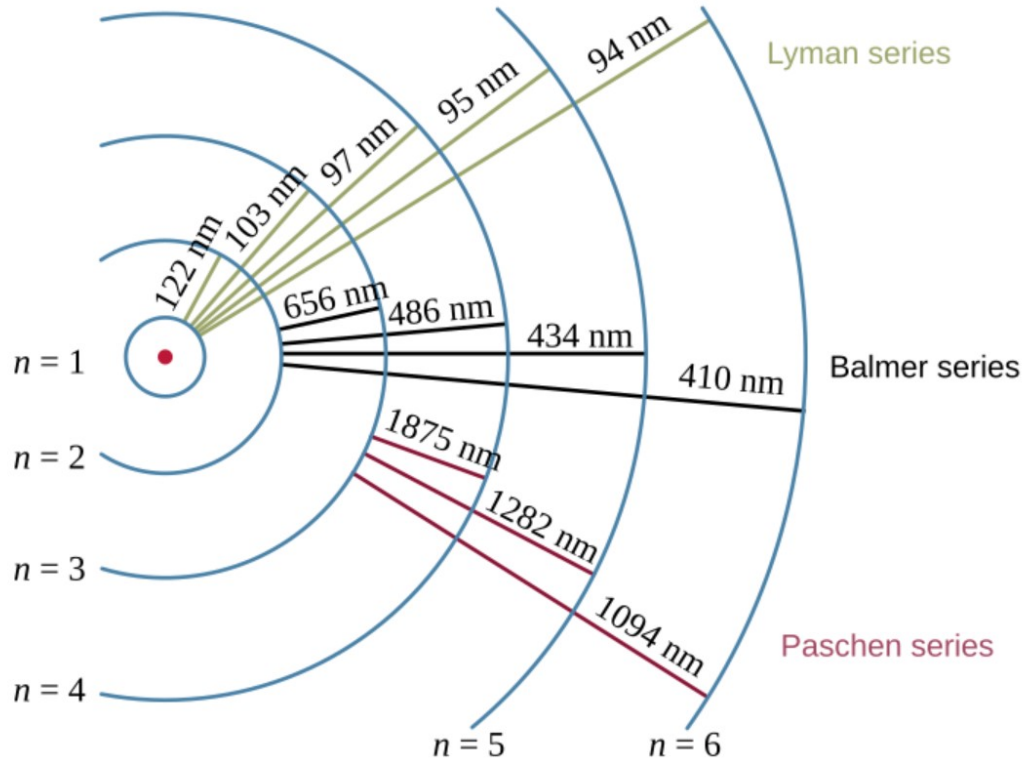
გამოსხივებული ფოტონის ენერგია: $E = h\nu = h\, C/\lambda$

გამოსხივების ხაზების სერიები:

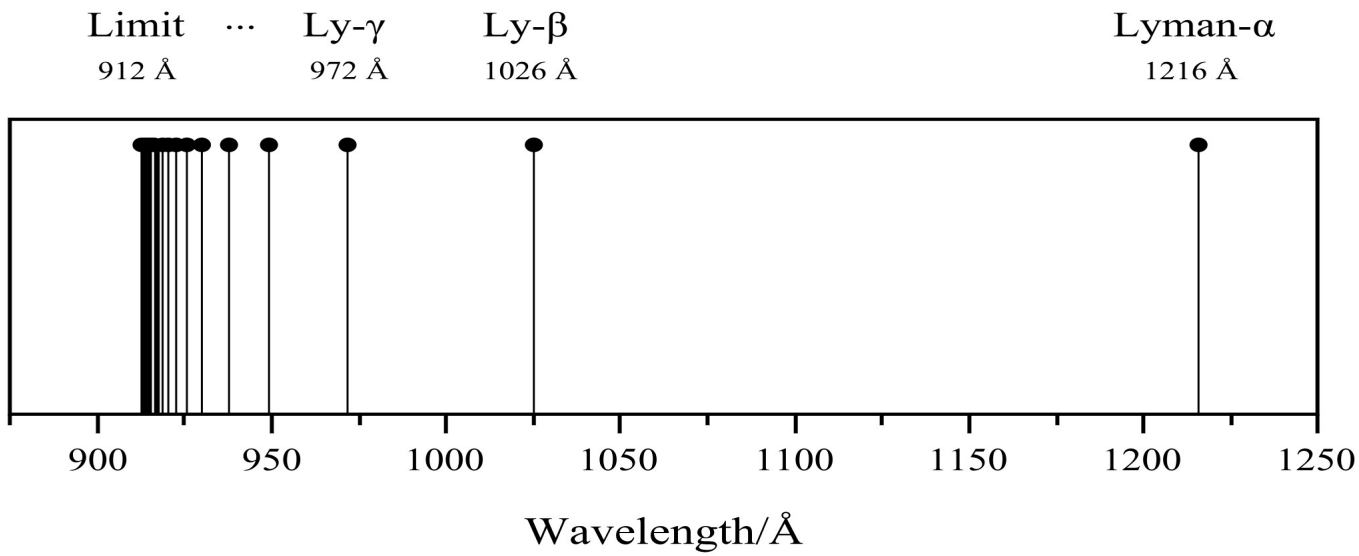
n=1 - ლაიმანის;
n=2 - ბალმერის;
n=3 - პაშენის;
4/5/6 - Brackett/Pfund/Humphreys

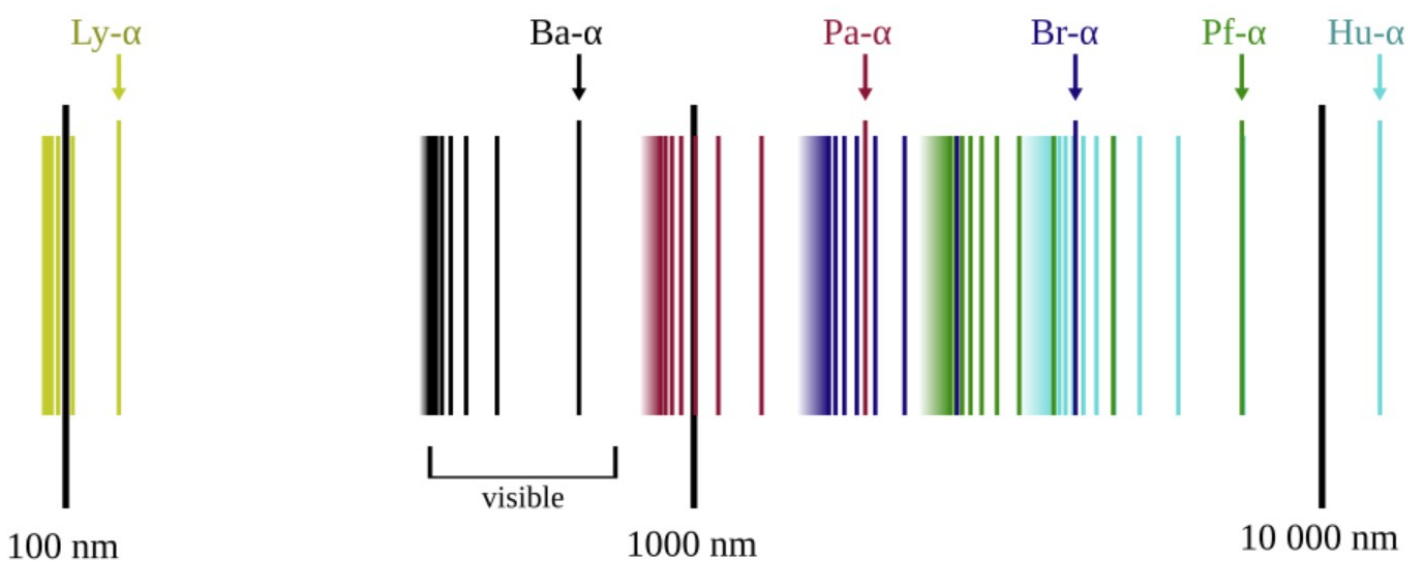


წყალბადის ატომის ბალმერის სერია

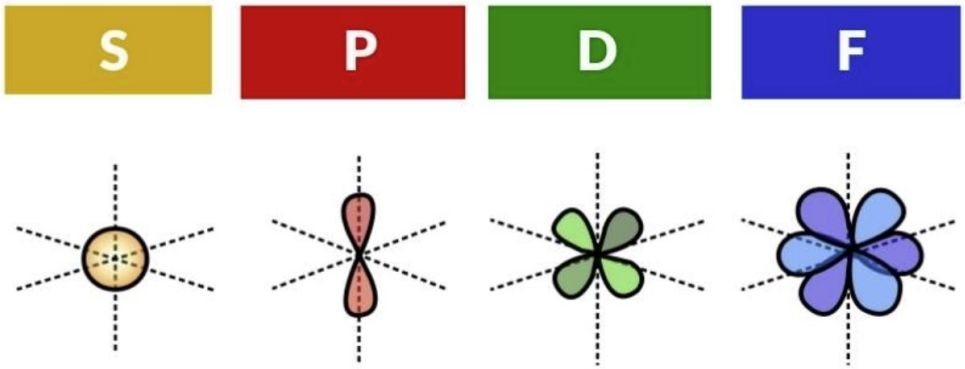


წყალბადის ატომის გამოსხივების/შთანთქმის სპექტრი



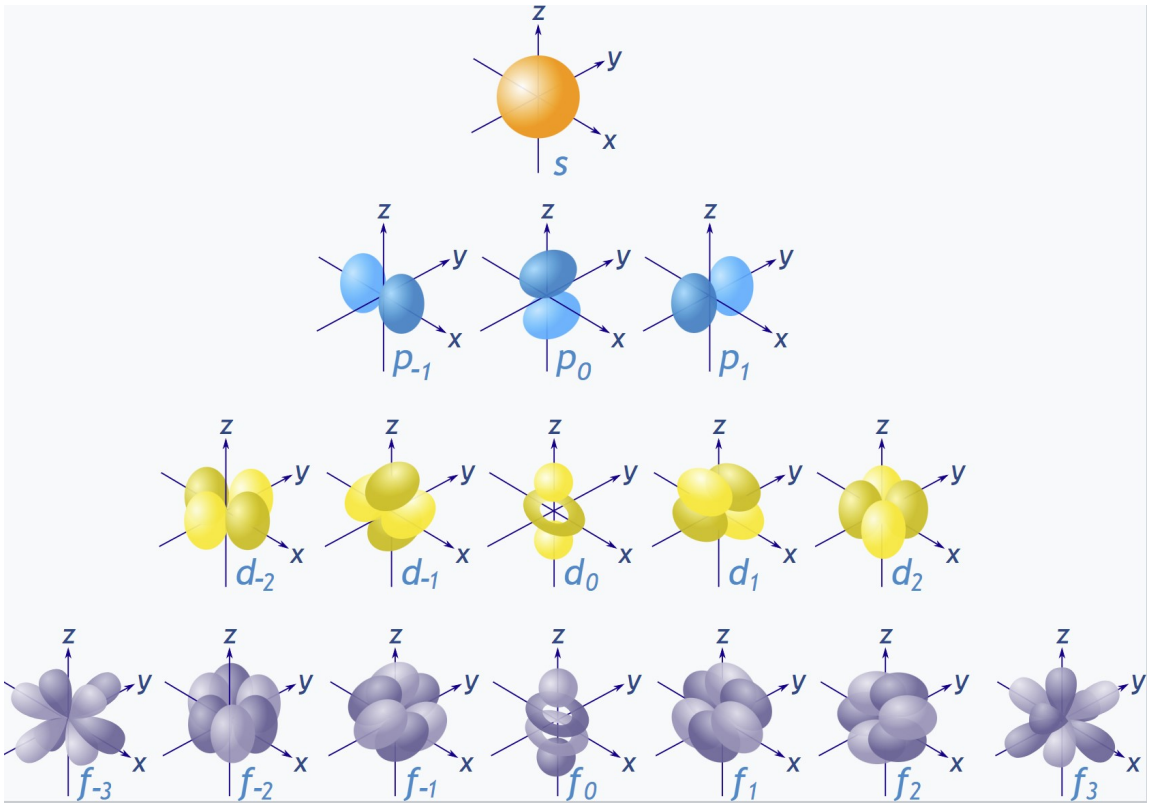


ელექტრონების ორბიტალები

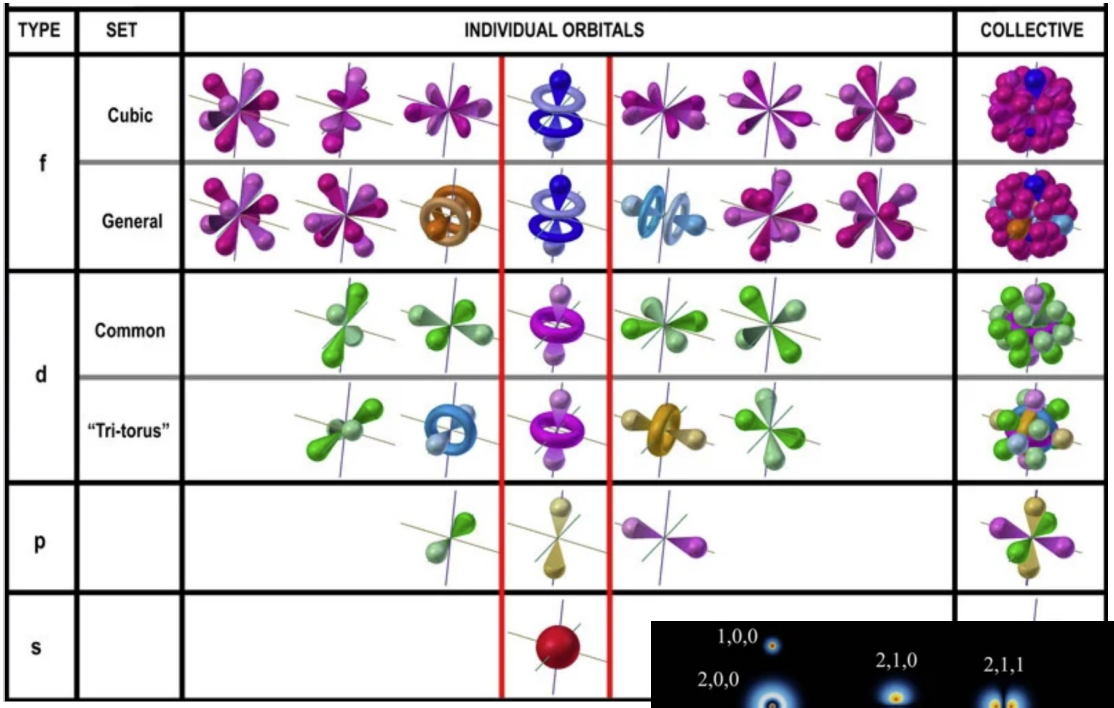


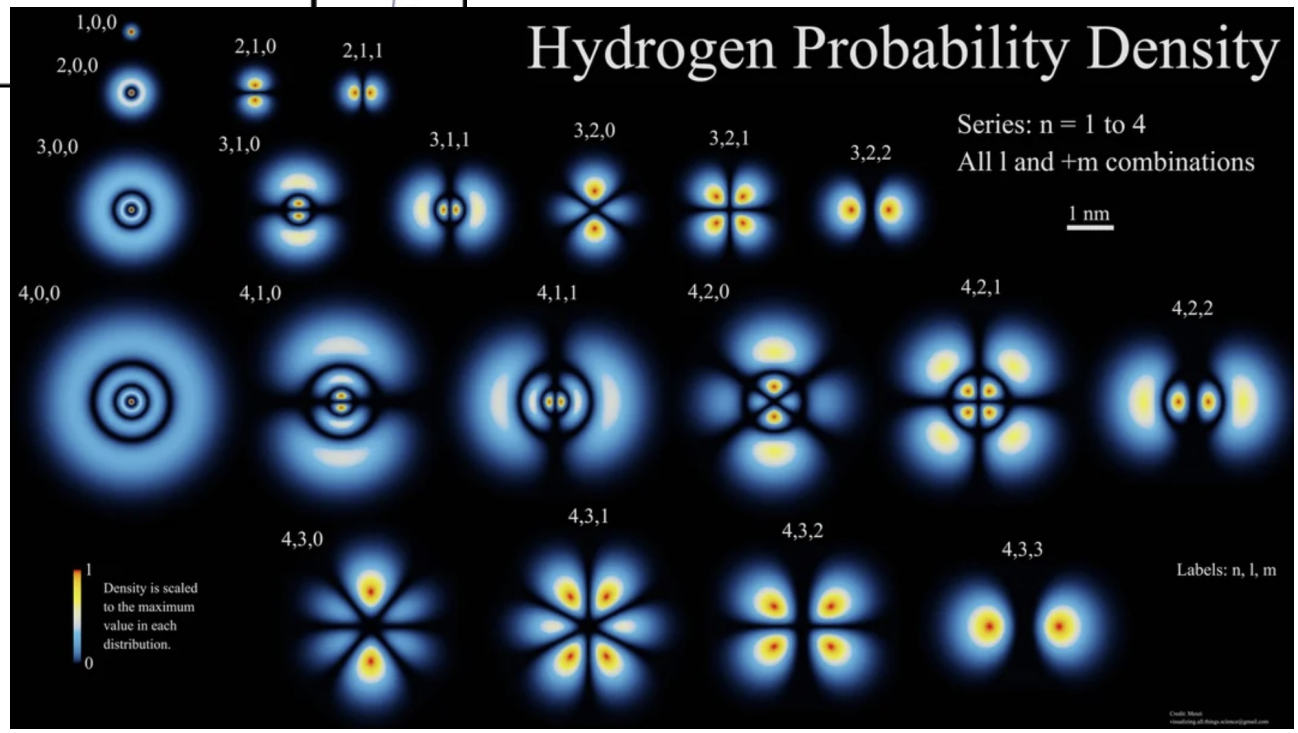
Orbital Types in Energy Levels

n = 1	1s			
n = 2	2s	2p		
n = 3	3s	3p	3d	
n = 4	4s	4p	4d	4f



ელექტრონული ღრუბლის გეომეტრია



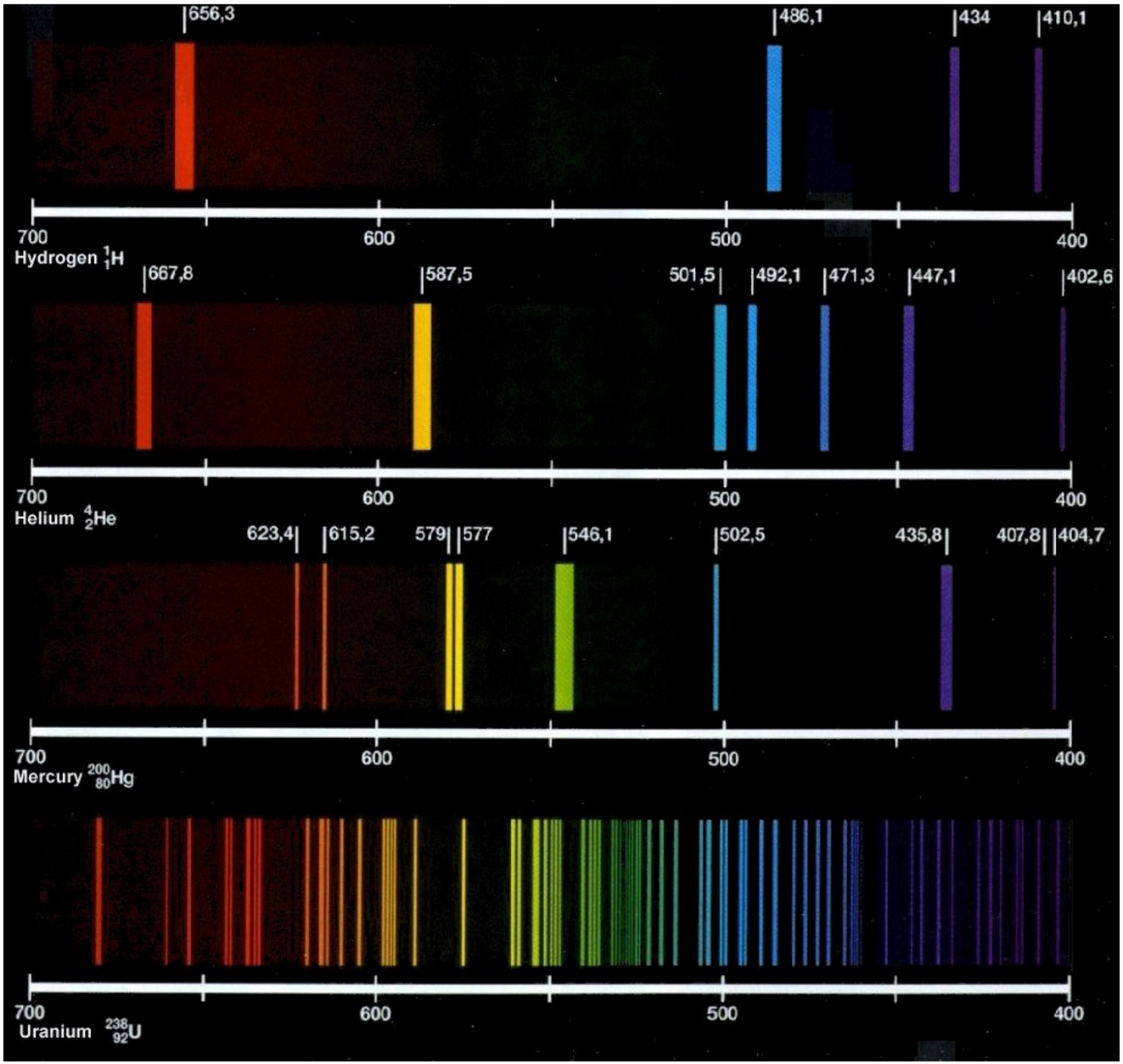


სპექტრული ხაზები

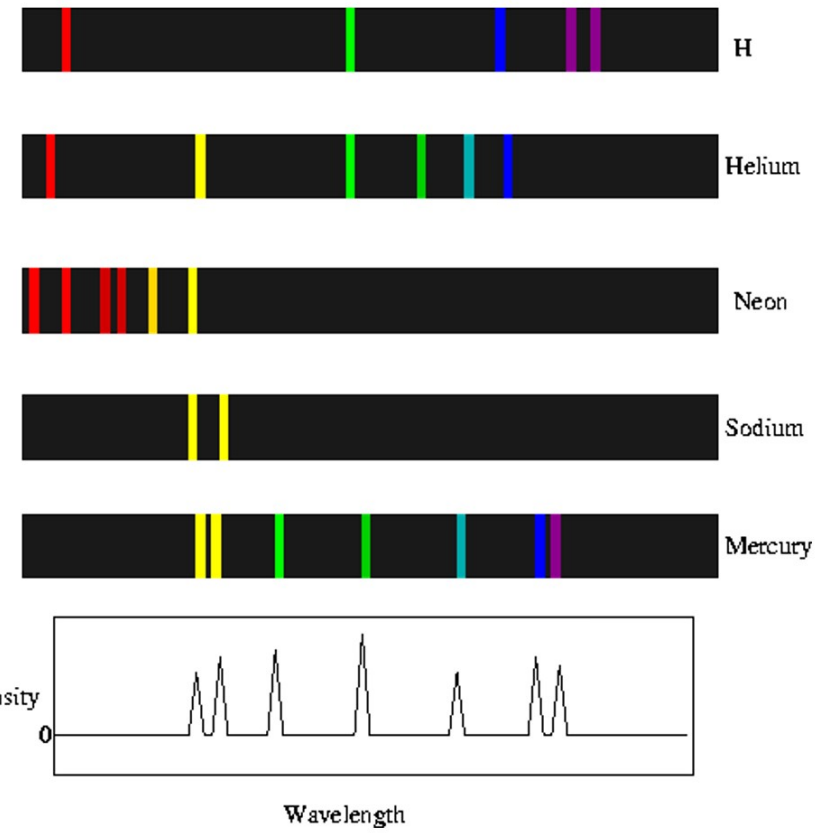
ქიმიური შემადგენლობა

ყოველ ქიმიურ ელემენტს ახასიათებს ხაზების უნიკალური თანმიმდევრობა

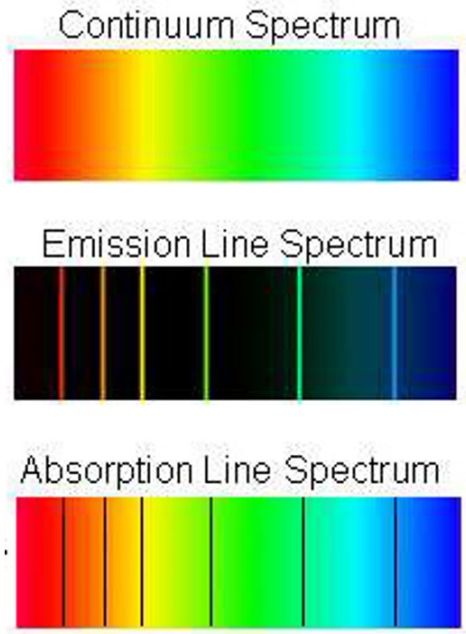
“სპეტრული ანალიზი”



სპექტრული ანალიზი



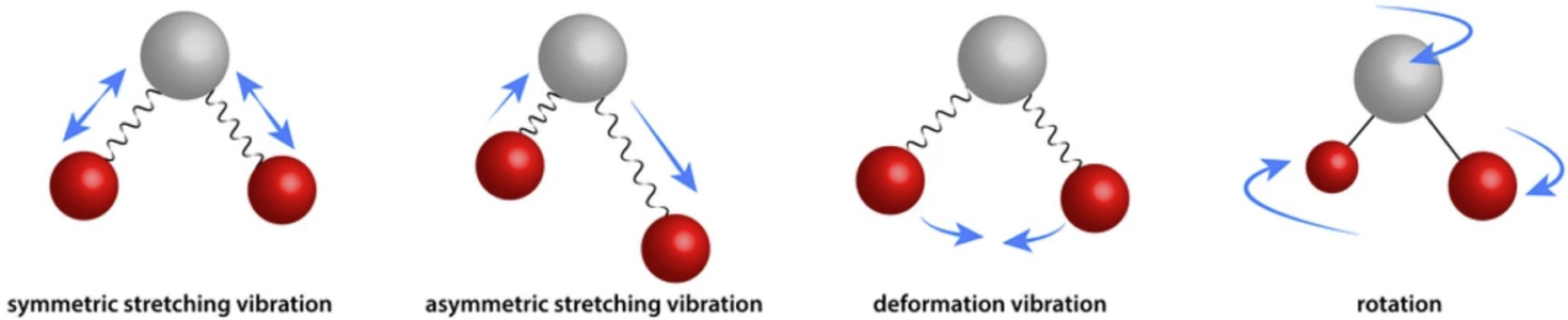
სპექტრული ხაზები:
გამომსხივებელი გარემოს
ქიმიური შემადგენლობა

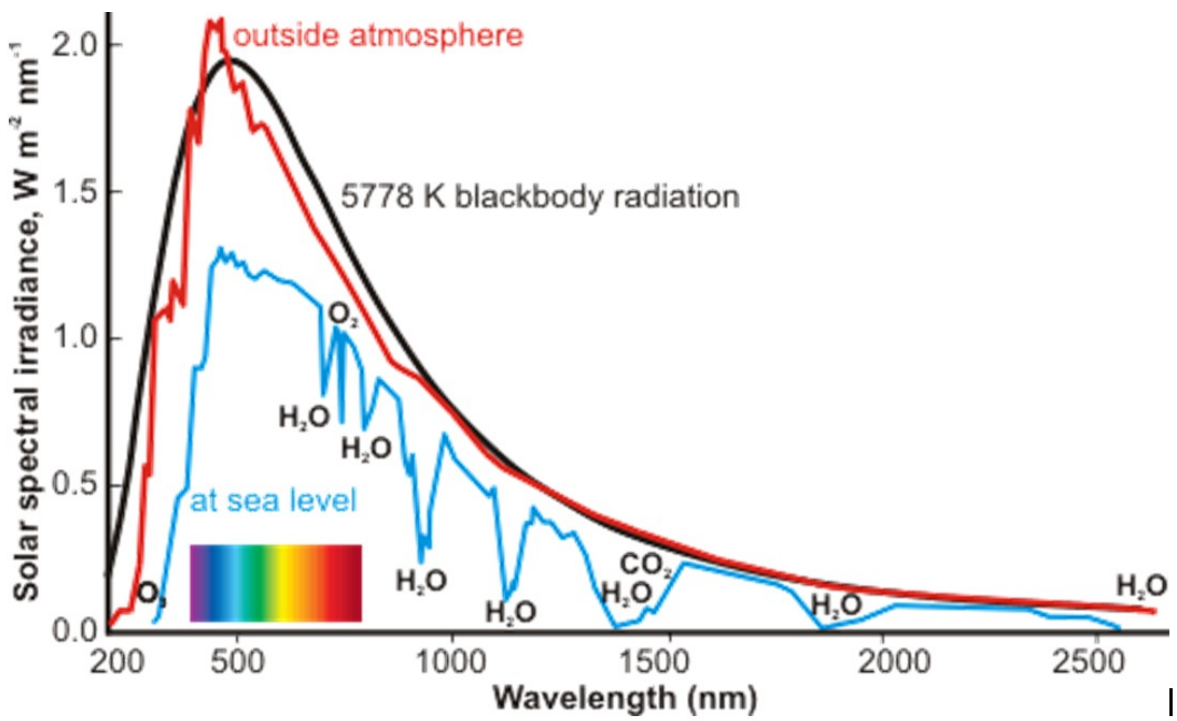


გამოსხივების და
შთანთქმის ხაზები

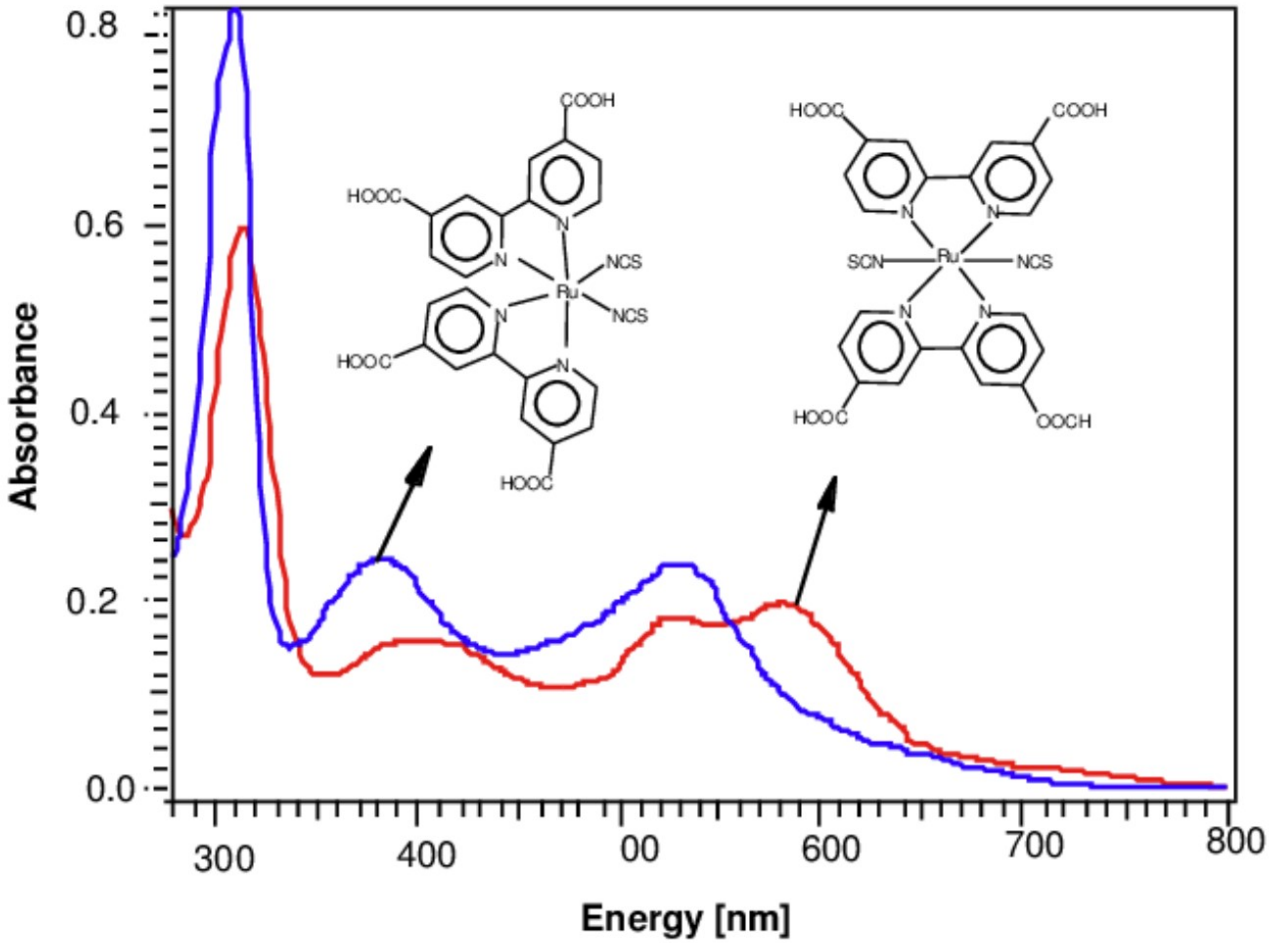
მოლეკულური ხაზები

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

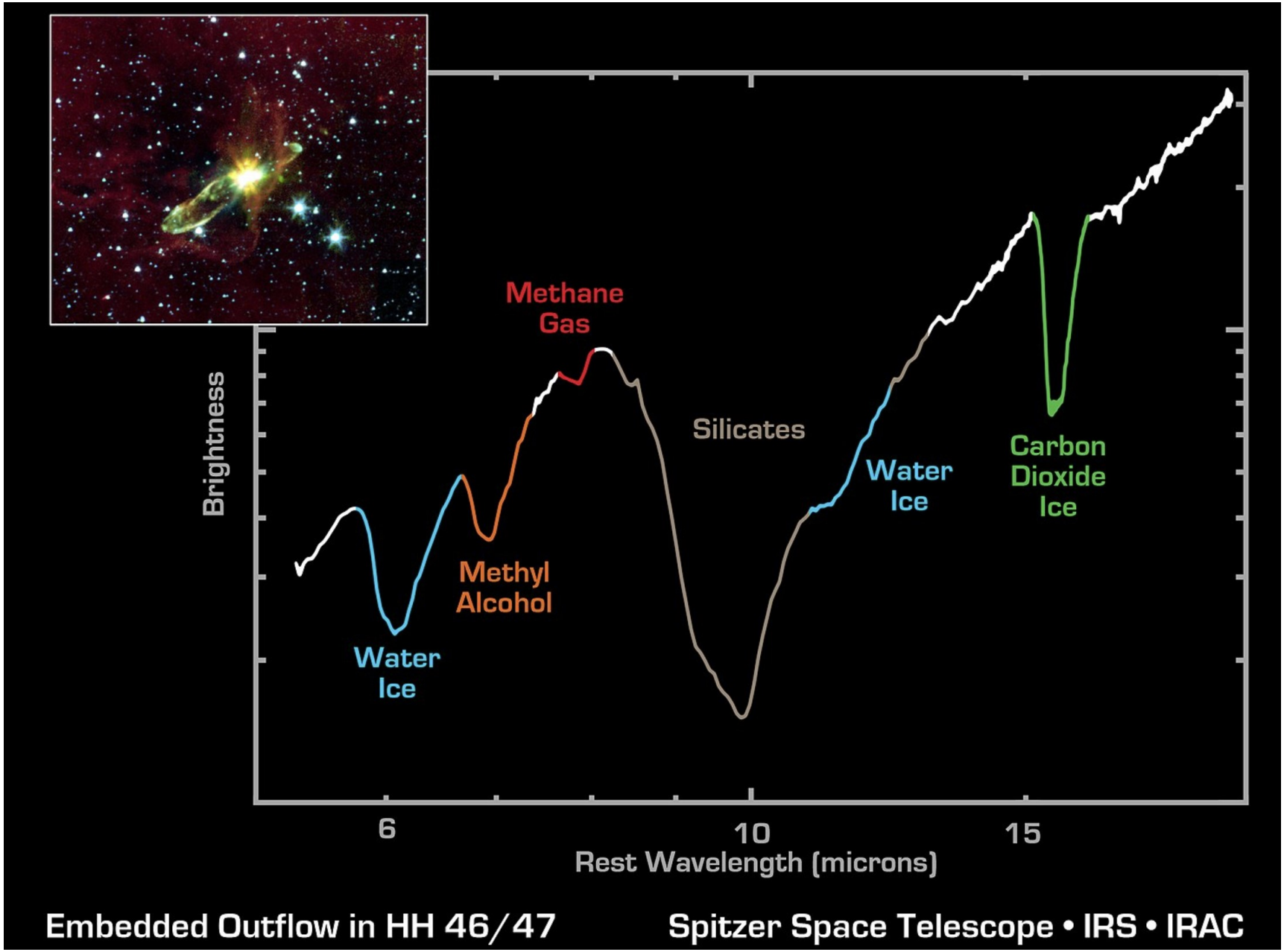




რთული მოლეკულების სპექტრალური ნაკვალევი



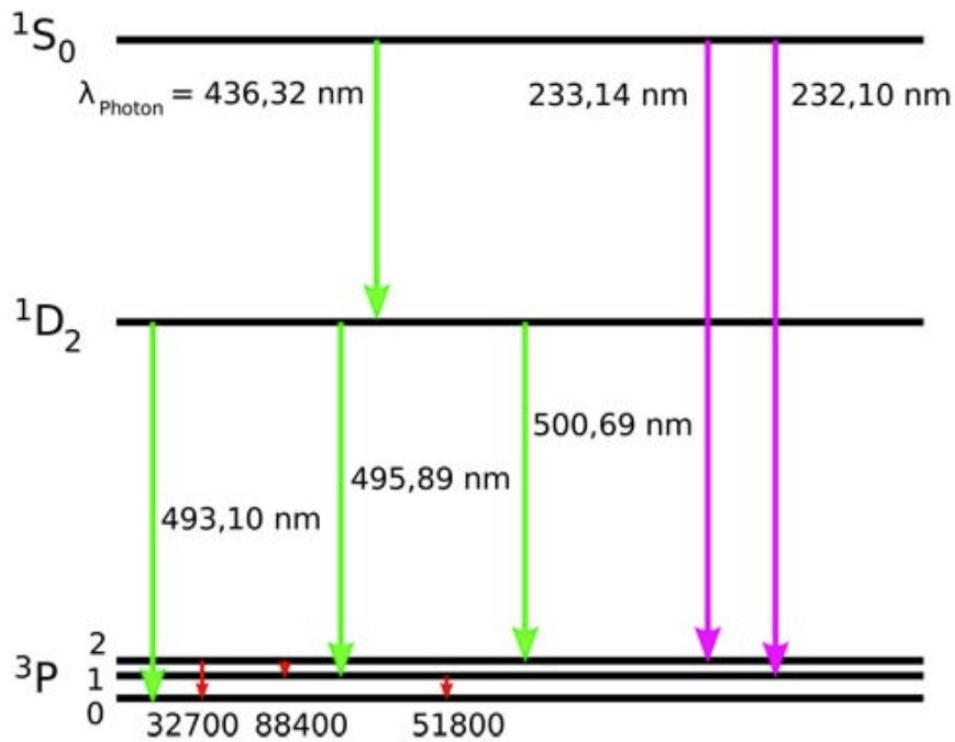
SST (Spitzer Space Telescope) – HH46/47 ჯეტი



აკრძალული ხაზები

ელექტრონის ერთი მეტასტაბილური ორბიტიდან მეორეზე „გადახტომა“

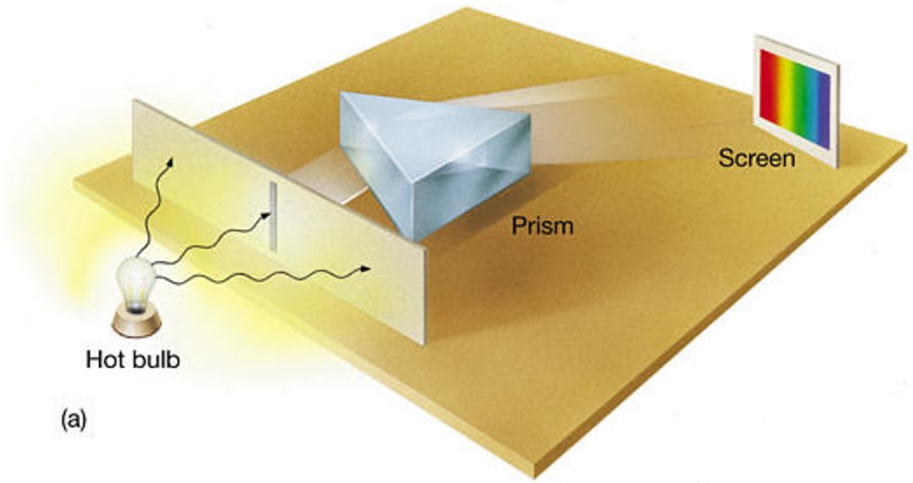
ძალიან დაბალი სიმკვრივე: ატომების დაჯახებებს შორის დროის ინტერვალი: 10-10,000 წმ
ახალი ელემენტი: „nebulium“??



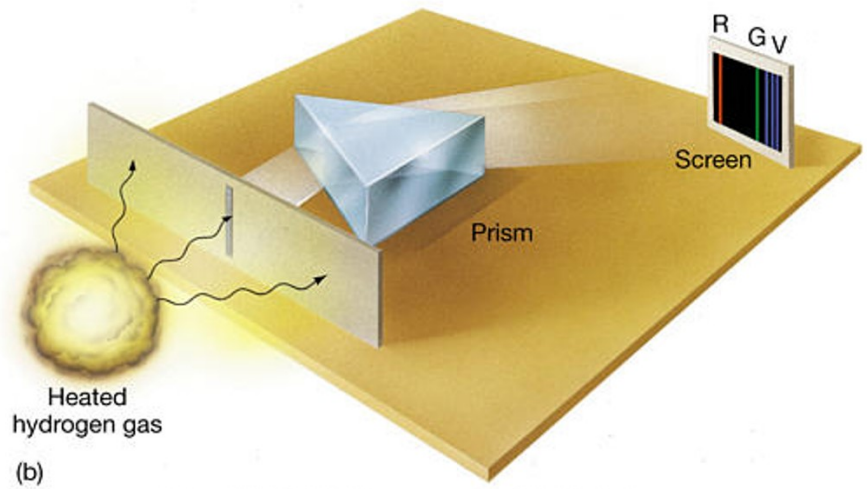
Electron transitions of doubly ionized oxygen: forbidden transitions in the visible spectrum are shown in green.

სპექტრული ანალიზი

გავარვარებული ნათურის გამოსხივება: უწყვეტი სპექტრი



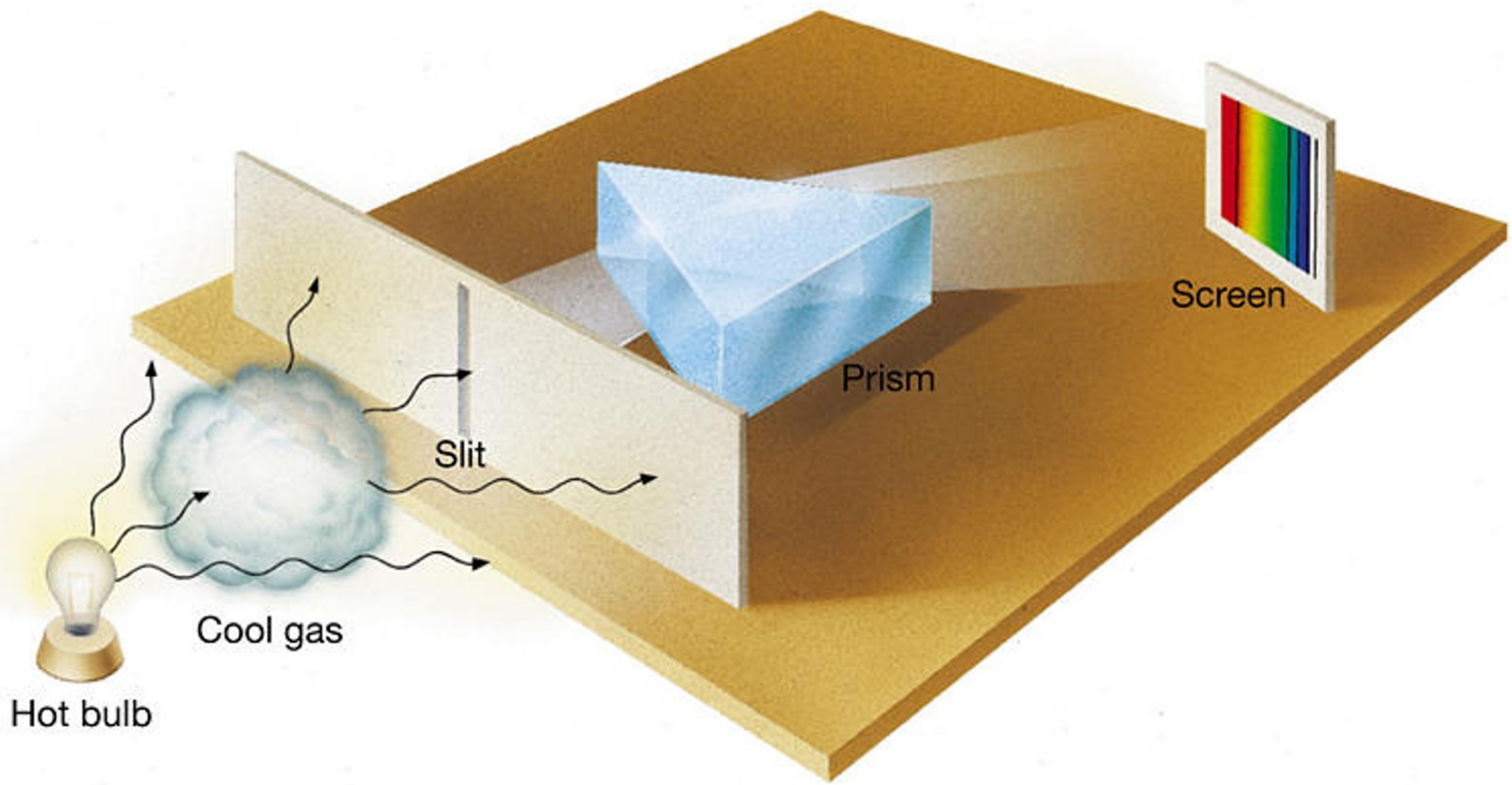
ცხელი წყალბადის აირის გამოსხივება: სპექტრული ხაზები



Copyright © 2005 Pearson Prentice Hall, Inc.

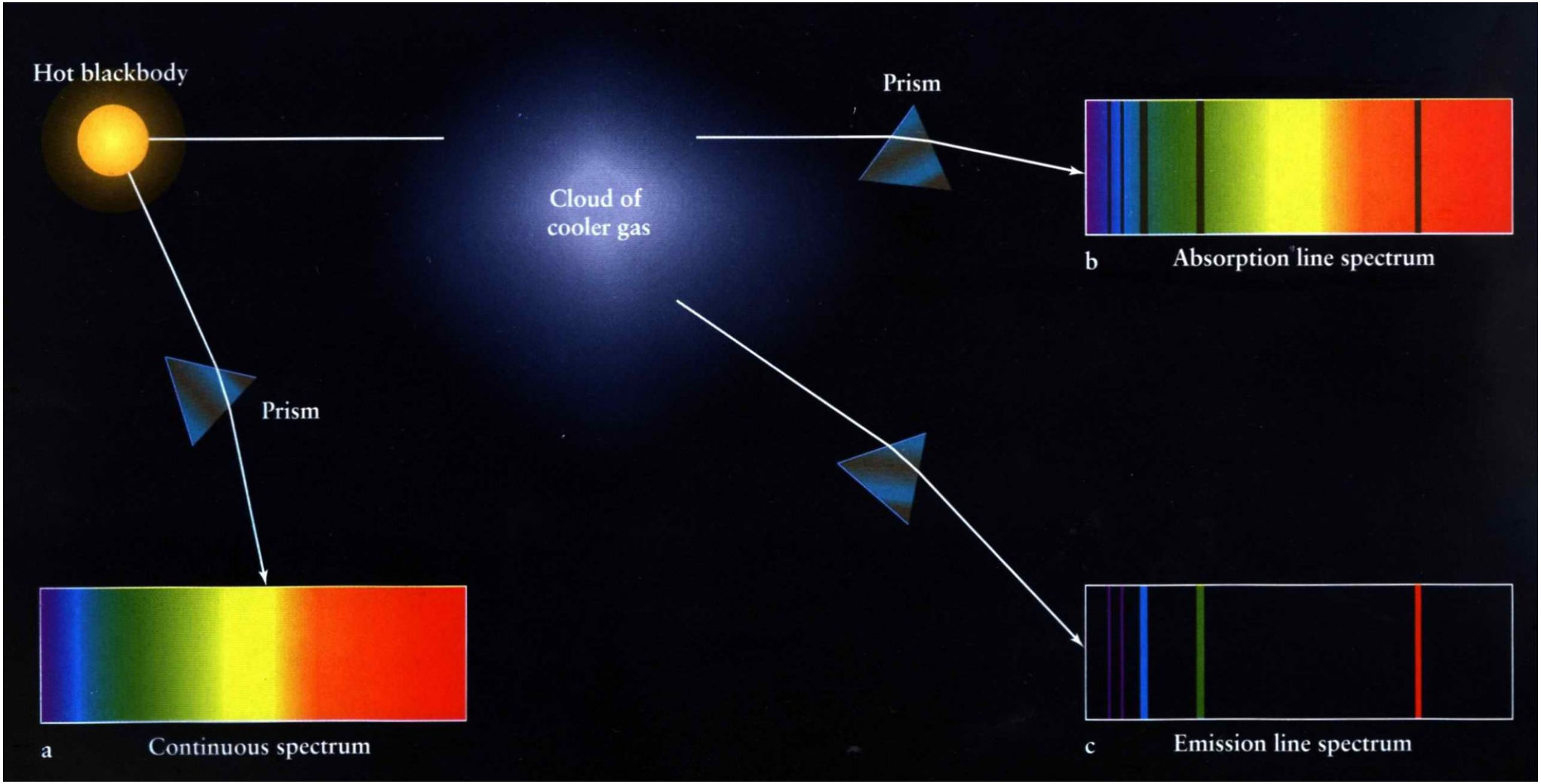
გამოსხივების და შთანთქმის ხაზები

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

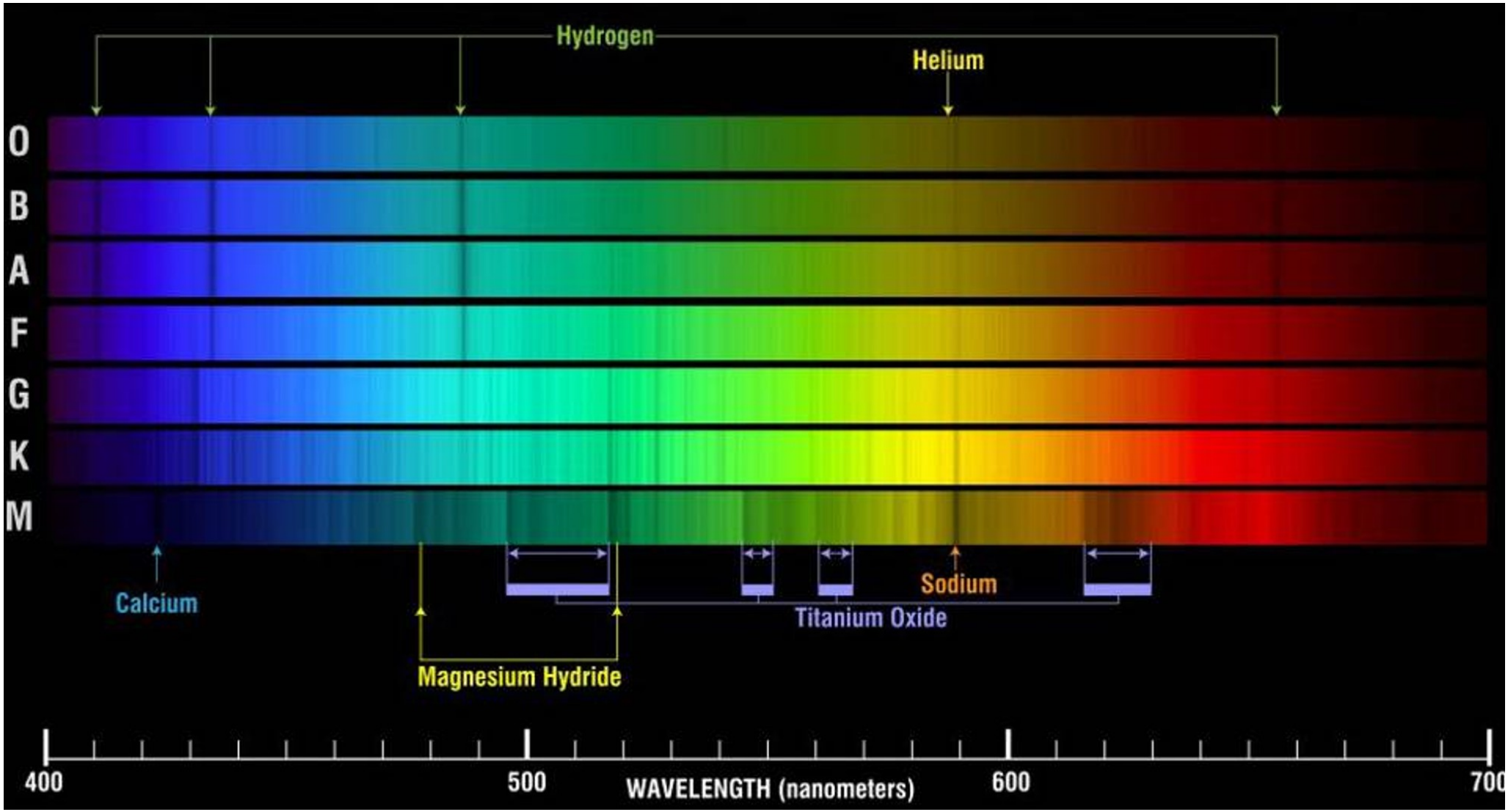


Copyright © 2005 Pearson Prentice Hall, Inc.

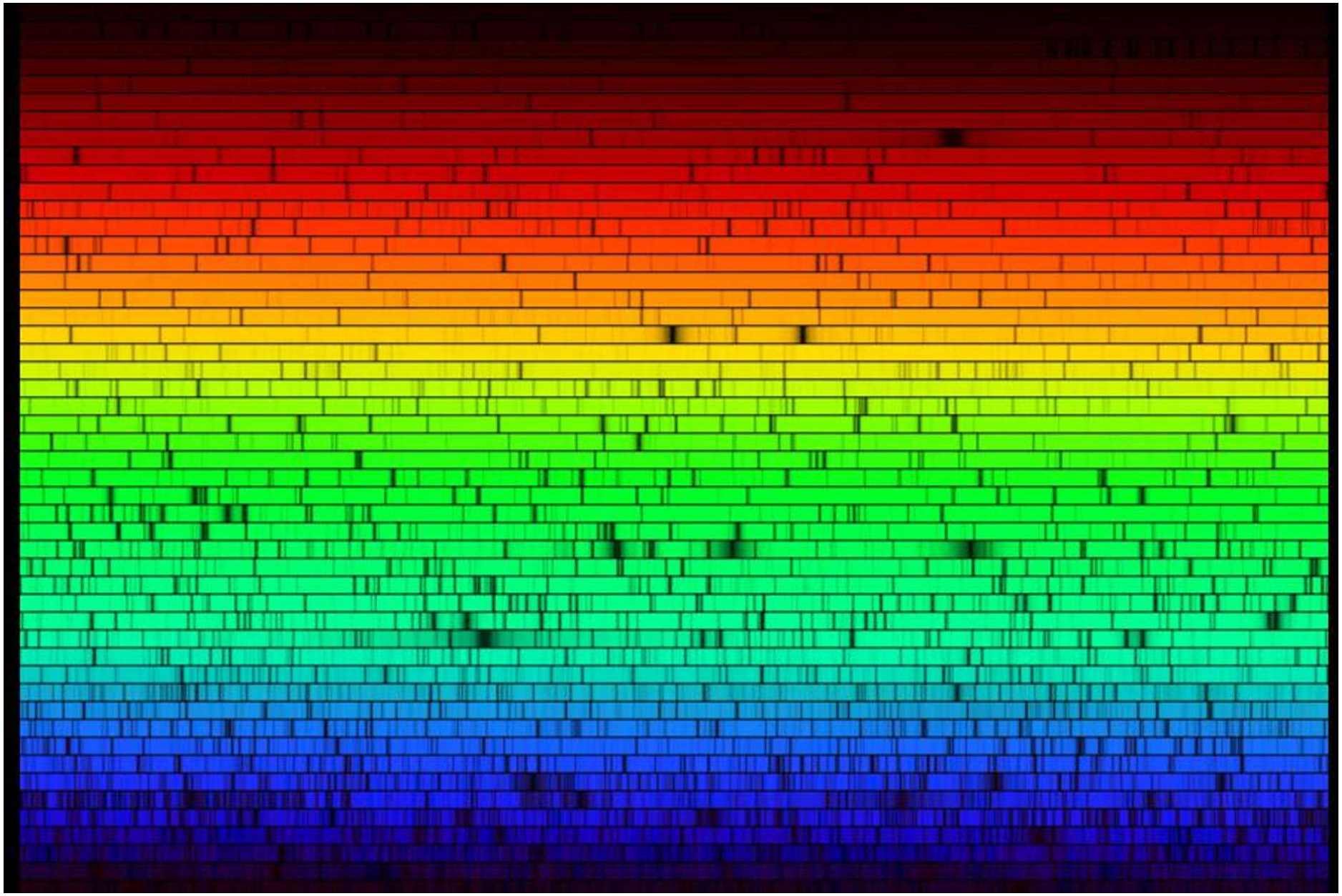
ციური სხეულების სპექტრი



სხვადასხვა სპექტრული კლასის ვარსკვლავები



მზის გამოსხივების სპექტრი (G2V)



სპექტრული ხაზები და “კინემატიკა”

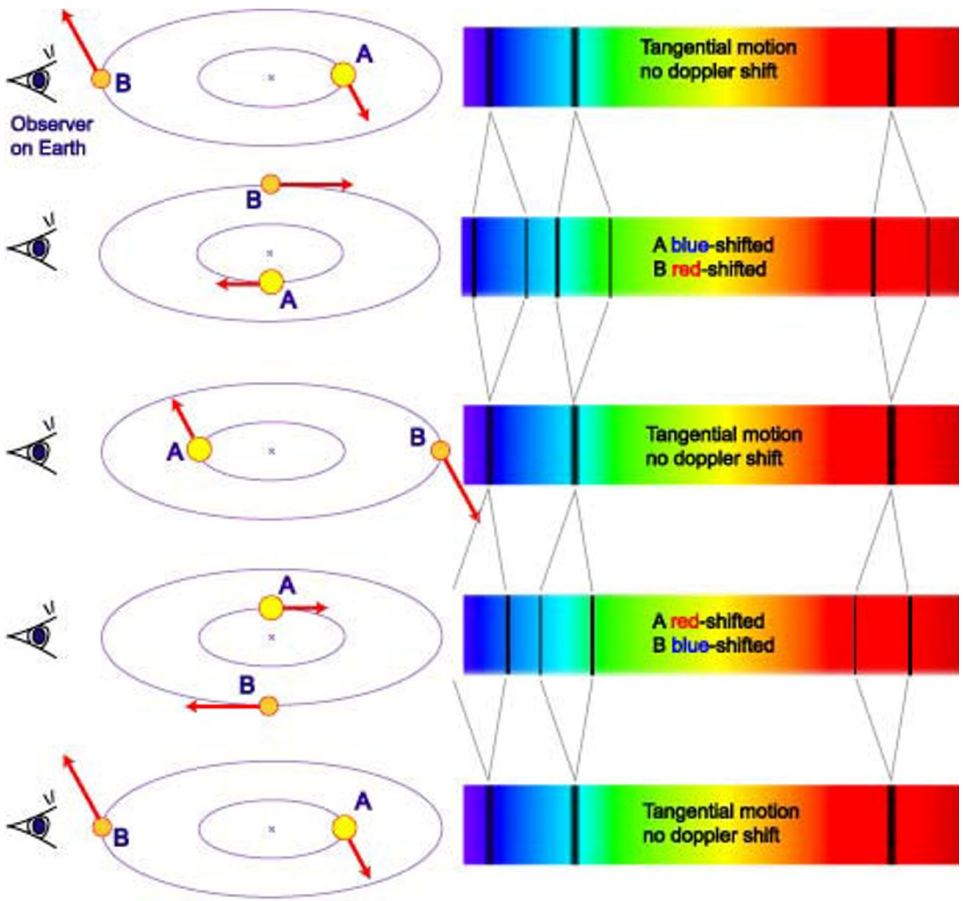
სპექტრული ხაზის წანაცვლება: (დოპლერის ეფექტი)

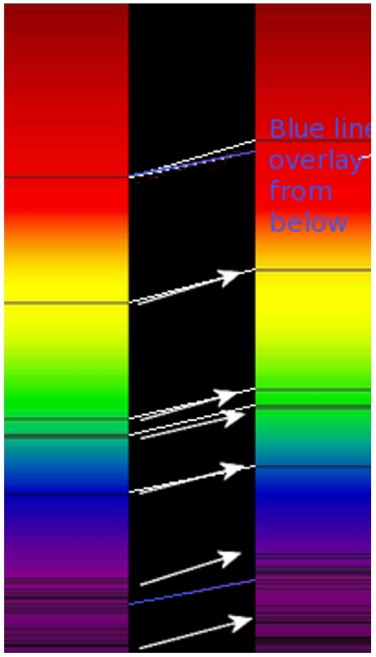
ლურჯი წანაცვლება: წყაროს დამკვირვებლის მიმართ *დაახლოება*

წითელი წანაცვლება: წყაროს დამკვირვებლის მიმართ *დაშორება*

ორჯერადი სისტემის სპექტრი:

სპექტრული ხაზების მკაცრად პერიოდული გახლეჩვა

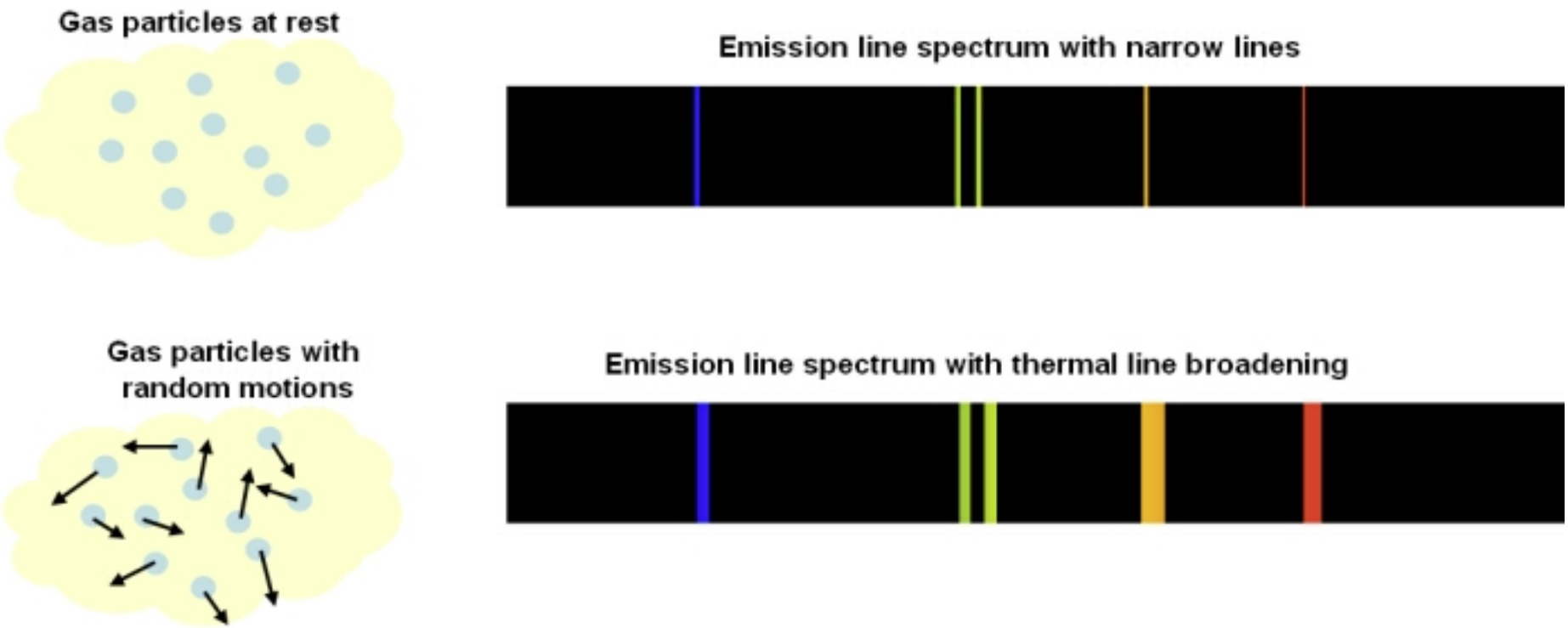




ჭითელი წანაცვლების მაგალითი

სპექტრული ხაზების სითბური გაფართოება

ატომების ქაოსური სითბური მოძრაობა: ლოკალური დოპლერის ეფექტი



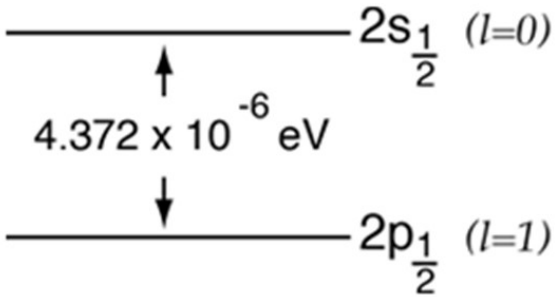
$$\omega = \omega_0 \left[1 \pm \frac{v}{c} \right]$$

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

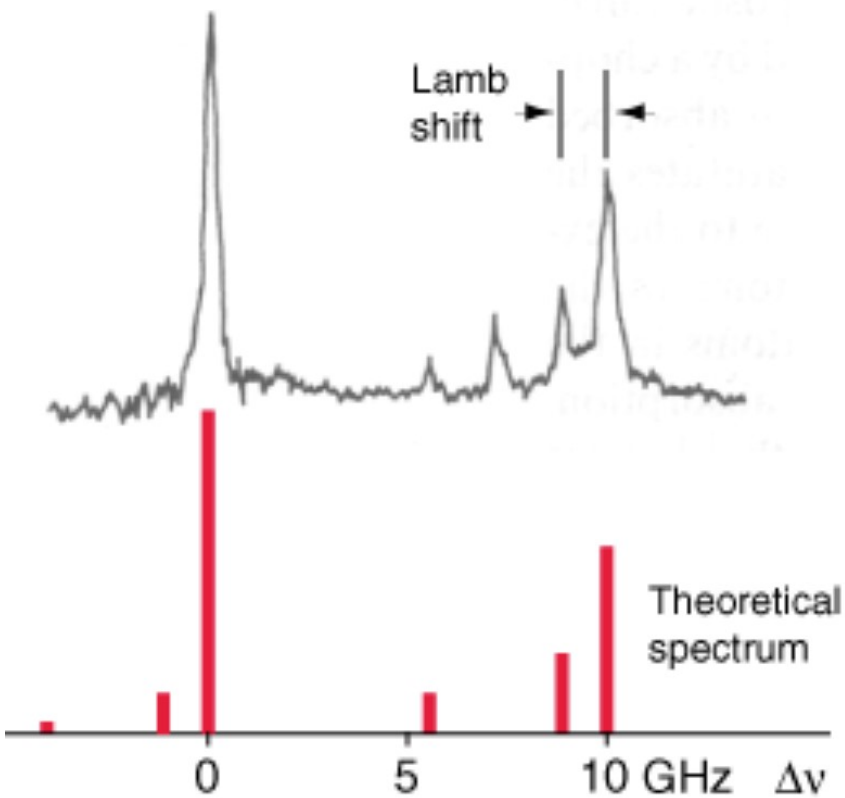
ლამბის წანაცვლება

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

ორბიტალებზე ელექტრონის ენერგიების
ანომალური გადახრა.

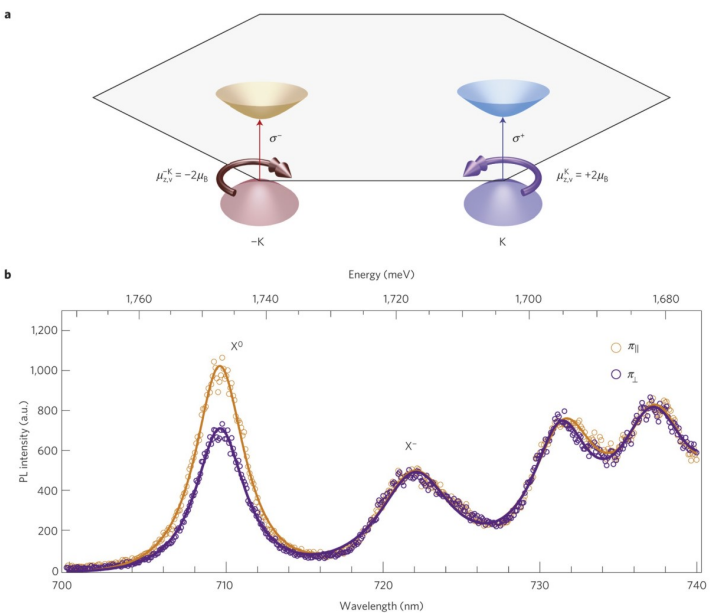


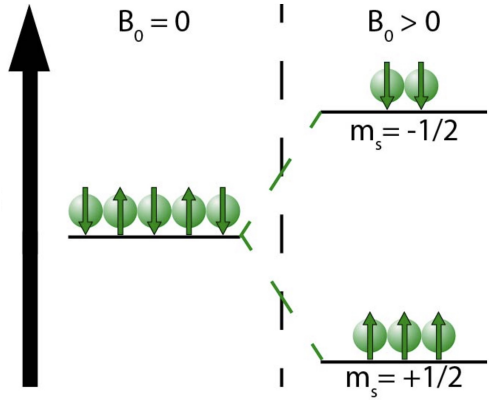
სითბური გაფართოება +
ლამბის წანაცვლება

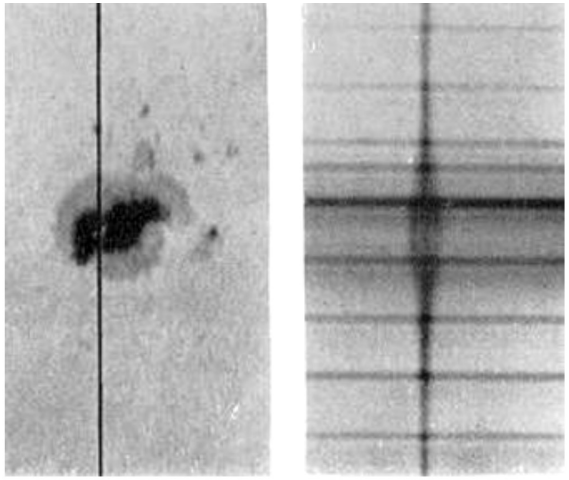


ატომები მაგნიტურ ველში: ზეემანის ეფექტი

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



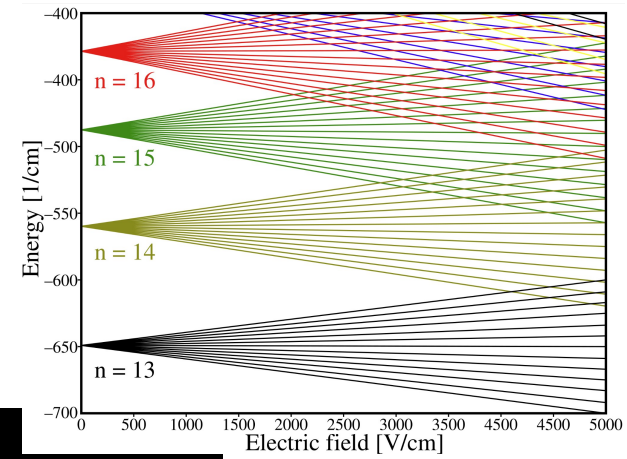


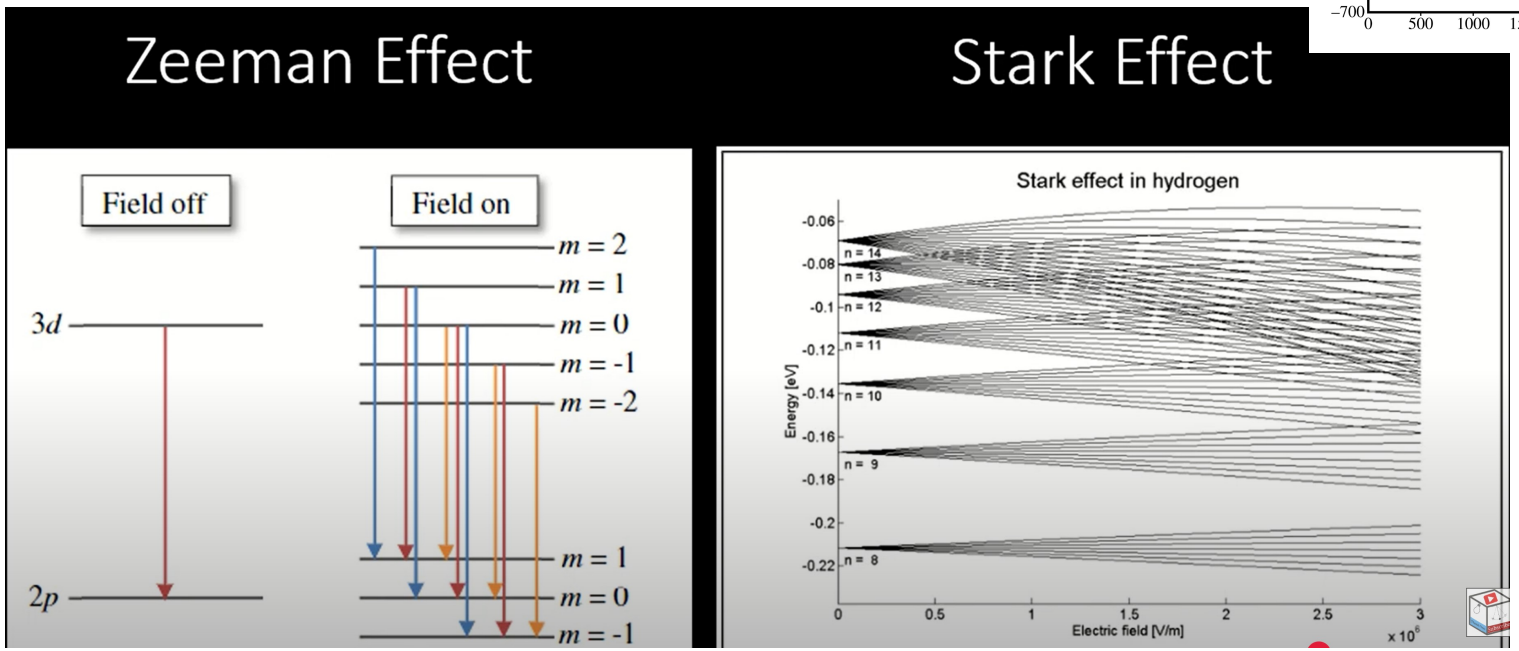


ანომალური ზეემანის ეფექტი:
ორბიტალური მაგნიტური მომენტი + ელექტრონის სპინი

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

Mechanism	Key Features	Source Type
Cyclotron	Non-relativistic spiral	Magnetospheres
Synchrotron	Relativistic, polarized	Pulsars, jets
Bremsstrahlung	e^- deceleration	Hot plasma
Cherenkov	Faster than light in medium	Reactors
Thomson	Elastic e^- scattering	Low-energy photons
Compton	Inelastic photon-e^-	High-energy X-rays
Inverse Compton	Photon gains energy	AGN, jets

Mechanism	Thermal?	Spectral Signature	Typical Source
Blackbody	Yes	Continuous	Stars, planets
Cyclotron	No	Harmonic lines	Magnetospheres
Synchrotron	No	Broad, polarized	AGN jets, pulsars
Bremsstrahlung	Yes	Smooth continuum	Hot plasmas
Cherenkov	No	Blue glow	Reactors, detectors
Compton	No	Shifted lines	X-ray sources
Zeeman	No	Line splitting	Magnetic stars
Stark	No	Line shifts/splitting	Dense plasmas