

Međuzvezdana materija

Međuzvezdana materija (MZM)

- čini oko 10% ukupne mase Galaksije
- ekstremno retka sredina
($n \sim 1$ čestica/cm³, $\rho \sim 10^{-24}$ g/cm³)
- tri stanja u MZM:
 - hladna: $T = 10-100$ K, $10 < n < 10^3$ cm⁻³
 - topla: $T \sim 10^4$ K, $0.1 < n < 10$ cm⁻³
 - vrela: $T \sim 10^6$ K, $10^{-4} < n < 10^{-2}$ cm⁻³

MEĐUZVEZDANA MATERIJ

- Gas (molekuli, atomi, joni)
- Prašina (čvrste čestice od C i Si, oko 1% mase MZM)
- Kosmički zraci (visokoenergetske čestice)
- Elektromagnetno zračenje (od radio-talasa do γ -zraka)
- Magnetno i gravitaciono polje

- Najveći doprinos izučavanju MZM su dale radio i infracrvena astronomija
- Kasnije su saznanja o MZM upotpunjena satelitskim UV i X merenjima
- Značaj izučavanja MZM (formiranje zvezda, džinovski organski molekuli, zabranjeni prelazi, maserski izvori, ...)

Gasna komponenta MZM

- Vodonik je najobilniji hemijski element i u MZM
- Nalazi se najvećim delom u atomskom (HI) i molekulskom (H₂) stanju
- U okolini vrelih zvezda je u jonizovanom stanju (HII regioni)
- Hemijski sastav MZM: 67% H, 31%He, 2% metala

1. GASNA KOMPONENTA

- HARTMANN 1904. GODINE (LINIJE CaII U SPEKTRU PVOJNIH ZV.)
- 20-ih i 30-ih GOD. OTKRIVENI NaI , CaI , KI , FeI , CH , CN U MZM
- ? VODONIK

VAN DE HULST 1944. GOD. : ZRAČENJE HI NA $\lambda 21\text{cm}$ KAO
POSLEDICA HIPERFINE STRUKTURE OSNOVNOG STANJA (NIVOJA)

$$E = 6 \cdot 10^{-6} \text{ eV} \quad \lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{hc}{h\nu} = 21.1 \text{ cm}$$

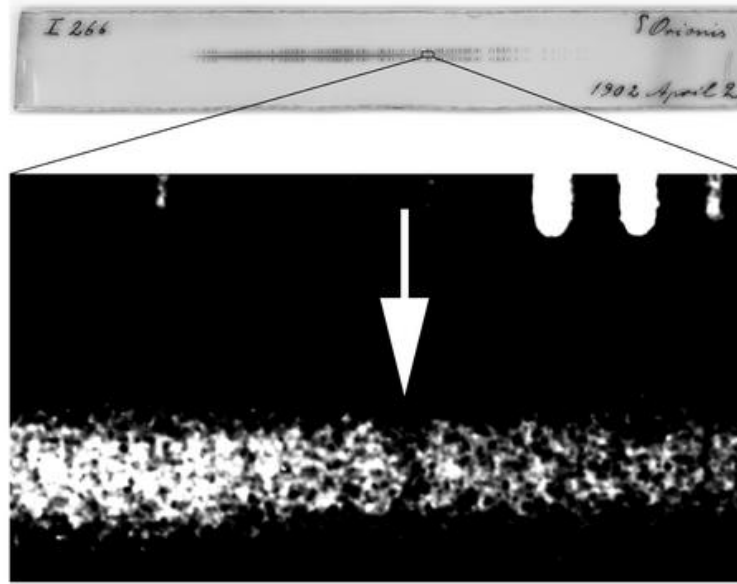
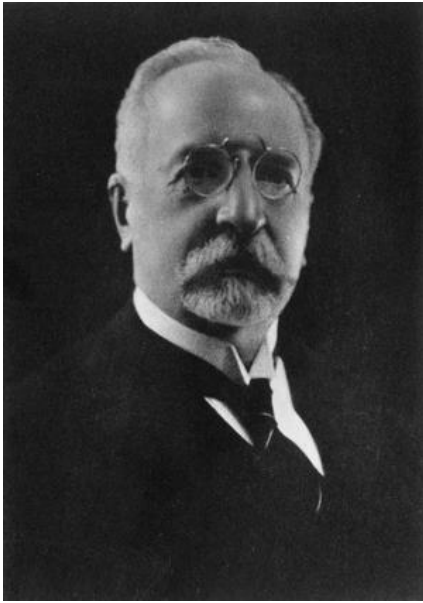


1951. GODINE I PUT DETEKTOVANO ZRAČENJE NA 21cm HI
(NA HARVARDU) U MEĐUZVEZDANOJ MATERIJI

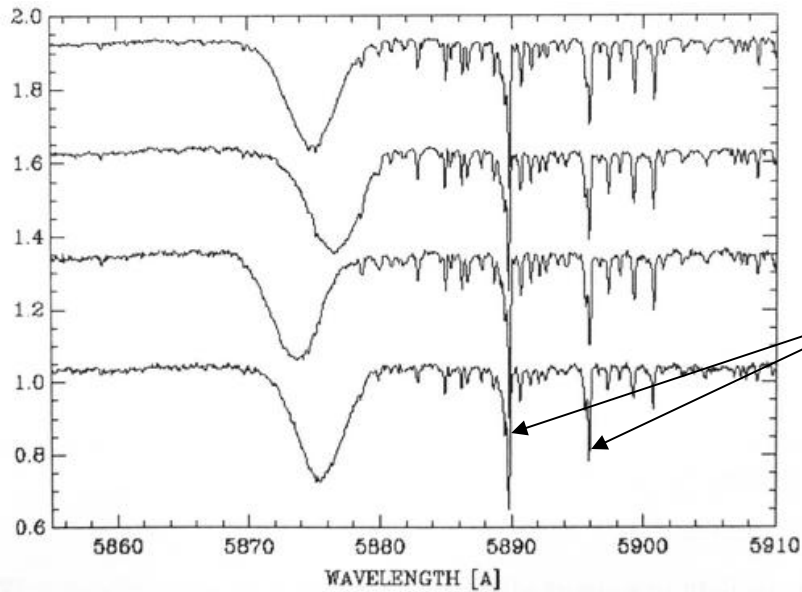
Zračenje na 21cm posledica je hiperfine struktura osnovnog nivoa atoma vodonika – postojanja dva podnivoa malo različitih energija

- KRAJEM 70-ih OTKRIVENE SU VELIKE KOLIČINE H₂ POSREDNO, DETEKCIJOM CO NA $\lambda = 2.6 \text{ mm}$ I KORIŠĆENJEM POZNATOG ODNOSA $n(\text{H}_2)/n(\text{CO}) \approx 10^4$.
- DETEKTOVAN JE VELIKI BROJ MOLEKULA (VIŠE OD 120), OD JEDNOSTAVNIJIH (OH, H₂O, SiO, NH₃, H₂CO, ...) DO VEOMA SLOŽENIH KOJI SE SASTOJE I OD 13 ATOMA (HC₁₁N)
- 3/4 SVIH MOLEKULA SU ORGANSKI (SADRŽE UGLJENIK)

Johannes Hartmann (1904)



Medjuzvezdane linije
kalcijuma u spektru
dvojne zvezde δ
Orionis (1902)



Medjuzvezdane linije
natrijuma u spektru
zvezde δ Orionis
(2000)

ŠTRUKTURA I RASPORED U GALAKSIJI

- KONCENTRACIJA MZM RASTE KA GALAKTIČKOJ RAVNI

(1) GAS NISKE TEMPERATURE ($\sim 10-100$ K) SE JAVLJA NAJČEŠĆE U OBLIKU ATOMSKIH I MOLEKULSKIH OBLAKA

- SUPEROBLACI $M \sim 3 \cdot 10^7 M_{\odot}$, $D \sim 5$ kpc

- GMO H_2 $M \sim 3 \cdot 10^5 M_{\odot}$, $D \lesssim 100$ pc

$T \sim 20$ K, $\bar{n} \sim 10^8 \text{ cm}^{-3}$

Najbrojniji su (5-6000) i sadrže pola mase gasne komponente Galaksije.

- OBLACI ATOMSKOG VODONIKA $M \sim 100 M_{\odot}$, $D \sim 10$ pc

$T \sim 80$ K

- TAMNI OBLACI - BOK-OVE GLOBULE

$D \sim 0.3$ pc

$T \sim 10$ K

$\bar{n} \sim 10^4 - 10^5 \text{ cm}^{-3}$

Molekulski oblaci \rightarrow koljenke zvezda!

(2) MAGLINE: $T \sim 10-10^4 \text{ K}$, $\bar{n} \sim 10^2-10^3 \text{ cm}^{-3}$

(3) KORONALNI GAS: $T \sim 3 \cdot 10^5 - 10^6 \text{ K}$

- u disku: $\bar{n} \sim 10^{-3} - 10^{-2} \text{ cm}^{-3}$

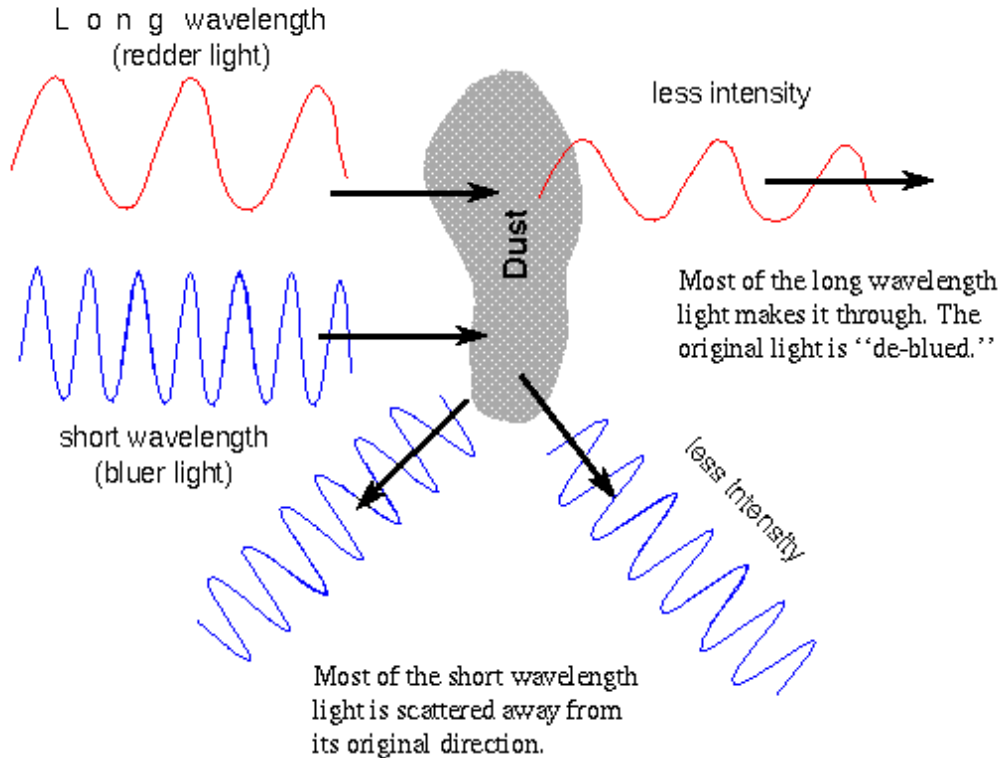
- u halou: $\bar{n} \sim 10^{-4} \text{ cm}^{-3}$

- ispunjava znatan deo zapremine Galaksije

- otkriven je sa prvim sistematskim registrovanjem
X zračenja u Galaksiji

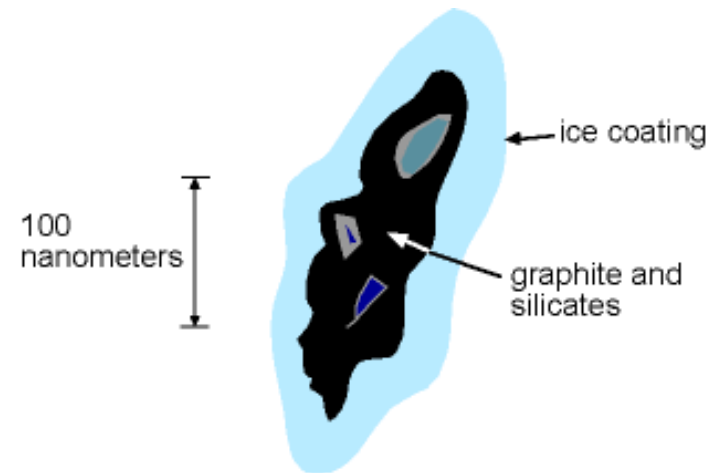
Prašina (čestična komponenta)

Reddening and Extinction



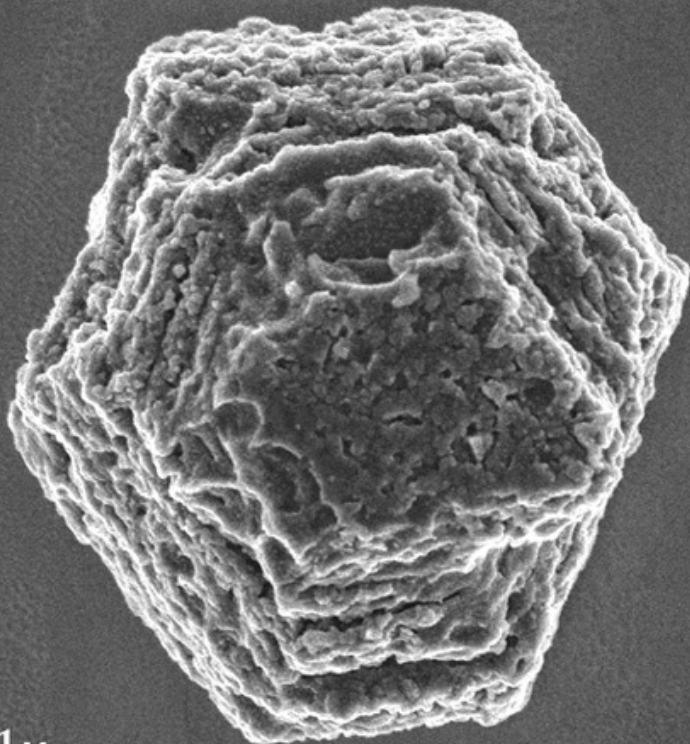
O njenom prisustvu, količini i rasporedu saznajemo iz uticaja koji ima na svetlost zvezda

Čini 1% mase MZM

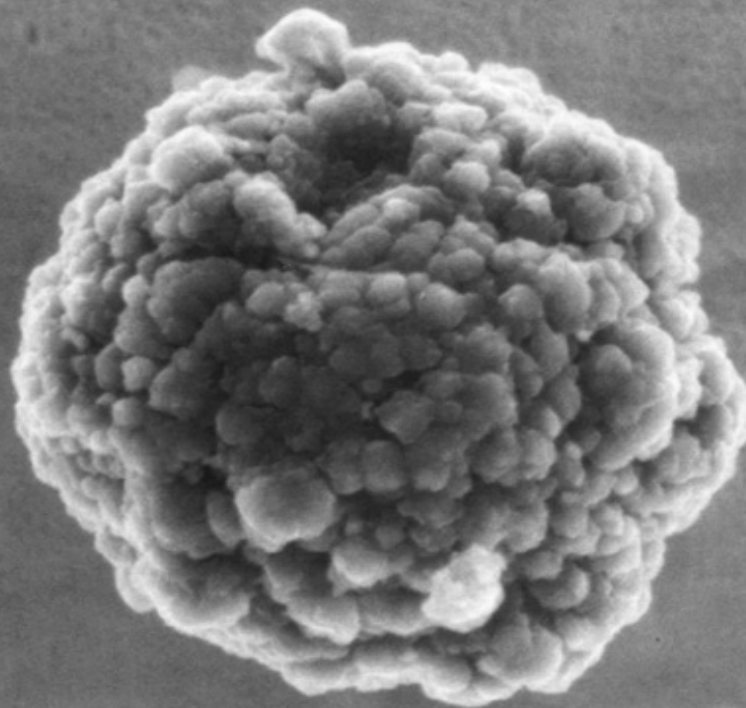


A typical dust grain (note the tiny scale!).

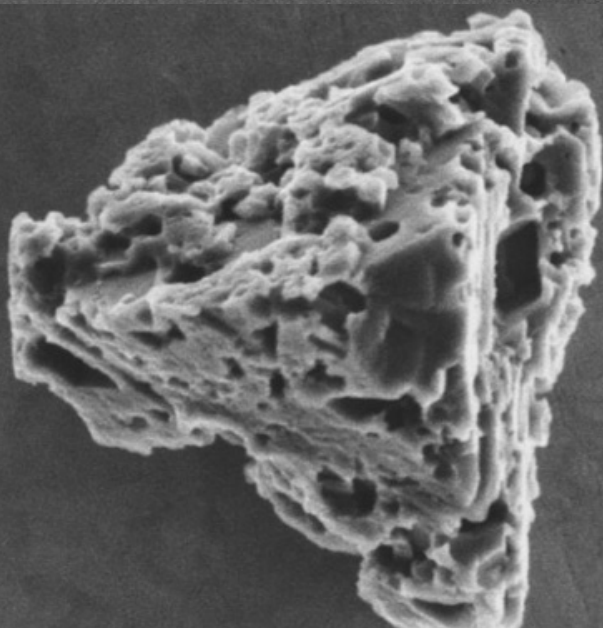
c)



1 μ



5KV X14,000 1 μ m WD 8



Prašina

MEDUZVEZDANA EKSTINKCIJA I POČRVENJENJE SVETLOSTI ZVEZDA

$$F = F_0 e^{-\tau_\lambda}$$

$$\tau_\lambda = \int_0^r \kappa_\lambda(r) \rho(r) dr$$

- Meduzvezdana ekstinkcija na celoj dužini puta od zvezde do posmatrača:

$$\boxed{a(r) = m - m_0} = 2.5 \log \frac{E_0}{E} = 2.5 \log \frac{F_0}{F} = 2.5 \log e \cdot \tau_\lambda = \underline{1.086 \tau_\lambda}$$

$$\underline{a(r) = \int_0^r A(r) dr}$$

$A(r)$ = koeficijent ekstinkcije =

ekstinkcija po jedinici dužine puta

$$\underline{a(r) = \int_0^r A(r) dr}$$

$A(r)$ = koeficijent ekstinkcije =
ekstinkcija po jedinici dužine puta

za homogenu međuzvezdanu sredinu:

$$\boxed{a(r) = A \cdot r}$$

kako je: $a(r) = 1.086 \tau_{\lambda} = 1.086 \bar{\kappa}_{\lambda} \bar{\rho} \cdot r$

↓

$$\underline{A = 1.086 \bar{\kappa}_{\lambda} \bar{\rho} = f(\lambda, d, \rho)}$$

$$\boxed{A \propto \frac{1}{\lambda}}$$

selektivnost međuzv. ekstinkcije
na talase raznih λ

- Višak boje - COLOR EXCESS (CE) - mera međuzvezdanog porcrvenjenja

$$\underline{CE} = \underbrace{(m_B - m_V)}_{\text{posmatrani CI}} - \underbrace{(M_B - M_V)}_{\text{stvarni CI}} = (m_B - m_V) - (m_B - m_V)_0 = \underline{CI - CI_0}$$

$$\boxed{M = m + 5 - 5 \log r - A \cdot r}$$

$$m_B - m_V = (M_B - M_V) + (A_B - A_V) \cdot r$$

$$\frac{A \cdot r}{CE} = \text{const} \quad ; \quad \text{za UBV-sistem: } \frac{A \cdot r}{CE} \approx 3$$

$$\underline{M = m + 5 - 5 \log r - A \cdot r}$$

Ako zanemarimo ekstinkciju:

$$\underline{M = m + 5 - 5 \log r'}$$

većići prividni sjaj m i zaajuci stvarni sjaj M dobijamo rastojanje r' koje je veće od stvarnog r

$$M = m + 5 - 5 \log r' = m + 5 - 5 \log r - A \cdot r$$

⇓

$$\underline{r' = r \cdot 10^{0.2 A \cdot r}}$$

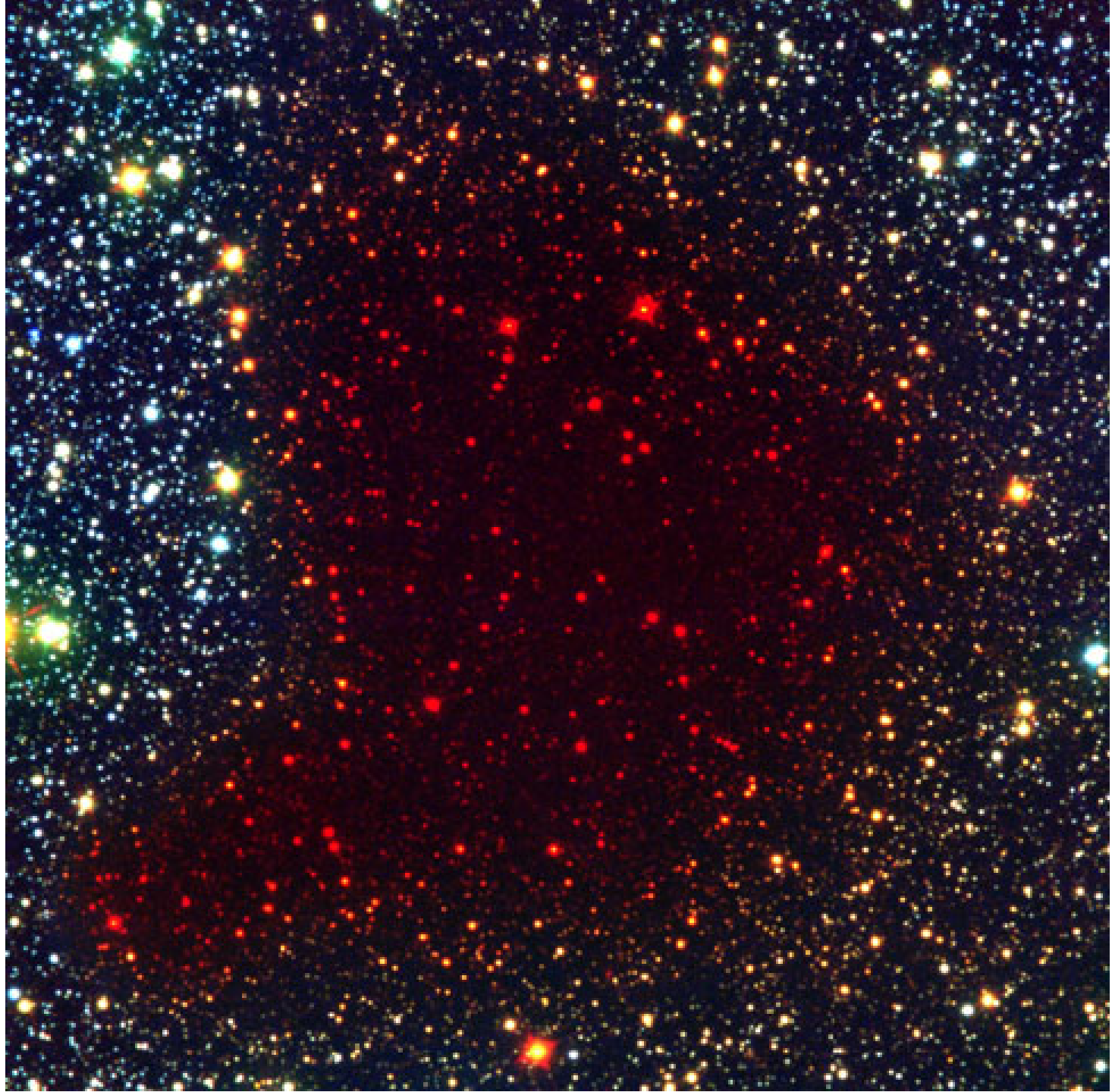
Primer:

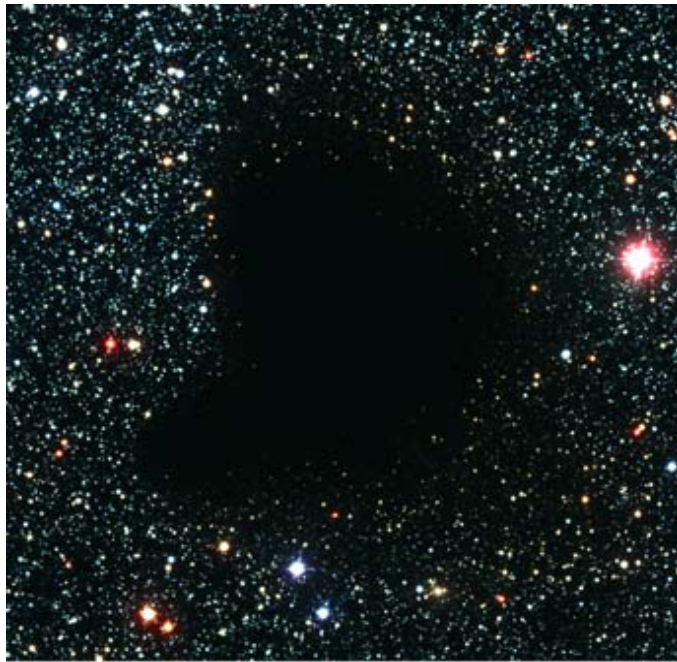
r [pc]	$A \cdot r$	r' [pc]	(za $A = 1^m/\text{kpc}$)
10	0.01	10	
100	0.1	105	
500	0.5	630	
1000	1.0	1580	

SASTAV I GRADA ČESTICA PRAŠINE

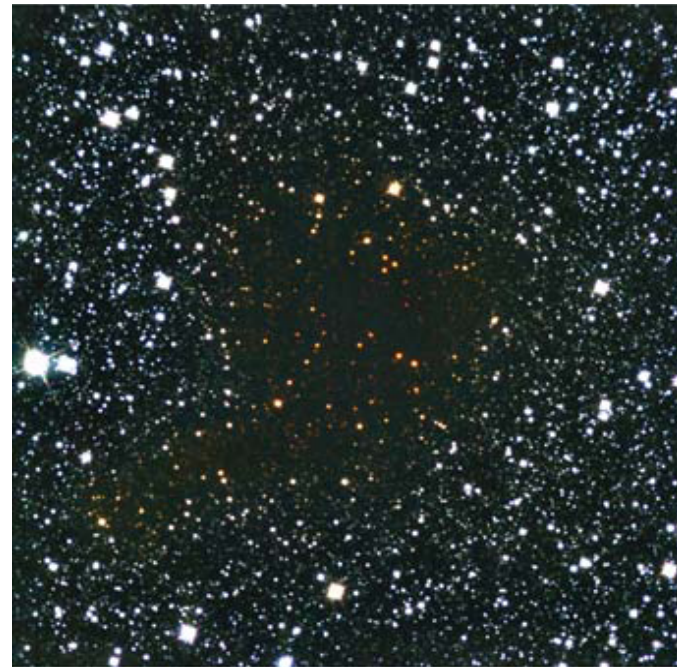
- DIMENZIJE ČESTICA $d \approx 10^{-5} - 10^{-4} \text{ cm}$
- HEMIJSKI SASTAV: C, Si, oksidi Fe i drugih teških elemenata
- NASTAJU U OBJEKTIMA KOD KOJIH DOLAZI DO ISTICANJA MATERIJE UZ BRZO HLAĐENJE (NOVE, SUPERNOVE, ZVEZDE SA JAKIM ZVEZDANIM VETROM). PROIZVODE SE PRVO ZAMETCI BUDUĆIH ČESTICA - KRISTALI $d \approx 10^{-6} \text{ cm}$ NA KOJE SE U MEĐUZV. PROSTORU LEPE ATOMI I MOLEKULI OBRAZUJUĆI OMOTAČ OD "PRJAVOG LEDA" (SMRZNUTI MOLEK. VODE SA PRIMESAMA).
- RAZARAJU SE: SUBLIMACIJOM (ISPARAVANJE OMOTAČA NA $\uparrow T$), I EROZIJAMA PRI ŠUDARIMA.



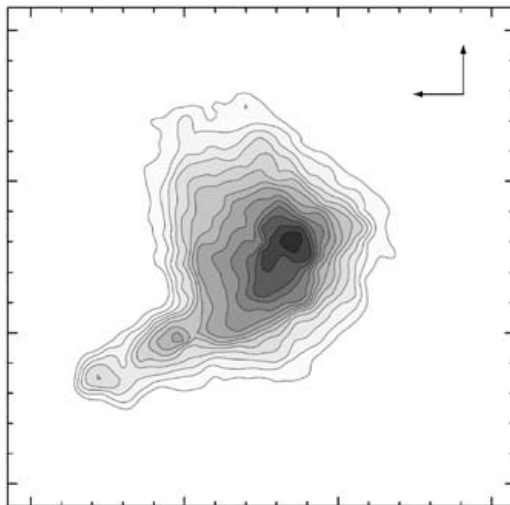




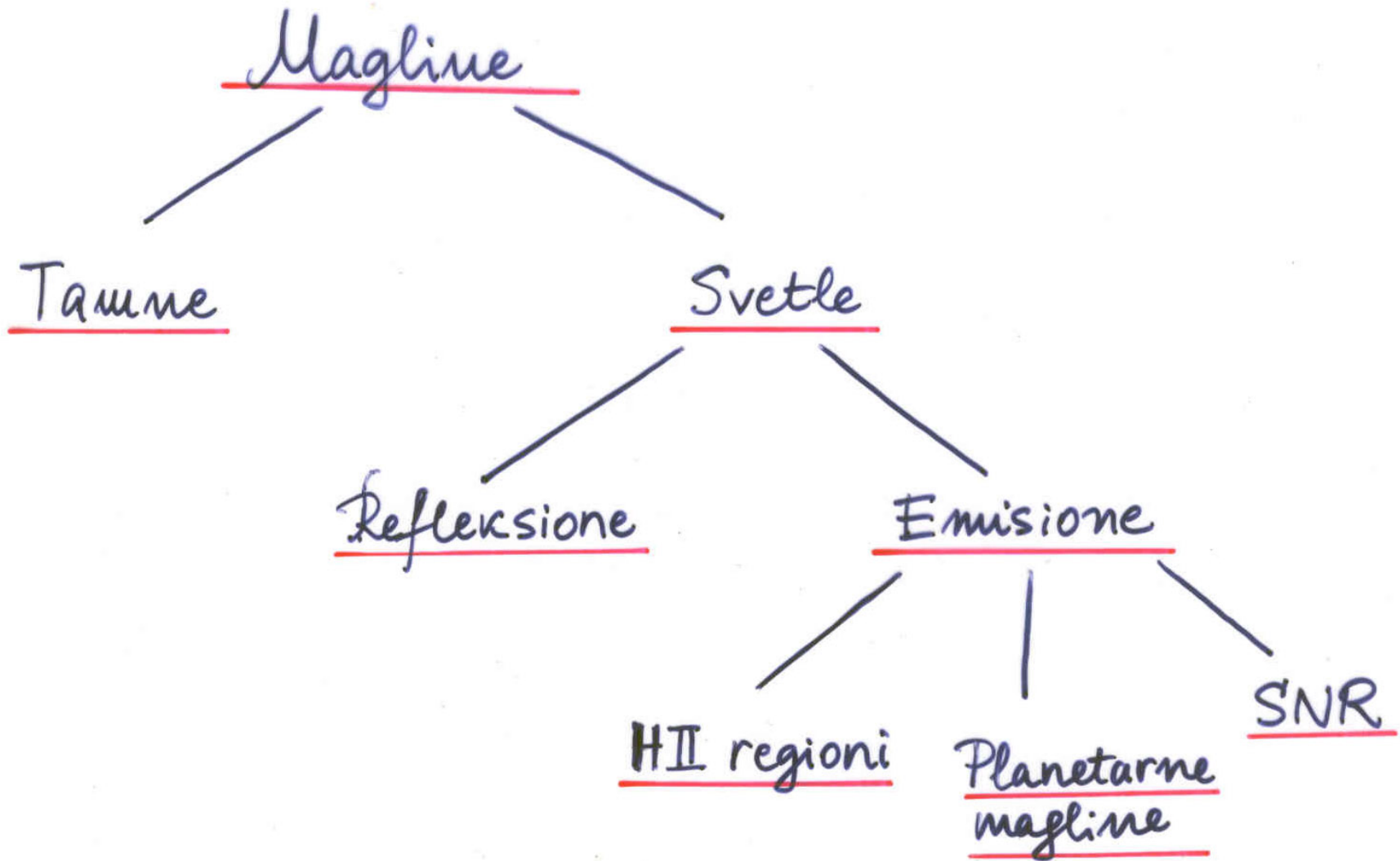
Tamni oblak B68 (Bokova globula), potpuno neprozračan za vidljivo zračenje zvezda



Isti oblak snimljen u infra-crvenom (manja ekstinkcija u IC nego u vidljivom)



Mapa ekstinkcije - od 4 (na periferiji) do 35 magnituda (u centru)



Tamne magline

- Zgušnjnja MZM u kojima nema zvezda
- Premer: maglina Konjska glava u Orionu

Maglina Konjska glava u Orionu



Refleksione magline

- Okružuju zvezde spektralnih klasa od B2 do M
- Svetle kao posledica rasejanja svetlosti zvezda na česticama prašine
- Spektri ovih maglina i zvezda koje okružuju su slični (apsorpcioni)
- Primer: refleksione magline oko sjajnih zvezda u Plejadama (Vlašićima)

Refleksione magline u Vlašićima





Emisione magline

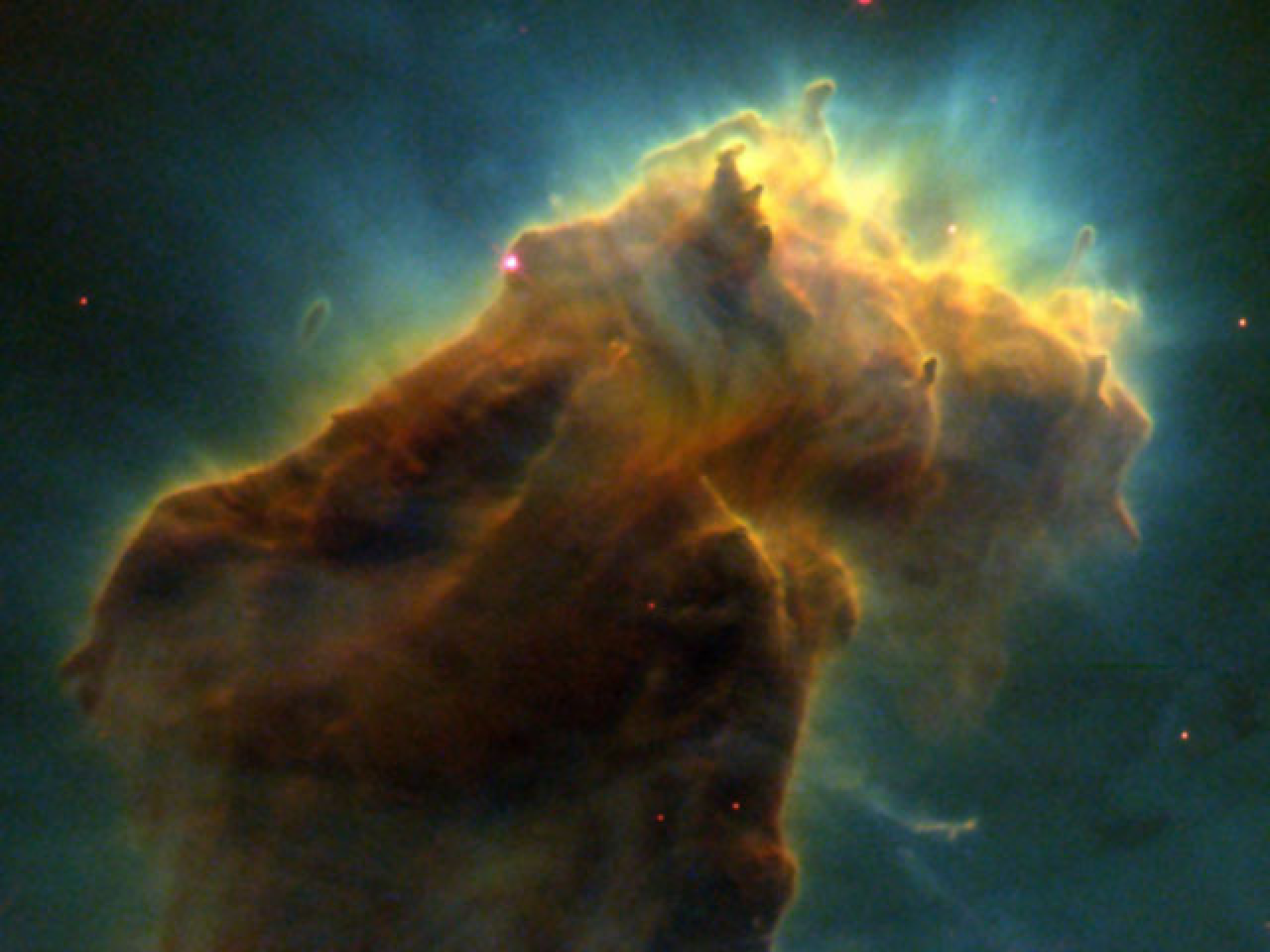
- Magline koje svetle sopstvenom svetlošću (fluorescencija)
- **Spektri ovih maglina su emisioni**
- Prema poreklu dele se na:
 - HII regione,
 - planetarne magline i
 - ostatke supernovih (SNR)

HII regioni

- Najsjajniji oblici MZM ($T=10^4\text{K}$, $n=10^2\text{ cm}^{-3}$)
- Okružuju mlade, vrelе zvezde O i B1, čije UV zračenje jonizuje vodonik (fotoni talasne dužine manje od 91.2nm)
- Pri rekombinaciji naseljavaju se visoki ekscitacioni nivoi sa kojih se vrše kaskadno prelazi naniže uz emisiju zračenja
- Karakteristične su linije vodonika (Balmerove serije) i zabranjene linije OIII i NeIII (“nebulijum”)
- Objekti populacije I (primer: maglina M42 u Orionu)
- Oblasti u kojima se rađaju zvezde









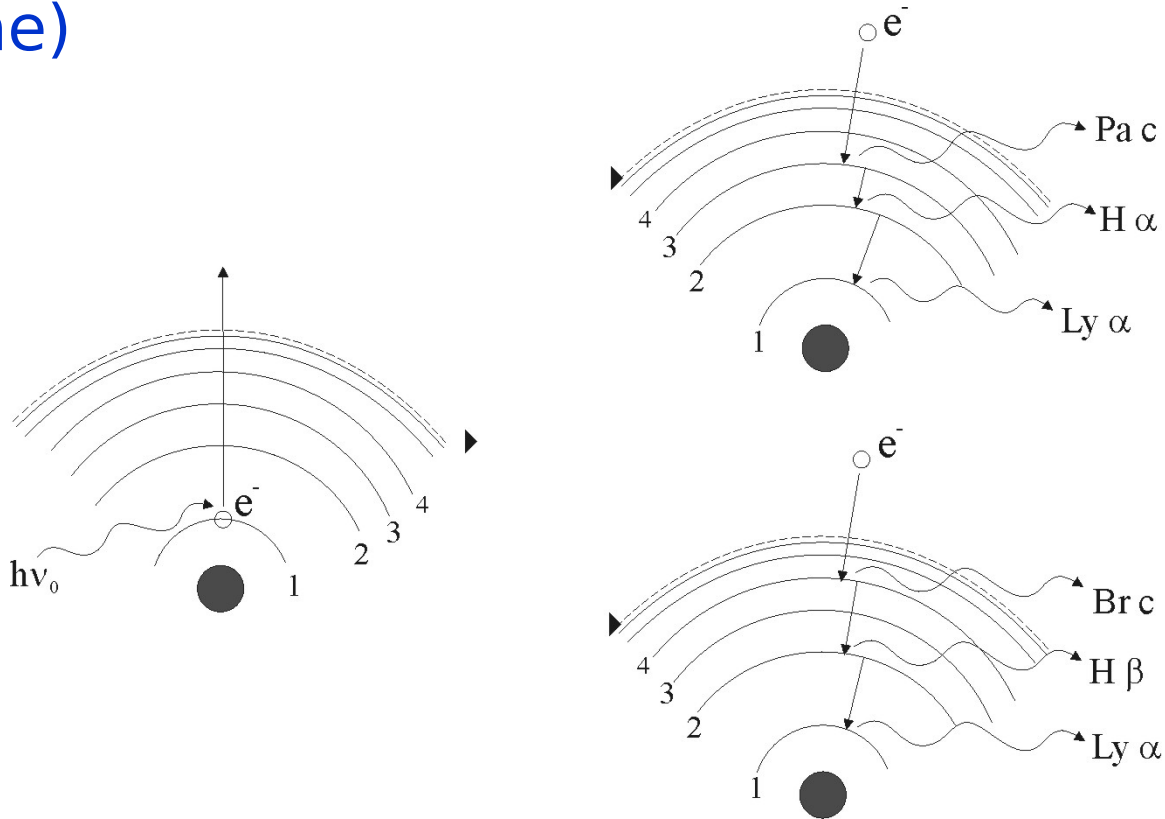


Emissione magline: **HII regioni**

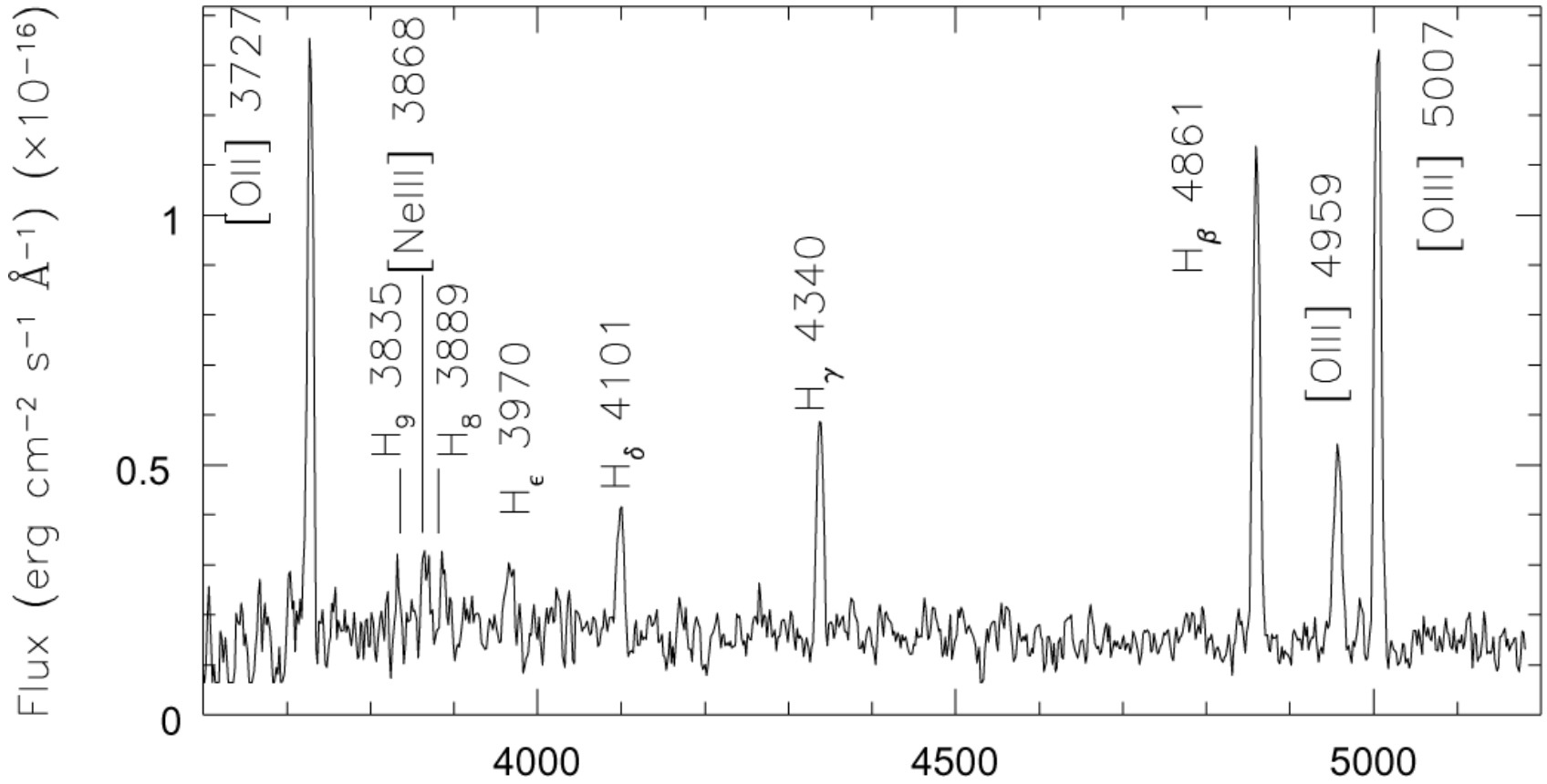


Proces fluorescencije

Jonizacija pod dejstvom UV fotona vrelih O i B1 zvezda praćena rekombinacijom i kaskadnim prelazima na niže nivoe uz emisiju fotona na raznim talasnim dužinama (emisioni spektar magline)



Spektar HII regiona



Spektri emisionih maglina

Linijski emisioni spektri

- **Jake emisione linije** posmatrane u spektrima maglina nisu odgovarale nijednom poznatom elementu na Zemlji. Novi element je nazvan **nebulijum**. Bowen 1927. godine otkriva da te linije u stvari odgovaraju tzv. zabranjenim prelazima **OIII**.
- U ekstremno razređenoj sredini kakva je međuzvezdana materija mogući su **prelazi sa metastabilnih ekscitovanih stanja** (stanja sa izuzetno dugim vremenom života) koji se u Zemaljskim laboratorijama ne mogu ostvariti (**zabranjeni prelazi**).

HII region



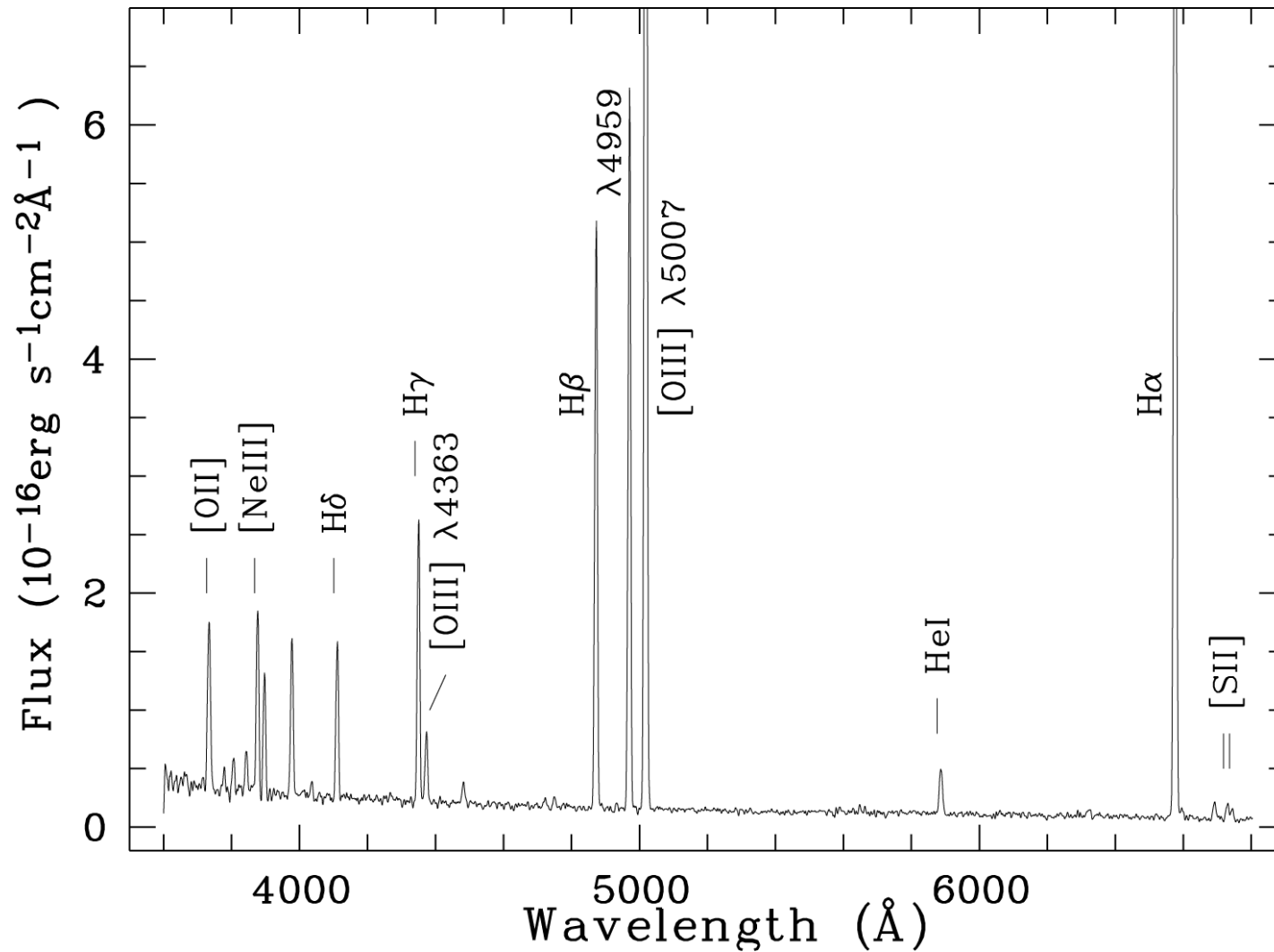
Planetarna maglina



Zabranjeni prelazi (linije)

- Malo verovatni spontani prelazi sa metastabilnih nivoa
- Metastabilni nivoi (stanja) u atomu su oni u kojima je srednje vreme života atoma znatno duže (reda 10^2 s) nego u drugim ekscitovanim stanjima (reda 10^{-8} s)

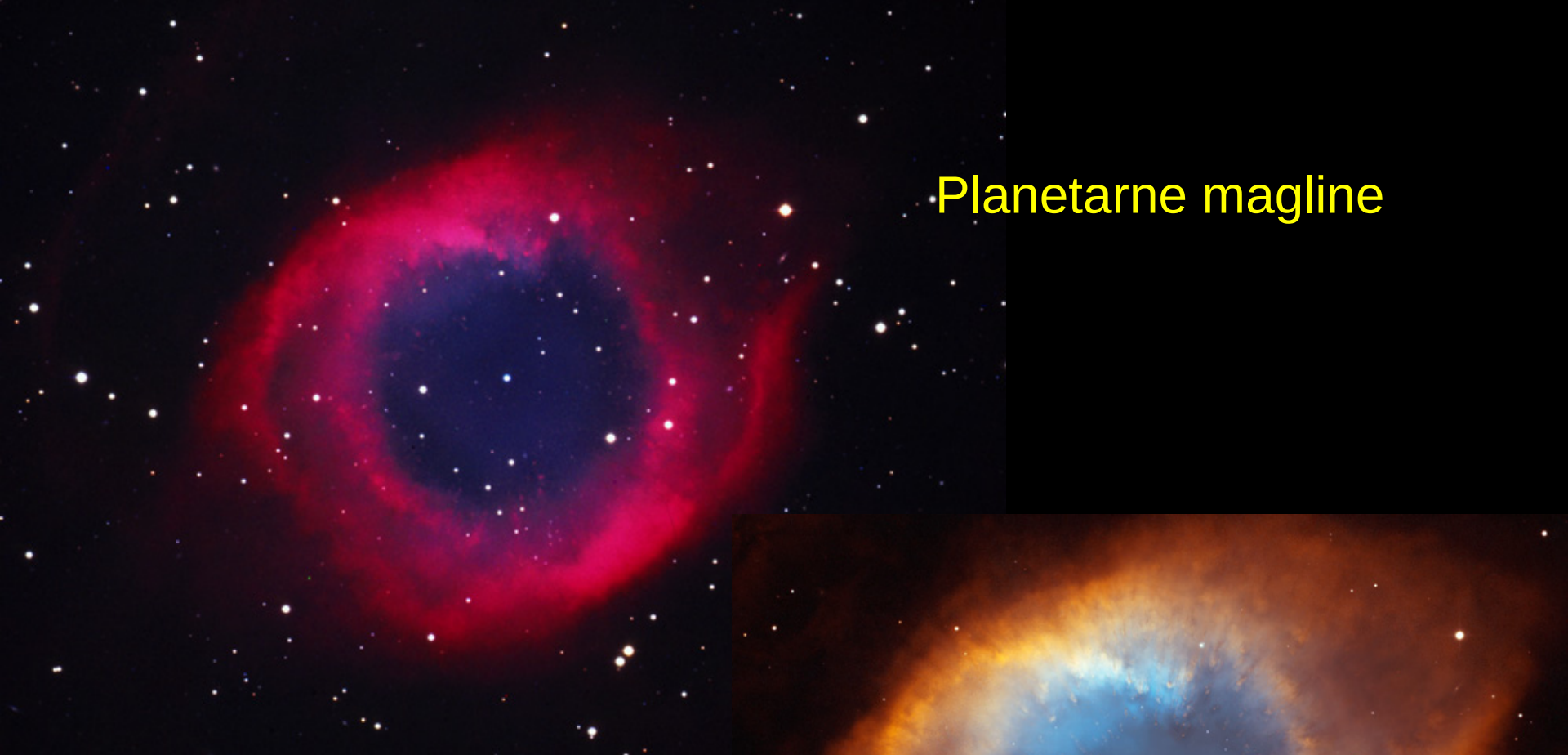
Zabranjene linije u maglinama



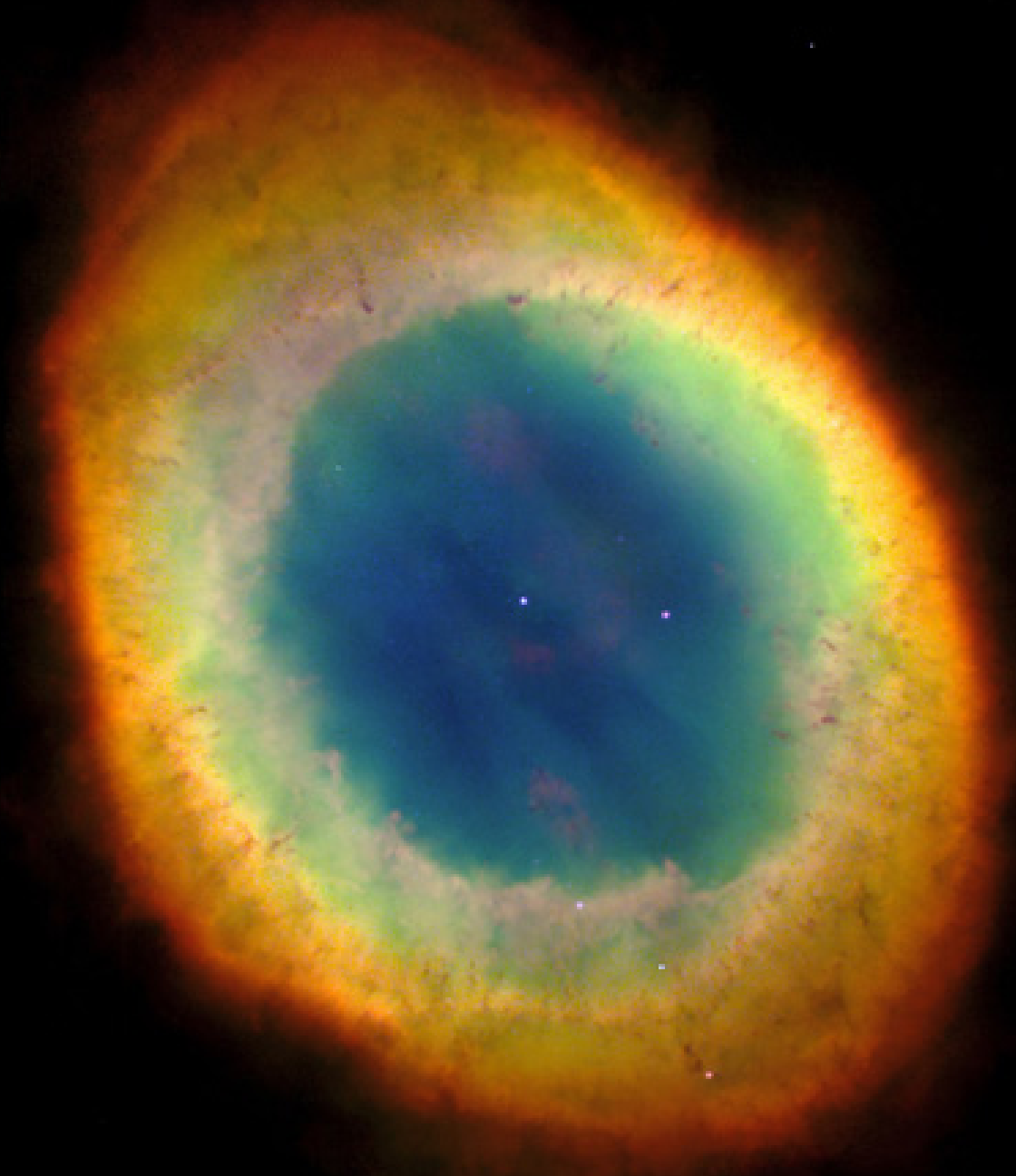
Planetarne magline

- Daleki objekti, ogromnih dimenzija, slabog sjaja, objekti između pop. I i II, žive kratko (oko 10000 godina)
- Zvezde u centru magline su najtoplije zvezde ($T=10^5\text{K}$) – vreli beli patuljci čije UV zračenje jonizuje maglinu - odbačeni omotač umiruće zvezde ($v=10\text{-}30\text{km/s}$)
- Mehanizam svetljenja – fluorescencija kao kod HII regiona
- $T=10^4\text{K}$, $n=10^2\text{ cm}^{-3}$
- Spektar sličan spektru HII regiona (Balmerove linije vodonika i zabranjene linije)
- Primer: prstenasta maglina u Liri, u Vodoliji

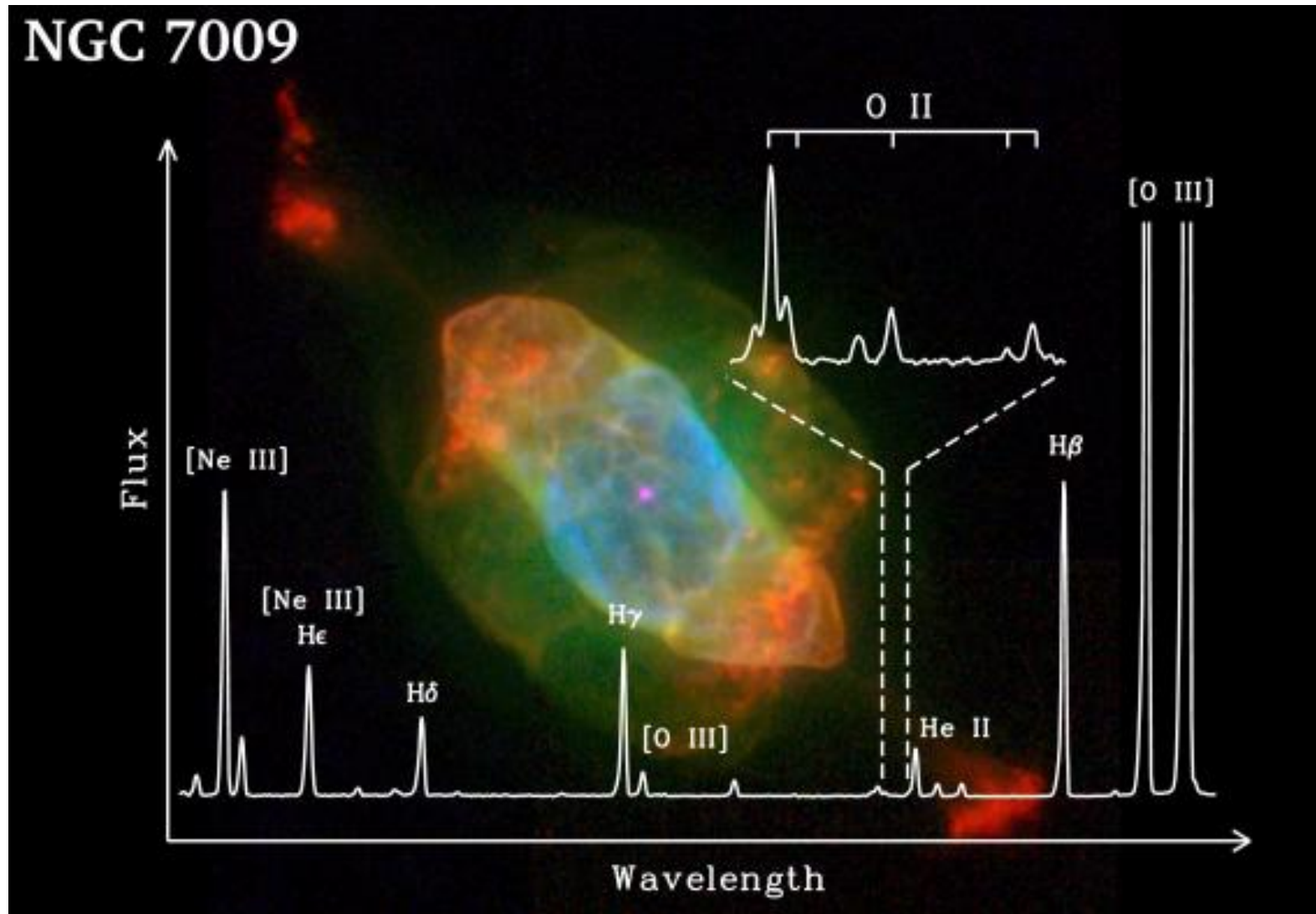
Planetarne magline



Helix maglina
u Vodoliji



Tipični spektar planetarne magline



Ostaci supernovih (SNR)

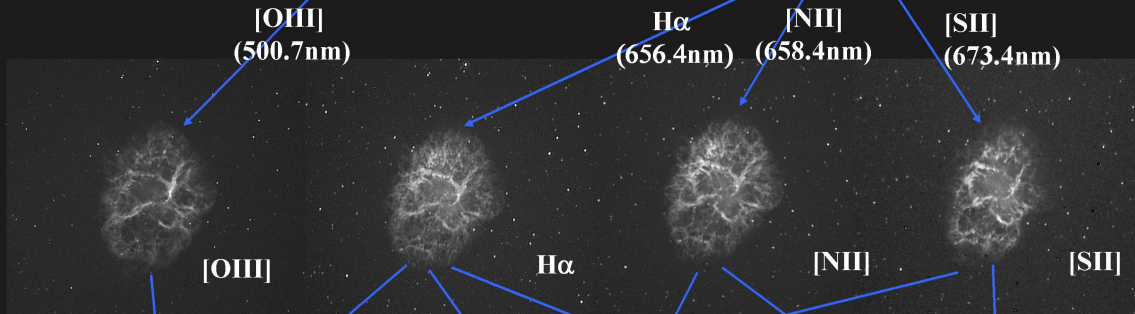
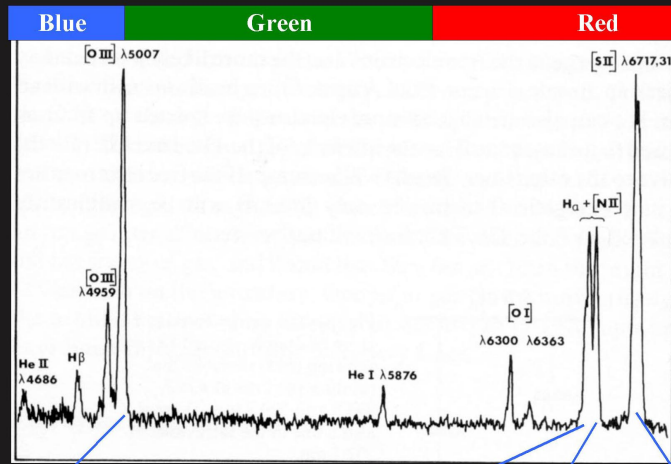
- Omotači bivših zvezda ili ostaci zvezda koje su se pri eksploziji SN potpuno raspale
- $v=1000\text{km/s}$
- Zračenje je netermalno (postojanje jakog magnetnog polja)
- 90% su shell tipa - u vidu ljuski ili vlakana (Veo maglina)
- 10% su popunjene (pleione) i imaju centralni pulsar (Krab maglina)

Krab maglina – ostatak
supernove



Veo maglina -ostatak
supernove (SNR –
supernova remnant)





RGB =
[SII], Hα, [OIII]

RGB =
Hα, [NII], [NII]

RGB =
[SII], [NII], Hα

Spektar
Krab
magline

Kosmički zraci

- Visokoenergetske čestice: protoni, jezgra helijuma i elektroni
- Energije kosmičkih zraka su od 10^6 do 10^{20} eV
- Nastaju pri eksplozivnim procesima na zvezdama