

Emisione gasne magline

- (1) Fotojonizovane magline (HII regioni i planetarne magline)
- (2) Sudarno jonizovane magline (ostaci supernovih)

Fotojonizovani gasni oblaci

- HII regioni
- Planetarne magline
- AGN-ovi

Centralni izvor zračenja u fotojonizovanim gasnim oblacima su:

- (a) O ili B zvezde (u HII regionima)
- (b) vreli beli patuljci (u planetarnim maglinama)
- (c) AGN-ovi (kod kvazara, Sajfertovih i radio galaksija)

- Visoki stepen jonizacije u maglinama rezultat je visoke temperature centralnog izvora i energije fotona koje on emituje ($\lambda < 91,2\text{nm}$, tj. $E > 13,598\text{eV}$ za jonizaciju H, $\lambda < 50,4\text{nm}$, tj. $E > 24,587\text{eV}$ za jonizaciju He), a ne temperature magline koja je definisana kinetičkom energijom slobodnih elektrona!
- Fotojonizovani gasni oblaci se pre svega medjusobno razlikuju po temperaturi centralnog izvora i njegovoj spektralnoj raspodeli, a time i stanjima jonizacije raznih elemenata. B zvezde ($T \sim 30000\text{K}$) stvaraju HII regione, O zvezde ($T \sim 40000\text{K}$) i HeII regione, dok vreli beli patuljak ($T \sim 100000\text{K}$) formira i HeIII regione ($\lambda < 22,8\text{nm}$, tj. $E > 54,418\text{eV}$). AGN-ovi imaju ravan kontinuum pa se u okolnom gasu javlja širok dijapazon jonizacija.

Fizički procesi

- Fotoni koje emituje centralni izvor jonizuju gas i zagrevaju ga – predaju mu energiju u vidu kinetičke energije oslobodjenih elektrona:

$$h\nu = E_{jon} + \frac{1}{2}mv^2$$

- Termalni elektroni sudarno ekscituju gas. Emisijom fotona u procesima rekombinacije, free-free prelazima, emisijama u linijama maglina se hladi. Termalna ravnoteža se uspostavlja na T od 5000 do 25000K (temperatura maglina).
- Jonizacija UV fotonima centralnog izvora - uglavnom iz osnovnog stanja atoma/jona. Rekombinacija jona (HII, HeII, HeIII) vrši se najčešće zahvatima elektrona na više ekscitovane nivoe, sa kojih sledi kaskadna radijativna deekscitacija do osnovnog nivoa (rekombinacione linije H i He).
- Stepen jonizacije određen je ravnotežom između broja fotojonizacija i rekombinacija. Za dva susedna stanja jonizacije j i $j+1$ važi

$$n_j \int_{\nu_0}^{\infty} \frac{4\pi J_{\nu}}{h\nu} a_{\nu} d\nu = \alpha_{rec} n_{j+1} n_e$$

a stepen jonizacije je dat sa:
$$z_j = \frac{n_{j+1}}{n_{uk}} = \frac{n_{j+1}/n_j}{1 + n_{j+1}/n_j}$$

- Sudarima elektrona i jona ekscituju se niži energetske nivoe jona (nekoliko eV). Skoro svaka ovakva ekscitacija dovodi do emisije fotona (iako su to zabranjeni prelazi jer je zbog malih gustina sudarna deekscitacija još manje verovatna).

Spektar Orionove magline (HII region)

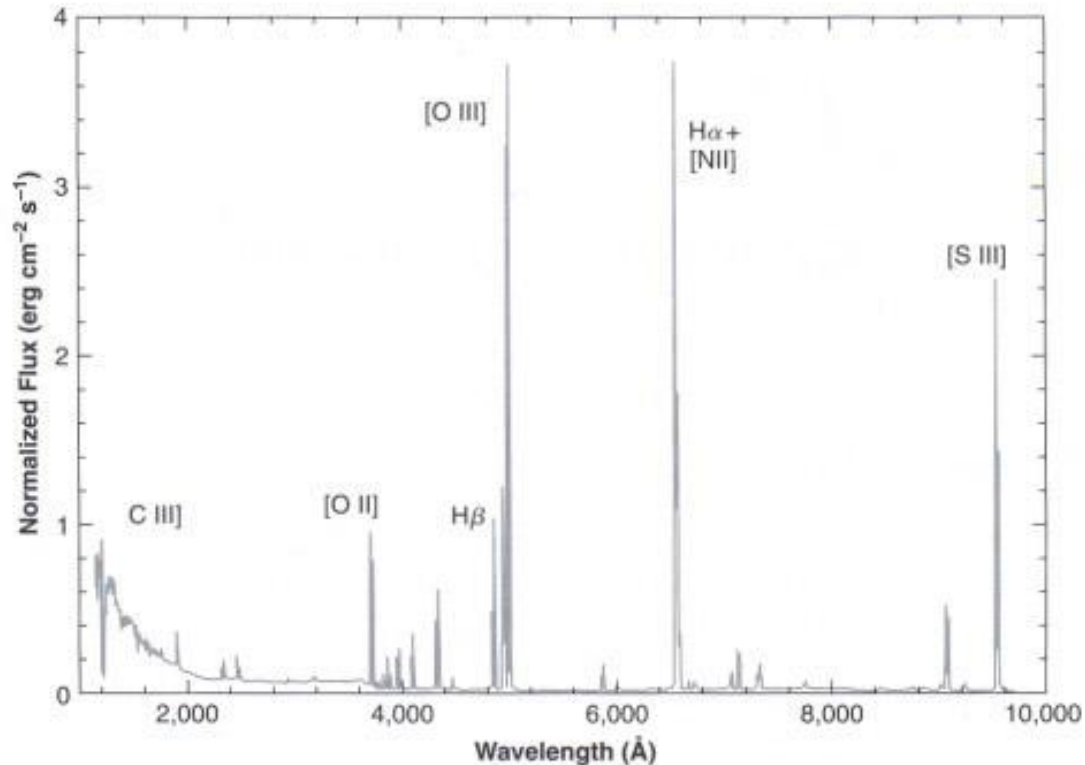


Figure 1.1

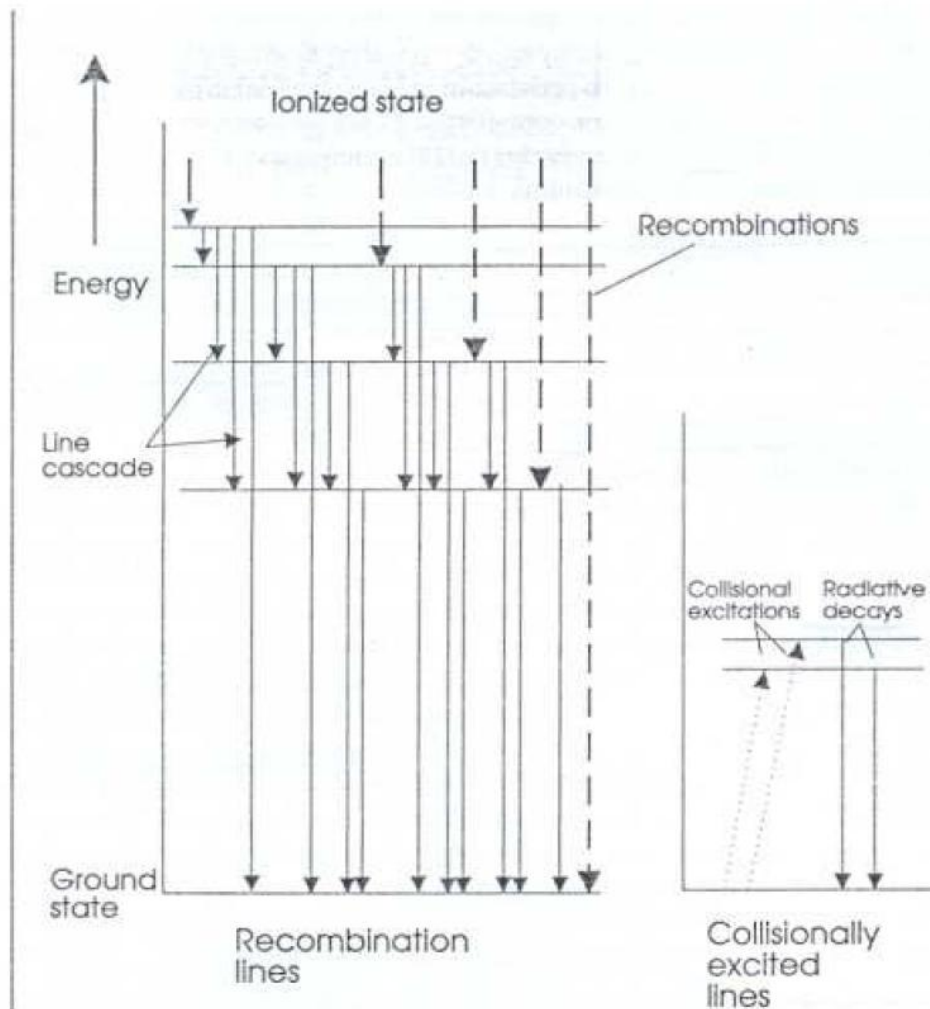
The ultraviolet, optical, and near infrared spectrum of inner regions of the Orion Nebula. A few of the strongest lines are identified in the plot; their wavelengths and those of all the other emission lines, from C III] $\lambda 1909$ to [S III] $\lambda\lambda 9069, 9531$ (except the H I and He I lines) may be found in Chapter 3. The flux scale is normalized to the flux in $H\beta = 1$. (Original data provided by Reginald Dufour and Jack Baldwin.)

Kontinuum

- Gasne magline imaju slab kontinualni spektar – linije se javljaju u emisiji
- Kontinuum potiče od **slobodno-vezanih** (f-b), **slobodno-slobodnih** (f-f) prelaza i procesa **emisije dva fotona**
- Pašenov i Balmerov kontinuum – f-b prelazi
- Lajman kontinuum nastaje rekombinacijama u osnovno stanje, optički je neprozračan
- f-f emisija raste sa talasnom dužinom i dominira u IC i radio oblasti.
- Proces emisije dva fotona je prelaz iz $n=2, l=0$ nivoa vodonika u $n=1, l=0$ osnovno stanje. Ovaj prelaz, zabranjen za jedan foton (narušen uslov održanja ugaonog momenta), javlja se kroz emisiju dva fotona sa verovatnoćom $8,23 \text{ s}^{-1}$.
- Magline imaju i refleksioni kontinuum, koji potiče od **zvezdane svetlosti rasejane na česticama prašine**.
- Jači kontinualni spektar je u IC (**emisija prašine** zagrejane do 100K zračenjem centralne zvezde) i radio-području (**f-f emisija termalnih elektrona ubrzanih sudarima sa protonima**)

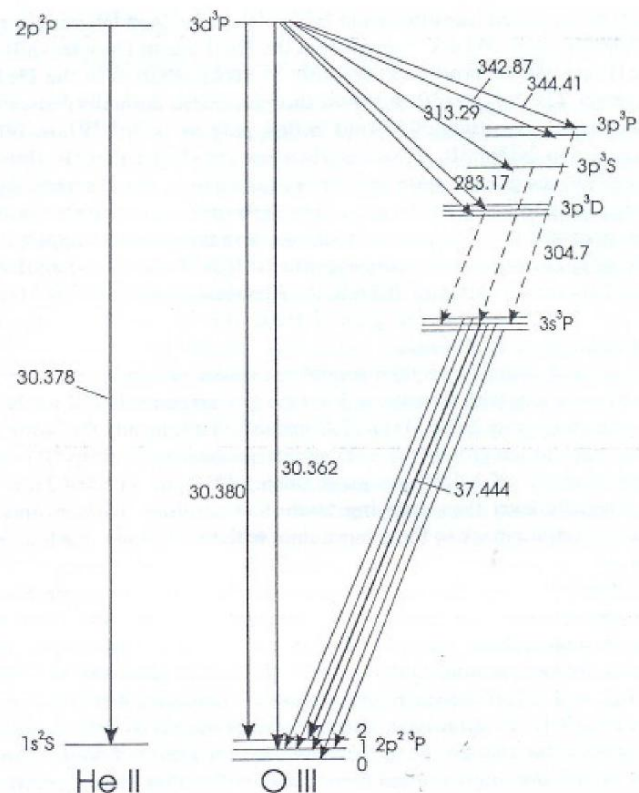
Formiranje emisijih linija u maglinama

- **Rekombinacione linije** nastaju kada se zahvatom elektrona jon rekombinuje na neki od viših ekscitovanih nivoa i potom kaskadno deekscituje do osnovnog nivoa. **Prelazi su dozvoljeni**. Rekombinacije su malobrojne zbog niske gustine, pa su ove linije jake samo kod najzastupljenijih elemenata ($H\alpha$ 656,3nm, $H\beta$ 486,1 nm, $H\gamma$ 434,0 nm, HeI 587,6 nm, $HeII$ 468,6 nm)
- **Linije nastale sudarnom ekscitacijom** elektrona iz osnovnog stanja u prvo ekscitovano stanje (dozvoljeni rezonantni prelazi u UV ($Ly\alpha$ 121,6 nm, CIV 154,8 i 155,0 nm, $MgII$ 279,6 i 280,3 nm), zabranjeni prelazi u UV ($[OII]$ 372,6 i 372,9 nm), zabranjeni prelazi u optičkom delu spektra ($[OIII]$ 495,9 i 500,7 nm, $[NII]$ 654,8 i 658,3 nm). **Sve sudarno ekscitovane linije u optičkom su zabranjene (ekscitovani nivoi iz kojih se vrši prelaz potiču iz iste elektronske konfiguracije kao i osnovno stanje).**
- **Rezonantna fluorescencija** – poklapanje neke jake emisije linije ($HeII$ 30,378nm) sa nekim prelazom drugog atoma ($OIII$ 30,380 nm). Po ekscitaciji $OIII$ apsorpcijom fotona jake linije $HeII$, radijativni povratak u osnovno stanje $OIII$ vrši se prolaskom kroz medju-stanja (dozvoljeni prelazi između 280 nm i 380 nm) u 2% slučajeva. Drugi primer: $Ly\beta$ foton (102,577nm) ekscituje OI koji se deekscituje kroz niz medju-stanja.



Rekombinacione
linije

Sudarno
ekscitovane linije



Rezonantno fluorescentne
linije

Spektar Orionove magline (HII region) od 100 nm – 1000 nm

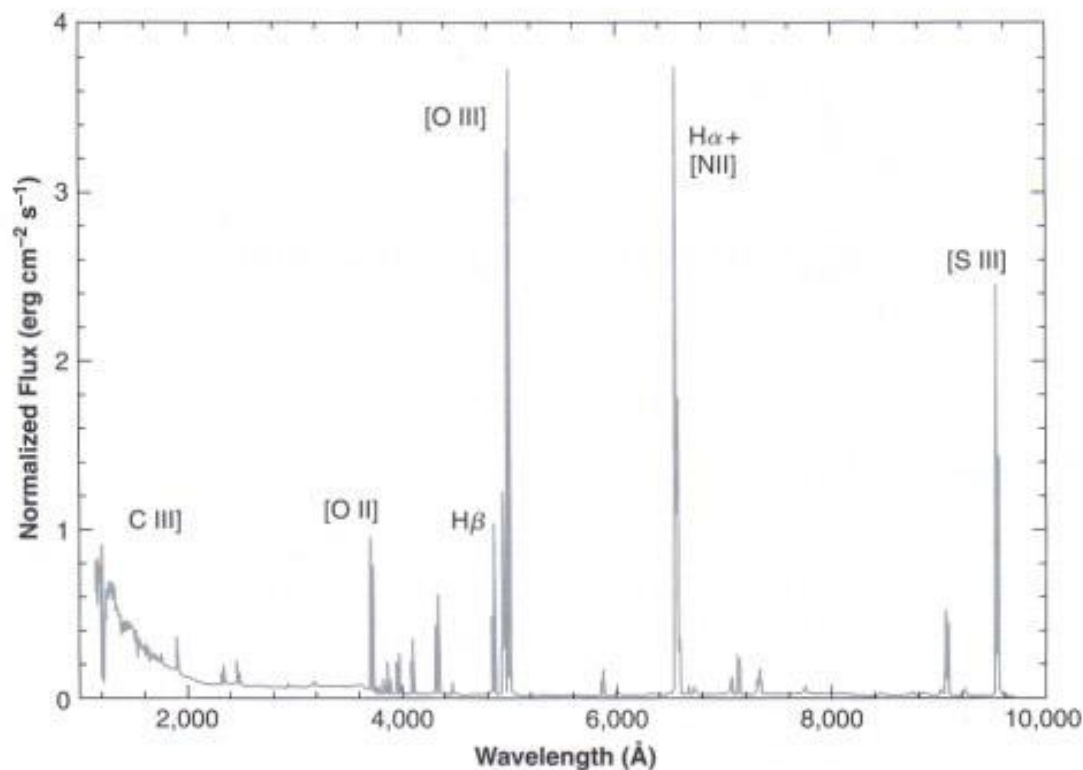
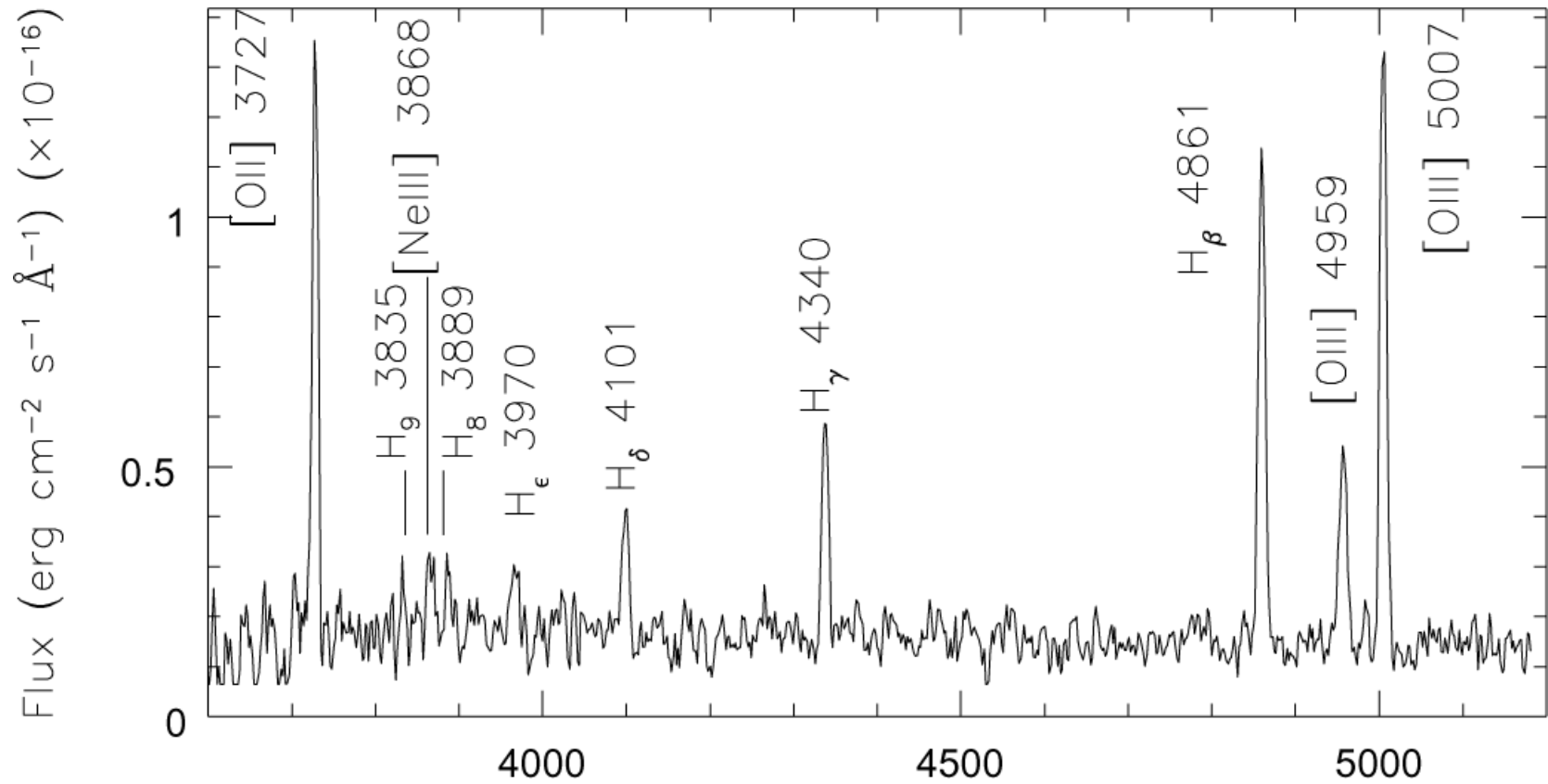


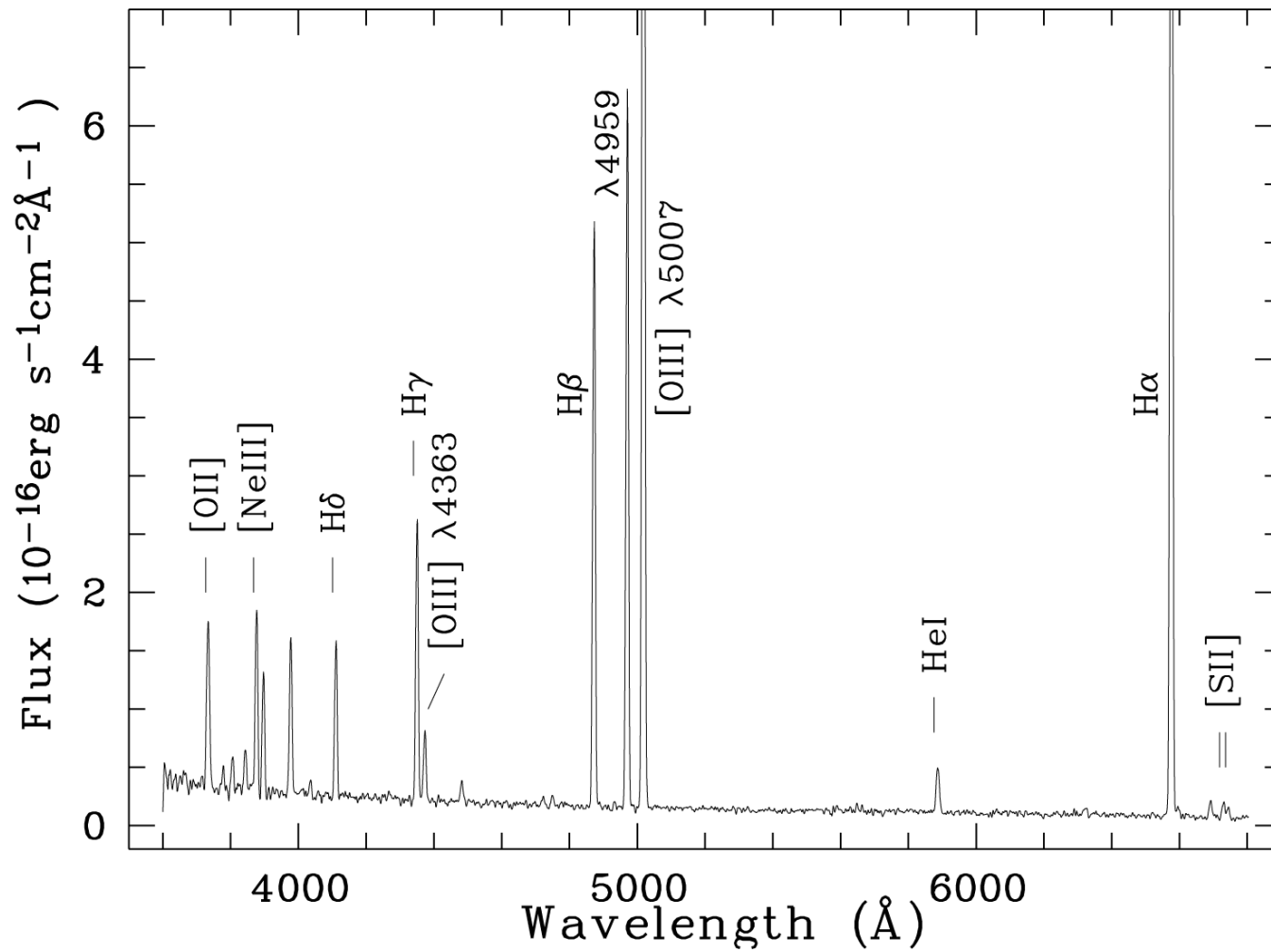
Figure 1.1

The ultraviolet, optical, and near infrared spectrum of inner regions of the Orion Nebula. A few of the strongest lines are identified in the plot; their wavelengths and those of all the other emission lines, from C III] λ 1909 to [S III] $\lambda\lambda$ 9069, 9531 (except the H I and He I lines) may be found in Chapter 3. The flux scale is normalized to the flux in H β = 1. (Original data provided by Reginald Dufour and Jack Baldwin.)

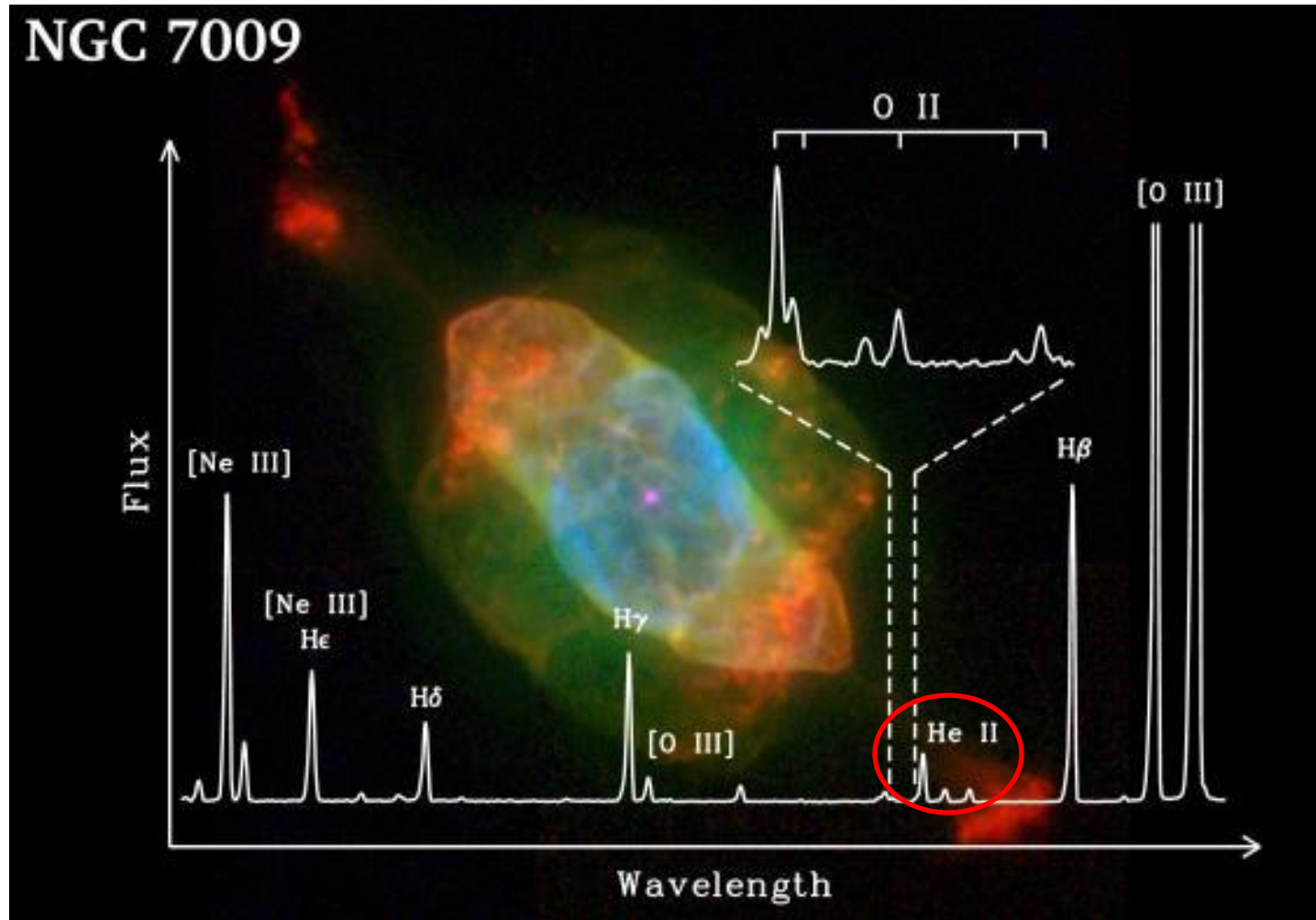
Spektar HII regiona (360 nm – 520 nm)



Spektar HII regiona (360 nm – 690 nm)



Spektar planetarne magline (360 nm – 520 nm)



Rekombinacione linije

Intenzitet rekombinacione linije $j \rightarrow i$ ($j > i$)

$$I_\nu(ji) = \int j_\nu(ji) \rho dz = \int A_{ji} n_j \frac{h\nu}{4\pi} dz$$

Naseljenost j -tog nivoa se određuje iz jednačine statističke ravnoteže:

$$\alpha_{rec}(j) n_e n_{jon} + \sum_{k>j} n_k A_{kj} = n_j \sum_{i<j} A_{ji} \quad (j > i)$$

Na temperaturi magline ($T=10000K$), odnosi emisijih koeficijenata H linija su

$$\frac{j(H\alpha)}{j(H\beta)} = 2.87, \quad \frac{j(H\gamma)}{j(H\beta)} = 0.466, \quad \frac{j(Ly\alpha)}{j(H\beta)} = 34$$

i neznatno se menjaju sa promenom T i elektronske koncentracije.

➡ Odnos intenziteta Balmerovih linija – Balmerov dekrement

$$I(H\alpha) : I(H\beta) : I(H\gamma) \text{ je fiksna.}$$

Sudarno ekscitovane linije

Intenzitet optički tanke linije koja nastaje prelazom sa $j \rightarrow i$ ($j > i$)

$$I_\nu = \int j_\nu \rho dz = \int \frac{A_{ji}}{4\pi} n_j h\nu dz$$

$$n_j \sum_k A_{jk} + n_j \sum_k C_{jk} = n_l C_{lj} \quad (l - \text{osnovni nivo})$$



$$I_\nu = \frac{h\nu}{4\pi} A_{ji} \int \sum_{k < j} \frac{n_l C_{lj}}{(A_{jk} + C_{jk})} dz \quad \Rightarrow \quad I_\nu = \frac{h\nu}{4\pi} \int n_l C_{lj} dz$$

Sudarna ekscitacija za zabranjene linije (uvek su optički tanke)

$$C_{lj} = \frac{8.6 \cdot 10^{-12}}{\sqrt{T}} n_e \frac{\Omega(l, j)}{g_l} e^{-E_{lj}/kT}$$

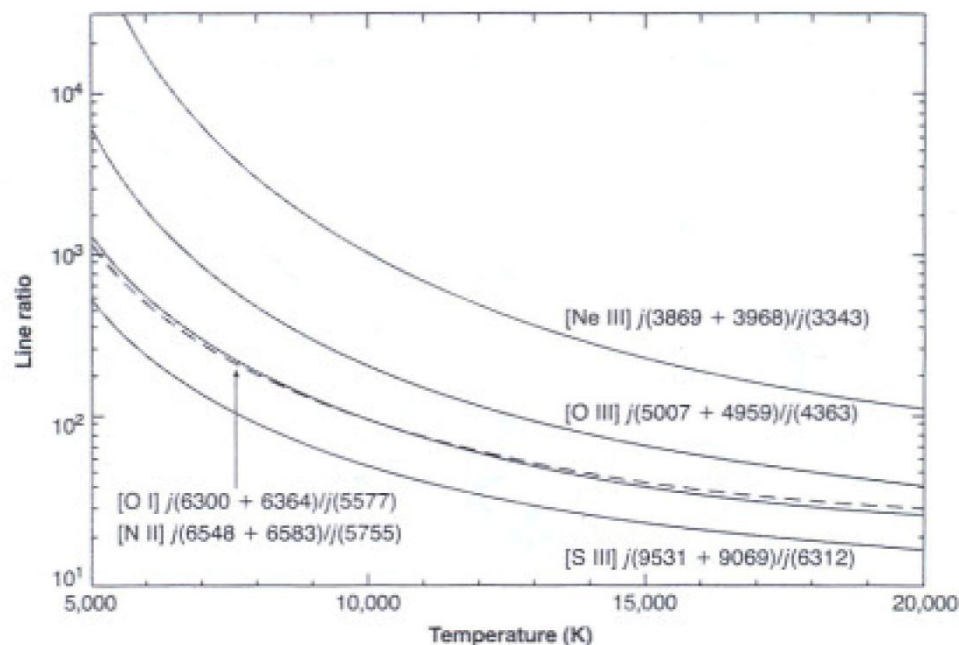
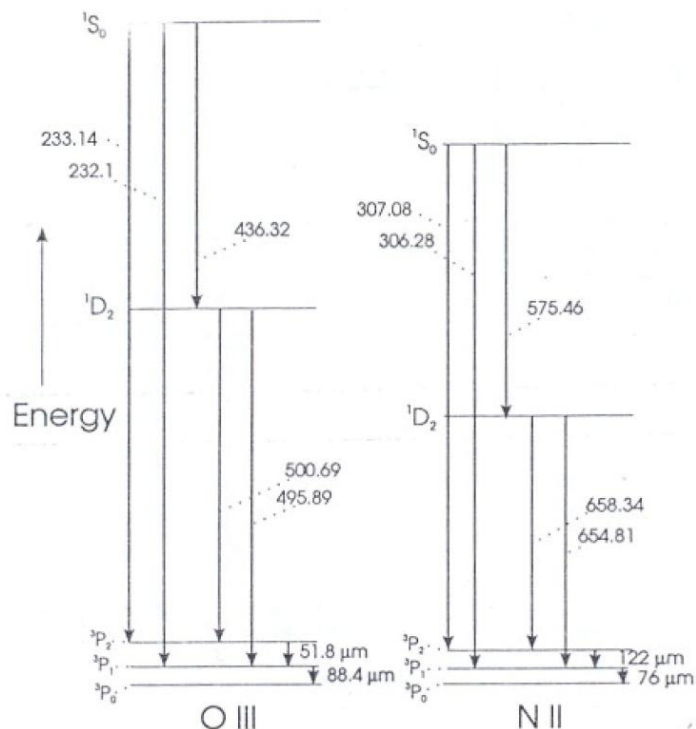
$$I_\nu = 6.8 \cdot 10^{-13} E_{lj} \frac{\Omega(l, j)}{g_l} \int \frac{n_l n_e}{\sqrt{T}} e^{-E_{lj}/kT}$$

Odredjivanje fizičkih uslova u maglini

I. Odredjivanje T

Odnos intenziteta linija jona koje polaze sa različitih pobudjenih nivoa (čije naseljenosti zavise od T)

$$\frac{I(495.9) + I(500.7)}{I(436.3)} = \frac{7.9e^{32960/T}}{1 + 4.5 \cdot 10^{-4}(n_e/\sqrt{T})}$$



$$\frac{I(^1S \rightarrow ^1D)}{I(^1D \rightarrow ^3P_2) + I(^1D \rightarrow ^3P_1)} = \frac{n(^1S)}{n(^1D)} \frac{A(^1S \rightarrow ^1D)h\nu(^1S \rightarrow ^1D)}{A(^1D \rightarrow ^3P)h\nu(^1D \rightarrow ^3P)}$$

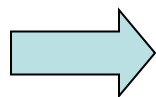
$$n(D)A(D \rightarrow P) = n(P)C(P \rightarrow D)$$

$$n(S)[A(S \rightarrow P) + A(S \rightarrow D)] = n(P)C(P \rightarrow S)$$

$$\frac{n(S)}{n(D)} = \frac{C(P \rightarrow S)}{C(P \rightarrow D)} \frac{A(D \rightarrow P)}{A(S \rightarrow P) + A(S \rightarrow D)}$$

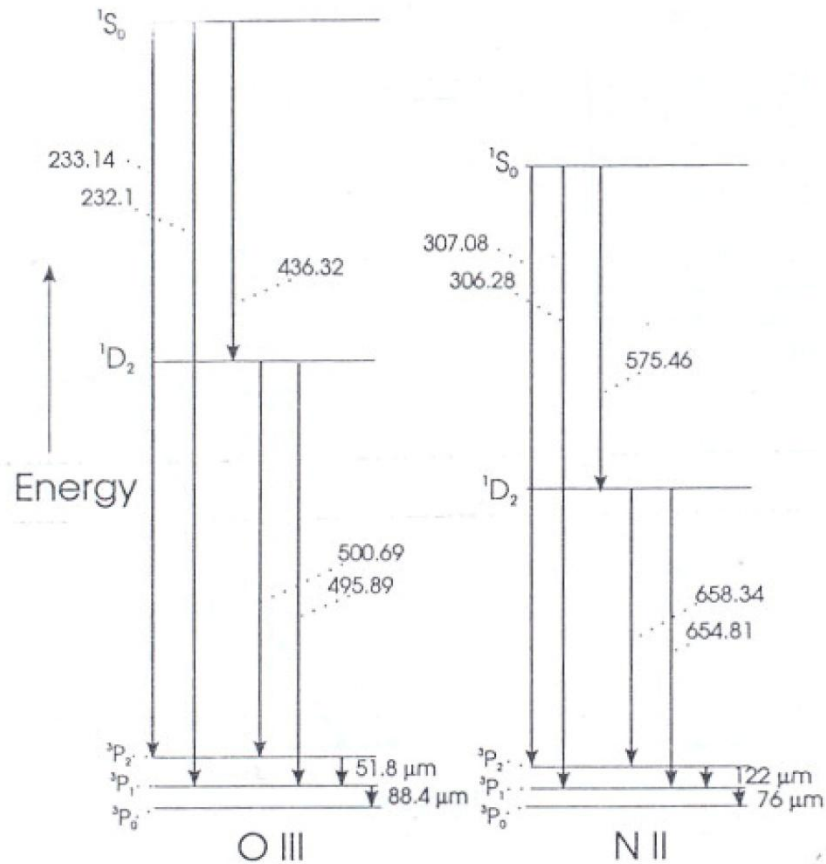
$$\frac{I(S \rightarrow D)}{I(D \rightarrow P)} = \frac{C(P \rightarrow S)}{C(P \rightarrow D)} \frac{\nu(S \rightarrow D)}{\nu(D \rightarrow P)} \frac{A(S \rightarrow D)}{A(S \rightarrow P) + A(S \rightarrow D)}$$

$$C \propto \frac{\Omega}{g} \frac{e^{-E/kT}}{\sqrt{T}} \quad \frac{I(S \rightarrow D)}{I(D \rightarrow P)} = \frac{\Omega(P \rightarrow S)}{\Omega(P \rightarrow D)} e^{-\Delta E/kT} \frac{\nu(S \rightarrow D)}{\nu(D \rightarrow P)} \frac{A(S \rightarrow D)}{A(S \rightarrow P) + A(S \rightarrow D)}$$



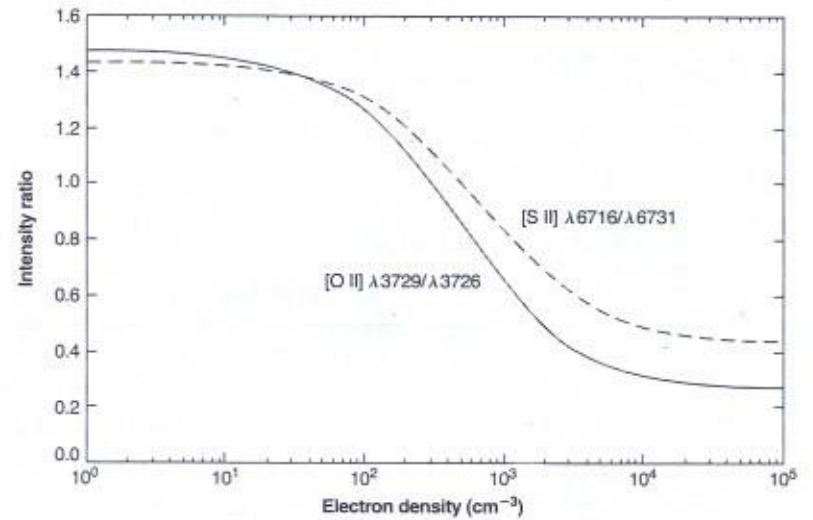
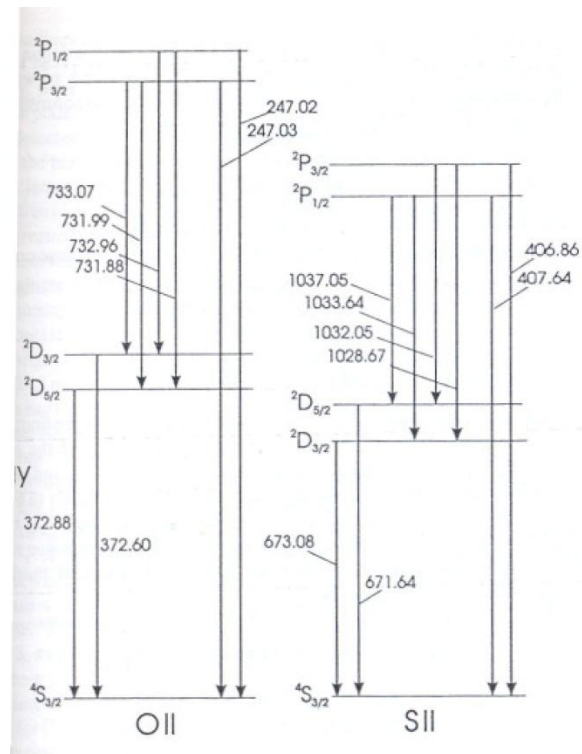
$$\frac{I(495.9) + I(500.7)}{I(436.3)} = \frac{7.9e^{32960/T}}{1 + 4.5 \cdot 10^{-4}(n_e/\sqrt{T})}$$

II. Odredjivanje elektronske koncentracije

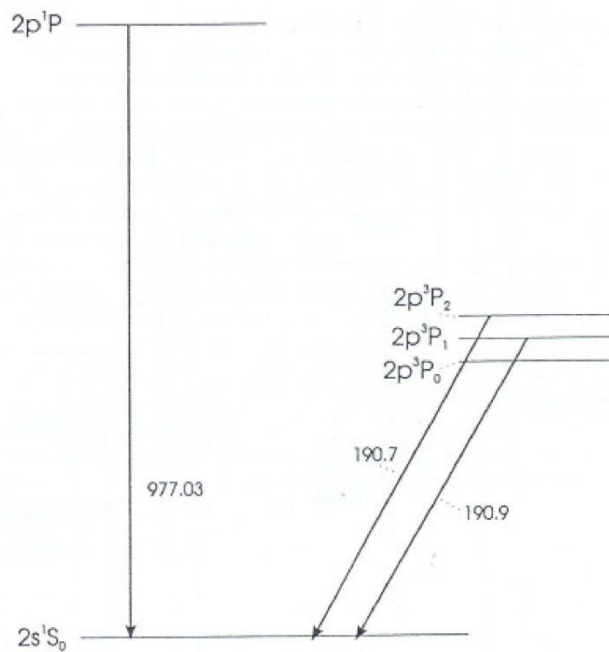


Odnos intenziteta IC zabranjenih linija [OIII] služi za **odredjivanje elektronske koncentracije**:

$$\frac{I(52\mu m)}{I(88\mu m)} = 0.55e^{-278/T} \left(1 + 4.7 \cdot 10^{-7} \frac{n_e}{\sqrt{T}}\right)$$



$$\frac{I(^2D_{5/2} \rightarrow ^4S)}{I(^2D_{3/2} \rightarrow ^4S)} = \frac{j(^2D_{5/2} \rightarrow ^4S)}{j(^2D_{3/2} \rightarrow ^4S)} = \frac{n(^2D_{5/2})A(^2D_{5/2} \rightarrow ^4S)h\nu(^2D_{5/2} \rightarrow ^4S)}{n(^2D_{3/2})A(^2D_{3/2} \rightarrow ^4S)h\nu(^2D_{3/2} \rightarrow ^4S)}$$



Energetski nivoi jona C III i polu-zabranjeni prelazi

