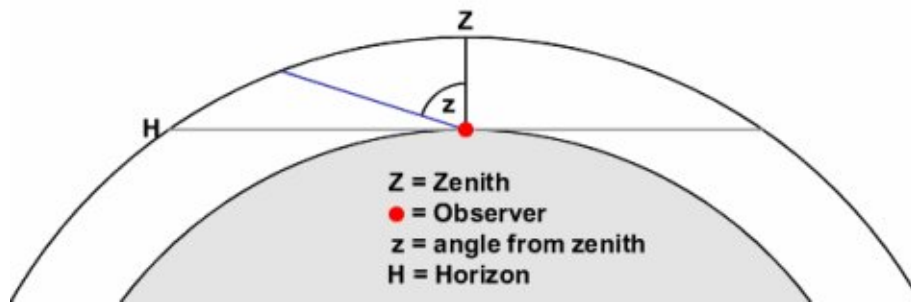


Određivanje uticaja atmosferske ekstinkcije

Uvod

Na zračenje koje nam stiže od objekata pored međuzvezdane prašine utiče i sama atmosfera Zemlje. Kako bi se izbegao uticaj atmosfere, velike opservatorije se grade na visokim planinama gde je broj kišnih i oblačnih noći mali. Takođe, još jedno od rešenja, ali izazovnije, je slanje teleskopa u orbitu oko Zemlje.

Prilikom prolaska zračenja kroz atmosferu Zemlje dolazi do refrakcije (promene prividnog položaja zvezde). Međutim, u atmosferi dolazi i do ekstinkcije zračenja (rasejanja i apsorpcije) što uzrokuje promenu fluksa zračenja koje stiže na samu površinu Zemlje (označićemo ga sa f_{λ}^A , dok je fluks na površini atmosfere f_{λ}^1). Na objekte koji se nalaze bliže zenitu atmosfera ima manji uticaj nego u slučaju da se objekat nalazi blizu horizonta. Razlog tome je što svetlosni zrak prolazi manji geometrijski put, odnosno, prolazi kroz više slojeva atmosfere kada je bliže horizontu - trpi veću ekstinkciju (vidi sliku 1). Parametar koji nam opisuje debljinu atmosfere kroz koju zračenje prolazi se naziva vazдушna masa X (eng. *air mass*). Veća vazдушna masa znači da se objekat nalazi bliže horizontu. Po definiciji se uzima da je u zenitu posmatrača $X = 1$. To je fiktivna granica iznad koje kažemo da je vakuum i da nema uticaja atmosfere. Odnosno, debljina atmosfere iznad posmatrača je 1.



Slika 1: Model sferne atmosfere Zemlje. Što je zenitna daljina veća, zračenje do posmatrača prolazi veći put kroz atmosferu Zemlje.

Jasno je da promenom zenitne daljine raste vazдушna masa. Razvijeno je nekoliko modela promene vazdušne mase (kako za plan-paralelnu atmosferu, tako i za sfernu, vidi Mathar 2015) sa zenitnom daljinom objekta. U prvom redu aproksimacije za sfernu atmosferu dobijen je izraz:

$$X = \frac{1}{\cos Z} \left(1 - 0.0012 \left(\frac{1}{\cos^2 Z} - 1 \right) \right),$$

gde je Z upravo zenitna daljina objekta. Prednost ovog izraza u odnosu na plan-paralelni slučaj je taj što se može koristiti i na većim zenitnim udaljenostima sa velikom tačnošću (plan-paralelni je ograničen do $Z = 70^\circ$, odnosno, $X = 3$).

Zadatak za vežbu: Izvedite izraz za vazдушnu masu u slučaju plan-paralelne atmosfere preko Ber-Lambertovog zakona.

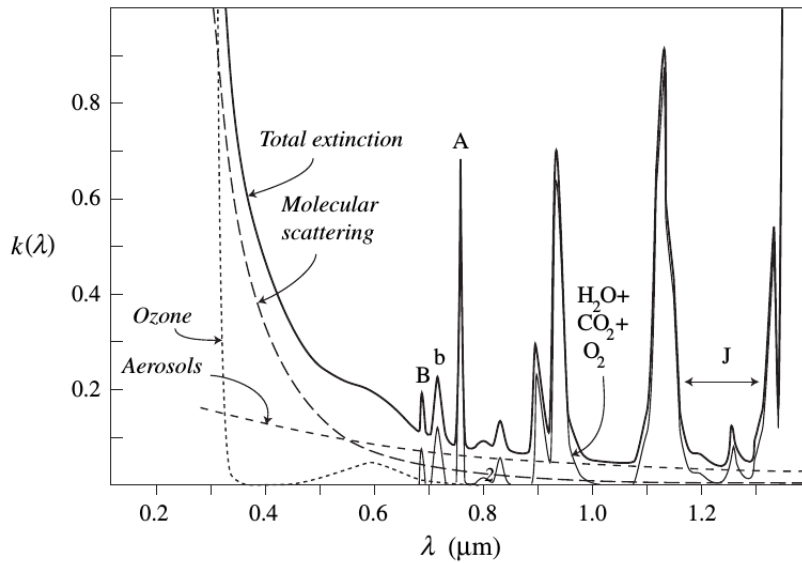
Izvori ekstinkcije zračenja u atmosferi mogu biti:

- Rejljevo rasejanje na molekulima: proporcionalno je sa λ^{-4} i to je objašnjenje zašto nebo ima plavu boju; slabo se menja sa vremenom.

¹Oznaka će biti ista i u slučaju ukupnog fluksa integraljenog po propusnosti filtera. U vežbi ćemo zanemriti postojanje spektralnih linija u spektru zvezde.

- apsorpcija ozona: nema drastične promene tokom kraćih vremenskih intervala; formira kratkotalasnu granicu propusnosti atmosfere.
- rasejanje na aerosolima (Mijevo rasejanje): proporcionalno je sa λ^{-1} i to daje oblacima belo-sivu boju; dosta varira sa vremenom i najjači uticaj ima do visine od 4.5km.
- apsorpcija na molekulima: glavni apsorberi su vodena para, ugljen dioksid i kiseonik; dosta varira sa vremenom, mestom i temperaturom.

Svaki od ovih procesa zavisi od talasne dužine zračenja. Na slici 2 predstavljen je uticaj svakog od izvora, kao i ukupna ekstinkciona kriva za različite talasne dužine.



Slika 2: Doprinos različitih izvora na ukupnu ekstinkciju u atmosferi (iz Chromey 2010).

Na osnovu prethodnog, magnituda objekta koja se meri na površini Zemlje m_λ^A je prema definiciji, uz korišćenje Ber-Lambertovog zakona:

$$m_\lambda^A = m_\lambda + k_\lambda X, \quad (1)$$

gde je k_λ koeficijent ekstinkcije² za dati filter određene efektivne talasne dužine λ (vidi Dodatak), a m_λ magnituda na površini atmosfere. Pod tim pretpostavkama kažemo da je atmosfera **fotometrijska**.

Posmatrajući zvezdu (ili više njih) tokom jedne večeri za različite vrednosti vazdušne mase, možemo proceniti koeficijent ekstinkcije i magnitudu na površini atmosfere prema prethodnoj jednačini. Pored korekcije magnituda može se izvršiti i korekciju za određeni indeks boje³. U tom slučaju važi sledeća jednakost:

$$(CI)^A = (CI)^0 + k_{CI} X. \quad (2)$$

odakle možemo dobiti vrednosti $(CI)^0$ i k_{CI} .

²Pretpostavićemo da se ne menja sa vremenom i da je izotropan.

³Standard je da se umesto N magnituda da jedna magnituda i N-1 indeks boje.

Zadatak

Potrebno je naći koeficijent ekstinkcije za V filter i $B - V$ indeks boje na osnovu posmatranja zvezda datih u tabeli 2 (zvaćemo ih standardne zvezde) u toku jedne noći (na različitim vrednostima vazdušne mase) sa opservatorije u Torontu ($\varphi = 43^\circ 52'$). Od podataka su poznati: kataloški nazivi zvezda, odbroj fotona koji su stigli na površinu Zemlje u V i B filteru i lokalno zvezdano vreme trenutka posmatranja (LZV) i ekvatorske koordinate zvezda.

Tabela 1: Podaci o test zvezdi čiju magnitudu želimo da korigujemo.

α [J1976]	δ [J1976]	N_V	N_B	LZV
$19^h 34.1^m$	$+31^\circ 18'$	$3.56 \cdot 10^5$	$7.70 \cdot 10^5$	$19^h 52^m$

Za poznate koeficijente ekstinkcije potrebno je korigovati posmatranu magnitudu test zvezde čiji su podaci dati u tabli 1 (isti podaci koji su poznati i za standardne zvezde). U prvoj aproksimaciji ćemo pretpostaviti da su filteri monohromatski fotometrijski elementi, odnosno, da je magnituda u datom filteru snimljena na talasnoj dužini koja odgovara maksimumu propusnosti datog filtera (videti Dodatak vežbe).

Prilikom obrade posmatranja koristiti instrumentalnu magnitudu zvezda koju ćemo definisati kao (npr. u V filteru):

$$v = -2.5 \log N_V$$

gde je N_V broj detektovanih fotona, što znači da jednačinu 1 možemo da prepisemo kao:

$$v = v_0 + k_V X$$

gde je v_0 magnituda koju bismo izmerili na površini atmosfere. U daljem delu teksta malim slovima v i b su označene instrumentalne magnitude u V i B filteru, respektivno, dok su sa indeksom 0 označene instrumentalne magnitude koje bismo izmerili na površini atmosfere. Slično važi i za indeks boje.

Međutim, nama je od interesa da dobijemo magnitudu test zvezde u nekom od standardnih sistema, kao što je na primer Johnsonov UBV sistem. U tom cilju je potrebno konstruisati relacije pomoću kojih se prelazi sa poznatih instrumentalnih magnituda na magnitude iz Johnsonovog sistema. Bez detaljnijeg upuštanja u pozadinu relacija, pomenute relacije su (za detalje videti Chromey 2010):

$$\begin{aligned}(V - v_0) &= \beta + \gamma(b - v)_0 \\ (B - V) &= \eta + \epsilon(b - v)_0\end{aligned}$$

Na osnovu dobijenih vrednosti za v_0 i $(b - v)_0$ standardnih zvezda potrebno je fitovati prethodne relacije kako bi se dobili koeficijenti β , γ , η i ϵ . Nakon što su ovi koeficijenti poznati, i uz izračunate vrednosti instrumentalnih magnituda na površini atmosfere test zvezde, potrebno je izračunati V magnitudu i $B - V$ indeks boje test zvezde na površini atmosfere primenom prethodnih relacija. Magnitude V i B su poznate magnitude standardnih zvezda iz kataloga (npr. iz SIMBAD baze).

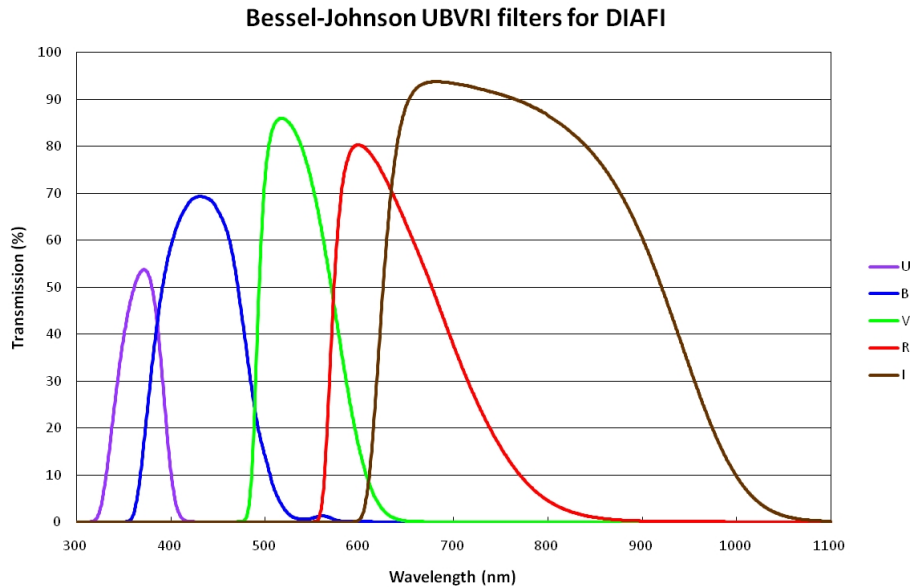
Probajte da pronađete realnu magnitudu test zvezde i uporedite je sa vašim rezultatom. Obradu uraditi u programskom jeziku Python3 i uz izveštaj priložiti iskomentarisan kod. U izveštaju dati grafik promene instrumentalne magnitude zvezde sa vazdušnom masom (odaberite grafik samo za jednu standardnu zvezdu). Takođe, priložiti i grafike koje opisuju gornje relacije između instrumentalnih i Johnsonovih magnituda.

Literatura

- [1] Mathar J. Richard, 2015. Astronomical Air Mass, skripta. <http://www.mpia.de/~mathar/public/mathar20151213.pdf>
- [2] Chromey R. Frederick, 2010. To Measure the Sky An Introduction to Observational Astronomy, Cambridge.

Dodatak

U vežbi je pretpostavljeno da su filteri monohromatski fotometrijski elementi. Međutim, Johnsonovi filteri, koji su u širokoj upotrebi, nisu monohromatski uređaji već su to širokopojasni filteri koji propuštaju zračenje određenog opsega talasnih dužina. Striktno gledano, magnituda u nekom od filtera (koristićemo opštu oznaku P za filter) zavisi od krive propusnosti filtera $R_P(\lambda)$ i od spektra zračenja objekta f_λ . Kriva propusnosti filtera nosi informaciju o tome koji deo zračenja određene talasne dužine prolazi kroz filter (vidi sliku 3). Pozicija maksimuma ove krive naziva se talasna dužina filtera ili efektivna talasna dužina. Ova kriva je još određena i širinom na polovini maksimuma, $FWHM$.



Slika 3: Kriva propusnosti UBVRI filtera.

U ovom slučaju, jednačinu 1 možemo onda da prepisemo na sledeći način za određeni filter P :

$$k_P X = m_P^A - m_P = -2.5 \log \frac{\int R_P(\lambda) f_\lambda S_{\text{atm}} d\lambda}{\int R_P(\lambda) f_\lambda d\lambda}$$

gde je S_{atm} funkcija koja opisuje uticaj atmosfere na zračenje koje prolazi kroz atmosferu i zavisi od koeficijenta ekstinkcije $k(\lambda)$ i vezdušne mase X . Ovde $k(\lambda)$ opisuje ukupan koeficijent ekstinkcije u atmosferi koji se menja sa talasnom dužinom koji je predstavljen na slici 2.

Iz prethodnog možemo videti da koeficijent ekstinkcije u datom filteru zavisi od spektra zvezde, f_λ . Međutim, od interesa je da ovu relaciju koliko-toliko uprostimo kako bismo olakšali račun, zbog toga što bi u suprotnom trebalo da znamo ceo spektar zvezde. Zbog toga je potrebno aproksimirati uticaj izgleda spektra pri proceni koeficijenta ekstinkcije u datom filteru P . Kada kažemo izgled spektra misli se na oblik konitnuuma spektra, s obzirom da nam linije ovde nisu od interesa i zato što radimo sa širokopojasnim filterima.

Oblik spektra zvezde možemo da poistovetimo sa njenim nagibom (koji je određen temperaturom zvezde) iliti razlikom flukseva na dvema talasnim dužinama. Međutim, takav parametar je definisan mnogo ranije i zove se *indeks boje* zvezde (jer je u vezi sa samom temperaturom zvezde). Kroz indeks boje sadržana je informacija o nagibu spektra, što nam omogućava da koeficijent ekstinkcije za širokopojasni filter P raspišemo u sledećem obliku:

$$k_P = k'_P + k''_{P,CI} \cdot (CI)$$

gde je (CI) indeks boje zvezde (npr. $B - V$ ili neki drugi), dok su k'_P i $k''_{P,CI}$ koeficijenti ekstinkcije prvog i drugog reda⁴, respektivno. Ukoliko zanemarimo uticaj spektra zračenja, onda nam je $k_P = k'_P$ i dolazimo do situacije koju imamo u vežbi. Međutim, ukoliko uključimo uticaj spektra onda moramo razmatrati i kako se menja koeficijent ekstinkcije u datom filteru P od zvezde do zvezde zbog toga što sve zvezde nemaju isti indeks boje.

Polazeći potom od relacije koja daje magnitudu zvezde na površini Zemlje uz razmatranje koeficijenta ekstinkcije drugog reda može se dobiti relacija za indeks boje zvezde (ako pretpostavimo da nas interesuje $b - v$ indeks boje):

$$(b - v)^A = (b - v) + \{(k'_B - k'_V) + (k''_{B,BV} - k''_{V,BV}) \cdot (B - V)\} X$$

odnosno:

$$(b - v)^A = (b - v) + \{k'_{B-V} + k''_{B-V} \cdot (B - V)\} X$$

gde je sada $\{k'_{B-V} + k''_{B-V} \cdot (B - V)\}$ koeficijent ekstinkcije za indeks boje $B - V$, k_{B-V} .

⁴Koeficijent drugog reda ima dva indeksa: prvi označava filter na koji se odnosi koeficijent, a drugi za koji indeks boje zvezde vršimo popravku.

Tabela 2: Podaci o standardnim zvezdama.

zvezda	N_V	N_B	LZV [hh mm]	$\alpha(\text{J2000}) [^\circ]$	$\delta(\text{J2000}) [^\circ]$
HR7235	1.49e7	4.90e7	19 29.6	286.2525	13.86344
HR7235	1.42e7	4.37e7	22 18.6		
HR7235	1.32e7	4.03e7	23 10.2		
HR7235	1.05e7	2.74e7	00 09.4		
HR7298	4.65e6	1.94e7	19 32.8	288.43953	39.1458
HR7298	4.33e6	1.79e7	22 22.0		
HR7298	3.21e6	1.11e7	23 13.6		
HR7298	3.61e6	1.24e7	01 15.2		
HR7377	1.04e7	2.82e7	19 36.0	291.3745	3.11477
HR7377	9.60e6	2.40e7	22 25.6		
HR7377	8.33e6	1.97e7	23 17.1		
HR7377	6.91e6	1.45e7	00 02.1		
HR7387	3.24e6	7.42e6	19 39.5	291.6295	0.33857
HR7387	2.82e6	5.67e6	22 29.1		
HE7387	2.38e6	4.53e6	23 21.0		
HR7387	1.91e6	3.01e6	00 05.9		
HR7405	3.92e6	4.37e6	19 43.1	292.1763	24.664919
HR7405	3.81e6	4.17e6	22 32.8		
HR7405	3.45e6	3.58e6	23 24.4		
HR7405	2.56e6	2.23e6	01 19.0		
HR7478	3.12e6	5.47e6	19 46.9	294.8441	30.153317
HR7478	3.12e6	5.52e6	22 36.7		
HR7478	2.96e6	4.96e6	23 28.7		
HR7478	2.38e6	3.42e6	01 23.1		