



ASTRONOMIJA

Određivanje zastupljenosti kemijskih elemenata u zvijezdama

Vladimir Kolbas*

Uvod

U ovom tekstu se objašnjava problematika mjerenja zastupljenosti kemijskih elemenata iz spektra zvijezde. Prvo se ukratko objašnjava kako nastaju spektralne linije te njihova struktura. Nakon toga se prvo teorijski, a onda na primjeru dvije natrijeve linije u Suncu objašnjava postupak mjerenja zastupljenosti kemijskih elemenata pomoću krivulje rasta. Na kraju se raspravlja što se u praksi zapravo mjeri, te daje nekoliko primjera u kojima se može dobiti uvid u kemijski sastav dubljih, inače nedostupnih dijelova zvijezde.

Nastajanje spektralnih linija

Fotoni koji čine vidljivi dio spektra zvijezde koji detektiramo i bilježimo na Zemlji nastaju u središtu zvijezde u kontinuiranom rasponu valnih duljina. Po nastanku, polako odlaze prema površini zvijezde, mnogim apsorpcijama i emisijama, dok konačno ne bivaju emitirani sa zvijezde u međuzvjezdani prostor. Važna veličina kojom opisujemo interakciju fotona s tvari gustoće ρ od koje je zvijezda sastavljena je neprozirnost κ [cm^2g^{-1}], odnosno κ_λ obzirom da je neprozirnost funkcija valne duljine. Intenzitet zračenja I_λ se pri prolasku kroz put Δs smanjuje prema relaciji

$$\Delta I_\lambda = -\kappa_\lambda \rho I_\lambda \Delta s.$$

Neprozirnost ovisi prvenstveno o apsorpciji fotona na vezanim i slobodnim elektronima, no i o raspršenju fotona. Rezultat je smanjivanje broja fotona iz početnog toka. Također, možemo definirati i bezdimenzionalnu veličinu, optičku dubinu τ_λ , koja je vezana s neprozirnošću relacijom

$$\Delta \tau_\lambda = -\kappa_\lambda \rho \Delta s.$$

Za razliku od puta Δs koji je vezan uz put fotona te se mjeri od središta zvijezde prema površini, optička dubina je vezana uz dogleđnicu, te je nula na površini zvijezde i raste prema unutrašnjosti. Efektivna temperatura T_{ef} , pomoću koje najčešće karakteriziramo zvijezde je temperatura na optičkoj dubini $\tau = 2/3$. Možemo reći da je optička dubina 1 ekvivalentna srednjem slobodnom putu fotona dane valne duljine odnosno foton na optičkoj dubini 1 s velikom vjerojatnošću može pobjeći sa zvijezde bez apsorpcije. Zbog veze s neprozirnošću, vidimo da ista numerička optička dubina nije ista stvarna dubina

* Autor je znanstveni novak na Fizičkom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta u Zagrebu.

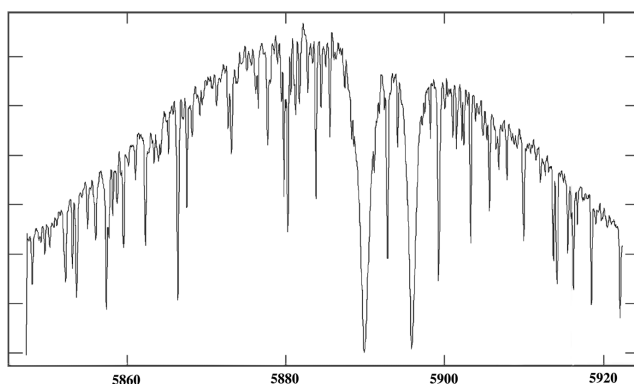
u atmosferi već joj položaj ovisi o neprozirnosti tvari za danu valnu duljinu. Za valne duljine na kojima je apsorpcija velika će ekvivalentna optička dubina biti bliže površini.

Struktura spektralnih linija

Apsorpcijska spektralna linija je dio spektra gdje dolazi do pojačane apsorpcije fotona na zvjezdanoj tvari. Valna duljina na kojoj se pojavljuje u spektru je vezana npr. uz energije atomskih prijelaza među orbitalama (za tzv. vezano-vezane prijelaze, odnosno prijelaze kod kojih je elektron vezan i u atomu i prije i poslije apsorpcije). U liniji možemo razlučiti centralni dio, s najvećom apsorpcijom, te tzv. krila, dio na većim i manjim valnim duljinama od centralne na kojima apsorpcija pada te ide prema kontinuumu, maksimalnom zračenju zvijezde na nekoj valnoj duljini. Ukupan izgled linije nazivamo i profilom linije. Zbog manjeg srednjeg slobodnog puta odnosno povećane apsorpcije, centar linije nastaje u višem, hladnijem dijelu atmosfere od krila, odnosno možemo reći da na valnim duljinama krila vidimo sve dublje u atmosferi zvijezde. Također, profil spektralne linije se mijenja zbog raznih procesa širenja linije, poput prirodnog, Dopplerovog ili širenja zbog tlaka. Važnija veličina od same dubine linije je ekvivalentna širina linije W . Ekvivalentna širina linije je pravokutnik visine kontinuumu (odnosno 1 u normiranom slučaju), te širine takve da mu je površina jednaka površini spektralne linije. Ekvivalentna širina je obično oko $0.1\text{Å} = 10^{-11}\text{ m}$. Površina linije, odnosno ekvivalentna širina će biti to veća što imamo više apsorbera u promatranoj tvari, što nas vodi na metodu mjerenja zastupljenosti nekog elementa u zvjezdanoj atmosferi.

Mjerenje zastupljenosti

Prvi problem pri mjerenju zastupljenosti elementa u zvijezdi je identifikacija željenih spektralnih linija. Pogledamo li primjer Sunčeva spektra na slici 1, vidimo bogatstvo linija.



Slika 1. Primjer dijela spektra Sunca (intenzitet zračenja kao funkcija valne duljine u jedinicama 10^{-10} m).

U slučaju da želimo mjeriti zastupljenost nekog određenog elementa, problem je identifikacije njegovih linija u spektru. Iako znamo njihov položaj, zbog Dopplerovog pomaka i eventualnog mnoštva susjednih linija nije jednostavno identificirati željene linije. Zbog velike ovisnosti o tlaku, temperaturi i naponu, podaci o jačinama linija dobiveni laboratorijskim mjerjenjima ne moraju nužno korespondirati snimljenom spektru te nadalje, u spektru zvijezde uz naše linije od interesa (ili čak unutar njih), mogu upasti linije drugih elemenata. S druge strane, imamo isti problem ako želimo iz snimljenog spektra identificirati sve snimljene linije i napraviti kemijsku analizu zvijezde. Da bismo izmjerili površinu jedne spektralne linije moramo oduzeti utjecaj drugih, što je još tim teže ukoliko u liniju koja nas interesira potpuno upada linija nekog drugog elementa pa možemo nesvjesno mjeriti površinu više linija istovremeno i time precijeniti količinu elementa. Profil spektralne linije ne ovisi samo o zastupljenosti elementa, apsorbera, već i o raznim svojstvima okoline u kojoj linija nastaje – prvenstveno temperaturi i tlaku, a nadalje i raznim gibanjima materije kao npr. mikro i makroturbulentno gibanje tvari, od kojih prvo utječe na promjenu površine linije, a drugi efekt samo mijenja profil, a čuva površinu.

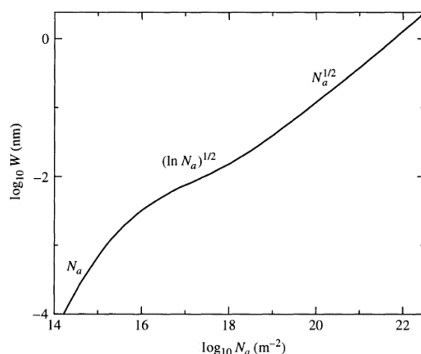
Veličina koju želimo mjeriti je $N_a [m^{-2}]$, odnosno zastupljenost elementa po površini doglednice. Prva činjenica koja nam je važna pri određivanju zastupljenosti je informacija koliko imamo elementa u nekom energetskom stanju b u odnosu na stanje a , što se uvijek računa pomoću Boltzmannove jednadžbe:

$$\frac{N_b}{N_a} = \frac{g_b}{g_a} e^{-\frac{E_b - E_a}{kT}},$$

gdje je g tzv. degeneracija stanja (broj stanja dane energije), k Boltzmannova konstanta, E energija, te T temperatura. Također nam je važna i Sahina jednadžba koja nam govori o omjeru tvari u susjednim ionizacijskim stanjima i i $i + 1$:

$$\frac{N_{i+1}}{N_i} = \frac{2kT}{P_e} \left(\frac{2\pi m_e kT}{h^2} \right)^{3/2} e^{-\frac{\chi_i}{kT}},$$

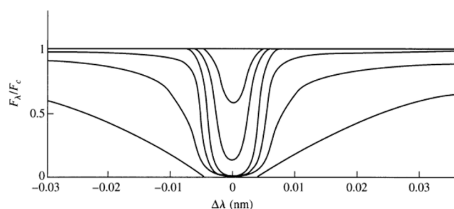
gdje je T temperatura, P_e tlak elektrona, m_e masa elektrona, h Planckova konstanta, te χ ionizacijska energija stanja ionizacije i . Također, bit će nam važne i tzv. “oscilatorne jakosti” f , veličine koje nam govore o vjerojatnosti atomskih prijelaza iz iste početne orbitale u viša stanja. Oscilatorne jakosti se mogu ili računati ili mjeriti, a u oba slučaja postupak je težak te su tablične vrijednosti često nepouzdana.



Slika 2. Krivulja rasta

Mjerenje zastupljenosti se vrši pomoću tzv. krivulje rasta, ovisnosti ekvivalentne širine W o zastupljenosti elementa, prikazane na slici 2.

Na slici 3 je prikazana spektralna linija za razne zastupljenosti elementa. U slučaju da je elementa malo, apsorpcija je slaba, linija je plitka te povećanjem zastupljenosti površina linije, a time i ekvivalentna širina raste linearno. Kada tok povećanjem broja apsorbera padne (idealno, ne u stvarnosti) na nulu povećanje površine linije se privremeno zaustavlja, te je ekvivalentna širina proporcionalna s $\sqrt{\ln(N_a)}$ odnosno rast je spor, a doprinose mu samo krila linije i to slabo. Kako dalje unosimo apsorbere, raste utjecaj na krila linije te površina počne brže rasti, s $\sqrt{N_a}$. Krivulja rasta se može izračunati za svaku liniju, ali nam je posebno zgodno izračunati je za sve atomske prijelaze koji potiču iz iste početne orbitale. Takve krivulje rasta možemo preračunati i prikazati kao jednu, te je iskoristiti za mjerenje zastupljenosti iz svih linija koje su nastale prijelazima iz istog početnog stanja, npr. Balmerove linije vodika koje padaju u vidljivi dio spektra te su uzrokovani prijelazima iz prvog pobuđenog u viša stanja.



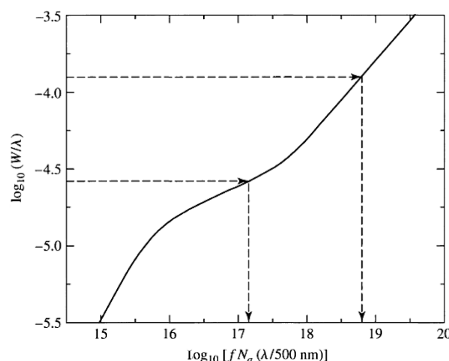
Slika 3. Primjer spektralne linije. Sukcesivne linije su linija istog elementa za povećanje zastupljenosti N_a od jednog reda veličine.

Pogledajmo sam postupak mjerenja zastupljenosti na konkretnom primjeru, linijama natrija mjenjenima u Sunčevu spektru. Mjerene su linije na valnim duljinama λ od 330 i 589 nm, odnosno njihove ekvivalentne širine (slika 4).

λ (nm)	W (nm)	f	$\log_{10}(W/\lambda)$	$\log_{10}[f(\lambda/500 \text{ (nm)})]$
330.238	0.0088	0.0214	-4.58	-1.85
589.997	0.0730	0.645	-3.90	-0.12

Slika 4. Podaci za dvije linije natrija iz Sunčeva spektra

Obje linije su prijelaz iz osnovnog stanja neioniziranog natrija, te je preračunata krivulja rasta za te prijelaze prikazana na slici 5.



Slika 5. Krivulja rasta za natrijeve prijelaze is osnovnog stanja

Mjerenjem ekvivalentne širine pojedine linije i dijeljenjem s njenom valnom duljinom, pronađemo odgovarajuću vrijednost na ordinati te očitamo pripadnu vrijednost na apscisi. U našem slučaju, vrijednost apscise za liniju $\lambda = 330.238$ nm je 17.2, a za $\lambda = 588.997$ nm je 18.3. Stoga, znamo da je

$$\log\left(\frac{f N_a \lambda}{500 \text{ nm}}\right) \Big|_{\lambda=330.238} = 17.2 \implies \log(N_a) = 19.05$$

$$\log\left(\frac{f N_a \lambda}{500 \text{ nm}}\right) \Big|_{\lambda=588.997} = 18.83 \implies \log(N_a) = 18.95.$$

Kako oscilatorne jakosti i valnu duljinu znamo, možemo izračunati logaritam zastupljenosti N_a . Srednja vrijednost za 2 mjerene linije je 19, a oko nje bi trebale biti vrijednosti i svih drugih linija nastalih iz iste početne orbitale. Stoga zaključujemo da je zastupljenost natrija (uz slučajno poklapanje oznake elementa i zastupljenosti)

$$\log_{10}(N_a) = 19 \implies N_a = 10^{19} \text{ m}^{-2},$$

odnosno imamo 10^{19} atoma neutralnog natrija u osnovnom stanju po m^2 (obzirom da je krivulja rasta za osnovno stanje). Provjerimo koliko ima natrija na danoj temperaturi ($T_{\text{ef, sunca}} \approx 5800$ K) u višim stanjima, npr. za mjerene linije:

$$\frac{N_b}{N_a} = \frac{g_b}{g_a} e^{-\frac{\Delta E}{kT}} = \begin{cases} 4.89\%, (\lambda = 589 \text{ nm}) \\ 0.15\%, (\lambda = 330 \text{ nm}) \end{cases}$$

Dakle, zaključujemo da je većina natrija u osnovnom stanju, za potrebe prikaza postupka određivanja zastupljenosti. Nadalje, provjerimo koliko je natrija jednostruko ionizirano za temperaturu Sunca, dakle koristimo Sahinu jednadžbu

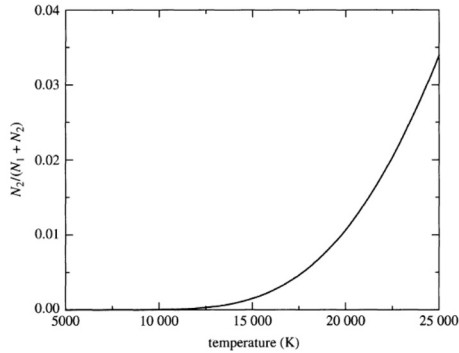
$$\frac{N_{II}}{N_I} = \frac{2kT}{P_e} \frac{Z_{II}}{Z_I} \left(\frac{2\pi m_e kT}{h^2}\right)^{3/2} e^{-\frac{zI}{kT}} \approx 2500$$

te vidimo da imamo 2500 iona jednostruko ioniziranog natrija za jedan neionizirani. Zastupljenost dvostruko ioniziranog natrija na Sunčevoj temperaturi je zanemariva stoga moramo korigirati izmjerenu zastupljenost za faktor 2500 jednostruko ioniziranog natrija.

$$N_{uk} = 2500 \cdot N_I = 2500 \cdot 10^{19} = 2.5 \cdot 10^{22} \text{ m}^{-2}.$$

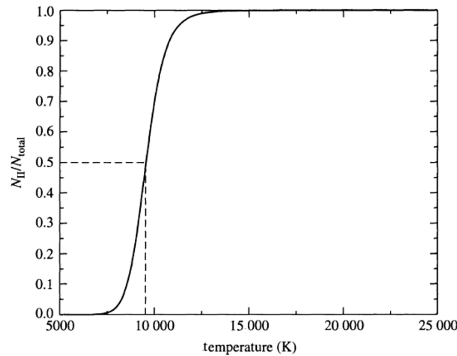
Time smo odredili zastupljenost natrija u Sunčevoj atmosferi.

Da bismo uvidjeli važnost uzimanja u obzir Boltzmannove i Sahine jednadžbe u računu, pogledajmo povijesni primjer odnosno zablude o sastavu Sunca. Zbog velikog broja linija metala (astrofizički, svi elementi teži od helija) te slabih vodikovih linija smatralo se da je Sunce od metala, a da nema vodika. Kako vodika ima $6.7 \cdot 10^{27} \text{ m}^{-2}$ odnosno 5 redova veličine više od npr. natrija, očito je došlo do pogreške pri interpretaciji rezultata. Balmerove linije vodika, koje upadaju u vidljivi dio spektra, nastaju prelazom iz prvog pobuđenog stanja u viša stanja. Pogledajmo rezultat Boltzmannove jednadžbe za omjer vodika u prvom pobuđenom stanju u odnosu na sva stanja (slika 6). Vidimo da je količina vodika u stanju koje daje Balmerove linije za temperaturu Sunca zanemariva.



Slika 6. Ovisnost količine vodika u 1. pobuđenom stanju o temperaturi.

Stoga mjerenu količinu vodika, onog u 1. pobuđenom stanju, moramo korigirati na već provedeni način. Pogledajmo dalje rezultat Sahine jednadžbe, omjer neutralnog i ioniziranog vodika (slika 7).



Slika 7. Omjer ioniziranog vodika u odnosu na neionizirani u ovisnosti o temperaturi.

Dakle, iako je na nižim temperaturama samo mali broj vodikovih atoma u prvom pobuđenom stanju koje daje Balmerove linije, na temperaturama većim od 10 000 K većina atoma vodika je ionizirana te više ne doprinosi spektru. Kombinacijom te dvije činjenice dolazimo do zaključka da su Balmerove vodikove linije najizraženije na temperaturama od oko 10 000 K, gdje je optimalna ravnoteža vodikovih atoma u prvom pobuđenom stanju i dovoljno malog broja ioniziranih atoma.

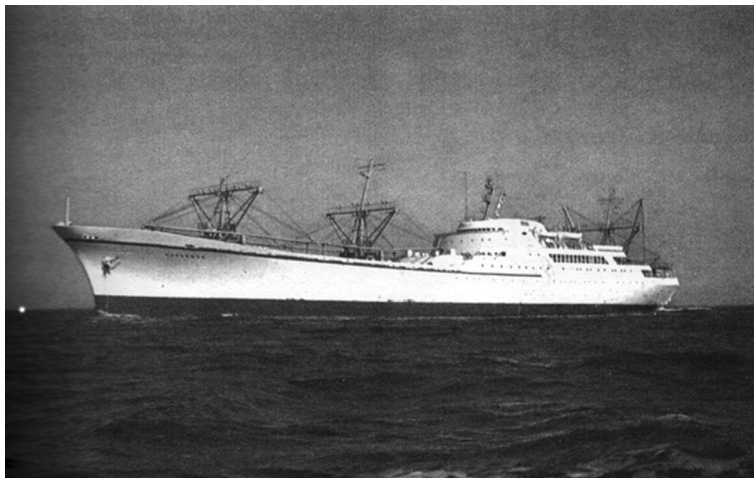
Diskusija

Upravo smo vidjeli da je kritično odrediti udio elementa u stanju koje doprinosi spektru u odnosu na sva moguća stanja elementa. Također smo vidjeli problem pri identifikaciji i mjerenju profila linije, bilo zbog pogrešne identifikacije ili neželjenog utjecaja drugih linija. Jedan od velikih uspjeha astrofizike je mogućnost stvaranja tzv. sintetskih spektara – spektara kao rezultata modela. Za dane parametre zvijezde, uz tablice atomskih podataka, moguće je izračunati spektar koji uključuje sve elemente koje želimo, a da za njih postoje podaci. Spektar se izračunava za sve elemente zasebno

te se zbraja u ukupni spektar kojeg možemo uspoređivati s mjenjenim. Ukoliko postoji korespondencija, imamo mogućnost uzimajući komponente sintetskog spektra željenog elementa te mjerenja ekvivalentnih širina samo tog elementa, bez utjecaja drugih elemenata.

Sljedeća je važna činjenica da mi mjerimo samo sastav zvjezdine atmosfere. Nuklearne reakcije se odvijaju oko središta zvijezde, npr. za Sunce koje je polumjera 700 000 km, dok spektar nastaje približno na optičkoj dubini $\tau = 1$, što odgovara dubini od oko 100 km. Dakle, želimo li mjeriti rezultate nuklearnih reakcija oko središta moramo uzeti u obzir da oni dugo putuju do površine gdje nastaje spektar koji mjerimo. Brzina prijenosa tvari ovisi o mehanizmu prijenosa energije u zvijezdama koji je ili radijativan ili konvektivan, koji uključuje vrtloženje tvari i prijenos težih elemenata oko središta prema površini. Transport je pojačan u bliskim dvostrukim sustavima u kojima međusobne interakcije dvije zvijezde povećavaju transport te uzrokuju prezastupljenost nekih elemenata za danu fazu razvoja zvijezde, u odnosu na model jednostrukih sustava.

Zanimljiv je i primjer zvjezdanog sustava Algola (beta Perzeja), trostrukog sustava u kojemu su dvije komponente bliske i u interakciji. Masivnija zvijezda je brže evolucije, te je krenula prema grani divova, bitno narasla u volumenu, te počela predavati materiju svojem inicijalno manje masivnom pratiocu. Taj proces možemo predočiti kao odmatanje atmosfere jedne zvijezde i namatanje iste na drugu, uz gubitak dijela materije u okolinu sustava. U konkretnom je slučaju predano oko 80% tvari. To je uzrokovalo paradoksalnu situaciju – sustav se sastoji od zvijezde diva male mase, te masivne zvijezde koja se nalazi na glavnom nizu, a evolucijski bi trebala biti puno dalje od pratioca. Međutim, nama je izuzetno korisna činjenica da se prijenosom tvari otvorio direktan uvid u unutrašnjost zvijezde te mjerenjem spektra direktno mjerimo njezin kemijski sastav, koji nam je inače nedostupan mjerenju, već možemo samo postavljati modele transporta tvari, te provjeravati njihove rezultate. Istraživanjem ovog i sličnih sustava dobivaju se dragocjene informacije o kemijskoj evoluciji zvijezda i svemira općenito.



*Prvi trgovački brod na nuklearni pogon čiji je glavni projektant bio Erazmo Tićac.
(Vidi 4. stranu omota.)*