

Kemijski sastav Sunca i njegove atmosfere

Ištef, Lukas

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:149:383957>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-06**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Lukas Ištef

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, rujan 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Lukas Ištef

KEMIJSKI SASTAV SUNCA I NJEGOVE ATMOSFERE
ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada: izv. prof. dr. sc. Vladimir Dananić

Članovi ispitnog povjerenstva: izv. prof. dr. sc. Vladimir Dananić

prof. dr. sc. Veljko Filipan

prof. dr. sc. Igor Sutlović

prof.dr.sc. Zoran Mandić, zamjena

Zagreb, rujan 2021.

Zahvaljujem se svojem mentoru prof. dr. sc. Vladimiru Dananiću na vrlo zanimljivoj temi, susretljivosti i savjetima prilikom izrade završnog rada.

Posebno želim zahvaliti svojoj obitelji na velikoj podršci i strpljenju.

SAŽETAK RADA

Kemijski sastav sunca predstavlja temelj astronomije. Njegovo poznavanje uvelike nam pomaže u shvaćanju Sunčeve unutrašnjosti, evolucije i općenito čitavog solarnog sustava jer su sva kozmička tijela u suštini jednakog kemijskog sastava. Metode koje se u ovu svrhu koriste i koje će u ovome radu biti opisane su solarna (apsorpcijska) spektroskopija te masena spektroskopija primitivnih meteorita. Apsorpcijskom spektroskopijom Sunčeve svijetlosti dobiva se određeni spektar prepun apsorpcijskih linija. Svaki pojedini element, odnosno njegov atom ima svoj karakterističan “otisak” u dobivenom spektru. Spektar atoma određenog elementa prikaz je njegove atomske građe, a sastavljen je od niza tamnih spektralnih linija upravo svojstvene za određeni atom. Na taj način može se zaključiti o kemijskom sastavu Sunca i njegove atmosfere te je upravo to temelj spektralne analize. Tradicionalno se solarna spektroskopija izvodila u 1D modelima atmosfere uz određena pojednostavljenja, međutim danas se koriste sve sofisticiraniji i realniji 3D modeli, čime se dobivaju bolji rezultati stoga je prethodne potrebno korigirati. Masena spektroskopija izvodi se u adekvatnim laboratorijima, u kojima se s vrlo visokom preciznošću određuje kemijski sastav određenog tijela, ovdje meteorita. Analiziraju se najprimitivniji meteoriti, a obilnosti elemenata koje se pritom dobiju poslužuju kao odlična komparacija sa obilnostima dobivenim solarnom spektroskopijom. Kemijski sastav Sunčeve atmosfere nije jednak solarnom. Naime, postoje značajna odstupanja i to je primarno uzrokovano veoma visokim temperaturnim skokom između donjeg i gornjeg dijela atmosfere. Obilnosti elemenata se pritom mijenjaju što ovisi o njihovom prvom ionizacijskom potencijalu (FIP), što će u daljnjem radu biti i prikazano.

Ključne riječi: kemijski sastav Sunca, solarna spektroskopija, apsorpcijski spektar, masena spektroskopija, primitivni meteoriti, model atmosfere, prvi ionizacijski potencijal

ABSTRACT

The chemical composition of the sun is the foundation of astronomy. Its knowledge greatly helps us to understand the solar interior, evolution and the entire solar system in general because all cosmic bodies are essentially made of the same chemical components. The methods used for this purpose, and which will be described in this paper, are solar (absorption) spectroscopy and mass spectroscopy of primitive meteorites. Absorption spectroscopy of sunlight gives a certain spectrum full of absorption lines. Each individual element, in other words its atom, has its characteristic "imprint" in the obtained spectrum. The spectrum of an atom of a certain element is a representation of its atomic structure and it is composed of a series of dark spectral lines specific to a particular atom. In this way, one can conclude about the chemical composition of the Sun and its atmosphere and this is precisely the basis of spectral analysis. Traditionally, solar spectroscopy was performed in 1D models of the atmosphere with some simplifications, but today more and more sophisticated and realistic 3D models are used, which gives better results, so the previous ones need to be corrected. Mass spectroscopy is performed in adequate laboratories, in which the chemical composition of a particular body, here a meteorite, is determined with very high precision. The most primitive meteorites are analyzed, and the abundances of the elements obtained serve as an excellent comparison with the abundances obtained by solar spectroscopy. The chemical composition of the solar atmosphere is not equal to that of the sun. Namely, there are significant deviations and this is primarily caused by a very high temperature jump between the lower and upper part of the atmosphere. The abundances of the elements change depending on their first ionization potential (FIP), which will be shown in further work.

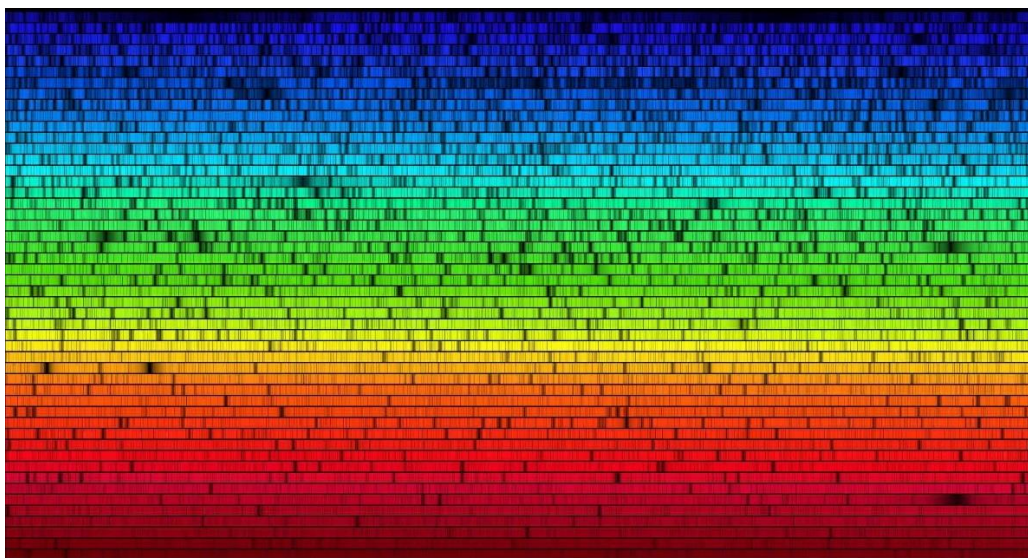
Keywords: chemical composition of the Sun, solar spectroscopy, absorption spectrum, mass spectroscopy, primitive meteorites, atmospheric model, first ionization potential

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
1.1. Modeliranje solarnih atmosfera i linija	2
1.2. NLTE I LTE aproksimacija	4
1.2.1. LTE	5
1.2.2. Kineticki ekvilibrij-NLTE	5
2. PIONIRI ASTRONOMIJE I PROTO SUNCE	7
2.1. Joseph von Fraunhofer.....	7
2.2. Cecilia Payne Gaposchkin.....	9
2.3. Proto-sunce	11
3. ANALIZIRANE OBILNOSTI SOLARNIH ELEMENATA.....	13
3.1. Lakši elementi.....	13
3.2. Ugljik, dušik i kisik.....	14
3.2.1. Zabranjene linije	15
3.3. Elementi srednjih masa	16
3.4. Elementi od skandija do nikla	19
3.5. Teški elementi- od bakra do uranija.....	22
3.6. Elementi analizirani iz sunčevih pjega- fluor, klor, indij i talij	26
4. NEIZRAVNO ODEĐIVANJE SOLARNIH OBILNOSTI- Plemeniti plinovi	28
5. IZOTOPSKE OBILNOSTI	32
6. OBILJA ELEMENATA ODREĐENA IZ PRIMITIVNIH METEORITA	34
7. SUNČEVA ATMOSFERA.....	36
7.1. Sunčeva korona	36
7.2. Kromosfera.....	39
7.3. Solarne energetske čestice i solarni vjetar.....	40
8. ZAKLJUČAK	42
9. POPIS LITERATURE	43

1. UVOD

Težnja za detaljnom spoznajom o rasprostranjenosti elemenata u Sunčevom sustavu predstavlja glavnu ulogu u razvoju moderne astronomije. Kemijski sastav Sunca jest fundament u astronomiji jer su sva kozmička tijela uključujući planete, zvijezde, maglice itd. suštinski jednakog kemijskog sastava [1]. Postoje dvije neovisne, no komplementarne metode kojima je moguće odrediti obilnosti elemenata u Sunčevom sustavu. Naravno, svaka pojedinačno ima svoje prednosti i nedostatke. To su metoda solarne (apsorpcijske) i masene spektroskopije meteorita [1], a općenito spektroskopija predstavlja znanost koja se bavi proučavanjem interakcije materije i elektromagnetskog zračenja [2]. Ona je kao takva izrazito bitna za istraživanje fizičkih i kemijskih svojstava nebeskih tijela. Kao rezultat apsorpcijske spektroskopije dobiva se određeni spektar. Spektar atoma određenog elementa jest upravo prikaz njegove građe atoma, a sastavljen je od niza spektralnih tamnih linija koje su svojstvene za pojedini kemijski element. Stoga se promatranjem izvora Sunčeve svjetlosti može zaključiti njegov kemijski sastav [2].



Slika 1. Solarni spektar [3]

Masena spektroskopija meteorita odvija se u za to primjerenim laboratorijima. U njima je moguće vrlo precizno direktno odrediti kemijski sastav određenog tijela. U tu svrhu se analiziraju ugljični (C1) kondriti, kao najčišća vrsta kamenih meteorita koji se s vremenom nisu znatno modificirali. Međutim, hlapivi elementi poput vodika, helija, ugljika, neona i dr. su iscrpljeni. S

obzirom da je Sunce, što će kasnije biti i prikazano, uglavnom sastavljeno od istih, ne možemo se u potpunosti osloniti na masenu spektroskopiju kondrita već ona ima komparativnu ulogu [1].

Poznavanje kemijskog sastava Sunčeve atmosfere uvelike nam pomaže u shvaćanju kako solarnog sustava općenito, tako i Sunčeve unutrašnjosti i evolucije. No taj sastav nije moguće najpreciznije odrediti ili direktno izmjeriti, stoga se rasprostranjenost elemenata mora pretpostaviti [1]. Zbog ove činjenice potrebno je koristiti sofisticirane modele stelarnih atmosfera pri spektroskopskoj analizi i zato se podaci o kemijskom sastavu Sunca vremenom ažuriraju pri čemu dolazi i do znatnijih razlika u vrijednostima obilnosti elemenata [4].

Solarna spektroskopija tradicionalno se izvodila u jednodimenzionalnim modelima atmosfera., ali danas se koriste visoko realistični trodimenzionalni hidrodinamički solarni modeli koji pružaju puno bolje rezultate te su u odnosu na prethodne 1D modele superiorniji [4].

Također je važno spomenuti pojmove lokalnog termodinamičkog ekvilibrija (LTE) i suprotnog NLTE. LTE predstavlja svojevrsnu aproksimaciju koja je za određene spektralne linije stvorene u fotosferi prihvatljiva, međutim dobivene vrijednosti nisu nužno ispravne (moguća odstupanja), stoga se vrijednosti ne mogu pretpostaviti sa sigurnošću. Zato je poželjno implementirati 3D nLTE modele koji ne zanemaruju mogućnosti raznih procesa zračenja i kolizija atoma [4].

1.1. Modeliranje solarnih atmosfera i linija

Iako je kemijski sastav zvijezde kodiran u njenom spektru, nije ga moguće odmah ekstrahirati bez prethodnog modeliranja zvjezdane atmosfere i procesa formiranja linija. Budući da se rasprostranjenost zvjezdanih elemenata dobiva, a ne promatra, oni su nužno ovisni o modelu. S obzirom da su realističniji modeli sve dostupniji, procijenjeni broj zvijezda može s vremenom varirati. Jednako su važni poboljšani atomski i molekularni podaci. Napredak u oba područja su od iznimne važnosti. Ona su također komplementarna jer realnije modeliranje može otkriti nedostatke u ulaznim atomskim podacima i obrnuto [4].

Kao što je već ranije navedeno, standardne analize obilnosti elemenata u zvijezdama koriste vremenski neovisne, jednodimenzionalne (1D) modele atmosfera u hidrostatičkoj ravnoteži. U osnovi takvi modeli dolaze u dvije vrste: teorijski i polu-empirijski [1]. Hidrostatska ravnoteža zvijezde u astrofizici označava stanje u kojem se zvijezda niti ne širi niti skuplja.

Točnije, to je stanje u kojem su sila gravitacije F_g (koja djeluje prema središtu zvijezde) i sila gradijenta tlaka F_p (koja djeluje od središta) izjednačene. Takvu ravnotežu karakterizira sposobnost samoregulacija, odnosno ako stvaranje energije u jezgri počinje usporavati, tada gravitacijska sila nadvlada silu gradijenta tlaka i zvijezda se skuplja. Skupljanjem raste tlak plina i temperatura, čime se povećava sila gradijenta tlaka i time do povratka ravnoteže [6].

Polu-empirijske modele često preferiraju znanstvenici koji se bave solarnom spektroskopijom. Temperature se u takvim modelima zaključuju iz promatranja ovisnih o dubini. Hidrostatička ravnoteža još se pretpostavlja u polu-empirijskim modelima, no kriterij konstantnog toka nije nužan kao što nije potrebna niti procjena transporta konvektivne energije [1].

U novije su se vrijeme počele izvoditi 3D, hidrodinamičke, vremenski ovisne simulacije konvekcija zvjezdanih površina. U takvim modelima se standardne jednadžbe očuvanja mase, impulsa i energije rješavaju zajedno s 3D jednadžbom prijenosa zračenja u malom, međutim reprezentativnom volumenu zvjezdane atmosfere. Izmjena energije radijacijom je ključna s plinom u površinskim slojevima, jer upravo to pokreće konvektivna gibanja. Takvo hidrodinamičko modeliranje računski je iznimno zahtjevno, stoga su aproksimacije neophodne. Postoje razni modeli takve vrste koji se koriste u analizama te iako se računaju s različitim kodovima, temelje se na mnogim jednakim fizičkim pretpostavkama i aproksimacijama. Zbog toga rezultirajuće strukture atmosfera mogu biti vrlo slične. 3D modeli izračunati su korištenjem realne i sveobuhvatne jednadžbe stanja, kontinuirane i linijske neprozirnosti. Numerička razlučivost je zadovoljavajuća te se granulacija može adekvatno razriješiti, međutim nije dovoljno visoka da dosegne mikroskopske ljestvice viskozne disipacije [4].

S prikladno realnom atmosferom solarnog modela, sljedeći korak u pokušaju zaključivanja kemijskog sastava Sunca jest modeliranje načina formiranja spektra. Kako bi izveli obilnosti kemijskih elemenata, znanstvenici mjere ukupnu promatranu jačinu linije koja je definirana ekvivalentnom širinom ili izravno kompariraju promatrane i teoretske spektre kroz preklapanje profila linija. Konačno, za izračun jačine linije potrebno je poznavanje razine populacija. U LTE - u to izravno slijedi iz lokalne temperature i tlaka elektrona pomoću Boltzmannove i Sahine raspodjele. Općenito se ne može očekivati da će ovakvo poprilično ozbiljno pojednostavljenje biti ispravno, stoga je potrebno razmotriti NLTE slučaj. NLTE je opći pojam koji pokriva sve situacije kada LTE nije važeći. U praksi svi izračuni pretpostavljaju statističku ravnotežu, tj. razine populacija se vremenom ne mijenjaju. Stoga NLTE zahtijeva istovremeno rješenje jednadžbi

brzine za sve relevantne razine i vrste zajedno s jednadžbom prijenosa zračenja za sve relevantne valne duljine [1].

Sofisticiranije modeliranje nužno ne implicira automatsko i realnije rješenje. Vrlo je važno pažljivo testirati predviđanja atmosfera 3D modela na temelju. Međutim imajući na raspolaganju 3D hidrodinamičke modele solarnih atmosfera sada je moguće postići vrlo zadovoljavajuća slaganja s uočenim profilima tipičnih slabih i srednjih jakih linija [4]. Analize kemijskog sastava solarne fotosfere koriste “otiske” elemenata prisutne u solarnom spektru u obliku spektralnih apsorpcijskih linija. Analize su provedene pomoću nekoliko modela atmosfera u 1D i 3D, te kad god je to moguće, uzimaju se u obzir NLTE efekti, a sve je učinjeno s istim pomno provjerenim računalnim kodovima. Širok je raspon potencijalnih izvora pogrešaka u analizama obilnosti elemenata Sunca i zvijezda, počevši od netočnih ulaznih podataka za prijelaze (gf-vrijednosti, proširenje linija itd.), pa do otežane procjene jačina linija ili nedostataka pri modeliranju. U literaturi ne postoji opći konsenzus o tome kako kvantificirati neizvjesnosti pri analizi obilnosti elemenata. Jedini način na koji se potencijalne pogreške mogu uključiti jest sistemska pogreška [4].

Brojnosti su izražene na tradicionalnoj astronomskoj logaritamskoj ljestvici obilnosti. Vodik je prirodni referentni element za solarnu (zvjezdanu) spektroskopiju, zbog toga što je najrasprostranjeniji element i zbog toga što osigurava kontinuiranu neprozirnost u optičkoj i infracrvenoj svjetlosti preko negativnog vodikovog iona [1].

1.2. NLTE I LTE aproksimacija

Ako pretpostavimo da smo uz pomoć nekog spektrografa i teleskopa opazili zvjezdani spektar te da smo ga pomoću određenog programa umanjili. Tako dobiveni spektar spreman je za analizu. Ako se želi napraviti analiza atmosfere modela takvog spektra, potrebno je slijediti nekoliko koraka uz implementaciju različite vrste softvera. Najprije se izračuna model atmosfere, što se može učiniti primjenom pretpostavke, odnosno aproksimacije o lokalnoj termodinamičkoj ravnoteži (LTE) ili bez ove restriktivne pretpostavke koja dopušta da se populacija atomske razine razlikuje od njihovih ravnotežnih vrijednosti (NLTE). Pomoću izračuna modela atmosfere određuje se detaljan spektar. Posljednji korak analize je usporedba teorijskog spektra s promatranjima, što se također može učiniti pomoću računalnog koda, kao što je korišteno i za svaki

prethodni korak. Za svaki se korak ovog postupka koriste različiti računalni kodovi. Međutim, određeni dio korisnika se uglavnom fokusira na posljednji korak (na usporedbu opažanja s teorijskim spektrom) te su zadovoljni kada opažanja odgovaraju teorijskom spektru. Ne zamaraju se detaljima proračuna modela atmosfere i pretpostavkama. No, dobro preklapanje pojednostavljenog modela nužno ne implicira da je ono i prihvatljivo. Uzimanjem u obzir više mogućih pretpostavki općenito vodi do preciznijih modela, pa tako i do boljih rezultata. Stoga je prelazak na NLTE pretpostavku korak prema kvalitetnijim modelima. Početni korak proračuna atmosfere modela uvelike ovisi o pretpostavci LTE/NLTE [6].

1.2.1. LTE

Termodinamička ravnoteža ne može se koristiti za opis zvjezdane atmosfere. Kao što je vidljivo iz promatranja zvjezdanih spektara, zvjezdano zračenje ne slijedi Planckovu raspodjelu. Da bismo opisali zvjezdanu atmosferu, koja predstavlja prijelaz iz guste i vruće zvijezde u gotovo prazan i hladan međuzvjezdani medij, potrebno je uvesti mogućnost o gustoći i temperaturi koje su ovisne o dubini u zvjezdanoj atmosferi. Ovo također omogućuje izlazak zračenja iz zvjezdane atmosfere. Kako bi se očuvala prednost termodinamičke ravnoteže, uvodi se lokalna termodinamička ravnoteža, LTE, u kojoj su Maxwell-ova raspodjela brzina čestica i Saha-Boltzmannova raspodjela pobuđenih i ionizacijskih stanja na lokalnoj razini ispravna, upotrebom lokalne vrijednosti temperature T i gustoće elektrona. Polje radijacije nije u ravnoteži (nema Planckovu distribuciju) [6].

1.2.2. Kinetički ekvilibrij-NLTE

Pretpostavka kinetičke ravnoteže općenitija je od pretpostavke lokalne termodinamičke ravnoteže. U kinetičkoj ravnoteži polje radijacije određuje se rješavanjem jednadžbe prijenosa zračenja i koristimo funkciju izvora [6].

Pretpostavlja se da su brzine čestica ravnotežne (Maxwellova raspodjela). Ova se aproksimacija naziva non-LTE ili NLTE te nalikuje na negacija ravnoteže. Međutim to nije slučaj, budući da u ovoj "neravnoteži" još uvijek postoje brzine čestica koje su u ravnoteži (na što i sam naziv "kinetički" ekvilibrij upućuje). Također i sami prošireni pojam NLTE-a, „ne-lokalna termodinamička ravnoteža“ ne treba doslovno shvaćati jer može doći do konfuzije. Točnije, pod

pojmom ne-LTE podrazumijeva se svako stanje koje pokazuje odstupanje od LTE-a. Stoga je prikladnije ovu aproksimaciju nazvati kinetičkom ravnotežom, za razliku od uobičajenog, netočnog izraza statistička ravnoteža. Koliko će raspodjela pobuđenih stanja doći do ravnotežnog, ovisi o ravnoteži između zračenja i sudara. Ako dominiraju sudari, tada je raspodjela blizu ravnotežne. S druge strane, ako dominiraju procesi zračenja, tada raspodjela može značajno odstupati ravnotežne. Sudari općenito teže uspostavljanju ravnoteže (budući da čestice imaju ravnotežne raspodjele brzina), procesi radijacije ju nastoje uništiti ako polje zračenja nije u ravnoteži (karakteristično u zvjezdanim atmosferama) [6].

I u lokalnoj termodinamičkoj ravnoteži (LTE) i u kinetičkoj ravnoteži (NLTE) pretpostavlja se Maxwelllova (ravnotežna) raspodjela brzina čestica. Ravnotežnu raspodjelu brzine odražavaju česti elastični sudari, dok ju oni neelastični nastoje prekinuti. Međutim, ako je vrlo velik broj elastičnih sudara između dva neelastična, svako odstupanje od ravnoteže uzrokovano neelastičnim sudarima brzo se kompenzira i ravnoteža ostaje sačuvana. Za raspodjelu ravnotežne brzine potrebno je da vrijeme relaksacije bude što kraće i puno manje od vremena između neelastičnih sudara. Ovaj uvjet je u zvjezdanoj atmosferi ispunjen u većini slučajeva, stoga se pretpostavlja ravnotežna raspodjela čestica. Temeljna razlika između LTE i NLTE je ponašanje izračunatih populacija atomske razine. LTE aproksimacija omogućuje njihov relativno jednostavan i brz izračun pomoću Saha-Boltzmannove distribucije. NLTE aproksimacija uzima u obzir činjenicu da polje zračenja utječe na razinu populacije [6].

NLTE (ili ne-LTE) označava odstupanje od LTE aproksimacije što u zvjezdanoj atmosferi podrazumijeva da:

- polje zračenja nije u termodinamičkoj ravnoteži, njegov intenzitet se određuje iz jednadžbe prijenosa zračenja
- stanje pobude i ionizacije tvari nije u termodinamičkoj ravnoteži, razine populacija se određuju iz jednadžbi kinetičke ravnoteže
- brzine čestica su u termodinamičkoj ravnoteži, poštuju Maxwelllovu raspodjelu

Opisana NLTE aproksimacija daje znatno bolji i reprezentativniji opis stvarnosti od "standardne" aproksimacije LTE -a, stoga je i poželjnija pri stelarnim analizama [6].

2. PIONIRI ASTRONOMIJE I PROTO SUNCE

2.1. Joseph von Fraunhofer

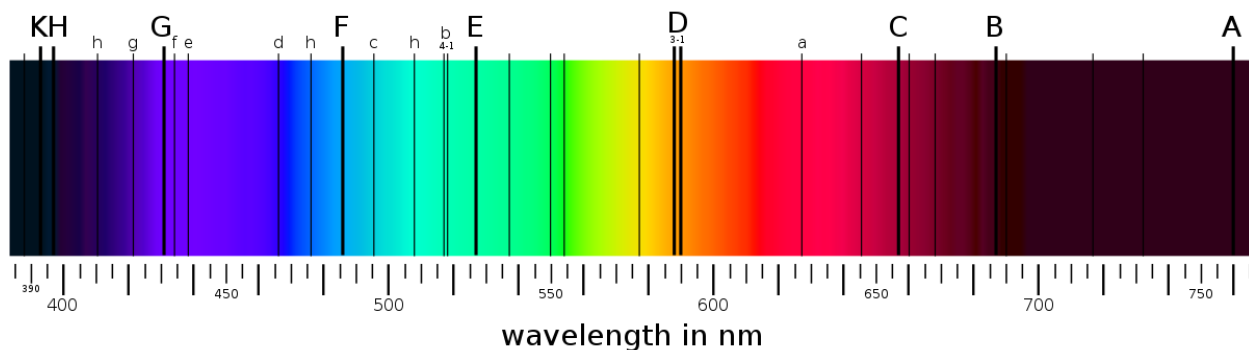
Sunce je najsjajnija zvijezda na našem nebu. Apsorpcijske linije u solarnom spektru prvi je put primijetio engleski astronom 1802. godine, no njemački fizičar Joseph von Fraunhofer, prvi je izmjerio i razvrstao preko 600 linija desetak godina kasnije. Te su linije danas poznate kao "Fraunhoferove linije". 1800 -ih godina znanstvenici nisu znali što te linije predstavljaju da te da su kemijskog podrijetla. Slova koja je Fraunhofer koristio za identifikaciju linija nemaju veze s kemijskim simbolima. Međutim, sada je poznato da svaka je svaka od tih apsorpcijskih linija uzrokovana prijelazom elektrona između energetske nivoa u atomu. Svaki pojedini element ima specifičan uzorak apsorpcijskih linija. Promatranjem linija određenog elementa u laboratorijima moguće je utvrditi da li je taj element prisutan drugdje u svemiru jednostavnom komparacijom s teorijskom spektrom linija [7].

Helij je prvi otkriveni plemeniti plin. U Indiji 1868. Godine spektroskopska istraživanja Sunčeve kromosfere tijekom pomrčine Sunca otkrila su nepoznatu liniju, po valnoj duljini blisku Fraunhoferovim natrijevim D1 i D2 linijama. Novootkrivena linija dobiva oznaku D3, a element koji predstavlja helij, što na grčkome jeziku znači sunce (Helios- grčki bog Sunca). 25 godina kasnije helij se otkriva i na Zemlji. Atomska spektroskopija je u posljednjih 400 godina doživjela procvat. Ključno znanstveno otkriće koje je razvilo optičku atomsku spektrometriju prezentirao je Isaac Newton 1666. Godine. Prikazao je podjelu svjetlosti Sunca u kontinuirani spektar boja pomoću staklene prizme. Wollaston je 1802. prvi primijetio tamne linije u spektru Sunca, ali Fraunhofer ih je detaljno proučavao. Međutim, nisu mogli objasniti značenje tih linija kao ni samu pojavu [8].

Kasnije je Kirchhoff, uz pomoć Bunsena koji je povezao Fraunhoferove linije s emisijama u bojama nastalih pri spaljivanju natrijeve soli u plamenu i prikazao da su Fraunhoferove linije nastale apsorpcijom bijele Sunčeve svjetlosti u atomu natrija i time definiran fenomen apsorpcije i emisije atoma [2].

Prolaskom sunčeve svjetlosti kroz prizmu, propuštena svjetlost razbijena je u spektar duginih boja. Pomnijim promatranjem dobivenog spektra, moguće je uočiti mnoštvo tamnih karakteristika. To su apsorpcijske linije koje su uzrokovane tzv. nečistoćama poput kalcija, natrija,

željeza, magnezija itd. Vodik predstavlja vodeći element Sunca, a nečistoće prisutne u malim količinama apsorbiraju svjetlost koja dolazi iz unutrašnjosti na određenim valnim duljinama i upravo to rezultira tamnim obilježjima na promatranom spektru [7].



Slika 2. Primjer Fraunhoferovih linija [2]

Fraunhofer je označio glavne značajke slovima od A do K od duže valne duljine (crvenije) do kraće (plavije). Na primjer, liniju D uzrokuje natrij, a linije H i K kalcij [2].

Fraunhoferove linije su od iznimne važnosti solarnim fizičarima. Dubine apsorpcijskih linija pružaju informacije o temperaturi, dok pomaci valnih duljina linija govore o gibanju plina. Da je vodik jedini sastavni element Sunca, apsorpcijska linija nebi niti postojala [8].

Spektroskopska opažanja daju nam dvije vrste informacija: podatke o kemijskom sastavu i o kretanju tijela. Emisijske i apsorpcijske linije odgovaraju specifičnim atomima i molekulama. Intenzitet takvih linija govori nam koje vrste i koja količina atoma i molekula postoje u promatranom objektu [2]. Spektri također sadrže podatke o temperaturi i tlaku objekta. Dopplerovim efektom izvode se gibanja objekta. Udaljavanjem objekta od promatrača, valna duljina primljene svjetlosti je veća. U obrnutom slučaju, kada se object približava, valna duljina je kraća. Na taj način možemo mjeriti kretanje objekata analizom pomaka spektralne linije, i takva vrsta gibanja naziva se radijalna brzina [8].

2.2. Cecilia Payne Gaposchkin

Još jedno iznimno važno ime, koja je udarila temelje moderne astrofizike odgovorivši na pitanje sastava Sunca i zvijezda.

Cecilia Payne uspješno je dekodirala složene spektre svjetlosti zvijezda, u svrhu pronalaska relativnih količina kemijskih elemenata u zvijezdama. Takve spektre astronomi dobivaju pričvršćivanjem spektroskopa na teleskop. Instrument širi svjetlost zvijezda u spektre duginih boja, i time obuhvaća sve valne duljine vidljive svjetlosti. Od ljubičastog do crvenog kraja spektra valna duljina raste, odnosno raste kako se energija zračenja smanjuje. Tipičan zvjezdani spektar ima mnogo uskih tamnih “praznina” na određenim valnim duljinama ili energijama te na tim mjestima nedostaje svjetlost. Te takozvane praznine su već poznate apsorpcijske linije, a posljedica su prisutnosti raznih kemijskih elemenata u zvjezdanoj atmosferi koji apsorbiraju svjetlost koja dolazi iz vruće unutrašnjosti prema van [9].

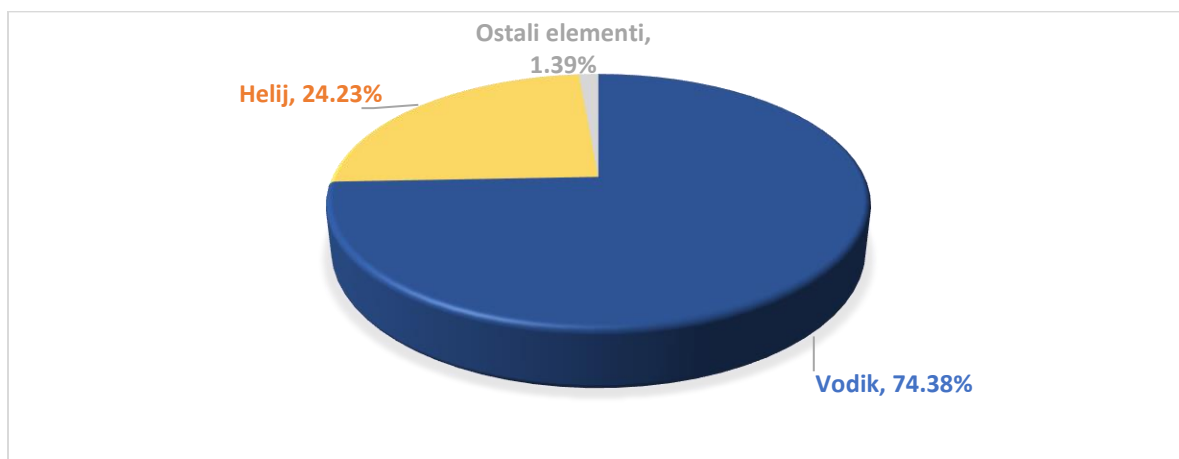
Proučavanje spektara dovelo je značajnog razvitka znanosti astrofizike. 1859. Gustav Kirchhoff i Robert Bunsen zagrijavali su različite kemijske elemente i potom promatrali dobivene spektre svjetlosti užarenih plinova. Shvatili su da svaki pojedini element ima vlastiti karakterističan skup spektralnih linija, odnosno svoj jedinstveni identificirajući otisak. 1863. znanstvenik William Huggins opazio je identičnu pojavu u spektrima zvijezda, te zaključio da isti kemijski elementi sastavni dio svemira kao i Zemlje [9].

U načelu se smatralo da je do kemijskog sastava zvijezda moguće doći jednostavnom usporedbom njihovih spektralnih linija s onima već od poznatih kemijskih elemenata ranije promatranih u laboratoriju. Identificirani kalcij i željezo smatrani su kao najutjecajniji elementi odgovorni za neke od najistaknutijih spektralnih linija. Astronomi su pretpostavili da su takvi teški elementi među glavnim sastavnim elementima zvijezda. Henry Norris Russell je čak iznio tezu da bi Zemljina kora, zagrijana na temperaturu Sunca, pokazivala identičan spektar [9].

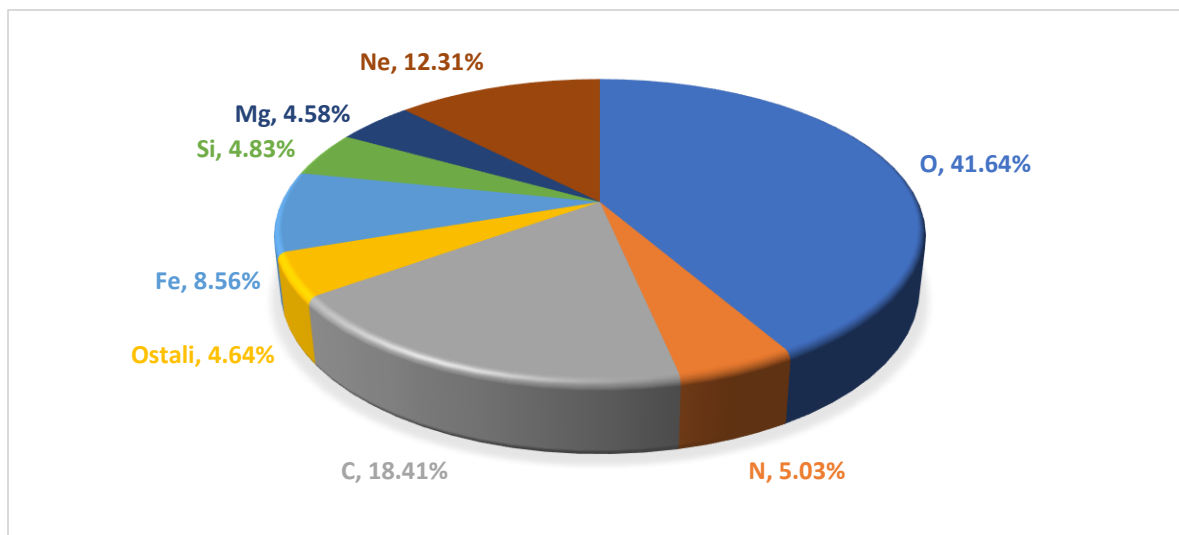
S obzirom da je Cecilia Payne proučavala znanost kvantne fizike, znala je da su značajke uzorka u spektru bilo kojeg atoma određene konfiguracijom njegovih elektrona. Također je znala da se pri visokim temperaturama elektron ili više njih izbijaju od atoma. Tom pojavom nastaju ioni. Indijski fizičar M. N. Saha nedavno je prikazao je korelaciju između temperature, tlaka i stupnja ionizacije različitih atoma elemenata u stelarnim atmosferama.

Međutim, Cecilia Payne pokazala je da su odstupanja i velike razlike u zvjezdanim spektrima uglavnom posljedica različitih ionizacijskih stanja atoma. Razlog tome su isključivo različite

površinske temperature zvijezda, a ne različite količine elemenata. Izračunala je relativne količine osamnaest elemenata i zaključila da su različitim vrstama zvijezda sastavi gotovo pa isti. Također je došla do još jednog iznenađujućeg saznanja, otkrila je da su Sunce i ostale zvijezde gotovo u potpunosti sastavljene od samo dva, najlakša elementa, vodika i helija [9]. Svi oni teži elementi koji primjerice sačinjavaju najveći dio Zemlje, prisutni su u masenom udjelu manjem od dva posto od ukupne mase zvijezde (Sunca) [4].



Slika 3. Maseni udio solarnih elemenata, uključujući H i He [4]



Slika 4. Relativni maseni udjeli najrasprostranjenijih teških elemenata s visoko hlapljivim C, N, O i Ne [4]

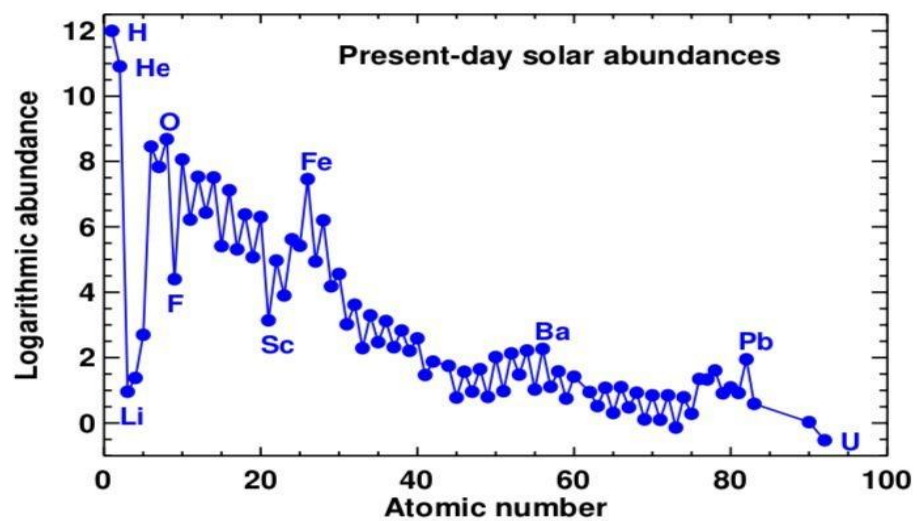
Najlakši element, vodik, čini glavninu mase vidljivog svemira. Ovo revolucionarno otkriće pobilo je prethodne teorije o tome da su teži elementi zapravo ti koji su sastavni [9].

2.3. Proto-sunce

Sunce čini preko 99,85% ukupne mase solarnog sustava. Zbog te činjenice možemo sa sigurnošću poopćiti kemijski sastav Sunca kao sastav cijelog sustava. Današnja rasprostranjenost solarnih elemenata se razlikuje od one protosolarne, prije gotovo 4,5 milijardu godina i to zbog raznih nuklearnih procesa, radioaktivnih raspada i difuzija. Nuklearni procesi utjecali su na obilje litija i moguće berilija, koji su uglavnom uništeni u konvektivnoj zoni. To je također vidljivo u komparaciji spektroskopskih vrijednosti s onim meteoritskima, odnosno njihovom razlikom. U površinske slojeve Sunca nije dospio niti jedan nuklearni produkt izgaranja vodika u jezgri. Što se tiče radioaktivnih raspada, elementi poput radioaktivno nestabilnog torija (Th) ili uranija (U) danas imaju puno manju obilnost nego što je bila protosolarna. Njihove vrijednosti određuju se iz vremena poluraspada. Elementi teži od vodika su se djelomično slegnuli u unutrašnju zonu radijacije iz konvektivne zone, zbog procesa gravitacijskog taloženja, radijacijskog ubrzanja i mikroskopske toplinske difuzije, čiji je skupni naziv atomska difuzija [4].

Svaki element u fotosferi koji je teži od vodika izgubio je vremenom na obilnosti i to za otprilike 10-20%, dok se vodik difundirao. Sunce neprekidno gubi na masi, koja izlazi kroz vanjske slojeve u obliku solarnog vjetra [10].

Sunce ima radijalni gradijent obilnosti elemenata, tj. nejednoliki kemijski sastav. Reakcijom izgaranja vodika u Sunčevoj jezgri postupno reducira njegovu količinu, a količina helija raste. Energija se u Suncu zračenjem prenosi iz jezgre prema van. Konvektivni sloj relativno je homogen po sastavu i ne izmjenjuje puno tvari sa jezgrom. S obzirom da je fotosfera blizu vrha konvektivnog sloja, ona može dati reprezentativnu sliku kemijskog sastava Sunca. Međutim ona ne može prikazati izvorni proto-solarni sastav zbog prelaska težih elemenata iz konvektivne zone u unutrašnjost uslijed djelovanja gravitacije tijekom vremena. No, relativne obilnosti elemenata težih od helija otprilike su nepromijenjene, odnosno takva je pretpostavka. Eventualna odstupanja pri usporedbi s meteoritskim vrijednostima nije moguće razriješiti, barem s trenutno raspoloživim alatima i podacima. Za omjere obilnosti takvih elemenata se stoga uzimaju konstante, međutim jedan element je u tom slučaju iznimka. Taj element je litij čija se obilnost zbog posljedice uništenja (nuklearna uništenja jezgara atoma, taloženja i dr.) drastično reducirala, točnije njegova je obilnost gotovo 170 puta manja od one meteoritske [4].



Slika 5. Solarno fotosferno obilje elemenata (logaritamsko) kao funkcija atomskog broja uz definiran $\log H=12$. Za elemente koje nije moguće odrediti putem spektroskopije iz fotosfere, dane su meteoritske vrijednosti [4]

3. ANALIZIRANE OBILNOSTI SOLARNIH ELEMENATA

Za današnji je kemijski sastav Sunca najpouzdaniji izvor spektar apsorpcijskih linija fotosfere. Međutim još uvijek nije moguće kvantificirati i odrediti sve prisutne solarne elemente, jer linija u spektru je na tisuće pri čemu nerijetko dolazi do raznoraznih preklapanja i miješanja linija. To posebice otežava detekciju i identifikaciju linija elemenata niskih potencijala. Naime, linije takvih elemenata su poprilično slabije. Elementi poput flora, klora i drugih mjere se isključivo iz hladnih sunčevih pjega, dok elementi prisutni u malim količinama posljedično mogu imati samo nekoliko korisnih linija koje pak mogu biti komplicirane za odrediti (primjerice u ultraljubičastom dijelu spektra). Linije pojedinih elemenata uopće ne postoje ili su krajnje pomiješane s drugima, pa su fotosferski izračuni vrlo nepouzdati (elementi poput Br, As, I, Se, Hg, Bi, plemeniti plinovi) [4].

3.1. Lakši elementi

Litij

Promatrana rezonantna linija litija valne duljine 670,8 nm vrlo je slaba. Razlog tome je zbog toga što je navedena linija spojena skupom linija cijanida CN i željeza Fe, stoga je određivanje obilnosti litija poprilično izazovno. Linija je također osjetljiva na temperature i na polje fotoionizirajućeg zračenja jer prijelaz proizlazi iz osnovnog stanja manjinske vrste. Za određivanje obilnosti prisutnog litija korišteni su novi 3D NLTE modeli koji uzimaju u obzir mogućnost preklapanja linija. Tako izvedena solarna količina litija iznosi $\log Li = 0,96 \pm 0,03$ (statistički) $\pm 0,05$ [1,4].

Berilij

Prijašnje uvriježeno mišljenje da je berilij iscrpljen dva puta više u solarnoj fotosferi nego u usporedbi s C1 kondritima (ranije spomenutim meteoritima) je demantirano i osporeno zbog sumnjivog nedostatka neprozirnosti UV zraka pri valnoj duljini linije berilija od 313 nm. Kalibracijom nedostajuće neprozirnosti u ovom području valnih duljina primjenom iste O količine (kao referentne) procjenom iz obližnjih ultraljubičastih OH linija s OH linijama u infracrvenom

području, otkriveno je da je solarna fotosferna količina berilija u skladu s meteoritskom vrijednošću. U svrhu ove analize također je korišten sofisticirani 3D NLTE model [1,4].

Bor

Što se ovog elementa tiče, još uvijek postoji velika nesigurnost vezana za vrijednost njegove obilnosti, $\log B = 2,70 \pm 0,20$, naprosto zbog prisutnosti poteškoća u analizi ove spektralne regije koja je prepuna. Bor se ne čini iscrpljenim u solarnoj fotosferi. O bogatstvu Sunca borom uglavnom se može zaključiti samo iz jedne rezonantne linije valne duljine 249,7 nm. Zato je rezultat prilično neizvjestan, zbog spomenute gužve i mogućeg nedostajanja neprozirnosti u ovom području valnih duljina. Najnovijom spektroskopskom analizom zaključena je (fotosferična) vrijednost od $\log B = 2,70 \pm 0,20$ iz sinteze 1D LTE spektra [1,4].

3.2. Ugljik, dušik i kisik

Četvrti, šesti i treći najrasprostranjeniji elementi po brojnosti na Suncu, C, N i O od velike su važnosti za modernu astronomiju. Oni imaju jednu od glavnih uloga u modeliranju Sunca. Kisik je dominantni izvor neprozirnosti u konvekcijskoj zoni kao najproblematičnijem području, no i ugljik i dušik imaju nezanemariv doprinos. Sva tri elementa tvore hlapljive spojeve stoga su osiromašeni i iscrpljeni u meteoritima. Njihova se prisutna količina odnosno obilnost mora zaključiti spektroskopijom solarne fotosfere [4].

Ugljik

O bogatstvu ugljika u Suncu može se zaključiti iz mnoštva pokazatelja, primjerice iz zabranjenih atomskih C(i) linija s niskim i visokim pobuđivanjem ili preko različitih molekularnih prijelaza (na pr. CH, C₂ i CO). Tijekom proteklog desetljeća obilnost solarnog ugljika pretrpjela drastičnu reviziju (i to u vidu smanjenja vrijednosti). Linija [C i] valne duljine 872,7 nm ponovno se analizira te se otkriva da je kombinacija 3D hidrodinamičkog solarnog modela i ažurirane gf-vrijednosti smanjila vrijednost na $8,39 \pm 0,04$. Identična vrijednost dobivena je i uključivanjem molekularnih linija CH, C₂ kao i C linije. Svi pokazatelji dali su dosljedne i uvjerljive rezultate, što je dodatno potvrdilo niske količine solarnog ugljika. Preporučena konačna vrijednost iznosi neznatno više od prethodno navedene, $\log C = 8,43 \pm 0,05$, jer proizlazi iz srednje vrijednosti rezultata temeljenih na 3D modelu za niz linija C (i), CH i C₂ [1,4].

Ugljik ima najveći broj dostupnih pokazatelja i vjerojatno je najbolje ograničen od tri elementa opisana u ovom odjeljku. Njegova vrijednost je izvučena iz 3D NLTE analize linije 872.7 nm, iako je ova nisko pobudna linija čak dobro reproducirana i u 3D LTE-u. Rezultat se temelji na ukupno 14 analiziranih linija čija se analiza također provodi u 3D nLTE modelu. Molekularni se pak rezultati temelje na novim 3D LTE proračunima ukupno 39 linija u sustavu C₂ i CH linija. CO linije su također uzete u obzir prihvaćanjem količine kisika koja je izvedena iz linija OH uz uključivanje pogreške u ukupniom proračunu. Predviđena obilnost solarnog ugljika je $8,46 \pm 0,04$. Ova procjena proizlazi iz ponderirane srednje vrijednosti i pogrešaka rezultata [C_i], C_i, C₂, CH i CO. Razlog za revidiranu vrijednost, nešto većeg iznosa prvenstveno se može pripisati poboljšanjima atomskih i molekularnih ulaznih podataka [4].

3.2.1. Zabranjene linije

Za emisijske linije u spektru koju emitira isključivo plin niske gustoće (kao u međuzvjezdanim područjima ili maglinama), kaže se da je zabranjena jer je njena pojava nemoguća u normalnim uvjetima na Zemlji, gdje su plinovi gušći. Zabranjena linija nastaje skokom elektrona s višeg energetskog nivoa, gdje se može dugo zadržati, na niži energetski nivo. Takav skok, odnosno prijelaz ima vrlo malu vjerojatnost prijelaza. U Zemljinoj atmosferi pobuđeni atom bi se puno prije sudario s drugim atomima ili slobodnim elektronima i posljedično izgubio energiju u tom sudaru (bez stvaranja fotona), nego da bi emitirao energiju. Međutim, u međuzvjezdanom prostoru i regijama oko vrućih zvijezda gdje je gustoća niska, ti sudari su iznimno rijetki te ima dovoljno vremena za spontani raspad atoma [11,12].

Dušik

Obilnost dušika može se odrediti preko atomskih i molekularnih linija, iako su zabranjene [N i] linije u Sunčevom spektru preslabe da bi se mogle mjeriti. Molekularne linije CN i NH također su uzete u obzir. Predviđena vrijednost obilnosti solarnog dušika iznosi $7,83 \pm 0,07$ [1,4].

Za razliku od ugljika čija se obilnost može odrediti iz mnoštva pokazatelja, relativno je malo dobrih za određivanje solarnog dušika. Nema vidljivih [N i] linija u Sunčevom spektru, dok je samo pet ioniziranih N (i) linija identificirano kao dovoljno jake i nepomiješane za pouzdano mjerenje. NH rovibracijske linije također su uključene, a podijeljene su u dvije skupine koje se sastoje od 13 čistih rotacijskih i 15 temeljnih linija. Linije CN također su uzete u obzir

prihvatanjem ponderiranih prosječnih količina ugljika na temelju C2, CH i CO linija. Nerijetko se navodi da su molekularne linije osjetljivije na temperaturu od atomskih linija, no NH linije ukazuju na suprotnost jer su manje osjetljive od visoko pobuđenih N (i) linija [4].

Kisik

Kisik je najzastupljeniji element u svemiru koji nije proizveden u Velikom prasku, a ukupno je treći po rasprostranjenosti. Kisik i njegovi izotopi predstavljaju ključne pokazatelje nastanka i evolucije planeta, zvijezda i galaksija. Upravo je zbog toga jedan od najvažnijih elemenata u astronomiji. O brojnosti solarnog kisika može se zaključiti iz niza različitih atomskih i molekularnih pokazatelja [1].

Profil linije valne duljine 630 nm upućuje na preklapanje s Ni (i) linijom, što je i eksperimentalno potvrđeno. Implementacijom naprednijih modela i prepoznavanjem prisutnih preklapanja linija dovelo je do značajnog smanjenja količine solarnog kisika od prijašnje vrijednosti. Osim linije 630 nm, postoje još dva prijelaza koja mogu poslužiti. Linija od 636 nm nalazi se usred vrlo široke Ca (i) autoionizacijske linije, a prisutna su i preklapanja s CN I C₂ linijama, čiji se doprinos može precizno predvidjeti iz susjednih linija. Linija 636 nm daje veću vrijednost od linije 630 nm. Linija od 557 nm također je uključena, a nalazi se točno između dva zabranjena prijelaza. Za atomske pokazatelje analizirane su spektralne linije [O i] 557,7 nm, 630,0 nm i 636,4 nm te linije od 615,8 nm, 777 nm, 844,7 nm i 926,9 nm korištenjem 3D NLTE modela atmosfere. Molekularni rezultati temelje se na novim 3D LTE proračunima OH linija. Predviđena obilnost solarnog kisika iznosi $8,69 \pm 0,04$ [1,4].

U konačnici, za [O i] gotovo je sva težina dana liniji 630,0 nm nakon razmatranja relativnih poteškoća u modeliranju odgovarajućih kontinuumu i miješanju doprinosa. Također je najveću težinu dobila linija od 777 nm [4].

3.3. Elementi srednjih masa

Natrij

Natrij je zbog svoje vrlo niske energije ionizacije, 5.14 eV [13], u cijeloj fotosferi prisutan kao Na (ii). Nijedna linija Na (ii) nije dostupna u solarnom spektru, ali je nekoliko linija Na (i) prisutno. Neke od njih su pomiješane (preklapaju se s drugim linijama), stoga se ne mogu smatrati

pouzdanim pokazateljima obilnosti natrija u Suncu. Natrij se određuje iz pet slabih linija Na (i), koje su dale zadovoljavajuće rezultate s minimalnim odstupanjem [1,4].

Analize su temeljene na 3D LTE modeli koji je korigiran za NLTE učinke korištenjem modela atmosfere 1D. Međutim, 3D NLTE učinci su mali i zapravo identični onima iz 1D modela [4,13].

Preporučena obilnost natrija (prema 3D NLTE kalkulacijama) na temelju srednje vrijednosti pet linija Na (i) iznosi $\log Na = 6,22 \pm 0,01$ (statističko) $\pm 0,03$. Naše preporučeno 3D ne-LTE bogatstvo Na, na temelju neprevagnute srednje vrijednosti pet linija Na (i), postaje $\log Na = 6,22 \pm 0,01$ (statističko) $\pm 0,03$ [4].

Magnezij

Mg (ii) je najdominantnija faza ionizacije u solarnoj fotosferi, međutim prilično je mali broj čistih i relativno slabih linija i Mg (i) i Mg (ii) dostupan u solarnom spektru [1,4].

Količina magnezija može se odrediti iz dvije faze ionizacije. Svaka faza ima mnoštvo naizgled čistih i relativno slabih linija. No, vrijednosti magnezija obje faze su strahovito neizvjesne [13], što je posljedica poprilično velikih varijacija u broju linija kod obje vrste [4].

S uključenim NLTE učincima, srednja količina Mg (ii) poklapa se s meteoritskom (C1 kondriti) vrijednošću, dok se Mg (i) mora nadoknaditi. Obje linije (Mg (i) te Mg (ii)) pri NLTE dale su prihvatljivu i zadovoljavajuću obilnost elementa, no značajno su manje u LTE-u. Zato je potrebno istaknuti važnost statističke ravnoteže NLTE u izračunima i to prvenstveno za Mg (ii) (zanemarivo za Mg i). Tako je preporučena 3D ne-LTE obilnost magnezija prosjek Mg (i) i Mg (ii) vrijednosti, s ukupnim statističkim i sustavnim pogreškama uzetima u obzir, $\log Mg = 7,55 \pm 0,03$. Također je moguće usvojiti vrijednost Mg (i), obzirom na komplikacije vezane uz Mg (ii), međutim konačan bi iznos imao bi zanemarivu razliku, tj. iznos bi bio gotovo jednak [1,4].

Aluminij

Izvršeni su potpuni 3D NLTE proračuni formiranja spektralnih linija za Al (i) linije na Suncu. Korišten je jednak 3D hidrodinamički model solarne atmosfere i 3D ne-LTE kod zračenja. Analizirano je 5 linija, od kojih je linija valne duljine 1089.1 nm eliminirana zbog telurske kontaminacije. Na temelju ostalih linija pronađena je količina sunčevog fotosfernog aluminija u vrijednosti od $\log Al = 6,43 \pm 0,03$ (statistički + sustavni) [4].

Silicij

Silicij je jedan od onih elemenata sa relativno niskom energijom ionizacije, pa je on u solarnoj fotosferi u osnovi prisutan u dvostruko ioniziranom Si (ii) obliku. Nažalost, vrlo malo kvalitetnih linija Si (ii) je na raspolaganju. Za izračun obilja silicija su izvedeni prvi potpuni proračuni formiranja 3D NLTE linija. Analizirano je devet linija Si (i) i samo jedna Si (ii) linija. Pretpostavljena obilnost solarnog (fotosfernog) silicija iznosi $\log \text{Si} = 7,51 \pm 0,03$ [4].

Fosfor

Dobivena vrijednost za fosfor iznosi $\log P = 5,41 \pm 0,03$. Ova obilnost se razlikuje od prethodnih, odnosno niže je vrijednosti zbog manjeg rasipanja linija, stoga se ona i kao preporučena. Što se tiče visokopobuđenih fosfornih Pi linija, do sada nisu provedene analize koje primjenjuju NLTE tehnologije, ali se ionako ne očekuju velika odstupanja od LTE-a. Također nema zabilježenih istraživanja fosfora niti u 3D niti u 1D NLTE modelu [1,4].

Sumpor

Izobilje solarnog sumpora ima vrijednost $\log S = 7,12 \pm 0,03$. Ovaj iznos dobiven je uključivanjem 1D NLTE korekcije 3D LTE rezultata. Ono što je također otkriveno jest da zabranjena linija [S i] valne duljine 1082 nm daje preveliku količinu, što može signalizirati neidentificirano preklapanje ili miješanje linija, da je teoretska vjerojatnost prijelaza pogrešna ili da to ranije korištenjem LTE metoda nije bilo moguće otkriti što opet pokazuje prednost nLTE modela. Usprkos tome, gore navedena obilnost sumpora je niža od vrijednosti prijašnjih istraživanja [1,4].

Kalij

Kao što je to svojstveno svim solarnim elementima vrlo niske energije ionizacije, tako je kalij u solarnoj fotosferi u potpunosti u ioniziranom K ii obliku. No, linije koje jedino koriste za izvođenje kalijeve solarne obilnosti, u solarnome spektru su K (i) linije [4].

Vrijednost koja proizlazi iz 3D modela koji uključuje lokalni termodinamički ekvilibrij (LTE) zajedno s 1D NLTE korekcijama (nedostatak 3D nLTE proračuna) iznosi $\log K = 5,04 \pm 0,05$. Analizirano je pet relativno slabih linija, no prisutne su i dvije jake rezonantne K (i) linije valnih

duljina 766.5 i 769.9 nanometara koje su isključene za analizu (obje linije imaju izražene jačine i NLTE efekte čime bi obilnost znatno porasla) [4].

Profili spektralnih linija i ekvivalente širine su međutim ponovno ispitane i izmjerene. Ova revizija dovodi do isključivanja linija valnih duljina 404,4 i 580,2 nanometra zbog otkrivenog sumnjivog preklapanja (miješanja) linija. Nova se obilnost stoga temelji na izmjerenim ekvivalentnim širinama tri linije ioniziranog kalija K (i) duljina 693.9, 1177.0 te 1252.2 nm, koje pokazuju odstupanje od LTE modela što ponovno upućuje na važnost korištenja naprednijih NLTE modela. Konačna vrijednost $\log K = 5,07 \pm 0,01$ (statistički) $\pm 0,03$ (sustavno) dobivena je kao srednja vrijednost triju K (i) linija (ovdje je korišten 3D NLTE model) [4].

Kalcij

Kalcij također ima relativno nizak potencijal ionizacije, stoga je u solarnoj fotosferi uglavnom postojan u obliku Ca ii. Analizom 3D LTE (uz 1D nLTE korekcija) jedanaest Ca (i) i 5 linija Ca (ii) dobivena je obilnost solarnog fotosfernog kalcija od $\log Ca = 6,32 \pm 0,03$. Međutim, detaljnijom analizom otkriven je utjecaj susjedne Ca (i) linije od 616,22 nm na drugu liniju od 616,13 nm, pa je tu liniju ipak potrebno isključiti iz proračuna. Stoga je u konačnici srednji rezultat deset Ca (i) linija i pet Ca (ii) linija $\log Ca = 6,30 \pm 0,03$, odnosno malo manji od prijašnjeg [4].

3.4. Elementi od skandija do nikla

Skandij

Prijašnja vrijednost količine solarnog skandija iznosila je $\log Sc = 3,16 \pm 0,04$, no to je bio rezultat 3D analize s uključenim lokalnim termodinamičkim ekvilibrijem (LTE) uz model atmosfere 1D s nLTE korekcijama. Međutim, nova analiza pokazala je vrlo točne i precizne eksperimentalne vrijednosti prijelaza te korigirana vrijednost skandija iznosi $\log Sc = 3,14 \pm 0,01$ (statistički) $\pm 0,04$ (sustavni). U ovoj solarnoj analizi pronađeno i korišteno je dvaput više čistih Sc linija. Uočena su značajna odstupanja linija Sc (i) od LTE-a, ali obilnost mu ionako u velikoj mjeri ovisi o liniji Sc (ii). Obilnost dana ovim linijama je znatno veća od one meteoritske, dobivene masenom spektroskopijom [4].

Titan

Pronađena je znatna i neobjašnjiva razlika u obilnosti titana u dva stupnja ionizacije, tj. 4.88 ± 0.05 za linije Ti (i) te 4.97 ± 0.04 za Ti (ii). Preporučena vrijednost jednaka je iznosu njihovog prosjeka, $\log \text{Ti} = 4.93 \pm 0.04$. Svi teoretski i poluempirijski modeli atmosfera davali su znatno veće količine titana. Ovakva osjetljivost modela atmosfera sugerira na potrebu korištenja sofisticiranijih 3D NLTE modela, te da 1D NLTE korekcije nisu prikladne. Upravo zbog nesklada između faza ionizacija, u konačnu vrijednost obilja solarnog titana uključuje se greška stoga ona iznosi ukupno $\log \text{Ti} = 4.97 \pm 0.05$ [4].

Vanadij

Neutralni vanadij u vidljivom Sunčevom spektru ima niz kvalitetnih linija koje mogu poslužiti za proračun njegove količine, dok je vrlo malo ioniziranih V(ii) linija dostupno jer su sve narušene. S druge se strane očekuje da će V(i) linije pokazati snažne NLTE efekte, kao što je slučaj za skandijevu Sc(i) liniju te titanovu Ti (i) jer imaju vrlo sličan ionizacijski potencijal [1].

Temelj za određivanje solarnog fotosfernog vanadija jest 3D LTE analiza ioniziranih V(i) linija s NLTE korekcijom u iznosu od 0,10 dex, zbog nedostatka stvarnih izračuna kinetičke, odnosno NLT ravnoteže sličnih elemenata Sc i Ti. Ionizirani V(i) je manjiska vrsta i kao takva pokazuje izrazitu osjetljivost na implementirani model atmosfere, stoga različiti modeli pokazuju različite podatke. Problem preciznog izračuna njegove obilnosti je podosta jako preklapanje, tj. miješanje dostupnih V(ii) linija, međutim sugerirana vrijednost vanadija iznosi $\log V = 3.90 \pm 0.08$ (ukupno) [4].

Krom

Neutralni krom i njegov ionizirani Cr(i) oblik imaju velik broj čistih, slabih linija u Sunčevom spektru. Podaci o NLTE efektima na element kroma nisu dostupni, a on bi s obzirom na njegovu nisku energiju ionizacije na Suncu trebao biti prisutan u Cr(ii) ioniziranom obliku. Obilnost kroma u Sunčevoj fotosferi određena je izračunom prosjeka sveukupnih linija Cr(i) i Cr(ii) i to 1D modelom uz kinetičku ravnotežu (NLTE). Vrijednost iznosi $\log \text{Cr} = 5.62 \pm 0.04$ [4].

Mangan

Računajući obilje fotosfernog mangana pomoću 3D solarnog modela, njegova vrijednost vrlo blizu onoj u meteoritima. Ionizirani Mn(i) pokazuje umjerene NLTE učinke, a vrijednost njegovog ionizacijskog potencijala nalazi se između nižih potencijala lakših elemenata poput Sc, Ti, Cr i V te onih većeg potencijala težih elemenata Fe, Ni, Co. Preporučena vrijednost mu iznosi $\log \text{Mn} = 5,42 \pm 0,06$, a problem koji se s u ovom iznosu pojavljuje jest nesigurnost koja je povezana sa NLTE efektima. Iako se ovaj rezultat može smatrati relativno dosljednim, određivanje količine solarnog mangana doista je kompleksno jer različite studije pokazuju različite vrijednosti, usprkos korištenju jednakih metoda [4].

Željezo

Željezo se u astronomiji često koristi kao supstitucija za ukupni metalicitet zvijezda [1,4]. Metalicitet u astronomiji označava obilnosti svih elemenata u određenom tijelu koji su teži od vodika i helija. Helij i vodik su u svemiru zapravo većina fizičke tvari, a astronomi koriste pojam metalicitet kao skraćeni izraz za sve ostale elemente (osim vodika i helija) [14]. Značenje ove riječi razlikuje se od one konvencionalne definicije metala kao električno provodljivih krutina. Za maglice, zvijezde i ostala tijela koja relativno obiluju težim elementima, kažemo da su bogate metalima, iako mnogi od tih elemenata nisu metali u kemijskom smislu [4].

To proizlazi iz njegovog relativno velikog obilja i bogatstva lako mjerljivih linija. Željezo je također ima važan doprinos neprozirnosti u zvjezdanim unutrašnjostima. Mnoge linije ioniziranog željeza Fe(i) te Fe(ii) dostupne su sa Sunca. One pružaju precizne atomske podatke potrebne za spektroskopsku analizu. Temeljem analiza ionizacijskih Fe(i) i Fe(ii) linija dobivene su vrijednosti $7,46 \pm 0,04$ i $7,47 \pm 0,04$ koje se savršeno slažu. U navedene iznose uključene su statističke i moguće sustavne nesigurnosti. Za obje vrste su odstupanja od lokalnog termodinamičkog ekvilibrija zanemariva [1,4].

U 1D modelu atmosfere obilnost željeza postiže nemoćne niske vrijednosti, $\log \text{Fe} < 7,40$, čime se potvrđuje potreba za potpunim 3D modelom uključujući kinetičku ravnotežu NLTE. Obilnost željeza u konačnici iznosi $\log \text{Fe} = 7,46 \pm 0,04$, kao prosjek između vrijednosti ioniziranih stanja. Usprkos poboljšanjima i razvitku tehnika te pouzdanijim atomskim podacima, ova obilnost se nije promijenila već dva desetljeća [4].

Kobalt

Pronađena vrijednost obilja kobalta najprije je iznosila $\log Co = 4.88$ i dobivena je korištenjem 3D modela atmosfere s lokalnim termodinamičkim ekvilibrijem. Solarna analiza ovog elementa poprilično je jednostavno zbog činjenice da kobalt ima mnogo dostupnih, iskoristivih linija te poprilično visok ionizacijski potencijal. Vrijednost od 4.88 podudara se s meteoritskom. Međutim ako se u obzir uzme NLTE efekt, obilnost kobalta raste i to na krajnju vrijednost od $\log Co = 4.99 \pm 0.07$ [1].

Nikal

Obilje nikla mora se zaključiti iz 3D modela atmosfere s lokalnom termodinamičkom ravnotežom, zbog nedostatka NLTE analiza i proračuna. NLTE efekti mogu se usporediti s onima kod željeza, gdje su zaista minorni, pa je sličan trend očekivan i za nikal, međutim za to treba potkrepljena potvrda. Za solarni nikal uzima se vrijednost $\log Ni = 6.20 \pm 0.04$ [4].

3.5. Teški elementi- od bakra do uranija

Spektralne linije dolje navedenih elemenata djelomično se nalaze i u infracrvenom spektralnom području što uzrokuje ozbiljne probleme pri uklapanju linija. Neke od tih linija se čak isključuje za spektralnu analizu zbog visokog stupnja nesigurnost i posljedično davanja pogrešne predodžbe o njihovoj solarnoj količini. Važno je napomenuti kako su obilnosti ovih elemenata u Suncu još uvijek dosta neistraženo polje, stoga i navedene vrijednosti mogu odudarati od onih realnih.

Bakar

Bakar je u solarnoj fotosferi uglavnom prisutan u ioniziranom obliku Cu(i) [4,15]. No, u solarnom spektru moguće je pronaći isključivo nekoliko linija Cu(i) [4,15]. Vrijednost njegove solarne količine jest $\log Cu = 4.18 \pm 0.05$, međutim ova vrijednost se dosta oslanja na zastarjele i pomalo nesigurne podatke [4].

Germanij

Poput prethodnog bakra, germanij također većinom ionizira u prvom stupnju, pa je u istom obliku i prisutan u solarnoj fotosferi. Međutim slučaj se ponavlja jer je moguće identificirati samo nekoliko prihvatljivih linija Ge(i). Analizirana je linija valne duljine 326,95 nm, 3D modelom atmosfere s uključenom kinetičkom ravnotežom, a dobiveno obilje germanija iznosi $\log \text{Ge} = 3,62 \pm 0,10$ [4,15].

Galij

Galij je još jedan element u nizu koji je ioniziran u jednom stupnju. Jedina linija koja je korištena za dobivanje vrijednosti o solarnoj obilnosti galija je rezonantna linija valne duljine 417,2 nm koja se nalazi u blizini ultraljubičastog područja. Međutim, ovu liniju potrebno je izdvojiti sintezom spektra zbog njene iznimne narušenosti. Na taj način dobivene su dvije slične vrijednosti; $\text{Ga} = 2,80$ i $\text{Ga} = 2,84$. Kasnije je predložena još jedna linija koja bi se mogla uključiti u izračun obilja elementa. Ta linija se nalazi u IR (infracrvenom) području, valne duljine 1194.915 nm, ali je i ova linija vrlo slaba. Za ovu liniju se također smatra da potječe od ionizirane Ga(i) linije [15].

Infracrvenu liniju bilo je potrebno detaljnije analizirati jer je sugerirala neidentificirano miješanje/preklapanje zbog svoje širine. Područje oko rezonantne linije (417,2 nm) također je ponovno sintetizirano, a doprinos Ga(i) linije koja je potom utvrđena iznosi 5.22 ± 0.30 pm [15].

Arsen

Za spektralne linije ovog elementa ne može se sa sigurnošću reći ima li prisutnih definiranih linija u solarnome spektru. U izračunu su korištene moguće dvije linije koje se nalaze u blizini infracrvenog područja, valnih duljina 299.0984 i 303.2846 nm. To su linije za koje se smatra da su projicirane od ioniziranog arsena As(i). Preporučena solarna obilnost je $\log \text{As} = 2.33$, međutim nju treba uzeti s rezervom s obzirom na nesigurnost samih linija [15].

Rubidij

Rubidij ima samo dvije dostupne linije u Sunčevom spektru. To su rezonantne linije valnih duljina 780.03 i 794.76 nm, ali su i one poremećene drugim vrstama linija. Primjenom 3D modela atmosfere uz lokalni termodinamički ekvilibrij LTE, vrijednost obilja elementa iznosi $\log \text{Rb} =$

$2,44 \pm 0,08$. Ta vrijednost je manja kada se primjeni NLTE korekcija modela koja tada upućuje na solarnu vrijednost Rb od $\log Rb = 2,32 \pm 0,08$ [4].

Rodij

U solarnoj fotosferi je omjer između ioniziranih oblika rodija Rh(ii) i Rh(i) popriličan, no teško je izmjeriti dostupne Rh(ii) linije kojih je samo nekoliko. One se nalaze u ultraljubičastom spektru i dosta su nepouzdana radi preklapanja, pa je tako analiza ograničena samo na jednu liniju od 369.24 nm, dok je linija 343.49 eliminirana zbog vrlo jakog miješanja. Kada se sve nesigurnosti uzmu u obzir, izračunato obilje solarnog rodija je $\log Rh = 0,78 \pm 0,11$ (statistički + sustavni). Kada se ova vrijednost uspoređi s meteoritskom, ona je znatno manja. Što može biti uzrokovano mogućim odstupanjima od lokalne termodinamičke ravnoteže. Primjenom 1D polu-empirijskog modela solarne atmosfere dobivaju se vrijednosti koje se puno bolje slažu s onom meteoritskom [4].

Paladij

Faktor između količine prisutnih ioniziranih oblika paladija u solarnoj fotosferi Pd(ii)/Pd(i) je 4, ali opet se nailazi na prepreku u identifikaciji Pd(ii) linija u Sunčevom spektru. Za izračun obilnosti korištene su linije Pd(i) valnih duljina 324.27 te 340.46 nm, a modeli koji su pritom korišteni su 1D uz kinetičku NLT ravnotežu za izračun korekcije i 3D LTE model. Međutim, opetovano se javlja potreba za preciznijim 3D NLTE modelom, čija analiza u ovom slučaju nedostaje. Obilnost paladija iznosi $\log Pd = 1,57 \pm 0,10$ [4].

Barij

Element barij ima nisku energiju ionizacija te se zbog toga u solarnoj fotosferi javlja u ioniziranom Ba(ii) obliku. Za potrebu izračuna njegove obilnosti dostupno je samo nekoliko spektralnih linija. Njegova obilnost dobivena masenom spektroskopijom iz kondrita iznosi $\log Ba = 2,18 \pm 0,02$, što je puno manje od one solarne koja iznosi $\log Ba = 2,27 \pm 0,05$. To je vrijednost obilja temeljena na 3D NLTE modelu atmosfere, međutim ona je malo uvećana zbog pretpostavke o mogućoj sustavnoj pogrešci modela. Bilo bi poželjno napraviti nove analize s obzirom na znatnu razliku između vrijednosti dviju različitih tehnika [4].

Praseodimij

Uvriježena obilnost ovog elementa iznosi $\log Pr = 0,75 \pm 0,05$. Model atmosfere ovdje primjenjen jest 3D LTE, ali je korigiran 1D NLTE modelom [4].

Volfram

Pronađene su dvije spektralne linije volframan, valnih duljina 484.38 i 400.875 nm. Linija od 484.38 nm je prilično slaba i nepouzdana te je zbog toga isključena iz daljnje analize. Dobivena obilnost iz preostale linije je $\log W = 0,79 \pm 0,11$, a korišteni model atmosfere je 3D LTE [4].

Osmij

Osmijeva solarna obilnost iznosi $\log Os = 1.35 \pm 0.12$, obilnost koja je dobivena analizom prijelaza profila spektralne linije od 330,16 nanometara. Također je korišten 3D model atmosfere s lokalnom termodinamičkom ravnotežom (LTE) [4].

Iridij

Nažalost, jedna jedina iridijeva linija valne duljine 322.08 nanometara je sasvim pomiješana i izrazito neizvjesna za bilo kakvu daljnju analizu ili dobivanje smislene obilnosti elementa [4].

Zlato

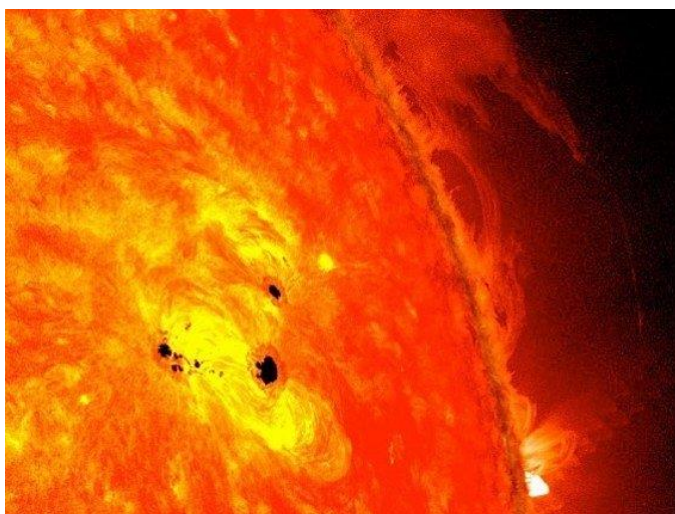
Jedina dostupna Au(i) linija također je vrlo problematična kao i kod prethodnog elementa. Linija je dosta slaba i pomiješana, pa je tako i preciznost dobivene obilnosti zlata upitna. Pretpostavljena vrijednost uz procjenjenu pogrešku iznosi $\log Au = 0.91 \pm 0.12$ [4].

Olovo

Obilnost solarnog olova određena je jednom linijom ekvivalentne širine 0.91 pm (pikometar) te valne duljine 368,35 nm. Analizom je određena obilnost olova od $\log Pb = 1,95 \pm 0,08$ [4].

3.6. Elementi analizirani iz sunčevih pjega- fluor, klor, indij i talij

Fotosferne obilnosti elemenata F, Cl, In i Ti nije moguće odrediti solarnom spektroskopijom, već se njihove vrijednosti određuju iz infracrvenog spektra sunčevih pjega i to preko molekularnih linija fluorovodika HF i klorovodika HCl. Sunčeve pjege su hladnija i tamnija područja na solarnoj površini, a nastaju i nestaju utjecajem snažnih elektromagnetskih polja. Također su nađene i molekulske linije C₂, CO, CN, OH, NH i CH, koje su upravo najprisutnije u hladnijim solarnim pjegama. U njima su također prisutne i molekule HCl, HF, HS, BO, MgH, Ca Hi TiO [1,4].



Slika 6. Sunčeve pjege (crne mrlje na slici) [16]

Fluor

Fluorove spektralne linije nemoguće je otkriti u Sunčevom spektru, međutim postoje karakteristične HF molekularne linije u spektrima sunčevih pjega. Na taj način se procjenjuje njegovo obilje, uz korištenje 1D teoretskog modela. Vrijednost solarnog fluora je $\log F = 4,40 \pm 0,25$. Upotrebljeni 1D model ima nedostataka te nije najprikladnije rješenje za analizu ove vrste spektra [4].

Klor

Fotosferna obilnost klora također se jedino može procijeniti samo iz spektra sunčevih pjega jer molekule HCl zahtijevaju niže temperature. Određena vrijednost iznosi $\log Cl = 5,31 \pm 0,12$.

Preciznije solarne vrijednosti zastupljenosti halogenih elemenata općenito je moguće dobiti pomoću omjera zastupljenosti neke druge vrste, poput FeH ili MgH, koje pokazuju sličnu temperaturnu ovisnost i spektralnim značajkama [4].

Indij

Meteoritska vrijednost indija puno je manja od one dobivene solarnom spektralnom analizom i to zbog nepoznatih miješanja linije. Za solarnu spektroskopiju poslužila je spektralna linija In(i) valne duljine 451,13 nm. Vrijednost je iznosila $\log \text{In} = 1,56 \pm 0,20$ i ona nije uvriježena. Prihvaćena je obilnost na temelju spektra sunčevih pjega koja je relativno blizu meteoritske vrijednosti, a iznosi $\log \text{In} = 0,80 \pm 0,20$ [4].

Talij

Najnovije istraživanje solarne obilnosti talija staro je gotovo pedesetak godina. Jedina linija koja je održiva, međutim izrazito pomiješana je Ti(i) linija duljine 535.04 nm. Obilnost talija određena je na isti način kao i kod prethodnih elemenata, iz spektra sunčevih pjega, a preporučena vrijednost je $\log \text{Tl} = 0,92 \pm 0,17$. Valja napomenuti kako ta vrijednost nije u potpunosti pouzdana. Bolja vrijednost može se dobiti preko omjera obilja slične vrste, poput Zr(i) [4].

Najnovije određivanje količine solarnog Tl datira gotovo pola stoljeća. Ažurirajući trenutnu vjerojatnost prijelaza koju preporučuje NIST za jedinu održivu, ali jako pomiješanu liniju Tl i 535,04 nm, analiza sunčevih pjega Lamberta i sur. (1972) sugerira da je $\log \text{Tl} = 0,92 \pm 0,17$, vrlo vjerojatno s podcijenjenom nesigurnošću. Točnije određivanje bilo bi moguće iz omjera brojnosti s drugom sličnom vrstom, poput linije cirkonija (i) [4].

4. NEIZRAVNO ODREĐIVANJE SOLARNIH OBILNOSTI- Plemeniti plinovi

Plemeniti plinovi se vrlo lako ekscitiraju zbog njihovog visokog potencijala [4]. Zbog toga njihove linije u solarnoj fotosferi ne postoje, stoga se njihove količine moraju određivati indirektnim metodama [1]. Obilnosti im se mogu izvesti promatranjem koronalnih izvora, kao što su solarne baklje, solarne energetske čestice ili solarnog vjetra. To su plinovi helij, neon, argon, kripton i ksenon [4].

Helij

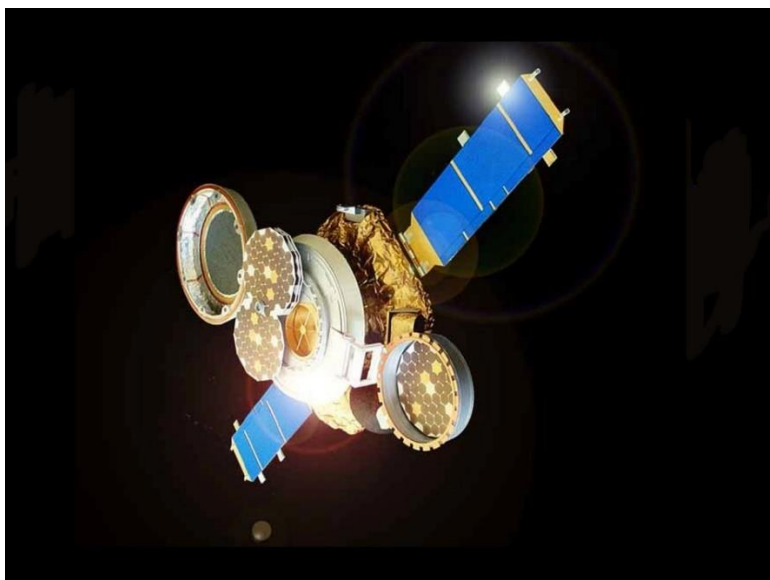
Vrijednost solarne obilnosti plemenitog plina helija može se odrediti iz Sunčeve korone, solarnog vjetra, solarnih energetskih čestica i drugih izvora, međutim on se najčešće određuje helioseizmologijom. Helioseizmologija može vrlo precizno odrediti helijevu obilnost, koju nije moguće odrediti spektroskopskom analizom. Dobivena vrijednost za helij je $\log \text{He} = 10,93 \pm 0,01$ [4].

Neon

Obilnost plemenitog plina neona može se odrediti iz rentgenske i ultraljubičaste spektroskopije solarne korone i solarnih bljeskova te izravno iz solarnog vjetra. Takozvani FIP efekt, odnosno efekt prvog ionizacijskog potencijala, čini ovu interpretaciju dosta kompliciranom [1].

Elementi s potencijalom ionizacije manjim od 10 eV učestaliji su u gornjoj Sunčevoj atmosferi i solarnom vjetru u usporedbi s njihovom fotosferskom učestalošću. S druge strane, elementi visoke ionizacije su samo neznatno ili uopće nisu pogođeni tim efektom. Uvriježeni način određivanja solarnog neona jest prvo odrediti obilnost referentnog elementa te onda pretpostaviti da je u jednakom omjeru u fotosferi. U ovom slučaju taj referentni element je kisik, usprkos njihovoj velikoj razlici u ionizacijskim potencijalima (O (13,6 eV) i Ne (21,6 eV)) što može unijeti sustavnu pogrešku u rezultatu. Njihov omjer iznosi $\text{Ne/O} = 0,24 \pm 0,05$, što upućuje na fotosfernu obilnost neona od $\log \text{Ne} = 8,08 \pm 0,09$. Vrijednost je znakovito viša nego što su prijašnje analize pokazivale, što općenito pripisujemo poboljšanjem dostupnih atomskih podataka (promjene u stopama ionizacije) [4].

Istovremeno je iz spektra solarnih bljeskova zaključena i koronalna zastupljenost neona, $\log \text{Ne} = 8,11 \pm 0,12$. Ta vrijednost se razlikuje od one računate u solarnim bakljama (vrijednost apsolutne zastupljenosti kao i omjer Ne/O). Najnižu vrijednost omjer Ne/O postiže u solarnim energetskim česticama ($0,140 - 0,157 \pm 0,010$) te u solarnom vjetru ($0,11-0,14$), što je možda posljedica dodatne elementarne frakcije. Stoga nije preporučljivo poopćavati vrijednost obilja neona putem solarnog vjetra, jer je takva analiza nepouzdana. NASA je 2001. godine poslala svemirsku letjelicu Genesis, dizajniranu i lansiran u cilju boljeg upoznavanja kozmičkog podrijetla. Njegova zadaća bila je prikupiti uzorke solarnog vjetra te ih vratila na Zemlju na daljnja proučavanja [4].



Slika 7. NASA-ina letjelica Genesis [3]

Tada se neon usporedio s helijem koji ima daleko bližu vrijednost ionizacijskog potencijala neonu (24.59 eV) nego kisik (13,6 eV). Pomoću otkrivenih Genesisovih omjera $4\text{He}/20\text{Ne}$ i $20\text{Ne}/22\text{Ne}$, kao i dobivenim helioseizmičkim omjerom He/H u konvektivnoj zoni, u konačnici dovodi do vrijednosti solarnog neona u iznosu $\log \text{Ne} = 8,14 \pm 0,01$. Međutim kada se u obzir uzmu mogući različiti režimi solarnog vjetra, obilnost neona se revidira i postaje $\log \text{Ne} = 8,06 \pm 0,03$, što pokazuje izvrsno slaganje s obilnošću u prvom dijelu [4].

Argon

Analiza zastupljenosti plemenitog plina argona isključivo se oslanja na povratni uzorak solarnoga vjetra sa NASA-inog Genesis (jednako kao što je utvrđena i vrijednost neona). Dobivena vrijednost za argon je $\log \text{Ar} = 6,38 \pm 0,08$ (statistički), ako se u obzir uzmu korelacije između izmjerenih omjera H/He i $^{36}\text{Ar}/^{4}\text{He}$. S obzirom da FIP efekt još uvijek nije u potpunosti razriješen te da su razlike u ionizacijskim potencijalima Ar (15,76 eV) i referentnog elementa He (24,59 eV) postojane, vrlo vjerojatno su i preostale sustavne pogreške značajne. U konačnici, usvojena zastupljenost argona za Sunce iznosi $\log \text{Ar} = 6,38 \pm 0,10$ [4].

Kripton

Preporučena količina solarnog kriptona također je dobivena mjerenjima povratnog uzorka Sunčeva vjetra sa letjelice Genesis, a iznosi $\log \text{Kr} = 3,12 \pm 0,03$ (statistički). Ova vrijednost priznata je pod jednim uvjetom, a taj je da su korekcije frakcioniranja FIP efekta identične za kripton (14,00 eV) i vodik (13,60 eV). Ako se izračunu prilazi alternativnim načinom, tj. koristeći argon kao referentnim (čija je obilnost gore navedena), tada vrijednost solarnog kriptona raste $\log \text{Kr} = 3,16 \pm 0,08$, a raste zajedno sa statističkom nesigurnosti. Ako se kao referentan element uzme kisik, tada se obilnost kriptona malo smanji, što može implicirati na višu obilnost fotosferičnog kisika od zagovarane ili jednostavno zbog nesigurnosti FIP efekta. Koju se god metoda određivanja odabere, uvijek su prisutne dominantne sustavne pogreške FIP-a. Stoga se uz uključene sustavne pogreške, ipak uzima vrijednost $\log \text{Kr} = 3,12 \pm 0,10$ za obilnost solarnog kriptona. Kripton se još može odrediti i preko izotopskih vrijednosti (tada je $\log \text{Kr} = 3,15 \pm 0,10$ (statistički) [4].

Ksenon

Obilnost ksenona može se zaključiti mjerenjem fotosfernog samarija kombiniranog s izotopskim mjerenjima. Dobiveno obilje ksenona, uz ažuriranu vrijednost fotosfernog Sm i uključujući procijenjene sustavne pogreške, iznosi $\log \text{Xe} = 2,22 \pm 0,05$. Obilnost ksenona izvedena iz solarnog vjetra (uzorak sa Genesis) znatno je veća, $\log \text{Xe} = 2,42 \pm 0,05$. To se u teoriji i očekuje zbog različitog frakcioniranja FIP efekta između ksenona (12,13 eV) i vodika [4].

Z	Element	Photosphere	CI chondrites	Comments	Z	Element	Photosphere	CI chondrites	Comments
1	H	12.00 ± 0.00	8.22 ± 0.04	definition	44	Ru	1.75 ± 0.08	1.77 ± 0.02	
2	He	10.914 ± 0.013	1.29 ± 0.18	helioseismology	45	Rh	0.78 ± 0.11	1.04 ± 0.02	
3	Li	0.96 ± 0.06	3.25 ± 0.04	meteorites	46	Pd	1.57 ± 0.10	1.65 ± 0.02	
4	Be	1.38 ± 0.09	1.32 ± 0.03		47	Ag	0.96 ± 0.10	1.20 ± 0.04	
5	B	2.70 ± 0.20	2.79 ± 0.04		48	Cd		1.71 ± 0.03	meteorites
6	C	8.46 ± 0.04	7.39 ± 0.04		49	In	0.80 ± 0.20	0.76 ± 0.02	
7	N	7.83 ± 0.07	6.26 ± 0.06		50	Sn	2.02 ± 0.10	2.07 ± 0.06	
8	O	8.69 ± 0.04	8.39 ± 0.04		51	Sb		1.01 ± 0.06	meteorites
9	F	4.40 ± 0.25	4.42 ± 0.06		52	Te		2.18 ± 0.03	meteorites
10	Ne	8.06 ± 0.05	-1.12 ± 0.18	solar wind	53	I		1.55 ± 0.08	meteorites
11	Na	6.22 ± 0.03	6.27 ± 0.04		54	Xe	2.22 ± 0.05	-1.95 ± 0.18	nuclear physics
12	Mg	7.55 ± 0.03	7.53 ± 0.02		55	Cs		1.08 ± 0.03	meteorites
13	Al	6.43 ± 0.03	6.43 ± 0.03		56	Ba	2.27 ± 0.05	2.18 ± 0.02	
14	Si	7.51 ± 0.03	7.51 ± 0.01		57	La	1.11 ± 0.04	1.17 ± 0.01	
15	P	5.41 ± 0.03	5.43 ± 0.03		58	Ce	1.58 ± 0.04	1.58 ± 0.01	
16	S	7.12 ± 0.03	7.15 ± 0.02		59	Pr	0.75 ± 0.05	0.76 ± 0.01	
17	Cl	5.31 ± 0.20	5.23 ± 0.06		60	Nd	1.42 ± 0.04	1.45 ± 0.01	
18	Ar	6.38 ± 0.10	-0.50 ± 0.18	solar wind	62	Sm	0.95 ± 0.04	0.94 ± 0.01	
19	K	5.07 ± 0.03	5.08 ± 0.04		63	Eu	0.52 ± 0.04	0.52 ± 0.01	
20	Ca	6.30 ± 0.03	6.29 ± 0.03		64	Gd	1.08 ± 0.04	1.05 ± 0.01	
21	Sc	3.14 ± 0.04	3.04 ± 0.03		65	Tb	0.31 ± 0.10	0.31 ± 0.01	
22	Ti	4.97 ± 0.05	4.90 ± 0.03		66	Dy	1.10 ± 0.04	1.13 ± 0.01	
23	V	3.90 ± 0.08	3.96 ± 0.03		67	Ho	0.48 ± 0.11	0.47 ± 0.01	
24	Cr	5.62 ± 0.04	5.63 ± 0.02		68	Er	0.93 ± 0.05	0.93 ± 0.01	
25	Mn	5.42 ± 0.06	5.47 ± 0.03		69	Tm	0.11 ± 0.04	0.12 ± 0.01	
26	Fe	7.46 ± 0.04	7.46 ± 0.02		70	Yb	0.85 ± 0.11	0.92 ± 0.01	
27	Co	4.94 ± 0.05	4.87 ± 0.02		71	Lu	0.10 ± 0.09	0.09 ± 0.01	
28	Ni	6.20 ± 0.04	6.20 ± 0.03		72	Hf	0.85 ± 0.05	0.71 ± 0.01	
29	Cu	4.18 ± 0.05	4.25 ± 0.06		73	Ta		-0.15 ± 0.04	meteorites
30	Zn	4.56 ± 0.05	4.61 ± 0.02		74	W	0.79 ± 0.11	0.65 ± 0.04	
31	Ga	3.02 ± 0.05	3.07 ± 0.03		75	Re		0.26 ± 0.02	meteorites
32	Ge	3.62 ± 0.10	3.58 ± 0.04		76	Os	1.35 ± 0.12	1.35 ± 0.02	
33	As		2.30 ± 0.04	meteorites	77	Ir		1.32 ± 0.02	meteorites
34	Se		3.34 ± 0.03	meteorites	78	Pt		1.61 ± 0.02	meteorites
35	Br		2.54 ± 0.06	meteorites	79	Au	0.91 ± 0.12	0.81 ± 0.05	
36	Kr	3.12 ± 0.10	-2.27 ± 0.18	solar wind	80	Hg		1.17 ± 0.18	meteorites
37	Rb	2.32 ± 0.08	2.37 ± 0.03		81	Tl	0.92 ± 0.17	0.77 ± 0.05	
38	Sr	2.83 ± 0.06	2.88 ± 0.03		82	Pb	1.95 ± 0.08	2.03 ± 0.03	
39	Y	2.21 ± 0.05	2.15 ± 0.02		83	Bi		0.65 ± 0.04	meteorites
40	Zr	2.59 ± 0.04	2.53 ± 0.02		90	Th	0.03 ± 0.10	0.04 ± 0.03	
41	Nb	1.47 ± 0.06	1.42 ± 0.04		92	U		-0.54 ± 0.03	meteorites
42	Mo	1.88 ± 0.09	1.93 ± 0.04						

Slika 8. Tablični prikaz solarnih obilnosti dobivene fotosfernom spektroskopijom zajedno s meteoritskim vrijednostima. Vrijednosti komentiranih elemenata nisu temeljene na solarnoj spektroskopiji [4]

5. IZOTOPSKE OBILNOSTI

Izotopska zastupljenost može se mjeriti solarnom spektroskopijom samo za ugljik i kisik, iako još uvijek nesigurna. Zbog toga se njihova solarna vrijednost uglavnom dobiva alternativnim metodama. One uključuju analize povratkih uzoraka solarnog vjetra (NASA-ina Genesis sonda) i laboratorijska istraživanja različitih zemaljskih, lunarnih, meteoritskih, kometnih i asteroidnih uzoraka [4].

Tijekom evolucije došlo je do gotovo potpunog izgaranja solarnog deuterija D do ^3He , zbog toga je njegovu rasprostranjenost nemoguće odrediti izravnim putem. Uzorak sa Genesis sonde ukazuje na omjer $^3\text{He}/^4\text{He} = (4,5 - 4,8) \cdot 10^{-4}$, što ovisi o režimu solarnog vjetra, odnosno da se tijekom ubrzanja solarnog vjetra stvaraju frakcije (izotopske). Frakcije se mogu objasniti teorijskom korekcijom temeljenom na Coulombovom modelu otpora ili metodom empirijskih korelacijama $^3\text{He}/^4\text{He}$ i $\text{H}/^4\text{He}$ u solarnom vjetru. Određivanje obilja neona i argona također se temelji na metodi empirijskih korelacija. Metodama su dobiveni različiti rezultati, odnosno omjeri $^3\text{He}/^4\text{He}$. Posljedično su dobivene i različite vrijednosti obilnosti za teoretski $(1,24 \cdot 10^{-5})$ i empirijski $(1,67 \cdot 10^{-5})$ način. U prosjek tih dviju vrijednosti uključen je i omjer D/H $(2,1 \cdot 10^{-5})$, pa je konačni omjer D/H $(1,67 \pm 0,25) \cdot 10^{-5}$. Protosolarni izotopski omjer D/H potrebno je dalje istražiti. Omjer izotopa $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ se između različitih objekata Sunčevog sustava ne razlikuje. Stoga uvriježenom smatramo referentnu zemaljsku vrijednost u iznosu od $89,3 \pm 0,2$. Navedena vrijednost podudara se rezultatima solarne fotosfere i preliminarnim rezultatima solarnog vjetra sonde Genesis. Iz nepoznatog razloga izotopski omjer $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ pokazuje znakovite oscilacije promjenom izvora u Sunčevom sustavu. Dobiveni omjer iz solarnog vjetra iznosi $^{14}\text{N}/^{15}\text{N} = 453 \pm 66$, uz korekciju izotopskih frakcija. Za Jupiter se dobiva skoro identična vrijednost (435 ± 57) , pa se kao konačna vrijednost uzima sredina ta dva mjerenja, $^{14}\text{N}/^{15}\text{N} = 443 \pm 13$ [1,4].

Što se kisika tiče, njegov izotopski sastav također je određen pomoću povratnog uzorka solarnog vjetra (Genesis). Solarni omjer izotopa koji je usvojen je $^{16}\text{O}/^{18}\text{O} = 530$ i $^{16}\text{O}/^{17}\text{O} = 2798$, koji je ujedno i korigiran (za izotopsko frakcioniranje). Iz povratnog uzorka solarnog vjetra sa Genesis također je moguće odrediti zastupljenosti izotopa pleminitih plinova. Utjecaj izotopskih frakcija za neon i argon su male, a za kripton i ksenon su zanemarive, pa je za prva dva

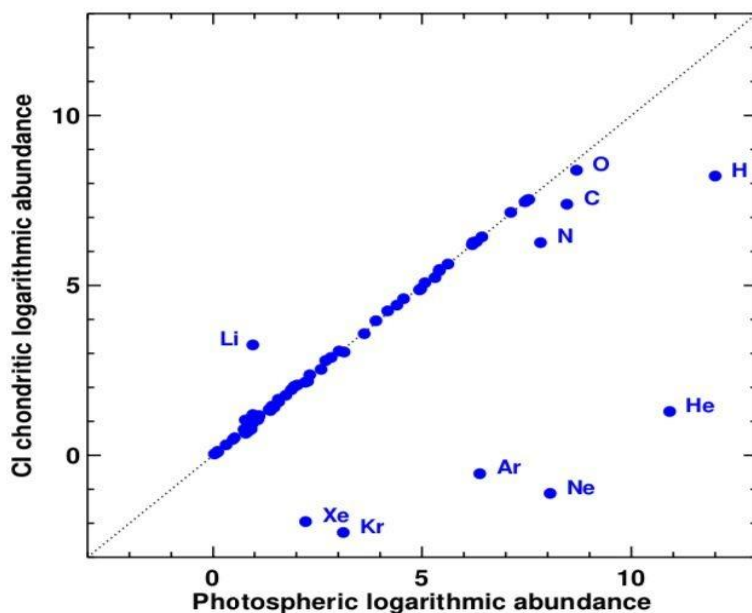
plemenita plina potrebno napraviti korekciju (empirijskim ili teorijskim putem). Solarne vrijednosti im tada iznose $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne} = 13,36 \pm 0,09$, $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne} = 0,0324$ i $^{36}\text{Ar}/^{38}\text{Ar} = 5,37 \pm 0,03$. Omjer izotopa $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ vrlo je nepouzdan i ne može se odrediti iz povratnog uzorka, dok se za plinove kripton i ksenon rezultati tog uzorka prihvaćaju. Uzorci solarnog vjetra (Genesis) još uvijek ne pružaju konačnu obilnost hlapljivih elemenata. U dogledno vrijeme će to biti moguće za elemente poput željeza, magnezija, sumpora i druge. Za ostale elemente koji nisu navedeni, uzimaju se relativne izotopske frakcije za reprezentativne kopnene uzorke [4].

6. OBILJA ELEMENATA ODREĐENA IZ PRIMITIVNIH METEORITA

Vrijednosti obilja elemenata dobivena putem analiza meteorita predstavljaju izvrstan način usporedbe sa vrijednostima dobivenim iz solarne fotosfere. U tu svrhu koriste se oni najprimitivniji, najčišći meteoriti koji se vremenom nisu drastično promijenili, a nazivaju se ugljični ili C1 kondriti. Ostali meteoriti nisu prikladni jer su prošli različite stupnjeve izmjene i frakcioniranja i zbog toga ne mogu točno prikazati kemijski sastav protosolarne maglice [1].

Ugljičnih kondrita poznato je samo pet. To su meteoriti Orgueil, Alais, Ivuna, Tonk i Revelstoke [1,4,10].

Orgueil prednjači svojom veličinom, pa je zbog i najizloženiji analizama. Usprkos vjerovanju da se navedeni meteoriti nisu značajno kemijski izmijenili, ipak je znatna modifikacija u mineraloškom aspektu zbog toplinske metamorfoze i promjene vode. Obilnosti elemenata iz meteorita dobivaju se masenom spektroskopijom i to sa vrlo visokom preciznošću (čak i za izotopske vrijednosti), što je i njihova glavna prednost te se zato mogu uzeti kao standard kozmičkih obilja. Masena spektroskopija je analitička metoda kojom se ioniziraju spojevi i potom razvrstavaju ioni temeljem njihovog omjera mase i naboja. Spektar masa zapravo mjeri mase unutar ispitivanog uzorka. Važno je napomenuti kako su hlapljivi elementi uglavnom iscrpljeni (H, C, N, O), a oni su ujedno i najzastupljeniji stelarni elementi te je zato u meteoritima obilnost vezana za sadržaj silicija, a ne vodika [1].



Slika 9. Prikaz usporedbe meteoritskih i fotosfernih solarnih vrijednosti. Vidljivo je uglavnom dobro poklapanje elemenata, osim litija i ostalih jako hlapljivih elemenata [4]

Za sve ostale nehlapljive elemente otkriveno je vrlo dobro i zadovoljavajuće slaganje između fotosfernih vrijednosti (dobivene solarnom spektroskopijom) i onih od primitivnih meteorite. Ljestvica zastupljenosti elemenata u meteoritima stavljena je na istu apsolutnu razinu kao i fotosferna, upravo zbog potrošenih hlapljivih elemenata (također i vodika). To je omogućeno primjenom ekvivalentne količine već spomenutog silicija. Elementi kojima solarne vrijednosti odstupaju od meteoritskih (primjerice rubidij, srebro, rodij i dr.), najvjerojatnije upućuju na neidentificirana miješanja, LTE učinke ili općenito nedovoljno kvalitetnim solarnim analizama [1].

7. SUNČEVA ATMOSFERA

Sunčeva atmosfera obično se definira kao vanjski, izravno vidljiv dio Sunca (za razliku od dubljih solarnih slojeva, koji se mogu ispitati samo neizravno uz pomoć helioseizmologije. Drugim riječima, solarna atmosfera daje rođenje fotona koji napuštaju Sunce u obliku sunčeve svjetlosti. U donjem rubu Sunčeve atmosfere emitira kontinuirano zračenje u zelenom dijelu spektra. Gornji rub se pak proteže i do nekoliko milijuna kilometara gdje polako prelazi u solarni vjetar (ponekad se i smatra dijelom solarne atmosfere). Slojevi Sunčeve atmosfere tek su gruba aproksimacija. Solarna fotosfera je onaj najdublji i najhladniji sloj, širok 500-tinjak kilometara temperature otprilike 5000 K i koji svoje zračenje uglavnom emitira u obliku vidljivih valnih duljina. Iznad nje nalazi se kromosfera, sloj u kojem raste temperature na 10 000 K i koja je prosječne debljine 1500 km. Ovaj sloj moguće je promatrati u dalekom ultraljubičastom zračenju, milimetarskim valnim duljinama te u jezgrama jakih spektralnih linija (valnih duljina između). U području iznad kromosfere, zvanom prijeloznom području (debljine 100 km), dolazi do izrazitog temperaturnog skoka na gotovo milijun kelvina gdje se počinje formirati solarna korona. Prijelazno područje i korona promatraju se ultraljubičastim zrakama, radio valovima (valnih duljina oko 1 cm) te duljim X-zrakama [17].

Solarna atmosfera je izrazito dinamičan sustav koji obiluje mnoštvom raznih procesa (magnetizam, konvekcija, oscilacije itd.), stoga se u bilo kojem trenutku u određenom prostoru svojstva mogu drastično promijeniti [18].

7.1. Sunčeva korona

Za proučavanje Sunčeve korone, potrebno je čekati priliku potpune pomrčine Sunca kada Mjesec u potpunosti blokira Sunčev disk, zbog toga što vidljiva svjetlost, sjajna solarna površina ometa promatranje slabije korone [19]. Koronalne emisije pokazuju zabranjene linije visoko ioniziranih atoma u vidljivom spektru i dopuštene linije u ekstremnom UV području (EUV) te valne duljine X zraka [20,21].



Slika 10. Vidljiva Sunčeva korona tijekom pomrčine Sunca [22]

Promatranja elektromagnetskog zračenja kraće valne duljine, poput ultraljubičastog i X-zraka, prikladna su za detaljno istraživanje korone. Sunčeva korona postiže ekstremno visoke temperature (i do preko milijun K) te posljedično emitira više zračenja kraćih valnih duljina. Međutim, takva vrsta zračenja, odnosno ultraljubičasto i rendgensko zračenje ne mogu prodrijeti u Zemljinu atmosferu, stoga nam je potrebna svemirska zvezdarnica za njeno promatranje i prikupljanje podataka [21].

Promatrajuću tada nepoznatu spektralnu liniju valne duljinu 530.3 nm u vanjskoj atmosferi Sunca, znanstvenici su u 19. stoljeću pretpostavljali da se radi o novom element. S obzirom da je pronađena u vanjskoj atmosferi Sunca, zvanoj korona, nepoznati element nazvali su koronij. Međutim, tek razvijenim alatima kvantne mehanike počele su se računati valne duljine prijelaza visoko ioniziranih teških atoma i tada došlo do razrješenja misterija koronalnih linija. One su bile rezultat emisija iz ekstremno vrućeg plina, gdje se velik broj elektrona otkida atomu, pa su tako linije poput Fe^{20+} zaslužne za takav neobičan spektar. Izračunata temperature emitirajućeg plina iznosila je više od milijun kelvina [18].

Instrument *Hinode* služi za promatranje sa satelita na kojem je ugrađen (imena *Extreme-ultraviolet Imaging Spectrometer* (EIS)) dizajniran je za dobivanje spektra solarne korone. Ekstremno UV područje je raspon još kraćih valnih duljina od već kratkih valnih duljina ultraljubičastog zračenja. Moguće je pronaći mnoštvo spektralnih linija koje zrače iz plazme vrlo visoke temperature (više od milijun Kelvina). Emisijske linije koje su najrasprostanjenije su one koje potječu iz ioniziranog željeza (simbola Fe s atomskim brojem 26, kao i 26 elektrona). Dio elektrona se zbog uvjeta ekstremnih temperature izbija iz atoma. Što je temperature viša, to je više elektrona otkinuto

atomu. Pomoću analize spektra ioniziranoga željeza također je moguće odrediti i temperature korone [17,18].

Sustavne analize Sunca koje traju više desetaka godina, doprinijele su uvjerljivim i pouzdanim vrijednostima solarnih fotosferičnih obilnosti elemenata. No, to nije slučaj za obilja solarne korone kao gornje atmosfere Sunca, čijih je studija neusporedivo manje. Sunčeva korona pokazuje značajna odstupanja obilnosti elemenata od fotosfere, iako je činjenica da je prisutan kontinuirani protok fotosferne materije u koronu. Obilnosti elemenata u koroni ovisi o prvom ionizacijskom potencijalu tzv. FIP-u. Elementi nižeg FIP-a pokazuju veću zastupljenost u koroni nego u fotosferi (za faktor 4 u odnosu na vrijednosti fotosfere u prosjeku). Tu činjenicu potkrepljuju razni spektroskopski podaci, podaci o SEP-u (solarne energetske čestice) te podaci solarnog vjetera, to jest da dolazi do povećanja u iznosu obilnosti elemenata niskog FIP-a u odnosu na one s visokim (> 10 eV). Elementi niskog FIP-a su primjerice Na, K, Mg, Si, Ca i Fe, srednjeg FIP elementa S i visokog FIP su plemeniti plinovi, C, N, O. Većina vodika je u koroni ionizirana te u osnovi nema uočljivih spektralnih linija. Zbog ove činjenice koronalna spektroskopija zahtjeva mjerenje čistog kontinuuma [23].

Elementima koji se vrlo lako ioniziraju već u kromosferi, odnosno oni elementi s niskom vrijednosti prvog ionizacijskog potencijala (FIP), obilnost se povećava za faktor od 3 do 4. S druge strane elementi visokog FIP-a, ostaju neutralni u kromosferi te u solarnoj koroni imaju identične vrijednosti obilja kao u fotosferi. Također kemijski sastav varira od područja do područja, te od strukture do strukture [18,23].

Prvi ionizacijski potencijal različitih elemenata usko je povezan s varijacijama u obilnostima u koronalnoj plazmi, a te razlike se očituju u različitim vrstama struktura poput aktivnih područja, petlja, mlazova itd. Njihova obilnost također ovisi i o prostornom položaju u atmosferi te o solarnom ciklusu. Obilnosti elemenata niskog FIP-a (< 10 eV) povećavaju se u magnetski zatvorenim strukturama u odnosu na fotosferne. Za one elemente visokog FIP-a to ne vrijedi, već su njihove obilnosti gotovo jednake kao i fotosferne. Ta pojava naziva se FIP efekt te ga je moguće kvantificirati pomoću omjera koronalnog i fotosfernog obilja elementa [23].

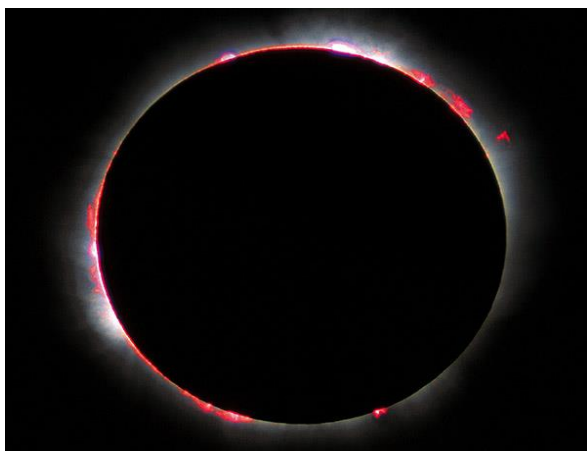
U literaturi su iznesene dvije različite teze zaključene iz dva različita empirijska modela. Jedan model tumači da su vrijednosti elemenata s niskim FIP-om jednake u koroni i fotosferi, a elementi visokog FIP-a su potrošeni odnosno iscrpljeni za otprilike četiri puta u odnosu na fotosfernu vrijednost. Drugi model govori upravo suprotno. Za oba modela postoje potkrijepljujuće analize.

Za prvi model pronađena je reducirana vrijednost obilnosti visokih FIP elemenata helija, kisika i drugih u odnosu na fotosferu. Za drugi model je nađena povećana vrijednost kalcija (koronalna vrijednost) koji ima niski prvi ionizacijski potencijal [23].

Koronalne obilnosti mogu se odrediti i ultraljubičastom spektroskopijom, međutim teško ih je na taj način točno izmjeriti iako je emitirano zračenje iona proporcionalno njegovoj obilnosti. To ukazuje na prisutnost ovisnosti o drugim parametrima. Međutim ova vrsta spektroskopije temelj je za određivanje obilnosti plemenitih plinova [23,24].

7.2. Kromosfera

Između fotosfere i solarne korone smještena je kromosfera, heterogena prijelazna zona s izraženim temperaturnim gradijentom. Spektri kromosfere ukazuju na prisutnost neutralnih i jednom ioniziranih atoma. Sunčeva kromosfera izrazito je bitna, međutim i vrlo kompleksna. Zbog toga o njoj nije bilo puno podataka sve do nedavno [25].



Slika 10. Sunčeva kromosfera nalikuje na crveni prsten tijekom solarne eklipse [26]

Spektroskopske analize obilnosti u kromosferu imaju više nedostataka i problema što onemogućuje izravna mjerenja. Jedan od njih je to što je (hidrostatička) visina ljestvice mnogo manja od vertikalnog proširenja funkcije doprinosa apsorpcijske i emisijske linije. Također, još uvijek nema dostupnog adekvatnog 3D magnetno-hidrodinamičkog modela za kromosferu koji bi pouzdano odredio njezino obilje elemenata stoga se javlja potreba za razvojem kvalitetnijih i

naprednijih simulacija. Novi 3D hidrodinamički modeli omogućiti će duboki uvid u složenu kromosfersku dijagnostiku te prikupljanje podataka [25].

7.3. Solarne energetske čestice i solarni vjetar

Solarne energetske čestice potječu iz udarnih valova sa Sunca koji pritom izbacuju koronalnu masu. Ta pojava uzrokuje tok čestica SEP-a prema van, u međuplanetarno magnetsko polje blizu Zemlje. Upravo tamo ih je moguće izravno detektirati i pobrojiti, umjesto da se broje emitirani fotoni u blizini Sunca [23,27].

Izbacivanjem fotosferne i koronalne mase nastaje solarni vjetar koji nosi solarni materijal u interplanetarni prostor, a sastoji se od plazme s visoko ioniziranim atomima. Plazma solarnog vjetra je također je ubrzana iz solarne korone, stoga je za očekivati da će se sastav vjetra i korone podudarati (a ne fotosfere). Elementi u solarnom vjetru, kao i njihova brojnost, mogu se odrediti iz povratnog uzorka već spomenute sonde Genesis ili masenom in situ spektroskopijom. Čestice solarnog vjetra se na identičan način broje kao i solarne energetske čestice. Efekt prvog ionizacijskog potencijala FIP utječe na frakcioniranje elemenata solarnog vjetra, međutim djelovanje efekta je puno blaže nego na čestice SEP. No, spektroskopijom se elementi SEP čestica mogu s puno većom pouzdanošću otkriti [23].

Postoje dva stanja solarnog vjetra, brzi i spori vjetar. Dva tipa se također razlikuju prema omjeru elementarnog naboja na pr. O_7^+/O_6^+ ili C_6^+/C_5^+ . Brzi solarni vjetar potječe iz hladnih koronalnih rupa, te kao posljedicu ima prosječno niža stanja naboja. On je također frakcioniran s faktorom 2 ili manjim, no vrijednosti su mu bliže fotosfernim. Spori vjetar s druge strane proizlazi iz znatno toplijeg pojasa, s višim stanjima naboja, Spori vjetar snažnije je frakcioniran i to faktorom 2,5 i više. Brzi vjetar smatra se najbližim onom što možemo dobiti fotosfernim rezultatima (in situ analize), zbog svog minimalnog frakcioniranja i varijabilnosti. Kompozicijske razlike između dvije vrste vjetra još uvijek nisu u potpunosti razumljive [23].

Solarne energetske čestice su neovisne i različiti su uzorak korone, nisu isključivo ubrzani solarni vjetar. Korona uzorkovana iz solarnih čestica razlikuje se od one iz solarnog vjetra, značajnija razlika očituje se u elementima srednjeg ionizacijskog potencijal FIP (C, S, P...) te ona omogućuje određivanje izvora solarnog vjetra i čestica (SEP) [23,27].



Slika 11. Solarni vjetar [28]

8. ZAKLJUČAK

Za današnji je kemijski sastav Sunca najpouzdaniji izvor spektra apsorpcijskih linija fotosfere. Prezentirane obilnosti solarnih elemenata te njihov način određivanja značajne su za napredak u razumijevanju kemijskog sastava Sunca, ali i solarnog sustava u cijelini. Solarna spektroskopska analiza već je doživjela znatna poboljšanja čime su omogućeni bolji i precizniji rezultati obilja elemenata i to u vidu korištenja sofisticiranijih, visoko realističnih 3D (NLTE) modela solarne atmosfere. Na taj način promatrane su obilnosti 13 elemenata (C, N, O, Li, Na, Mg, Al, Si, Ca, K, Mn, Ba i Fe), a ostali elementi analizirani su na temelju 3D LTE modela. Dio elemenata analizirano je NLTE metodom međutim u 1D modelu. Stoga je posebno važno za buduće analize kao prioritetno postaviti implementaciju 3D NLTE modela, kako bi se minimizirale pogreške i nesigurnosti. Plemeniti plinovi obrađeni su alternativnim indirektnim metodama. Nesigurnosti (statističke i sustavne) u izračunima su itekako prisutne, međutim pomno su procijenjene. Obilnosti nekih elemenata zaključene su iz meteoritskih vrijednosti, pa je sveukupno moguće odrediti obilja preko 80 elemenata u Sunčevu sustavu. Također je važno spomenuti neistražen utjecaj LTE odstupanja jednog elementa, na druge elemente, čime bi došlo do moguće dodatne izmjene vrijednosti obilnosti. Novije analize iznjedrile su dvije iznenađujuće zanimljivosti. Prva je nedosljednost sastava mjerenog spektroskopijom (na površini) i solarne unutrašnjosti (helioseizmologijom), koja se pokušava razriješiti dugi niz godina i predstavlja ne samo solarni, već i zvjezdani problem. Drugo otkriće jest da najčišći meteoriti koji se koriste u analizama obilnosti u komparativne svrhe, CI kondriti, nemaju potpuno jednaki kemijski sastav kao Sunce, a njihov sastav smatrao se ekvivalentnim više od pola stoljeća.

Sunčeva atmosfera pokazuje značajna odstupanja obilnosti elemenata od fotosfere, iako je činjenica da je prisutan kontinuirani protok fotosferne materije u atmosferu. Obilnosti elemenata u koroni ovisi o prvom ionizacijskom potencijalu tzv. FIP-u. Elementi nižeg FIP-a pokazuju veću zastupljenost u solarnoj atmosferi nego u fotosferi, dok elementi viših potencijala pokazuju gotovo identičnu obilnost.

9. POPIS LITERATURE

- [1] M. Asplund, N. Grevesse, A. J. Sauval, P. Scott, The chemical composition of the Sun, <https://arxiv.org/pdf/0909.0948.pdf> (pristup 10.8.2021.)
- [2] Spektroskopija, https://www.phy.uniri.hr/files/nastava/stranice_kolegija/fizicki_praktikum_IV_ECTS_6/8%20Spektroskopija.pdf (pristup 12.8.2021.)
- [3] NASA Science, Solar System Exploration, <https://solarsystem.nasa.gov/missions/genesis/in-depth/> (pristup 16.8.2021.)
- [4] M. Asplund, A. M. Amarsi, N. Grevesse, The chemical make-up of the Sun: A 2020 vision, <https://arxiv.org/pdf/2105.01661.pdf> (11.8.2021.)
- [5] <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=71046> (pristup 18.8.2021.)
- [6] J. Kubat, Basic of the NLTE physics, <https://arxiv.org/pdf/1406.3553.pdf> (pristup 16.8.2021.)
- [7] M. W. Jackson, Fraunhofer and his spectral lines, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/andp.201400807> (pristup 14.8.2021.)
- [8] Science Direct, <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/fraunhofer-line> (pristup 14.8.2021.)
- [9] American Museum of Natural History, Cecilia Payne and the Composition of the Stars, <https://www.amnh.org/learn-teach/curriculum-collections/cosmic-horizons-book/cecilia-payne-profile> (pristup 17.8.2021.)
- [10] K. Lodders, Solar Elemental Abundances, <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1912/1912.00844.pdf> (pristup 24.8.2021.)
- [11] Oxford Reference, <https://www.oxfordreference.com/view/10.1093/oi/authority.20110803095827784> (pristup 21.8.2021.)
- [12] Britannica, Forbidden lines, <https://www.britannica.com/science/forbidden-lines> (pristup 24.8.2021.)
- [13] P. Scott, N. Grevesse, M. Asplund, A. Jacques Sauval, K. Lind, Y. Takeda, R. Collet, R. Trampedach, W. Hayek, The elemental composition of the Sun I. The intermediate mass elements Na to Ca, <https://arxiv.org/pdf/1405.0279.pdf> (pristup 27.8.2021.)

- [14] Astronomy&Astrophysics, Metallicity,
<https://www.aanda.org/glossary/194-metallicity> (pristup 23.8.2021.)
- [15] N. Grevesse, P. Scott, M. Asplund, A. Jacques Sauval, The elemental composition of the Sun III. The heavy elements Cu to Th,
<https://arxiv.org/pdf/1405.0288.pdf> (pristup 27.8.2021.)
- [16] NASA Science Space Place, Sunspots and Solar Flares,
<https://spaceplace.nasa.gov/solar-activity/en/> (pristup 2.9.2021.)
- [17] A. I. Shapiro, P. Hardi, S. K. Solanki, The Sun as a Guide to Stellar Physics,
https://pierre.fkit.hr/webmail/?_task=mail&_action=get&_mbox=INBOX&_uid=2110&_token=g1EiW6qqe05yP6Hs8EP47FZzbZhuUJEf&_part=3 (pristup 1.9.2021.)
- [18] <https://courses.lumenlearning.com/astronomy/chapter/the-structure-and-composition-of-the-sun/> (pristup 3.9.2021.)
- [19] <https://www.britannica.com/science/corona-Sun> (pristup 2.9.2021.)
- [20] D.B. Seaton, J. M. Hughes, S. K. Tadikonda, A. Caspi, C. DeForest, A. Krimchansky, N. E. Hurlburt, R. Seguin, G. Slater, The Sun's Dynamic Extended Corona Observed in Extreme Ultraviolet, <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2105/2105.08028.pdf> (pristup 2.9.2021.)
- [21] S. Narendranath, P. Sreekumar, Netra S Pillai, S. Panini, K. Sankarasubramanian, Juhani Huovelin, Coronal Elemental Abundance: New Results from Soft X-ray Spectroscopy of the Sun,
<https://arxiv.org/pdf/2011.08584.pdf> (pristup 2.9.2021.)
- [22] NASA Science Space Place, What Is the Sun's Corona,
<https://spaceplace.nasa.gov/sun-corona/en/> (pristup 2.9.2021.)
- [23] J. T. Schmelz, D. V. Reames, R. von Steiger, S. Basu, COMPOSITION OF THE SOLAR CORONA, SOLAR WIND, AND SOLAR ENERGETIC PARTICLES,
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-637X/755/1/33/pdf> (pristup 3.9.2021.)
- [24] D. A. Falconer, J. M. Davila, R. J. Thomas, RELATIVE ELEMENTAL ABUNDANCES OF THE QUIET SOLAR CORONA AS DETERMINED BY SERTS,
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.583.7061&rep=rep1&type=pdf>
 (pristup 3.9.2021.)

[25] P. Hardi, COMPOSITION OF THE SOLAR CHROMOSPHERE AND TRANSITION REGION,

<https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.551.2114&rep=rep1&type=pdf>

(pristup 4.9.2021.)

[26] UCAR, Center for Science Education, The Sun's chromosphere (Lower Atmosphere)

<https://scied.ucar.edu/learning-zone/sun-space-weather/solar-chromosphere> (pristup 4.9.2021.)

[27] J. C. Raymond, J. E. Mazur, F. Allegrini, E. Antonucci, G. Del Zanna, S. Giordano, G. Ho, Y. K. Ho, E. Landi, A. Lazarus, S. Parenti, G. Poletto, A. Reinard, J. Rodriguez-Pacheco, L. Teriaca, P. Wurz, L. Zangrilli, Coronal and Solar Wind Elemental Abundances,

https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/87583/49_1.pdf%3Bjsessionid%3D349185A328D5EA23B73692C66410A468?sequence%3D2& (pristup 2.9.2021.)

[28] ORBIT INSIDE, Hazards Of Space Weather And How To Forecast Solar Wind Blast,

<https://www.orbitinside.com/hazards-of-space-weather-forecast-solar-wind/> (pristup 3.9.2021.)