

Simon Ülen^{1,2}, Ines Gabor², Veronika Poštrak²,
Rok Vogrinčič³

DOLOČANJE LASTNOSTI ZVEZD S SPEKTROSKOPIJO

POVZETEK

Spektroskopija je metoda, ki se uporablja za preučevanje določenih objektov s pomočjo njihove izsevane svetlobe. Namen raziskovalne naloge je z amaterskim teleskopom ustvariti dovolj kakovostne spektre zvezd, da lahko preko valovnih dolžin spektralnih črt razberemo elementarno sestavo le-teh. Na začetku raziskovalne naloge so predstavljene osnove spektroskopije in klasifikacija spektrov. V nadaljevanju je z emisijo in absorpcijo natančno predstavljen nastanek spektrov in spektralnih črt. Predstavljene so tudi lastnosti spektralnih črt. Na koncu teoretičnega dela je predstavljeno še elektromagnetno valovanje in sevanje zvezd ter jedrske reakcije, ki potekajo v zvezdah. V poglavju Eksperimentalni del so predstavljene metode dela in uporabljena oprema za izdelavo spektrov. Temu sledijo postopki eksperimentalnega dela in dobljeni rezultati, ki so kasneje analizirani. Končni del vsebuje še ovrednotene hipoteze. V nalogi je dokazano, da se elementarne sestave zvezd med seboj razlikujejo in da je z amaterskim teleskopom in digitalnim fotoaparatom možno posneti različne spektre zvezd, ki so uporabni za nadaljnjo analizo.

Ključne besede: *spektroskopija zvezd, barvni spekter, spektralne črte, lastnosti zvezd*

Uvod

Spektroskopija je metoda, ki se uporablja za preučevanje določenih objektov s pomočjo njihove izsevane svetlobe; obenem je tudi veda, ki proučuje interakcije med materijo in elektromagnetnim valovanjem. Vsaka snov, kemijski element ali spojina seva (ali absorbira) svetlobo točno določenih valovnih dolžin. Spektroskopija nam omogoča, da preko izsevane oziroma absorbirane svetlobe pridobimo dodatne informacije, ki jih s fotometričnimi opazovanji ne moremo pridobiti (na primer kemijska sestava, radialna hitrost in temperatura zvezde). [1]

Spekter svetlobe predstavlja gostoto svetlobnega toka v odvisnosti od valovne dolžine. Ta spekter je zvezen pri trdnih in kapljevinskih svetilih, pri plinskih pa je črtast. [2]

Vrste spektrov

Ločimo zvezni in črtasti spekter. Pri zveznem spektru se barve prelivajo ena v drugo, podobno kot barve pri pojavu mavrice. Dobimo ga, kadar belo oziroma vidno svetlobo pošljemo skozi uklonsko mrežico (zaradi uklona in interference svetlobe) ali skozi optično prizmo (zaradi loma svetlobe). Črtasti spekter je niz črt s točno določenimi, za atom značilnimi valovnimi dolžinami, ki so posledica prehodov atomov v vzbujeno stanje. Na podlagi tega ločimo emisijski in absorpcijski spekter.

Emisijski spekter: pri prehodu iz vzbujenega stanja z energijo W_2 v vzbujeno stanje z energijo W_1 izseva atom svetlobo s frekvenco ν , za katero velja:

$$W_2 - W_1 = h\nu = hc/\lambda,$$

kjer je Planckova konstanta $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{Js}$.

Frekvenca svetlobe je sorazmerna z izsevano energijo.

Absorpcijski spekter: dobimo ga, če atome posameznega elementa posvetimo z belo svetlobo – atomi absorbirajo iz vpadne svetlobe tisto, z določeno valovno dolžino, kot jo samo sevajo.

¹Alma Mater Europaea, Slovenska ulica 17, 2000 Maribor

²Gimnazija Franca Miklošiča Ljutomer, Prešernova 34, Ljutomer

³Fakulteta za matematiko in fiziko, Univerza v Ljubljani, Jadranska ulica 19, 1000 Ljubljana

Emisija in absorpcija kažeta, da poteka izmenjava med svetlobo in atomi v paketih, v katerih je energija sorazmerna s frekvenco svetlobe. Pakete svetlobe imenujemo fotoni. Energija fotonov je $W = hv$. Zvezde, ki so plinasta nebesna telesa, torej oddajajo črtasti spekter. Zvezde se med seboj razlikujejo po spektrih, saj so ti posledica absorpcije svetlobe v plinih, površinske temperature in drugih dejavnikov v zvezdni atmosferi. Tako imajo zvezde različno "barvo", tip ter kemijsko sestavo. [2] [3]

Spektralne črte

Spektralne črte nastanejo zaradi prehodov zunanjih elektronov v atomih na nižji ali višji energijski nivo. Razlika v energiji med dvema energijskima nivojema ustreza energiji fotona, ki je odvisna od frekvence izsevane ali absorbirane svetlobe med prehodom elektrona z enega na drugi nivo. Valovne dolžine spektralnih črt so značilne za kemijski element ali molekulo, ki seva ali absorbira.

Absorpcija svetlobe je odvisna tudi od frekvence svetlobe. Vsaka snov ima absorpcijski spekter, ki je zanjo značilen. Črte absorpcijskega spektra pa dobimo samo s plini posameznih atomov. Absorpcijski spekter dobimo le, če gre svetloba iz vira, preden dospe do nas, skozi absorpcijski material. [4]

Intenziteta spektralnih črt nam pove, kje v zvezdni atmosferi so črte nastale. Pri večini zvezd so zgornje plasti atmosfere hladnejše kot nižje plasti. Šibke črte nastajajo globoko v zvezdni atmosferi, njihova središča postanejo ozka in globoka; močne črte pa nastajajo visoko v zvezdni atmosferi. Šibke črte predstavljajo šibko absorpcijo, to pomeni, da ima zvezdna atmosfera majhno neprosojnost in da lahko vidimo globoko v njo. Nasprotno pa predstavljajo močne črte: zvezdna atmosfera ima visoko absorpcijo in veliko neprosojnost. [2] [4]

Spektralni razredi

Intenziteta črt v spektru je v osnovi odvisna od stopnje ionizacije elementov in prisotnosti različnih ionov in atomov v zvezdni atmosferi. Na osnovi tega zvezde klasificiramo v različne razrede. Prvi je tako klasifikacijo opravil Secchi in zvezde razdelil v pet skupin. Moderejšo klasifikacijo pa je opravil Henry Draper.

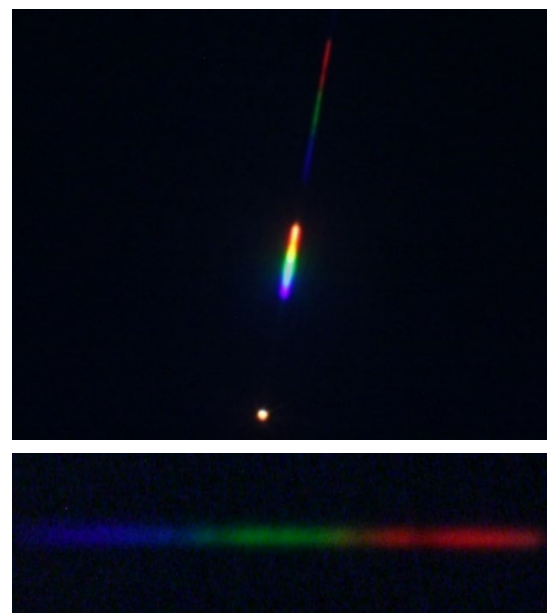
Zvezde so tako razdeljene v sedem osnovnih razredov in štiri podrazrede, znotraj katerih jih delimo še po intenzitetah posameznih črt od 0 do 9. Zaporedje spektralnih tipov dopolnijo še izsevnostni razredi od I do V. [2]

Ekperimentalni del

Preden smo se lotili merjenja spektrov, smo morali poiskati primerne zvezde za raziskovanje. Pri izbiri zvezd smo upoštevali, da so dovolj svetle, torej da imajo čim manjšo navidezno magnitudo. Navidezna magnituda zvezde nam namreč pove, kako svetla je zvezda (manjša magnituda pomeni svetlejšo zvezdo). Izbrali smo šest zvezd z dokaj različnimi spektralnimi tipi za lažje primerjanje (Aldebaran, Mirfak, Sirij, Rigel, Betelgeza, Mirah).

Opravljanje meritev

Meritve so bile opravljene 12. 12. 2019 v Borejcih. Surove slike spektrov željenih zvezd smo dobili z digitalnim fotoaparatom Canon EOS 350D v primarnem gorišču 20-centimetrskega reflektorskega teleskopa STIGMA (f/6.0), z uporabo uklonske mrežice Star Analyser 100. [5] [6]



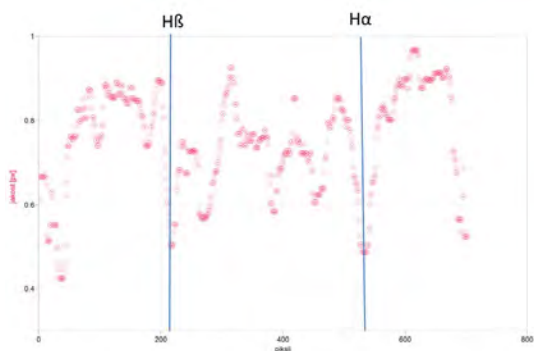
Slika 1: Osnovna in obrezana slika spektra Betelgeze

Z uporabo teleskopa, uklonske mrežice in fotoaparata smo posneli spektre, ki so prikazani na zgornji sliki. Na sliki lahko opazimo ničti, prvi, drugi in del tretjega reda

spektrov. Za nadaljnje raziskovanje je bil najprimernejši drugi red, saj je dovolj močno in razločno viden, obenem pa je spekter dovolj široko razporejen. Prvo sliko smo obdelali tako, da smo dobili le čisti spekter zvezde (spodnja slika).

Obdelava spektrov

Za obdelavo zgoraj dobljenih slik spektrov smo uporabili program MaxIm DL: funkciji Line Profile Window in Vertical Line. Za lažje opazovanje celotnega spektra smo spekter pretvorili v črno-belo, saj nam je to omogočalo jasnejše in bolj pregledno opazovanje spektralnih črt. Vertical Line smo premikali po spektru v razmaku enega piksla in si za pet sredinskih slikovnih točk (pikslov) zabeležili jakost po dolžini celotnega spektra (v pikslih). Vseh pet vrednosti smo sešteli, nato pa od tega odšteli petkratno vrednost ozadja, da smo dobili le čisti signal spektra. S pomočjo programa »continuum_fit.py«, napisanega v jeziku Python, smo zgladili kontinuum spektra (del spektra, kjer ni prisotnih absorpcijskih ali emisijskih črt). Ko smo dobili prilagojene spektre, smo se lotili pretvarjanja enot s pomočjo dveh vodikovih črt.



Slika 2: Graf jakosti svetlobe v pikslih od modre proti rdeči

$$534px \dots\dots\dots 656,28 \text{ nm}$$

$$218px \dots\dots\dots 486,10 \text{ nm}$$

$$656,28 \text{ nm} - 486,10 \text{ nm} = 170,18 \text{ nm}$$

$$534px - 281px = 316px$$

$$170,18 \text{ nm} / 316px = 0,54 \quad \square \quad 1px = 0,54 \text{ nm}$$

Glede na to pretvorbo smo dobili nastavek za računanje pretvorbe za vse ostale grafe:

$$656,28 - x = 0,54(534 - px)$$

*vrednost piksla pri posamičnem grafu za H α črto

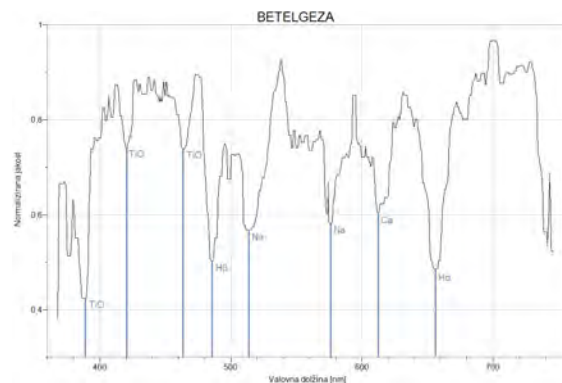
Diskusija

Valovne dolžine absorpcijskih črt smo odčitali in jih primerjali z že znanimi valovnimi dolžinami, ki smo jih našli v bazi podatkov NIST. Na ta način smo ugotovili, kateremu elementu pripada določena spektralna črta. V tabelah je razvidna odčitana vrednost na dobljenih grafih, ki je primerjana z najbližjo najdeno vrednostjo iz baze podatkov. [7]

*Opomba: zaradi gostote nekaterih spektralnih črt ne moremo točno določiti valovne dolžine, zato je včasih v tabeli podana vrednost od – do. Prav zaradi tega se na mestih s podobnimi valovnimi dolžinami lahko pojavlja več elementov. Potrebno se je zavedati, da smo za oceno pretvorbe piksla v valovno dolžino uporabili predpostavko, da je spekter linearen, hkrati pa smo zanemarili premik absorpcijskih črt zaradi radialne hitrosti zvezde. Zvezde z neničelno radialno hitrostjo imajo spekter premaknjen zaradi Dopplerjevega pojava.

V članku je podana samo analiza Betelgeze, vse prej omenjene izbrane zvezde so bile analizirane na enak način, razbrani elementi pa so nas pripeljali do potrditve na začetku zadanih hipotez.

Betelgeza



Slika 3: Graf spektra Betelgeze

Valovna dolžina graf [nm]	Element	Valovna dolžina teorija [nm]
387,90	TiO	387,50
419,22	TiO	418,0
463,50–464,04	TiO	463,50 – 464,04
485,64	H β	486,13
513,00–513,76	Na	514,80
576,36	Ca	585,70
656,28	Hα	656,28
612,54	Ca	612,20

Betelgeza spada v spektralni razred M. V tem razredu v zvezdni atmosferi prevladuje titanov oksid, pojavljajo se nevtralne kovine, atmosfera pa premore veliko natrija. Z našim umerjenim spektrom smo potrdili prisotnost spektralnih črt vseh teh elementov in kovinske spojine.

Preko ustvarjenih spektrov zvezd smo zaznali spektralne črte elementov, ki variirajo od razreda do razreda. Elementarna sestava zvezd se skozi njihovo življenje spreminja, zato se zvezde, ki jih opazujemo na nočnem nebu, razlikujejo po elementarni sestavi.

Iz nastalih spektrov izbranih zvezd se da razbrati spektralne črte helija, vodika in mnogih kovin. Ugotovili smo, da helij in vodik prevladujeta v sestavi bolj vročih zvezd, s padanjem temperature zvezde pa se pojavlja vedno več kovinskih spektralnih črt.

Pri nastajanju grafa smo opazili mnogo odmikov od kontinuuma, a za vsak odmik nismo našli primerne valovne dolžine, ki bi nakazovala na prisotnost določenega elementa. Niti en odklon od krivulje se ni popolnoma ujemal s teoretično vrednostjo valovne dolžine, vsi imajo manjši odklon, kar nakazuje na premik spektralne črte zaradi neničelne radialne hitrosti zvezde. Odmiki, katerim nismo pripisali nobene elementarne vrednosti, so nastali kot posledica šuma na posnetku ali pa so bili zaradi preslabe ločljivosti premalo izraziti. Zaradi razširitev in premikov spektralnih črt ne bo možno natančno določiti vseh sestavnih elementov izbrane zvezde.

Balmerjevo serijo vodika smo zaznali v vseh zvezdah, saj smo preko spektralne črte $H\alpha$ izračunali in umerili skalo valovnih dolžin. A vseeno, nikoli nismo zaznali vseh spektralnih črt Balmerjeve serije vodika.

Zaključek

Iz še tako navadne in šibke svetlobe, ki jo na širnem nebu oddajajo zvezde, smo ustvarili 6 spektrov zvezd ter preko spektralnih črt ogromno izvedeli o njihovi elementarni sestavi ter posledično o njihovi masi in življenjski dobi. Raziskavo bi lahko nadgradili z meritvami radialnih hitrosti, saj so izmerjeni spektri zaradi le-teh malo zamaknjeni. Za to bi morali posneti kalibracijsko lučko. Tipično so to ThAr (Torij Argon) lučke, ki so v laboratorijskem sistemu (ob teleskopu). S pomočjo njihovih črt bi potem kalibrirali spektre zvezd. Iz premika črt bi potem izračunali radialno hitrost zvezde, to pa bi nam povedal Dopplerjev premik: $v/c = \Delta\lambda/\lambda_0$.

Viri

- [1] Galičič, M. Nebo, premazano z zvezdami: več kot sto odgovorov o vesolju in astronomiji. Učila International, Tržič, 2003.
- [2] Čadež, A. Astronomija: Fizika zvezd. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko, Ljubljana, 1999.
- [3] Fizika 3: Učbenik za fiziko v 3. letniku gimnazij in štiriletnih strokovnih šol. Mladinska knjiga, Ljubljana, 2014.
- [4] Emin, M. Astronomska spektroskopija. http://mafija.fmf.uni-lj.si/seminar/files/2009_2010/Seminar-EminSlo.pdf (29-2-2020)
- [5] RSpec Real-time Spectroscopy <https://www.rspec-astro.com/star-analyser/> (10-12-2019)
- [6] Vogrinčič, R. Teleskop Stigma <https://rokvogrincic.wixsite.com/stigma/oprema> (12-12-2019)
- [7] Basic Atomic Spectroscopic Data. https://physics.nist.gov/PhysRefData/Handbook/element_name.htm (6-2-2020)