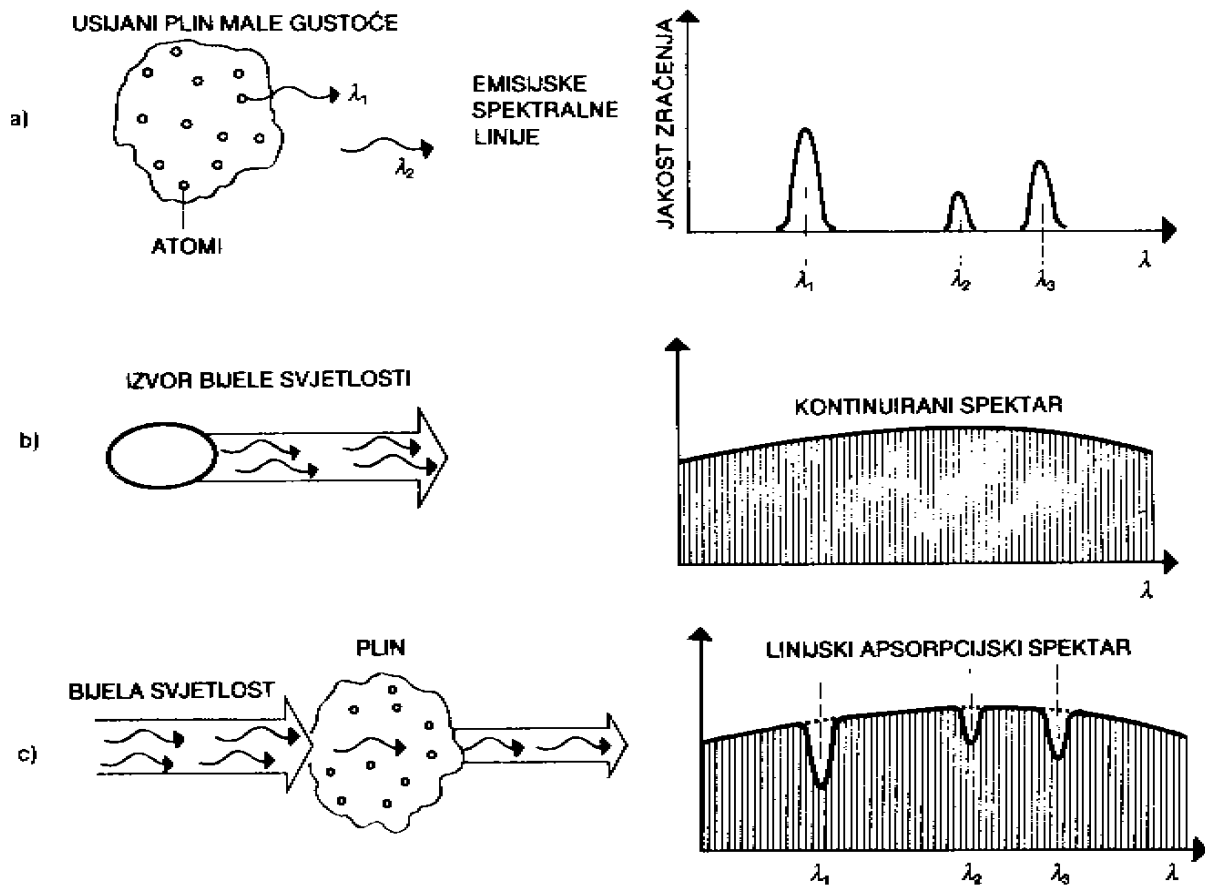


## SPEKTROSKOPIJA ZVIJEZDA

Priredila: dr.sc. Rajka Jurdana Šepić

Spektar izvora svjetlosti nastaje rastavljanjem svjetlosti po valnim duljinama disperzijom pomoću optičke prizme ili optičke rešetke. Zvijezde su plinoviti izvori spektara. S obzirom na sastav plina, međusobne odnose atoma i fizičke parametre koji vladaju u području nastanka spektra on može imati izgled neprekidnog (kontinuiranog) ili linijskog spektra (slika 1.). Linijski spektar ovisno o tome da li plin zrači ili apsorbira može biti emisijski ili apsorpcijski. Molekule kao složene atomske strukture posjeduju složen spektar, organiziran u skupine spektralnih linija – vrpce.



Slika 1. Nastanak kontinuiranog i linijskog spektra

Spektar atoma svakog kemijskog elementa (odnosno molekule) odraz je građe atoma (molekule) te se sastoji od spektralnih linija (vrpca) karakterističnih za kemijski element (molekulu). Zato se motreći spektar nepoznatog izvora svjetlosti može zaključiti koji se kemijski elementi u njemu nalaze. To je osnova spektralne analize – postupka kojim se ustanovljava kemijski sastav tvari koja proizvodi svjetlost te fizikalni uvjeti području njezina nastanka.

Spektroskopija je jedna od najvažnijih metoda kojom se istražuju fizička i kemijska svojstva zvijezda. Temperatura u jezgrama zvijezda viša je od  $10^6$  K, a jezgra je izvor kontinuiranog zračenja. Temperatura atmosfere zvijezde niža je od one u njezinoj jezgri pa u njoj nastaju apsorpcijske spektralne linije atoma i iona. Atmosfere hladnih zvijezda, temperatura nižih od 3000 K, sadrže molekule koje apsorpcijom kontinuiranog zračenja stvaraju apsorpcijski vrpčasti spektar. Emisijske spektralne linije nastaju u području plina visokih temperatura, a ne osobito velikih gustoća. Spektralna

linija predočena je svjetlošću u uskom pojasu valnih duljina. Raspored jakosti spektralne linije po njezinim valnim duljinama nazivamo profil spektralne linije.

Spektralnu liniju, odnosno prijelaz među atomskim energetska stanja kojim ona nastaje nazivamo zabranjenim ako je vjerojatnost nastanka linije vrlo mala, ali se ipak uspijeva ostvariti u području osobito rijetkog plina.

Zvijezde se klasificiraju u spektralne podtipove ili razrede upravo po vrsti, brojnosti, intenzitetima i profilima spektralnih linija. Jedan od pionira zvjezdane spektroskopije bio je J. Fraunhofer po kojem se linijski apsorpcijski spektar Sunca naziva Fraunhoferovim spektrom. Neke od najintenzivnijih Fraunhoferovih linija nazvane su posebnim imenima: kao npr. linije neutralnog natrija  $D_1$  i  $D_2$ , linije jednostruko ioniziranog kalcija K i H itd.

Nastanak spektra vezan je uz građu atoma. U plinovitom stanju u kakvom se nalaze atmosfere zvijezda, atomi se slobodno kreću i sudaraju pri čemu može doći do promjene unutrašnje energije atoma. Slobodnim je atomima svojstveno da su im unutrašnje energije strogo određene tj. kvantizirane. Najmanju energiju atom ima kada se nalazi u osnovnom stanju. Prilikom isijavanja ili upijanja svjetlosti unutrašnja energija atoma se mijenja. Kada atom prelazi iz višeg  $E_2$  u niže energetska stanje  $E_1$  razliku energija stanja  $E$  isijava kao zračenje odnosno svjetlost

$$E = hn = E_2 - E_1.$$

Kada pak prelazi iz nižeg  $E_1$  u više energetska stanje  $E_2$  atom upija zračenje energije

$$E = hn = E_2 - E_1.$$

Svaka vrsta atoma ima osobite spektralne linije zato što svaki atom ima samo njemu svojstvenu ljestvicu energetskih stanja.

### Dopplerov pomak spektralnih linija

Dopplerov efekt je pojava promjene valne duljine svjetlosti do koje dolazi uslijed relativnog gibanja opažača u odnosu na izvora svjetlosti. Ako se, dakle izvor valova svjetlosti udaljava od opažača (ili se opažač udaljava od izvora) opažač će izmjeriti veću valnu duljinu  $\lambda'$  valova svjetlosti od one  $\lambda_0$  koju bi emitirao izvor koji miruje u odnosu na opažača. Govorimo o pomaku spektralnih linija izvora prema dugovalnijem području spektra (što kod optičkih spektara znači prema crvenom).

Prilikom međusobnog približavanja opažača i izvora, spektralnu liniju laboratorijske valne duljine  $\lambda_0$  opažač će mjeriti u položaju  $\lambda'$  gdje je  $\lambda' < \lambda_0$ , odnosno ona će biti pomaknuta prema kratkovalnijem spektralnom području (što kod optičkih spektara znači prema plavom). Brzina je svemirskog tijela pozitivna ako se ono udaljava od promatrača, a negativna ako mu se približava. Promjena se valne duljine prema valnoj duljini mirnog izvora odnosi kao relativna brzina izvora prema brzini svjetlosti odnosno:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c}$$

gdje je  $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda_0$

Ova relacija omogućuje određivanje brzine  $v$  mjerenjem pomaka spektralnih linija  $\Delta\lambda$ . Brzina  $v$  je brzina izvora u smjeru doglednice odnosno radijalna brzina izvora (RV - radial velocity).

Kod relativističkih brzina gibanja izvora primjenjuje se relativistički izraz za Dopplerov efekt:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \sqrt{\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}} - 1$$

### Identifikacija spektralnih linija

Identifikacija spektralnih linija provodi se usporedbom spektra zvijezde s laboratorijskim spektrima u kojima su položaji spektralnih linija različitih atoma precizno ustanovljeni. Energetske razine atoma, s kojih se realiziraju prijelazi odnosno spektralne linije imaju složenu strukturu tj. sastoje se od brojnih energetskih podnivoa. Zato prijelazom među dvama energetskim stanjima atoma nastaje multiplet – skupina spektralnih linija bliskih valnih duljina.

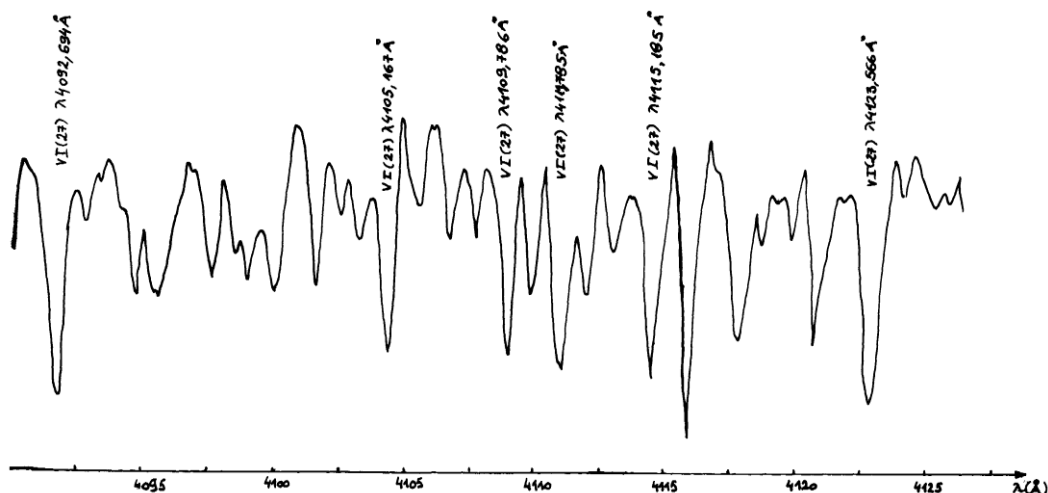
Svojstvo spektralnih linija istog multipleta da se istodobno pojavljuju u spektru koristi se pri identifikaciji zvjezdanih spektara. Prilikom identifikacije, naime, nije dovoljno prepoznati samo jednu spektralnu liniju nekog elementa, nego što više linija istog multipleta. No, u spektru zvijezde ne moraju se pojaviti sve linije koje postoje u laboratorijskom spektru. Jedan od razloga je mala jakost svjetlosti zvijezda zbog kojega je spektar zvijezde teško snimiti. Drugi razlog je što pojava spektralne linije i njezina jakost ovisi o cjelokupnom fizičkom stanju izvora svjetlosti, tj. laboratorijski spektar ne može imati jednak odnos jakosti linija kao spektar zvijezde.

Identificirana spektralna linija označava se simbolom kemijskog elementa, stupnjem ionizacije te brojem multipleta napisanim u zagradi. Pri tome stupanj ionizacije obilježavamo rimskim brojem za jedan većim od stupnja ionizacije: npr. I označava neutralne atome, II jedanput ionizirane, itd. Npr. Fe II (21) je identifikacijska oznaka spektralne linije jedanput ioniziranog željeza koja pripada multipletu broj 21. Pri identifikaciji treba uvažiti mogući Dopplerov pomak linija. Spektralne linije istog multipleta imaju isti Dopplerov pomak. Zabranjene linije označavaju tako da se oznaka kemijskog elementa, stupnja ionizacije i multipleta linije piše u uglatim zagradama, npr. [Fe II (21)]

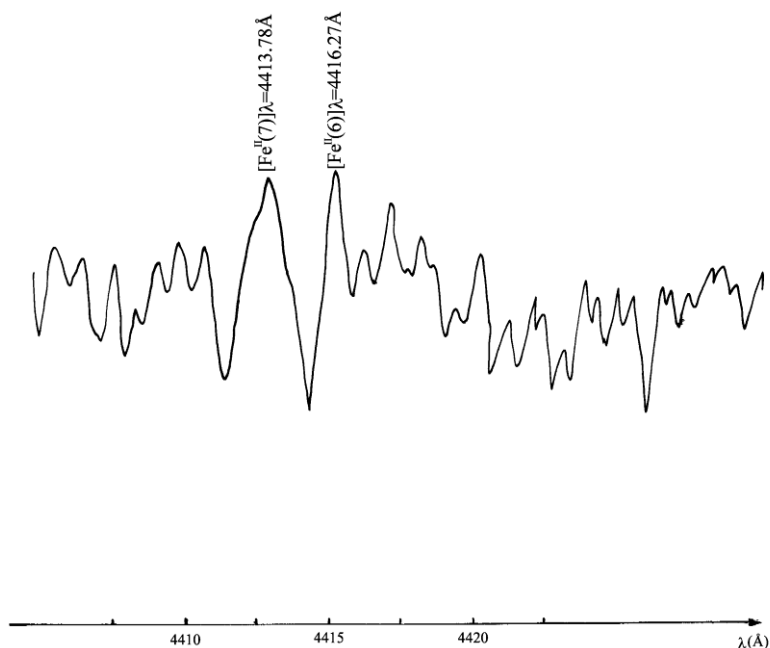
## Vježba 1. Mjerenje radialnih brzina (RV)

### 1.1. RV neutralnih metala i metalnih iona

Slike 2 i 3 prikazuju dva područja spektra promjenljive dvojne zvijezde CH Cygni. Izračunajte RV (radijalnu brzinu) spektralnih linija kojima su laboratorijske valne duljine navedene u spektrima.



Slika 2. Područje spektra CH Cyg namijenjeno mjerenju RV apsorpcijskih linija neutralnog vanadija



Slika 3. Područje spektra CH Cyg namijenjeno mjerenju RV zabranjenih emisijskih linija ioniziranog željeza

### Pitanja uz vježbu 1.1.

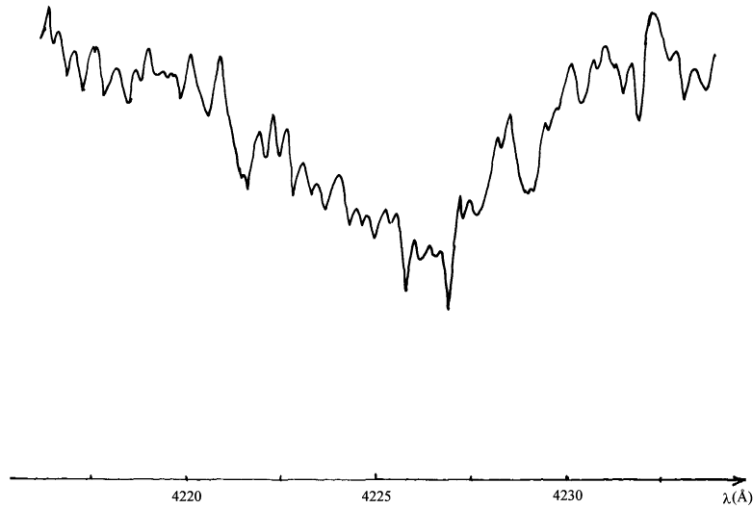
Kojim kemijskim elementima pripadaju označene spektralne linije? Koliki je stupanj ionizacije njihovih atoma? Usporedite RV emisijskih i apsorpcijskih spektralnih linija?

Da li su RV emisijskih i apsorpcijskih linija istih predznaka?

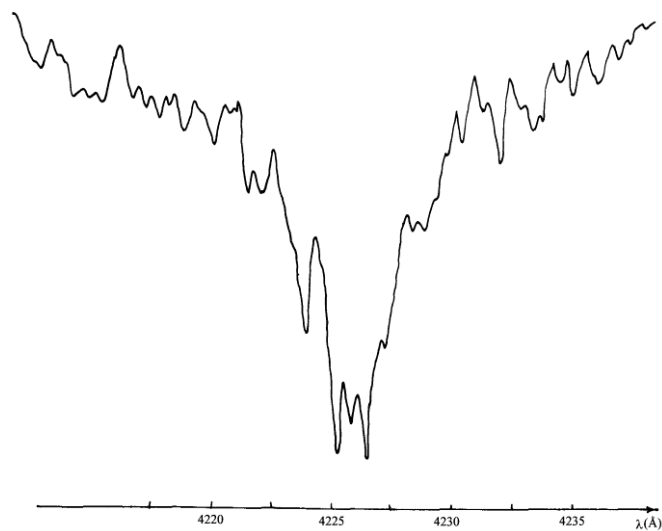
Što možete reći o gibanju područja zvijezde bogatog ioniziranim željezom u odnosu na područje zvijezde u kojem nastaju linije neutralnog vanadija?

## 1.2. RV Fraunhoferovih linija H i K Ca II

Područje Fraunhoferove K linije ioniziranog kalcija u spektru promjenljive dvojne zvijezde CH Cygni snimljeno 1987. godine prikazano je na slici 4., a isto područje snimljeno 1988. godine na slici 5. Ove linije nastaju u vanjskoj zajedničkoj ovojnici dvostruke zvijezde. Spektralne linije imaju apsorpcijski profil složen od dvije apsorpcijske jezgre. On ukazuje na to da je ovojnica slojevita i da se svaki njezin sloj giba različitom brzinom. Izračunajte RV za obiju apsorpcijskih jezgri K Ca II linija ako je  $l_K = 3933,664 \text{ \AA}$ .



Sl. 4. Apsorpcija Ca II u spektru CH Cyg 1987. godine



Sl. 5. Apsorpcija Ca II u spektru CH Cyg 1988. godine

### Pitanja uz vježbu 1.2.

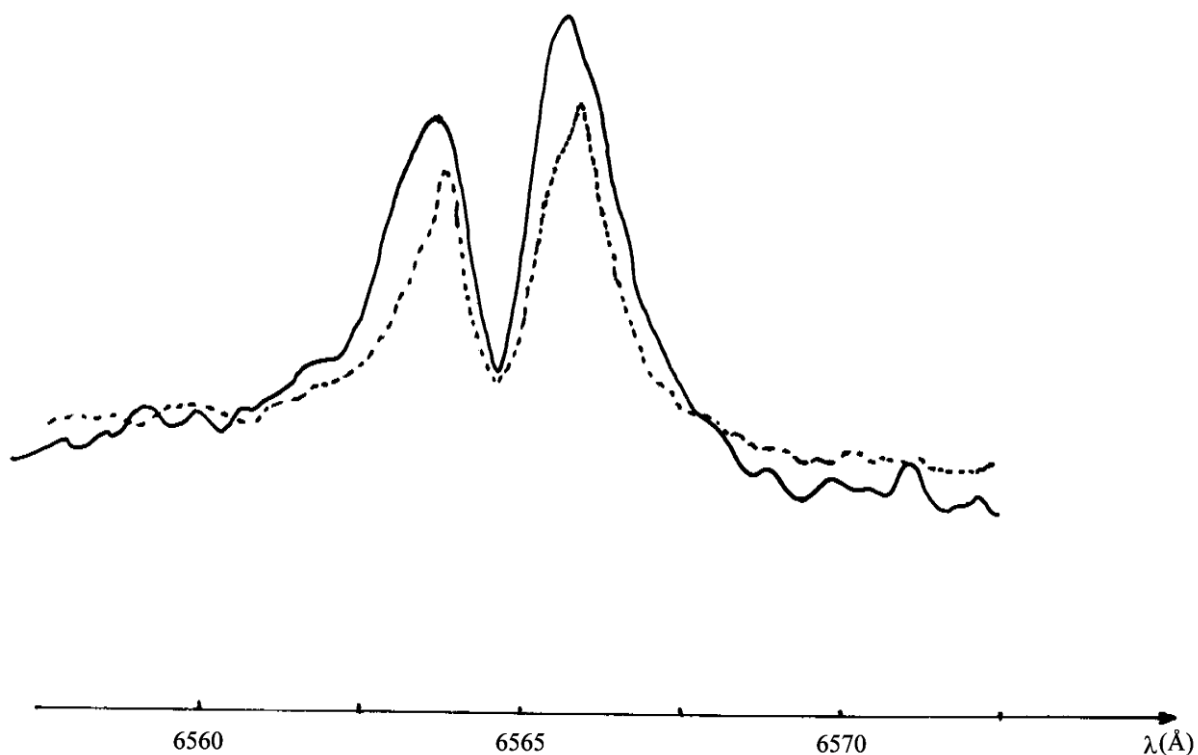
Kako se u odnosu na Zemlju giba ovojnica CH Cyg u kojoj nastaju K linije Ca II?

Kolike su brzine svakog od dva sloja ovojnice?

Kako se brzina ovojnice CH Cyg mijenja u vremenu?

### 1.3. RV komponenti Balmerove linije $H_\alpha$

Slika 6. prikazuje profile Balmerovih linija  $H_\alpha$  simbiotske zvijezde CH Cyg snimljene 1987. godine (punom crtom) te 1988. godine (isprekidanom crtom). Ove linije nastaju u području dvojne zvijezde u kojem postoji strujanje hladnog materijala s hladne divovske zvijezde na toplu patuljastu zvijezdu. Spektralne linije imaju emisijski profil složen od dviju emisijskih komponenti tzv. emisijskih vrhova među kojima postoji središnja apsorpcija. Takav profil ukazuje na postojanje rotirajućeg akrecijskog diska. Izračunajte RV emisijskih vrhova i središnjih apsorpcija Balmerovih  $H_\alpha$  linija za oba vremenska trenutka ako je  $\lambda_{H_\alpha} = 6562,82 \text{ \AA}$ .



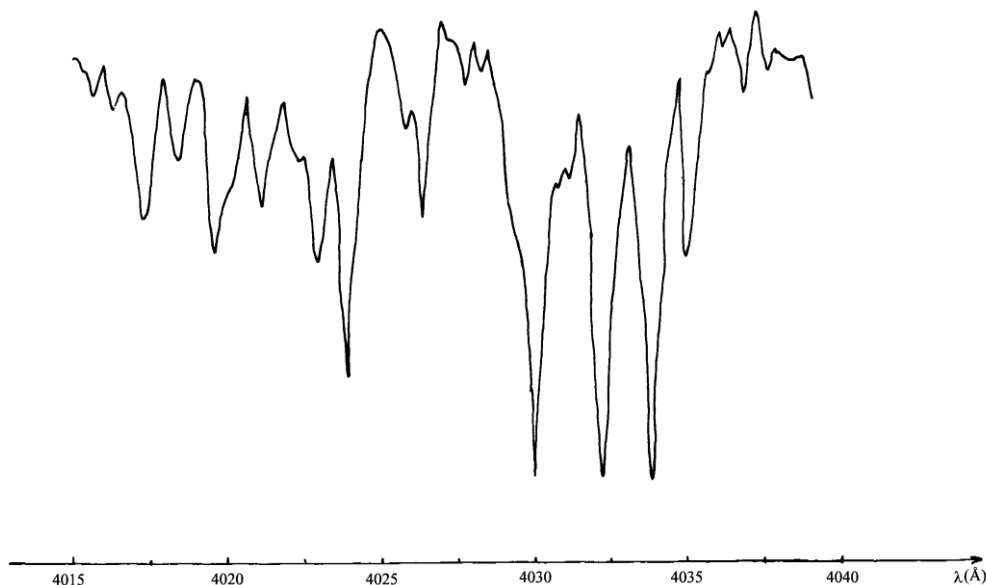
Slika 6. Balmerova  $H_\alpha$  linija u spektrima CH Cyg 1987. i 1988. godine

#### Pitanja uz vježbu 1.3.

Kako se u odnosu na Zemlju giba vodik u akrecijskom disku dvojne zvijezde? Kolike su brzine pojedinih komponenti Balmerove  $H_\alpha$  linije? Kako se RV područja nastanka  $H_\alpha$  linije mijenja u vremenu?

## Vježba 2. Identifikacija spektralnih linija

Slika 7. prikazuje dio spektra promjenljive dvostruke zvijezde CH Cygni. Valne duljine na apscisnoj osi izražene su u angstromima, jedinici uvriježenoj u spektroskopiji. ( $10 \text{ \AA} = 10^{-1} \text{ nm}$ ) Pomoću popisa položaja spektralnih linija kemijskih elemenata danog u tablici 1, pokušajte odrediti kojim bi kemijskim elementima mogle pripadati apsorpcijske spektralne linije sa slike 7. Prilikom identifikacije uzmite u obzir da je Dopplerov pomak spektralnih linija neutralnih metala  $0,5 - 1 \text{ \AA}$  prema kratkovalnom spektralnom području.



Slika 7. Spektralno područje 4015 – 4040 Å namijenjeno identifikaciji apsorpcijskih linija

### Pitanja uz vježbu 2.

Koje spektralne linije ste identificirali s većom sigurnošću, a kojima je identifikacija nesigurna? Zašto? Koliko linija pojedinog multipleta ste identificirali? U kakvom su odnosu radijalne brzine linija istog multipleta? Koji kemijski elementi su prisutni u atmosferi zvijezde u kojoj nastaje apsorpcijski spektar čiji ste dio istražili?

### Literatura:

Marković B., Fizika 4 - Optika i atomska fizika, 1978  
 Unsold A., Der Neue Kosmos, Springer, Berlin, 1967  
 Vujnović V., Astronomija 2, ŠK, Zagreb, 1990

Tablica 1. Popis atomskih apsorpcijskih linija u 4015 – 4040 Å

36

## FINDING LIST

I A	Type	Element	Multiplet No.	I A	Type	Element	Multiplet No.	I A	Type	Element	Multiplet No.
4007.81	P	Forb									
4008.046		He I	56	4020.06		Cl II	76	4031.456		Fe II	151
4008.17		Ti I	187	4020.25		Hf II	40	4031.633		Al II	72
4008.41		V II	32	4020.399		Sc I	7	4031.68		La II	40
4008.46	P	Sc II	16	4020.490		Fe I	913	4031.73	P	Fe I	427
4008.60		Hf II	54	4020.872		Nd II	19	4031.753		Ti I	185
4008.714	P	Sc II	16	4020.898		Co I	16	4031.807		Nd II	
4008.769		Pr II	28	4021.13		C II	27	4031.968		Fe I	655
4008.81		W I	6	4021.330		Nd II	36	4032.40		Fe I	320
4008.913		Fe III		4021.622		Fe I	120,557	4032.628		Ti I	287
		Gd II		4021.75	P	Fe III	45	4032.636		Fe I	44
4008.926		Ti I	12	4021.812		Ti I	185	4032.812		S II	59
4009.270		He I	55	4021.869		Fe I	278	4032.946		Fe II	126
4009.39		S II	55	4021.925		V I	96	4032.975		Ga I	1
4009.54	P	Fe I	556	4022.052		Ni I	238,241	4033.073		Mn I	2
4009.58		Al II	37	4022.263		Cr I	268	4033.18		O II	50
4009.653		Ti I	11	4022.333		Gd II		4033.19	P	Fe I	218
4009.714		Fe I	72	4022.36		Cr II	183	4033.263		Cr I	36
4009.90		C II	27	4022.36		Fe III	45	4033.55		Sb I	1
4009.984		Ni I	150	4022.45		Fe I	173	4033.68		P II	17
4010.18		Fe I	915	4022.744		Fe I	556,654	4033.83		A II	52
4010.77		Fe I	219,320	4023.002		Nd II		4033.857		Pr II	19
4011.089		Co I	2	4023.231		Sm II	4	4033.883		Ti I	208
4011.23		A II	53	4023.388		V II	32	4033.95		Cr I	36
4011.416		Fe I	218	4023.399		Co I	59	4034.012		Nd II	23
4011.534		Ti I	10	4023.58		La II	78	4034.10		Zr II	42
4011.69		Eu II	22	4023.688		Sc I	7	4034.490		Mn I	2
4011.71		Fe I	153	4023.739		Cr I	268	4034.84		Zr II	70
4011.89	P	Fe I	424	4023.986		He I	54	4034.884		Ti I	208
4012.10		K II	2	4023.99		Ni I	170	4035.087		N II	39
4012.16		Fe I	601	4023.99		Zr I	46	4035.09		O II	51
4012.250		Nd II	10	4024.04		O II	99	4035.110		Sm II	33
4012.372		Ti II	11	4024.109		Fe I	277	4035.25	P	Fe I	831
4012.389		Ce II	206	4024.45		Zr II	54	4035.47		A II	33
4012.467		Fe II	126	4024.491		Ce II	49	4035.54	P	Fe II	22
4012.49		Cr I	268	4024.552		Fe II	127	4035.54		Fe III	119
4012.50		Cr II	183	4024.573		Ti I	12	4035.542		Co I	173
4012.51		Mo I	12	4024.727		F II	2	4035.631		V II	32
4012.704		Nd II	70	4024.735		Fe I	560	4035.728		Mn I	5
4012.786		Ti I	186	4024.785		Nd II	24	4035.82	P	Fe III	45
4013.24	P	Ti I	186	4024.92		Zr I	46	4035.828		Ti I	208
4013.587		Ti I	187	4025.010		F II	2	4035.96	P	Ni I	150
4013.641		Fe I	557	4025.012		Cr I	37	4035.98	P	Fe I	426
4013.798		Fe I	485	4025.07		Fe III	53	4036.23		P II	16
4013.798		Gd II		4025.07	P	Ti I	208	4036.37	P	Fe I	279
4013.80		Mg II	22	4025.114		Ni I	240	4036.53		Cl II	76
4013.822		Fe I	466	4025.136		Ti II	11	4036.59		La II	59
4013.87		A II	2	4025.44		Cr I	37	4036.779		V II	9
4013.89	P	Fe I	120	4025.44		Ni I	117	4036.80		Cr I	36
4013.942		Co I	58	4025.49	P	Forb		4037.294		Cr I	36
4013.953		Gd II	17	4025.495		F II	2	4037.332		Gd II	49
4014.28		Fe I	426,427	4025.60		He II	3	4037.665		Ce II	218
4014.489		Sc II	8	4025.67	P	Fe III	45	4037.725		Fe I	118
4014.534		Fe I	802	4025.87		La II	42	4037.897		Gd II	49
4014.668		Cr I	268	4026.080		N II	40	4038.03		Cr II	194
4014.899		Ce II	157	4026.166		Cr I	37	4038.124		Nd II	31
4015.20	P	Fe II	142	4026.189		He I	18	4038.27	P	Ni I	150
4015.377		Ti I	185	4026.362		He I	18	4038.545		V II	155
4015.389		Pr II	32	4026.40		O II	51	4038.622		Fe I	600,728
4015.50		Ni II	12	4026.435		Mn I		4038.82		A II	2
4015.877		Ce II	256	4026.5		Al II	24	4039.100		Cr I	251
4016.264		Ti I	186	4026.539		Ti I	185	4039.12		Fe III	45
4016.432		Fe I	560	4027.032		Co I	3	4039.30		Cr I	261
4016.54		Fe I	277	4027.103		Cr I	37	4039.302		Al II	62
4016.81	P	Fe I	428	4027.20		Zr I	46	4039.357		Pr II	15
4016.82		V II	202	4027.30		V II	201	4039.397		Al II	62
4016.943		Ti I	208	4027.426		Ti I		4039.574		V II	32
4017.096		Fe I	279	4028.332		Ti II	87	4039.83		Y I	6
4017.158		Fe I	527	4028.411		Ce II	47	4039.94		Fe I	276
4017.27		C II	27	4028.791		S II	45	4040.24		Zr II	54
4017.29		V II	216	4029.16		Hf II	23	4040.310		Ti I	185
4017.56		Ni I	171	4029.32	P	Ni I	170	4040.650		Fe I	655
4017.58		Bu II	10	4029.64	P	Ti II	87	4040.762		Ce II	138
4017.596		Ce II	163	4029.840		Fe I	556,563	4040.796		Nd II	30
4017.771		Ti I	185	4029.88		Zr II	41	4041.288		Fe I	603,654
4017.96		Cr II	166	4030.03		Zr I	46	4041.31		O II	50
4018.102		Mn I	5	4030.194		Fe I	72	4041.321		N II	39
4018.282		Fe I	560	4030.28	P	Cr II	19	4041.361		Mn I	5
4018.38		Zr II	54	4030.470		Nd II	32	4041.64	P	Fe II	172
4018.49	P	Fe II	13	4030.499		Fe I	560	4041.675		Sm II	22
4018.50		Cl III	7	4030.512		Ti I	185	4041.79		Cr I	36
4018.826		Nd II	19	4030.755		Mn I	2	4041.84	P	Fe II	13
4019.05		Fe I	219	4030.867		Al II	72	4041.911		Fe I	602
4019.05		V II	201	4030.90	P	Fe I	943	4042.135		Ce II	252
4019.055		Ni I	72	4031.130		Cr I	268	4042.20		A II	28
4019.137		Th II	3	4031.135		Al II	72	4042.246		Cr I	36
4019.288		Co I	16	4031.210		Al II	72	4042.584		Ce II	140
4019.30	P	Co I	18	4031.243		Fe I	186	4042.635		V I	96
4019.45		P II	30	4031.339		Ce II	108	4042.723		Sm II	4
4019.982		Sm II	16	4031.35		Zr II	42	4042.75	P	Fe I	556
4020.05	P	Fe I	556	4031.41		A II	65	4042.905		Sm II	9