

ОД СУНЧЕВОГ СИСТЕМА ДО ГРАНИЦА ВАСИОНЕ

SERBIAN ACADEMY OF SCIENCES AND ARTS

LECTURE SERIES

Book III

FROM THE SOLAR SYSTEM
TO THE FRONTIERS
OF THE UNIVERSE

Accepted at the 9th meeting of the Department of Mathematics,
Physics and Geo-Sciences on December 23rd, 2016

Editor

Academician
ZORAN KNEŽEVIĆ

BELGRADE 2017

СРПСКА АКАДЕМИЈА НАУКА И УМЕТНОСТИ

ЦИКЛУС ПРЕДАВАЊА

Књига III

ОД СУНЧЕВОГ СИСТЕМА ДО ГРАНИЦА ВАСИОНЕ

Примљено на IX скупу Одељења за математику,
физику и гео-науке од 23. децембра 2016. године

Уредник

академик

ЗОРАН КНЕЖЕВИЋ

БЕОГРАД 2017

Издаје
Српска академија наука и уметности
Кнеза Михаила 35, Београд

Технички уредник
Мира Зебић

Лектор и коректор
Снежана Крсчић-Букарица

Тираж
400

Штампа
Службени гласник

САДРЖАЈ
CONTENTS

Предговор – Зоран Кнежевић

Бојан Новаковић, *У нашем суседству: мала тела Сунчевог система* 1
Bojan Novaković, *In our neighborhood: small solar system bodies* 14

Слободан Јанков, *Висока просторна резолуција: нови прозор
за сагледавање тајни васионе* 15
Slobodan Jankov, *High spatial resolution: new window to view
the secrets of the Universe* 23

Оливера Латковић, *Шта се крије у светлости звезда?* 25
Olivera Latković, *What is hiding in the starlight?* 39

Дејан Урошевић, *Остаци супернових: најмоћнији акцелератори
у Галаксији* 41
Dejan Urošević, *Supernova remnants: the most powerful accelerators
in the Galaxy* 53

Лука Ч. Поповић, *Најсјајнији објекти у васиони: активна
галактичка језгра и гама бљескови* 55
Luka Č. Popović, *The brightest objects in the Universe: active
galactic nuclei and gamma ray bursts* 65

Милан М. Ћирковић, *Симпсон, Кардашев и пола века еволуционог
промишљања астробиологије и SETI пројеката* 67
Milan M. Ćirković, *Simpson, Kardashev and half a century
of the evolutionary deliberation of astrobiology and SETI projects* 75

ПРЕДГОВОР

У склопу обележавања 175. годишњице свог континуитета, Српска академија наука и уметности је почев од 2016. године покренула неколико нових облика активности, с циљем успостављања боље комуникације с јавношћу и приближавања рада Академије и њених чланова широкој публици. Покретањем серије циклусних пројеката, од којих се сваки састоји од више предавања наших еминентних научника посвећених истраживањима у некој области науке присутној у Академији, жеља је била да се ове области представе кроз сагледавање њиховог садашњег стања и праваца будућег развоја у свету, али и са аспекта положаја и улоге наше науке у савременим научним токовима. Пројекте осмишљавају и припремају чланови Академије, а предавања се одржавају у њеним просторијама.

Припала ми је част да организујем други по реду циклусни пројекат у овој серији, „Од Сунчевог система до граница васионе”, посвећен астрономији. Идеја са којом сам ушао у овај захтевни подухват била је да се што целовитије и приступачније, али и без претераног поједностављивања, представе савремена астрономска истраживања у свету и код нас, да се сложени феномени физичког света који нас окружује и чији смо само мајушни део на разумљив начин представе радозналом посетиоцу. Пошли смо, стога, на пут од непосредног нам космичког суседства и стигли до најудаљенијих кутака васионе, чули смо одговор савремене науке на питања о томе како је настала наша планета Земља, а како васиона у целини, шта су звезде, далеке галаксије и други тајновити васионски становници, какви процеси се на њима одвијају, најзад, да ли смо сами у свемиру? На крају тог пута стоји овај зборник који са великим задовољством предајемо читаоцу.

Циклусни пројекат не било могуће организовати без драгоцене сарадње мојих колега са Астрономске опсерваторије у Београду и Катедре за астрономију Математичког факултета Универзитета у Београду, чија предавања у оквиру пројекта сте могли да чујете и чије прегледне радове можете да

VIII

прочитате на страницама овог зборника. На томе им се Српска академија наука и уметности и ја најтоплије захваљујемо.

Београд, 23. фебруара 2017. године

Зоран Кнежевић

ОЛИВЕРА ЛАТКОВИЋ*

ШТА СЕ КРИЈЕ У СВЕТЛОСТИ ЗВЕЗДА?

А п с т р а к т. – Звезде су основни градивни делови видљиве васионе. Од звезда се састоје двојни и вишеструки звездани системи, звездана јата и читаве галаксије; око звезда орбитирају екстрасоларне планете; масивне звезде на самрти, супернове, обогаћују међузвездану материју разноврсним хемијским елементима без којих живот на Земљи не би постојао. Ови и многобројни други астрономски феномени изучавају се посматрањем и анализом звездане светлости, која са собом носи невероватне количине информација.

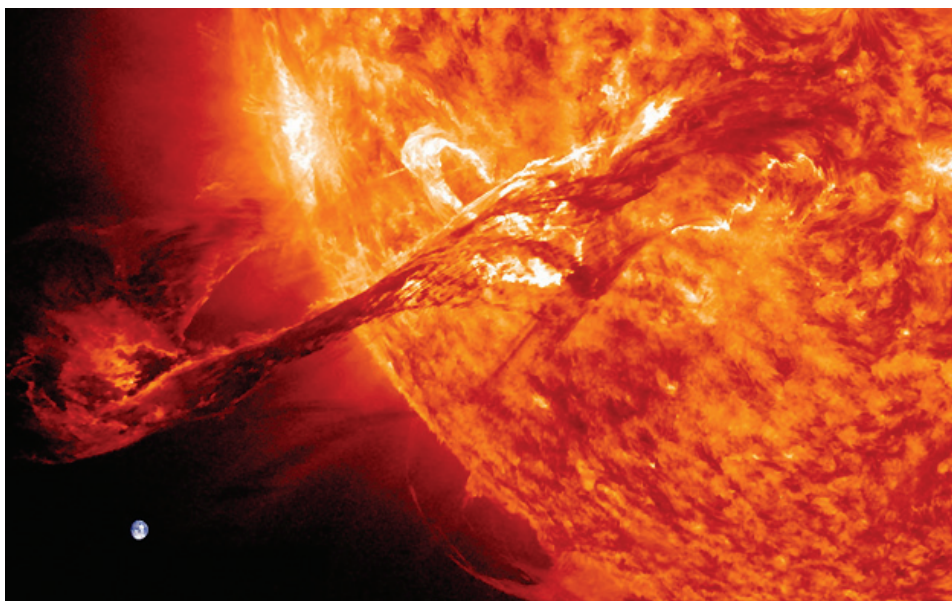
Ово, треће по реду предавање у циклусу „Од Сунчевог система до граница васионе“ приказује основне кораке којима се од посматрања светлости звезда стиже до физике звезда. После кратког увода у теорију структуре и еволуције звезда, биће речи о основним методама посматрања и анализе звездане светлости, а то су фотометрија и спектроскопија. Посебна пажња посвећена је променљивим звездама, и то конкретно еклипсно двојним и пулсирајућим звездама, које су главни предмет мог истраживачког рада. На крају су приказани неки од резултата истраживања физике звезда у Астрономској опсерваторији у Београду.

ЗВЕЗДЕ СУ ОСНОВНИ ГРАДИВНИ ДЕЛОВИ ВИДЉИВЕ ВАСИОНЕ

Голим оком се са Земље може видети око 6.000 најсјајнијих звезда. У веома повољним ноћним условима, голим оком се може назрети и диск Галаксије, Млечни пут, који садржи стотине милијарди звезда. Већ и са малим

* Астрономска опсерваторија, Волгина 7, 11000 Београд, Србија, e-mail: olivia@aob.rs.

телескопом могу се прилично лепо разлучити друге галаксије, које такође садрже стотине милијарди звезда. Са великим телескопом видеће се читава јата и супер-јата која се састоје од стотина и хиљада галаксија. Све ове незамисливо велике и компликоване структуре састоје се од *звезда*. То није случајност. Звезде су један од најосновнијих видова организације материје и елементарни градивни блокови видљиве васионе, као што су атоми елементарне честице свакодневне материје. Али шта су, заправо, звезде?



Слика 1. Ерупција гаса на површини Сунца. Земља је приказана у доњем левом углу само ради поређења величине

Звезде се састоје од огромних количина усијаног гаса, углавном водоника и хелијума, које на окупу држи сопствена гравитација. На слици 1 видимо Сунце, нама најближу звезду, а мајушна плава лопта у доњем левом углу је Земља, приказана тако близу само ради поређења величине. Позната је чињеница да се на површини Сунца непрестано нешто дешава: појављују се и нестају тамне пеге, а усковитлани гас струји дуж линија магнетног поља и повремено експлодира уз силовити бљесак, избацујући млаз материјала вишеструко већи од читавог нашег света.

Али на дуге стазе, Сунце и велика већина звезда веома су стабилни и дуговечни системи. Животи звезда се мере милионима и милијардама година, и већину тог времена звезде проведу у стању хидростатичке равнотеже између супротстављених сила гравитације и притиска у гасу. Притисак се одржава сагоревањем водоника који се у средишту звезде у термонуклеарним реакцијама претвара у хелијум. Управо је део енергије који настаје на овај начин оно што видимо као светлост звезда.

За описивање физичких процеса у којима се ова енергија ствара и преноси из средишта звезде на површину, користи се скуп величина које зовемо фундаментални звездани параметри. То су: маса, радијус, површинска температура, хемијски састав, и тако даље. Али нису све ове величине једнако важне. Маса је с разлогом на првом месту. Она одређује структуру звезде, ток њене еволуције, дужину њеног живота, те могућност живота после смрти.

УКРАТКО О СТРУКТУРИ И ЕВОЛУЦИЈИ ЗВЕЗДА

Звезда се може грубо поделити на средиште и омотач. Природа ових делова се драматично разликује код звезда велике, умерене и мале масе, а одређена је доминантним начином преноса енергије. Кроз слојеве звезданог гаса између којих су разлике у температури умерене, енергија се углавном преноси радијативно, тј. зрачењем; када су разлике у температури велике, главну улогу преузима конвекција, односно пренос енергије мешањем. Код веома масивних звезда, средиште је конвективно, а омотач радијативан. Код звезда умерене масе, попут Сунца, средиште је радијативно, а омотач конвективан. Код звезда најмањих маса (црвених патуљака), конвективни су и средиште и омотач.

Од масе звезде индиректно зависи и њен сјај. Наиме, највећи део масе је код свих звезда концентрисан у релативно малој области око средишта, док се омотач, који попуњава скоро читаву запремину звезде, састоји од релативно ретког материјала који чини само мали део укупне масе. Што је звезда масивнија, концентрација масе у средишту је израженија, а средиште је све веће густине и температуре. Темпо сагоревања гаса у термонуклеарним реакцијама и количина произведене енергије (ϵ) повезани су са густином (ρ) и температуром (T) степеним законом:

$$\epsilon \propto \rho^\lambda T^\nu$$

– при чему се и експоненти λ и ν повећавају са масом звезде. Тако ће звезда веће масе производити и зрачити много више енергије, али ће такође трошити своје нуклеарно гориво много већом брзином него звезда мање масе. Најсјајније, односно најмасивније звезде имају најкраћи животни век.

На овоме је заснована теорија звездане еволуције, по којој се живот сваке звезде може поделити на неколико главних фаза.

Фаза протозвезде, у којој се безоблични облак хладне међузвездане материје сажима под утицајем сопствене гравитације, почиње да се загрева и да ротира, те поприма карактеристичан сферни облик. Протозвезде су тајновити објекти које није лако посматрати и проучавати јер су уроњени дубоко у матични облак гаса и прашине и скривени од оптичких телескопа. Протозвезде нису у хидростатичкој равнотежи: оне се полако сажимају, а њихово зрачење углавном потиче од гравитационе енергије која се ослобађа из упадајућег материјала.

Следећа је фаза „главног низа“ која почиње оног тренутка када термонуклеарно сагоревање водоника у средишту звезде постане доминантан извор њене енергије. Када се то догоди, звезда ступа у стање хидростатичке равнотеже и престаје да се сажима. Ово је убедљиво најдужа фаза код свих типова звезда, и траје док у средишту има довољно водоника за сагоревање и одржавање притиска.

Код звезда најмањих маса, које су у потпуности конвективне, залихе водоника се непрестано обнављају мешањем са материјалом у омотачима, и код њих је ова фаза еволуције дужа од тренутне старости васионе. Код звезда умерених и великих маса прилив „свежег“, водоником богатог материјала из омотача ка средишту је занемарљив, те у њему кад-тад понестане горива, а термонуклеарне реакције просто престану. Средиште тада колапсира под сопственом тежином, а омотач се охлади и многоструко прошири. Након колапса се у средишту, које је сада мање, топлије и гушће, стварају услови за нови тип термонуклеарних реакција, у којима се уместо водоника као гориво троши хелијум, а звезда поново постаје стабилна и улази у фазу црвеног џина.

Иако је по карактеристикама слична фази главног низа (хидростатичка равнотежа се одржава захваљујући термонуклеарним реакцијама у средишту), фаза црвеног џина се одликује знатно краћим трајањем, јер је темпо сагоревања нуклеарног горива и ослобађања енергије бржи, а залихе хелијума многоструко мање од некадашњих залиха водоника. Када се и оне потроше, средиште поново колапсира, а омотач се поново прошири.

За звезде умерених маса, као што је наше Сунце, ово је крај. Патуљасто језгро нема довољну масу за фузију тежих елемената – угљеника, кисеоника, итд. Нема довољно масе ни да спречи своје омотаче у ширењу да заувек напусте њено гравитационо поље. На крају уместо звезде остане бели патуљак у центру тзв. планетарне маглине, коју чини гас из одбачених омотача. Бели патуљак се потом веома полако хлади, док не престане да сија.

Звезде великих маса не одлазе у смрт овако мирно и тихо. Њихова језгра имају довољно масе да после сваке фазе сажимања могу да наставе производњу енергије нуклеарном фузијом све тежих елемената, преко целог периода система – све до гвожђа. Фузијом гвожђа се више не ослобађа енергија; штавише, за њу би било потребно *уложити* енергију. Када у језгру масивне звезде не остане ништа осим гвожђа, долази до коначног гравитационог колапса после кога нема опоравка: језгро имплодира, а омотачи експлодирају у једном од најспектакуларнијих космичких догађаја – у експлозији супернове.

После тога од звезде може да не остане ништа осим одбаченог материјала који у виду сјајне маглине неправилног облика наставља да се шири и хлади милионима година. Али у неким случајевима колапсирано језгро преживи као компактни објекат: неутронска звезда или црна рупа. Да ли и у ком облику ће звезда преживети ову последњу, катаклизмичну промену, такође зависи од масе: само звезде највећих маса могу на крају свог века да постану црне рупе.

Како све ово знамо? Како се мере маса и други звездани параметри?

ПОСМАТРАЊЕ И АНАЛИЗА ЗВЕЗДАНЕ СВЕТЛОСТИ

Све што знамо о звездама, знамо на основу њихове светлости. Нама најближа звезда, Сунце, налази се на удаљености од 150 милиона километара од Земље, а прва следећа, *Proxima Centauri*, на око четири светлосне године, или четрдесет хиљада милијарди километара. А између је само вакуум. Светлост и други електромагнетни таласи су једини тип информације који уопште можемо да добијемо са удаљених звезда.

Међу многобројним посматрачким методама за проучавање светлости звезда, као најосновније се издвајају фотометрија и спектроскопија.

Фотометрија

Фотометрија је мерење количине светлости, тј. сјаја звезде. У астрономији се сјај изражава у логаритамским јединицама: магнитудама односно звезданим величинама, код којих већим бројевима одговара мањи сјај и обрнуто. Повећање магнитуде (m) за једну јединицу одговара повећању сјаја (E) за 2,5 пута:

$$m_2 - m_1 = -2,5 \log_{10} \frac{E_2}{E_1}$$

Звезде видљиве голим оком имају магнитуде од 0 до 6; пун Месец достиже магнитуду од око -13, а Сунце око -27.

Разлику правимо између привидних и апсолутних магнитуда. Апсолутна магнитуда звезде је мера њеног стварног сјаја и одговара привидној магнитуди коју би измерио посматрач удаљен од звезде тачно десет парсека (32,6 светлосних година). Стварни сјај звезде, или *луминозности* (L) је сразмерна површини звезде (тј. квадрату радијуса, R) и четвртој степену површинске температуре (T):

$$L \propto R^2 T^4$$

Важно је знати луминозност звезде јер она представља индикацију масе. Рекли смо да темпо сагоревања нуклеарног горива, па отуд и количина ослобођене енергије, зависе од масе. И заиста, постоји добро дефинисана и посматрањима потврђена степен релација између масе и луминозности:

$$m \approx L^a$$

Међутим, количина светлости E коју примамо са извора луминозности L се смањује са квадратом растојања (r):

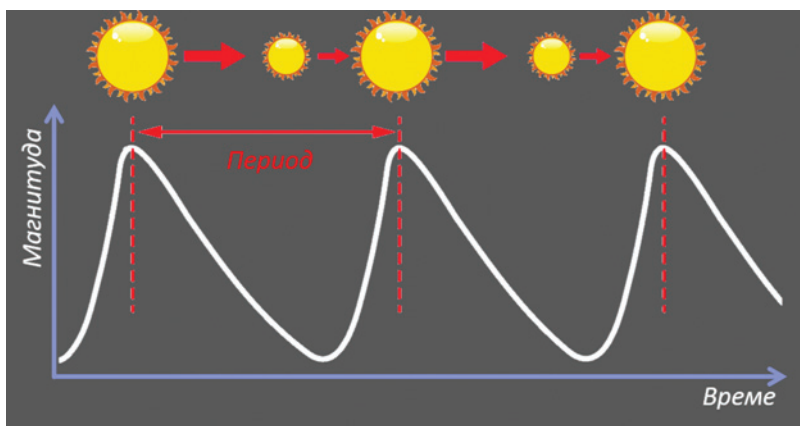
$$E \propto L/r^2$$

Када уочимо неку сјајну звезду на небу, ми у ствари не знамо зашто је она сјајна: можда нам је само близу? Можда је јако топла? Или јако велика? Сунце је без сумње најсјајнија звезда за посматраче на Земљи, иако није ни

веома велико, ни веома топло у односу на друге звезде – само је неупоредиво ближе. *Привидна магнитуда* је оно што меримо; тек ако знамо удаљеност звезде, можемо да израчунамо њену луминозност, односно *ајсолућину магнитуду*; и обрнуто, само ако знамо њену луминозност, можемо да израчунамо колико је далеко.

Код одређених класа променљивих звезда луминозност може да се одреди независно од привидног сјаја. Једна таква класа су циновске пулсирајуће звезде које се зову цефеиде.

На слици 2 приказана је илустрација тзв. *криве сјаја* једне цефеиде. Крива сјаја је промена количине светлости звезде током времена. Код цефеида до промена у сјају долази услед пулсирања: оне се наизменично шире и сажимају, што доводи до хлађења и загревања и јасно се одражава на количину ослобођене енергије, тј. светлости. Промене количине светлости су периодичне: понављају се са великом правилношћу из циклуса у циклус. Период се дефинише као временски интервал између узастопних тренутака када звезда достигне максимални или минимални сјај.



Слика 2. Илустрација криве сјаја цефеиде

Посматрања показују да је код цефеида период пулсирања повезан са луминозношћу једноставним линеарним законом. Што је период дужи, то је већи апсолутни сјај звезде. А ако знамо апсолутни сјај, онда из привидног сјаја можемо да закључимо колико је звезда далеко.

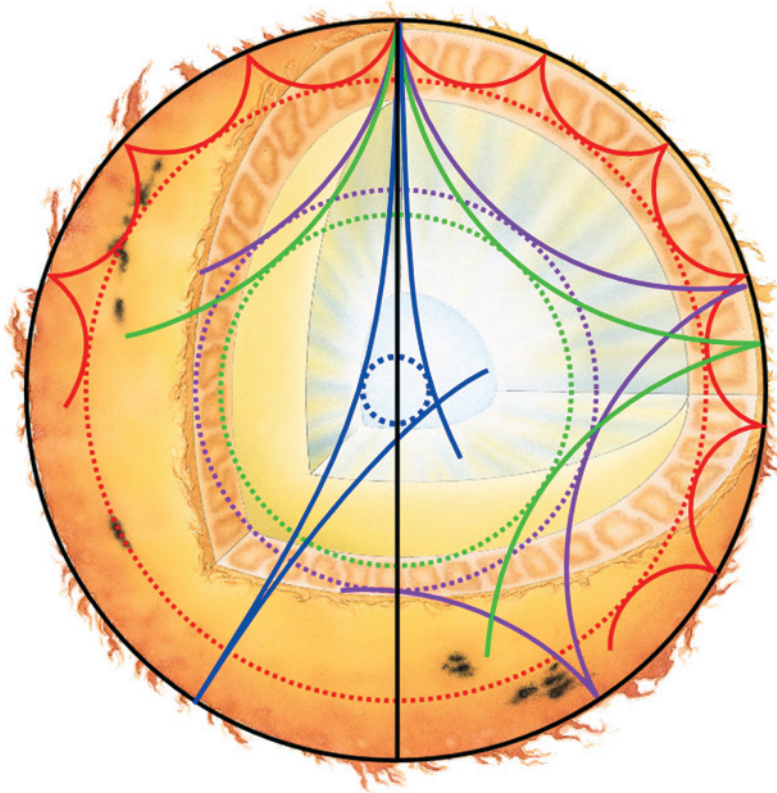
Ово је информација од непроцењиве вредности за све области астрономије, јер омогућава процену удаљености других галаксија. Довољно је уочити једну цефеиду у другој галаксији – а цефеиде су циновске звезде великог сјаја, па се релативно лако уоче – и измерити јој период пулсирања, па може да се процени њена даљина, а самим тим и даљина галаксије којој припада.

Проучавањем звезданих осцилација бави се младо поље астрономије које се зове астросеизмологија. Осим пулсација, тј. радијалних осцилација

(при којима остаје очувана сферна симетрија звезде), постоје и нерадијалне звездане осцилације много мањих амплитуда које се јављају код других типова променљивих звезда. Из анализе оваквих осцилација могу се добити драгоцене информације не само о маси, већ и о унутрашњој структури звезде.

Унутрашњост звезде је неприступачна за конвенционалне методе посматрања: посматрана светлост звезда долази са њихове *површине* и носи информације о површинским условима (температури, хемијском саставу, гравитационом убрзању итд.). Звездане осцилације су манифестација простирања механичких таласа кроз унутрашњост звезде, и са собом носе информације о уловима *исход* површине.

На слици 3 су приказани различити механички таласи који се на свом путу кроз унутрашњост звезде крећу кроз слојеве различите густине и других карактеристика. При прелазу из слоја у слој сваки од ових таласа се прелама, док се коначно не одбије и не врати на површину, где изазива померање материјала које посматрач уочава као малу осцилацију одређене



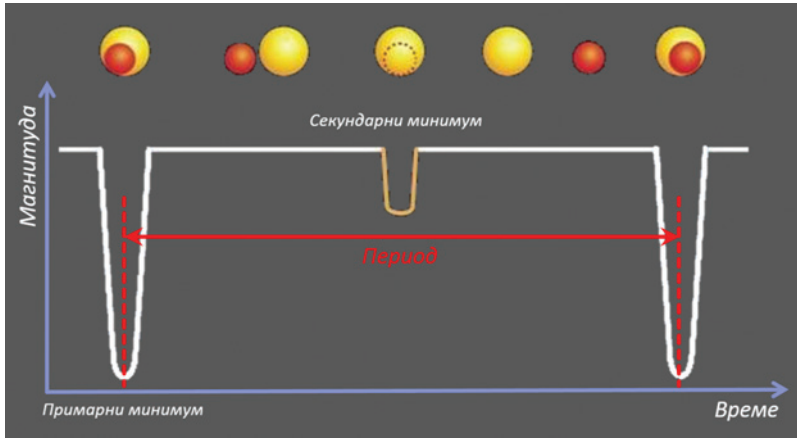
Слика 3. Илустрација простирања механичких таласа кроз унутрашњост звезде

фреквенције и амплитуде. Ове величине, које можемо да измеримо на основу више крива сјаја, одређене су особинама слоја где се талас одбија: најпре његовом густином, али такође и температуром и хемијским саставом. Тако из посматрања звезданих осцилација можемо, нпр. да одредимо брзину ротације језгра, које је скривено дубоко у унутрашњости, затим дебљине слојева у којима се енергија преноси радијативно или конвективно, и многе друге информације.

Овакве студије су још пре педесет година увелико рађене за Сунце (у том случају говоримо о *хелиосеизмологији*), чија је унутрашња структура позната са великом тачношћу на основу посматрања малих осцилација. Захваљујући ултрапрецизној фотометрији са сателитских опсерваторија *CoRoT* и *Kepler*, сада се зна за хиљаде звезда са малим и великим осцилацијама. Анализом овог великог узорка установљено је, између осталог, да се из односа међу фреквенцијама малих осцилација налик Сунчевим, могу израчунати глобалне карактеристике удаљених звезда, као што су маса и радијус, а већ смо се уверили да су то подаци од непроцењиве вредности за астрономију.

Још једна класа променљивих звезда код којих је могуће одредити луминозност су тзв. еклипсно двојни системи. Код ових објеката су за промене количине светлости током времена одговорна међусобна помрачења, а не физичка променљивост као код цефеида. Наиме, у двојним системима имамо две звезде које се крећу под утицајем међусобног гравитационог привлачења. То кретање је уређено и периодично, по кружним или елиптичним орбитама, по свему налик кретању планета око Сунца. Када је орбита у повољном положају у односу на посматраче на Земљи, звезде ће се међусобно помрачивати, што се јасно одражава на количину светлости коју детектујемо. Еклипсно двојни системи, иако се састоје од две одвојене звезде, при посматрањима изгледају као јединствени тачкасти објекти и углавном се не могу раздвојити чак ни најмоћнијим телескопима. Постоје, наравно, двојне звезде веома великих орбита, код којих је могуће разлучити једну звезду од друге, али што је орбита већа, то је мања вероватноћа да ћемо моћи да видимо помрачења. Већина еклипсно двојних система се састоје од звезда које су међусобно удаљене много мање него Земља и Сунце.

Крива сјаја еклипсно двојног система илустрована је на слици 4. Највише светлости меримо када су видљиве обе звезде; нешто мање када сјајнија (примарна) звезда помрачи мање сјајну (секундарну); и најмање када секундарна звезда помрачи примарну. Тај догађај се зове примарни минимум. Међусобна помрачења се веома правилно понављају једно за другим. Време које протекне између два примарна односно секундарна помрачења зове се орбитални период и представља величину аналогну земаљској години. Пошто се углавном ради о релативно малим орбитама, периоди еклипсно двојних система су доста краћи од тога и мере се углавном у сатима или данима.

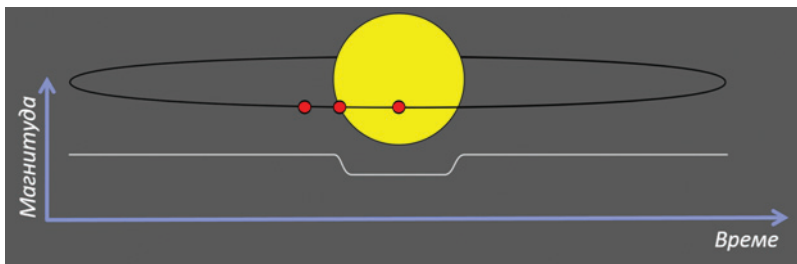


Слика 4. Илустрација криве сјаја еклипно двојног система

Крива сјаја еклипно двојног система носи са собом обиље информација о звездама и њиховом кретању, на пример:

- Трајање помрачења зависи од величина звезда, а дубина помрачења од односа температура. (Ако знамо радијус и температуру, можемо да израчунамо апсолутни сјај и даљину.)
- Помрачење са равним дном може бити тотално помрачење, где већа звезда у потпуности прекрије мању; или прстенасто, где се мања звезда нађе директно испред веће. У оба случаја, ова појава нам омогућава да закључујемо о односу величина звезда и оријентацији орбите у простору.
- Ако је сјај у интервалима када се обе звезде у целости виде константан, као на илустрацији, то значи да су звезде довољно мале у односу на орбиту, тј. довољно далеко једна од друге да међусобна гравитација не утиче на њихов облик и расподелу температуре, одн. сјаја на њиховој површини. Када у тим интервалима имамо промене, знамо да сјај није равномерно распоређен по површини једне или обе компоненте.

Донекле слично криви сјаја еклипно двојног система изгледа крива сјаја транзита екстрасоларне планете, илустрована на слици 5.



Слика 5. Илустрација криве сјаја транзита екстрасоларне планете

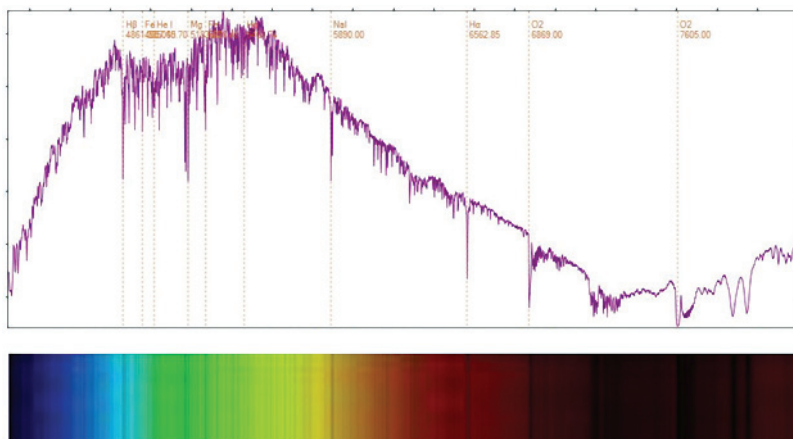
Ово је такође помрачење, само је сјај планете, која не зрачи сопствену енергију, толико мали да се и не примећује у односу на сјај звезде, па у већини случајева не можемо да детектујемо помрачење планете од стране звезде (које се зове окултација), већ само помрачење звезде од стране планете (транзит). Дубина планетарних транзита мери се милионитим деловима магнитуде и није их лако детектовати. До пре десетак година потврђено је било само неколико открића екстрасоларних планета. Данас се, захваљујући сателитским телескопима *CoRoT* и *Kepler*, зна за хиљаде њих.

Спектроскопија

Спектроскопија је такође мерење количине светлости, али овог пута на одређеној таласној дужини.

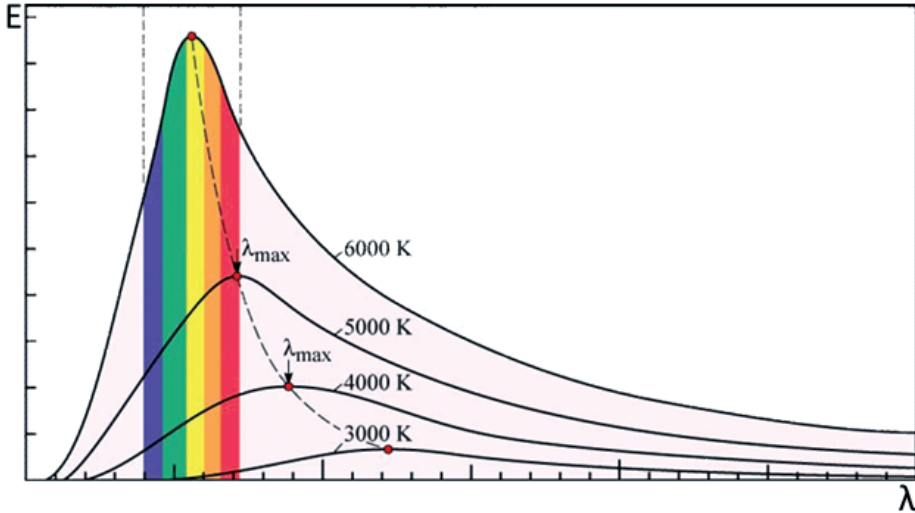
Наиме, светлост звезда, која је углавном бела (мада се понекад и голим оком могу уочити црвене и плаве нијансе код најсјајнијих звезда), састоји се од електромагнетних таласа различитих таласних дужина. Бела светлост се на спектар разлаже приликом проласка кроз граничну површину између две материјалне средине (или вакуума и материјалне средине), зато што индекс преламања зависи од таласне дужине. У лабораторијским условима ово се демонстрира пропуштањем зрака беле светлости кроз стаклену призму, а у природи за пример имамо дугу.

У астрономији се светлост звезда, сакупљена помоћу телескопа, разлаже на спектар помоћу инструмента који се зове спектрограф. Звездани спектри се приказују у виду криве зависности количине светлости од таласне дужине, или у виду слике налик на дугу. На слици 6 је, примера ради, приказан спектар Сунца на оба поменути начина.



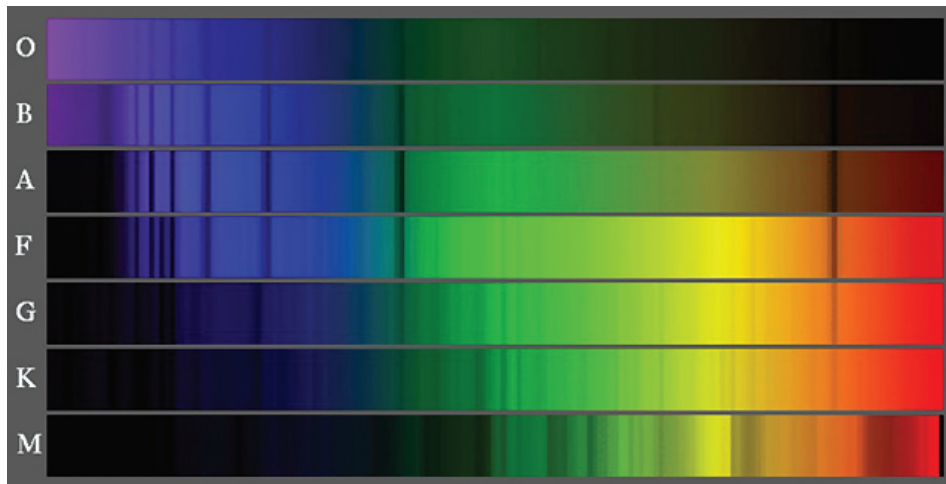
Слика 6. Спектар Сунца

Тумачење спектра звезде није тако једноставно као тумачење криве сјаја, али по цену комплексности добија се још веће обиље информација. *Ако слика вреди хиљаду речи, спектар вреди хиљаду слика.*



Слика 7. Винов закон померања. Идеализованом извору веће температуре одговара крива спектралне расподеле енергије са максимумом на мањој таласној дужини

На основу облика спектра на широком опсегу може се утврдити температура звезде. Максимум расподеле енергије зрачења је за идеализован извор једнозначно одређен температуром преко Виновог закона (слика 7). Такав идеализован извор зове се апсолутно црно тело и код њега свеукупно зрачење настаје у термалним процесима. Нормалне звезде углавном заиста и зраче на овај начин, а када не зраче, то се одражава на облик спектра, углавном као вишак зрачења у инфрацрвеној области, и користи се за дијагностику околне звездане материје, нпр. присуства протопланетарног диска. Међутим, оно што нас највише интересује код спектра звезде су тамне линије које се јављају на одређеним таласним дужинама (слика 8). Оне настају зато што атоми или јони одређеног хемијског елемента присутног у звезданој атмосфери апсорбују зрачење управо на тој таласној дужини. Спектар се тако може користити за веома фину дијагностику састава звездане атмосфере. Зна се тачно које линије потичу од водоника, које од хелијума, које од натријума итд. Јачина линије нам говори о томе колика је заступљеност дотичног елемента, да ли га има у траговима или великим количинама. Из ширине линија могу да се одреде површинска гравитација и брзина ротације звезде, а из положаја линије у односу на лабораторијску таласну дужину, брзина кретања звезде у односу на Земљу, па тако и припадност одређеним деловима Галаксије, звезданим јатима и другим физички повезаним системима.

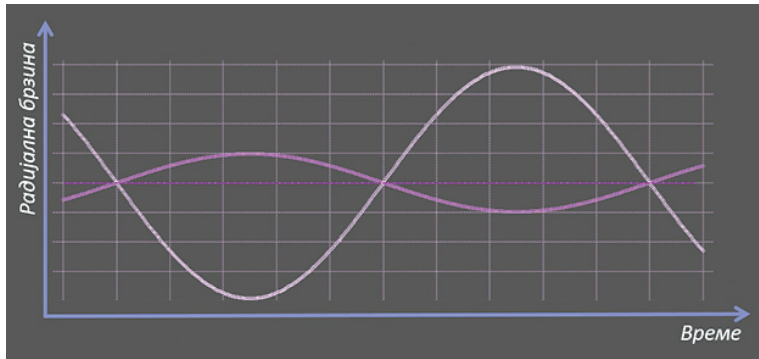


Слика 8. Различити типови звезда имају изразито различите спектре, на основу којих се класификују у познате спектралне класе, по реду падајућих температура, О, Б, А, Ф, Г, К, М. Тамне линије уочљиве код звезда већине спектралних класа потичу од апсорпције светлости атомима водоника. Од црвеног ка плавом делу спектра видимо, редом, најважније линије из такозване Балмерове серије водоника: H_α , H_β , H_γ , H_δ , итд.

Од посебног значаја је спектроскопија већ поменутих еклипно двојних система. Посматрања су јасно показала да се код двојних система током времена периодично мења не само количина светлости него и изглед спектра, односно положаји апсорпционих линија. Већ сам поменула да су међусобна помрачења звезда последица њиховог орбиталног кретања. Промене у спектрима су још једна последица исте појаве, а објашњавају се Доплеровим ефектом:

Када се извор таласа креће у односу на посматрача, мења му се таласна дужина: повећава се ако се извор удаљава, а смањује ако се извор приближава. Како је и светлост једна врста таласа, овај ефекат се у спектроскопији опажа као померање спектралних линија у односу на референтне, лабораторијске таласне дужине. У случају двојних система, звезде су извори који се крећу, и то не било како: оне се наизменично приближавају и удаљавају од нас. Линије у њиховим спектрима се зато наизменично померају ка плавом, односно црвеном делу спектра са периодом који је исти као фотометријски период система.

Величина помака је сразмерна брзини кретања извора. Ако из помака у свакој фази израчунамо брзину на основу Доплеровог ефекта, можемо да конструишемо тзв. криву радијалне брзине. На илустрацији на слици 9 видимо како се радијална брзина једне, односно друге звезде, мења са временом, тј. кроз различите орбиталне фазе. Већу амплитуду, тј. максималну радијалну брзину, увек има звезда мање масе, и обрнуто: звезда веће масе се креће мањом брзином. Тако из мерења радијалних брзина можемо да одредимо масе компонената. Маса усамљених звезда процењују се индиректним методама и не могу се одредити веома тачно. Маса компонената еклипно двојних система могу се измерити са тачношћу од једног процента.



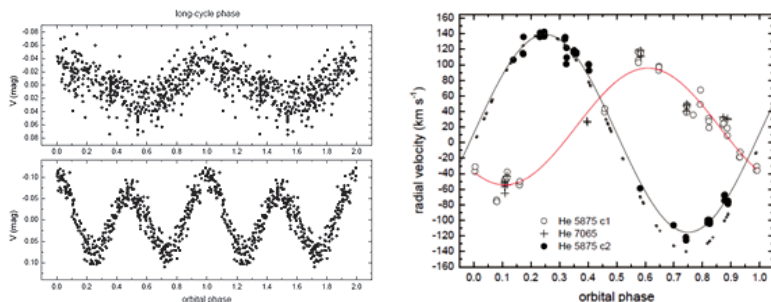
Слика 9. Криве радијалних брзина за хипотетички еклипсно двојни систем илустрован на слици 4. Светлија крива одговара мање масивној, а тамнија масивнијој компоненти система

ФИЗИКА ЗВЕЗДА У АСТРОНОМСКОЈ ОПСЕРВАТОРИЈИ У БЕОГРАДУ

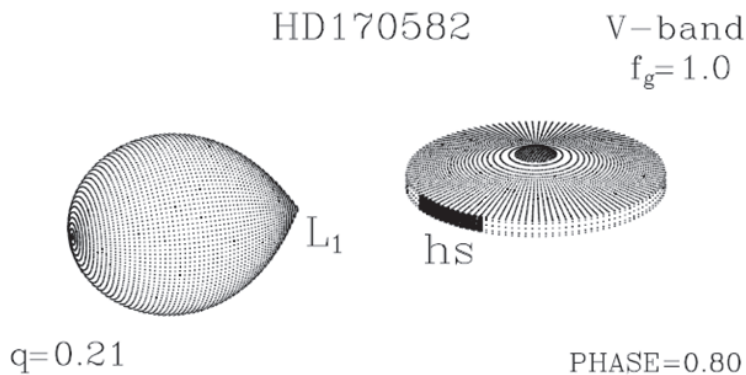
Проучавање двојних звезда кроз симултану фотометријску и спектроскопску анализу је једна од главних тема истраживачког рада групе за звездану физику Астрономске опсерваторије у Београду, којој и сама припадам још од студентских дана. Бавимо се углавном испитивањем егзотичних, тесно двојних система у којима једна звезда током еволуције прерасте извесну критичну величину, па маса из њених омотача почне да струји ка другој звезди, и око ње формира акрециони диск. Овај процес, који се зове трансфер масе, често доводи до смањивања орбите, услед чега се звезде нађу толико близу једна другој да формирају заједнички омотач и прерастају у тзв. контактни систем.

Типичан ток проучавања неког конкретног двојног система почиње са прикупљањем фотометријских и спектроскопских података, тј. кривих сјаја и радијалних брзина (слика 10), које затим анализирамо помоћу математичког модела (слика 11) у коме фигуришу фундаментални параметри звезда и њиховог орбиталног кретања: међусобно растојање, период, затим масе, радијуси и температуре, те геометријски параметри акреционог диска. Ове параметре одређујемо тако што поредимо криве сјаја и радијалних брзина генерисане помоћу модела са посматрањима. На овај начин можемо да одредимо удаљеност система, старост и еволутивне фазе компонената, те да спекулишемо о њиховој прошлости и будућности. Сваки индивидуални двојни систем чије се особине на овај начин измере постаје члан растућег узорка на основу кога се врши емпиријска калибрација различитих теоријских закона, као што је већ поменута релација између масе и сјаја звезде, које се после користе у другим гранама астрономије.

Посматрачке податке за ова истраживања до сада смо углавном прибављали из јавно доступних архива великих посматрачких пројеката као што је *Kepler*, или кроз међународну сарадњу са иностраним опсерваторијама. Астро-



Слика 10. Посматрачки подаци за тесно двојни систем са акреционим диском HD 170582. На левој страни је крива сјаја, а на десној су криве радијалних брзина за различите компоненте система. Слике преузете из рада који су сарадници на пројекту „Физика звезда“ Астрономске опсерваторије у Београду објавили 2015. године у врхунском међународном часопису (Mennickent et al. 2015)



Слика 11. Математички модел тесно двојног система са акреционим диском HD 170582. Масивнија, „примарна“ звезда је урођена у акрециони диск, а „секундарна“ је изобличена услед међусобног гравитационог привлачења. Трансфер масе са секундарне на примарну звезду врши се кроз Лагранжеву тачку L_1

номска опсерваторија налази се на Звездари, што је практично центар Београда у смислу светлосног загађења, а расположива посматрачка опрема, укључујући и велики рефракторски телескоп, један од највећих те врсте у Европи, са сочивом пречника 60 цм, застарела је и запостављена услед неадекватног финансирања. Из наведених разлога не могу да се врше посматрања оног квалитета који је неопходан за проучавање тесно двојних система. Међутим, пре пар година је саграђена и у рад уведена нова Астрономска станица на планини Видојевици на југу Србије, где је у редовној употреби један савремени телескоп са огледалом пречника 60 цм, а пре свега неколико месеци је постављен и потпуно нови телескоп са огледалом пречника 140 цм. Изградња нове опсерваторије углавном је финансирана из средстава Европске комисије кроз FP7 пројекат „Белисима“.

Планирамо да у предстојећем истраживачком раду започнемо самостални програм посматрања контактних двојних система са сопственом опремом.

Овиме сам, надам се, бар донекле одговорила на питање садржано у наслову – шта се крије у светлости звезда? Видели смо да светлост звезда са собом носи невероватне количине информација: о њиховим масама, величинама, температурама, хемијском саставу, ротацији, старости, па чак и о унутрашњој структури. До тих информација долазимо помоћу фотометријских и спектроскопских метода које се примењују на посматрања растуће тачности са земаљских и свемирских телескопа. Звездана астрофизика је живо поље астрономије у константном развоју, које обилује егзотичним, фасцинантним и недовољно проученим феноменима, и од чијих резултата зависе калибрације теоријских закона на свим ступњевима космичке скале.

ЛИТЕРАТУРА

- Атанацковић-Вукмановић, О. и Вукићевић-Карабин М., *Опшња астрофизика*, Завод за уџбенике, Београд 2010.
- Hilditch, R., *An Introduction to Close Binary Stars*, Cambridge University Press, 2001.
- Mennickent, R., Đurašević, G., Cabezas, M., Čeki, A., Rosales, J., Niemczura, E., Araya, I., Cure, M., 2015. “Fundamental parameters of the close interacting binary HD 170582 and its luminous accretion disc”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 448, 1137–1152.

Olivera Latković

WHAT IS HIDING IN THE STARLIGHT?

S u m m a r y

Stars are the basic building blocks of the visible Universe. Stars make double and multiple stellar systems, stellar clusters and whole galaxies; the extrasolar planets orbit the stars; dying massive stars, supernovae, enrich the interstellar matter with various chemical elements without which the life on Earth would not exist. These, as well as many other astronomical phenomena are studied by observation and by analysis of the starlight, which carries an incredible amount of information.

This lecture, the third in the row in the cycle “From the solar system to the frontiers of the Universe“, presents the basic steps which lead from the observation of the starlight to the stellar physics. After the brief introduction into the theory of structure and evolution of stars, we shall speak of the basic methods of observation and analysis of the starlight, photometry and spectroscopy. A special atten-

tion will be payed to the variable stars, more specifically to the eclipsing binaries and pulsating stars, which are the topics of my own research. At the end, I shall present some results of the study of stellar physics carried out at the Astronomical Observatory of Belgrade.