

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

ДЕЈАН УРОШЕВИЋ*

ОСТАЦИ СУПЕРНОВИХ: НАЈМОЋНИЈИ АКЦЕЛЕРАТОРИ У ГАЛАКСИЈИ

А п с т р а к т. – У уводном делу овог рада биће укратко приказане основне карактеристике астрономије изван видљивог дела спектра. Након тога, као најјачи галактички извори радио и гама зрачења, биће представљени остаци супернових и њихова особина да се виде управо у овим рубним подручјима електромагнетног спектра. Уз објашњење механизма који стварају зрачење остатака супернових на најкраћим и најдужим таласним дужинама, биће показано да је за ова „невидљива“ зрачења неопходно присуство ултарелативистичких честица. Затим ће бити дато објашњење како ови величанствени објекти сами стварају честично космичко зрачење незамисливо високих енергија, па сходно томе представљају најефикасније убрзиваче честица у читавој нашој, а и у другим галаксијама широм универзума.

Занимљиво је нагласити да хидродинамичку и радио-еволуцију, а потом и теорију убрзавања честица на ударним таласима остатака супернових изучава група истраживача са Катедре за астрономију Математичког факултета у Београду и из Астрономске опсерваторије у Београду. Неки од најважнијих резултата до којих је ова истраживачка група дошла биће такође приказани, а односе се на еволуцију остатака супернових, изглед њихових радио-спектара у континууму и рачун једнаког учешћа густине енергије магнетног поља и густине енергије ултарелативистичких честица. Све претходно наведене теме су нераскидиво везане за механизме убрзавања честица до ултарелативистичких енергија.

* Катедра за астрономију, Математички факултет, Универзитет у Београду,
e-mail: dejanu@matf.bg.ac.rs.

УВОД

Када се погледа ноћу у ведро небо види се да је посуто светлим, у највећем броју тачкастим објектима, на црној позадини. Ти објекти су углавном звезде, голим оком се виде и неке маглине, пет планета које припадају Сунчевом систему и Земљин сателит Месец. Наше очи су прилагођене да виде део електромагнетног зрачења на таласним дужинама на којима Сунце емитује највећу количину светлости. Тај део је јако узак у поређењу са ширином целог електромагнетног спектра зрачења који се простире од најдужих радио-таласа до високоенергијских врло кратких таласа који припадају гама подручју. Када бисмо имали „очи” прилагођене да виде најкраће и најдуже електромагнетне таласе, небо које бисмо видели не би било ни налик оном које можемо да гледамо сваке ведре ноћи. Позадина радио и гама неба не би била тамна, небо не би било посуто звездама већ би се видели објекти који су већих угаоних димензија, Млечни пут би био значајно светлији него што је то случај у оптичком делу спектра. Једноставно речено, појавили би се објекти који нису звезде и које јако тешко можемо да видимо не само голим оком већ и најмодернијим оптичким телескопима. Видели бисмо исти космос, али испуњен разним, за нас егзотичним објектима. Ти објекти су невидљиви за наше очи због тога што не производе зрачење на исти начин као што то чини наше Сунце, које представља засигурно најдоминатнији објект у нашем блиском космичком окружењу. Они производе зрачење на начин који ће бити описан у овом раду и доминантно емитују у рубним деловима електромагнетног спектра – у радио и гама подручју.

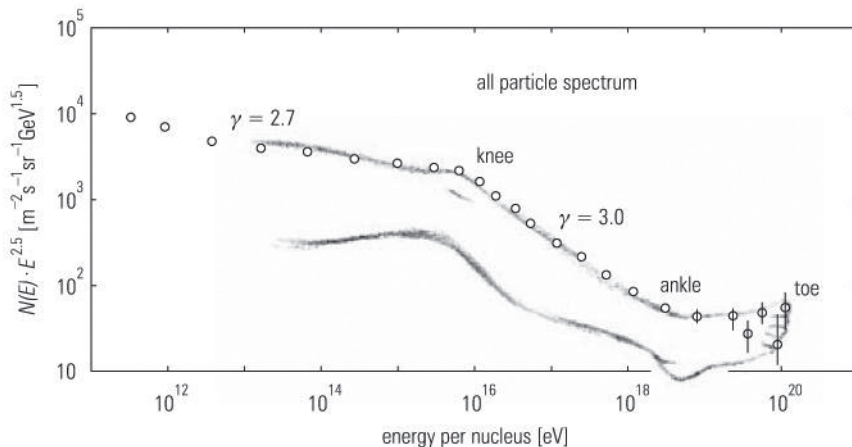
Да би неки космички објекат био јак извор зрачења у радио и гама подручју, неопходно је да у себи ствара високоенергијске честице које, када се крећу успорено, или после судара са честицама у асоцираном међузвезданом гасу (а које су на много нижим енергијама), емитују електромагнетне таласе. Те високоенергијске честице, углавном протони, алфа честице, језгра тежих елемената и електрони, називају се заједничким именом космички зраци. Главни механизми који доводе честице из међузвезданог гаса до енергија космичких зрака, као и објекти који имају способност да убрзају честице до ултрарелативистичких брзина, тзв. остаци супернових, биће представљени у овом раду.

Овај рад се састоји од две целине. У првом делу, поред механизма који убрзавају честице и остатака супернових, биће приказан и основни механизам стварања зрачења остатака супернових у радио-подручју. У другом делу биће укратко дат краatak осврт на резултате групе истраживача са Катедре за астрономију Математичког факултета Универзитета у Београду и Астрономске опсерваторије у Београду (у даљем тексту Београдска група), која се бави научним радом у овој области високоенергијске астрофизике.

ПРВИ ДЕО

1.1. Убрзавање честица

Као што је у уводу већ наведено, космички зраци су високоенергијске честице које се углавном стварају у објектима као што су остаци супернових, активна галактичка језгра, магнетари итд. Они нижих енергија потичу са звезда, па и само Сунце представља извор космичког зрачења. Звезде мало доприносе укупној количини космичког зрачења, а оно је прилично интензивно и има га у сваком кутку читаве наше Галаксије. Осим протона, алфа честица и језгара тежих елемената, у састав космичког зрачења улазе и ултарелативистички електрони. Када се крећу око линија сила магнетног поља зраче тзв. синхротронским механизмом у радио-подручју, а у интеракцији са фотонима из своје околине емитују гама кванте механизмом инверзног Комптоновог расејања. Високоенергијски протони у сударима са језгрима из међузвездане материје преко пионског распада такође стварају обиље гама зрачења. Простом дедукцијом може се извести закључак: да би наши телескопи детектовали радио или гама зрачење из космоса, неопходно је да постоји космичко зрачење које ће кроз специфичне интеракције са својом околином створити електромагнетно зрачење на најнижим и највишим фреквенцијама. Спектар космичког зрачења које стиже до нас приказан је на слици 1 – очигледно је да на високим енергијама има мање честица него на нижим. Како је графикон дат у логаритамској скали, а спектар је приближно праволинијски, јасно је да је у питању степена зависност броја честица од енергије честица космичког зрачења.



Слика 1. Спектар космичког зрачења на високим енергијама (изнад 100 GeV) мерен на Земљи, тзв. „нога“

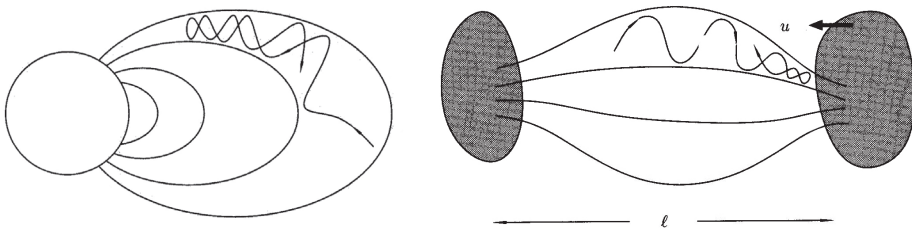
Да би се космичко зрачење створило потребно је нискоенергијским честицама из међузвездане материје предати велику количину енергије. Најразвијенији модели убрзавања честица до ултарелативистичких енергија су засновани на Фермијевим истраживањима из средине XX века (Fermi 1949). Први појам који треба да се уведе да би се објаснио Фермијев модел јесте појам магнетног огледала. Ако имамо неко нехомогено магнетно поље, честица која се креће око линија сила магнетног поља ће се у једном тренутку одбити од дела поља где је интензитет довољно велики и наставити своје кретање у супротном смеру и при тој интеракцији ће добити одређену количину енергије која ће се испољити кроз пораст њене брзине, а у случају да се та магнетна нехомогеност креће ка честици. Следећа два израза обезбеђују теоријску основу за овакво кретање:

$$p_{\perp}^2 / B = \text{const}, p_{\perp}^2 + p_{\parallel}^2 = \text{const}, \quad (1)$$

где први израз представља тзв. трансверзалну адијабатску инваријанту (p_{\perp} је нормална компонента импулса честице, B је магнетно поље), а други, закон о одржању импулса (p_{\parallel} је паралелна компонента импулса честице). Илустрација једног магнетног огледала је приказана на слици 2 (лево). Неопходно је увести и појам лонгитудиналне адијабатске инваријанте:

$$p_{\parallel} l = \text{const}, \quad (2)$$

где је l растојање између два магнетна огледала која се крећу у сусрет једно другоме. У оваквој тзв. магнетној боци, приликом судара честице са покретним магнетним нехомогеностима, више пута ће доћи до трансфера енергије са нехомогености на честицу, јер ће се заробљена честица више пута одбијати од њих и она ће бити значајно убрзана. Илустрација магнетне боце дата је на слици 2 (десно).



Слика 2. Магнетно огледало (лево). Магнетна боца (десно)

Концепт дат у Фермијевом раду је управо заснован на претходно објашњеном механизму убрзавања честица. Финални резултат који је произашао из Фермијевог рада је да се приликом сваког чеоног судара честице са нехомогеностима магнетних поља којих има свуда у међузвезданој материји, честица убрзава и прираштај њене енергије је дат изразом:

$$\Delta E / E \sim (v / c)^2, v < c, \quad (3)$$

где су ΔE и E прираштај енергије честице при сваком судару и енергија честице пре судара, респективно, а v и c брзина магнетне нехомогености и брзина честице, респективно. Због квадратне зависности прираштаја енергије при сваком судару од v / c , оригинални Фермијев механизам убрзавања се често у литератури назива и Фермијев механизам убрзавања другог реда.

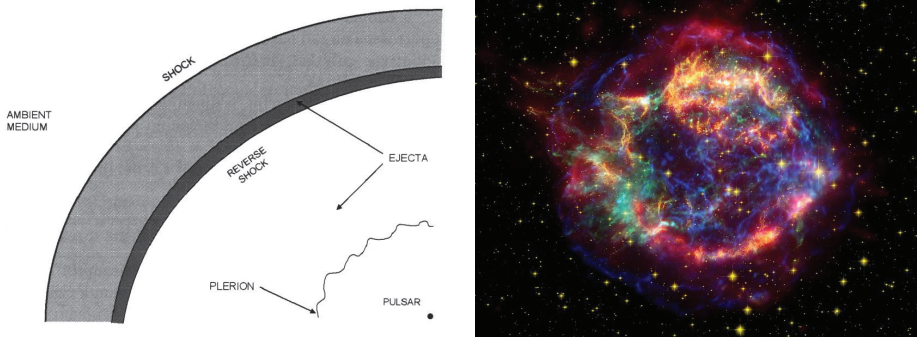
Фермијево убрзање првог реда је ефикаснији процес и повезан је са убрзањем честица на ударним таласима. Покретну магнетну пертурбацију, неопходну за Фермијев механизам, представља сам ударни талас кроз који честица може да пређе више пута, са обе стране ударног фронта и да приликом сваког прелаза буде убрзана. Осим што је прираштај енергија дат изразом:

$$\Delta E / E \sim v / c, \quad (4)$$

јако високу ефикасност овог механизма убрзавања честица обезбеђује и могућност великог броја прелаза једне честице кроз ударни талас. У литератури се овај Фермијев механизам убрзавања првог реда чешће може наћи под именом: дифузно ударно убрзавање (DSA, енг. *Diffuse Shock Acceleration*). Најважнији радови у којима је предложен овај механизам убрзавања су рад Бела и рад Блендфорда и Острајкера, оба објављена 1978. године (Bell 1978, Blandford and Ostriker 1978).

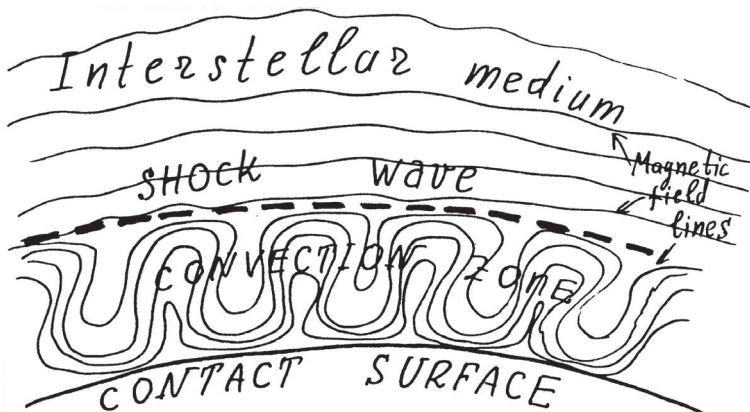
1.2. Остаци супернових

У више наврата су помињани остаци супернових, високоенергијски астрофизички објекти, који спадају у скупину тзв. емисионих маглина. Маглине су загушења међузвездане материје и осим емисионих постоје и рефлексионе маглине, као и тамне маглине, састављене од зрнаца прашине које апсорбују светлост позадинских објеката. Остаци супернових, као што им само име објашњава, представљају остатке експлозија супернових звезда (слика 3). Супернове су гигантске експлозије звезда којима звезде великих маса завршавају свој живот. Од материјала одбаченог експлозијом се створи ударни талас и док траје ширење тог ударног таласа траје и живот једног остатка супернове. За космичке објекте, остаци супернових живе релативно кратко, око 100.000 година, а у екстремним случајевима најдуже до милион година – под условом да је експлозија била јача него просечна, а густина околне међузвездане материје ређа него просечна.



Слика 3. Шематски приказ остатка супернове са припадајућим ударним таласима (лево). Остатак супернове Касиопеја А – Cas A (десно)

Ударни талас представља најважнији део једног остатка супернове и он обезбеђује услове за то да су ови објекти препуни енергије која се троши на зрачење, загревање међузвездане средине и што нас у овом делу рада највише занима – на убрзање честица. Фермијевим механизмом другог реда убрзавају се честице у делу међузвездане материје коју је „прегазио“ ударни талас (слика 4). Та област је препуна турбуленција, на високој је температури и што је најважније у њој је појачано магнетно поље, а ту су због турбуленција присутне и покретне магнетне пертурбације које су неопходне за покретање Фермијевих механизма убрзавања. Још важније, на самом ударном таласу једног остатка супернове врши се ефикасно убрзавање честица механизмом дифузног ударног убрзавања. Због претходно наведеног, остаци супернових представљају идеалне објекте у којима се очекује ефикасно убрзавање честица.



Слика 4. Илустрација зоне иза ударног таласа остатка супернове у којој се очекује Фермијево убрзавање другог реда

Тренутно најбоље описан, а уједно и високоефикасан механизам стварања честица на ултрарелативистичким енергијама, представља претходно приказани процес дифузног ударног убрзавања на ударним таласима остатака супернових. Из аналитичке теорије (Bell 1978) која описује овај механизам добија се да спектар космичког зрачења треба да буде степеног типа у облику:

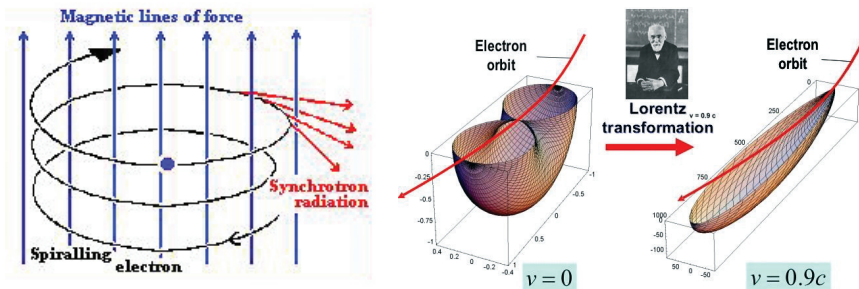
$$N(E) dE \sim E^\gamma dE, \quad (5)$$

где је $N(E)$ број високоенергијских честица на енергији E , γ тзв. енергијски индекс који за јаке немодификоване ударе има теоријску вредност $\gamma=2$. То је управо вредност која је приближно једнака вредностима које се добијају из посматрања и које су утврђене деценијама раније, пре 1978. године (слика 1).

Остаци супернових са својим ударним таласима обезбеђују јако добре услове за убрзавање честица, механизмом дифузног ударног убрзавања и због тога ови објекти представљају најмоћније акцелераторе у Галаксији јер могу да убрзају честице до енергија 10^{15} eV, што су енергије које су више од сто пута веће од енергија које стварају најмоћнији акцелератори честица на Земљи, као што је нпр. Велики сударач хадрона (LHC) који се налази у CERN-у надомак Женева.

1.3. Синхротронско зрачење

Ултрарелативистички електрони, настали, како у овом тренутку мислимо, углавном Фермијевим механизмима убрзавања бивају захваћени међузвезданим магнетним пољима и губе енергију на тзв. синхротронско зрачење (слика 5). Ми то зрачење детектујемо у радио-области електромагнетног спектра коришћењем радио-телескопа. Основне особине синхротронског зрачења су да је нетермалног порекла, врло усмерено (самим тим и интензивно у одређеном правцу) и поларизовано.

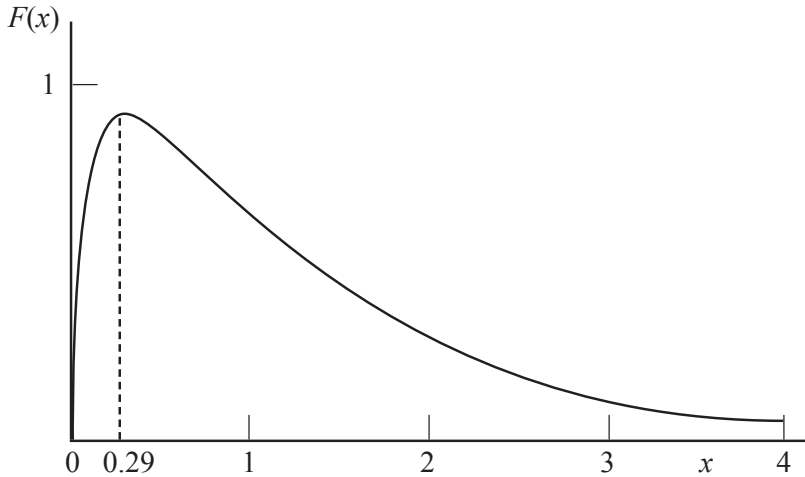


Слика 5. Илустрација емитовања синхротронског зрачења (лево). Трансформација усмерености емисије из нерелативистичког у релативистички случај (десно)

Један ултарелативистички електрон захваћен магнетним пољем емитује највећу количину зрачења у релативној близини тзв. критичне фреквенције:

$$\nu_{\text{crit}} = c_1 E^2 B_{\text{norm}}, \quad (6)$$

где је B_{norm} нормална компонента магнетног поља, а c_1 константа (слика 6).



Слика 6. Спектар синхротронског зрачења једног електрона у функцији критичне фреквенције $x = \nu/\nu_{\text{crit}}$

Фреквенције од 10 MHz до 100 GHz припадају радио-подручју електромагнетног спектра, а доступне су посматрањима са Земље. Користећи формулу (6), долазимо до енергија електрона које треба да буду достигнуте да би синхротронско зрачење било детектовано на одређеној фреквенцији. За зрачење на фреквенцији од 10 MHz одговорни су електрони који имају енергију око 800 MeV, док емисију на 100 GHz обезбеђују они на енергијама око 80 GeV. За ово рачунање коришћена је вредност за нормалну компоненту магнетног поља од 1 μG . Занимљиво је нагласити да је за синхротронско зрачење у X-подручју неопходно да електрони имају TeV енергије. Неки млади остаци супернових су детектовани као синхротронски извори X-зрачења.

Нешто више детаља о изгледу синхротронског спектра групе електрона биће дато у одељку 2.2. овог рада.

ДРУГИ ДЕО

2.1. Σ - D релација за остацике супернових

Као што је у уводу већ наведено, укратко ће бити представљени резултати истраживања Београдске групе која се бави тематиком претходно изложеном у овом раду.

Прва тема истраживања Београдске групе је тзв. Σ - D релација за остатке супернових. То је релација која описује радио-еволуцију ових објеката, тј. промену синхротронског радио-сјаја остатка супернове са порастом његовог пречника. Изузетно је значајна за разумевање еволуције ових објеката и развија се и са теоријске и са посматрачке тачке гледишта. Додатно, ова релација може да се користи за одређивање даљина до остатака до којих на неки прецизнији начин није одређена даљина. Тренутно у нашој Галаксији постоји око 300 детектованих остатака супернових, а за само њих око 60 може да се одреди даљина на неки начин који је независан од употребе ове релације, па је јасно да је незамењива као алат за одређивање даљина.

У склопу истраживања теоријских и емпиријских Σ - D релација за остатке супернових наша група је објавила 24 научна рада, од тога 17 у најбољим светским часописима. Најближи сарадници аутору овог рада су: др Бојан Арбутина, доцент на Катедри за астрономију Математичког факултета (МФ) Универзитета у Београду, др Бранислав Вукотић, научни сарадник Астрономске опсерваторије у Београду (АОБ) и докторанд Марко Павловић, истраживач сарадник на МФ. Има још пуно отворених истраживања у овој области и очекују се нови пробоји и значајни резултати, посебно кроз резултате које доноси докторска дисертација колеге Марка Павловића.

2.2. Радио-сјектри остатака супернових

Отисак процеса убрзавања честица (слике 1 и 6) директно је остављен у изгледу радио-спектра остатака супернових. Изглед једног синхротронског радио-спектра (густина флукса радио-зрачења у функцији радио-фреквенције) је директна последица изгледа спектра ултрарелативистичких електрона (број електрона у функцији њихове енергије). Једноставније речено, ако је спектар електрона степеног типа (израз 6), онда је спектар радио-зрачења такође степеног типа и нагиби ова два спектра су повезани простом формулом $\gamma = 2\alpha + 1$, где је α спектрални индекс. Како је у одељку 1.2. наведено да је енергијски индекс добијен из теоријских разматрања $\gamma = 2$, спектрални индекс треба да има вредност $\alpha = 0,5$. Посматрања показују да већина остатака супернових заиста има спектрални индекс око 0,5! С друге стране, постоје и спектри остатака који су стрмији или блажи и оних који немају изглед идеалног степеног закона. Објашњавање разних варијација изгледа радио-спектра је јако важна тема за истраживање у области изучавања остатака супернових, јер су те варијације резултат ефеката који могу да се добију

унапређивањем модела за процесе убрзавања честица, као и укључивањем доприноса других механизма стварања зрачења у остацима супернових, на онај доминантни, синхротронски.

У склопу ове теме, објављено је девет научних радова, од којих осам у најбољим светским часописима. Најближи сарадници: др Душан Онић, доцент на МФ и др Томас Панути (Thomas Pannuti), професор на Морхед државном универзитету (Morehead State University), Кентаки, САД. Тема је јако актуелна посебно после успешне мисије свемирског сателита Планк (Planck), који је обезбедио високофреквенционе радио-податке, а тај рубни део радио-спектра, на додиру са инфрацрвеним делом, јако је тешко посматрати са Земље па је доступно обиље нових података у делу спектра где се теоријски предвиђене варијације радио-спектра и очекују.

2.3. Рачун једнаког учешћа (густине енергије магнетног поља и релативистичких честица)

Врло је тешко одредити јачине магнетних поља у међузвезданој материји. Постоји пар метода од којих је једна тзв. рачун једнаког учешћа (енг. *equipartition calculation*). Једнако учешће се односи на приближну једнакост (општије, константност) количника густине енергије релативистичких електрона и густине енергије магнетног поља при производњи синхротронског зрачења. Модел заснован на претпоставци једнаког учешћа је са наше стране у потпуности базиран на теоријским разматрањима дифузног ударног убрзања. Формуле помоћу којих се рачунају јачине магнетних поља се аналитички изводе и прилагођавају физичким условима који владају у остацима супернових и затим се примењују за рачунање јачина магнетних поља у овим објектима.

Резултати рада Београдске групе о овој тематици објављени су у шест научних радова, од којих су три изашла у најбољим светским часописима. Најближи сарадници су: др Бојан Арбутина и др Бранислав Вукотић. Поред будућих извођења за скупине остатака који имају равније спектралне индексе, у плану је да се настави са радом на физичкој заснованости овог модела, јер немали корпус истраживача сумња у реалну физичку заснованост овог модела, док постоји и велика струја која се противи таквом мишљењу. Наша група ради на томе да понуди јаче доказе у корист физичке заснованости рачуна једнаког учешћа.

2.4. Појрага за оптичким остацима супернових у блиским галаксијама

Пројекат нема директне везе са процесима описаним у претходним деловима овог рада, али је везан за остатке супернових, па је индиректно повезан са осталим истраживачким пројектима којима се бави Београдска група. За разлику од претходне три теме у склопу којих су истраживања теоријског

типа, ова тема је посматрачка. Посматрају се оптичким телескопима блиске галаксије, покушавају да се детектују остаци супернових, упркос слабом зрачењу ових објеката у видљивој светлости, и да се на основу тих детекција и уз одстрањивање њиховог доприноса у укупном доприносу зрачења емисионих маглина, одреди стопа формирања звезда у блиским галаксијама. Ово истраживање је формализовано кроз заједнички пројекат Српске академије наука и уметности и Бугарске академије наука. Интензивно се користи двоветарски телескоп Националне астрономске опсерваторије Бугарске академије наука на Рожену. Такође, кроз заједнички пројекат српских и турских астронома користи се 1,5 метарски ТУГ телескоп Турске националне опсерваторије на планини изнад Анталије.

До сада је објављено пет научних радова, од којих четири у најбољим светским часописима. На овом пројекту су ангажовани, поред аутора овог рада: докторанд Милица Вучетић, истраживач сарадник на МФ, др Бојан Арбутина, др Драгана Илић, доцент на МФ, докторанд Александра Ћипријановић, истраживач сарадник на МФ и Марко Павловић. Докторска дисертација Милице Вучетић представља главни резултат досадашњег рада на овој тематици. Овај пројекат је тек на почетку свог развоја и има потенцијала да прерасте у можда најзначајнији сегмент рада Београдске групе.

2.5. Радио-испитурања остатака супернових (сарадња са испитивачима из Аустралије)

Најбољи радио-телескопи на јужној Земљиној хемисфери се налазе на територији Аустралије. Самим тим истраживачи из Аустралије имају ексклузивну погодност да поседују најбоље посматрачке податке са јужне небеске хемисфере. У склопу сарадње са колегама из Аустралије, који се баве посматрањима остатака супернових у Магелановим облацима и у нашој Галаксији, ангажовани смо да дајемо поуздане теоријске интерпретације резултата њихових посматрања. То је процес од велике помоћи колегама посматрачима (наравно, и теоретичарима да би проверили исправност својих модела). Од изгледа радио-спектара, преко положаја на Σ - D дијаграмима, уз рачунање вредности магнетних поља, може да се дође до процене еволутивног статуса посматраног остатка супернове – све три претходно наведене теме су укратко описане у овом раду и имају очигледан значај у интерпретирању посматрачких резултата, а посебно када се сва три приступа примене истовремено.

У склопу сарадње са колегама из Аустралије објављено је 11 радова, од тога 10 у најбољим светским часописима. Најближи сарадник је др Мирослав Филиповић, редовни професор Универзитета западног Сиднеја (University of Western Sydney), Аустралија, са својим сарадницима. Ово је и најперспективнија тема за даљи напредак јер сумира сва претходно стечена знања и конкретне теоријске доприносе Београдске групе објављене у десетинама радова, о проблематици интерпретације нових посматрачких података.

ЗАКЉУЧАК

Остаци супернових су дефинитивно најмоћнији акцелератори у нашој Галаксији. Способни су да космичке зраке доведу до изузетно високих енергија које су и више од сто пута веће него што то најбољи акцеларатори направљени на Земљи могу да учине. Остаци супернових су фасцинантни високоенергијски објекти, осим што убрзавају честице, они загревају међузвездану средину, обогаћују је тежим елементима и подстичу стварање нових звезда. И наше Сунце је настало после дејства неког остатка супернове на своју околину. Са поносом се може истаћи да у склапању те огромне слагалице, која треба да потпуно опише остатке супернових, мала група истраживача са Катедре за астрономију Математичког факултета Универзитета у Београду и Астрономске опсерваторије у Београду даје свој немали допринос.

Захвалница. Овом приликом желим да се захвалим академику Зорану Кнежевићу на пружању прилике да учествујем у циклусу предавања „Од Сунчевог система до граница васионе“, што је за мене била велика част и задовољство. Такође се захваљујем САНУ на организацији овог циклуса предавања. На крају, желим да се захвалим свим својим сарадницима, да истакнем да је задовољство радити са њима и да сам уверен да ћемо кроз заједнички рад, свако понаособ и сви заједно као група, напредовати и имати све боље научне резултате.

ЛИТЕРАТУРА

- Bell, A. R.: The acceleration of cosmic rays in shock fronts. I. Mon. Not. R. Astron. Soc. 182, 147–156 (1978).
 Blandford, R. D., Ostriker, J. P.: Particle acceleration by astrophysical shocks. Astrophys. J. 221, L29–L32 (1978).
 Fermi, E.: On the origin of the cosmic radiation. Phys. Rev. 75, 1169–1174 (1949).

Dejan Urošević

SUPERNOVA REMNANTS: THE MOST POWERFUL ACCELERATORS IN THE GALAXY

S u m m a r y

In the introductory part of this work the basic characteristics of the astronomy outside the visible part of the spectrum will be briefly presented. Afterwards, the

supernova remnants, the most powerful Galactic sources of radio- and gamma-radiation, will be described, as well as their property to be visible in just these boundary regions of the electromagnetic spectrum. In addition to the explanation of the mechanisms giving rise to the supernova remnants radiation at the shortest and longest wavelengths, it will be shown that the presence of ultrarelativistic particles is necessary to get these "invisible" radiations. Next, the explanation will be given of how these magnificent objects create by themselves the particle cosmic radiation of unimaginably high energies, so that they represent the most efficient particle accelerators in ours, as well as in other galaxies throughout the Universe.

It is interesting to note that the group of researchers from the Department of Astronomy of the Mathematical Faculty of Belgrade and the Astronomical Observatory of Belgrade studies the hydrodynamical and radio evolution, as well as the theory of particle acceleration on the shock-waves of the supernova remnants. Some of the most important results achieved by this group, which pertain to evolution of the supernova remnants, to the appearance of their radio-spectra in continuum, and to the computation of the equipartition of the energy density of the magnetic field and of the energy density of the ultrarelativistic particles, will also be described. All these topics are closely related with mechanisms of acceleration of particles to ultrarelativistic energies.

