

Gama-astronomija – posljednji elektromagnetski prozor u svemir

Dario Hrupec¹, Koprivnica

Uvod – elektromagnetski spektar

Znanje o svemiru uglavnom se temelji se na činjenicama do kojih se došlo opažanjem elektromagnetskog zračenja. Tek manji dio podataka dobiven je opažanjem nabijenih čestica (kozmičkog zračenja), drugih neutralnih čestica (neutrona i neutrina) te makroskopskih uzoraka nezemaljskog podrijetla koje su donijele svemirske letjelice ili su sami pali na Zemlju (meteoriti). Elektromagnetski spektar čine fotoni vrlo širokog spektra, od radio valova najvećih valnih duljina preko mikrovalova, infracrvenog (toplinskog) zračenja, vidljive svjetlosti, ultraljubičastog zračenja, x (rendgenskog) zračenja do gama zračenja najkraćih valnih duljina. Podjela spektra obično se daje karakterizirajući fotone frekvencijama f ili valnim duljinama λ , no ovdje ćemo fotone karakterizirati njihovom energijom $E = hf = hc/\lambda$ izraženom u elektronvoltima.

PODRUČJE	ENERGIJA
radio valovi	manje od 10 μeV
mikrovalovi	od 10 μeV do 1 meV
infracrveno	od 10 meV do 1 eV
vidljivo	od 1 eV do 10 eV (preciznije: od 1.77 eV do 3.10 eV)
ultraljubičasto	od 10 eV do 100 eV
rendgensko	od 100 eV do 100 keV
gama	više od 100 keV (preciznije: iznad 512 keV)

Tablica 1. Elektromagnetski spektar u energijskom području ($1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$).

Pojava novih astronomija

Istraživanje svemira dugo se temeljilo samo na opažanjima u vidljivom dijelu spektra (*optička astronomija*) – najprije golim okom, a zatim sve naprednijim optičkim teleskopima. Svaka pojava mogućnosti promatranja u ostalim dijelovima elektromagnetskog spektra donosila je radikalno nove spoznaje. S obzirom da atmosfera propušta uglavnom vidljivu svjetlost i radiovalove, nakon optičke astronomije prva nova astronomija bila je *radio-astronomija*. Radio teleskopi su poput optičkih teleskopa smješteni na površini Zemlje. Pojavom umjetnih satelita javila se mogućnost promatranja iznad površine Zemlje pa su počela promatranja u drugim područjima elektromagnetskog spektra. Slučajno otkriće snažnog kozmičkog zračenja u rendgenskom i gama području, do kojeg je došlo u špijunskom traganju za nuklearnom aktivnošću na Zemlji, iz temelja je promijenilo naše poimanje svemira. Dok se prije smatralo da su izvori zračenja u svemiru gotovo isključivo termički uravnoteženi objekti poput zvijezda, postojanje snažnih izvora visokoenergijskog zračenja pokazalo je da postoje objekti i procesi neke nove vrste. U usporedbi s kozmičkim gama-zračenjem, kozmičko x-zračenje je većeg toka (broj fotona po jedinici površine u jedinici vremena), može prolaziti kozmološke udaljenosti (vide se i najudaljeniji objekti) te se može pod određenim uvjetima fokusirati pa je najprije procvatela *rendgenska astronomija*. Za razvoj rendgenske astronomije, 2002. godine dodijeljena je Nobelova nagrada². Tako je gama područje ostalo posljednji elektromagnetski prozor u svemir koji treba otvoriti.

¹ Autor je asistent u Institutu "Ruđer Bošković" u Zagrebu, e-mail: dario.hrupec@irb.hr

² Pogledajte članak Krešimira Pavlovskog, *Riccardo Giacconi: pionir rendgenske astronomije*, u trećem broju MFL-a, godište 2002./03.

Gama područje

Gama zračenje iz svemira obuhvaća veći dio spektra nego sva ostala zračenja zajedno - čak 16 redova veličine, od 10^4 eV do 10^{20} eV. Tako veliki energijski raspon zahtijeva vrlo različite instrumente i detekcijske tehnike. Uobičajena je zato podjela gama spektra na podpodručja.

PODRUČJE	ENERGIJA
LE niske energije	od 100 keV do 100 MeV
HE visoke energije	od 100 MeV do 100 GeV
VHE vrlo visoke energije	od 100 GeV do 100 TeV
UHE ultra visoke energije	od 100 TeV do 100 PeV
EHE ekstremno visoke energije	više od 100 PeV

Tablica 2. Podjela gama spektra ($M = 10^6$, $G = 10^9$, $T = 10^{12}$, $P = 10^{15}$).

Gama-sateliti

Gama-zračenje niskih i visokih energija (od 100 keV do 100 GeV) detektira se instrumentima smještenim na satelite. Prvi gama-sateliti bili su SAS-2 (1973.) i COS-B (1975.–1982.). Izuzetno značajni pomak donio je EGRET (Energetic Gamma Ray Experiment Telescope) smješten na satelitu CGRO (Compton Gamma Ray Observatory) koji je bio aktivan od 1991. do 2000. U novije vrijeme aktivni su sateliti INTEGRAL (lansiran 2002.), SWIFT (lansiran 2004.) te još nekoliko manjih satelita koji su nedavno lansirani ili tek trebaju biti lansirani. Ipak, najviše nade polaže se u budući satelit GLAST (Gamma-ray Large Area Space Telescope) koji bi trebao biti lansiran 2007. godine. Osnovni elementi gama-detektora na satelitima su: (1) komora na iskre u kojoj se opažaju tragovi elektron–pozitron para koji je stvoren primarnim gama fotonom³, (2) kristal natrij-jodida koji služi kao kalorimetar u kojem se apsorbira energija elektron–pozitron para te (3) tzv. veto-detektor koji detektira prolaz nabijene čestice i omogućava da se takvi događaji odbace. Nabijene čestice su kozmičke zrake koje su 10000 puta učestalije od kozmičkih gama fotona. Satelit GLAST će, kao predstavnik nove generacije gama satelita, umjesto komore na iskre biti opremljen segmentiranim silicijskim detektorom (engl. silicon strip detector).



Slika 1. Umjetnički prikaz satelita GLAST za detekciju gama-zračenja iz kozmičkih izvora
Satelit će biti lansiran 2007. godine. (Izvor: NASA)

Osnovna karakteristika satelitskih gama-detektora je relativno mala detekcijska površina (do 1 m^2). S obzirom da tok kozmičkog zračenja (broj fotona po jedinici površine u jedinici vremena) naglo opada s energijom (proporcionalan je s $E^{-2.7}$) sateliti imaju gornji energijski prag od približno 20 GeV. GLAST će taj prag podići na 300 GeV.

³ Gama fotoni energije ispod 1 MeV ne mogu stvarati elektron-pozitron parove, zato u tom području koristi tzv. Comptonov teleskop.

Pljuskovi čestica u atmosferi

Gama zračenje vrlo visokih energija (od 100 GeV do 100 TeV) detektira se indirektnim metodama pomoću instrumenata smještenih na površini Zemlje. U tom energijskom području gama fotoni imaju dovoljnu energiju da pri ulasku u atmosferu izazovu elektromagnetski pljusak sekundarnih čestica: elektrona, pozitrona i fotona. Takvi pljuskovi nastaju tipično na visinama oko 20 km i mogu se protezati od par kilometara pa sve do površine Zemlje. Slične pljuskove izaziva i kozmičko zračenje (nabijene atomske jezgre od protona do željeza) čija je učestalost veća 10000 puta. Takve pljuskove zovemo hadronskim pljuskovima i oni osim elektrona i fotona sadrže još i pione, mione, protone, neutrone i druge čestice.

Problem je s nabijenim primarnim česticama (kozmičkim zračenjem) što skreću u galaktičkom i međugalaktičkom magnetskom polju na svojem putu od izvora do Zemlje. Zato se ne mogu povezati s izvorom⁴. S druge strane gama zračenje putuje bez otklona u magnetskom polju i može se povezati s izvorom.

I hadronski i gama pljuskovi u atmosferi sadrže mnoštvo nabijenih čestica koje se kroz zrak gibaju brzinom većom od brzine svjetlosti u zraku (koja je c/n gdje je n indeks loma za zrak). Takve čestice stvaraju tzv. Čerenkovljevo zračenje što je elektromagnetska analogija zvučnog udara koji nastaje kad npr. supersonični avion probija zvučni zid. Čerenkovljevo zračenje pojedinog pljuska u atmosferi ima pogodne karakteristike za indirektnu detekciju kozmičkog gama zračenja – vrlo je kratkotrajno i jako usmjereno.

Čerenkovljevi teleskopi

Čerenkovljevo zračenje danas ima veliku primjenu u visokoenergijskoj fizici, a nosi naziv prema ruskom fizičaru P.A. Čerenkovu koji ga je otkrio i za to dobio Nobelovu nagradu 1958. godine. Početkom 60-ih godina javila se ideja da se Čerenkovljevo zračenje, koje stvaraju pljuskovi u atmosferi izazvani upadom kozmičkog zračenja, iskoristi za indirektnu detekciju gama fotona iz svemira. To je bio začetak ideje gama-astronomije. Bilo je potrebno trideset godina usavršavanja detekcijskih tehnika i teleskopa da se pouzdano detektira prvi visokoenergijski gama izvor. Čerenkovljev teleskop sastoji se od segmentiranog zrcala koje reflektira Čerenkovljevu svjetlost u kameru sastavljenu od fotomultiplikatora. Elektronika kojom se digitalizira signal mora biti vrlo brza jer Čerenkovljeva svjetlost iz jednog pljuska dolazi u vrlo kratkom pulsu trajanja svega par nanosekundi.



Slika 2. Teleskop MAGIC na La Palmi, Kanarsko otočje, koji je počeo s opažanjima krajem 2003 godine. Nedavno je započela gradnja drugog teleskopa (Izvor: MAGIC)

⁴ Opservacijska znanost postaje **astronomija** tek onda kad utvrdi svoje izvore zračenja. Tako je gama-astronomija rođena prije 15 godina, a rođenje se neutrinske astronomije očekuje uskoro.

Tehnika detekcije koja je omogućila lociranje prvog visokoenergijskog gama izvora i nagli razvoj visokoenergijske gama-astronomije temelji se na analizi slika (engl. imaging) koje Čerenkovljeva svjetlost iz pljuska stvara u kameri teleskopa. Najvažniji teleskop druge generacije Čerenkovljevih teleskopa bio je teleskop HEGRA na kanarskom otoku La Palmi. HEGRA je zapravo bio sustav od 5 teleskopa kojim je po prvi put uvedena tehnika stereo⁵ opažanja 1997. Ta je tehnika omogućila daljnja poboljšanja karakteristika Čerenkovljevih teleskopa i time otkrića mnogih novih izvora. HEGRA je bila aktivna do 2003. godine nakon čega su dva njezina teleskopa dopremljena u Institut "Ruđer Bošković" u Zagrebu. Ta dva teleskopa bit će baza budućeg opservatorija CROATEA (Cosmic Ray Observatory at the Eastern Adriatic) čime će se Hrvatska uključiti u mali broj zemalja koje se suvereno bave visokoenergijskom astrofizikom čestica. Treća generacija Čerenkovljevih teleskopa u fazi je dovršetka i probnog rada. Čine ju teleskopi: MAGIC na La Palmi, H.E.S.S. u Namibiji, VERITAS u Arizoni te CANGAROO III u Australiji.

Ostali detektori kozmičkog gama zračenja smješteni na površini Zemlje

Kozmičko zračenje najviših energija (više od 100 TeV) detektira se indirektnim metodama s površine Zemlje, no u tom je energijskom području teško razlučiti primarne game od nabijenih čestica pa tako ne postoje utvrđeni izvori i područje nema status astronomije. Pluskovi čestica u atmosferi koje stvaraju kozmičke zrake najviših energija protežu se do površine Zemlje pa je osim Čerenkovljevog zračenja moguće detektirati sekundarne čestice (mione, elektrone, hadrone) detektorima na površini Zemlje kao npr. u eksperimentu KASKADE u Karlsruheu. Za detekciju kozmičkog zračenja najviših energija (oko 10^{20} eV) potrebni su detektori koji pokrivaju ogromne površine. Najveći takav eksperiment danas je AUGER u Argentini koji je još u gradnji, a čiji će detektori biti rasprostranjeni na čak 3000 km². AUGER koristi Čerenkovljevo zračenje za detekciju, ali ne ono koje nastaje u atmosferi, nego Čerenkovljevo zračenje koje u posebnim rezervoarima vode stvaraju sekundarne čestice koje dopjevaju do površine Zemlje. Prvi rezultati pokazuju da bi događaji najviših energija (čak 10^{21} eV) mogli biti izazvani upadom primarnog gama-fotona.

Galaktički izvori kozmičkog gama-zračenja

Prvi pouzdano detektirani visokoenergijski gama izvor bila je Rakova Maglica, 1989. godine, otkrivena Čerenkovljevom teleskopom Whipple smještenim u Arizoni. Rakova Maglica udaljena je od nas 6500 svjetlosnih godina. To je ostatak supernove čija su eksploziju 1054. godine zabilježili kineski astronomi kao iznenadnu pojavu nove, vrlo sjajne zvijezde na nebu. Eksplozija supernove je završni stadij u evoluciji vrlo masivne zvijezde. Udarni val koji pri eksploziji nastaje širi se u okolni prostor još dugi niz godina. Nabijene čestice u udarnom valu bivaju ubrzane praktički do brzine svjetlosti. Elektroni mogu doseći energije i do 100 TeV (masa mirovanja im je samo 0.5 MeV) pa ih zovemo ultrarelativističkim elektronima. Takvi elektroni koji na svom putu nalete na niskoenergijske fotone (npr. mikrovalno pozadinsko zračenje koje je sveprisutno) mogu fotonima predati veliki dio svoje energije stvarajući tako gama zračenje visokih i vrlo visokih energija. Ovaj se proces zove inverzno Comptonovo raspršenje i glavni je izvor visokoenergijskog gama zračenja koje emitiraju ostaci supernova. Rakova maglica najjači je galaktički izvor čiji je nepromjenjivi tok visokoenergijskog gama zračenja dobro utvrđen tako da je izvor dobio status tzv. standardne svijeće. Svaki Čerenkovljev teleskop na sjevernoj hemisferi povremeno promatra Rakovu maglicu. Jedinica za tok visokoenergijskog gama zračenja dobila je po Rakovoj maglici naziv "crab". Osim Rakove maglice danas su poznati i drugi *ostaci supernova*. U njihovim središtima obično se nalaze *pulsari*, brzrotirajuće neutronske zvijezde koje ostaju nakon eksplozija supernova. Pulsari su ekstremni objekti čija brzrotirajuća snažna polja također uzrokuju ubrzavanje nabijenih čestica do vrlo visokih energija. Pulsari ponekad emitiraju i jednu vrstu erupcija gama zraka. Ostaci supernova i pulsari su galaktički izvori visokoenergijskog gama zračenja, što znači da su smješteni unutar naše galaktike.

⁵ Dva ili više teleskopa promatraju isti pljusak u atmosferi i događaj se prihvaća ako su ga istovremeno opazila barem dva teleskopa.

Izvangalaktički izvori kozmičkog gama zračenja

Nakon što je osjetljivost atmosferskih Čerenkovljevih teleskopa dosegla dovolju granicu, 1992. godine detektiran je i prvi izvangalaktički izvor visokoenergijskog gama zračenja, Markarijan 421, aktivna galaktička jezgra udaljena od nas oko 500 milijuna svjetlosnih godina. 1995. godine otkriven je na drugom dijelu neba i drugi izvor, Markarian 501 na sličnoj udaljenosti. Oba izvora otkrivena su teleskopom Whipple. Do danas je poznato oko 10 takvih izvora, a uskoro se očekuje veliki porast broja otkrića s obzirom da treća generacija Čerenkovljevih teleskopa upravo počinje s radom. Gotovo sve aktivne galaktičke jezgre koje su izvori visokoenergijskog gama zračenja su *blazari*. Osnovna karakteristika blazara je brza promjenjivost toka zračenja u širokom spektru valnih duljina, od radio valova do visokoenergijskih gama. Vremenska promjena toka može biti reda veličine sata što znači da je veličina objekta reda veličine svjetlosnog sata – manje od veličine Sunčevog sustava. S druge strane, masa aktivne galaktičke jezgre iznosi par stotina milijuna masa Sunca što znači da se radi o izuzetno kompaktnom objektu. Postoji više teorija o prirodi takvih objekata, no objašnjenje koje ima neusporedivo najviše izgleda da bude točno jest da se u središtima aktivnih galaktičkih jezgara nalaze supermasivne crne rupe. Vjerojatno se u središtima svih galaktika, pa i u našoj, nalaze supermasivne crne rupe, ali je akrecija⁶ mala pa jezgra takve galaktike nije aktivna.



Slika 1. Umjetnički prikaz aktivne galaktičke jezgre. (Izvor: NASA)

Aktivna galaktička jezgra sastoji se od supermasivne crne rupe, akrecijskog diska i dva ultrarelativistička mlaza na osi rotacije. Kod blazara je jedan od mlazova usmjeren prema nama. Druga vrsta izvangalaktičkih izvora gama zračenja su erupcije gama-zračenja (engl. GRB – gamma ray burst). Njihove su energije uglavnom u području dostupnom satelitima, no nova generacija Čerenkovljevih teleskopa niskog energijskog praga (desetak GeV) mogla bi dati značajan doprinos istraživanju ovih pojava. Teleskop MAGIC na La Palmi konstruiran je tako da vrlo brzo može reagirati na dojavu o erupciji gama-zračenja i usmjeriti svoju aktivnost u taj dio neba. Samo mali dio erupcija gama-zračenja dolazi s pulsara i mehanizam njihovog nastanka je više-manje poznat. Međutim, erupcije gama zračenja izvangalaktičkog podrijetla s pravom nose epitet najsjajnijih i najtajanstvenijih pojava u svemiru⁷.

⁶ Akrecija je prirast mase svemirskog tijela, pojava pri kojoj zbog snažne gravitacije postoji tok tvari iz okoline prema tom tijelu. Zbog zakona očuvanja kutne količine gibanja formira se tzv. akrecijski disk.

⁷ Pogledajte članak Nevena Soića, *Erupcije γ -zraka – najsjajnije i najtajanstvenije pojave u svemiru*, u četvrtom broju MFL-a, godište 2004./05.

Budućnost gama-astronomije

Nova, treća generacija Čerenkovljevih teleskopa (MAGIC, HESS, VERITAS i CANGAROO-III) u završnoj je fazi izgradnje. Neki su teleskopi već dovršeni te su počeli s opažanjima, a ostali će biti dovršeni u idućih nekoliko godina. Satelit GLAST, prvi iz nove generacije gama-satelita, također je u završnoj fazi izgradnje. Lansiranje se planira početkom 2007. godine.

Iz povijesti znanosti poznato je da je dosad svaka radikalno nova vrsta znanstvenih instrumenata donosila nove znanstvena otkrića. Zato se opravdano vjeruje da će nova generacija detektora kozmičkog gama-zračenja u idućih deset godina donijeti mnoge nove spoznaje i otkriti nam novu, zasad nepoznatu, fiziku.

Više informacija o vodećim eksperimentima u području visokoenergijske gama-astronomije možete naći na web stranicama:

<http://magic.mppmu.mpg.de/>

<http://www.mpi-hd.mpg.de/HESS/>

<http://veritas.sao.arizona.edu/>

<http://icrhp9.icrr.u-tokyo.ac.jp/c-iii.html>

<http://www-glast.stanford.edu/>