

ZRAČENJE U PRIRODI

Saša Blagus

Institut "Ruđer Bošković", Zagreb

Prirodu oko nas, spoznajemo na dva načina: 1) motrenjem pojava u našoj neposrednoj i daljoj okolini (planeta Zemlja, Sunčev sistem, Galaksija, širi svemir), 2) aktivnim izazivanjem određenih pojava u mikrosvijetu. Oba navedena pristupa možemo u širem smislu svrstati pod pojam eksperimenta.

Ono što u eksperimentu mjerimo jesu razne vrste zračenja. Upravo su zračenja ona veza, preko koje dolazimo do spoznaje o raznim fizikalnim pojavama, kako u mikrosvijetu, tako i na skali svemirskih dimenzija. Bez obzira odakle dolazila, zračenja se uvijek opisuju istim fizikalnim veličinama: energijom, količinom gibanja, masom i specifičnim kvantnim brojevima. To su veličine po kojima se pojedine vrste zračenja razlikuju i određuju način interakcije sa materijom, a to znači i sa detektorima, koje kao eksperimentatori koristimo za proučavanje svijeta oko nas.

Prema porijeklu zračenja se mogu klasificirati na *zračenja zemaljskog porijekla*, dakle zračenja čiji izvori se nalaze na planeti Zemlji ili u njenoj atmosferi i *zračenja vanzemaljskog porijekla*. Pod zračenja vanzemaljskog porijekla svrstat ćemo sve vrste zračenja koje dolazi iz svemira i pada na površinu atmosfere. To mogu biti elektromagnetski valovi, odnosno fotoni ili pak neke od elementarnih čestica i atomske jezgre. U tom slučaju govorimo o kozmičkom zračenju.

1. Elektromagnetsko zračenje

Elektromagnetski valovi, odnosno fotoni - kvanti elektromagnetskog polja prekrivaju široko frekventno, odnosno energijsko ($E=h\nu$, $h=6.6262\times 10^{-34}$ Js) područje. Slika 1. prikazuje spektar pozadinskog elektromagnetskog zračenja, koje iz svemira upada u tipičnu točku svemira. Punim crtama označeni su mjereni dijelovi spektra, a crtkanim, teorijski procijenjeni. Radi lakšeg prikaza na koordinatnim osima se nalaze dekadski logaritmi odgovarajućih veličina. Vidimo da spektar obuhvaća vrlo široko područje, od radiovalova velike valne duljine, pa sve do granice takozvanih tvrdih γ -zraka.

Od posebnog je interesa, u vezi sa ovim ciklusom predavanja kozmičko mikrovalno pozadinsko zračenje, koje su 1965. otkrili A.A. Penzias i R.W.Wilson. Spektar tog zračenja, koje dopire jednoliko iz svih smjerova (izotropnost) je svjedok vrućeg “velikog praska” (danas najprihvaćenijeg modela nastanka svemira) i u frekventnom području od 400 MHz - 400 GHz odgovara Planckovom zračenju crnog tijela, temperature 2.7 K. Budući da je svemir od trenutka nastanka (prije 10^{10} godina) u stanju ekspanzije, to se zračenje moralo adijabatski hladiti, pa je navedena temperatura karakteristična za današnji svemir. Gustoća energije mikrovalnog pozadinskog zračenja od $0,25 \text{ eVcm}^{-3}$ daleko je najveća od gustoća energije svih ostalih valnih područja, a to vrijedi i za gustoću fotona od 400 cm^{-3} . Prosječna energija reliktnih fotona jest $6 \times 10^{-4} \text{ eV}$ ($\nu = 1.5 \times 10^{11} \text{ Hz}$).

Sva područja valnih duljina elektromagnetskih valova danas su dostupna opažanjima sa površine Zemlje ili sa visokih planina, odnosno, aviona, balona ili satelita. Zbog eksperimentalnih razloga, važno je znati kakva je atenuacija elektromagnetskog zračenja u atmosferi. Na slici 2. je pokazano na kojim visinama iznad površine Zemlje dolazi do atenuacije elektromagnetskog zračenja za faktore 2, 10 i 100 u ovisnosti o valnoj duljini. Radiovalovi valnih duljina iznad 30 m ne dopiru na površinu Zemlje zbog nepropusnosti ionosfere za te valne duljine, a od 30 m - 1 cm je područje klasične terestričke radioastronomije. U području od 10 mm - 1 mm djeluje jaka molekularna apsorpcija. Područje od 1 mm – 1 μm karakterizirano je sa nekoliko atmosferskih prozora za submilimetarsko (1-0.3) mm i daleko infracrveno područje (300–10) μm , no najpogodnije je motrenje iz aviona i balona na velikim visinama. U bliskom infracrvenom području (10-1) μm postoje brojni atmosferski prozori. Klasično optičko područje obuhvaća usko područje od (1-0.3) μm , s time da se na 0.3 μm ponovno javlja apsorpcija zbog kisika, dušika i ozona. Na svim kraćim valnim duljinama motrenja se izvode pomoću satelita. Unutar (0.3-0.2) μm obuhvaćeno je blisko ultraljubičasto područje, a za duljine valova $< 0.1 \mu\text{m}$ nije moguće motrenje jako daleko od Sunca, zbog interstelarne fotoelektrične apsorpcije zbog prisutnog vodika i helija. Kako valna duljina fotona dalje opada, nepropusnost međuzvezdanog plina opada kao λ^3 i za neke x-zrake (10-1) nm Galaksija postaje dovoljno propusna za promatranje vanjskog svemira. Područje od (1-10) keV pripada klasičnoj astronomiji x-zraka uz pomoć satelita, a područje od (10-1000) keV (tvrde x-zrake i meke i tvrde γ -zrake) obuhvaćeno je balonima i satelitima.

2. *Kozmičko zračenje*

Većina saznanja o svemiru su dobivena iz elektromagnetskog zračenja, no jednako je važno i takozvano kozmičko zračenje. 1912. g. je

ustanovljeno (V. Heiss) vanzemaljsko porijeklo tog zračenja a 1930. (Compton, Clay) da se radi o nabijenim česticama. Izvori zračenja, kako elektromagnetskog, tako i kozmičkog jesu procesi u pojedinim svemirskim objektima (radiogalaksije, aktivne galaktičke jezgre, neutronske zvijezde, supernove) ili procesi interakcije zračenja u međugalaktičkom i međuzvjezdanom prostoru. Te su interakcije mnogostruke prirode. One uključuju nuklearne sudare između jezgara kozmičkog zračenja i međuzvjezdane materije, kao i elektromagnetske interakcije između elektrona, pozitrona i ostalih čestica (zakočno zračenje, sinhrotronsko zračenje, anihilacija, tvorba parova čestica-antičestica). Osobito je važna u tom pogledu interakcija sa mikrovalnim pozadinskim zračenjem od 2.7 K, što postavlja izvjesne granice na porijeklo i udaljenost izvora kozmičkog zračenja najviših energija. Od izuzetnog značaja je pitanje porijekla kozmičkog zračenja, te mehanizmi ubrzavanja na najviše energije kao i pitanje postojanja energijske granice iznad 10^{20} eV. Važno je pitanje konfiguracije i jakosti međuzvjezdanih ($\sim 10^{-10}$ T) i međugalaktičkih ($\sim 10^{-13}$ T) magnetskih polja.

Važnost kozmičkog zračenja leži u činjenici da one predstavljaju jedini uzorak materije van sunčevog sistema, koji dopire na Zemlju.

Astrofizičke spoznaje sadržane u kozmičkom zračenju izvlače se iz opažanja raspodjele zastupljenosti i sastava čestica u kozmičkom zračenju, energijskih spektara i anizotropije dolaska kozmičkog zračenja na Zemlju. To nije lak zadatak jer na putu kozmičkog zračenja do mjesta opažanja postoji velik broj intervencijskih procesa, koji modificiraju kako sastav, tako i energijski spektar.

2.1 Kozmičko zračenje na površini atmosfere

Kozmičko zračenje, koje dopire na površinu atmosfere uključuje sve stabilne čestice i jezgre sa vremenom života $>10^6$ godina. Primarno zračenje čine čestice nastale i akcelerirane u astrofizičkim izvorima: elektroni, protoni, helijeve jezgre, ugljik, kisik, željezo i ostale jezgre sintetizirane u primordijalnoj i stelarnoj nukleosintezi (gotovo cijeli periodni sistem elemenata). Sekundarno zračenje obuhvaća one čestice koje su nastale interakcijom primarnih čestica sa međuzvjezdanim plinom.

Pogledamo li sliku 3. gdje su usporedno dani zastupljenost elemenata u kozmičkom zračenju i solarnom sistemu, vidimo da je zastupljenost lakih elemenata Li, Be i B u kozmičkom zračenju je mnogo veće nego u solarnom sistemu. Slično je i za elemente rednog broja od 15 do 24. Sličnost zastupljenosti elemenata u kozmičkom zračenju i Sunčevom sistemu nam govori da je i hipotetički izvor kozmičkog zračenja morao imati malu zastupljenost elemenata Li, Be i B. S obzirom na veliku zastupljenost C, N, O elemenata u međuzvjezdanom prostoru, produkcija Li, Be i B je

uzrokovana interakcijama protona iz primarnog zračenja i elemenata C, N i O, procesom spalacije. To je proces u kojem primarni proton nalijeće na atomsku jezgru i interagira sa jednim ili dva nukleona u jezgri. Ti protoni izlaze iz jezgre a rezidualna jezgra ostaje u visokopobuđenom stanju, koje se deeksitira evaporacijom nuklearnih fragmenata i neutrona.

Antiprotoni i pozitroni su uglavnom sekundarne prirode, no onaj dio koji je primarne prirode je predmet aktualnog interesa (zašto u svemiru ima vrlo malo antimaterije?).

Osim čestica koje su povezane sa sunčevom aktivnošću, kozmičko zračenje dolazi izvan sunčevog sistema. Od vremena na vrijeme Sunce emitira nabijene čestice, uglavnom protone i α čestice male energije ≤ 400 MeV, ali velikog intenziteta $\approx (10^6-10^7)$ $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, no ponekad se emitiraju i čestice od nekoliko desetaka GeV.

Tok čestica koji dolazi izvan sunčevog sistema sa energijom manjom od nekoliko GeV po nukleonu moduliran je postojanjem heliosfere (radius 50-100 a.j., 1 a.j. $\approx 1.5 \times 10^{11}$ m). U tom području oko Sunca, sunčev vjetar (ekspandirajuća magnetizirana plazma, generirana Suncem) usporava i djelomično sprečava lakše čestice nižih energija da dopru do Zemljine atmosfere. Zbog toga je spektar ispod 1 GeV/n vrlo slabo poznat i ovisi o fazi sunčevog ciklusa. Postoji znatna antikorelacija između solarne aktivnosti (ciklus od 11 g) i intenziteta kozmičkog zračenja s $E < 10$ GeV/n. Znatno je i utjecaj geomagnetskog polja, kao i vremenskih varijacija ovisnih o atmosferskom tlaku i raspodjeli temperature kroz atmosferu.

Prosječna gustoća energije primarnog zračenja iznosi 1 eVcm^{-3} .

Energijski spektar primarnog kozmičkog zračenja za jače izražene komponente prikazan je na slici 4. Fluksevi svih jezgri, osim produkata spalacije (Li, Be, B), slijede u biti isti zakon

$$I(E) \approx E^{-\alpha} \text{ nukleona/m}^2\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1} \text{ MeV}^{-1}$$

gdje je E totalna energija nukleona, a $\alpha=2.7$ u području energije od nekoliko GeV do ~ 100 TeV. U tom području energije, primarne čestice mogu još uvijek biti identificirane u direktnim eksperimentima na balonima i satelitima.

Najveći intenzitet čestica je u području od (10^8-10^{10}) eV/n i sadrži približno 87% vodika, 12% helija, dok ostatak od 1% otpada na elemente od Li do aktinida.

Na višim energijama spektri imaju dva različita ponašanja, vidljiva na slici 5. Blizu 10^{15} eV/n (takozvano "koljeno") spektar postaje strmiji $\sim E^{-3}$ ($\alpha=3$), a između 10^{18} i 10^{19} eV/n ponovno postaje nešto ravniji (takozvano "stopalo").

Spektar elektrona i pozitrona, koji upadaju u atmosferu Zemlje je nešto strmiji od spektra protona i atomskih jezgri.

Danas se smatra da je porijeklo kozmičkog zračenja u području energija ispod “koljena” u našoj galaksiji. Razmotrimo neke argumente u prilog te tvrdnje.

Satelitsko promatranje raspodjele γ -zračenja uzrokovano međudjelovanjem kozmičkog zračenja energije $<3 \times 10^{10}$ eV sa međuzvezdanom materijom, pokazuje smanjenje intenziteta protonske i elektronske komponente zračenja od centra prema rubu Galaksije (slika 6). Isto tako lokalna gustoća energije kozmičkog zračenja u našoj Galaksiji nije konzistentna sa gustoćom energije u nekim drugim galaksijama, što govori protiv jednolike ekstragalaktičke gustoće i upućuje na galaktičko porijeklo kozmičkog zračenja.

Izvor kozmičkog zračenja u Galaksiji trebali bi biti ostaci supernova. To je gotovo sigurno za energije ispod 3×10^{10} eV. Kada dolazi do kolapsa masivne zvijezde, vanjski dio zvijezde eksplodira brzinom većom od 10^4 kms^{-1} . Izbačena materija zbog kretanja nadzvučnom brzinom uzrokuje jak udarni val u okolnom mediju. Materija koja prolazi kroz taj udarni val ubrzava se do energija kozmičkog zračenja. Budući su čestice kozmičkog zračenja nabijene one slijede složeni put kroz međuzvezdana magnetska polja odbijajući se na iregularnostima tih polja. Kao rezultat takvog gibanja osmatranja na Zemlji pokazuju izotropnost smjerova dolaska. Kozmičko zračenje se zadržava u magnetskim poljima Galaksije tokom $\sim 10^7$ godina nakon čega dio izlazi u vangalaktički prostor. Budući je procijenjeno da je tokom zadnjih 4×10^9 godina tok kozmičkog zračenja, koji dolazi u Sunčev sistem nepromijenjen, očito je da se nekim procesima gubitak kozmičkog zračenja mora nadoknađivati. Opažena brzina pojavljivanja supernova je ~ 3 na jedno stoljeće. Pokazuje se, da se time dobiva dovoljno snage za održavanje stacionarnog toka kozmičkog zračenja u Galaksiji.

Japanski astrofizičar K. Koyama sa suradnicima nedavno je utvrdio satelitskim osmatranjem (ASCA satelit) Supernove 1006, da x-zračenja sa suba omotača ostatka supernove imaju karakteristiku sinhrotronskog zračenja, za razliku od x-zračenja koje dopire iz unutrašnjosti ostatka. Iz jakosti magnetskih polja, koja se očekuju u ostacima supernove, ustanovljeno je da sinhrotronsko zračenje, emitiraju elektroni ubrzani do kinetičke energije $>10^{14}$ eV. Za očekivati bi bilo da se istim procesom ubrzavaju i protoni. Ovim okrićem bilo bi riješeno pitanje porijekla i ubrzavanja kozmičkog zračenja za energije ispod “koljena”. Mišljenje znanstvenika o tome ipak nije jedinstveno.

Mjereni energijski spektar kozmičkog zračenja pokazuje prisustvo čestica s energijama iznad “koljena” pa čak i iznad 10^{20} eV. O tom području energija bit će govora u posljednjem iz ovog ciklusa predavanja.

2.2 Kozmičko zračenje u atmosferi i na površini mora

Kozmičko zračenje u atmosferi je rezultat interakcije primarnog zračenja energije >1 GeV sa jezgrama atmosfere. Totalna energija primarne čestice troši se na ionizacijske procese u atmosferi i na generiranje kaskadnih procesa shematski prikazanih na slici 7. Simultano sa generiranjem nukleonske komponente stvara se “meka” ili elektromagnetska komponenta i “tvrda” ili mezonska komponenta. Glavni izvor “meke”komponente su neutralni pioni. Oni imaju vrlo kratki život (1.8×10^{-16} s) nakon čega se raspadaju u dva γ -kvanta, koji mogu u procesu sudara s atomskim jezgrama stvoriti par elektron-pozitron koji opet emitiraju zakočno i anihilacijsko zračenje. Proces se nastavlja sve dok energija elektrona i pozitrona ne padne ispod izvjesne energije. Nabijeni pioni se raspadaju prema shemi $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)$ i generiraju “tvrdu”, mionsku komponentu. Zbog relativističke dilatacije vremena mioni dovoljno velike energije mogu doći do površine Zemlje iako im je vrijeme raspada 2.2×10^{-6} s. Mioni manjih energija raspadnu se prema shemi $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$ odnosno $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$. Mioni s materijom interagiraju uglavnom elektromagnetski pa imaju veliku prodornu moć, tako da mogu prodrijeti duboko pod površinu Zemlje.

Slika 8. prikazuje raspodjelu vertikalnog toka raznih komponenti kozmičkog zračenja u ovisnosti o debljini atmosfere.

Najbrojnije nabijene čestice na površini mora su mioni. Mioni se generiraju na visini od ~ 15 km, a na površini Zemlje stižu sa srednjom energijom od ~ 4 GeV. Intenzitet miona je proporcionalan sa $\cos^2\theta$, gdje je θ kut upada u detektor u odnosu na vertikalnu. Totalni intenzitet na nivou mora iznosi $\sim 1 \text{ cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$. Elektromagnetska komponenta dominira na velikim visinama no zbog jake atenuacije, na površini mora predstavlja manji dio zračenja. Totalni intenzitet je $\sim 0.4 \text{ cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$.

Nukleonska komponenta zbog intenzivne interakcije sa okolnom atmosferom gotovo iščezava na površini mora. Neutroni iz nukleonske komponente odgovorni su za stvaranje radioaktivnog ^{14}C i ^3H u atmosferi. Većina neutrona iz nukleonske komponente visoko u atmosferi podliježe nuklearnoj reakciji $^{14}\text{N} + n \rightarrow ^{14}\text{C} + ^1\text{H}$ pri čemu nastaje beta radioaktivan ^{14}C s poluvremenom raspada od 5568 godina. Neutroni s energijom >4 MeV (oko 5%) sudjeluju u reakciji $^{14}\text{N} + n \rightarrow ^{12}\text{C} + ^3\text{H}$ pri čemu nastaje beta radioaktivni tricij s poluvremenom raspada od 12.5 g. Nakon formiranja brzo se oksidiraju u CO_2 i H_2O u kao oborine padaju na površinu Zemlje gdje se ugrađuju u organske spojeve ili otapaju u vodi (tricija u vodi ima $\sim 10^{-16}$ %).

3. Neutrinsko zračenje

Radi potpunosti spomenut ćemo ukratko i neutrinsko zračenje.

Najveći dio elektronskih neutrina koji iz svemira dolaze na površinu Zemlje su sunčevog porijekla i imaju energije od (0-20) MeV. Rezultat su termonuklearnih procesa na Suncu. Opaženi tok neutrina sa Sunca iznosi $\sim 1/3$ toka predviđenog takozvanim standardnim modelom Sunca ($10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Ta činjenica je predmet takozvane zagonetke solarnih neutrina. Prirodna β -radioaktivnost Zemlje je izvor elektronskih antineutrina i ponešto elektronskih neutrina u području energija (0.02-2.5) MeV, sa tokom nešto manjim od onog sa Sunca. Atmosferski tokovi neutrina i antineutrina su rezultat raspada piona, kaona i miona. Energije tako nastalih neutrina mogu doseći energiju i do 10^{14} MeV s tokom $\sim 10^{-2} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Konačno, na Zemlju mogu doprijeti i neutriini koji nastaju pri pojavi supernova (energije 10-15 MeV) kao i neutriini nastali interakcijom kozmičkog zračenja sa međuzvezdanom materijom ($\sim 10^{14} \text{ MeV}$).

Teorija "velikog praska" predviđa postojanje reliktnih neutrina vrlo male energije od $\sim 10^{-10} \text{ MeV}$.

4. Prirodna radioaktivnost na površini Zemlje

Radioaktivnost je svojstvo nekih jezgri da spontano emitiraju α -čestice (helijeve jezgre), β -čestice (elektrone i pozitrone), γ -zrake ili x-zrake pridružene u hvatu orbitalnog elektrona od strane atomske jezgre. Glavni izvor prirodne radioaktivnosti Zemlje čine tri radioaktivna niza (slika 9) ${}_{92}^{238}\text{U} \rightarrow {}_{82}^{206}\text{Pb}$ (uranov niz), ${}_{92}^{235}\text{U} \rightarrow {}_{82}^{207}\text{Pb}$ (aktinijev niz) i ${}_{90}^{232}\text{U} \rightarrow {}_{82}^{208}\text{Pb}$ (torijev niz) koji završavaju stabilnim izotopima olova. Poluvremena raspada početnih nuklida su $T_{1/2} = 4.5 \times 10^9 \text{ g. } ({}_{92}^{238}\text{U})$, $T_{1/2} = 7.13 \times 10^8 \text{ g. } ({}_{90}^{235}\text{U})$ i $T_{1/2} = 1.4 \times 10^{10} \text{ g. } ({}_{90}^{232}\text{Th})$. Ta su vremena usporediva sa vremenom postojanja planete Zemlje $\sim 4.5 \times 10^9 \text{ g.}$ Raspadi se dešavaju emisijama α -čestica energije nekoliko MeV-a, odnosno emisijom β -čestica. U svakom od nizova maseni broj se mijenja za 4, kao rezultat α -raspada.

Osim ovih nizova postoji još nekoliko radioizotopa koji nisu direktno vezani uz navedene nizove. Na primjer ${}^{40}\text{K}$ se raspada β -raspadom ili u hvatom orbitalnog elektrona. (g) ili ${}^{87}\text{Rb}$ (β^- , g).

Srednja aktivnost zemljine kore iznosi $\sim 3 \times 10^{10} \text{ Bqkm}^{-2}$ no to jako ovisi od mjesta do mjesta.

Jedan od srednjih članova svakog prirodnog niza je izotop plemenitog plina radona: ${}^{222}\text{Rn}$, ${}^{220}\text{Rn}$ i ${}^{219}\text{Rn}$ za poluvremenom raspada 3.825 dana, 55.6 s i 3.96 s. Njihovi neposredni prethodnici su izotopi radija koji se

raspadaju u radon α -raspadom. Radonovi izotopi se dalje raspadaju preko izotopa polonija, olova, bizmuta i talija u stabilne izotope olova.

U slobodnom zraku koncentracija ^{222}Rn je obično 10 Bqm^{-3} i ovisi o tlaku i vlazi. Ekstremno male koncentracije radova se mogu naći iznad površine mora.

Radon se unosi u ljudsko tijelo preko respiratornog trakta. Smatra se da je radonom kontaminiran zrak odgovoran za oko 50% doze zračenja, kojoj su ljudi izloženi (totalna godišnja doza iznosi 2-3 mSv/god). Zatvoreni prostori, podzemni prostori ili kuće sa povećanom koncentracijom torija u građevnom materijalu su glavna izvorišta radona. Specijalno su kritična područja s poroznim tlom.

Koncentracija u zatvorenim prostorima može varirati od nekoliko Bqm^{-3} do više od 10^5 Bqm^{-3} , no uobičajene koncentracije su između 20 i 80 Bqm^{-3} .