

Mreža detektora kozmičkog zračenja SEVAN

Sažetak: Svjetska mreža detektora kozmičkog zračenja SEVAN ima za cilj poboljšati temeljna istraživanja uvjeta u okolnom svemiru, posebno istražiti učinke Sunčevih modulacija. Godine 2011. mreža SEVAN prvi je put zabilježila učinak Sunčeve modulacije (Forbushov pad). Odnedavno se detektori upotrebljavaju i za istraživanje novih visokoenergetskih pojava nastalih u Zemljinoj atmosferi – tzv. *Thunderstorm Ground Enhancements* (TGE). Prvi dokazi o TGE-ima zabilježeni su s pomoću detektora SEVAN u Zvezdarnici Zagreb 14. svibnja 2017. tijekom olujnog nevremena. U radu smo predstavili i neke druge rezultate dobivene detektorom SEVAN koji se nalazi u Zvezdarnici Zagreb, poput iznosa barometrijskih koeficijenata i dnevnih varijacija.

Ključne riječi: kozmičko zračenje, svemirsko vrijeme, mreža SEVAN, Zvezdarnica Zagreb, barometarski koeficijenti, dnevne varijacije kozmičkog zračenja, Forbushov učinak, TGE

1. Što je kozmičko zračenje?

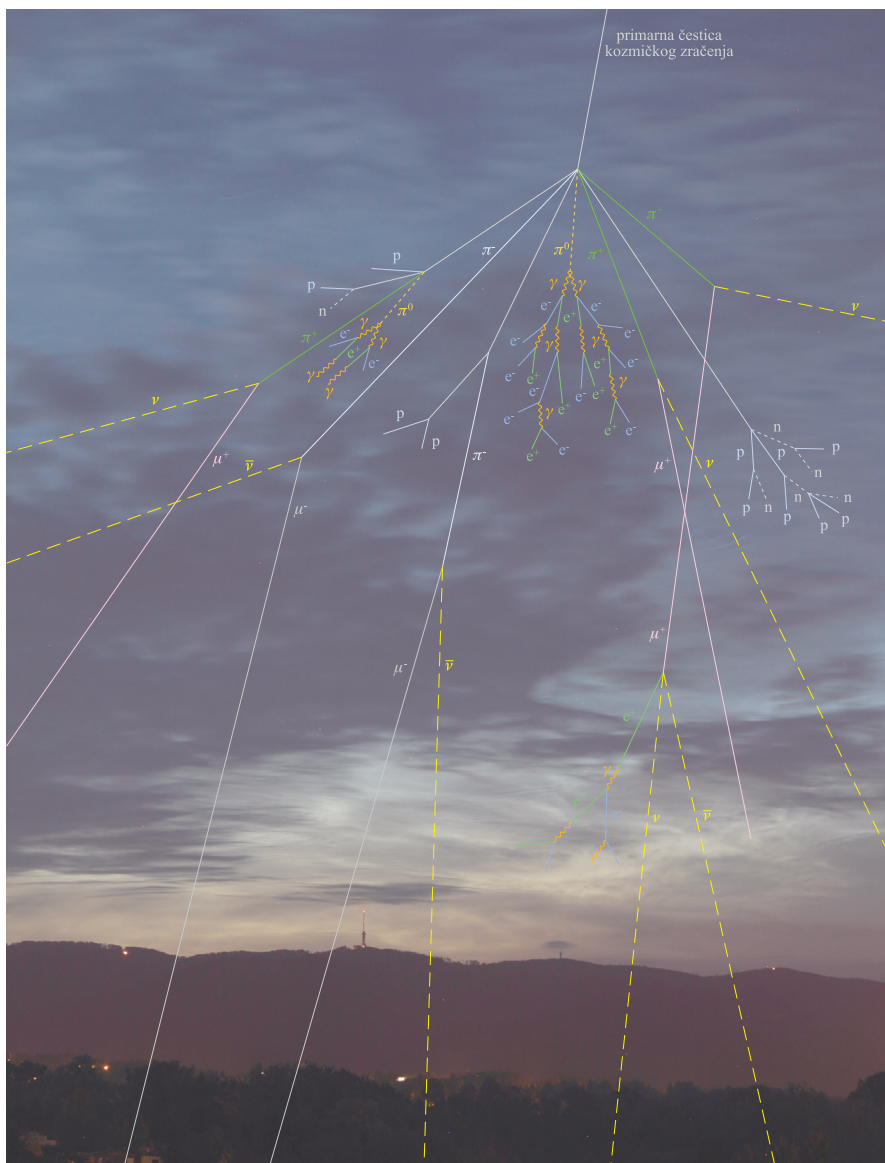
Kozmičko zračenje (ili kozmičke zrake) čestice su velikih energija koje se gibaju svemirom [1]. Ubrzane su različitim procesima, kao što su eruptivni procesi na zvijezdama (uključujući i Sunce), supernovama i najizdašnjim energetskim pojavama poput onih koje se zbivaju u aktivnim galaktikama. Čestice kozmičkog zračenja mogu se dodatno ubrzavati u gibajućim međuzvjezdanim magnetskim oblacima. Najzastupljenije su čestice jezgre vodika (protoni), jezgre helija (α čestice), dok je manji udio jezgara težih elemenata i elektrona. Čestice najvećih energija imaju milijune puta veću energiju od onih koje danas

postizemo u ubrzivačima (akceleratorima) čestica. Unatoč tomu što su pojedinačne čestice kozmičkog zračenja velike energije, ukupna gustoća energije čestica kozmičkog zračenja usporediva je s gustoćom energije svjetlosti zvijezda.

Čestice koje potječu neposredno od astrofizičkih izvora nazivamo primarnim kozmičkim zračenjem, dok sekundarno kozmičko zračenje nastaje međudjelovanjem primarnog kozmičkog zračenja s međuzvjezdanom tvari ili Zemljinom atmosferom. Sunčevo kozmičko zračenje pripada području manjih energija energetskog spektra kozmičkog zračenja. Galaktičko kozmičko zračenje nastaje izvan Sunčeva sustava. Njegov tok približno je konstantan, za razliku od Sunčeva, koji je vremenski vrlo promjenjiv i ovisan o pojavama Sunčeve aktivnosti. Galaktičko kozmičko zračenje približno je izotropno, što je rezultat utjecaja magnetskog polja naše galaktike (Mliječne staze), koje “zarobljava” nabijene čestice i mijenja im prvotni smjer. Galaktičko magnetsko polje naše galaktike nije dovoljno jako da može zadržati čestice velikih energija pa smatramo da su one izvangalaktičkog podrijetla.

Zbog Zemljine atmosfere čestice primarnog kozmičkog zračenja ne prodiru do Zemljine površine. One uzajamno djeluju (jakom nuklearnom silom) s jezgrama atmosferskih molekula (pretežito s dušikom i kisikom). Pritom dolazi do rasprskavanja (spalacije) jezgara, a nastali produkti zbog velike energije nastavljaju nuklearne interakcije. U sukcesivnim interakcijama (atmosferske kaskade) nastaje velik broj raznovrsnih čestica sekundarnog kozmičkog zračenja (primjerice α čestica, protona, neutrona, piona, kaona, miona itd.). U interakciji primarne čestice s jezgrama atoma u atmosferi nastaje velik broj piona koji su nestabilni, slika 1. Glavne su kaskadne komponente atmosferskog sekundarnog kozmičkog zračenja meka, tvrda i nukleonska komponenta. Meku komponentu čine elektroni (e^-), pozitroni (e^+) te fotoni (γ), zbog čega meku komponentu znamo nazivati i elektromagnetskom. Tvrdu komponentu čine mioni nastali raspadom mezona (uglavnom piona). Mioni slabo reagiraju s česticama u atmosferi (ne djeluju jakom nuklearnom silom) i unatoč kratkom vremenu života, zbog relativističkih efekata (dilatacije vremena), mnogi od njih uspijevaju stići do Zemljine površine. Nukleonska komponenta najvećim se dijelom sastoji od neutrona i protona. Zemaljskim detektorima obično bilježimo neutrone i mione.

Prije dolaska u Zemljinu atmosferu nabijene čestice galaktičkog kozmičkog zračenja prolaze heliosferom, kojom se širi Sunčev vjetar i Sunčevo magnetsko polje (zbog zamrznutosti polja u plazmi) i koja se od Sunca proteže do udaljenosti od oko 100 astronomskih jedinica. Potom nailaze na okolno Zemljino magnetsko polje (magnetosferu). Samo čestice dovoljno velikih energija mogu stići do Zemljine atmosfere i izazvati kaskadne raspade. S obzirom na oblik Zemljina magnetskog polja, vertikalno dolazeće čestice najteže prodiru do ekvatorskih područja, a najlakše do polarnih. Primjerice, energija protona potrebna za njegov vertikalni dolazak u ekvatorsko područje iznad Indije oko četiri je



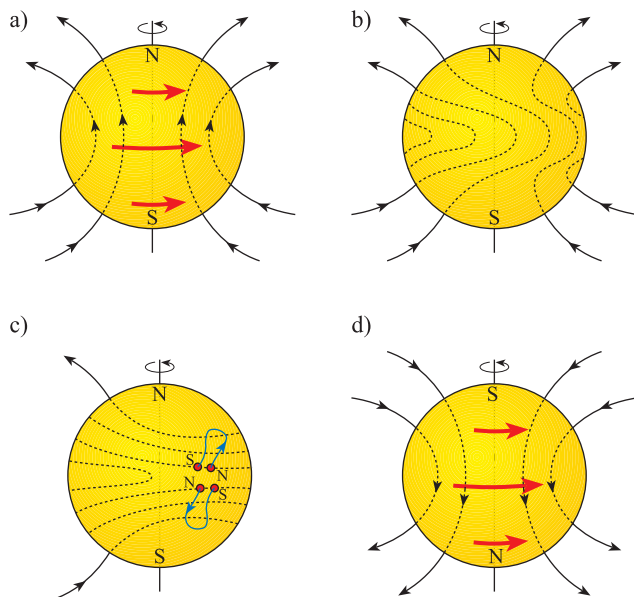
Sl. 1.: Pri interakciji primarne čestice kozmičkog zračenja s jezgrama atmosferskih atoma većinu nastalih čestica čine pioni (π). Neutralni pioni brzo se raspadaju (za oko 10^{-16} s), obično u dva γ -fotona. Gama-fotoni mogu producirati parove elektron-pozitron, od kojih zaključnim zračenjem opet mogu nastati novi γ -fotoni. Nabijeni pioni imaju dulje vrijeme raspada (oko 10^{-8} s), pa prije raspada mogu stupiti u interakciju s jezgrama drugih elementa. Pozitivno nabijeni pioni obično se raspadaju na pozitivne mione (μ) i mionske neutrine (ν), dok se negativni pioni obično raspadaju na negativne mione i mionske antineutrone. Negativni mioni raspadaju se stvarajući elektrone i elektronske antineutrone i mionske neutrone, dok pri raspadu pozitivnih miona nastaju pozitroni, elektronski neutrin i mionski antineutrin. Kaskadni procesi šire se vrlo brzo u atmosferi, brzinom usporedivom s brzinom svjetlosti.

puta veća od energije protona za dolazak u područje iznad Hrvatske, a oko 15 puta veća u odnosu na protone koji uspijevaju prodrijeti prema polarnim geografskim područjima.

2. Sunčeva aktivnost, heliosferska stanja i kozmičko zračenje

Prevladavajući čimbenik koji utječe na heliosferska stanja je Sunce, odnosno Sunčeva aktivnost. Ciklus Sunčeve aktivnosti tumačimo učinkom samopobuđujućeg magnetohidrodinamičkog dinama kojim kinetička energija vodljive plazme prelazi u magnetsku energiju [1]. Pritom su ključna dva učinka: diferencijalna rotacija koja zakrivljuje silnice poloidalnog magnetskog polja i generira toroidalno polje i učinak kojim se indukcijskim djelovanjima turbulentnih gibanja obnavlja poloidalno polje. Za minimuma aktivnosti Sunčevo je magnetsko polje poloidalnog oblika (poput magnetskog polja štapićastog magneta). Zbog zamrznutosti magnetskog polja u plazmi, diferencijalna rotacija “zakrivljuje” magnetske silnice mirnog Sunca i magnetsko polje postupno poprima toroidalnu konfiguraciju, pojačava se i na nekim mjestima izbija na Sunčevu površinu (fotosferu). Na tim područjima nastaju Sunčeve pjege, kojih je najviše za maksimuma Sunčeve aktivnosti. Za maksimuma aktivnosti silnice Sunčeva magnetskog polja poprimaju kompleksne konfiguracije i velike količine magnetske energije prelaze u druge oblike energije čestim pojavama aktivnosti, kao što su baklje (sjajnija područja obično povezana s pjegama), bljeskovi (naglo oslobađanje energije koje se uočava u pojačanju elektromagnetskog zračenja i akceleraciji čestica prouzročenoj naglim oslobađanjem magnetske energije), promi-nencije (relativno guste i hladne nakupine plazme u kromosferi i koroni), koro-nini izbačaji tvari (golemi izbačaji tvari iz korone koji kao magnetski oblaci plazme napuštaju Sunce, koji su najčešće vezani uz erupciju prominencije). Međuplanetni udarni val izazvan koroninim izbačajem također ubrzava nabijene čestice. Zbog Coriolisove sile i konvektivnih potpovršinskih gibanja, Sunce na-kon nekog vremena opet poprima polje slično štapićastom magnetu, ali sad su magnetski polovi suprotnog polariteta. Nakon idućeg maksimuma uspostavlja se početni magnetski polaritet Sunca. Sunčev ciklus aktivnosti u kojem se iz-mjenjuju uzastopni minimumi (a također i maksimumi) broja pjega iznosi pri-bližno 11 godina, dok magnetski ciklus u kojem se ponavlja isti magnetski polaritet Sunčevih polova iznosi oko 22 godine, slika 2.

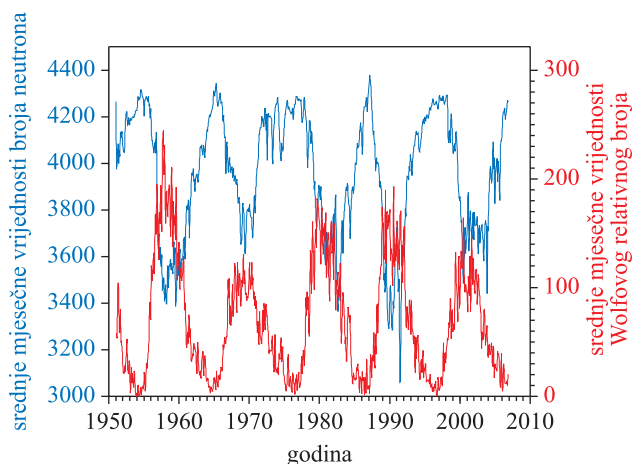
Sunce također utječe na Zemljinu magnetosferu i geomagnetsko polje. Uza-jamno djelovanje međuplanetnog magnetskog polja i magnetosferskog rezul-tira generiranjem visokoenergetskih čestica u magnetosferi i lakšim prijelazom



Sl. 2.: Konfiguracija Sunčeva magnetskog polja u razdoblju između dvaju uzastopnih minimuma aktivnosti

čestica iz heliosfere u magnetosferu. Kompleksni sustavi struja visokoenergetskih čestica poremećuju magnetosfersko stanje. Za najveće magnetosferske poremećaje, popraćene geomagnetskim olujama i podolujama, odgovorne su povremene pojave koroninih izbačaja tvari i s njima povezani udarni valovi. Periodične promjene (od 27 dana) nastaju zbog udarnih valova brze komponente Sunčeva vjetra iz koroninih šupljina. Njihov utjecaj najveći je za maksimuma Sunčeve aktivnosti, kad se koronine šupljine pojavljuju na nižim heliografskim širinama.

Istraživanje utjecaja Sunca na Zemlju i njezin svemirski okoliš vrlo je kompleksno i danas se karakterizira stanjem svemirskog vremena (engl. *Space Weather*). Pod tim pojmom podrazumijevamo uvjete na Suncu i u Sunčevu vjetru, magnetosferi i Zemljinoj atmosferi, koji utječu na provedbu svemirskih misija i pouzdanost tehničkih sustava u svemiru i na Zemlji i koji mogu ugroziti ljudski život i zdravlje, a mogu utjecati i na klimatske promjene [2]. Ti su uvjeti uglavnom potaknuti pojavama na Suncu i Sunčevom aktivnošću, ali uključuju i učinke zbog kozmičkog zračenja (Sunčeva i galaktičkog), kao i uzajamnog djelovanja međuplanetnog i geomagnetskog polja. Svemirska prognoza danas ima sve veće značenje zbog povećanja broja svemirskih misija (s ljudskom posadom i bez nje), kao i zbog upotrebe različitih zemaljskih i svemirskih tehničkih sustava (npr. za komunikaciju i navigaciju). Unatoč tomu što su prilično dobro poznati fizički procesi na Suncu i načini na koje oni utječu na Zemlju i njezinu



Sl. 3.: Tok kozmičkog zračenja (plava krivulja) antikoleriran je sa Sunčevom aktivnošću (crvena krivulja). Podaci o toku kozmičkog zračenja dobiveni su neutronske detektorom Climax Sveučilišta u Chicagu (riječ je o srednjim mjesečnim iznosima podijeljenim sa sto), dok je Sunčeva aktivnost iskazana srednjim mjesečnim iznosima Wolfova relativnog broja pjega.

magnetosferu, ipak još uvijek nismo u mogućnosti pouzdano predvidjeti nastupanje pojedinačnih pojava Sunčeve aktivnosti, kao što su pojave bljeskova i koroninih izbačaja tvari. Statistička učestalost tih pojava mijenja se s jedanaestogodišnjim ciklusom Sunčeve aktivnosti. Najveći ih je broj za maksimuma Sunčeve aktivnosti, ali isto tako, one se mogu zbivati i u razdoblju smanjene Sunčeve aktivnosti. Učinci galaktičkog kozmičkog zračenja veći su za Sunčeva minimuma. Naime, intenzitet galaktičkog kozmičkog zračenja antikoleriran je s ciklusom Sunčeve aktivnosti. Za maksimuma Sunčeve aktivnosti heliosfersko magnetsko polje učinkovitije sprečava dolazak čestica galaktičkog kozmičkog zračenja do Zemlje. Što je Sunčeva aktivnost Sunca, tok galaktičkog kozmičkog zračenja je manji, slika 3.

Općenito su vremenske promjene toka (ili intenziteta) kozmičkog zračenja na Zemlji vrlo složene i rezultat su superpozicije brojnih čimbenika [3]. Periodične promjene terestričkog podrijetla povezane su s fizičkim stanjem Zemljine atmosfere i asimetričnošću Zemljine magnetosfere, dok su sporadične (povremene) promjene terestričkog podrijetla uvjetovane relativno kratkotrajnim promjenama geomagnetskog polja (geomagnetskim olujama). Promjene ekstraterestričkog podrijetla uvjetovane su procesima u područjima izvan Zemljine magnetosfere.

Ekstraterestričke promjene vezane uz period Sunčeve rotacije (oko 27 dana) povezane su s dugoživućim aktivnim područjima na Suncu ili brzom komponentom Sunčeva vjetra. Dnevne ekstraterestričke periodične promjene približno su sinusnog oblika. Uvjetovane su učincima smanjenja galaktičkog kozmičkog

zračenja u smjeru suprotnom od Sunca i u smjeru heliosferskog lokalnog magnetskog polja, što ima za posljedicu da je u prosjeku minimum kozmičkog zračenja nekoliko sati nakon mjesne ponoći, a maksimum u rano poslijepodne. Prostorna orijentacija Zemljine staze također ima stanovit utjecaj na dnevne promjene toka kozmičkog zračenja.

Sporadične ekstraterestričke promjene vezane su uz naglo pojačanje Sunčeva kozmičkog zračenja, Forbushov učinak (ili Forbushov pad, koji se očituje u naglom padu toka kozmičkog zračenja kad sa Sunca izbačeni magnetski oblak zahvati Zemlju) i anizotropnu prethodnicu Forbushova pada. Nailazak magnetskog oblaka izaziva različite učinke na Zemlji i u njezinu svemirskom okolišu, koji mogu biti štetni za tehniku i opasni za zdravlje astronauta u svemirskim misijama. Zato istraživanje modulacija galaktičkog kozmičkog zračenja, posebno anizo- tropne prethodnice Forbushova učinka, može biti važno u pravodobnom pred-vidanju (prognozi) tih učinaka.

3. Mreža detektora SEVAN

Povećan interes za istraživanje heliosferskih stanja rezultirao je velikim svjetskim znanstvenim programom nazvanim Međunarodna heliofizička godina (*International Heliophysical Year – IHY*), koji je osmišljen kao međunarodni program globalnih istraživanja u svrhu boljeg razumijevanja pokretača stanja u svemirskom okolišu i klimi i koji je počeo 2007. godine. Prisjetimo li se prethodnih sličnih programa, Međunarodne polarne godine (*International Polar Year – IPY*, koja je počela 1882.), Druge polarne godine (počela 1932.) i posebno Međunarodne geofizičke godine (*International geophysical Year – IGY*, počela 1957.), koja je označila početak ere svemirskih letova, možemo uvidjeti povijesni kontekst programa IHY i njegovu važnost za suvremenu svemirsku tehniku i svemirske misije [4]. Jedna od sastavnica programa IHY bila je *United Nations Basic Space Science (UNBSS) Observatory Development Program* (UNBSS), namijenjena uspostavi opservatorija i mreže instrumenata u svrhu proširenja spoznaja o globalnim heliofizičkim procesima. Dio te sastavnice (programa) bila je i mreža detektora u srednjim i niskim geografskim širinama nazvana SEVAN (*Space Environmental Viewing and Analysis Network*, čiji je voditelj profesor Ashot Chilingarian, Odjel za kozmičko zračenje, Svemirski okolišni centar Aragat, Alikhanianov institut za fiziku, Erevan, Armenija). SEVAN mreža nastavila je aktivnost i u okviru idućeg svjetskog programa, *International Space Weather Initiative* (ISWI).

Glavna je svrha mreže SEVAN prikupljanje podataka u cilju istraživanja veze između Sunčeve aktivnosti i toka čestica kozmičkog zračenja, posebno korelacije Sunčevih eruptivnih pojava s intenzitetom i modulacijama toka galak-

tičkog kozmičkog zračenja. Galaktičko kozmičko zračenje služi kao pokazatelj stanja u heliosferi. Naime, nakon što ono uđe u heliosferu dolazi pod utjecaj međuplanetnih magnetskih oblaka i udarnih valova, koji nastoje otkloniti kozmičko zračenje iz unutarnjeg područja Sunčeva sustava. Na putu do Zemlje magnetski oblak i udarni val mijenjaju tok galaktičkog kozmičkog zračenja, koje postaje anizotropno. Analizirajući promjene galaktičkog kozmičkog zračenja možemo dobiti informacije o akceleraciji čestica na udarnom valu unutar heliosfere i rasvijetliti dinamiku golemih magnetskih ustrojstava u heliosferi. Detektori kozmičkog zračenja razvijeni u okviru mreže SEVAN mogu se upotrijebiti za procjenu veličine i orijentacije Sunčevih izbačaja, veličine udarnog vala i jakosti magnetskog polja u međuplanetnom izbačaju tvari. Također mogu dati podatke o mehanizmima akceleracije čestica velikih energija u udarnim valovima nastalim bljeskovima i koroninim izbačajima tvari.

Pojave Sunčevih energetskih čestica i geomagnetske oluje igraju važnu ulogu u nastanku heliosferskih nepogoda koje mogu utjecati ne samo na tehničke nego i na biološke sustave. S te je točke gledišta moguće detaljno istražiti korelaciju stanja u Zemljinu svemirskom okolišu s klimatskim i biološkim čimbenicima.

Detektori omogućuju predviđanje i uzbunjivanje vezano uz mnoge uvjete stanja Zemljina svemirskog okoliša i time poboljšavaju predviđanje heliosferskih nepogoda i uzbunjivanje. S pomoću detektora na Zemljinoj površini moguće je predvidjeti nadolazeću magnetsku oluju satima prije nego što koronini magnetski izbačaji dođu do magnetometara na satelitima. Ujedno dobivamo i korisne podatke za identifikaciju glavnih izvora pogrešaka u predviđanju geomagnetskih oluja.

Detektori mreže SEVAN do danas su instalirani u sljedećim državama: Armeniji, Bugarskoj, Hrvatskoj, Indiji, Slovačkoj, Češkoj, Njemačkoj, Izraelu. Detektori su potpuno samostalne jedinice s mogućnošću slanja podataka preko interneta.

U Zvezdarnici Zagreb detektor je instaliran u prosincu 2008. godine, slika 4. To je prvi detektor za kontinuirano bilježenje kozmičkog zračenja u Hrvatskoj, skraćeno nazvan SEVAN CRO Zagreb iz razloga što je dio međunarodne mreže SEVAN i što je njegovom instalacijom Zvezdarnica Zagreb postala postaja za opažanje kozmičkog zračenja (*Cosmic Ray Observatory Zagreb*). Njegova instalacija nadopuna je i proširenje postojećih dugogodišnjih i vrlo uspješnih projekata istraživanja fizike Sunca u Hrvatskoj, koje vode djelatnici Opservatorija Hvar, Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Detektor također pridonosi i popularizacijskim i obrazovnim programima Zvezdarnice Zagreb. Zahvaljujući suradnji Alikhanianova instituta za fiziku i Zvezdarnice Zagreb, predsjednik Armenije Serž Sargsjan posjetio je u sklopu službenog posjeta Hrvatskoj 2009. godine i Zvezdarnicu Zagreb, slika 5.



Sl. 4.: Detektor SEVAN CRO u Zvezdarnici Zagreb

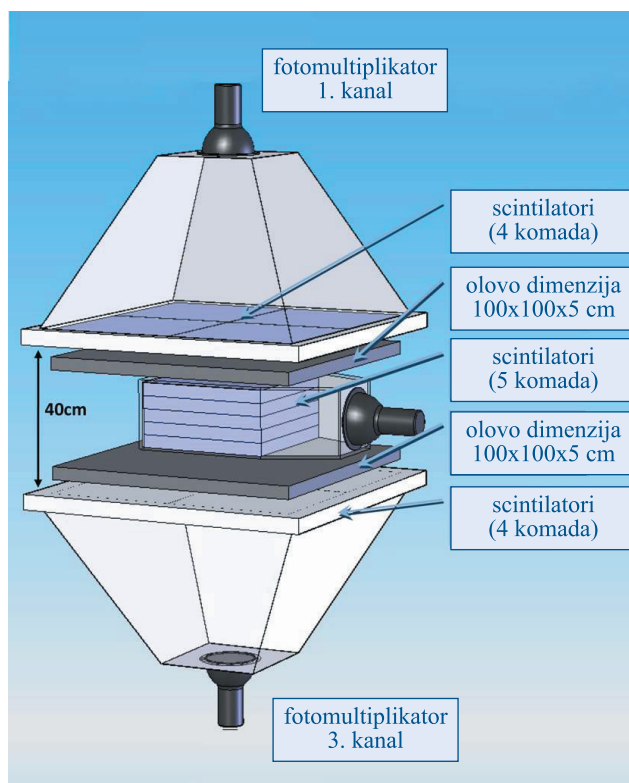


Sl. 5.: Snimka na terasi Zvezdarnice Zagreb tijekom posjeta predsjednika Republike Armenije. Zdesna nalijevo: prevoditeljica iz Ureda predsjednika Republike Hrvatske; Radovan Fuchs, tadašnji ministar znanosti, obrazovanja i športa; Ashot Chilingarian, direktor Alikhanianova instituta za fiziku, predsjednik Armenije Serž Sargsjan; Dragan Roša, ravnatelj Zvezdarnice Zagreb (Izvor: Protokol Ureda predsjednika Republike Hrvatske).

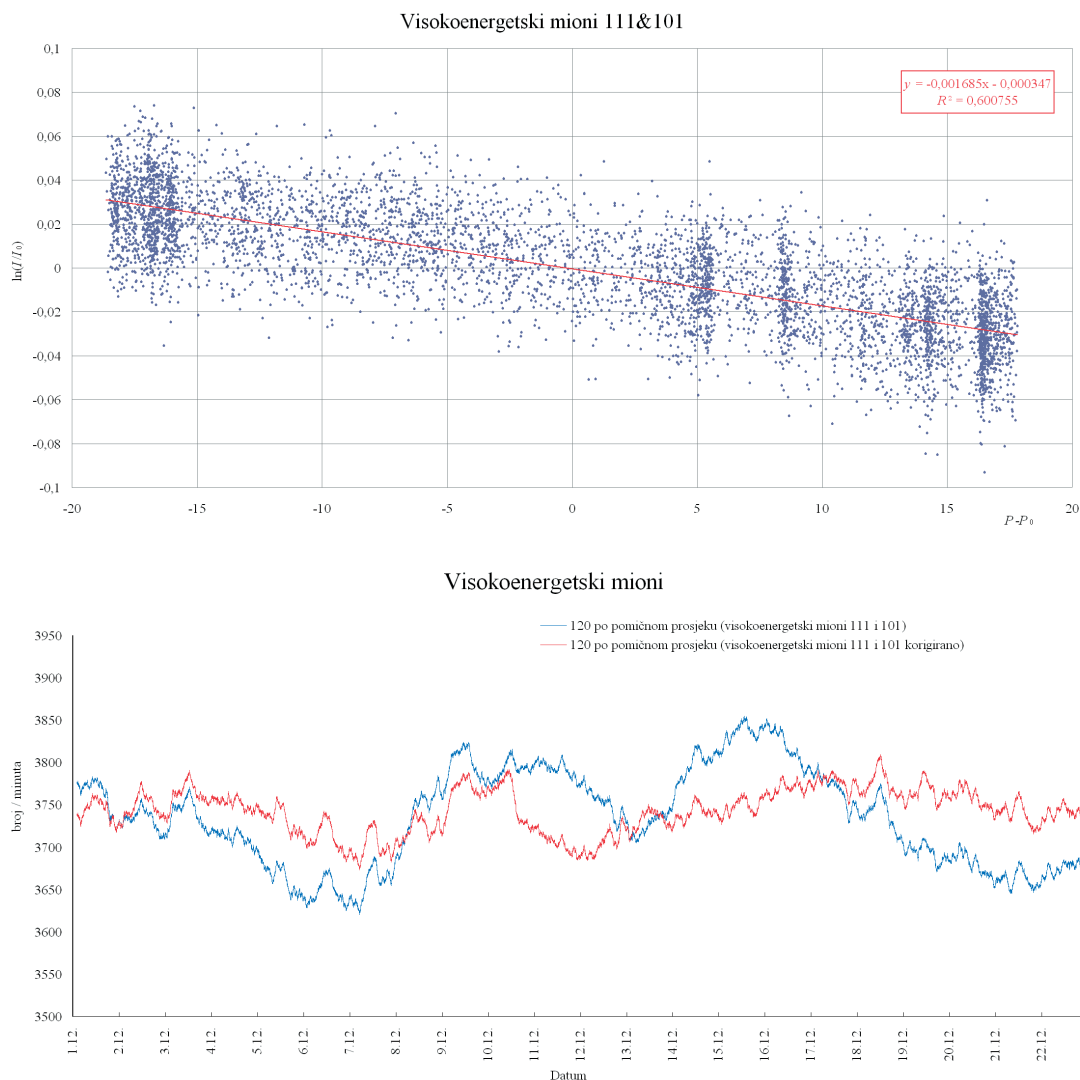
Detektor SEVAN, shematski prikazan na slici 6., je trokanalni [5]. Za detekcijsku tvar upotrebljavaju se plastični scintilatori, ukupno 13 (svaki obujma $50 \cdot 50 \cdot 5 \text{ cm}^3$). Ima tri fotomultiplikatora (za svaki kanal po jedan), te prateće elektroničke sklopove, računalo i barometar, koji nisu prikazani na slici 5.

Pojedini detekcijski kanali odijeljeni su olovom (površine 1 m^2 i debljine 5 cm). Ovisno o pojavi signala (1 – ima signala, 0 – nema signala) redom u po-jedinim kanalima, od gornjeg prema donjem, bilježi se:

- 111 ili 101 – transverzalni prolaz miona veće energije (približno $> 250 \text{ MeV}$)
- 010 – transverzalni prolaz neutralne čestice
- 100 – transverzalni prolaz čestice manje energije (približno $< 200 \text{ MeV}$) zaustavljene u scintilatoru ili u prvom (gornjem) dijelu olov- nog apsorbera
- 110 – transverzalni prolaz čestice manje energije zaustavljene u drugom (donjem) dijelu olovnog apsorbera
- 001 – bilježenje koso nadolazeće nabijene čestice.



Sl. 6.: Shematski prikaz detektora SEVAN



Sl. 7.: Primjer linearne regresije barometrijskog koeficijenta za visokoenergetske mione prikazan je na gornjoj slici, dok donja slika prikazuje mjesečni ugladeni graf s pomičnim prosjekom (također za visokoenergetske mione), koji prikazuje korigirane podatke koristeći barometrijski koeficijent

Detektor je projektiran za bilježenje sekundarnih čestica koje nastaju od čestica primarnog kozmičkog zračenja energije oko 10 GeV. Taj dio energetskog spektra galaktičkog kozmičkog zračenja moduliran je zbog utjecaja Sunčeve aktivnosti, a ujedno omogućuje i posredno bilježenje čestica primarnog Sunčeva kozmičkog zračenja s najvećim energijama. Bilježenja su minutna, kao i mjerenja tlaka zraka. Ukupan je broj detektiranih čestica oko 10 000 u minuti.

Tablica 1.: Prikaz rezultata mjerenja različitim statističkim metodama te barometrijski koeficijent β i linearni korelacijski koeficijent r

SEVAN CRO monitor	β 5(%/mbar) LSM	5(%/mbar) LAD	r	a LSM	a LAD	N
Visokoenergetski mioni	-0.169±0.0018	-0.169±0.00022	-0.775	0.01693	0.01693	5760
Neutroni	-0.282±0.0093	-0.274±0.00115	-0.368	0.08747	0.0875	5760
Niskoenergetske čestice	-0.202±0.0022	-0.224±0.00028	-0.765	0.02091	0.02137	5760
Gornji detektor	-0.190±0.0018	-0.202±0.00020	-0.838	0.01521	0.01543	5760
Srednji detektor	-0.147±0.0026	-0.144±0.00033	-0.584	0.02519	0.02521	5760
Donji detektor	-0.179±0.0016	-0.188±0.00021	-0.817	0.01559	0.01572	5760
Niskoenergetske čestice*	-0.251		-0.894			4799*
Donji detektor*	-0.209		-0.888			4799*

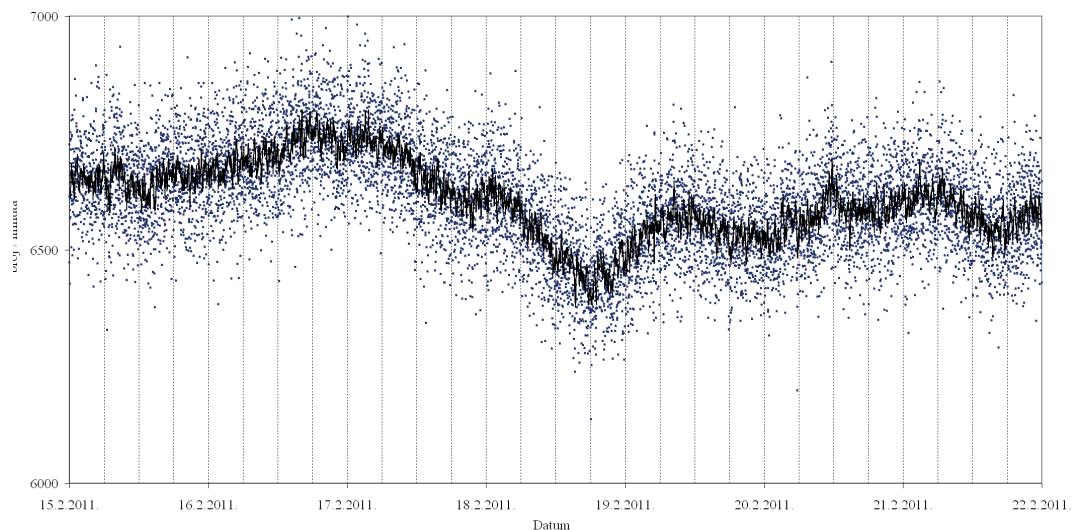
* podaci isključeni iz mjerenja i izračuna

Rezultati mjerenja i kalibracije barometrijskog koeficijenta SEVAN CRO detektora, kao i bilježenja Forbushova učinka i dnevne anomalije, prikazani su na konferenciji Proceedings of Tenth Workshop ‘*Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere*’, Primorsko, Bugarska, 4. – 8. lipnja 2018. [6].

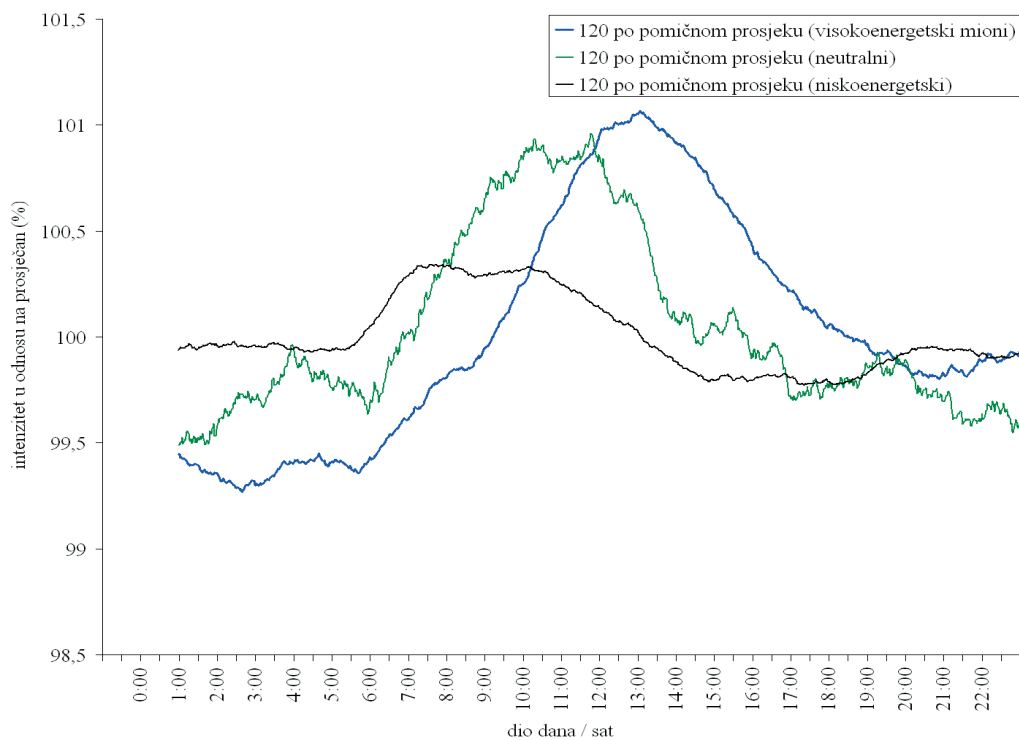
Intenzitet kozmičkog zračenja na instrumentima koji se nalaze na tlu pod utjecajem je lokalnog atmosferskog tlaka. Zbog toga je potrebno izračunati barometrijski koeficijent za korekciju podataka radi utjecaja na bilježenje čestica. U slučaju SEVAN CRO detektora, mjerenja i korekcije provedeni su tijekom Sunčeva minimuma krajem 24. Sunčeva ciklusa i to tijekom razdoblja bez većih poremećaja međuplanetnog magnetskog polja i magnetosfere te u razdoblju velikih oscilacija atmosferskog tlaka. Korišteni su podaci od 25. prosinca do 28. prosinca 2017. godine za izračunavanje barometrijskog koeficijenta tijekom najvećih oscilacija tlaka (razlika od oko 30 mbar) te u razdoblju bez geomagnetskih oluja (Dst indeks < -30 nT).

Primjenom metode najmanjih kvadrata (engl. *least-squares method* – LSM) te metode najmanjih devijacija (engl. *least absolute deviations* – LAD), metode koju je predložio naš znanstvenik Ruđer Bošković i to prije razvoja metode najmanjih kvadrata [7]), u tablici 1. prikazani su rezultati mjerenja i određivanja barometrijskog koeficijenta.

Detektorom kozmičkog zračenja SEVAN CRO prvi je put 2011. godine zabilježen Forbushov učinak. Vezan je uz nailazak sa Sunca izbačenog magnetskog oblaka na Zemlju. Najveće su Sunčeve modulacije niskoenergetskih protona primarnog kozmičkog zračenja i njihov broj je manji (a time i broj čestica sekundarnog kozmičkog zračenja). Zbog toga je Forbushov učinak najveći na tok niskoenergetskih čestica, slika 8.



Sl. 8.: Forbushov učinak na niskoenergetske čestice detektora SEVAN CRO. Mjerjenja od 17. do 18. veljače 2011. godine



Sl. 9. Dnevne anomalije kozmičkog zračenja tijekom 20 dana u razdoblju od 1. do 20. studenog 2010. Vrijeme (os apscisa) iskazano je u svjetskom vremenu (UT)

Dnevne anomalije ovise o mnogim čimbenicima, kao npr. o geografskom položaju samog detektora, stanju magnetosfere i stanju heliosferskog magnet-skog polja. Dnevna anomalija važna je za istraživanja međudjelovanja Sunca i Zemlje i heliosferskih stanja. Na slici 8. prikazani su prosječni tokovi čestica u isto vrijeme svakog dana u razdoblju od 1. do 20. studenog 2010. dobiveni detektorom SEVAN CRO. Podaci su uglađeni s pomičnim prosjekom od dva sata. Za visokoenergetske mione najveći je skok oko 13:00 UT; niskoenergetske čestice imaju dva skoka, oko 6:30 UT i oko 10:00 UT; neutralne čestice oko 9:00 UT i oko 11:00 UT, slika 9.

4. Visokoenergetska fizika Zemljine atmosfere

Detektori SEVAN pokazali su se i pogodnim za istraživanja visokoenerget-ske fizike Zemljine atmosfere, posebno u rasvjetljavanju razloga nastanka munja u grmljavinskim olujama. Pojave munja od davnina su poznate, ali mehanizam njihova nastanka još uvijek nije u potpunosti poznat [8].

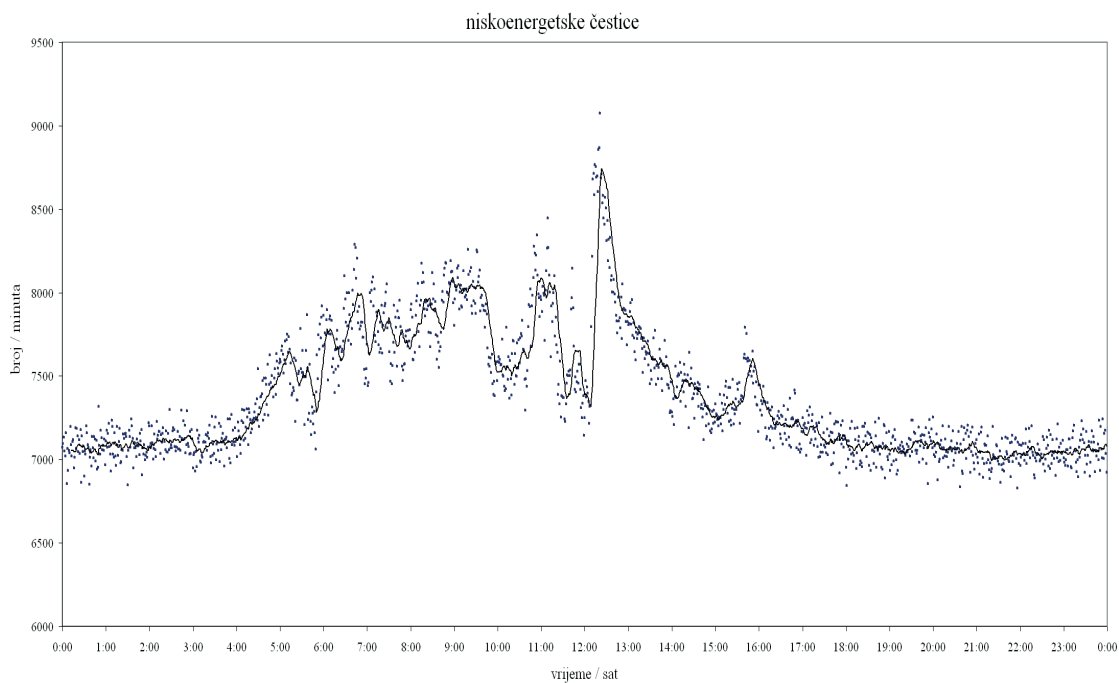
Da bi došlo do električnog izboja u plinu nužno je postojanje slobodnih elektrona i električnog polja. Električno polje ubrzava elektrone i oni ionizacijom stvaraju nove slobodne elektrone. Slobodni elektroni koji imaju manje energije mogu "iščeznuti" rekombinacijom s ioniziranim molekulama. Broj slobodnih elektrona povećavat će se samo u slučaju kad ionizacijski učinci nadvladaju rekombinacijske, što se događa kad je iznos električnog polja veći od određenog graničnog iznosa električnog polja. Izračun za uvjete koji vladaju u atmosferi i uobičajene (relativno male) energije slobodnih elektrona upućuje da se izboj može dogoditi za iznos električnog polja koji je barem deset puta veći od onog eksperimentalno ustanovljenog u grmljavinskim olujama.

Također je nejasno podrijetlo elektromagnetskog zračenja vezanog uz grmljavinske oluje (jakog radiozračenja, rendgenskog i gama-zračenja koje je detektirano i sa satelita u Zemljinoj orbiti). Ruski znanstvenik Aleksandr Gurevič sa suradnicima predložio je 1992. godine novi teorijski model ubrzavanja čestica i nastanka izboja u munjama [9]. Razmatrao je slučaj elektrona velikih (relativističkih) energija. Srednji iznos puta koji oni slobodno prelaze prije interakcije oko sto puta je veći negoli u slučaju elektrona malih energija. I uz manji iznos električnog polja, kakav je mjereno u grmljavinskim olujama, relativistički elektroni dobivaju energiju od električnog polja i mogu dovesti do izboja. Gurevič je pretpostavio da elektroni velike energije potječu od kozmičkog zračenja. Postojanje takvih elektrona još je prije stotinjak godina predvidio fizičar Charles Wilson, dobitnik Nobelove nagrade za fiziku 1927. godine. Količina elektrona u sekundarnom kozmičkom zračenju nije dovoljna da izazove izboj, ali Gurevičev model upozorava na drugu mogućnost. Pri interakciji

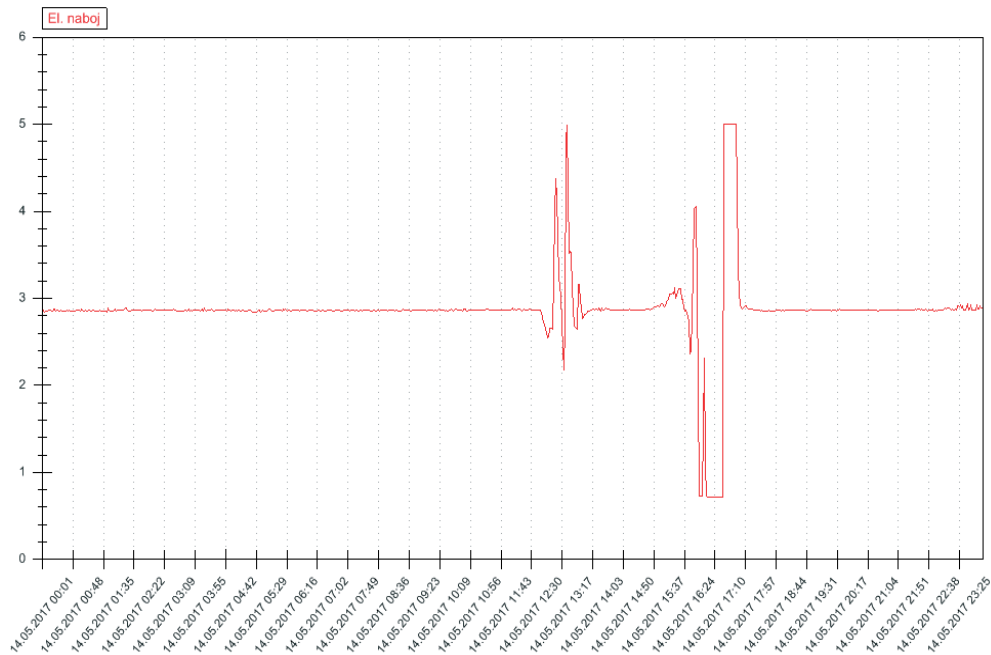
relativističkih elektrona s molekulama zraka dolazi do ionizacije. Dio novonastalih slobodnih elektrona može imati dovoljno veliku energiju da se i dalje ubrzavaju električnim poljem. Proces se tako nastavlja i dolazi do lavine elektrona, prvotno pokrenute elektronima sekundarnog kozmičkog zračenja, koja na kraju dovodi do nastanka munje. Emisija visokoenergetskog zračenja (rendgen-skog i gama-zračenja) samo je potvrda da u procesu nastanka munje ulogu igraju relativističke čestice.

Za potvrdu svakog modela potrebna su eksperimentalna mjerenja. Premda postaje za bilježenje kozmičkog zračenja djeluju gotovo sto godina, bilježenja promjene toka kozmičkog zračenja za grmljavinskih oluja bila su samo spora-dična i obično su se odnosila samo na jednu vrstu čestica sekundarnog kozmičkog zračenja i određenog raspona energija. Takve detekcije nisu izazivale posebnu pažnju. Godine 2009. prvi put je ostvarena istodobna registracija različitim detektorima promjena toka elektrona, neutrona i gama-zračenja vezanog uz munje (pojava se skraćeno naziva TGE, prema engleskom *Thunderstorm Ground Enhancements*). Zbilo se to na armenskoj postaji Aragat, koja se nalazi na nadmorskoj visini od 3200 m uz jezero Kari. O podacima mjerenja i njihovoj važnosti za visokoenergetsku fiziku Zemljine atmosfere izvijestio je prof. Ashot Chilingarian i to prvi put na znanstvenoj konferenciji *Heliophysical phenomena and Earth's environment* (Heliofizički uvjeti i Zemljina okolina), koja je u organizaciji Zvezdarnice Zagreb održana 2009. godine u Šibeniku. Nakon toga nastavljena su intenzivna praćenja TGE-a i otad Odjel za kozmičko zračenje Alikhanianova instituta za fiziku u Erevanu svake godine organizira međunarodnu konferenciju vezanu uz problematiku grmljavinskih oluja. Na konferenciji održanoj 2019. godine (*Thunderstorms and Elementary Particle Acceleration (TEPA-2019) 11 years of TGE observation on Aragats*), armenski znanstvenici iznijeli su izravan dokaz postojanja relativističke lavine elektrona u obliku fluorescentne svjetlosti emitirane tijekom razvoja elektronskih i gama kaskada u atmosferi. Uz opažanja minutnih tokova visokoenergetskih elektrona i gama-zračenja iz relativističkih lavina elektrona, objasnili su i mehanizam višesatnih izotropnih tokova niskoenergetskog gama-zračenja. Naime, pokusima su ustanovili da se produkti raspada radona prenose zrakom, potom se neposredno pričvršćuju na čestice prašine i aerosola u atmosferi te ih bliskopovršinska električna polja podižu, osiguravajući izotropno niskoenergetsko γ -zračenje [10].

Prva detekcija TGE-a s pomoću SEVAN CRO detektora ostvarena je 14. svibnja 2017. za vrijeme grmljavinske oluje koja je zahvatila Zagreb. Na slici 10. prikazano je povećanje zračenja u kanalu "100" (uglavnom niskoenergetski elektroni i γ -zračenje), a usporedno je prikazana i promjena atmosferskog električnog polja u relativnim jedinicama, jer instrument koji se nalazi na Institutu *Ruđer Bošković* udaljenom oko 1,5 km od Zvezdarnice Zagreb nije kalibriran. Povećanje toka zračenja dobro je kolerirano s promjenama električnog polja.



Mjerenja između 14.5.2017. i 14.5.2017.



Sl. 10.: Gornja slika prikazuje TGE zabilježen s pomoću detektora SEVAN CRO, a donja promjenu atmosferskog električnog polja

5. Suradnja Fakulteta elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu i Zvezdarnice Zagreb

Detektor SEVAN CRO sofisticiran je uređaj koji zahtijeva odgovarajuće održavanje elektronike i drugih komponenti. Obrada podataka također je zahtjevna. Iz tog razloga Zvezdarnica Zagreb uspostavila je suradnju s Fakultetom elektrotehnike i računarstva (FER) Sveučilišta u Zagrebu, koji ima eksperte na tom području. Trenutačno se suradnja temelji na nekoliko konkretnih tema, kao što je primjena postupaka otkrivanja znanja dubinskom analizom podataka o kozmičkom zračenju, razvoj, prilagodba i primjena primijenjenih računalnih aplikacija i digitalnih sklopova te popularizacija STEM područja.

Suradnja FER-a i Zvezdarnice Zagreb obuhvaća u prvom redu istraživanje koje uključuje primjenu različitih metoda strojnog učenja i statističkog zaključivanja u astrofizici s ciljem izlučivanja i detekcije skupa specifičnih značajki u vremenskim nizovima. Izazovi tog problema analize velikih skupova podataka (*engl. big data*) su brojni. Dobivene značajke mogu imati visoku praktičnu vrijednost jer na temelju fizikalnih mehanizama promjena intenziteta i modulacija toka galaktičkog kozmičkog zračenja upozoravat će na utjecaj Sunca i Sunčeve aktivnosti na Zemlju, geomagnetsko polje i heliosferska stanja. Namjera tog multidisciplinarnog istraživanja jest ostvarivanje novih spoznaja na područjima heliofizike i kozmičkog zračenja, kao i visokoenergetske fizike Zemljine atmosfere.

Osim navedenog, planira se projektni razvoj novog računalnog sustava koji će omogućiti analizu, vizualizaciju i izvještavanje, interaktivan mrežni pristup podacima prikupljenim detektorom SEVAN, te dijeljenje tih podataka s udaljenim računalnim sustavima. Takav je računalni sustav visokospecifičan, mora biti izrađen u bliskoj suradnji s korisnikom, a prijeko je potreban s obzirom na karakteristike signala te snažan interes u povezivanju istraživača tih fenomena. U toj domeni postoji i potreba za prilagodbom elektroničkih komponenti postojećih detektora i izradom novih detektora visokoenergetskog ionizirajućeg zračenja.

Planira se i razvoj paradigmi ili pristupa učenju o astronomiji, astrofizici i STEM području. Ti se programi učenja sad realiziraju korištenjem informacijsko-komunikacijskih tehnologija u sklopu različitih edukacijskih aktivnosti koje provodi Zvezdarnica Zagreb, a namijenjeni su učenicima, studentima i zainteresiranoj javnosti. Cilj tog aspekta suradnje FER-a i Zvezdarnice Zagreb općenito je unapređenje mogućnosti obrazovnih programa u STEM području i programa popularizacije znanosti.

Na koncu, završni, diplomski i doktorski radovi studenata još su jedno zanimljivo područje za suradnju u kojem se mogu susresti interesi tih dviju institucija kroz zajedničke teme i mentorstva.

Literatura

- [1] Roša, D.: *Metode astronomskih istraživanja*, Alfa d. d. i Zvezdarnica Zagreb, Zagreb, 2010.
- [2] Hanslmeier, A.: *The Sun and Space Weather*, Kluwer, 2002.
- [3] Dorman, L. I.; Smirnov, V. S.; Tjasto, M. I.: *Kosmičke luči v magnetnom polu zemli*, Nauka, Moskva, 1971.
- [4] *Putting the "I" in IHY: The United Nations Report for the International "Heliophysical Year 2007 (Studies in Space Policy)"*, Barbara J. Thompson; Natchimuthuk Gopalswamy; Joseph M. Davila; Hans J. Haubold (ur.), Wien New York: Springer, 2009.
- [5] Roša, D.; Angelov, Ch.; Arakelyan, K.; Arsov, T.; Avakyan, K.; Chilingarian, A.; Chilingaryan, S.; Hovhanissyan, A.; Hovhannisyanyan, T.; Hovsepyan, G. et al.: SEVAN CRO Particle Detector for Solar Physics and Space Weather research, *Central European astrophysical Bulletin*, 34 (2010), 115-122.
- [6] Šterc, F.; Roša, D.; Maričić, D.; Hržina, D.; Romštajn, I.; Chilingarian, A.; Karapetyan, T.; Cafuta, D. i Horvat, M.: SEVAN particle detector at Zagreb Astronomical Observatory: 10 years of operation, *Proceedings of Tenth Workshop "Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere"*, Georgieva, K.; Kirov, B.; Danov, D. (ur.), Primorsko: Space Research and Technologies Institute Bulgarian Academy of Sciences, 2018., str. 144-150.
- [7] Ivezić, Ž.; Connolly, A. J.; VanderPlas, J. T. and Gray, A.: *Statistics, Data Mining, and Machine Learning in Astronomy*, Princeton University Press, New Jersey, 2014.
- [8] Roša, D.: Zašto nastaju munje? Čovjek i svemir, br. 2, 2018./2019., LXI, str. 2, 8-32.
- [9] Gurevich, A. V.; Milikh, G. M. and Roussel-Dupre, R. A.: Runaway electron mechanism of air breakdown and preconditioning during a thunderstorm, *Physics Letters A*, 165 (1992): 463-468.
- [10] Chilingarian, A.: Razumijevanje visokoenergetske fizike u Zemljinoj atmosferi, (preveo D. Roša), Čovjek i svemir, br. 4, 2019./2020., LXII, str. 10-15.

SEVAN Cosmic Ray Detector Network

Dragan Roša, Filip Šterc, Marko Horvat

Abstract: Space Environmental Viewing and Analysis Network (SEVAN) is a worldwide network of particle detectors aimed to improve fundamental research of space weather conditions, especially to explore solar modulation effects. In 2011 first joint measurements of solar modulation effects (Forbush decrease) were detected by SEVAN network.

Recently detectors were used also for research of new high-energy phenomena originated in terrestrial atmosphere – Thunderstorm Ground Enhancements (TGEs). First evidence of TGEs at Zagreb Observatory by SEVAN detector was recorded on 14 May 2017 during lightning activity. In the paper we also presented some other results obtained by SEVAN CRO detector, such as the values of barometric coefficients and diurnal variation.

Keywords: cosmic ray, space weather, SEVAN network, Zagreb Astronomical Observatory, barometric coefficients, diurnal variations of cosmic rays, Forbush decrease, Thunderstorm Ground Enhancements

