

# KOZMIČKO IONIZIRAJUĆE ZRAČENJE NA ZRAKOPLOVNIM VISINAMA

---

Šafran, Adriana

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Department of Physics / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Odjel za fiziku**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:160:212090>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-01**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Department of Physics in Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**  
**ODJEL ZA FIZIKU**



**ADRIANA ŠAFRAN**

**KOZMIČKO IONIZIRAJUĆE ZRAČENJE NA  
ZRAKOPLOVNIM VISINAMA**

**Završni rad**

**Osijek, 2020.**

**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**  
**ODJEL ZA FIZIKU**



**ADRIANA ŠAFRAN**

**KOZMIČKO IONIZIRAJUĆE ZRAČENJE NA  
ZRAKOPLOVNIM VISINAMA**

**Završni rad**

Predložen Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku  
radi stjecanja zvanja prvostupnice fizike

**Osijek, 2020.**

**„Ovaj završni rad izrađen je u Osijeku pod vodstvom doc. dr. sc. Darija Hrupeca u sklopu Sveučilišnog preddiplomskog studija fizike na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku.“**

## Sadržaj

Sažetak.....	v
Abstract.....	vi
Uvod .....	1
1. Teorijski dio .....	2
1.1. Povijest ionizirajućeg zračenja .....	2
1.2. Ionizirajuće zračenje.....	3
1.3. Ionizirajuće kozmičko zračenje .....	6
1.4. Prirodna zaštita od ionizirajućeg kozmičkog zračenja .....	8
1.4.1. Sunčeva aktivnost .....	8
1.4.1.1. Magnetsko polje Sunca i Sunčev ciklus .....	8
1.4.1.2. Solarni vjetar .....	9
1.4.1.3. Solarna baklja .....	10
1.4.2. Zemljino magnetsko polje – geografska širina .....	11
1.4.2.1. Magnetosfera i Van Allenovi pojasi.....	12
1.4.3. Zemljina atmosfera – geografska visina .....	13
2. Mjerenje kozmičkog zračenja u avijaciji i dopuštene doze.....	14
2.1. Mjerenje ionizirajućeg kozmičkog zračenja.....	14
2.2. Dopuštene godišnje doze .....	16
2.3. Načini mjerenje kozmičkog zračenja na zrakoplovnim visinama .....	17
2.3.1. Uređaji i programi za mjerenje zračenja.....	17
2.3.1.1. TEPC .....	18
2.3.1.2. CARI-7 .....	18
2.3.1.3. EPCARD.Net .....	19
2.3.1.4. SIEVERT .....	20
3. Mjerenja na IBERIA letovima .....	20
4. Biološki utjecaj ionizirajućeg zračenja .....	23
4.1. Povećani rizik razvoja bolesti članova posade .....	23
Zaključak .....	25
Kazalo kratica .....	26
Literatura .....	27
Životopis.....	29

# KOZMIČKO IONIZIRAJUĆE ZRAČENJE NA ZRAKOPLOVNIM VISINAMA

ADRIANA ŠAFRAN

## Sažetak

Povećanjem broja niskotarifnih zračnih prijevoznika i pristupačnijim cijenama karata, komercijalni zračni prijevoz bilježi rast broja putnika. Otvaraju se nova odredišta, flote se povećavaju, što također zahtijeva i veći broj letачke posade. Putnici i posada su tijekom leta izloženi povećanoj dozi ionizirajućeg kozmičkog zračenja, a iznos doze zračenja koju će oni primiti ovisi o nadmorskoj visini, geografskoj širini, trajanju leta i Sunčevoj aktivnosti. Prvi dio ovog rada opisuje povijest i vrste ionizirajućeg zračenja, a daljnju tematiku usmjeravam na kozmičko ionizirajuće zračenje. U drugom dijelu su predstavljene dopuštene doze za članove posade koje izdaju ICRP, EU i FAA s potrebnim metodama mjerenja doza i izračunima pomoću prihvaćenih računalnih programa kao što su CARI, EPCARD.Net ili SIEVERT. Primjer provedenog mjerenja doza zračenja na letovima IBERIA airlines daje nam usporedbu s gore spomenutim programima. Rad završavam biološkim utjecajem ionizirajućeg zračenja i mogućim povećanim rizikom od razvoja malignih bolesti.

(29 stranica, 2 slike, 6 tablica, 9 grafova, 33 literaturnih navoda)

**Rad je pohranjen u knjižnici Odjela za fiziku**

**Ključne riječi:** kozmičko ionizirajuće zračenje, zrakoplovne visine, dopuštene doze, mjerenje doze TEPC, CARI, EPCARD.Net, biološki utjecaj ionizirajućeg zračenja

**Mentor:** doc. dr. sc. Dario Hrupec

**Ocjenjivači:**

**Rad prihvaćen:**

# COSMIC IONIZING RADIATION AT FLIGHT ALTITUDES

ADRIANA ŠAFRAN

## Abstract

With an increased number of low-cost airlines and more affordable ticket prices, commercial air transport is experiencing growing passenger numbers. New destinations are opening and fleets are increasing, which requires a larger number of aircrew too. Passengers and aircrew are exposed to an increased dose of ionizing cosmic radiation during the flight and the amount of radiation dose which they will receive depends on altitude, latitude, flight duration and solar activity. The first part of this paper describes the types of ionizing radiation and its history, further I focus only on cosmic ionizing radiation. In the second part, the permitted annual doses for crew members issued by the ICRP, EU and FAA is presented with required flight measurement methods and calculations using accepted computer programs such as CARI, EPCARD.Net or SIEVERT. The example of measuring radiation doses on IBERIA airlines flights provides a comparison with the programs mentioned above. Lastly, I conclude with biological effects of ionizing radiation and possible increased risk of developing malignant diseases.

(29 pages, 2 pictures, 6 tables, 9 figures, 33 references)

**Thesis deposited in Department of Physics library**

**Keywords:** cosmic ionizing radiation, flight altitudes, dose limits, TEPC, CARI, EPCARD.Net, biological effects of ionising radiation

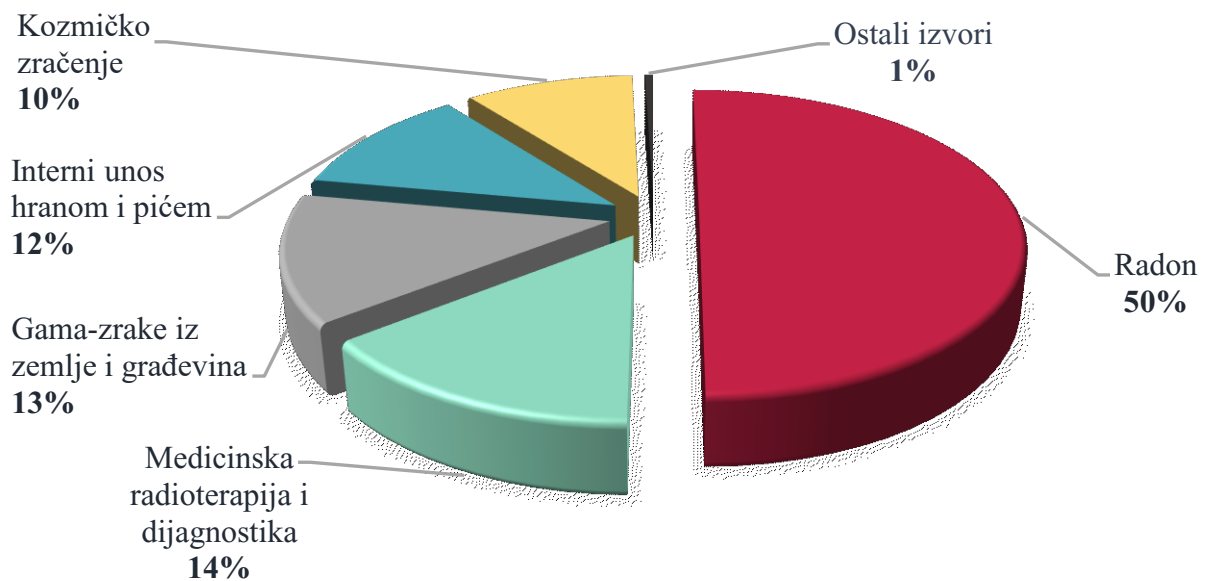
**Supervisor:** doc. dr. sc. Dario Hrupec

**Reviewers:**

**Thesis accepted:**

## Uvod

Svakodnevno smo izloženi raznim oblicima zračenja. Prirodno pozadinsko zračenje je neizbježno i svi smo mu izloženi. Tlo i objekti oko nas imaju određenu radioaktivnost, ovisno o radioaktivnim elementima koje sadrže. Neki radioaktivni elementi prisutni su oduvijek na Zemlji (uranij, torij, radij, kalij, radon), neki su posljedica ljudske tehnologije (stroncij, jod, cezij, plutonij), a neki su posljedica djelovanja kozmičkih zraka (ugljik-14, tricij, berilij-10). Također samom konzumacijom hrane i pića unosimo određenu prirodnu radioaktivnost pa stoga dolazimo do činjenice da svaki čovjek prima godišnju ekvivalentnu dozu zračenja od približno 3,5 mSv od čega je ozračivanje komičkim zračenjem 0,3 mSv/godišnje na otvorenom prostoru, nultoj nadmorskoj visini i srednjem geografskim širinama. Ionizirajuće kozmičko zračenje postupno raste porastom nadmorske visine te također ovisi i o geografskim širinama što govori činjenica da putnici u avionu, kabinsko-letačko osoblje i astronauti, na godišnjoj razini prime veće doze zračenja. [2,8]



**Graf 1.** Izvori pozadinskog zračenja [3]



# 1. Teorijski dio

## 1.1. Povijest ionizirajućeg zračenja

Zračenje ili radijacija je prijenos energije u obliku elektromagnetskih valova ili čestica kroz prostor. Zračenje često kategoriziramo na ionizirajuće i neionizirajuće zračenje, ovisno o iznosu energije koju zračenje prenosi.

Prve pojave ionizirajućeg zračenja započinju polovicom 19. stoljeća otkrićem katodnog zračenja. Godine 1858., njemački matematičar i fizičar Julius Plücker, proučavao je električne struje u plinovima i otkrio katodne zrake. Sljedećih godina drugi znanstvenici potvrdili su da se katodno zračenje sastoji od negativno nabijenih čestica koje se gibaju pravocrtno velikim brzinama, a 1881. godine Eugen Goldstein zapazio je i drugu vrstu zračenja koje se giba unutar katodne cijevi u suprotnom smjeru od katodnog zračenja te ga nazvao kanalnim zračenjem. Joseph John Thomson 1897. godine je odredio omjer naboja i mase čestica katodnog i kanalnog zračenja. Negativne čestice katodnog zračenja Georg Francis nazvao je elektronima, a čestice kanalnog zračenja koje su bile pozitivnog naboja i mase 1836 puta veće od mase elektrona – protonima. Philipp Lenard je kasnije načinio otvor zatvoren tankom berilijskom pločicom kako bi izveo katodno zračenje iz staklene cijevi. Godine 1895. Wilhelm Conrad Röntgen propuštao je katodno zračenje kroz Lenardov prozorčić i zapazio novo zračenje koje je bilo vrlo prodorno i uzrokovalo niz popratnih pojava, prije svega ionizaciju tvari. Röntgen je to zračenje nazvao X-zračenje. Kasnijim istraživanjima, Henri Becquerel, Pierre i Maria Sklodowska-Curie, te Ernest Rutherford i Paul Villard proučavali su zračenje iz urana, otkrili radioaktivnost tvari,  $\alpha$ -zračenje,  $\beta$ -zračenje te  $\gamma$ -zračenje. Walter Bothe i H. Backer 1930. godine zapazili su da neki laki elementi ozračeni  $\alpha$ -zračenjem zračili vrlo prodorno zračenje, a James Chadwick kasnije je objasnio i nazvao to zračenje neutronske zračenjem.

Ova prva istraživanja ionizirajućeg zračenja bila su vrlo važna, no daljnjim razvojem i pojavom nuklearnog oružja i nuklearnih elektrana, za širu javnost razvio se strah od nevidljivog ionizirajućeg zračenja. [2.a]

## 1.2. Ionizirajuće zračenje

Ionizirajuće zračenje je zračenje koje se širi kao elektromagnetski val ili čestica, a nosi dovoljno energije da u međudjelovanju s tvari ionizira tu tvar. Tim procesom ionizacije iz neutralnog atoma ili molekule nastaje električki nabijena čestica – ion.

Razlikujemo dvije osnovne skupine zračenja: elektromagnetsko (prijenos energije u obliku fotona) i korpuskularno zračenje (prijenos energije u obliku čestica).

Elektromagnetsko zračenje nastaje općenito pri promjenama energijskog stanja atoma što je npr: prijelaz elektrona u elektronskom omotaču atoma s više energijske razine na nižu, u nuklearnim procesima, kočenjem brzih elektrona i dr. Elektromagnetsko ionizirajuće zračenje obuhvaća rendgensko i  $\gamma$ -zračenje, no ionizaciju nekih tvari može uzrokovati i ultraljubičasto elektromagnetsko zračenje.

Rendgensko zračenje, često nazvano i X-zračenje, čine elektromagnetski valovi kratkih valnih duljina (od  $\sim 10^{-10}$  do  $10^{-13}$  m). Najkraće valne duljine zalaze u područje  $\gamma$ -zračenja, a najdulje graniče sa ultraljubičastim zračenjem. Iako rendgenskim zračenjem u početku nazivalo samo zračenje proizvedeno u rendgenskim cijevima, danas se rendgenskim zračenjem naziva svako zračenje tih valnih duljina, bez obzira na njegovo porijeklo. Također rendgensko zračenje može nastati prirodnim procesima u svemiru te ga dobivamo u procesima oko crnih rupa, neutronske zvijezde, zvijezde, supernova, pa čak i nekih kometa. [12] Primjena rendgenskog zračenja zasniva se na prodiranju zračenja kroz tvar, a to zračenje pristiglo iz svemira omogućuje nam da bolje upoznamo svemir i saznamo više o zvijezdama, crnim rupama, koronama, pulsarima i ostalim drugim svemirskim objektima i pojavama. Rabi se u medicini, astronomiji, znanosti te industriji. [13]

$\gamma$ -zračenje je najprodornije ionizirajuće zračenje, vrlo visoke frekvencije i energije elektromagnetskih valova. Nastaje energijskim prijelazima nestabilnih atomskih jezgri radioaktivnih tvari, usporavanjem vrlo brzih čestica i u sudarima subatomske čestice sa svojom odgovarajućom antičesticom (anihilacija čestica).  $\gamma$ -zračenje jedna je od komponenti kozmičkog zračenja koje nastaje pri nuklearnim procesima u zvijezdama. To zračenje dolazi do Zemlje i primarno međudjeluje sa Zemljinom atmosferom stvarajući sekundarno kozmičko zračenje također još uvijek visokih energija. Također, kao i rendgensko primjenjuje se u astronomiji (gama-astronomija), medicini (radiologija, gama-kamere) te u industriji (skeniranje kontejnerskog tereta i ispitivanje materijala koji se prevozi). [2,14]

Korpuskularno ili čestično zračenje nastaje raspadom atomske jezgre ili ubrzanjem čestica u električnom ili promjenjivom magnetskom polju, a neke vrste ionizirajućeg zračenja prema česticama su:  $\alpha$ -zračenje,  $\beta$ -zračenje i neutronske zračenje.

$\alpha$ -zračenje sastoji se od roja brzih  $\alpha$ -čestica jezgri helija koje se sastoje od dva protona i dva neutrona. Energije  $\alpha$ -čestica iznose nekoliko megaelektronvolta. U prirodi se također nalazi u primarnom kozmičkom zračenju, a umjetnim se putem dobiva ubrzanjem  $\alpha$ -čestica u akceleratorima. Sastoji se od relativno velikih čestica te u međudjelovanju s tvarima jako ionizira tvar. Prilikom jakog ionizirajućeg djelovanja gubi kinetičku energiju i ne prodire duboko u tvar (npr.: u zraku ima doseg samo nekoliko cm). Zbog toga  $\alpha$ -zračenje nije toliko opasno (ukoliko se nalazi izvan organizma), no ukoliko dođe do unosa u organizam izrazito je opasno zbog jake interakcije sa tvari tkiva s kojim je u dodiru. Trenutno se u medicini ovo zračenje ne primjenjuje, no razmatraju se neke nove metode u terapiji karcinoma u kojima bi se  $\alpha$ -zračenje primjenjivalo u velikim količinama lokalno – dovoljno za uništenje karcinoma uz poštedu okolnog zdravog tkiva. [2,16]

$\beta$ -zračenje sastoji se od roja  $\beta$ -čestica, brzih elektrona ( $\beta^-$ -zračenje) ili pozitrona ( $\beta^+$ -zračenje) koje izbacuju nestabilne atomske jezgre. Osim što  $\beta$ -zračenje spontano emitiraju nestabilne jezgre prilikom  $\beta$ -raspada,  $\beta$ -zračenje nastaje i ubrzanjem elektrona u akceleratorima (indukcijski akcelerator – betatron). Postoji oko 60 radioaktivnih elemenata oko nas u tlu, zraku, vodi, hrani i u svim živim bićima. Neki su oduvijek prisutni na Zemlji, neki nastaju kao posljedica djelovanja kozmičkog zračenja iz svemira, a neki su posljedica ljudske tehnologije. Ako usporedimo  $\beta$ -zračenje sa  $\alpha$  i  $\gamma$ -zračenjem, tada  $\beta$ -zračenje ima srednju prodornu i ionizirajuću snagu.  $\beta$ -čestice iz različitih radioaktivnih materijala razlikuju se u energiji, no većinu  $\beta$ -čestica može zaustaviti nekoliko milimetra aluminija. Također, iako  $\beta$ -čestice umjereno prodiru u živo tkivo one mogu izazvati spontane mutacije DNA. Neki beta radioaktivni elementi koriste se u medicinskoj dijagnostici, a u radioterapiji se koriste tako da se uništavaju ciljane stanice npr. za liječenje raka kostiju (stroncij-90) ili štitnjače (jod-131). [2,18]

Neutronske zračenje je zračenje roja brzih neutrona. Neutron je stabilan samo kada je vezan s drugim nukleonima u atomskoj jezgri, inače je slobodni neutron nestabilan te se raspada na proton, elektron i antineutrino. Neutroni se mogu emitirati iz nuklearne fuzije ili fisije, te drugih nuklearnih reakcija poput radioaktivnog raspada ili unutar akceleratora čestica. Neutronske zračenje također je komponenta kozmičkog zračenja. Neutroni proizvedeni iz

kozmičkog zračenja u Zemljinoj atmosferi ili površini te oni proizvedeni u akceleratorima čestica mogu biti znatno veće energije od onih u nuklearnim reaktorima. [15,17]

U sljedećoj tablici prikazane su spomenute vrste ionizirajućeg zračenja i neka njihova svojstva:

ZRAČENJE	SASTAV	DOMET U ZRAKU	DOMET U LJUDSKOM TKIVU	OPASNOST *
rendgensko	elektromagnetsko zračenje	mного metara	mного centimetara	vanjska
$\gamma$ -zračenje	elektromagnetsko zračenje	mного metara	mного centimetara	unutarnja + vanjska
$\alpha$ -zračenje	2 protona + 2 neutrona	nekoliko centimetara ( 2 – 8 cm )	nekoliko milimetara ( ~ 0.03 mm )	unutarnja
$\beta$ -zračenje	elektron ili pozitron	nekoliko metara	nekoliko milimetara	unutarnja + vanjska
neutronska	slobodni neutroni	mного metara	mного centimetara	vanjska

**Tablica 1.** Vrste ionizirajućeg zračenja i njegova svojstva [1]

\* *Opasnost unutarnja ili vanjska se odnosi na to da li pojedino zračenje prodire u ljudski organizam unutarnjim putem (udisanjem ili gutanjem) te vanjskim putem (prodire u ljudsko tijelo izvana).*

Postoji još vrsta ionizirajuća zračenja, a nazivaju se prema česticama od kojih se sastoje, npr: protonsko, deuteronsko, tritonsko, teškoionsko itd. Ta zračenja su dio komponente kozmičkog zračenja jer nastaju prirodnim putem u nuklearnim procesima u zvijezdama, no također mogu nastati i umjetnim putem npr: u nuklearnim reaktorima, nuklearnim eksplozijama ili u akceleratorima čestica.

Ionizirajuće zračenje nije moguće otkriti ljudskim osjetilima te ga je potrebno kontrolirati posebno kod ljudi koji su izravno izloženi nekoj vrsti ionizirajućeg zračenja, doktora u

medicini, astronauta, zračnog prometa te radnika u nuklearnim elektranama. Nekontrolirano izlaganje predstavlja opasnost za zdravlje poput oštećenja tkiva i stanica, a može rezultirati opeklinama, rakom i smrću.

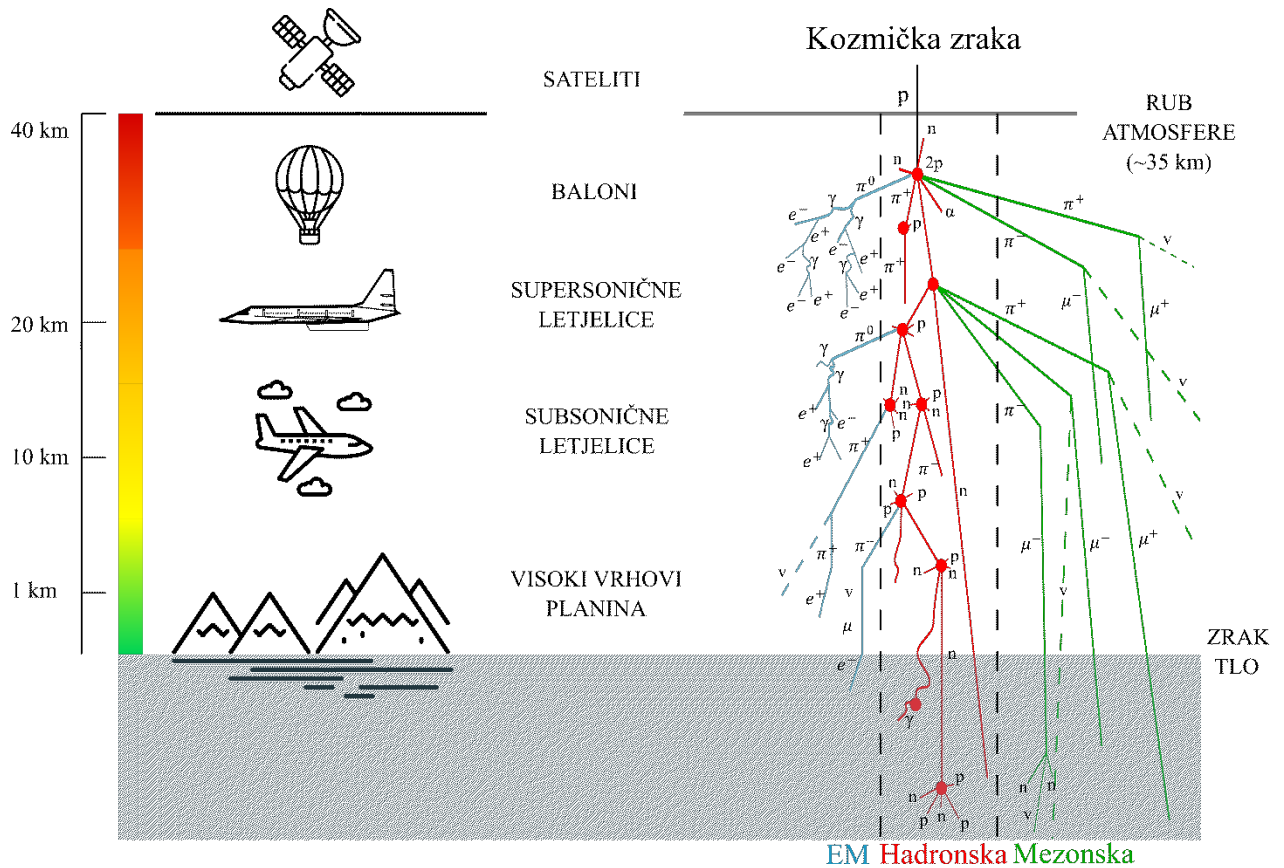
### **1.3. Ionizirajuće kozmičko zračenje**

Kao što smo već spomenuli opisujući vrste ionizirajućeg zračenja, zračenje može nastati prirodnim ili umjetnim putem. Umjetni izvori ionizirajućeg zračenja su tvari koje su načinjene umjetno i mogu biti kontrolirani (nastali nuklearnim procesima u reaktorima, u akceleratorima čestica, rendgenskim uređajima) ili nekontrolirani izvori (nuklearne eksplozije i umjetna radioaktivnost). Nuklearni otpad iz industrije – iz nuklearnih elektrana i od nuklearnih eksplozija raznosi se zrakom i vodom na široke prostore. Radioaktivni otpad potječe i od 'nenuklearni' aktivnosti poput izgaranja fosilnih goriva. [9]

Prirodno nas ozračuju prirodni radionuklidi iz mnogih kemijskih elemenata i spojeva od kojih je izgrađen naš svijet, te kozmičko zračenje koje dopire do Zemljine površine i kozmogeni radionuklidi nastali u atmosferi djelovanjem kozmičkog zračenja.

Ionizirajuće kozmičko zračenje je zračenje koje prožima cijeli svemir i zapljuskuje Zemlju iz svih smjerova. Glavni izvor kozmičkog zračenja smatraju se eksplozije zvijezda (supernove) te drugi nuklearni procesi u zvijezdama. Ionizirajuće kozmičko zračenje sastoji se od sunčeve komponente (koja se periodično mijenja kao i Sunčeva aktivnost) te galaktičke komponente koja dominira. Možemo ga podijeliti na primarno i sekundarno.

Primarno kozmičko zračenje je zračenje koje dolazi iz svemira, a čine ga 98% jezgre atoma i samo 2% elektroni. Oko 87% jezgara su protoni (jezgre vodika), 12% alfa čestice (jezgre helija) te 1% jezgre teških elemenata (od litija do uranija). Od tih primarnih čestica, u Zemljinu atmosferu prodiru neutroni, fotoni i neke naelektrizirane čestice koje nije zakrenulo Zemljino magnetsko polje. U atmosferi se čestice primarnog kozmičkog zračenja sudaraju sa jezgrama dušika, kisika i ostalim atomima Zemljine atmosfere, zračenje tada gubi energiju te dolazi do stvaranja novih čestica ionizirajućeg zračenja, tj. pljuskovi čestica. Međudjelovanje tih primarnih čestica s atmosferom Zemlje stvara sekundarno kozmičko zračenje. U sekundarnom kozmičkom zračenju također se pojavljuje i  $\gamma$ -zračenje vrlo visokih energija. [2.b.]



**Slika 1.** Ilustracija stvaranja sekundarnih čestica u atmosferi [1]

*Oznake: Pioni ( $\pi^+$ ,  $\pi^-$ ,  $\pi^0$ ), mioni ( $\mu^+$ ,  $\mu^-$ ), pozitron ( $e^+$ ), elektron ( $e^-$ ), gamma zračenje ( $\gamma$ ), alfa zračenje ( $\alpha$ ), kaoni ( $k$ ), neutroni ( $n$ ), neutrino ( $\nu$ )*

Na slici 1. možemo vidjeti ilustraciju prodiranja primarnih čestica u atmosferu te stvaranje sekundarnih u ovisnosti o visini. Kada čestice dođu do tla možemo iz podijeliti na tri komponente: elektromagnetska, hadronska i mezenska. Elektromagnetska komponenta je najmanja, a ostale dvije iako oslabljene prikazuju prodor čestica.

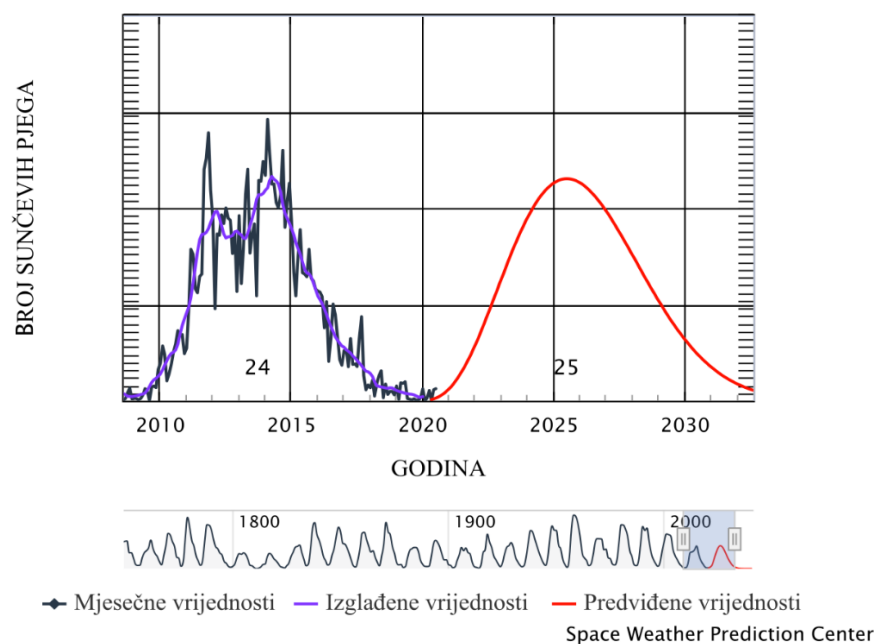
## 1.4. Prirodna zaštita od ionizirajućeg kozmičkog zračenja

### 1.4.1. Sunčeva aktivnost

U toku svoje aktivnosti Sunce ozračuje Zemlju fotonima i česticama vrlo visokih energija. Sunčeva komponenta kozmičkog zračenja mnogo je slabija od galaktičke komponente te se mijenja periodično kao i Sunčeva aktivnost. Osim što nas zrači, Sunce nam služi kao i štit od jakog galaktičkog kozmičkog zračenja, pogotovo u periodu Sunčevog maksimuma koje ćemo kasnije detaljnije objasniti.

#### 1.4.1.1. Magnetsko polje Sunca i Sunčev ciklus

Sunce ima promjenjivo magnetsko polje koje izaziva mnoge Sunčeve aktivnosti. Sunčevom magnetskom polju se polovi mijenjaju za vrijeme Sunčevog maksimuma u prosjeku svakih 11 godina. Taj proces naziva se Sunčev ciklus. Zadnji Sunčev maksimum bio je 2014. i sljedeći se očekuje 2025. Godine 2019. započeo je Sunčev minimum u kojemu se trenutno nalazimo i završavamo 24 Sunčev ciklus.



**Graf 2.** ISES proces napredovanja broja Sunčevih pjega u 24-om Sunčevom ciklusu [4]

Najpoznatiji i najveći solarni minimumi su: Maunderov i Daltonov minimum. Maunderov solarni minimum koji je trajao od 1645. – 1715. godine preklapao se sa malim ledenim dobom (od 13. stoljeća do sredine 19. stoljeća) što je dodatno dovelo do sniženja temperature na površini Zemlje. Ukoliko se u današnje vrijeme dogodi novi 'veliki solarni minimum' i potraje godinama, globalne temperature bi i dalje rasle. Globalno zagrijavanje

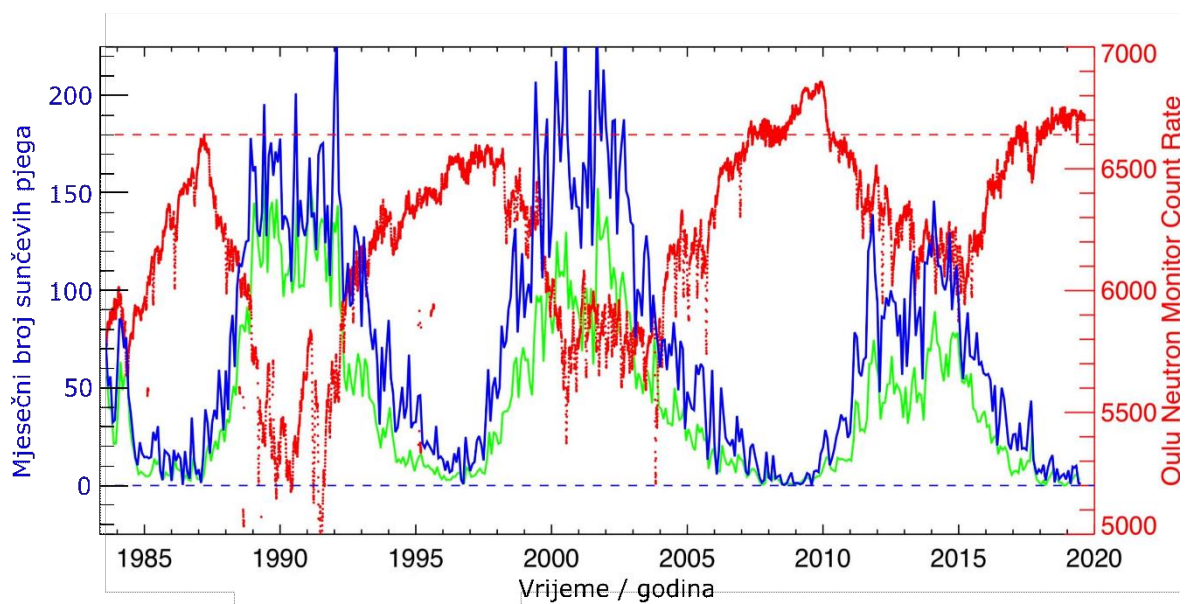
uzrokovano emisijama stakleničkih plinova izgaranjem fosilnih goriva šest puta je veće od mogućeg desetljetnog hlađenja velikog solarnog minimuma.

Tijekom solarnog minimuma smanjuje se broj Sunčevih pjega, Sunčevo magnetsko polje i aktivnosti Sunca slabe. Galaktičke kozmičke zrake tada lakše prodiru u Sunčev sustav i povećana je količina zračenja koja dolazi na Zemlju. Za razliku od minimuma u vrijeme solarnog maksimuma povećava se broj Sunčevih pjega, a Sunčevo zračenje (od ultraljubičastog zračenja prema rendgenskom zračenju) poraste za oko 0,07%. Također dolazi i do porasta broja različitih Sunčevih aktivnosti poput Sunčevog vjetera i učestalog pojavljivanja Sunčevih baklji. [4,5]

### 1.4.1.2. Solarni vjetar

Od brojnih Sunčevih aktivnosti valja spomenuti solarni vjetar i solarne baklje. Za vrijeme solarnog maksimuma povećava se brzina i gustoća Sunčevog vjetera. Sunčev vjetar je zapravo Sunčeva plazma koja se sastoji uglavnom od protona i elektrona koje neprestano emitira Sunce. Taj vjetar nosi i Sunčevo magnetsko polje kroz Sunčev sustav te u periodu Sunčevog maksimuma, zbog povećane količine Sunčeve plazme u Zemljinoj magnetosferi, količina galaktičkih kozmičkih zraka koja dolazi iz svemira je smanjena na površini Zemlje te nas Sunce u tom periodu štiti od galaktičkog kozmičkog zračenja.

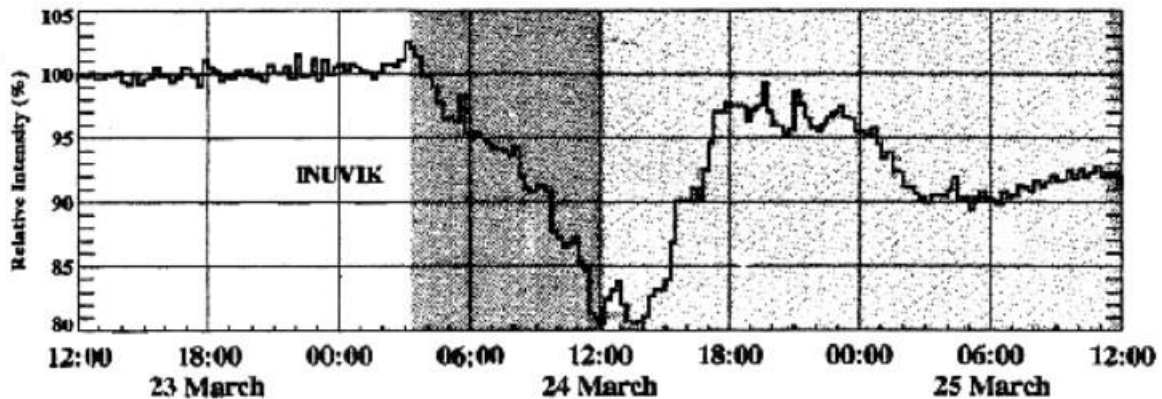
Dani graf pokazuje količinu galaktičkih kozmičkih zraka (neutronska komponenta) koje dođu na Zemlju u ovisnosti o Sunčevom ciklusu.



Graf 3. Oulu neutron monitor [6]



Tijekom 22. solarnog maksimuma, 24. ožujka 1991, Inuvik neutron monitor u Kanadi zabilježio je nagli pad galaktičkih kozmičkih zraka, kasnije nazvan Forbushov pad. Magnetska oluja na Suncu toga je dana spriječila mnoge kozmičke zrake iz svemira da uđu u Zemljinu atmosferu, no u roku par dana intenzitet kozmičkih zraka se vratio. [7]



Graf 4. Forbushov pad zabilježen Inuvik neutron monitor-om 24.ožujka 1991. [7]

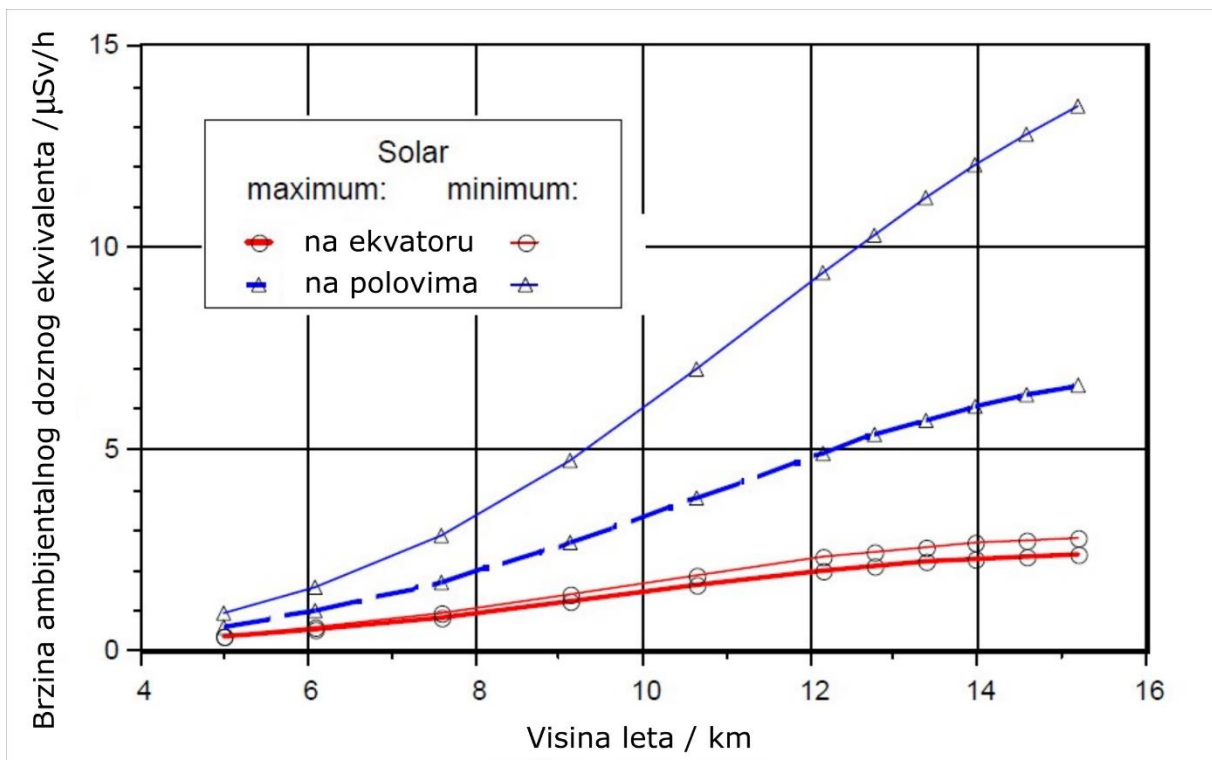
### 1.4.1.3. Solarna baklja

Za vrijeme Sunčevog maksimuma, galaktičko kozmičko zračenje se smanji za otprilike 20%. [8] No, kao što smo rekli, za vrijeme solarnog maksimuma povećava se i Sunčeva aktivnost tako da može doći i do iznenadnog velikog povećanja Sunčevog kozmičkog zračenja zbog velikih energetske eksplozija u Sunčevoj atmosferi – solarne baklje. Učestalost pojavljivanja Sunčevih baklji je različita, ali mnogo češće pojavljuju se male Sunčeve baklje koje obično nemaju dovoljno energije da doprinosu povećanju zračenja na zrakoplovnim visinama. Međutim, pri pojavi velikih baklji, čestice protona imaju dovoljno energije da prođu u Zemljinu magnetsko polje i uđu u atmosferu. U atmosferi te čestice, isto kao i galaktičke, su u međusobnom djelovanju sa atomima zraka tako da dolazi do povećane razine kozmičkog zračenja. Također zbog rendgenskog i ultraljubičastog zračenja koje emitiraju Sunčeve baklje dolazi do povećane ionizacije u gornjim slojevima Zemljine atmosfere koje može dovesti do ometanja radiokomunikacija, radara i ostalih uređaja.

### 1.4.2. Zemljino magnetsko polje – geografska širina

Prije nego li kozmičke zrake uđu u atmosferu, Zemljino magnetsko polje skreće jedan dio kozmičkih zraka tako da količina kozmičkih zraka ovisi uvelike i o zemljopisnoj širini, dužini i kutu azimuta. [9] U blizini ekvatora geomagnetsko polje je gotovo paralelno sa Zemljinom površinom te se upadne čestice s impulsom po jedinici naboja (magnetic rigidity) manjim od  $\sim 15$  GV odbijaju natrag u svemir. U blizini magnetskih polova magnetsko je polje gotovo okomito te *vertical cut-off* se približava nuli te maksimalni broj kozmičkih zraka ulazi u atmosferu. Kao rezultat, razina kozmičkog zračenja veća je u polarnim područjima i opada prema ekvatoru, ovisno i o nadmorskoj visini i o solarnom ciklusu. [8]

Primjer tome, na nadmorskim visinama na kojima leti većina komercijalni zrakoplova (od 10-15 km), za vrijeme solarnog minimuma, razina kozmičkog zračenja je 2,5 do 5 puta intenzivnija u polarnim regijama nego u blizini ekvatora. [22]



**Graf 5.** Prikaz razlike brzine amijentalnog doznog ekvivalenta na polovima i ekvatoru za vrijeme solarnog minimuma i maksimuma [22]

### 1.4.2.1. Magnetosfera i Van Allenovi pojasi

Magnetosfera je područje oko planeta u kojem je magnetsko polje vretenasto oblikovano jer se javlja kao posljedica interakcije sa Sunčevim vjetrom. Uz Zemlju i drugi planeti imaju vlastitu magnetosferu poput Merkura, Saturna, Urana, Neptuna, Jupitera te i Jupiterov mjesec Ganimed ima vlastitu malu magnetosferu. Mars i Venera nasuprot ostalih planeta našeg sustava, imaju vrlo slabo magnetsko polje te nemaju vlastitu magnetosferu.

Zemljina magnetosfera počinje oko 1000 km iznad Zemljina tla. Završava magnetopauzom koju u smjeru Sunca (dnevna strana) ograničuje čeonu udarni val na udaljenosti ~8-12  $R_z$  (Zemljinih polumjera,  $1 R_z = 6371$  km). Zbog tlaka Sunčevog vjetra, na dnevnoj strani je komprimirana, dok je na noćnoj razvučena u magnetski rep. [10]

U Zemljinoj magnetosferi se nalaze i Van Allenovi pojasi zračenja koje je 1958. godine otkrio američki fizičar James Van Allen. On je pomoću Geigerovih brojača, postavljeni na umjetnim satelitima Explorer 1 i Explorer 3, otkrio dva pojasa pojačanog radioaktivnog zračenja koji okružuju Zemlju i štite ju od opasne Sunčeve radijacije tako što od nje formiraju pojase.

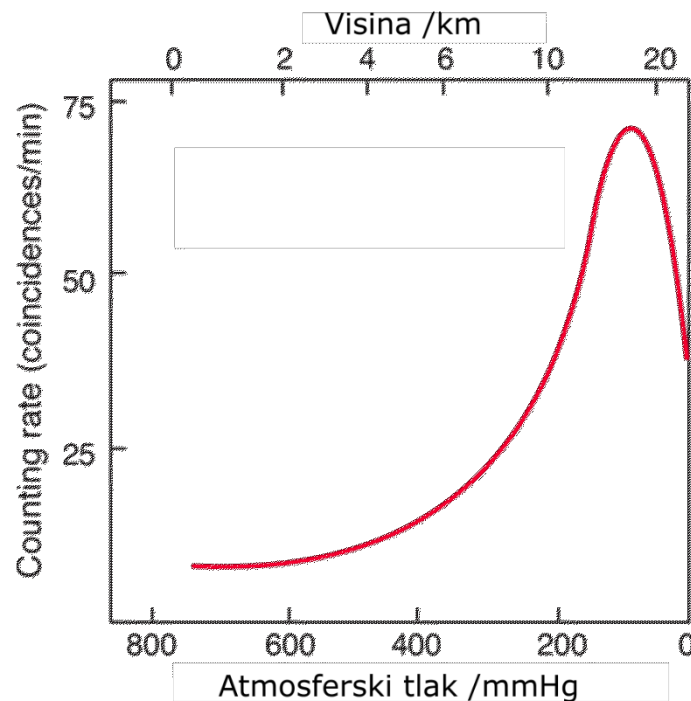
Razlikujemo unutarnji i vanjski Van Allenov pojas. Unutarnji pojas nalazi se na visini od 1 000 do 12 000 km te pretežito sadrži protone i elektrone, dok se vanjski pojas nalazi na visini od 13 000 do 60 000 km iznad Zemljine površine i sadrži visokoenergetske elektrone. Ti pojasevi sadrže i manju količinu alfa-čestica, a kod pojačane Sunčeve aktivnosti, u pojasevima se povećava energija čestica i nastaju geomagnetske oluje. Također, 2013. godine, NASA je izjavila da je sonda Van Allenovog istraživanja detektirala novi, treći privremeni radijacijski pojas oko Zemlje. Taj privremeni pojas zračenja trajao je samo četiri tjedna dok ga nije uništio snažni udarni val sa Sunca. [11]

Iako nas Van Allenovi pojasevi na Zemlji štite od Sunčevog zračenja, oni su vrlo opasni za astronaute koji su izloženi jakom zračenju pri prolasku kroz njih. Energije koje imaju brzi elektroni i  $\alpha$ -čestice u Van Allenovom pojasu opasna je za ljudsko zdravlje. Npr. Pri letu Apolla 11 za 195 sati leta astronauti su primili oko 4 mSv, što daje prosječnu ekvivalentnu dozu od ~20  $\mu$ Sv/h. [2.c]

### 1.4.3. Zemljina atmosfera – geografska visina

Zemljina atmosfera štiti život na Zemlji od opasnog kozmičkog zračenja. U atmosferi imamo kombinaciju primarnih i sekundarnih čestica kozmičkog zračenja. Kozmičke zrake kontinuirani su izvor visokoenergetskih protona, alfa-čestica i teških iona koji međudjeluju sa atomima i česticama Zemljine atmosfere, stvarajući sekundarne čestice neutrona, piona, elektrona i miona. Intenzitet ovih sekundarnih čestica postupno se povećava kako se povećava atmosferska gustoća, tj. zračenje se povećava s nadmorskom visinom za otprilike 15% svakih 600 m, s time da na visini od oko 20 km doseže svoj maksimum, tzv. Regener-Pfotzerov maksimum.

Iako zračenje uvelike ovisi i o Sunčevom ciklusu i geografskoj širini, kozmičko zračenje značajno je oslabljeno apsorpcijom u atmosferi tako da do Zemljine nulte nadmorske visine uglavnom dopijevaju samo mioni i vrlo malo nukleona izuzetno visokih energija, dok to nije slučaj na zrakoplovnim visinama. Primjer tome možemo spomenuti samo podatak da na nultoj nadmorskoj visini prosječna ekvivalentna doza zračenja je oko  $0,06 \mu\text{Sv/h}$ , a na oko 10 000 m, visini krstarenja komercijalnih zrakoplova poput Airbusa ili Boeinga, ekvivalentna doza zračenja je oko 100 puta veća, tj.  $\sim 6 \mu\text{Sv/h}$ . [1,15]



Graf 6. Regener-Pfotzerov maksimum [22]

## 2. Mjerenje kozmičkog zračenja u avijaciji i dopuštene doze

### 2.1. Mjerenje ionizirajućeg kozmičkog zračenja

Mjerenje doze zračenja i njezina posljedica u tvari zove se *dozimetrija*. Zračenje predaje ozračenoj tvari energiju koja uzrokuje niz pojava u tvari i mijenja svojstva tvari. [20]

Ekvivalentna doza ili dozni ekvivalent,  $H$  je dozimetrijska veličina koja opisuje biološki učinak određenog ionizirajućeg zračenja u tkivu. Mjerna jedinica ekvivalentne doze je sivert ( $Sv=J/kg$ ), a određena je kao umnožak apsorbirane doze  $D$  i faktora kvalitete zračenja  $Q$  :

$$H = Q \cdot D$$

Apsorbirana doza zračenja  $D$  (grej;  $Gy=J/kg$ ) je količina energije zračenja koju apsorbira tvar na koju zračenje djeluje. Definirana je kao omjer predane energije  $E_p$  i mase  $m$  ozračenog tijela.

$$D = \frac{\Delta E_p}{\Delta m}$$

Apsorbirana doza zračenja se mjeri instrumentom – dozimetrom, no učinak zračenja u tvari ovisi i o vrsti zračenja i o tvari, ne samo o predanoj energiji. Da bi se procijenio potpuni učinak zračenja tada se apsorbirana doza množi s faktorom kvalitete zračenja  $Q$  koji ovisi o linearnom prijenosu energije pojedinih vrsta zraka. [21]

U tablici koja slijedi navedena su pojedina zračenja i njihov faktor kvalitete  $Q$ :

<i>Zračenje</i>	<i>Faktor kvalitete Q</i>
rengensko i $\gamma$ -zračenje	1
$\beta$ -zračenje	1 – 2
neutronske zračenje	3 – 10
protonsko i $\alpha$ -zračenje	10
teškoionsko zračenje	20

**Tablica 2.** Faktor kvalitete zračenja za biološki učinak [2]

Efektivna ekvivalentna doza  $H_E$  ili samo efektivna doza ( $E$ ) je doza zračenja za cijelo tijelo. To je zbroj svih ekvivalentnih doza  $H_i$  u pojedinim dijelovima tijela (organa i tkiva) pomnožena s težinskim faktorom ozračivanja  $W_i$  za pojedino tkivo. [21]

$$H_E = \sum_i W_i H_i$$

Težinski faktor ozračivanja za pojedino tkivo  $i$  predstavlja udio štetnosti *stohastičkih\** učinaka u tkivu u odnosu na ozračeno cijelo tijelo. Vrijednosti težinskog faktora za pojedine dijelove tijela navedeni su u sljedećoj tablici.

Dio tijela	Težinski faktor ozračivanja $W$
cijelo tijelo	1
jajnik, testis	0,25
prsni koš	0,15
pluća	0,12
koštana srž	0,12
površina kostiju	0,03
štitna žlijezda	0,03
ostala tkiva	0,30

**Tablica 3.** Težinski faktor ozračivanja za pojedine dijelove tijela [2,24]

Dobivene dozimetrijske veličine se stavljaju u omjer s vremenom ozračivanja, pa se takav omjer naziva *brzina* te veličine, a označuje se s točkom iznad znaka te veličine. Tako je  $\dot{D}$  brzina apsorbirane doze,  $\dot{H}$  brzina ekvivalentne doze ili  $\dot{H}_E$  brzina efektivne ekvivalentne doze.

Također zaštitne dozimetrijske veličine (ekvivalentna doza i efektivna doza) ne mogu se direktno mjeriti pa se zbog toga prema ICRU koriste operativne veličine za nadzor prostora i osobni nadzor.

---

\*Stohastički učinci (eng. *Stochastic* – koji se ne može predvidjeti) posljedica su oštećenja normalnih stanica ionizirajućim zračenjima. Težina oštećenja je jednaka kod svih doza. Posljedice: maligni tumori, genetske promjene. [24]

Za nadzor prostora mjerne veličine su:  $H^*(10)$  – ambijentalni dozni ekvivalent, te  $H'(0,07)$  – dozni ekvivalent smjera. Ti dozni ekvivalenti definirani su kao dozni elementi na dubinama 10 mm i 0,07 mm sfere polumjera 30 cm sačinjene od ICRU četveroelementnog tkiva.

$H^*(10)$  – *ambijentalni dozni ekvivalent* je izotropna veličina čija vrijednost ne ovisi o smjeru raspodjele polja zračenja u promatranoj točki. Povezana je s veličinom efektivnom dozom, te se koristi za buduće procjene, provjeru učinkovitosti debljine zaštite, kategorizaciju radnog prostora i slično.

$H'(0,07)$  – *dozni ekvivalent smjera* koristi se za nadzor prostora pri određivanju doze za kožu i ostala površinska tkiva.

Za osobni nadzor koristi se  $H_p(10)$  – za određivanje efektivne doze,  $H_p(3)$  – za određivanje ekvivalentne doze na očnu leću, te  $H_p(0,07)$  – za određivanje lokalne doze na kožu od fotona ili elektrona. Osobni dozni ekvivalenti također su definirani za četveroelementno ICRU tkivo na dubinama od 10 mm, 3 mm i 0,07 mm. [21]

## 2.2. Dopuštene godišnje doze

Trenutna svemirska prognoza, eng. *space weather*, snažno može utjecati na količinu zračenja na zrakoplovnim visinama. Količina izlaganja zrakoplovne posade i putnika obavezan je zadatak i zakonska obaveza godinama u Europskoj uniji i ostatku svijeta. ICRP (eng. *International Commission on Radiological Protection*) je 1991. godine iznijela činjenicu da se članovi letачke posade u putničkom zračnom prometu trebaju smatrati kao radnici stalno izloženi ionizirajućem zračenju. Nekoliko godina kasnije, 1994. FAA (eng. *Federal Aviation Administration*) Sjedinjenih Američkih Država prepoznao je da je posada zrakoplovnih prijevoznika profesionalno izložena ionizirajućem zračenju, te preporučuje da sva posada bude obaviještena o izloženosti zračenju i informirani o mogućim zdravstvenim rizicima. FAA preporučuje ograničenja za članove posade: u petogodišnjem prosjeku efektivna doza člana posade ne smije prijeći 20 mSv/godišnje i ne smije biti viša od 50 mSv u jednoj godini. Za trudnu članicu zrakoplovnog osoblja preporučena maksimalna efektivna doza je 1 mSv u godini dana, s time da u mjesec dana ne smije biti viša od 0,5 mSv. [1]

Zaštita od zračenja zrakoplovne posade regulirana je u Europskoj uniji od 1996. godine. Države članice Europske unije zahtijevaju procjenu izloženosti zrakoplovnog osoblja kada je vjerojatno da će efektivna ekvivalentna doza biti veća od 1 mSv/godišnje te prilagodbu rasporeda

rada tako da nijedan pojedinac ne prelazi dozu od 6 mSv/godišnje. Europska komisija preporučuje upotrebe odgovarajućih računalnih programa za procjene doza, no također da se i ti računalni kodovi potvrde i provjere povremenim mjerenjima aktivnim ili pasivnim uređajima. [19,22]

## 2.3. Načini mjerenje kozmičkog zračenja na zrakoplovnim visinama

### 2.3.1. Uređaji i programi za mjerenje zračenja

Osim razvijenih računalnih programa, zračenje prilikom leta zrakoplovom može se mjeriti aktivno ili pasivno. Većina detektora precizno mjeri samo jednu vrstu zračenja te su obično ograničenog raspona energije. Aktivni instrumenti prikazuju odgovarajuće vrijednosti odmah ili nakon kratkog događaja, dok je pasivne instrumente potrebno obraditi u laboratoriju poslije leta. Aktivna dozimetrija se bazira na Geiger-Müllerovim brojačima (gama-zračenje), ionizacijska komora (gama-zračenje), moderni brojači borovog trifluida (neutroni), scintilacijski brojači (gama-zračenje ili neutroni), TEPC (mješovito zračenje) i dr. Prednost pasivnih dozimetra je što su mali, lagani i cijenom dostupniji. Međutim, mnogo su manje osjetljiviji u usporedbi s aktivnim dozimetrima. TLD dozimetri (termoluminiscentni dozimetari) reagiraju na rendgensko i gama-zračenje, te na elektrone, protone, mione itd. TLD dozimetre koriste radnici u nuklearnim industrijama te liječnici i osoblje u medicini. Neutronska komponenta može se izmjeriti pomoću PADC (Polyallyl Diglycol Carbonate) dozimetra.



**Slika 2.** Kutija NRPB sa pasivnim i dva elektronička dozimetra koji su bili upotrebljavani prilikom leta zrakoplova Concorde [22]



Zbog visine letenja preko 18 000 m i udaljenih prekooceanskih letova, supersonični Concorde je bio jedini komercijalni zrakoplov koji je bio opremljen dozimetrima koji su mjerili doze zračenja prilikom svakog leta. Često se predlaže da bi i članovi subsoničnih zrakoplova trebali nositi pojedinačne osobne dozimetre (filmske dozimetre), međutim nakon mnogo istraživanja i projekata zaključeno je da nemaju opravdan razlog to i provesti. Naime tijekom nekih eksperimenata pojedini članovi posade nisu nosili osobne dozimetre, neki su ih izgubili ili su zaprimili dodatno rendgensko zračenje tijekom provjere sigurnosti prtljage. [1,22]

### **2.3.1.1. TEPC**

Iako nije baždaren za cijeli energijski spektar, najvjerodostojniji instrument za mjerenje kozmičkog zračenja je proporcionalni brojač ekvivalentnog tkiva TEPC (eng. tissue equivalent proportional counter). TEPC ne pruža samo ukupnu ekvivalentnu dozu, nego i mikrodimenzijsku raspodjelu zračenja u funkciji linearne energije kojom se može dobiti linearni prijenos energije za spektar kozmičkog zračenja. Naime, interakcija ionizirajućeg zračenja s tkivom stvara određeni broj ionskih parova. Ta interakcija je tzv. linearni prijenos energije (LET) i označava količinu energije ionizirajućeg zračenja koja se apsorbira po jedinici prijednog puta. Neutronske, protonske i  $\alpha$ -zračenja spadaju u zračenja visokog LET-a, dok  $\beta$ ,  $\gamma$  i rendgensko zračenje u zračenja niskog LET-a. Linearni prijenos energije potreban nam je za određivanje faktora kvalitete zračenja  $Q$  kako bi dalje dobili ekvivalentnu dozu zračenja. TEPC je napunjen plemenitim plinom koji će biti ioniziran kada čestica uđe u brojač. Sastoji se od dvije glavne komponente, jedinice spektrometra i jedinice detektora. Jedinica za spektrometar sadrži snažno računalo koje omogućuje analizu podataka u stvarnom vremenu i izračune. Detektorska jedinica pričvršćena je izravno na višekanalni analizator u spektrometru. Na TEPC se mogu priključiti detektori različitih veličina, ovisno o željenom mjerenju. Izmjereni podaci o zračenju pohranjuju se u jedinici spektrometra za kasniju analizu ili se mogu prenijeti glavnom računalu. [22,26]

### **2.3.1.2. CARI-7**

Posljednja inačica CARI-7A i CARI-7 zamjenjuju CARI-6, -6M, -6P, -6PM, C6 i -6W. Taj računalni program razvijen je na Civilnom svemirskom medicinskom institutu FAA. Program izračunava efektivnu dozu ionizirajućeg kozmičkog zračenja koju je pojedinac primio tijekom leta zrakoplovom. Također mogu se izračunati i pojedine doze čestica za putovanje ili na određenim mjestima. Maksimalna nadmorska visina na kojoj se mogu izračunati podaci je

oko 90 000 m. Kao i prethodne verzije CARI programa, program uzima u obzir promjene nadmorske visine i zemljopisni položaja tijekom leta, na temelju podataka koje je pružio korisnik. Za mjesečne prosječne izračune koriste se baze podataka kako bi se izračunali učinci promjena zemaljskog magnetskog polja i sunčeve aktivnosti na količinu galaktičkog zračenja u atmosferi.

CARI-7A se razlikuje od CARI-7 po tome što je namijenjen korisnicima koji su usmjereni na istraživanja jer program sadrži više mogućnosti poput višestrukih kozmičkih modela i modela solarnih događaja, aproksimaciju superpozicije, ne vertikalne granične vrijednosti, aproksimacija prijenosa čestica nalik snopu i slično. Program zahtjeva održavanje većeg broja datoteka kako bi se podaci dodatnih modeli održali aktualnima. [27]

### **2.3.1.3. EPCARD.Net**

EPCARD.Net (eng. *European Program Package for the Calculation of Aviation Route Doses*) je softver razvijen od strane znanstvenika na Institutu zaštite od zračenja Helmholtz Zentrum u Münchenu. Potvrdio ga je Njemački nacionalni mjeriteljski institut (PTB), a zatim je odobren od strane Njemačkog saveznog zrakoplovstva (LBA) za službenu uporabu u dozimetriji zrakoplovnih snaga. To je objektno-orijentiran program koji izračunava efektivnu dozu kozmičkog zračenja koje su pojedinci primili bilo kojom zrakoplovnom rutom na visinama leta između 5 000 m i 25 000 m. EPCARD.Net se temelji na rezultatima opsežnih proračuna dobivenim Monte Carlo metodom (FLUKA kod) uzimajući u obzir sve procese interakcije kozmičkog zračenja sa Zemljinom atmosferom. Koristi NASA-in model (Badhwar\*) primarnog kozmičkog zračenja od vrha atmosfere, spektra sekundarnih čestica neutrona, protona, fotona, elektrona i pozitrona, miona i piona, sve do razine mora. Izračunati su rezultati za sve vrste okolnosti sunčeve aktivnosti i geomagnetskih uvjeta zaštite. Da bi uzeli u obzir najnovije podatke geomagnetske zaštite, EPCARD.Net koristi podatke od MAGNETOCOSMICS koda kojeg je razvila 'Cosmic Ray skupina' na sveučilištu u Bernu. Program je besplatno dostupan za sve na internet stranici (<https://www1.helmholtz-muenchen.de/epcard/online/fluginput.php?lang=en>), a funkcionira tako da osoba mora unijeti podatke o letu: od datuma i broja leta, polazne zračne luke, podatke koliko je vremenski zrakoplov bio na pojedinoj visini i zračnu luku odredišta. Što je više podataka prikupljeno vezano za visinu na kojoj se je zrakoplov nalazio i koliko dugo, dobiveni rezultat efektivne doze zračenja bit će točniji. [28]

### 2.3.1.4. SIEVERT

Postoje mnogi programi koji su u upotrebi za računanje doze zračenja u avijaciji. Još jedan koji ćemo spomenuti je SIEVERT računalni sustav za procjenu izloženosti kozmičkom zračenju tijekom zračnog prijevoza koje je razvio Francuski odjel za civilno zrakoplovstvo (DGAC) i njegovi partneri: Institut za radiološku zaštitu i nuklearnu sigurnost (IRSN), Pariški opservatorij i Francuski institut za polarna istraživanja – Paul Emile Victor (IFRTP). U IRSN institutu nalazi se SIEVERT sustav te su odgovorni za pružanje i redovito mjesečno provjeravanje dozimetrijskih podataka kozmičkog zračenja. Svaki mjesec IRSN također vrši novo mapiranje doza zračenja i uključuje solarne aktivnosti. To mapiranje dobivaju iz računalnog koda CARI-6 sustava. Redovita mjerenja zračenja provode se s dozimetrima instaliranim na tlu i u zrakoplovima tako da se dobivene vrijednosti mogu usporediti i potvrditi ili ispraviti. SIEVERT je alat dostupan na internet serveru (<https://www.sievert-system.org/?locale=en#Calcul>). Posvećen je dozimetriji zrakoplovnog osoblja, no svaki putnik također mu može pristupiti kako bi izračunali efektivnu dozu zračenja koju su primili tijekom leta. Sustav izračunava dozu pomoću parametara leta. Također, što su detaljniji podaci o letu, točniji će biti i izračun efektivne doze. Ako su informacije o letu minimalne, vrijednost efektivne doze procjenjivat će se iz baze podataka standardnih profila leta. [29,30]

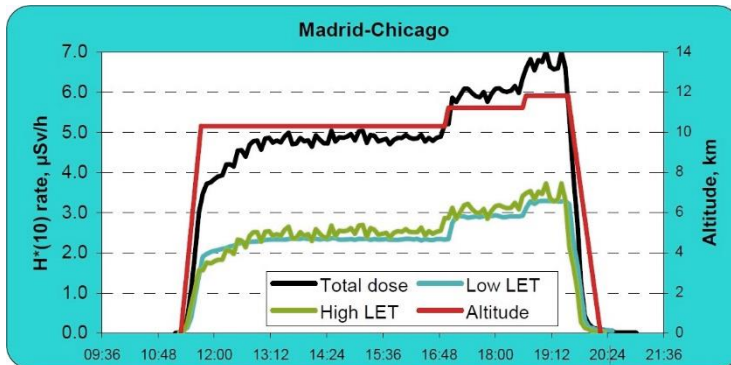
### 3. Mjerenja na IBERIA letovima

U ovome istraživanju koje je provedeno na letovima IBERIA airlines - španjolske aviokompanije, koristili su se uređaji za detekciju zračenja: TEPC, te ne-neutronske RS131 i neutronske SWENDI2. Svaki instrument bilježio je cijeli let u razmacima od 5 minuta, osim TEPC-a koji je automatski bilježio podatke svake minute. Geografski podaci (zemljopisna širina, dužina i nadmorska visina) na određenoj ruti, automatski su se dobivali iz GPS koji je ugrađen u TEPC-u. Nakon svakog leta, svi se podaci prenose na računalo i rezultati se obrađuju. Geografski podaci koji su zabilježeni o letu unosili su se kasnije u CARI-6 i EPCARD 3.2 sustav kako bi usporedili rezultate dobivene dozimetrima i računalnim programima.

Iz rezultata brzine doze dobivenih na instrumentima, izračunavalo se sljedeće:

1. Doza putovanja (od polijetanja do slijetanja)
2. Prosječna brzina doze tijekom leta (doza putovanja podijeljena s trajanjem leta)
3. Godišnja doza (E – ekvivalentna doza i  $H^*(10)$  – ambijentalni dozni ekvivalent) uzimajući u obzir 800 sati letenja godišnje (od polijetanja do slijetanja)

Na sljedećim grafovima i tablicama prikazana su mjerenja objavljena od strane Europske komisije za IBERIA airlines destinacije: Chicago, Havana i Santiago de Chile. [23]



**Graf 7.** Ovisnost  $H^*(10)$  brzine o visini leta **Madrid – Chicago**

Datum polaska: 22-11-2002

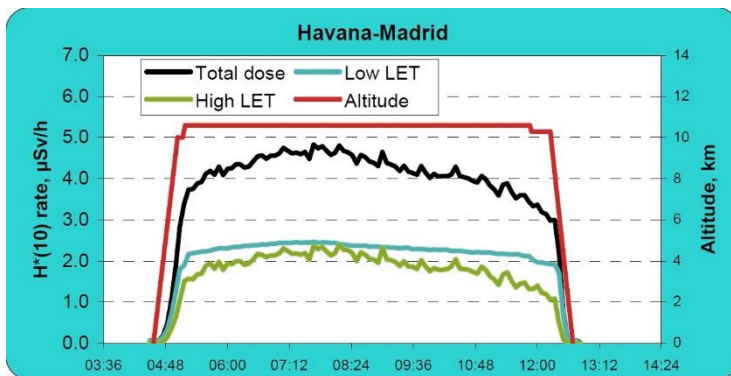
Model zrakoplova: A340

Trajanje leta (h): 8,97 h

Srednja nadmorska visina (km): 10,7 km

	Doza putovanja $\mu\text{Sv}$	Prosječna brzina doze $\mu\text{Sv/h}$	Godišnja doza* $\text{mSv}$
CARI-6, E	37,9	4,23	3,38
EPCARD 3.2, E	43,3	4,82	3,86
EPCARD 3.2, $H^*(10)$	36,7	4,09	3,27
TEPC, $H^*(10)$	43,3	4,83	3,86
RS131+SWENDI2, $H^*(10)$	41,9	4,67	3,74

**Tablica 4.** Dobivena mjerenja iz leta Madrid-Chicago grafa 7. [23]



**Graf 8.** Ovisnost  $H^*(10)$  brzine o visini leta **Havana – Madrid**

Datum polaska: 21-03-2002

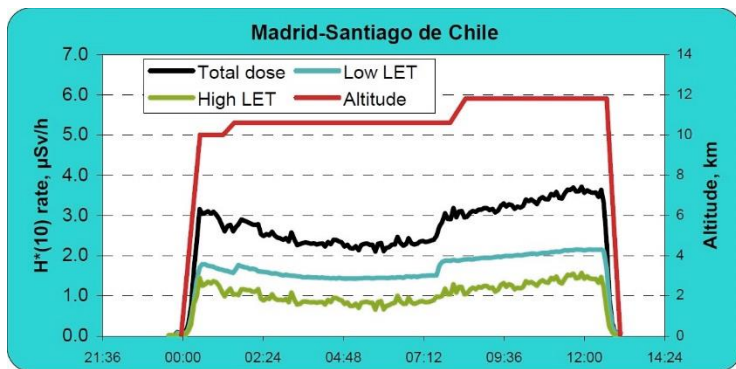
Model zrakoplova: B747

Trajanje leta (h): 8,12 h

Srednja nadmorska visina (km): 10,6 km

	Doza putovanja $\mu\text{Sv}$	Prosječna brzina doze $\mu\text{Sv/h}$	Godišnja doza* $\text{mSv}$
CARI-6, E	28,2	3,47	2,78
EPCARD 3.2, E	31,6	3,89	3,11
EPCARD 3.2, $H^*(10)$	27,2	3,35	2,68
TEPC, $H^*(10)$	29,1	3,58	2,87
RS131+SWENDI2, $H^*(10)$	30,5	3,76	3,01

**Tablica 5.** Dobivena mjerenja iz leta Havana – Madrid grafa 8. [23]



**Graf 9.** Ovisnost  $H^*(10)$  brzine o visini Madrid – Santiago de Chile

Datum polaska: 13-03-2001

Model zrakoplova: A340

Trajanje leta (h): 13,12 h

Srednja nadmorska visina (km): 11,0 km

	Doza putovanja $\mu\text{Sv}$	Prosječna brzina doze $\mu\text{Sv/h}$	Godišnja doza* $\text{mSv}$
CARI-6, E	34,4	2,62	2,10
EPCARD 3.2, E	27,5	2,10	1,68
EPCARD 3.2, $H^*(10)$	24,9	1,90	1,52
TEPC, $H^*(10)$	28,3	2,16	1,73
RS131+SWENDI2, $H^*(10)$	34,9	2,66	2,13

**Tablica 6.** Dobivena mjerenja iz leta Madrid – Santiago de Chile grafa 9. [23]

Dobivena mjerenja pokazuju utjecaj nadmorske visine i širine na brzinu doze. Također može se primjetiti kako se neutronska komponenta (high-LET) povećava u ovisnosti o geografskoj širini više od ne-neutronske (low-LET). U španjolskim propisima je dopuštena uporaba računalnih programa poput CARI-6 ili EPCARD 3.2, kako bi se izračunala doza zračenja koju su primili članovi zrakoplovne posade. No, kako i Europska komisija predlaže, španjolski propisi također iznose potrebu kontinuirane provjere izračuna računalnih programa sa eksperimentalnim mjerenjima. Prema trenutnim zahtjevima za točnost, omjer 'izračunate vrijednosti iz koda' i 'izmjerena vrijednost referentnim instrumentom' mora biti unutar  $1,0 \pm 0,3$ , tj razina pouzdanosti mora biti od oko 95%. EPCARD 3.2 daje procjenu doze u obliku  $H^*(10)$  što omogućuje izravnu usporedbu s eksperimentalnim rezultatima. Budući da CARI-6 daje rezultate u obliku efektivne doze E, potrebno je pretvoriti mjerenja iz  $H^*(10)$  u E. U tu svrhu, omjer za svaki let  $E / H^*(10)$  izračunat je EPCARD 3.2 i primjenjuje se na odgovarajuću eksperimentalnu procjenu ukupnog  $H^*(10)$ . Dobivene efektivne doze oba računalna koda i eksperimentalnih mjerenja instrumentima ispunjava kriterije pouzdanosti, sa time da najbolje rezultate ovog istraživanja ima EPCARD 3.2 u odnosu na TEPC sustav. [23]

## 4. Biološki utjecaj ionizirajućeg zračenja

Kada je unutarnje ili vanjsko ionizirajuće zračenje apsorbirano u našem tijelu, dolazi do biološkog učinka. Primarno nastaju fizikalni učinci ionizacije i ekscitacije, a zatim dolazi do sekundarnih kemijskih reakcija zbog kojih u tkivima nastaju cijeli lanci zamršenih promjena. Te fizikalno-kemijski procesi zapravo dovode do bioloških učinaka: stanica pokazuje izmijenjeno biološko ponašanje ili više uopće nije kadra obavljati svoju funkciju i dolazi do smrti stanice. Prema ICRP biološki učinci podijeljeni su u dvije grupe: deterministički (nestohastički) i probabilistički (stohastički).

Kod determinističkih učinaka postoji prag doze za svaki učinak, dok kod stohastičkih nema praga doze i težina oštećenja je jednaka kod svih doza (iako se smatra da je vjerojatnost za njihovu pojavu vrlo mala u stanicama kod niskih doza). Stohastički učinci temelje se na promjenama na kromosomima te se pojavljuju dugo nakon ekspozicije (npr. maligni tumori, genetska oštećenja). Deterministički učinci temelje se uglavnom na ubijanju stanica tkiva i pojavljuju se u kratkom vremenu nakon ekspozicije (npr. sterilitet, razvoj očne mrežnice). [24]

Valja spomenuti da isto zračenje također ne uzrokuje kod svih stanica isto djelovanje. Naime, osjetljivost određene vrste tkiva na zračenje ovisi o diobi stanice u tom tkivu. Diferencirane stanice koje tvore mišićno, živčano i koštano tkivo, vrlo se rijetko dijele pa su slabo osjetljive na zračenje. Suprotno njima, nediferencirane stanice koje se neprestano dijele, mnogo su osjetljivije na izloženost zračenju (stanice kože, očne leće, koštana srž, sluznica, embrij, jajne i sjemene stanice i dr.). Zbog toga što izloženost zračenju nije isti za sve dijelove ljudskog tijela, uveden je težinski faktor ozračivanja za pojedine dijelove tijela, a kao mjera osjetljivosti upotrebljava se već spomenuta ekvivalentna doza.

### 4.1. Povećani rizik razvoja bolesti članova posade

Kao posljedica utjecaja ionizirajućeg kozmičkog zračenja, stanica može postati kancerogena. Vjerojatnost da se razvije karcinom ovisi o energiji i primljenoj dozi ionizirajućeg zračenja. Za primljenu ekvivalentnu dozu zračenja od 5 mSv/godišnje tijekom karijere od 20 godina (tipično predviđanje za *long-haul* člana posade), vjerojatnost nastanka karcinoma biti će 1 od 250 (~0,4%), a tijekom 30 godina karijere rizik se povećava na 1 od 170 (~0,6%). [31]

Tek začeto dijete u opasnost je od nasljeđivanja genetskih defekata od roditelja koji je prethodno bio izložen ionizirajućem zračenju. Ti defekti mogu imati oblik funkcionalne abnormalnosti očite pri rođenju ili kasnije u životu. Rizik od genetskih defekata za dijete za

primljenu dozu zračenja od 5 mSv/godišnje tijekom karijere od 20 godina biti će 1 od 2500 (~0,04%) , a za 30 godina karijere rizik se povećava na 1 od 1700 (~0,06%). Nadalje, postoji i istraživanje smrtnosti od karcinoma kod djece zbog roditeljskog izlaganja ionizirajućem zračenju tijekom trudnoće. Procjenjuje se da izlaganje fetusa kozmičkom zračenju na 80 sati leta u razdoblju od 4 tjedna povećava rizik od oboljenja i smrtnosti karcinoma djeteta između 1 od 6 000 i 1 od 30 000 (ovisno o rutama letenja). [31]

U sljedeća dva istraživanja koja su provedena na 28 000 (Blettner [32]) i 10 211 pilota (Pukkala [33]) dolazi se do rezultata povećanog oboljenja malignog melanoma i drugih oblika karcinoma kože. Blettnerovo istraživanje provedeno je u Danskoj, Finskoj, Njemačkoj, Velikoj Britaniji, Grčkoj, Islandu, Italiji, Norveškoj i Švedskoj. U istraživanju je uočen porast oboljenja malignim melanomom te zabilježeno 25 smrtnih slučajeva kokpit posade od istog. Iako prozor zrakoplova ima zaštitu od ultraljubičastog zračenja, postoji vjerojatnost da je izlaganje UV zračenju tijekom leta ili provođenja slobodnog vremena na otvorenom imalo utjecaj na razvoj melanoma i drugih bolesti kože. Svakako povezanost ionizirajućeg zračenja i karcinoma kože i dalje ostaje u raspravi te se zahtijevaju daljnja istraživanja po pitanju utjecaja ionizirajućeg i UV zračenja na kokpit posadu.

Također postoji i istraživanje raka dojke ženskog kabinskog osoblja, ali sva trenutna istraživanja i rezultati ukazuju da je vrlo nizak rizik oboljenja zrakoplovne posade i njihovih potomaka, no ne može se isključiti. Zbog ovih predviđanja i mogućnosti ugrožavanja zdravlja zrakoplovne posade, propisana su pravila i maksimalne doze izloženosti ionizirajućem zračenju, a Europska unija koristi i ALARA princip (as low as reasonably achievable) izlaganju zračenju kako bi smanjili izloženost koliko god je moguće.

## Zaključak

Svakodnevno smo izloženi raznim oblicima zračenja, te godišnje primimo ekvivalentnu dozu od oko 3,5 mSv. Od ukupne ekvivalentne doze 10% dolazi od kozmičkog zračenja iz svemira, no ti podaci nisu isti za sve. Prilikom leta zrakoplovom putnici i posada izloženi su povećanoj dozi ionizirajućeg kozmičkog zračenja čiji iznos ovisi o nadmorskoj visini, geografskoj širini, trajanju leta i Sunčevoj aktivnosti.

Za ionizirajuće zračenje ne postoji donja granica po kojoj se biološki učinci ne javljaju. Iako rezultati trenutnih istraživanja pokazuju da je vrlo niska vjerojatnost da će članovi zrakoplovne posade ili putnici trpjeti bilo kakve bolesti kao rezultat povećanoj izloženosti kozmičkom zračenju, ne mogu to sa sigurnošću i potvrditi. Kod svih nadležnih za regulaciju i mjerenje preporučene doze za profesionalno izložene zaposlenike prisutna je svijest o mogućoj opasnosti te potreba za provođenjem daljnjih istraživanja kako se zdravlje ljudi ne bi dovelo u rizik.

Kod nepredvidljivih situacija, poput iznenadne solarne baklje, rezultati mjerenja računalnim programima nisu više toliko precizni, te se u tim slučajevima unose nove informacije o Sunčevoj aktivnosti i ponavljaju izračuni. Eksperimentalni podaci koje je proveo EURADOS i iznijela Europska komisija pokazuju da su postojeći programi za procjenu izloženosti kozmičkom zračenju za članove posade i putnika u komercijalnim zrakoplovima u potpunosti zadovoljavajući i adekvatni.



## **Kazalo kratica**

DGAC	French civil aviation department (DGAC)
EURADOS	European Radiation Dosimetry Group
FAA	Federal Aviation Administration
FLUKA	FLUktuierende KAskade (Monte Carlo simulation package)
IRSN	Institute for Radiological Protection and Nuclear Safety (IRSN)
IFRTP	French Institute for Polar Research – Paul Emile Victor (IFRTP)
ICRP	International Commission on Radiological Protection
ICRU	International Commission on Radiation Units and Measurements
ISES	International Solar Energy Society
LBA	Luftfahrt-Bundesamt
LET	Linear Energy Transfer
PTB	The Physikalisch-Technische Bundesanstalt
NRPB	National Radiological Protection Board

## Literatura

- [1] Rad prof. Mihael Bragshaw i dr. Francis A Cucunotta: Fundamentals of aerospace medicine: Cosmic radiation (20. 7. 2020.)  
URL: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20070028831.pdf>
- [2] Zvonimir Jakobović, Ionizirajuće zračenje i čovjek ; Školska knjiga – Zagreb 1991  
2.a. str (10 – 14), 2.b. str (43 – 45), 2.c. str (85)
- [3] Nenad Bolf – Ionizirajuće zračenje, (20. 7. 2020.)  
URL: <http://silverstripe.fkit.hr/kui/assets/Uploads/Osvjezimo-znanje-331-332.pdf>
- [4] NOAA – Solarni ciklus  
URL: <https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression> (25. 7. 2020.)
- [5] NASA - Veliki solarni minimum: (25. 7. 2020.)  
URL: <https://climate.nasa.gov/blog/2953/there-is-no-impending-mini-ice-age/>
- [6] Oulu neutron monitor; URL: <http://cosmicrays oulu.fi/> (1. 8. 2020.)
- [7] Forbush-ov pad; URL: <http://neutronm.bartol.udel.edu/listen/main.html> (5. 8. 2020.)
- [8] Civil Aviation Authority- CAA- Izlaganje zrakoplovnog osoblja kozmičkom zračenju;  
<https://www.caa.co.uk/Our-work/About-us/Aircrew-exposure-to-cosmic-radiation/>  
(20. 7. 2020.)
- [9] Kozmičko zračenje; URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Cosmic\\_ray](https://en.wikipedia.org/wiki/Cosmic_ray) (20. 7. 2020.)
- [10] Magnetosfera; URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetosphere> (1. 8. 2020.)
- [11] Van Allenov pojas; URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Van\\_Allen\\_radiation\\_belt](https://en.wikipedia.org/wiki/Van_Allen_radiation_belt)  
(1. 8. 2020.)
- [12] Rendgensko zračenje, NASA:  
[https://www.nasa.gov/audience/forstudents/5-8/features/F\\_X\\_Rays.html](https://www.nasa.gov/audience/forstudents/5-8/features/F_X_Rays.html) (3. 8. 2020.)
- [13] Radioterapija, URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Radiation\\_therapy](https://en.wikipedia.org/wiki/Radiation_therapy) (4. 8. 2020.)
- [14] Gama zračenje, Wikipedija: [https://en.wikipedia.org/wiki/Gamma\\_ray](https://en.wikipedia.org/wiki/Gamma_ray) (4. 8. 2020.)
- [15] Istraživanje: Current Topics in Ionizing Radiation Research, Edited by Mitsuru Neno, National Institute of Radiological Sciences, Japan
- [16] Alfa-čestica, URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Alpha\\_particle](https://en.wikipedia.org/wiki/Alpha_particle) (4. 8. 2020.)
- [17] Neutronska zračenje  
URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Neutron\\_radiation](https://en.wikipedia.org/wiki/Neutron_radiation) (4. 8. 2020.)
- [18] Beta-čestice, URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Beta\\_particle](https://en.wikipedia.org/wiki/Beta_particle) (4. 8. 2020.)
- [19] Zakon o zaštiti od ionizirajućih zračenja NN 27/1999  
[https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/1999\\_03\\_27\\_546.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/1999_03_27_546.html) (6. 8. 2020.)
- [20] Ekvivalentna doza, URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Equivalent\\_dose](https://en.wikipedia.org/wiki/Equivalent_dose) (6. 8. 2020.)

- [21] Koncept osobne dozimetrije i osnovne fizikalne veličine u osobnoj dozimetriji; Marija Surić Mihić, Ivica Prlić, Jerko Šiško i Tomislav Meštović  
<https://hrcak.srce.hr/148773> (6. 8. 2020.)
- [22] European Commission; Radiation Protection 140, Compilation of Measured and Calculated Data  
URL: <https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/140.pdf> (10. 8. 2020.)
- [23] Izvješće Europske komisije – Comparison of codes assessing radiation exposure of aircraft crew due to galactic cosmic radiation:  
URL: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/8ae41e75-1f81-4f8b-9a44-77f055a621df> (10. 8. 2020.)
- [24] Rad Srećka Grgića: Djelovanje ionizirajućih zračenja na žive stanice; Ministarstvo zdravstva RH, URL:  
<https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/Public/29/000/29000441.pdf>  
(10. 8. 2020.)
- [25] Efektivna doza, URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Effective\\_dose\\_\(radiation\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Effective_dose_(radiation))  
(6. 8. 2020.)
- [26] NASA-TEPC, URL: <https://lsda.jsc.nasa.gov/Hardware/hardw/716> (13. 8. 2020.)
- [27] FAA stranica CARI-7 sustava:  
URL: [https://www.faa.gov/data\\_research/research/med\\_humanfacs/aeromedical/radiobiology/cari7/](https://www.faa.gov/data_research/research/med_humanfacs/aeromedical/radiobiology/cari7/) (13. 8. 2020.)
- [28] Stranica računalnog programa EPCARD.Net:  
<https://www.helmholtz-muenchen.de/epcardnet/index.html> (15. 8. 2020.)
- [29] IRSN: Znanstveno-tehničko izvješće 2002  
URL: <https://www.irsn.fr/EN/Research/publications-documentation/Aktis/Scientific-Technical-Reports/STR-2002/Documents/Chap04art1GB.pdf> (15. 8. 2020.)
- [30] Stranica računalnog programa SIEVERT:  
URL: <https://www.sievert-system.org/?locale=en> (17. 8. 2020.)
- [31] Friedburg W, Copeland K. What aircrews should know about their occupational exposure to ionizing radiation. Office of Aerospace Medicine, Washington, DC 20591; October 2003  
[https://www.researchgate.net/publication/235030693\\_What\\_Aircrews\\_Should\\_Know\\_About\\_Their\\_Occupational\\_Exposure\\_to\\_Ionizing\\_Radiation](https://www.researchgate.net/publication/235030693_What_Aircrews_Should_Know_About_Their_Occupational_Exposure_to_Ionizing_Radiation) (20. 9. 2020.)
- [32] Blettner M, Zeeb H, Auvinen A, et al. Mortality from cancer and other causes among male cockpit crew in Europe.  
[https://www.researchgate.net/publication/6291423\\_Mortality\\_from\\_cancer\\_and\\_other\\_causes\\_among\\_male\\_airline\\_cockpit\\_crew\\_in\\_Europe](https://www.researchgate.net/publication/6291423_Mortality_from_cancer_and_other_causes_among_male_airline_cockpit_crew_in_Europe) (21. 9. 2020.)
- [33] Pukkala E, Aspholm R, Auvinen A, et al. Cancer incidence among 10,211 airline pilots: a Nordic study.  
[https://www.researchgate.net/publication/27386228\\_Cancer\\_incidence\\_among\\_10211\\_airline\\_pilots\\_A\\_Nordic\\_study](https://www.researchgate.net/publication/27386228_Cancer_incidence_among_10211_airline_pilots_A_Nordic_study) (21. 9. 2020.)

## **Životopis**

Adriana Šafran rođena je 3. srpnja 1991. u Kutini, u Republici Hrvatskoj. Pohađala je prirodoslovno-matematičku gimnaziju u Srednjoj školi Tina Ujevića Kutina koju je završila 2010. godine. Daljnje obrazovanje nastavlja na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu u Zagrebu, ali prekida studij te 2013. upisuje preddiplomski studij fizike na Odjelu za fiziku, Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku.