

Astrobiofizika: pregled spoznaja i otvorena pitanja

Bašić, Martina

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split, Faculty of Science / Sveučilište u Splitu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:166:686240>

Rights / Prava: [Attribution-NoDerivatives 4.0 International/Imenovanje-Bez prerada 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-08-16**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Science](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



Sveučilište u Splitu
Prirodoslovno – matematički fakultet

ASTROBIOFIZIKA: PREGLED SPOZNAJA I OTVORENA PITANJA

Završni rad / Bachelor thesis

Martina Bašić

Split, rujan 2022.

Temeljna dokumentacijska kartica

Sveučilište u Splitu
Prirodoslovno – matematički fakultet
Odjel za fiziku
Ruđera Boškovića 33, 21000 Split, Hrvatska

Završni rad

Astrobiofizika: pregled spoznaja i otvorena pitanja

Martina Bašić

Sveučilišni preddiplomski studij Fizika

Sažetak:

Zemlja je pod stalnim utjecajem radijacije iz Svemira. Biosfera na Zemlji je zaštićena atmosferom i magnetnim poljem koji apsorbiraju i usmjeravaju veliki dio zračenja koji dolazi do Zemlje. Pri eksploziji supernove, dodatna količina zračenja stiže do Zemlje. Da bi mogli promatrati promjene u organizmima pod utjecajem tog zračenja, ono treba imati dovoljno energije da se probije do površine Zemlje i utječe na organizme. Količina radijacije koja dolazi do Zemlje i njen utjecaj na atmosferu ovise primarno o udaljenosti supernove i energiji primarnog zračenja. Izgled galaktičkog magnetnog polja je ključan podatak u određivanju energije primarnog zračenja koje pri dodiru s atmosferom reagiraju s njom na dva načina: primarno zračenje mijenja njen kemijski sastav ili stvaranjem sekundarnih čestica, muona i neutrona. Glavni efekt utjecaja primarnog zračenja na atmosferu je smanjenje količine ozona što dovodi do povećanog prodora ultraljubičastog B zračenja do Zemlje. Ono uvelike utječe na organizme, na njihov razvoj, ponašanje tokom djelovanja zračenja, mutacije, hormone, učestalost raka organa i promjenu DNA. Promatrajući količinu zračenja koja dolazi do Zemlje možemo odrediti utjecaj na biosferu i razvoj organizama i oštećenja. S druge strane, kako se supernova sastoji od teških elemenata, pri njejoj eksploziji dolazi do ispuštanja čestica njenog sastava u međuzvezdani prostor i do dolaska tih čestica do Zemlje pa tako analizirajući koru Zemlje i količinu radioizotopa, posebice željeza, možemo spekulirati o vremenu eksplozije i dugotrajnosti utjecaja zračenja na Zemlju.

- Ključne riječi:** eksplozija supernove, kozmičke zrake, ionizacija atmosfere, utjecaj na biosferu
- Rad sadrži:** 29 stranica, 16 slika, 19 literaturnih navoda. Izvornik je na hrvatskom jeziku.
- Mentor:** doc. dr. sc. Željka Sanader Maršić
- Ocjenjivači:** doc. dr. sc. Željka Sanader Maršić
doc. dr. sc. Marko Kovač
mag. phys. Tamara Rom
- Rad prihvaćen:** 20.09.2022.

Rad je pohranjen u knjižnici Prirodoslovno – matematičkog fakulteta, Sveučilišta u Splitu.

Basic documentation card

University of Split
Faculty of Science
Department of Physics
Ruđera Boškovića 33, 21000 Split, Croatia

Bachelor thesis

Astrobiophysics: overview of the subject field and open questions

Martina Bašić

University undergraduate study programme Physics

Abstract:

Earth is constantly under the influence of radiation from space. The biosphere on Earth is protected by the atmosphere and magnetic field, which absorb and direct a large part of the radiation that reaches the Earth. During a supernova explosion, an additional amount of radiation reaches the Earth. In order to be able to observe changes in organisms under the influence of this radiation, it must have enough energy to penetrate to the surface of the Earth and affect organisms. The amount of radiation reaching the Earth and its impact on the atmosphere depend primarily on the distance of the supernova and the energy of the primary radiation. The appearance of the galactic magnetic field is a key piece of information in determining the energy of primary radiation, which upon contact with the atmosphere reacts with it in two ways: primary radiation changes its chemical composition or by creating secondary particles, muons and neutrons. The main effect of the influence of primary radiation on the atmosphere is the reduction of the amount of ozone, which leads to an increased penetration of ultraviolet B radiation to the Earth. It greatly affects organisms, their development, behavior during radiation exposure, mutations, hormones, frequency of organ cancer and DNA changes. By observing the amount of radiation that reaches the Earth, we can determine the impact on the biosphere and the development of organisms and damage. On the other hand, as a supernova consists of heavy elements, during its explosion particles of its composition are released into interstellar space and these particles reach the earth, so by analyzing the Earth's crust and the number of radioisotopes, especially iron, we can speculate about the time of the explosion and its duration impact of radiation on the Earth.

Keywords: supernovae explosion, cosmic rays, ionisation of the atmosphere, effect on the biota

Thesis consists of: 29 pages, 16 figures, 19 references. Original language: Croatian

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Željka Sanader Maršić

Reviewers: Assist. Prof. Dr. Željka Sanader Maršić
Assist. Prof. Dr. Marko Kovač
Mag. phys. Tamara Rom

Thesis accepted: Spetember 20th, 2022.

Thesis is deposited in the library of the Faculty of Science, University of Split.

Sadržaj

1	Uvod	1
2	Astrofizika: Kozmičko zračenje i eksplozija supernove	3
2.1	Ionizirajuća radijacija	3
2.2	Utjecaj supernove	4
2.2.1	Galaktičko magnetno polje (GMS)	5
2.2.2	Utjecaj radijacije ovisno o izgledu magnetnog polja	6
3	Biofizika: Utjecaj zračenja na Zemlju	11
3.1	Direktan utjecaj	11
3.2	Indirektan utjecaj	12
3.2.1	Korišteni modeli	13
3.2.2	Rezultati istraživanja	15
4	Otvorena pitanja	22
5	Zaključak	26
6	Literatura	28

1 Uvod

Zemlja je pod stalnim utjecajem radijacije iz Svemira. Ona dolazi do Zemlje u raznim intenzitetima i varijantama, od nježne svjetlosti zvijezda, Sunčeve svjetlosti, ali i opasnog zračenja. Zračenje je podložno velikim varijacijama ovisno o udaljenosti energetskog događaja u Svemiru od Zemlje, smjeru širenja i jačinom tog događaja. Postoje razni izvori zračenja u Svemiru, uz Sunčevo zračenje kao konstantan izvor, od kojih su nama najzanimljiviji eksplozije supernovi, gama zračenja ili solarne baklje. Oni se javljaju povremeno i njihov utjecaj se očituje kroz ostatke izotopa i efekte na organizme na Zemlji. Sunčevo zračenje kao sveprisutni izvor zračenja ne uzimamo kao biološki opasno zračenje jer je njegov utjecaj uvelike zaustavljen magnetnim poljem i atmosferom. Za razliku od tog, eksplozija supernove stvara zračenje puno većih energija koje ima mogućnost prodiranja u atmosferu i utjecaja na organizme na Zemljinu površinu pa nam je zbog tog njen utjecaj zanimljiv za promatranje i analiziranje.

Razvojem fizike i novim otkrićima i podacima otkrivenim 2016. područje astrobiofizike se ubrzano razvija te od spekulacija i pretpostavki, dolazi se do konkretnih rezultata. Razmatranja o utjecaju supernovi krenula su 90-ih godina 20-og stoljeća promatranjem eksplozija supernovi na udaljenosti od 300 pc (parsek, $1 \text{ pc} = 3.26 \text{ svjetlosnih godina} = 3,0857 \cdot 10^{13} \text{ km}$) te količini potrebne radijacije naspram detektirane radijacije koja je potrebna za utjecaj na biosferu i organizme, ali bez donesenih konkretnih rezultata, već je ostalo na teorijama kako bi uopće radijacija veće energije od sunčevog zračenja trebala utjecati na atmosferu. Daljnjim prikupljanjem podataka potrebna udaljenost za utjecaj na biosferu se spustila na 100 pc, s time da se na početku 21-og stoljeća počeo uzimati u obzir izgled galaktičkog magnetnog polja, koje zapravo igra ključnu ulogu u propagaciji primarnog zračenja koje dolazi od supernove do Zemlje. Tek se od 2016. korištenjem brojnih kompjuterskih metoda za simulaciju atmosfere, nastanka sekundarnih čestica pri reakciji primarnog zračenja s atmosferom, stope ionizacije i prikupljenim podacima o količini željeza došlo do zaključka kako je moguće da se dogodila eksplozija supernove na udaljenosti od 50 pc prije 2,6 milijuna godina i u kojoj mjeri je utjecala na razvoj života na zemlji.

U ovom radu osvrnut ću se na glavne efekte eksplozije supernove i podatke koje potvrđuju postavljene hipoteze. Za utjecaj eksplozije supernove bitna je količina radijacije koja dopijeva do Zemlje, a ključnu ulogu u tome igra izgled galaktičkog magnetnog polja, za koje postoje dvije pretpostavke njegovog izgleda i stope ionizacije u oba slučaja. Uzimajući u obzir jednu od hipoteza dobiveni su podaci o količini ozona za vrijeme trajanja utjecaja ionizacije i količini prodora ultraljubičastog B zračenja do Zemljine površine. Promatrani su utjecaji na učestalost pojavljivanja raka, mutacija, promjene u ponašanju i hormonima u organizama. Ostaju otvorena pitanja o točnosti tih podataka s obzirom na aproksimacije koje su uzete u obzir za opis utjecaja na organizme. Uz to, postoje i prikupljeni podaci o količini radioizotopa koji su

nađeni u Zemljinoj koji govore o vremenu eksplozije supernove i njenom trajanju. Promatranjem količine željeza moguće je odrediti tip zvijezde, njen sastav, udaljenost od Zemlje i dugotrajnost utjecaja radijacije.

2 Astrofizika: Kozmičko zračenje i eksplozija supernove

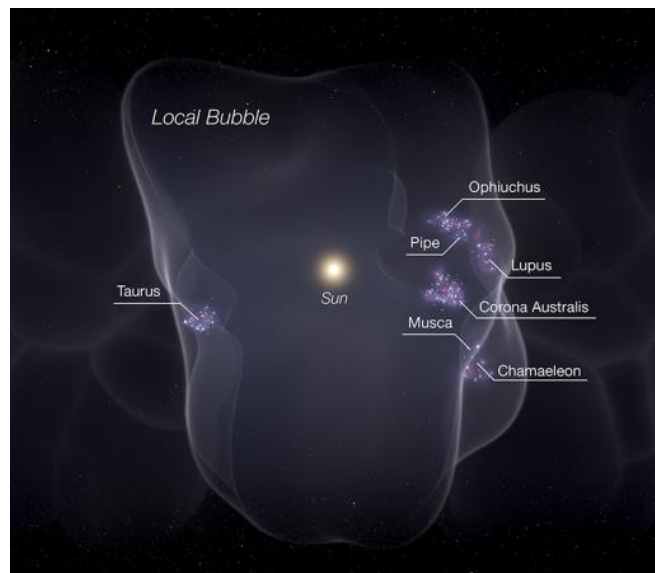
2.1 Radijacija

Razlikujemo dvije vrste radijacije, elektromagnetsku radijaciju i visoko energetske protone i druge jezgre, zvane kozmičke zrake (*engl. Cosmic rays, CR*). Elektromagnetska radijacija, tj. fotoni energije proporcionalne njihovoj frekvenciji, utječe na molekule tako što razbija međumolekulske veze i time mijenja atmosferu. Nema znatnog utjecaja na biosferu jer su fotoni imuni na utjecaj magnetnog polja te se zaustavljaju pri doticaju s materijom i time ostaju u visokim dijelovima atmosfere i ne probijaju se duboko do Zemlje. Za razliku od nje, druga vrsta radijacije se sastoji od vrlo ubrzanih elementarnih čestica i kao takva probija se duboko u atmosferu. Razlikujemo primarno i sekundarno kozmičko zračenje. Primarno zračenje se sastoji od protona i helijevih jezgara i ono dolazi iz svemira do gornjeg sloja atmosfere. Sekundarno zračenje nastaje kada primarno zračenje reagira s česticama u atmosferi. Događaju se nuklearne reakcije i stvaraju se mezoni, hiperoni i drugi nuklearni fragmenti. [1] Nabijene čestice koje su se stvorile u atmosferi prolaze elektromagnetne interakcije, događaju se kaskadne reakcije, i stvara se elektromagnetni pljusak kozmičkih zraka. Ovisno o energiji primarnog zračenja, maksimum zračenja, tj. dubina prodiranja zračenja, se mijenja. [2] Kozmičko zračenje pretežito dolazi od Sunca, ali i ostalih objekata izvan Sunčeva sustava. Sunčevo zračenje djeluje konstanto na Zemlju uz povremene Sunčeve bljeskove (*engl. Solar flares*) koji ipak nemaju dovoljno energije da bi dospjeli do površine Zemlje i tako imali značajan utjecaj. Da bi radijacija imala utjecaj na biosferu, treba moći promijeniti kemijski sastav atmosfere, a takva radijacija dolazi do Zemlje povremeno eksplozijom supernove koja proizvodi kozmičke zrake energije do 10^{15} eV ili bljeskovima gama zraka koje proizvode kozmičke zrake energije do 10^{21} eV. [1]

Pri pljuskovima kozmičkih zraka, većina stvorenih čestica u reakcijama nema dovoljno energije da se probije do površine Zemlje. Prolazeći kroz atmosferu ionizira ju gubeći svoju energiju i dovoljan broj čestica potreban za povećanje količine radijacije na Zemlji ne dođe ni do površine mora. Samo muoni i neutroni proizvode dovoljne količine radijacije da budu detektirani. Muoni imaju dovoljno energije da dođu do razine mora pa čak i da se probiju kroz mora i kamenje. Da bi se odredila jačina radijacije uzrokovana muonima, aproksimira se energija koju gube pri prolasku kroz organizme s energijom koju gube pri prolasku kroz vodu. Drugu vrstu čestica koju možemo detektirati su neutroni. Oni, iako nastaju visoko u atmosferi, probijaju se do nižih dijelova atmosfere jer nemaju naboj. Svoju energiju gube pri reakcijama i zaustavljaju se kada dosegnu stalnu brzinu, najčešće u stratosferi. Neki neutroni dosegnu stalnu brzinu blizu površine mora i tako proizvode radijaciju organizmima na zemlji. [3]

2.2 Utjecaj supernove

Eksplozijom supernove oslobađaju se γ -zrake, X-zrake i kozmičke zrake, a količina energije koja se oslobodi pri eksploziji je ekvivalentna energiji koju bi Sunce proizvelo u životnom vijeku [4]. Utjecaj kozmičkih zraka koje proizvede supernova je odgođen i vremenski produžen, dok će utjecaj γ -zraka i X-zraka biti relativno odmah uočen i možemo ga podijeliti na dva dijela. Prvi dio odgovara takozvanom UV-bljesku, kratki bljesak ultraljubičastog zračenja i slabog X-zračenja koje izlazi iz fotosfere supernove, i on se vremenski preklapa s izbijanjem udarnog vala. Dok drugi odgovara emisiji X- i γ -zraka koje nastaju raspadom ^{56}Ni , ^{56}Co , i ^{57}Co izotopa i on dolazi do Zemlje otprilike 100 dana nakon eksplozije i traje nekoliko stotina godina. [5] Pri eksploziji dolazi do ispuštanja velikog broja težih elemenata, koji sačinjavaju Sunčev sustav pa i Zemlju, u međuzvezdani prostor [6]. U zadnjem tisućljeću otkriveni su mnogi tragovi, naslage molekula i radioaktivnih izotopa u Zemljinoj kori, koje su ostavile eksplozije supernova [5]. Smatra se da kratko živeći radioaktivni elementi daju uvid u udaljenost u odnosu za Zemlju i starost eksplozije supernove. Učestalost pojavljivanja supernove u našoj galaksiji je otprilike tri supernove unutar 100 godina. Posljednja vidljiva je bila Keplerova supernova 1604. godine na udaljenosti 6 kpc. [1] Najjači signal eksplozije supernove potječe od prije 2.6 milijuna godina. To također može biti i ostavština eksplozije supernove u Orionovom kraku Kumove slame, tj. lanca događaja koji je započeo prije 14 milijuna godina i doveo do stvaranja golemog mjehura u svemiru, šupljine u međuzvezdanom mediju trenutno široke oko 1000 svjetlosnih godina, zvanom Lokalni mjehurić, slika 1 (*engl. Local Bubble, LB*). [7]



Slika 1. Izgled Lokalnog mjehurića u čijem je središtu Sunce (Slika preuzeta s [8]).

2.2.1 Galaktičko magnetno polje (GMS)

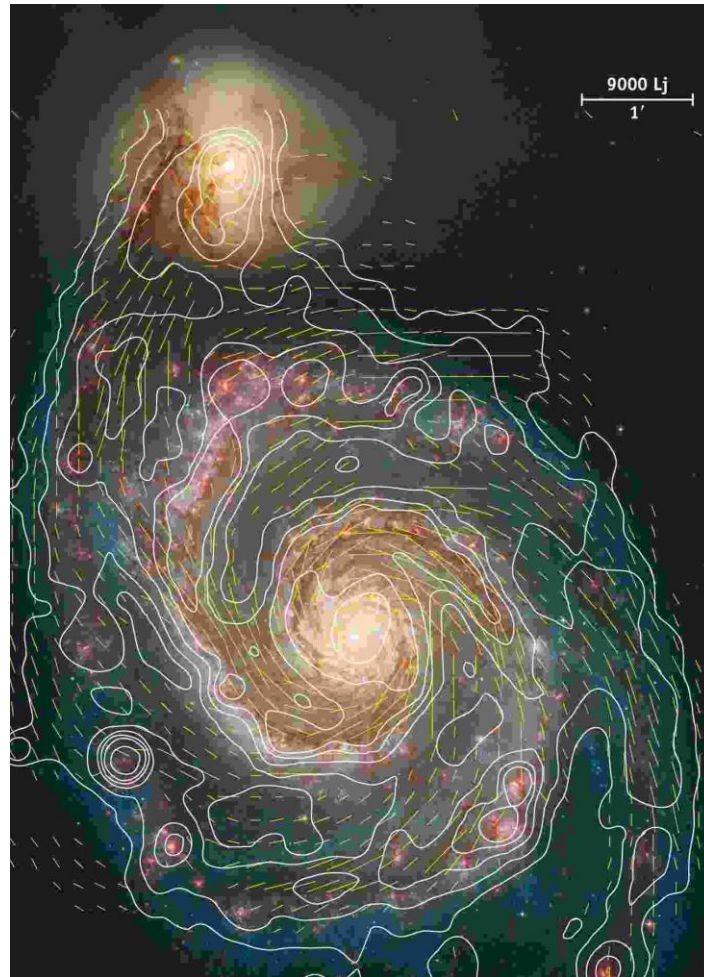
Magnetska polja su ključan faktor u razvoju i strukturi međuzvjezdanog medija i galaksije [9]. Omogućuju uklanjanje kutnog zakretnog momenta iz protozvjezdanog oblaka tijekom njegovog kolapsa pa tako utječu na početak formiranja zvijezda. Utječu na tokove plina u spiralnim kracima i ukupnom pritisku koji uravnotežuje međuzvjezdani medij i gravitaciju [10]. Djelomično polarizirano sinkrotronsko zračenje i Faradayeva rotacija su najinformativniji tragovi magnetnih polja. [9] Sinkrotronsko zračenje su polarizirani elektromagnetni valovi cijelog spektra valnih duljina koje nastaje kada se električni nabijene čestice gibaju okomito na smjer širenja magnetskog polja, ubrzane brzinom bliskom brzini svjetlosti [11]. A Faradayeva rotacija nastaje rotacijom ravnine polarizacije pod utjecajem linija magnetnog polja i elektrona u ionosferi i time se javljaju različite fazne brzine za desno i lijevo cirkularno polarizirane valove [12].

Teorija koja opisuje nastanak magnetnih polja u galaksijama je turbulentni dinamo (*engl. Turbulent dynamo*) [9]. Općenito teorija dinama opisuje magnetno polje kao samoodrživo, tj. samopobudno. Gibanje tekućine u jezgri zvijezde/planeta pomiče tekuće željezo preko već postojećeg slabog magnetnog polja i time se stvara električna struja. Električna struja potom stvara novo magnetno polje koje u interakciji s tekućinom u gibanju stvara sekundarno magnetno polje, dva polja zajedno su jača od primarnog i leže duž osi rotacije. [13]

Za opažanje magnetnih polja važne su dvije vrste dinama, fluktuacijski dinamo i dinamo srednjeg polja, a ovisno o količini polarizacije raspoznavamo vrstu magnetnog polja. Dinamo srednjeg polja proizvodi uređeno magnetno polje, koje je uređeno na skali usporedivoj s rezolucijom promatranja od nekoliko stotina parseka, a na njega ukazuje polarizirana radio emisija i značajna Faradayeva rotacija. Polarizacija za iznimno uređeno polje može biti i do 75%. Dok fluktuacijski dinamo proizvodi nasumično magnetno polje čija je rezolucija promatranja reda veličine od samo 50 do 100 parseka. Ono je jače od uređenog i stoga polarizacija može biti otprilike 20%. [9]

Elektroni kozmičkih zraka su ubrzani udarnom frontom eksplozije supernove i šire se međuzvjezdanim medijem. Oni se gibaju brzinom bliskoj brzini svjetlosti spiralno oko linija magnetnog polja i time emitiraju sinkrotronsko zračenje. Promatrajući intenzitet sinkrotronske emisije dobiva se mjera gustoće elektrona u kozmičkim zrakama, ali i jakost ukupne komponente magnetnog polja. [10]

U spiralnim galaksijama linije magnetnog polja većinom teku paralelno s krakovima galaksije, na njihovom unutarnjem rubu, ali u nekoliko galaksija formiraju se magnetni krakovi polja između krakova galaksije, slika 2. Također uzorci Faradayeve rotacije ukazuju na uređena polja velikih razmjera s konstantnim smjerom koja su pretpostavljena dinamo modelom. [10]



Slika 2. Slika galaksije M51 pomoću svemirskog teleskopa Hubble (*engl. Hubble Space telescope*), prekrivena konturama ukupnog radijskog intenziteta i polarizacijskih vektora na 6 cm valne duljine, u kombinaciji s radijskim promatranjima s Effelsberg i VLA (*eng. Very Large Array*, dugi niz teleskopa koji stvaraju efekt jednog teleskopa) radio teleskopa. Magnetsko polje dobro prati optičku spiralnu strukturu, ali područja između spiralnih krakova također sadrže jaka i uređena polja. Traka u gornjem desnom kutu označava ljestvicu od 1 kutne minute ili oko 9000 svjetlosnih godina (oko 3 kiloparseka) na udaljenosti galaksije. [10]
(Slika preuzeta s [10])

2.2.2 Utjecaj radijacije ovisno o izgledu magnetnog polja

Za prikupljanje i obradu podataka o utjecaju supernove (SN) na biosferu i jačinu radijacije uzimamo tip supernove SNII koji je najčešći. Karakterizira ga vodik u emisijskom spektru. Tip II dijelimo na pod kategorije, ovisno o tome postoji li pad svjetlosne krivulje nakon dosegnutog maksimuma (oznaka L, SNII-L) ili postoji faza platoa u svjetlosti, tj. kada je svjetlina konstanta određeno vrijeme (oznaka P, SNII-P). [14]

Pretpostavka je da se dogodila eksplozija tipa SNII-P na udaljenosti od 50 pc od Zemlje prije otprilike 2.6 milijuna godina. Za ovaj tip eksplozije, promatramo dva slučaja: A i B, kroz koja ćemo analizirati utjecaj radijacije i njenu ovisnost o visini i izgledu magnetnog polja.

Za slučaj A uzima se pretpostavka da se galaktičko magnetno polje sastoji od dvije komponente, turbulentna komponentom polja skupa s uređenom komponentom polja, koja leži na liniji vidnog polja sa Zemlje do supernove. Također se pretpostavlja da su Zemlja i supernova povezane linijom magnetnog polja, da bi se mogao maksimizirati tok kozmičkih zraka i tako dobiti gornja granica na moguću utjecaj supernove na život na Zemlji. Za slučaj B se zanemaruje uređena komponenta magnetnog polja, a turbulentna komponenta je reducirana. Glavna pretpostavka je da je Lokalni mjehurić već formiran i da se i Zemlja i supernova nalaze u njemu. [3]

Eksplozijom supernove emitiraju se X-, γ - i kozmičke zrake. Za tip II-P koji eksplodira unutar lokalnog mjehurića većina energije je pretvori u vidljivu svjetlost i na Zemlji nije pronađena dovoljna količina tragova X- i γ - zraka da bi imale utjecaj na radijaciju, dok je utjecaj kozmičkih zraka ovisan o GMS. [3]

Na gibanje kozmičkih zraka kroz galaksiju utječe turbulentno i uređeno galaktičko magnetno polje, koje skupa nazivamo glavno polje, a ukupno magnetno polje je suma glavnog magnetnog polja i njegovih fluktuacija [15]. Turbulentno magnetno polje je određeno spektrom snage $P(k) \sim k^{-\alpha}$, ovisnom o valnom broju k , maksimalnom duljinom fluktuacije L_{max} i duljinom fluktuacije $l_c = \frac{(\alpha-1)L_{max}}{2\alpha}$, gdje je α koeficijent koji se eksperimentima pokazao da iznosi $\alpha = 5/3$. [3] Gibanje promatramo ovisno o energiji čestica, koje rotiraju oko silnica magnetnog polja, tj. žiroskopski se gibaju Larmorovim radijusom $R_L(E_{cr}) = l_c$, radijusom rotacije. Fluktuacije magnetnog polja dovode do raspršenja čestica u žiroskopskom gibanju i tako se javlja difuzija kozmičkih zraka. [15] Za izotropnu turbulentnu komponentu magnetnog polja, a zanemarujući uređenu komponentu, raspršenje kozmičkih zraka je također izotropno. Za takav uvjet vrijedi da je duljina raspršenja veća od maksimalne duljine fluktuacija, $L_{max} \gg l_c$, i da je energija gibanja veća od granične energije određene Larmorovim radijusom, $E_{cr} \gg E$, pa energijski ovisan difuzijski faktor ima oblik $D(E) \sim E^{2-\alpha}$. [3]

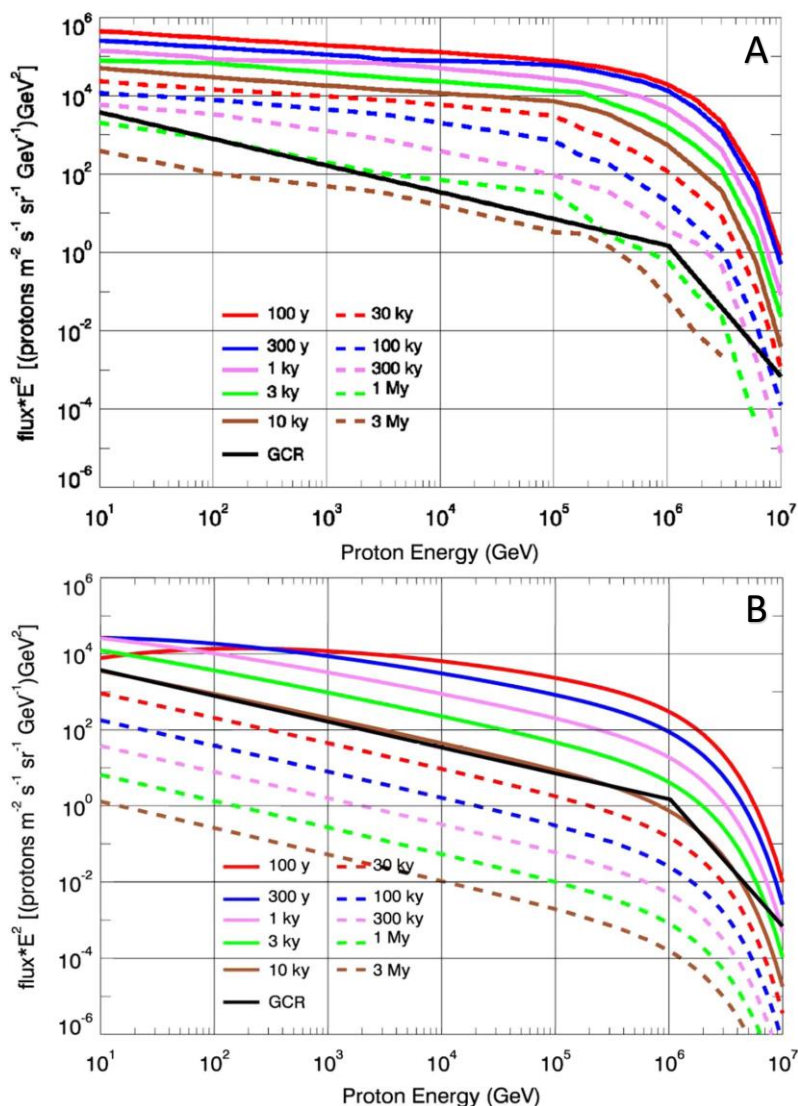
Za provjeru utjecaja kozmičkih zraka za izgled galaktičkog magnetnog polja za slučaj A računa se putanja svake individualne zrake, koja je izotropno emitirana iz supernove, pomoću koda koji koristi ugniježdene neuronske mreže. Ravnina galaksije se dijeli na rešetku sa ćelijama veličine $20 \text{ pc} \times 20 \text{ pc}$ na poziciji supernove, a za veće udaljenosti veličina ćelija se postepeno povećava do veličine $100 \text{ pc} \times 100 \text{ pc}$ na 500 pc udaljenosti od supernove. A visina ćelija je odabrana da bude 20 pc. Ovakvo promatranje galaksije je omogućilo izračun toka kozmičkih zraka na različitim mjestima sa drugačijom okomitom udaljenošću od silnica

uređene komponente magnetnog polja koja prolazi kroz supernovu. Maksimalan tok na Zemlji se dobiva kada silnica polja spaja supernovu i Zemlju. [3]

S obzirom da sustav promatramo u Lokalnom mjehuriću, postoji mogućnost da je tok plazme pri eksploziji supernove, odgovorne za njegov nastanak, smanjio utjecaj turbulentne komponente magnetnog polja i potpuno potisno djelovanje uređene komponente magnetnog polja. Za slučaj B promatra se izotropno raspršenje kozmičkih zraka s difuzijskim faktorom oblika $D(E) = D_0(E/E_0)^{1/3}$, $D_0 = 2 \times 10^{28} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ i $E_0 = 10 \text{ GeV}$. [3]

Za određivanje raspršenja i gibanja kozmičkih zraka kroz galaksiju ključan podatak je poznavanje smjera magnetnog polja u trenutku eksplozije supernove. Za slučaj kada je magnetno polje okomito na liniju vidnog polja, tok kozmičkih zraka je vrlo malen u suprotnosti kada je polje na istom pravcu kao i linija vidnog polja. [3]

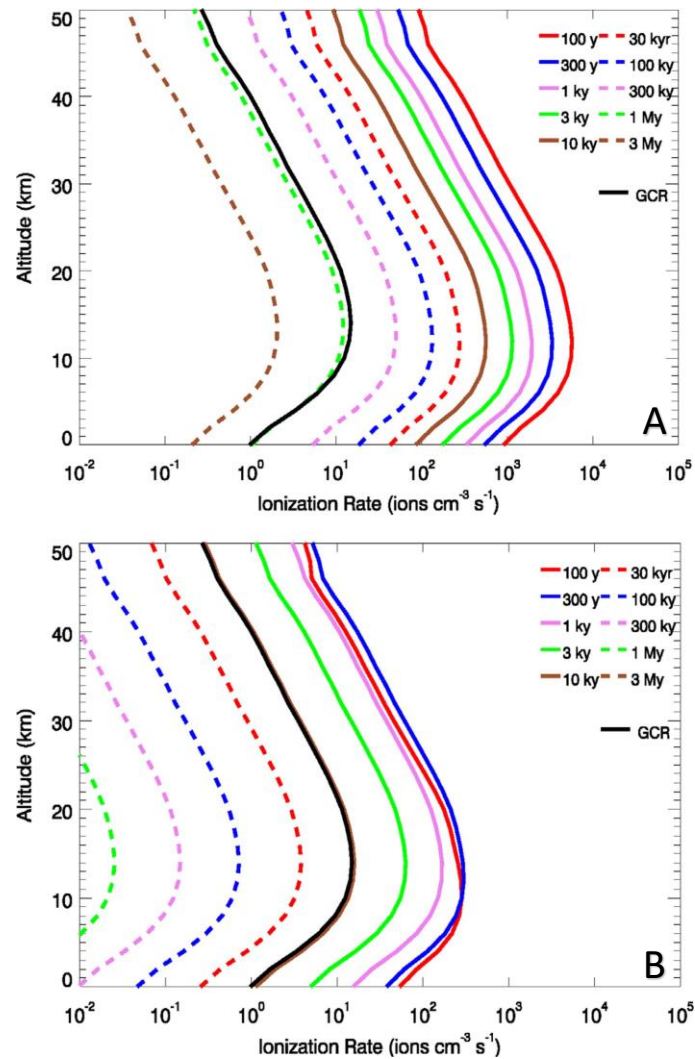
Obradom kompjuterski dobivenih rezultata na temelju pretpostavki polja i načina raspršenja kozmičkih zraka, dobiva se intenzitet zračenja (energija protona) na Zemlji ovisno o toku ukupne energije koja dolazi od supernove (slika 3). [3]



Slika 3. Spektar toka kozmičkih zraka (pomnoženo s E^2 tako da je područje ispod krivulje proporcionalno ukupnoj energiji zračenja između vremenskih intervala) za slučaj A i B u različitim vremenima od eksplozije supernove u ovisnosti o energiji koja dolazi do zemlje, uz sveprisutni, konstantni, tok kozmičkog zračenja iz svemira prikazan crnom linijom (*engl. Galactic cosmic rays, GCR*). [3] (Slika preuzeta s [3])

Vremenska skala je postavljena od trenutka eksplozije supernove, minus vrijeme potrebno da fotoni dođu do Zemlje. Spektar toka zračenja nam zapravo govori dubinu prodiranja kozmičkog zračenja u atmosferu. S obzirom da je prodiranje ovisno o energiji, što je veća energija veći je prodor pa i sam utjecaj kozmičkog zračenja na ionizaciju. Slučaj A pokazuje veliki porast toka zračenja, koji je zapravo posljedica pretpostavke da postoji linija magnetnog polja koja direktno povezuje supernovu i Zemlju. Za tako postavljeni sustav iz grafa vidimo da većina linija pokazuje veći tok kozmičkog zračenja od konstantnog pozadinskog zračenja i trajanje tog utjecaja je vidljivo kroz duže vrijeme od eksplozije supernove. Dok u slučaju B primjećujemo porast unutar prvih 10 000 godina, a nakon tog tok kozmičkog zračenja pada ispod razine GCR, što znači da nema posebnog utjecaja na Zemlju. [3]

Stopa ionizacije direktno ovisi o visini od površine zemlje na kojoj se molekule zraka ioniziraju (slika 4) [3].



Slika 4. Ionizacijska stopa atmosfere u različitim vremenskim intervalima od eksplozije supernove ovisno o visini od površine Zemlje, uz ionizacijsku stopu pozadinskog kozmičkog zračenja prikazanu crnom linijom (GCR) [3]. (Slika preuzeta s [3])

Rezultati pokazuju kako je donjem dijelu troposfere ionizacija veća od normalne ionizacije pozadinskog kozmičkog zračenja. Za slučaj A unutar prvih 100 godina povećanje ionizacije za faktor od 10^3 skroz do površine Zemlje, a za slučaj B povećanje za faktor od 50. Kako dubina prodiranja direktno ovisi o energiji, također za slučaj B vrijedi da je ionizacija veća unutar prvih 10000 godina u odnosu na pozadinsku, a za slučaj A da je utjecaj ionizacije primjetan i nakon milijun godina. Količina i trajanje ionizacije direktno utječe na kemijski sastav atmosfere i time na ukupan život na Zemlji [3].

3 Biofizika: Utjecaj zračenja na Zemlju

Visoko energetske radijacijske eksplozije su česte u našoj galaksiji. Eksplozije supernove, Sunčeve zrake, eksplozije gama zraka i drugi procesi u galaksiji ubrzavaju nabijene čestice, protone, koje dolaze do Zemljine atmosfere i pridonose brojnim fizikalnim procesima koje se događaju u Zemljinoj atmosferi pa tako i na Zemlji. Velik dio energije nabijenih čestica, koje dođu do Zemlje, a nazivamo ih primarno zračenje, se predaje česticama u atmosferi i ioniziraju ju, te tako dolazi do promjene kemijskog sastava atmosfere i stvaranja drugih čestica koje nazivamo sekundarno zračenje. Pri reakciji primarnog zračenja, s atmosferom, nastaje sekundarno zračenje koje se sastoji od muona i neutrona. Sekundarne čestice imaju dovoljno energije da se probiju do površine Zemlje i doprinose zračenju na površini Zemlje i na višim dijelovima ispod kore Zemlje. [2] S obzirom da postoji više načina na koje fotonska i čestična radijacija može utjecati na Zemlju, ovisno o izvoru zračenja i količini energije kozmičkih zraka, utjecaj radijacije dijelimo na dvije kategorije: direktan i indirektan. Direktan utjecaj bi bio onaj gdje kozmičke zrake i sekundarne čestice, neutroni i muoni, dolaze do površine Zemlje i izravno utječu na organizme ili obasjanost Zemljinog neba pod utjecajem fotona određene valne frekvencije i ima direktan utjecaj na razine hormona u organizmima. Dok indirektnim utjecajem smatramo biološka oštećenja povodom UVB (*engl. ultraviolet B*, ultraljubičastog B) zračenja, tj. utjecaj primarnog zračenja na atmosferu dovodi do smanjenja količine stratosferskog ozona i time većeg probijanja UVB zračenja do Zemlje. [1]

3.1 Direktan utjecaj

Čak i mala količina kozmičkog zračenja koja dođe do površine Zemlje može utjecati na povećano javljanje raka kostiju i rođenje djece s fizičkim nedostacima. Termalni neutroni uzrokuju rak kostiju, a njihov utjecaj nalazimo u višim dijelovima stratosfere, gdje je njihov tok otprilike 280 neutrona po centimetru kvadratnom svake sekunde, dok je tok na površinu Zemlje nekoliko neutrona svake sekunde po centimetru kvadratnom. Veće dospijeće neutrona do Zemlje bi bilo moguće uz kozmičke zrake veće energije, koje se javljaju pri eksploziji supernove. Tada je gravitacija ključna sila koja djeluje na čestice kozmičkih zraka, a za zrake nedovoljne energije javlja se difuzija u atmosferi i neutroni ne dospijevaju do površine Zemlje i nemaju veći utjecaj na organizme. [1]

Šteta koju nanese radijacija je proporcionalna energiji koja se apsorbira. Apsorbiranu radijacijsku dozu, D , definiramo kao količina adsorbirane energije po jedinici mase materije, $D=dE/dM$. Ova veličina daje mjeru oštećenja i kliničkih učinaka neovisno o vrsti izvora zračenja. Uz dozu zračenja, drugi pokazatelj je veličina LET= dE/dx , tj. linearni energijski prijenos (*engl. Linear Energy Transfer*), koja govori o srednjoj vrijednosti energije koja se apsorbira po duljini materije. Kako organizam ima sposobnost obnavljanja, štetu koju napravi radijacija ne možemo točno mjeriti i određivati. Također zbog sveukupne kompleksnosti

organizma, radijacija na određene organe i dijelove organizma ima veći utjecaj, nego na druge. Za istu apsorbiranu dozu, ali od različitih vrsta izvora radijacije, organizam će drugačije reagirati. Za preciznije određivanje utjecaja tipova radijacije koristi se relativna biološka efektivnost (*engl. Relative Biological Effectiveness*, RBE). Ona se eksperimentalno određuje za određeni sustav u određenim uvjetima. Mjerna jedinica za RBE je Sievert ($1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$) i ukupna radijacijska doza na površini Zemlje iznosi 2.4 mSv u godini. Kozmičke zrake pridonose samo malim udjelom od 0.39 mSv na godinu, i taj utjecaj ovisi o geografskoj visini i širini zbog geomagnetskih utjecaja. Ali eksplozijom supernove u blizini Zemlje utjecaj kozmičkog zračenja može narasti i do 100 mSv po godini. [2] Za svaki 1 Sv pri izlaganju kozmičkom zračenju rizik dobivanja raka poraste za 5.5%. Za prije opisani slučaj A, radijacija pod utjecajem supernove unutar 1 do 2 godine naraste za 1 Sv, a za slučaj B unutar 30 godina se dogodi porast u radijaciji za 1 Sv, što povećava rizik od raka i mutacija. Muoni, koji se probijaju dublje u atmosferu, imaju važniji utjecaj na veće organizme. Za kratko živuće organizme povećavaju rizik od raka za 5%, a kod dulje živućih i za veći faktor i tako stvaraju osjetnu promjenu u cijelom ekosustavu. Utjecaj neutrona je mnogo manje rizičan nego muona, ali njihova veća LET radijacija ima mogućnost rabijanja dvostruke veze DNA, što može utjecati na oštećenja u strukturi organa i tkiva koje nastaju tokom embrionalnog i fetalnog razvitka i uočavaju se na rođenju. [3]

Jedan od utjecaja eksplozije supernove je i povećanje osvjetljenja. Mnoga istraživanja su pokazala da je izloženost pojačanom osvjetljenju noću, posebice plavom svjetlu, je štetna za mnoge organizme na razne načine. Izloženost svjetlu tokom prirodno tamnog razdoblja utječe na cirkadijalni ritam, što dovodi do manjka sna, umora i promjene ponašanja. Primijećena je promjena u razmnožavanju kornjača uvjetovana umjetnim svjetlima i promjena u načinu potrage za hranom kod žaba pod utjecajem svjetla radijacije veće od $10^{-3} \mu\text{Wcm}^{-2}$. Također je pronađena poveznica između pojačanog osvjetljenja noću i oslabljenja imunološkog sustava pa i učestalijeg pojavljivanja raka u životinja i ljudi. Većina fizioloških promjena uvjetovanih povećanom iluminacijom je povezana s produkcijom melatonina, i to posebice pod utjecajem svjetla valnih duljina od 400 nm do 500 nm. [3]

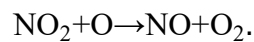
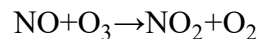
Promatrajući supernovu na udaljenosti od 50 pc pronađeno je kako je radijacija za valne duljine od 400 nm do 500 nm između 0.12 i $0.24 \mu\text{Wcm}^{-2}$, što je otprilike slično donjoj granici radijacije potrebnoj za utjecaj na životinje, a mnogo manja od radijacije potrebne za utjecaj na ljude. Što znači da je utjecaj UV i plavog svjetla na noćnom nebu značajan nekoliko tjedana, ali nema dugoročno učinak na organizme. [3]

3.2 Indirektan utjecaj

Indirektan efekt radijacije, tj. ionizacija atmosfere i smanjenje ozona, ima veći utjecaj na organizme nego direktna radijacija na Zemlji. Procesu u atmosferi pod utjecajem ionizacije, koja

je izazvana radijacijom, kao rezultat imaju dugoročno povećanje transmisije UVB zračenja na Zemlju od Sunca. Nakon što stane utjecaj ionizirajuće radijacije, povećanje neionizirajućeg UVB zračenja na Zemlji se zadržava kroz nekoliko godina. [1]

Ionizirajuća radijacija razbija jake kemijske veze molekula N_2 koje sačinjavaju 80% atmosfere. Razbijanjem veze dolazi do stvaranja dušikovih oksida, spojevi NO_y , gdje je y od 0.5 do 2, a najznačajniji su spojevi NO i NO_2 . Ovi spojevi stvaraju katalitički ciklus razbijanja veza ozona (O_3) koji se pretvara u kisik (O_2). Tako dolazi do smanjenja količine ozona i prodiranja UVB zraka do površine Zemlje. [1] Reprezentativne jednadžbe koje se događaju u atmosferi su [2]:



Neionizirajuće zračenje koje emitira Sunce i umjetni izvori nazivamo ultraljubičasto (*engl. ultraviolet*, UV) zračenje. Postoje tri osnovne vrste UV zračenja, podijeljene ovisno o valnim duljinama, koje dolaze do Zemlje ultraljubičasto B (UVB), ultraljubičasto A (UVA) i ultraljubičasto C (UVC). [16] Glavni utjecaj UVB zračenja je rak kože te maligni melanom, također uzrokuje opekline od sunca, tamnjenje i zadebljanje vanjskog sloja kože. Ali može i uzrokovati probleme s očima i imunološkim sustavom. [17] Većinu UVB zračenja apsorbira ozon i mali dio dolazi do Zemlje. Dok UVA zrake također uzorkuju rak kože, ali razlika je u tome što prodiru dublje u kožu jer imaju veću valnu duljinu i njih ne apsorbira ozon. Sunčeva svjetlost ima oko 500 puta više UVA nego UVB zraka. A UVC zrake su potpuno apsorbirane od strane ozona i nemaju značajan utjecaj na organizme na Zemlji. [16]

S obzirom da se utjecaj kozmičkih zraka mijenja ovisno o izgledu magnetnog polja, za određivanje utjecaja na ionizaciju, a time i na biološke organizme, odabran je slučaj B opisan u poglavlju 2.2.2 kao realističniji opis magnetnog polja i količine ionizacije. [18]

3.2.1 Korišteni modeli

Za dobiti podatke o količini ozona i količini UVB i UVA zraka koje dođu do Zemlje i njihovog utjecaja na DNA potrebno je bilo napraviti model kemijskog sastava atmosfere (*engl. Goddard Space Flight Center*, GSFC) i model ionizacije (paket CORISKA, *engl. COsmic Ray SIMulations for KAscade*) koji se dodaju u model kemijskog sastava kao izvor NO_y i HO_x (obje važne obitelji spojeva u reakcijama oštećenja ozona). Uz to, potreban je model troposferskog ultraljubičastog i vidljivog zračenja (*engl. Tropospheric ultraviolet and visible*, TUV) za izračun spektralnog zračenja, koeficijentata fitolize i biološki učinkovitog zračenja. Korišteni modeli nam zapravo služe da bi opisali utjecaj primarnog i sekundarnog zračenja na atmosferu te time i na biosferu. [18]

Ionizacija pomoću SN CRs je izračunata koristeći tablice navedene u radu „Lookup tables to compute high energy cosmic ray induced atmospheric ionization and changes in atmospheric chemistry“ (Atri et. al 2010), generiranih pomoću paketa CORSIKA, koji kombinira visoko i niskoenergetske modele interakcije s načinom transporta CR u zraku. Tablice daju ionizaciju za primarne čestice s energijom od 300 MeV do 1 PeV, za 46 različitih visina, od tla do 90 km. Za dobivanje podataka koriste se protoni primarne enegije između 10 GeV i 1 PeV. Model kemijskog sastava atmosfere je napravljen korištenjem GSFC, što je 2D atmosferski kemijski i dinamički model. Dvije prostorne dimenzije modela su visina i širina. Zemljopisna širina odjeljenja je na 18 jednakih pojaseva od pola do pola, a nadmorska visina ima 58 ravnomjerno raspoređenih logaritamskih razina tlaka, međusobno udaljenih 2 km, od tla do visine od 116 km. Podaci se koriste za dobivanje izraza koji opisuje fotolizu, kojeg koristimo da bi izračunali stopu fotolize pod utjecajem Sunčeve svjetlosti. Model uključuje utjecaj vjetrova, miješanje na malim skalama, varijacije Sunčevog ciklusa i heterogene procese (sulfatne dimove i kemijske spojeve na polarnim oblacima u stratosferi). Sadrži 65 kemijskih spojeva koje spajamo u obitelji, na primjer: O_x [O^3 , O, O(1D)], NO_y [N, NO, NO_2 , NO_3 , N_2O_5 , HNO_3 , ...], HO_x [H, OH, HO_2], Cl_y [Cl, ClO, HCl, HOCl,...], itd. [18]

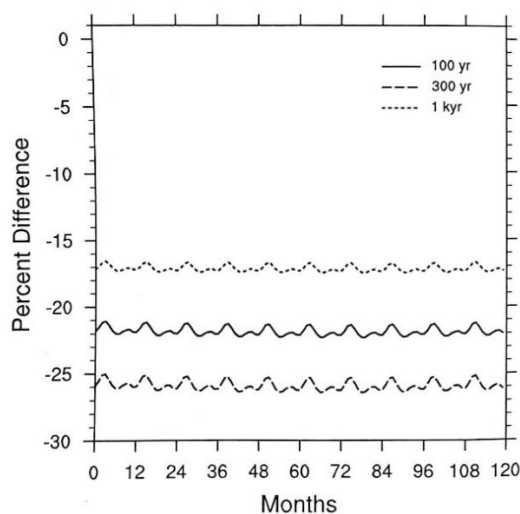
UVB zračenje nije jedina aktivna grupa zračenja koja djeluje na biološke organizme. Promjene u UVA zračenju i vidljivoj svjetlosti (400 nm-700 nm; *engl. photosynthetically active radiation*, tj. PAR) su također značajne za brojne biološke utjecaje. Za ionizirajuće radijacijske događaje postoji početno stvaranje molekula NO_2 koje ima jak pojas apsorpcije pri svjetlosti od 400 nm, i time dolazi do utjecaja na UVA i PAR radijacije na površini Zemlje. Osim tog, O_3 ima jaki apsorpcijski pojas pri svjetlosti od 600nm, pa kada se dogodi značajno smanjenje O_3 , UVB i PAR porastu, a UVA se smanji. Ove se složenosti mogu razlučiti samo s potpunim modeliranjem prijenosa zračenja i spektralnim biološkim težinskim funkcijama (*engl. Biological weighting functions*, tj. BWF). [18]

Također se koristi dostupan TUV model, to je 1D model koji se može pokrenuti na bilo kojoj lokaciji u bilo kojem vremenu. Koristi stalni kemijski sastav atmosfere, ali i mogućnost specificiranja gustoće stupaca za različite molekule, nama bitne O_3 , NO_2 , SO_2 . Postavljeni su uvjeti vedrog neba i modeliranja su se radila u podne. Model TUV proizvodi spektralno zračenje i integrirano zračenje za UVB, UVA i PAR, ali također su dostupni i mnogi BWF-ovi unutar modela. BWF kvantificira učinkovitost ovisnu o valnoj duljini za biološki ishod kao što je oštećenje DNA. TUV spaja izračunato spektralno zračenje s ugrađenim BWF-ovima kako bi se proizvelo usrednjeno zračenje ili relativni utjecaj. [18]

Za procjenu biološkog utjecaja koristi se potpuna slika radijacijskog zračenja s ovisnosti molekula O_3 , NO_2 o geografskoj širini i vremenu, tako što se generira polje zračenja na Zemljinoj površini i spaja s utjecajem BWF-ova. [18]

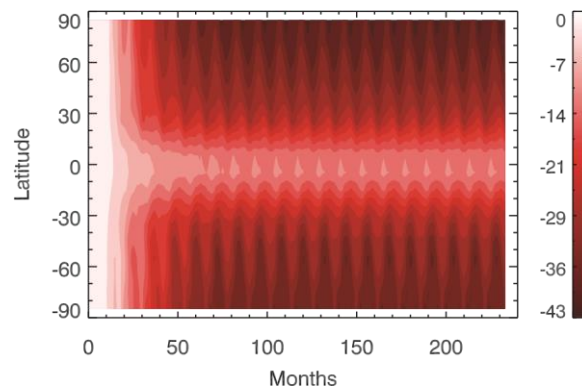
3.2.2 Rezultati istraživanja

Simulacija atmosfere provedena je za tri vremenska razdoblja nakon dolaska CR do Zemlje korištenjem ionizacijskih modela. Nakon 1 godine izvođenja modela atmosfere unesen je izvor CR ionizacije u stabilnom stanju. Primijećeno je smanjenje koncentracije ozona O_3 već i nakon 10 godina, u odnosu na kontrolni rad u koji nije unesen izvor CR ionizacije. Vremenska razdoblja nisu određena, već se gleda promjena ovisno o trenutku početka mjerenja i simulacija. S obzirom da mjerenja nisu povezana s određenim datumom, vremenska skala služi samo da bi se prikazao korišteni vremenski okvir, a nulti dan je zapravo dan počeka korištenja modela unutar modela atmosfere. [18]



Slika 5. Globalno usrednjena promjena u koncentraciji ozona pri utjecaju ionizacije kozmičkih zraka, za 3 vremenska razdoblja nakon puštanja simulacije kozmičkih zraka u atmosferski model, prikazana u postocima u usporedbi s kontrolnim testom bez utjecaja ionizacije kozmičkih zraka. [18] (Slika preuzeta s [18])

Za početak promatramo razinu ozona u različitim vremenskim intervalima nakon početka simulacije kozmičkim zrakama, nakon 1 godine puštanja atmosferskog modela (slika 5). Periodičnost ovisi o godišnjim dobima, s obzirom da je razina ozona povezana s fotolitičkim reakcijama. [18]

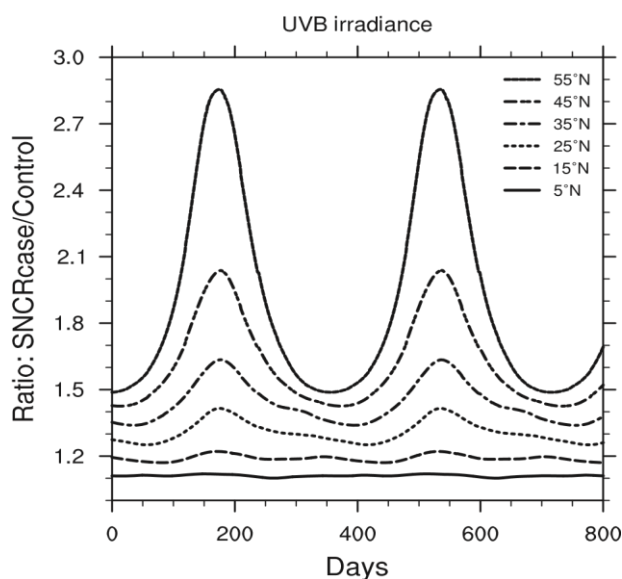


Slika 6. postotak razlike količine ozona ovisno o zemljopisnoj širini za vremensko razdoblje od 300 godina od početka simulacije u odnosu na kontrolni test. [18] (Slika preuzeta s [18])

Za vremenski period od 300 godina promatramo ovisnost gustoće ozona o geografskoj širini u odnosu na kontrolni test bez utjecaja kozmičkog zračenja (slika 6). Ovisnost širine o vremenu je za sva tri vremenska razdoblja slična, s maksimalnim smanjenjem 38% za slučaj od 100 godina, 43% za period od 300 godina i 31% za period od 1000 godina. Za promatrani slučaj od 300 godina sa slike 2 vidimo da pod konstantnim tokom kozmičkih zraka dolazi do stabilnog stanja nakon nekoliko godina, gdje je najveće smanjenje gustoće ozona u odnosu na na polovima (-90° i 90° geografske širine) i iznosi 43%, a najmanje smanjenje gustoće je na ekvatoru, nešto više od 10%. [18]

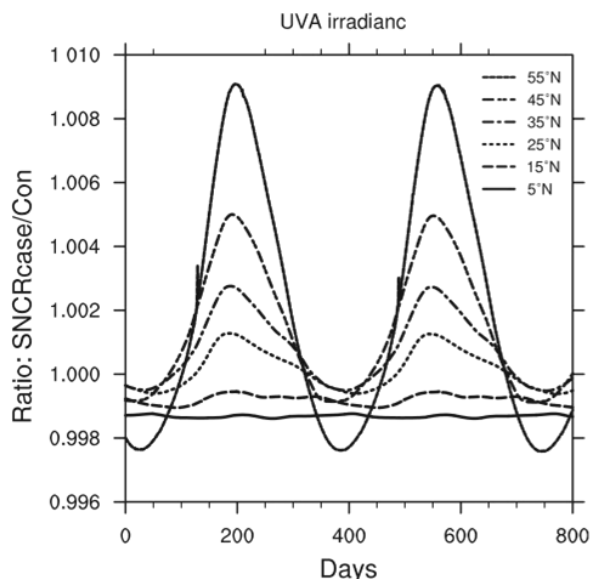
Najveće smanjenje događa se nakon 300 godina i uvjeti gdje je smanjenje ozona oko 26% (slika 5) i lokalizirano smanjenje veće od 10% (slika 6) zadržavaju se nekoliko stotina godina. Tako da uzimamo slučaj za vremenski period od 300 godina da bi promatrali povećanje transmisije UVB zraka i utjecaja na DNA. [18]

Za određivanje promjene u UVB radijaciji na površini Zemlje promatramo omjer slučaja od 300 godina i kontrolnog test kao funkciju vremena (slika 7). Za promatrani uzorak uzimamo od 5° do 55° stupnjeva sjeverne geografske širine, s obzirom da je oko ekvatora simetrična gustoća, što vidimo iz slike 6, a veće je smanjenje sjeverno. Početni trenutak je odabran nakon postizanja stabilnog stanja za slučaj od 300 godina. Vrijednosti UVB radijacije se mijenjaju od 1.1 do 2.8, te za više geografske širine veće su sezonske promjene zbog većeg kuta upada sunčeve svjetlosti. [18].



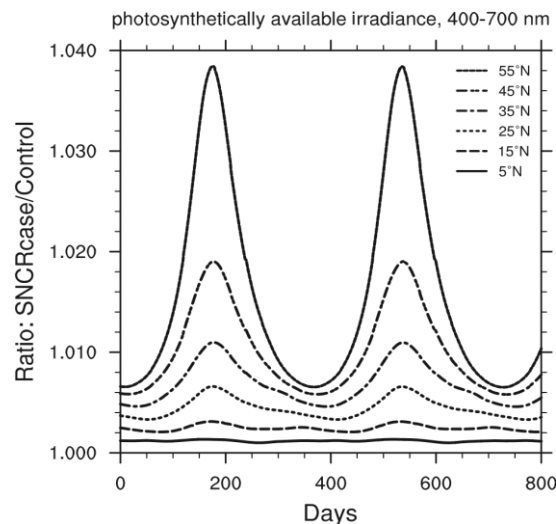
Slika 7. Omjer UVB radijacije na površini slučaja od 300 godina i kontrolnog testa kao funkcija vremena za sjevernu geografsku širinu od 5° do 55°. [18] (Slika preuzeta s [18])

Omjer UVA zračenja u odnosu na kontrolni test kao funkcija vremena je puno manji nego UVB zračenja i također se sa slike 8 vidi povećanje i smanjenje ovisno o poziciji i vremenu u godini. Povećanje UVA zračenja je posljedica smanjenja ozona pa i time manje mogućnosti apsorpcije, tako veći udio dolazi do površine, a smanjenje zračenja na površini je posljedica povećane koncentracije dušikova dioksida i njegove apsorpcije zračenja. Iako je utjecaj UVA zračenja slabiji od UVB i promjena u UVA zračenju mala, ona može jednim dijelom utjecati na smanjenje štete na organizme pod utjecajem UVB zračenja. [18]



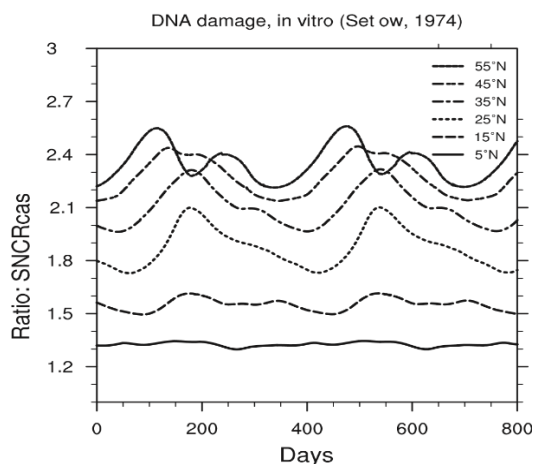
Slika 8. Omjer UVA zračenja na površini za slučaj od 300 godine u odnosu na kontrolni test kao funkcija vremena za sjeverne geografske širine od 5° do 55°. [18] (Slika preuzeta s [18])

S obzirom da je smanjena koncentracija ozona i manja mogućnost apsorpcije UVB zraka, vrijednosti PAR-a su na svim geografskim širinama povećane. Očekivanje je da bi povećanje u PAR-u trebalo dovesti do veće fotosinteze. Najveće povećanje je na višim geografskim širinama, što može imati pozitivan učinak na biljke koje imaju kraću sezonu rasta i manju dostupnu stopu radijacije. Omjer povećanja PAR-a u slučaju pod utjecajem kozmičkih zraka na kontrolni test bez kozmičkih zraka vidimo na slici 9. Nema znatnog porasta PAR-a na nižim geografskim širinama, ali pri višim geografskim širinama porast može utjecati na smanjenje utjecaja UVB zračenja. [18]

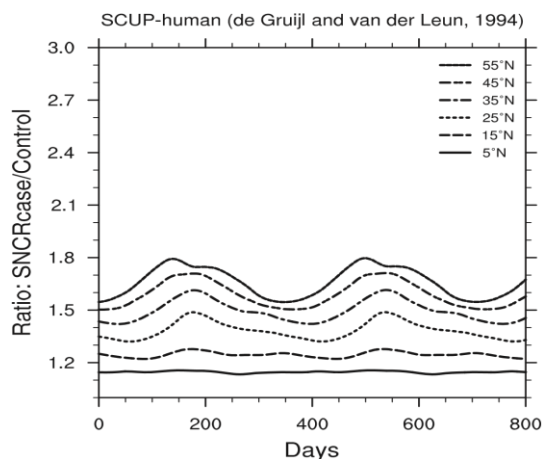


Slika 9. Omjer vrijednosti PAR-a za slučaj pod djelovanjem kozmičkih zraka i kontrolnog testa kao funkciju vremena bez utjecaja kozmičkih zraka za sjeverne geografske širine od 5° do 55°. [18] (Slika preuzeta s [18])

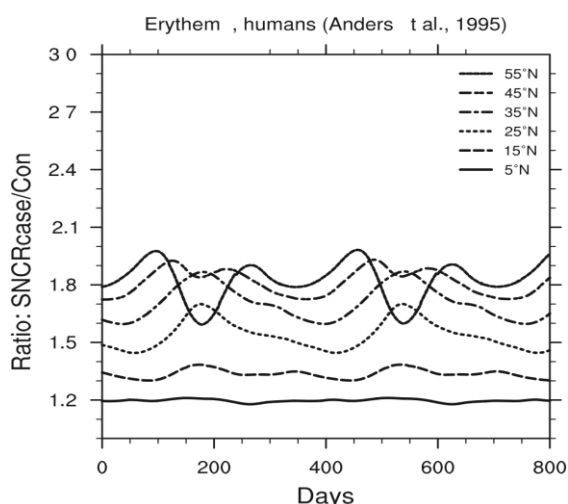
Određivanje utjecaja na organizme pod utjecajem promjena u radijaciji je vrlo kompliciran i ovisan o valnoj duljini. No za pojednostavljenje koriste se težinske funkcije (BWF) i dobivamo omjer za DNA oštećenje (slika 10), raka kože u ljudi (slika 11), osipa (slika 12), zamućenja vida u svinja (slika 13) i kontrolnog testa bez utjecaja kozmičkog zračenja. Oštećenje je najveće kod DNA, ali to je primarno zato što se promatra učinak na голу DNA, tj. za izračun su korištene BWF koje su vrlo malo vjerojatne da postoje u prirodi. Zbog tog se također koriste BWF raka kože, katarakta (zamućenje vida) i eriteme (osipa) koji su relevantni za veće organizme. [18]



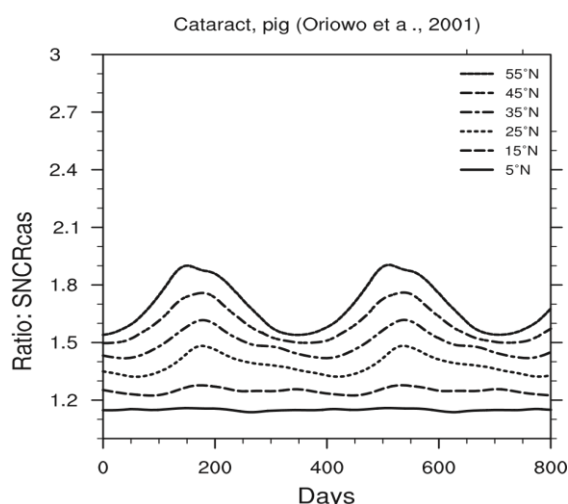
Slika 10. Omjer površinskog oštećenja DNA, pod utjecajem kozmičkih zraka, i kontrolnog testa za sjeverne geografske širine od 5° do 55°. [18]
(Slika preuzeta s [18])



Slika 11. Omjer površinskog raka kože, pod utjecajem kozmičkih zraka, i kontrolnog testa za sjeverne geografske širine od 5° do 55°. [18]
(Slika preuzeta s [18])



Slika 12. Omjer površinskog osipa, pod utjecajem kozmičkih zraka, i kontrolnog testa za sjeverne geografske širine od 5° do 55°. [18]
(Slika preuzeta s [18])



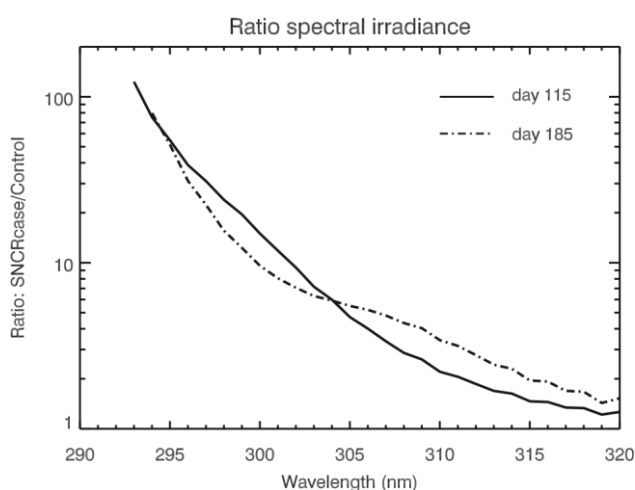
Slika 13. Omjer površinskog zamućenja vida kod svinja, pod utjecajem kozmičkih zraka, i kontrolnog testa za sjeverne geografske širine od 5° do 55°. [18]
(Slika preuzeta s [18])

Iz slika 11 i 13 primjećujemo porast, od 1.8 puta do 2.1 puta, oštećenja pri višim geografskim širinama i to točno na mjestima vrhunaca porasta UVB i UVA zračenja, oko 200. i 550. dana. Oštećenja se također mijenjaju periodično u vremenu ovisno o količini zračenja koja dolazi. Na slikama 10 i 12 vidimo kako oštećenje u DNA i osipu na koži zapravo doživljava pad u trenutku najveće radijacije, ali u trenucima prije i poslije maksimuma radijacije doživljavaju

svoj maksimum, kada promatramo za sjevernu geografsku širinu od 55° . Oštećenje u DNA raste čak i približno do 2.7 puta za geografsku širinu od 55° .

Efekte na primarnu produktivnost bi trebali imati najveći utjecaj na ukupni ekosistem, zato nam je važno promatrati inhibiciju sinteze u fitoplanktonima. Najveći porast se događa u inhibiciji dušika u fitoplanktonima na Antarktici (slika 14) [18], gdje također vidimo maksimum u trenutku maksimuma količine zračenja koje dođe do površine. Za geografsku širinu od 55° maksimum je za otprilike 1.45 puta veći pri utjecaju eksplozije supernove u odnosu na kontrolni test, bez utjecaja zračenja, ali to je zapravo vrlo mali utjecaj. Također se promatra općenita šteta u biljkama pod utjecajem radijacije (slika 15), koja također pokazuje veliki porast, do otprilike 4.5 puta, u odnosu na kontrolni test, ali također za geografsku širinu od 55° ima lagani pad u trenutku dostizanja maksimuma UVB i UVA zračenja, kao i DNA oštećenje.

Očekivano je da bi se grafički količina UVB i DNA oštećenje trebali poklapati, ali na višim geografskim širinama nemamo takvo ponašanje. Posljedica tog je što je UVB širokopojasna integrirana vrijednost, dok je oštećenje DNA (kao i drugi rezultati) spoj spektralnog zračenja i (spektralnog) BWF-a, tj. ovisno o tome na koje valne duljine je utjecala kemijska promjena atmosfere, mijenja se biološki utjecaj. Ovu razliku vidimo na slici 14, koja prikazuje omjer spektralnog zračenja uspoređujući SN slučaj s kontrolnim radom, na 55° sjeverne geografske širine, na dane 115 i 185. Dan broj 115 odgovara vremenu kada se UVB i oštećenje DNA prate zajedno, dok dan broj 185 odgovara vremenu kada je UVB još uvijek visok, ali je oštećenje DNA smanjeno. Ova razlika je zbog toga što 185. dan ima manje pojačanja u kraćim valnim duljinama u usporedbi sa 115. danom, a kraće valne duljine mnogo su učinkovitije u izazivanju biološke štete. Stoga je rezultat manje povećanje oštećenja 185. dana u usporedbi sa 115. danom. [18]



Slika 14. Omjer spektralne radijacije u UVB pojasu u usporedbi s kontrolnim testom, za 55° sjeverne geografske širine u 115. i 185. danu. [18] (Slika preuzeta s [18]).

Također slično promatranje vrijedi i za oštećenje kod biljaka. S obzirom da su BWF vrlo ovisno o valnim duljinama, BWF za oštećenje u biljaka strmo opadaju za valne duljine veće do 305 nm. Znači da je utjecaj valnih duljina UVB-a obrnuto proporcionalan utjecaju BWF-a, za manje valne duljine UVB-a porast u BWF-a je puno veći, nego za veće valne duljine. Također UVA (315 nm - 400 nm) zračenje umanjuje utjecaj SN zračenja, tj. utjecaj UVB zračenja, pa tako i smanjuje biološku štetu na organizme. Zato nam je vrlo bitna potpuna spektralna analiza modela radioaktivnog prijenosa. [18]

Da bi se uopće mogao odrediti kakav utjecaj na biosferu rezultati pokazuju kao analogija uzima se današnja ozonska rupa poviše Antartike s 50%-60% oštećenja u ozonu. Iako su rezultati za utjecaj supernove dali maksimalno 40% oštećenja, utjecaj supernove traje stoljećima s gotovo globalnim utjecajem. Brojna istraživanja su promatrala utjecaj na primarne proizvođače pod utjecajem smanjenja ozona. Pokazalo se da za 50%-60% smanjenja ozona dolazi do smanjenja produktivnosti fitoplanktona oko Antarktike za nekoliko posto. Ali prirodna varijabilnost u produktivnosti varira oko 25% ovisno o sunčevom zračenju, dostupnosti hranjivih tvari, temperaturi vode, itd. U mjerenjima pod utjecajem supernove pokazalo se povećanje u inhibiciji produktivnosti fitoplanktona od nekoliko posto do 30%. To povećanje inhibicije moglo je imati primjetan, ali ne i katastrofalan učinak na ekosustav. [18]

4 Otvorena pitanja

Otprilike svako 30 godina u našoj galaksiji eksplodira supernova, što znači da je njihov utjecaj na Zemlju neizbježan [19]. Mnogo desetljeća smanjenje ozona je bio glavni efekt eksplozije supernove koji se analizirao, ali postoje i drugi bitni učinci ionizacije koji su također mogli indirektno imati znatan utjecaj na biosferu pa i na evoluciju. [4]

Jedan ispitivani učinak povećane atmosferske ionizacije od SNCR-a (*engl. Supernova cosmic rays*, kozmičkih zraka supernove) bila je fiksacija dušika. Uobičajeno je dušik u atmosferi organizmima nedostupan radi njegove trostruke veze u N_2 . Pod utjecajem ionizacije kozmičkih zraka, smatra se da je povećanje dostupnog dušika otprilike 10%. Obzirom da je grmljavina dominantan izvor fiksacije dušika, za veliko povećanje brzine grmljavine moglo bi doći do većeg taloženja nitrata. [4]

Atmosferska električna polja prisutna u grmljavinskim oblacima nisu dovoljno jaka da iniciraju električni raspad. Međutim, elektroni generirani u elektromagnetni pljuskovima kozmičkih zraka imaju dovoljno energije da utječu na druge elektrone i ioniziraju ih, formirajući lavinu elektrona. Nakon dostizanja kritične energije, i nastajanja relativističke lavine odbjeglih elektrona, dolazi do naglog pražnjenja i oslobađa se energija lavine u obliku grmljavinske oluje. Postavlja se hipoteza kako povećanje intenziteta kozmičkih zraka povećava brzinu ionizacije u atmosferi i to rezultira povećanom brzinom stvaranja oblaka. Povećanjem oblačnosti, manja količina zračenja u vidljivom dijelu spektra dolazi do površine Zemlje, a to dovodi do globalnog zahlađenja. Smatra se kako temperatura Zemljine površine može sadržavati informacije o povezanosti količine taloga nitrata, NO_3 , o eksploziji supernove kako je količina nitrata direktno povezana s količinom NO_2 . Analizom količine slojeva nitrata na Zemljinoj površini otkrivena su četiri izvanredna i uska šiljka NO_3 taloga. Tri od tih šiljaka identificirana su kao podudaranja s tri povijesne supernove SN1181, SN1572 i SN1604. Četvrti šiljak je mnogo kasnije, novo otkriće iz 1997. godine, identificiran s ostatkom galaktičke supernove (SN) RXJ0852-4622 koji je otkriven 1997. [2] Pretpostavke i zaključci zapravo ovise o velikom porastu frekvencije grmljavine, koja se ne može procijeniti.

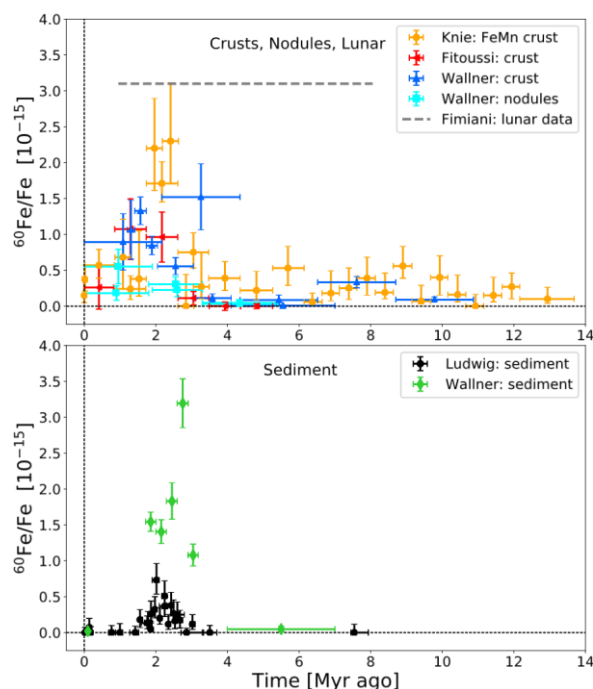
S druge strane veliki porast munja će uzrokovati veliki porast broja započetih požara, s obzirom da su munje glavni uzročnik požara, nakon ljudi. Prije otprilike 7 milijuna godina došlo je do slučajnog porasta broja šumskih požara u cijelom svijetu, što je vjerojatno odgovorno za pretvorbu šuma u savane diljem svijeta. Postavlja se hipoteza kako bi povećanje munja moglo pružiti objašnjenje za porast požara na raznim kontinentima i klimatskim zonama gdje nije bilo objašnjenja. Dokazi za povećanje broja požara nakon udarnih događaja mogu se pronaći u čađi i drugim sedimentima povezanim s ugljikom. Dok bi požari povezani s udarnim događajima pokazali iznenadni skok, očekivali bismo da će se šumski požari uzrokovani kozmičkim zrakama nakon eksplozije supernove odvijati tijekom puno duljeg vremenskog razdoblja, npr.

oko 100 godina za svaku SN. S tim razmišljanjima postavlja hipoteza kako je obližnja eksplozija supernove tokom dužeg perioda utjecala na pretvorbu šuma u savanu i time se smatra i čimbenikom u evoluciji hominina u dvonošca, tj. imala ulogu u evoluciji ljudi. [4]

Ako prihvatimo da su taloženje NO_3 i klimatski utjecaji potaknuti povećanjem ionizacije na stratosferskim visinama, i izgledaju vremenski podudarni s poznatim ili pretpostavljenim galaktičkim supernovama, sigurno postoje i dodatni učinci koje bi eksplozija supernova mogla imati na Zemlju ionizacijom atmosfere. Mogući efekt bio povećanje učestalosti pojavljivanja polarne svjetlosti zbog taloženja energije u atmosferi na velikim visinama, izazvane osvjetljenjem X- i γ -zrakama eksplozije supernove, u razdoblju od 1-2 godine, i to ne samo u polarnim regijama. [5]

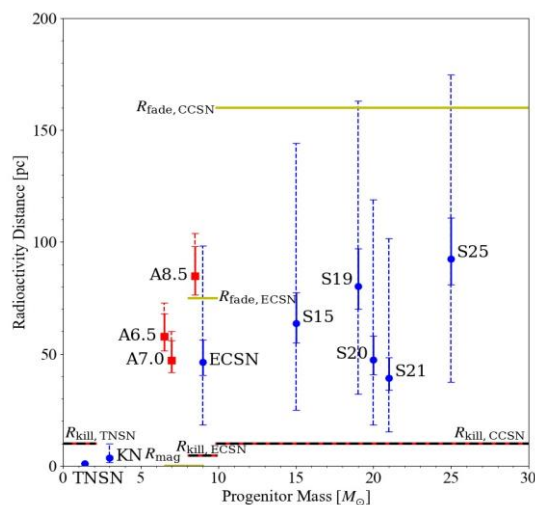
Na udaljenosti 10 pc od Zemlje je u proteklih milijardu godina eksplodiralo jedna ili više supernova s drastičnim učincima na biosferu, potencijalno uzrokujući masovno izumiranje. Pretpostavlja se da su tako bliske eksplozije ostavile vidljiv živi sloj radioizotopa na Zemlji, te je pronađen sloj iridija iz razdoblja kraja mezozoika za koji se smatra da je uzrokovao izumiranje dinosaura. Analogno tome, za supernove na udaljenosti od 100 pc od Zemlje se smatra da se događaju svako nekoliko milijuna godina i njihov utjecaj na biosferu se očituje u malim uznemirenjima u biosferi uz radioizotopske naslage. [19]

Korištenjem vrlo dobre osjetljivosti akceleratorске spektrometrije mase (*engl. Accelerator mass spectrometry*, AMS; to je tehnika nuklearne fizike niske energije koja odvaja i izravno broji jezgre dugoživućih izotopa) otkriven je sloj ^{60}Fe (vrijeme poluraspada 2,6 milijuna godina) u uzorku feromanganske (FeMn) kore s dna Tihog oceana, a potvrđeno je drugom FeMn korom iz nekog dijela u Pacifiku. Naknadna mjerenja FeMn kore dodatno su potvrdila početne rezultate. Prva serija uzoraka sedimenta iz sjevernog Atlantika otkrila je povećanje ^{60}Fe , ali je zahtijevalo mnogo dulje vrijeme taloženja (> 0.4 milijuna godina) nego što se očekivalo za supernove. To je kasnije potvrđeno u uzorcima sedimenta Indijskog oceana. Pronađen je signal u različitim Fe-Mn korama i nodulima, kao i u nekoliko dubookceanskih sedimenata, u mikrofossilima koji sadrže željezo. Svi podaci o sedimentu otkrivaju vremenske skale taloženja >1 milijuna godina. Na slici 15 vidimo vremensku starost navedenih pronađenih ostataka. Prije 2 do 3 milijuna godina se vidi vrhunac taloga željeza, što ukazuje na barem jednu supernovu u toj epohi. Također prije otprilike oko 8 milijuna godina postoji naznaka drugog vrhunca sedimenta željeza. Uz vremenski datirane navedene podatke, postoje i podatci željeza s mjesečeva regolita, donesenog Apollom, koji upućuju na nužnu eksploziju supernove na udaljenosti otprilike oko 1000 pc prije 2 milijuna godina. [19]



Slika 15. Globalna i lunarna detekcija ^{60}Fe kroz vremenski period od danas do prije 14 milijuna godina, bez korekcije za raspad. Svi pronađeni podaci pokazuju signal oko 2-3 milijuna godina. Razlike u amplitudi mogu odražavati varijacije unosa željeza ili varijacije geografske širine u ispadanju željeza. Gornja slika pokazuje: omjeri $^{60}\text{Fe}/\text{Fe}$ u dubokooceanskim Fe-Mn korama. Donja slika daje $^{60}\text{Fe}/\text{Fe}$ u dubokooceanskim sedimentima i prikazuje trajanje signala > 1 milijun godina. [19] (Slika preuzeta s [19]).

Mjesto proizvodnje opaženog ^{60}Fe signala mora biti kolaps jezgre supernove (*engl. Core-collapse supernova*, CCSN). Za bilo koji izvor nukleosinteze ^{60}Fe , supernovu ili nešto drugo, može se koristiti izmjereni utjecaj za procjenu udaljenosti do izvora. Slika 16 prikazuje rezultat jedne takve analize koja je koristila modele s različitim masama supernova, ali je također razmatrala proizvodnju ^{60}Fe u AGB zvijezdama (zvijezda divovskog ogranka, *engl. asymptotic giant branch*), supernovama tipa Ia (termonuklearnim, nastalima ponovnom aktivacijom fuzije bijelog patuljka nakon uzimanja energije zvijezde s kojom je u paru) i kilonovama (nastalima sudarom dvije neutronske zvijezde). Posljednje dvije su isključene zbog nevjerojatno i opasno male udaljenosti koju zahtijevaju njihovi mali utjecaji na taloženje otkrivene količine ^{60}Fe . AGB zvijezde su zvijezde male ili srednje mase (mase manje od 8 masa Sunca) u kasnoj evolucijskoj fazi svog života koje se tada pojavljuju kao crveni divovi u Hertzsprung-Russell dijagramu.[24] One postoje na odgovarajućim udaljenostima, ali vjerojatnost dospjeća željeza do Zemljine površine prije raspada je vrlo malo vjerojatna. Tako da je jedini utjecaj na biosferu moguć od kolapsa jezgre supernove. [19]



Slika 16. Procjena udaljenosti do izvora na temelju prikupljenih podataka o količini ^{60}Fe ovisno o različitim masama izvora. Udaljenost, D , je procijenjena pomoću $D \propto \sqrt{M_{ej,60}/\mathcal{F}_{60}}$ uz pretpostavku da se izotropno širi izbacivanje ^{60}Fe izvora mase, $M_{ej,60}$, i to dovodi do opaženog taloženja ^{60}Fe korigiranog raspadom u dubokim oceanima. Vodoravne linije služe za ograničenje mogućih udaljenosti, gornja je mjesto blijeđenja ostataka supernove i ne mogućnosti dostavljanja željeza do Zemlje, a donja isključuje termonuklearne supernove i klionove, tj radijus je „granica uništavanja“. Tako da na grafu vidimo samo dopuštene izvore željeza na temelju udaljenosti, a to su AGB zvijezde (crveno, označeno A) i kolapsa jezgre supernove (plavo, označeno S). Najvjerojatnije će kolaps jezgre supernove dostaviti željezo, uz dopušten širok spektar masa i udaljenostima od 30 pc do 150 pc [19]. (Slika preuzeta s [19])

Veliki problem predstavlja način prijenosa radioizotopa od izvora do dna oceana. Pretpostavka je da su čestice prašine način transporta kroz međuzvjezdani medij, koje također dalje interferiraju s drugim međuzvjezdanim materijalom. Postavljaju se pitanja o trajanju ovog procesa i postoji li ovisnost smjera gibanja čestica prašine sa smjerom gibanja izvora, ali to je vrlo malo vjerojatno. Očekivano je kako će utjecaj atmosfere i oceana uništiti informacije o geografskoj širini izvora i također mogu uzrokovati varijacije u gustoći taloženja na površini Zemlje, tako što je u određenim područjima oceanskog dna količina ^{60}Fe veća ili manja. [19]

5 Zaključak

U svemiru postoje brojni izvori zračenja koji često bombardiraju Zemlju radijacijom, od slabih do štetnih. Glavni promatrani izvor je eksplozija supernove, čiji utjecaj uvelike ovisi o njenoj udaljenosti, vremenu eksplozije i izgledu galaktičkog magnetnog polja (GMS) u trenutku njene eksplozije. U ovom radu promatrana je potencijalna eksplozija supernove na udaljenosti od 50 pc od Zemlje prije 2.6 milijuna godina. Glavni aspekt ovog rada je zapravo utjecaj kozmičkog zračenja na biosferu i organizme. Eksplozijom supernove nastaje primarno zračenje koje u doticaju s atmosferom reagira s njom i nastaje sekundarno zračenje. Bitnu razliku radimo između ionizirajućeg sekundarnog zračenja, i njegovog indirektnog utjecaja, i neionizirajućeg sekundarnog zračenja, i njegovog direktnog utjecaja.

Direktan utjecaj smatramo nastajanje muona i neutrona i mogućnost njihove propagacije do površine Zemlje i direktno povećanje radijacije na Zemlji. To može dovesti do razbijanja dvostruke veze DNA, veće učestalosti pojavljivanja raka, promjena u hormonima, količini sna i reprodukciji. Ali usporedbom sa intenzitetom zračenja koje dolazi od supernove, s onim koje se javlja pri konstantnim utjecajem od Sunca, uočeno je kako povećanje zračenja zbog utjecaja supernove traje nekoliko tjedana te je stoga smatramo zanemarivim.

S druge strane najznačajniji efekt daje upravo ionizirajuća radijacija koja zapravo mijenja kemijski sastav atmosfere, tj. dovodi do smanjenja stratosferskog ozona. Posljedica toga je povećano UVB zračenje na površini Zemlje i time i štetan utjecaj tog zračenja na organizme. Korištenjem brojnih modela za simulaciju izgleda atmosfere, izgleda primarnog zračenja, promjene u kemijskom sastavu pri djelovanju zračenja, utjecaja na DNA i druge organe došlo se do podataka koji su upućivali na pojačanu količinu zračenja za pretpostavljenu eksploziju supernove prije 2.6 milijuna godina na udaljenosti od 50 pc. Tako je uočeno smanjenje stratosferskog ozona za 40% 300 000 godina nakon eksplozije supernove, koje je globalno gledano bilo ujednačeno. Za taj vremenski period od 300 000 godina nakon eksplozije supernove uočen je porast u UVB zračenju za 3 puta od kontrolnog testa atmosferskog sastava bez djelovanja kozmičkih zraka. Također se uočava povećanje u PAR radijaciji, za malu količinu, od 1.04 puta, ali vrlo značajnu, jer on utječe na smanjenje utjecaja UVB zračenja. Pa se sukladno tome vidi pad u oštećenju DNA točno pri maksimumu promjene PAR i UVB zračenja, baš zbog samog djelovanja PAR-a. Također se iz istog razloga događa smanjenje osipa na koži u ljudi i oštećenja u biljaka u danima maksimalnog povećanja utjecaja UVB i PAR zračenja. Ali se zato povećava učestalost sive mreže u svinja za faktor od 2 puta. Ovi podaci uvelike ovise o odabranim biološki težinskim funkcijama i početno postavljenim uvjetima. Ali nam mogu dati neku opću sliku utjecaja eksplozije supernove na biosferu. Može se zaključiti kako je eksplozija supernove najvjerojatnije imala utjecaj u promjeni balansa ekosistema i potencijalno uvelike utjecala na neke vrste, pozitivno ili negativno.

Drugi pokazatelj na potencijalnu eksploziju supernove pronalazimo u količini i vremenskom datiranju pronađenih radioizotopa u Zemljinoj kori. Uzimanjem uzoraka brojnih sedimenata i kore, uočena je povećana koncentracija izotopa željeza ^{60}Fe prije otprilike 2.6 milijuna godina.

No još uvijek postoji mnogo neodgovorenih pitanja i otvorenih hipoteza na utjecaj eksplozije supernove na biosferu. Postavlja se pitanje i koji bi drugi radioizotopi, koji se talože na Zemlji i Mjesecu, mogli upućivati na eksploziju supernove i njenu prašinu. Bitno pitanje koje nam uvelike govori o izgledu magnetnog polja, a time i propagaciji kozmičkih zraka i njihovom utjecaju je identifikacija tipa supernove odgovorne za događaj prije 2.6 milijuna godina. Njeno mjesto i njen ostatak pa i njena poveznica sa značajkama u Lokalnom mjesuriću se postavljaju kao nepoznanice, ali bitne spoznaje za daljnji razvoj teorije o supernovama. A jedno od najbitnijih pitanja bi bilo da li je i koliko drugih supernova je postojalo u blizini Zemlje i može li se uspostaviti veza između bilo kojeg događaja supernove sa specifičnom perturbacijom u biosferi [19].

6 Literatura

- [1] Adrian L. Melott and Brian Thomas, *Astrophysical Ionizing Radiation and Earth: A Brief Review and Census of Intermittent Intense Sources*, *Astrobiology*, br. 4, 2011.
- [2] Dimitra Atri, Adrian L. Melott, *Cosmic rays and terrestrial life: A brief review*, *Astroparticle Physics*, br. 53, 2014.
- [3] A. L. Melott, B. C. Thomas, M. Kachelreib, D. V. Semikoz i A. C. Overholt, *A Supernova at 50 pc: Effects on the Earth's Atmosphere and Biota*, *The Astrophysical Journal*, 2017.
- [4] Adrian L. Melott i Brian C. Thomas, *From Cosmic Explosions to Terrestrial Fires?*, *The journal of geology*, br. 127, 2019.
- [5] A. F. Iyudin, *Terrestrial impact of the galactic historical SNe*, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, br. 64, 2002.
- [6] Britannica, Supernova, URL: <https://www.britannica.com/science/supernova> (21. 09. 2022.)
- [7] Earthsky, Huge Local Bubble drives formation of new stars, URL: <https://earthsky.org/space/expansion-of-local-bubble-drives-star-formation-near-our-sun/> (21. 09. 2022.)
- [8] Hubblesite, NASA, Illustration of the Local Bubble's star-forming regions, URL: <https://hubblesite.org/contents/media/images/2022/006/01FS4WPWJ1MDZBSZX2SZ27RZK9> (21. 09. 2022.)
- [9] Oxford Academic, Galactic magnetic fields and hierarchical galaxy formation, URL: <https://academic.oup.com/mnras/article/450/4/3472/990726> (21. 09. 2022)
- [10] Scholarpedia, Galactic magnetic fields, URL: http://www.scholarpedia.org/article/Galactic_magnetic_fields (21. 09. 2022)
- [11] sinkrotronsko zračenje. *Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje*. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021. Pristupljeno 21. 9. 2022. <<http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=69885>>.
- [12] Science direct, Faraday Effect, URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/faraday-effect> (21. 09. 2022)
- [13] Britannica, Dynamo theory, URL: <https://www.britannica.com/science/dynamo-theory> (21.09.2022)
- [14] Cosmos, Type II Supernovae, URL: <https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/t/Type+II+Supernova> (21.09.2022)

- [15] Oxford Academic, Global diffusion of cosmic rays in random magnetic fields, URL: <https://academic.oup.com/mnras/article/457/4/3975/2589001> (21.09.2022)
- [16] Centers for Disease Control and Prevention, National Center for Environmental Health, UV radiation, URL: <https://www.cdc.gov/ncmh/features/uv-radiation-safety/index.html> (21.09.2022)
- [17] National Cancer Institute, UV radiation, URL: <https://www.cancer.gov/publications/dictionaries/cancer-terms/def/uvb-radiation> (21.09.2022)
- [18] Brian C. Thomas, *Photobiological Effects at Earth's Surface Following a 50 pc Supernova*, *Astrobiology*, br. 18, 2018.
- [19] Brian D. Fields, John R. Ellis, Walter R. Binns, Dieter Breitschwerdt, Georgia A. deNolfo, Roland Diehl, Vikram V. Dwarkadas, Adrienne Ertel, Thomas Faestermann, Jenny Feige, Caroline Fitoussi, Priscilla Frisch, David Graham, Brian Haley, Alexander Heger, Wolfgang Hillebrandt, Martin H. Israel, Thomas Janka, Michael Kachelreiß, Gunther Korschinek, Marco Limongi, Maria Lugaro, Franciole Marinho, Richard A. Mewaldt, Jesse Miller, Ryan C. Ogliore, Michael Paul, Laura Paulucci, Mark Pecaut, Brian F. Rauch, Karl E. Rehm, Michael Schulreich, Ivo Seitenzahl, Mads Sørensen, Friedrich-Karl Thielemann, Francis X. Timmes, Brian C. Thomas, Anton Wallner, *Near-Earth Supernova Explosions: Evidence, Implications, and Opportunities*, *Astro2020 Science White Paper*, 2020.