

# Kosmički zraci

Skup različitih naelektrisanih čestica koje imaju izrazito visoke, relativističke ili ultrarelativističke kinetičke energije, a poreklom su iz udaljenih oblasti svemira, daleko izvan granica Sunčevog sistema

Primarni ili izvorni kosmički zraci, a nekada je u upotrebi i naziv kosmičko zračenje

Danas se uglavnom pravi jasna distinkcija između naelektrisanih čestica visokih energija koje dolaze sa Sunca (nekada nazivanih kosmički zraci sa Sunca) i onih koji nastaju van Sunčevog sistema

Energije pojedinih čestica visokih energija koje dolaze sa naše zvezde (uglavnom protona) mogu dostići i vrednosti reda  $10^{9-10}$  eV po čestici

## Anomalni kosmički zraci

Poreklo im se obično objašnjava jonizacijom neutralnih čestica međuzvezdane materije (npr. ultraljubičastim zračenjem Sunca, sudarnom jonizacijom sa protonima Sunčevog vetra i dr) koje su nekako dospele u Sunčev sistem, te im se zatim putanja modifikuje usled interakcije sa magnetnim poljem Sunca, a konačno su ubrzane (uglavnom do energija reda  $10^{7-8}$  eV) konkretnim netermalnim mehanizmima, verovatno u spoljašnjim oblastima Sunčevog sistema

Relativistički režim

$$\mathcal{E}^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$$

$$\gamma \equiv 1/\sqrt{1 - v^2/c^2} > 1$$

Ultrarelativistički režim

$$\mathcal{E} \approx pc \quad \gamma \gg 1$$

$$pc \gg mc^2$$

Otkriće kosmičkih zraka se obično vezuje za Viktora Hesa, a naziv potiče od Milikena

Nakon otkrića radioaktivnosti od strane Bekerela, preovladavalo je mišljenje da naelektrisane čestice u atmosferi Zemlje potiču od procesa jonizacije radioaktivnim elementima sa površine naše planete

Hes je 1912. godine organizovao seriju eksperimenata koji su uključivali letove balonima do oko 5 km u visinu

U tu svrhu je koristio elektrometre, merne instrumente koji pokazuju prisustvo i/ili količinu naelektrisanja

Uspeo je da utvrdi da se veoma brzo pri usponu, sve više i više povećava broj naelektrisanih čestica, suprotno dotadašnjem mišljenju da bi trebalo da opada sa visinom

Kako se u početku smatralo da je priroda jonizujućeg zračenja, zaslužnog za stvaranje naelektrisanja u elektrometru, pretežno elektromagnetna, pri čemu je postalo jasno da dolazi iz vasiona, tako je i nastao, danas pomalo zbunjujući naziv kosmički zraci

Detekcija kosmičkih zraka ukazuje na prisustvo aktivnih mehanizama ubrzavanja naelektrisanih čestica u vasioni

Naporedo sa razvojem tehnika detekcije kosmičkih zraka, kosmičko sinhrotronsko i uopšte netermalno zračenje detektovano astronomskim posmatranjima takođe ukazuje na prisustvo ultrarelativističkih, netermalnih populacija, prevashodno elektrona, jer oni mnogo efikasnije gube energiju zračenjem od drugih masivnijih čestica

Već je prvi prodor u astronomiju izvan vidljivog dela elektromagnetnog spektra, tridesetih godina 20. veka upravo demonstrirao da su radio-izvori u velikom broju netermalni

Slično, kasniji razvoj  $\gamma$ -astronomije pružio je priliku i da se indirektno ubedimo u postojanje barionske komponente kosmičkih zraka

Usled npr. interakcije protona visokih energija sa protonima međuzvezdane materije, mogu nastati različiti pioni

Neutralni pioni se obično raspadaju na dva  $\gamma$ -kvanta, te su zaslužni za dodatnu emisiju komponentu u  $\gamma$ -području

Među posmatranim kosmičkim zracima, po broju ubedljivo ima najviše bariona

Konkretno, najveći je broj protona (jezgara atoma vodonika), te mnogo manje jezgara helijuma ( $\alpha$ -čestica) i najmanje jezgara težih elemenata, kao i leptoni, konkretno slobodnih elektrona

Odnos u broju protona i elektrona je reda 1%

Sastav kosmičkih zraka, odnosno relativna zastupljenost po broju za različite tipove čestica koje ih čine, ipak se donekle razlikuje od uobičajene zastupljenosti elemenata u Sunčevom sistemu, a zavisi i od energije

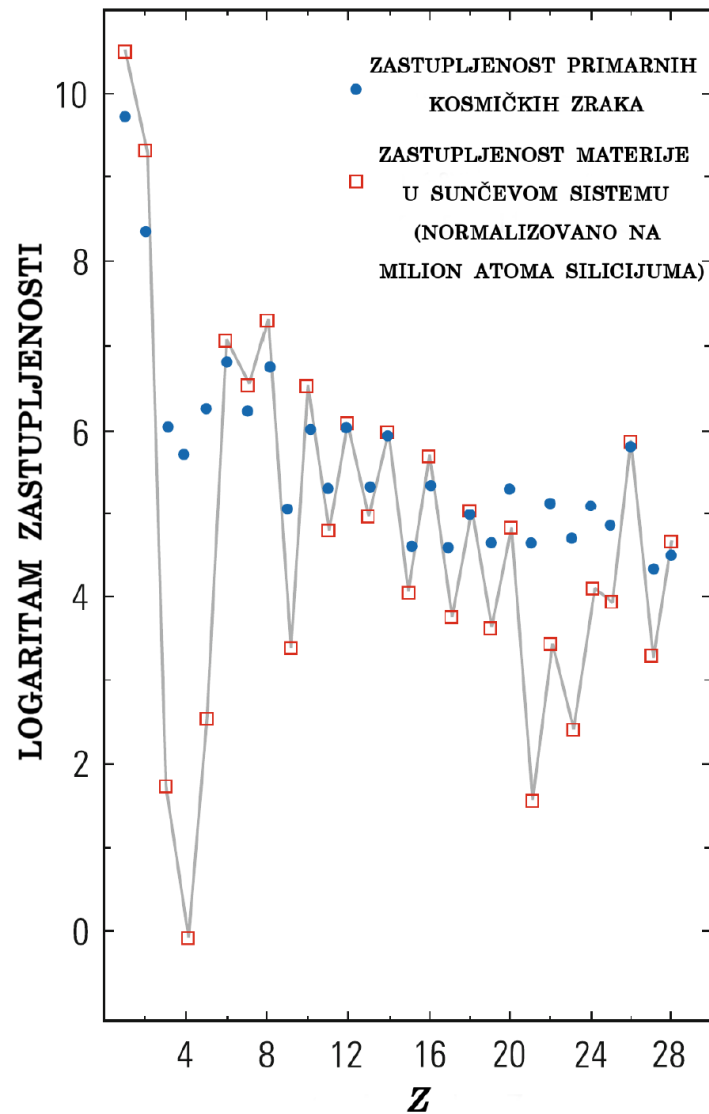
Primetan je npr. veći broj jona litijuma (Li), berilijuma (Be) i bora (B) koji ulaze u sastav kosmičkih zraka

Do toga, najverovatnije dolazi usled procesa (nuklearne) spalacije, odnosno fragmentacije jezgara težih elemenata

Za formiranje jezgara Li, Be i B, verovatno je primarni proces spalacija brzih jezgra ugljenika, azota, te kiseonika usled interakcije sa protonima i  $\alpha$ -česticama međuzvezdane materije

U smislu stabilnosti jezgara, konfiguracije sa parnim brojem i protona i neutrona (parno-parna jezgra) su najviše zastupljene, usled veće vezivne energije





Slika 1.1: Relativna zastupljenost po broju (u jedinici zapremine) za različite tipove čestica koje ulaze u sastav kosmičkih zraka u poređenju sa tipičnim vrednostima za materiju koja čini Sunčev sistem. Vrednosti su date u odnosu na milion atoma silicijuma (eng. *cosmochemical abundance scale*; prema [28]).

Posmatranje kosmičkih zraka čije su energije ispod od oko  $10^{9-10}$  eV po čestici (ta energija zavisi od tipa čestice) je znatno otežano unutar Sunčevog sistema, pojednostavljeno rečeno usled interakcije od spolja dolazećih naelektrisanja sa složenim magnetnim poljem Sunca koje je spregnuto sa Sunčevim vetrom, odnosno tzv. solarne modulacije

Za vreme porasta broja naelektrisanih čestica visokih energija sa Sunca (tokom pojačane aktivnosti Sunca), smanjuje se broj posmatranih kosmičkih zraka koji dolaze iz drugih oblasti svemira do nas

Forbušov efekat upravo predstavlja smanjenje broja pristiglih kosmičkih zraka do Zemlje diktirano aktivnošću Sunca

Broj posmatranih kosmičkih zraka opada sa porastom njihove energije (bar približno od nekih  $10^9$  eV po čestici)

Diferencijalni fluks  $F(\mathcal{E})$  predstavlja broj čestica koje posmatramo u jedinici vremena, po jedinici površine, u jediničnom prostornom uglu, u konkretnom infinitezimalno malom intervalu energija

Za energije veće od oko  $10^9$  eV, uglavnom se opisuje izlomljenim stepenim zakonom

Opšti oblik raspodele kosmičkih zraka po energijama je dat preko:

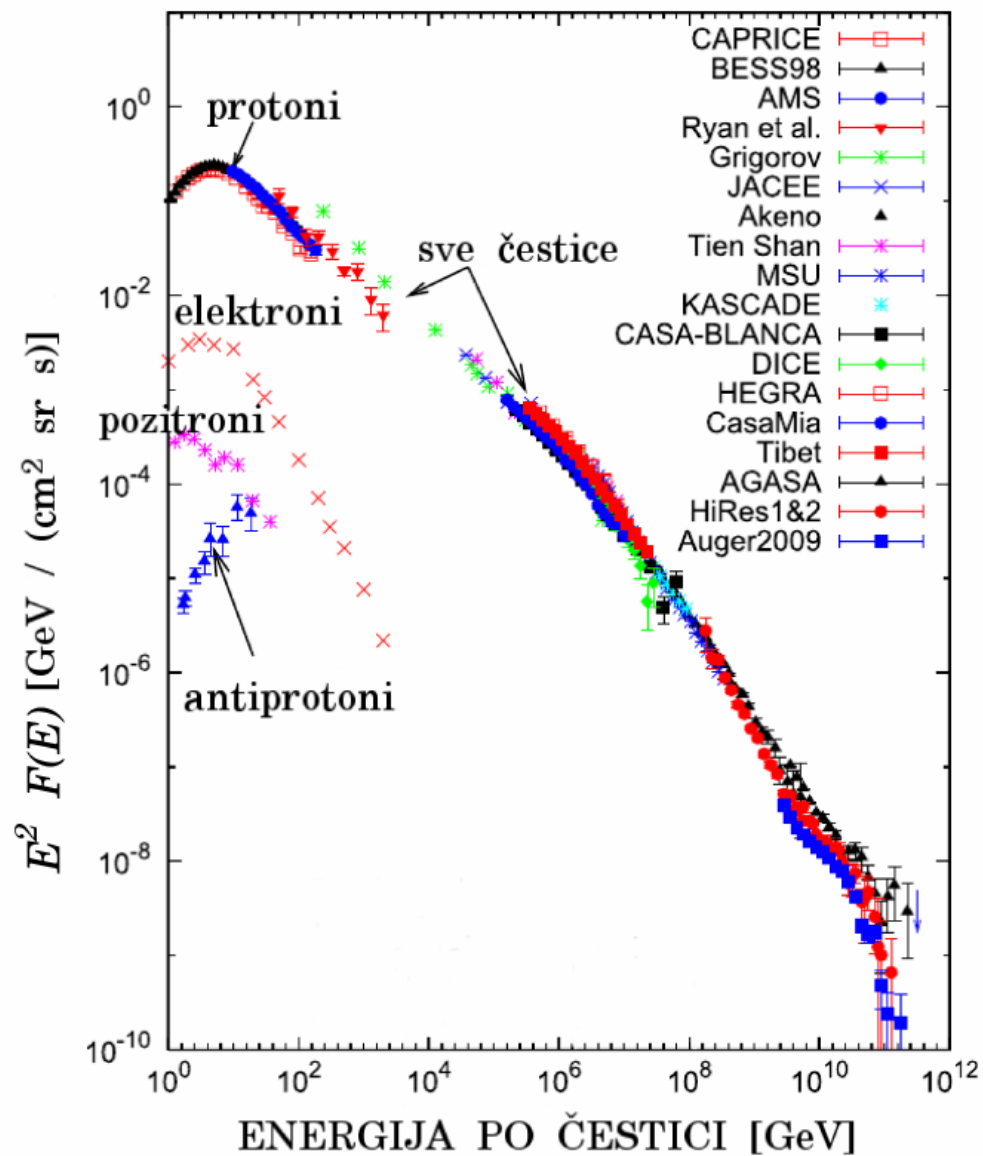
$$F(\mathcal{E}) \propto \mathcal{E}^{-x_{\mathcal{E}}}$$

Maksimum raspodele kosmičkih zraka po energijama je reda GeV-a

Najuočljivije strukture u raspodeli primarnih nukleona kosmičkih zraka su stepeni zakon sa spektralnim energijskim indeksom 2.7 od nekih  $10^9$  eV, zatim ustrmljavanje spektra na 3.1 od grubo  $10^{15-16}$  eV (tzv. koleno), kao i zaravnjivanje spektra opet na 2.7 od oko  $5 \times 10^{18}$  eV (tzv. članak)

Primetne su i finije strukture, kao npr. tzv. drugo koleno na  $2.3 \times 10^{17}$  eV

Različiti tipovi i poreklo izvora, kao i specifična svojstva konkretnih mehanizama ubrzavanja naelektrisanih čestica koji se u njima odvijaju, dovode do tih, posmatranih osobenosti energijskog spektra kosmičkih zraka



Slika 1.2: Raspodela posmatranih primarnih kosmičkih zraka (diferencijalni fluks)  $F(E)$  po energijama  $E \equiv \mathcal{E}$  (prema [74]).

Kinetička energija po čestici za pojedine detektovane kosmičke zrake može dostići vrednosti koje iznose čak i nešto više od  $10^{20}$  eV (tzv. oblast nožnih prstiju u energijskom spektru)

Kosmički zraci svedoče o izrazito burnim vasijskim procesima koji podrazumevaju ekstremno visoke energije

U okolini kolena je srednja stopa prijema jedna čestica po kvadratnom metru tokom godine, dok je u okolini članka jedna čestica po kvadratnom kilometru tokom godine

Na najvišim energijama, iznad oko  $5 \times 10^{19}$  eV, postaje značajna interakcija protona sa fotonima mikrotalasnog pozadinskog zračenja

Protoni tada gube veliki deo svoje energije, što bi onda trebalo da se oslikava naglim opadanjem diferencijalnog fluksa (tzv. GZK prekid ili granica)

Rezultat pomenute interakcije je nastanak piona, te njihov naknadni raspad

Ovim putem je i ograničena srednja slobodna putanja kosmičkih zraka veoma visokih energija

Drugim rečima, protoni tako visokih energija mogu dospeti do nas samo iz najbliže vangalaktičke okoline

Sa druge strane, za slučaj slične interakcije težih jezgara, npr. gvožđa, minimalna energija se pomera ka višim vrednostima

Iako je koncentracija kosmičkih zraka inače veoma niska u poređenju sa tipičnom koncentracijom međuzvezdane materije naše galaksije (njihov odnos je grubo oko  $10^{-9}$ ), usled izrazito velikih kinetičkih energija, gustina energije razmatranih čestica visokih energija nije zanemariva

Ukupna gustina energije kosmičkih zraka čije su energije veće od 1 GeV iznosi oko  $1 \text{ eV cm}^{-3}$ , što je baš istog reda veličine kao i gustina energije međuzvezdanog magnetnog polja (ekviparticipija sa magnetnim poljem), termalnog (toplotnog) kretanja plazme (ekviparticipija sa termalnim pritiskom), te elektromagnetnog zračenja, u blizini Sunca (ekviparticipija sa lokalnim elektromagnetnim zračenjem)



Za kosmičke zrake energija većih od reda  $10^{18}$  eV se danas smatra da sigurno imaju vangalaktičko poreklo

Pojednostavljeno rečeno, objekti u našoj galaksiji nemaju ni dovoljne dimenzije niti tako jako magnetno polje da drže na okupu naelektrisane čestice veoma visokih kinetičkih energija

Ciklotronski ili žiro-radius čestice naelektrisanja  $q$ , sopstvene mase  $m$ , koja se kreće, bar približno helikoidalno u spoljašnjem magnetnom polju  $B$  zamagnetisane međuzvezdane plazme, u relativističkom režimu je dat preko:

$$r_c = \frac{p_{\perp}}{|q|B} = \frac{\gamma m v_{\perp}}{|q|B} \quad \mathcal{E}_k = (\gamma - 1)mc^2 \quad v = c \sqrt{1 - \left( \frac{mc^2}{mc^2 + \mathcal{E}_k} \right)^2}$$

Što su veće kinetičke energije to raste i žiro-radijus

Za protone ( $mc^2$  oko 938.272 MeV) energija reda  $10^{18}$  eV, koji se kreću u srednjem međuzvezdanom magnetnom polju intenziteta nekoliko  $\mu\text{G}$ , red veličine žiro-radijusa je uporediv sa debljinom Galaktičkog diska od oko 300 pc

Zapravo, ispostavlja se da već pri energijama čestica od oko  $10^{15}$  eV dolazi do postepenog curenja kosmičkih zraka iz Galaksije

Na osnovu posmatranja se ispostavlja da kosmički zraci dopiru do nas skoro pa potpuno podjednako iz svih mogućih pravaca (primećuje se izrazito izotropna raspodela pravaca iz kojih nam pristižu posmatani kosmički zraci), tako nam njihovi dolazeći pravci na nebu i ne pružaju realistične informacije o poreklu samih izvora razmatranih naelektrisanih čestica

Naelektrisane čestice – njihove putanje su zapravo podložne drastičnim promenama pod uticajem spoljašnjih magnetnih polja, npr. globalnog magnetnog polja Galaksije, te lokalnih, veoma komplikovanih magnetnih konfiguracija

Iako kosmički zraci nose informacije sa mesta njihovog nastanka (a uz to su i jedina materija, osim neutrina, nastala van Sunčevog sistema koja može dopreti do nas), kao i o različitim interakcijama sa drugim česticama na putu od njihovog izvora do nas kao posmatrača, usled značajnog uticaja sredine kroz koju se prostiru na njih, veoma je teško direktno im utvrditi mesto nastanka

Kosmički zraci većih kinetičkih energija od, reda  $10^{12-13}$  eV obično su zaslužni za čitavu kaskadu novih i novih (sekundarnih) čestica u atmosferi naše planete (uglavnom, putem spalacije, tokom interakcije sa česticama atmosfere)

Reč je o svojevrsnom pljusku čestica, koje se sve (bilo one naelektrisane, bilo električno neutralne) uglavnom u literaturi nazivaju atmosferski sekundarni kosmički zraci

Usled interakcije hadronske komponente primarnih kosmičkih zraka sa jezgrima elemenata koji se nalaze u vazduhu, u prvom redu nastaju različiti tipovi piona (pozitivni, negativni i neutralni), a prisutni su i raznovrsni kaoni, te tzv. nukleonska komponenta (sekundarni protoni i neutroni)

Do raspada neutralnih piona dolazi veoma brzo nakon njihovog nastanka i najčešće se formiraju baš dva  $\gamma$ -fotona visokih energija

Pomenuti fotoni visokih energija, krećući se u blizini okolnih atomskih jezgara u atmosferi Zemlje, mogu onda proizvesti parove elektron-pozitron

Na taj način se pokreće tzv. elektromagnetna lavina (kaskada, pljusak; tzv. meka komponenta atmosferskih sekundarnih čestica) uz neprestano stvaranje parova elektron-pozitron i dalju emisiju  $\gamma$ -fotona putem zakočnog zračenja elektrona i pozitrona, sa sve manjim i manjim energijama

Ovakav proces traje sve dok energija  $\gamma$ -fotona ne postane nedovoljna za kreaciju parova

Stvaranje parova uopšte označava kreaciju para čestica-antičestica od nekog konkretnog neutralnog bozona, recimo fotona

Ako se foton visoke energije prostire u blizini nekog atomskog jezgra (neophodno da bi bili zadovoljeni svi relevantni zakoni održanja), energija takvog  $\gamma$ -kvanta se može transformisati u energiju para elektron-pozitron

Naravno, neophodno je da energija fotona bude veća od sume energije mirovanja elektrona i pozitrona

Raspadom naelektrisanih piona i kaona nastaju, kako mioni i antimioni (tzv. tvrda komponenta sekundarnih atmosferskih čestica), tako i mionski neutrini i odgovarajući antineutrini

Ako mion ipak stigne da se raspadne pre kontakta sa površinom Zemlje, dolazi do nastanka dodatnih elektrona, pozitrona, te elektronskih i mionskih neutrina i antineutrina

Zbog značaja u astronomiji, fotoni i neutrini se, kao nosioci informacija posebno izdvajaju, no kao što je iz prethodnog jasno, oni mogu biti elementi skupa sekundarnih čestica koje nastaju kao produkti interakcije primarnih kosmičkih zraka i okolne materije

Jedna od bitnih potvrda tzv. dilatacije vremena (relativističkog produženja vremena) upravo je vezana za raspad sekundarnih kosmičkih zraka, recimo npr. pozitivnog miona (antimiona) u atmosferi planete Zemlje

Naime, sopstveno vreme poluživota (u sistemu reference vezanom za sam mezon) te čestice je reda  $\mu\text{s}$

Sa druge strane, od mesta nastanka u atmosferi (na visini od 300 km), pa do same površine Zemlje potrebno im je, krećući se relativističkim brzinama reda ms

Ako se ima na umu da vreme poluživota ovog mezona nije isto u sistemu reference vezanom za česticu (sopstveno vreme) i sistemu reference vezanom za površinu Zemlje (nesopstveno vreme), odnosno da je to vreme duže za posmatrača u odnosu na kojeg se ovaj pozitivno naelektrisani mion kreće, tada je jasno zašto se ipak detektuju antimioni na površini naše planete



Za detekciju kosmičkih zraka energija do  $10^{12-13}$  eV uglavnom se koriste različiti prijemnici primarnih čestica, na velikim visinama u atmosferi

Za kosmičke zrake većih energija koriste se različite metode detekcije atmosferskih sekundarnih čestica, kako diferencijalni fluks primarnih čestica postaje veoma mali

Da bi se jasnije razlikovale čestice visokih energija koje nastaju usled interakcije izvornih ili primarnih kosmičkih zraka (koji nastaju putem konkretnih mehanizama ubrzavanja naelektrisanih čestica u vasioni) sa međusistemskom materijom, nekada im se takođe pripisuje naziv sekundarne

Tada se sekundarne čestice, koje nastaju u atmosferi planete Zemlje posebno izdvajaju kao tzv. atmosferske sekundarne čestice (češće samo sekundarni kosmički zraci)

Kako savremena literatura nije baš konzistentna po tom pitanju, važno je biti veoma obazriv prilikom upotrebe ovih termina

Za procenu starosti organske materije često se koristi radioaktivni izotop ugljenika  $C^{14}$  – neprestano se formira u atmosferi planete Zemlje usled interakcije sekundarnih čestica (konkretno, neutrona) sa, pre svega azotom  $N^{14}$ , procesom spalacije

Zatim dolazi do formiranja odgovarajućeg, radioaktivnog ugljendioksida, koji potom ulazi u sastav svih fotoautotrofnih organizama (recimo biljaka i dr) usled procesa fotosinteze, te tako i drugih organizama koji se njima hrane

Nakon smrti jedinke, prestaje razmena ugljenika sa okolinom, te se odnos stabilnog  $C^{12}$  prema radioaktivnom  $C^{14}$  u organskoj materiji polako smanjuje usled radioaktivnog raspada

Na taj način se merenjem količine radioaktivnog ugljenika može proceniti starost uzoraka organske materije

Pomenuti radioaktivni ugljenik se ugrađuje i u godove (tzv. godišnje prstenove) stabala (značajne npr. u tzv. dendrohronologiji) dok se ona formiraj

u

U tom smislu je danas moguće utvrditi i period porasta i smanjenja aktivnosti Sunca kroz istoriju

To se, pre svega odnosi na one periode u istoriji za koje nema pouzdanih podataka o posmatranjima Sunčevih pega (kao osnovnih indikatora aktivnosti naše zvezde u vidljivom području elektromagnetnog spektra)

Pri intenzivnijoj solarnoj modulaciji, tokom pojačane aktivnosti naše zvezde, očekuje se manji broj inkorporiranih C14 u godove, a važi i obratno

Sličan princip se koristi u geonaukama pri geohronologiji

Sekundarni kosmički zraci (pre svega neutroni) interaguju sa materijom (stenama; konkretno npr. sa silicijumom, kiseonikom i kalcijumom koji ulaze u sastav konkretnog materijala) na površini Zemlje, te dolazi do nastanka različitih radioaktivnih izotopa, uglavnom procesom spalacije

Za kosmičke zrake se može reći i da predstavljaju osnovni mehanizam koji kontroliše stepen jonizacije u troposferi, najnižoj (donjih oko desetak kilometara) i najgušćoj oblasti atmosfere planete Zemlje

Kosmički zraci predstavljaju jedan tip prirodnog korpuskularnog jonizujućeg zračenja i mogu biti veoma opasni po živi svet, kao i svemirsku tehnologiju

Sekundarni kosmički zraci mogu proizvesti i azotne okside (NO<sub>x</sub>, npr. azot monoksid NO i azot dioksid NO<sub>2</sub>), koji bitno utiču na smanjivanje (brže uništavanje nego stvaranje) ozona u atmosferi planete Zemlje