



Univerza v Ljubljani
Fakulteta za matematiko in fiziko

Seminar

Vpliv kozmičnih žarkov na zemeljsko klimo

Aleks Žagar
Mentor: prof. Rudolf Podgornik

Ljubljana, 8. april 2008

Povzetek

V tej seminarski nalogi predstavimo nekatere vidike o vplivu kozmičnih žarkov in sončne aktivnosti na zemeljsko klimo. Nепrestano poslušamo o vplivu ogljikovega dioksida na zemeljsko klimo. Mnenja o vplivu ostalih dejavnikov so deljena in večkrat zanemarjena. Znano je, da sončeva aktivnost vidno vpliva na vreme v daljšem časovnem obdobju. Najbolj znan primer je prav gotovo mala ledena doba, ki ustreza Maunder-jevemu minimumu sončne aktivnosti, v letih 1645–1715. Visokoenergijski delci vplivajo na stopnjo oblačnosti zgornjih plasti atmosfere. Kozmični žarki so seveda različnih energij in so tudi različnega izvora, od tistih galaktičnega izvora do tistih, ki prihajajo s Sonca. Njihov vpliv na zemeljsko klimo se da izmeriti in je bistven. [1] Marsikaj torej vpliva na klimo tega planeta in težko bi rekli kateri vpliv je bistven.

Kazalo

1. Uvod.....	2
2. Kozmični žarki.....	3
2.1. Interakcija z atmosfero.....	4
2.2. Detekcija kozmičnih žarkov.....	5
2.3. Rekonstrukcije kozmičnih žarkov in sončne aktivnosti.....	6
3. Variacije sončne aktivnosti.....	7
3.1. Milankovičevi cikli.....	8
3.2. Sončni kozmični žarki.....	9
4. Vpliv kozmičnih žarkov.....	10
4.1. Nastanek in vrste oblakov.....	10
4.2. Rezultati meritev.....	11
5. Primerjava modela CO ₂ in modela kozmičnih žarkov.....	15
5.1. Geološka ujemanja.....	15
6. Zaključek.....	16
7. Reference.....	17

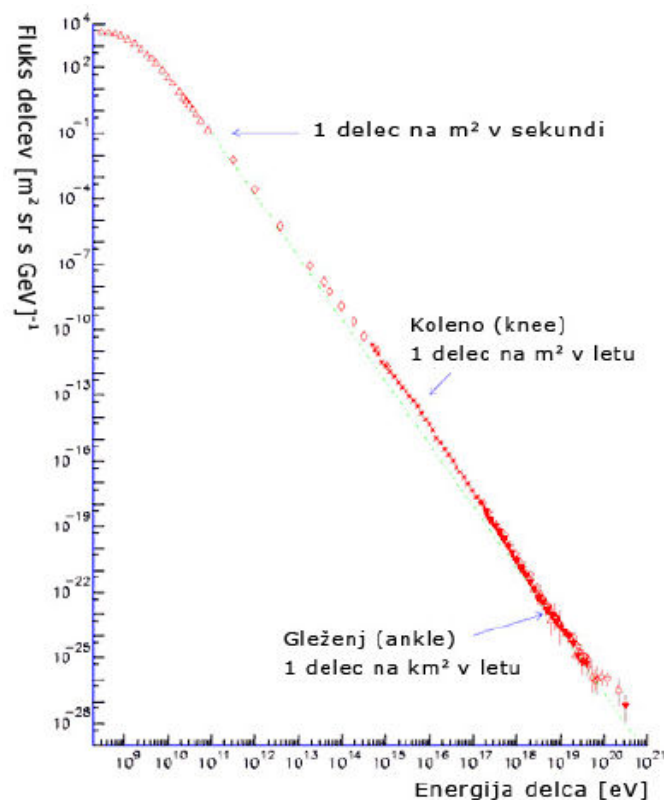
1. Uvod

Obdobja visoke in nizke sončeve aktivnosti se ciklično izmenjujejo približno vsakih 11 let, variacije v gostoti sončnega toka pa se pojavljajo tudi na krajših časovnih skalah. Razhajanja o tem kakšen vpliv ima sonce na zemeljsko klimo izhajajo iz merjenja sončne aktivnosti v zadnjih 40 letih in primerjave le-te s povprečnimi temperaturami na Zemlji. Znanstveniki se sicer strinjajo, da je kozmično sevanje v preteklosti verjetno vplivalo na podnebje na Zemlji. O tem kakšen vpliv ima danes, pa so mnenja različna.

Hipoteza o vplivu kozmičnega sevanja, po kateri povečana Sončeva aktivnost, ki ustvarja večji magnetizem, blokira galaktične kozmične žarke, je tema različnih debat in raziskav v zadnjem času. Različne raziskovalne skupine so prišle do podobnih zaključkov, mnenja o vplivu kozmičnih žarkov in sončne aktivnosti na zemeljsko klimo pa so še vedno deljena. Henrik Svensmark et al. trdi, da variacije v sončni aktivnosti modulirajo vpadli fluks kozmičnih žarkov, ki vplivajo na stopnjo oblačnosti zgornjih plasti atmosfere in posledično klimo. [2], [3] Eksperimenti so pokazali, da kozmični žarki lahko producirajo kondenzacijska jedra, vendar ni še popolnoma jasno, če gre za pomemben prispevek k procesu tvorjenja oblakov v zemeljski atmosferi. Po analogiji z Wilsonovo meglično komoro celotna zemeljska atmosfera deluje kot katalizator kondenzacijskih jeder. Bistvena razlika pa je v že začetni naravni prisotnosti kondenzacijskih jeder v atmosferi, ki naj bi imela bistven vpliv pri tvorbi oblakov. Vsekakor pa opazovanja večletnih nihanj v stopnji oblačnosti v zgornjih plasteh atmosfere potrjujejo korelacijo z variacijami v kozmičnih žarkih. Vredno je omeniti, da ne glede na močno korelacijo med kozmičnimi žarki in klimatskimi spremembami. Teh vplivov ne gre jemati kot dokaz prevladujočega vpliva sonca na zemeljsko klimo nad greenhouse efektom v zadnjih desetletjih, kot je pokazala tudi študija v poročilu IPCC, AR4, WG1. [4] Neposredne meritve kozmičnih žarkov obstajajo od leta 1953 dalje in ne pojasnjujejo sprememb klime v zadnjih desetletjih. Leta 2006 je Harisson et al. potrdil Svensmarkovo teorijo. Opazovanja zmanjšanj koncentracije vodne pare v ozračju sovpadajo z zmanjšanjem vpadlih kozmičnih žarkov. Vpliv tega efekta kljub temu ni bil neodvisno potrjen in določen, saj naj bi kozmični žarki imeli največji vpliv na tvorbo oblakov nad oceani, Harissonova skupina pa je opazovala sipanje in difuzno sevanje (LIDAR) le nad Veliko Britanijo. Ta opazovanja so kasneje opravili drugi. Nekatere študije predlagajo kozmične žarke kot glavni vir spremembe temperature v zadnjem času. K opaženemu segrevanju ozračja naj bi doprinesli 85% del vpliva. [3], [5] Shaviv et al. trdi, da galaktični kozmični žarki bistveno vplivajo (66%) na zemeljsko klimo na geoloških časovnih skalah (več kot 100 000 let). [6] Vzrok za to naj bi bile spremembe položaja sonca v spiralnih rokavih naše galaksije. Rezultati potrjujejo teorijo o vplivu na zemeljsko klimo. Zaradi negotovosti o tem kateri od visokoenergijskih delcev z različnimi energijami bistveno vplivajo na spremembe v stopnji oblačnosti in negotovosti v rekonstrukcijah fluksa kozmičnih žarkov različnih energij iz geoloških podatkov, vpliv kozmičnih žarkov in sončne variabilnosti ostaja tema številnih polemik. V nadaljevanju bomo predstavili ugotovitve nekaterih raziskovalnih skupin ter jih podkrepili z eksperimentalnimi rezultati.

2. Kozmični žarki

Kozmični žarki so visokoenergetski delci, jedra, ki so bila prvič opažena kakih 100 let nazaj. Vglavnem so to atomska jedra različnih elementov periodnega sistema, visokoenergijski elektroni, pozitroni, anti-protoni, morda pa tudi nevtrini in ostala eksotika. [7] Zemljo dosežejo le delci z dovolj visoko energijo, da lahko prodrejo skozi zaščito, ki nam jo nudi zemeljska atmosfera in magnetno polje sonca in zemlje. Okoli 87% kozmičnih žarkov, opazovanih na vrhu atmosfere, je protonov (H jedra), 12% alfa delcev (He jedra) in 1% ostalih težkih jeder (Fe, C) ter elektronov. Različen diferencialni energijski spekter kozmičnih žarkov lahko razložimo z različnimi izvori kozmičnih žarkov, od sončnih izbruhov do galaktičnih in ekstragalaktičnih izvorov. Spekter energij kozmičnih žarkov, se razteza od nekaj 100 MeV do 300 EeV (3×10^{20} eV). Kozmični žarki so tako zanimivi s stališča fizike delcev, saj so njihove energije precej višje kot energije, ki jih lahko dosežemo v pospeševalnikih (do 10^{13} eV). [8] Slika 1 prikazuje energijski spekter kozmičnih žarkov, ki dosežejo zemljo.



Slika 1: Diferencialni energijski spekter galaktičnih kozmičnih žarkov temelji na meritvah različnih instrumentov, ki so pokrivali energijska območja od $\sim 10^9$ eV - 10^{20} eV. Energijski spekter na sliki 1 kaže fluks galaktičnih kozmičnih žarkov pri različnih energijah, t. j. število delcev, ki prihajajo skozi površino v nekem času iz nekega prostorskega kota na enoto energije. Enota je delcev $/\text{cm}^2 / \text{s} / \text{sr} / \text{GeV}$. Graf je dvakrat logaritemiran. Abscisa prikazuje energijo kozmičnih žarkov v eV. Ordinata pa fluks kozmičnih žarkov. Tanka zelena črta kaže, da je število kozmičnih žarkov z neko določeno energijo sorazmerno z energijo na neko potenco. Zgornja puščica označuje število delcev pri energiji 10^{12} eV, torej 1 delec $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1} \text{GeV}^{-1}$, srednja pri 10^{15} eV, 1 delec $\text{m}^{-2} \text{leto}^{-1} \text{sr}^{-1} \text{GeV}^{-1}$ in spodnja pri 10^{19} eV, kjer je 1 delec $\text{km}^{-2} \text{leto}^{-1} \text{sr}^{-1} \text{GeV}^{-1}$ (letno na km^2 prileti en delec z energijo 10^{19} eV). Opazimo, da energijski spekter na sliki ni eksponenten. To pomeni, da je energijski spekter galaktičnih kozmičnih žarkov precej bolj oster kot npr. termični energijski spekter (Planckov), iz česar lahko sklepamo, da so delci doživeli znatno netermično pospeševanje. Pri energiji 5×10^{15} eV se opazi zlom spektra navzdol, točki pa se navadno pravi koleno (knee). Drug zlom spektra se pojavi pri energiji 3×10^{18} eV, spekter se obrne navzgor, točki pa se navadno pravi gleženj (ankle). [9]

V prvem približku se fluks kozmičnih žarkov smatra kot izotropen blizu zemlje. Zato je smiselno, da energijski spekter zapišemo v približku s potenčnim zakonom:

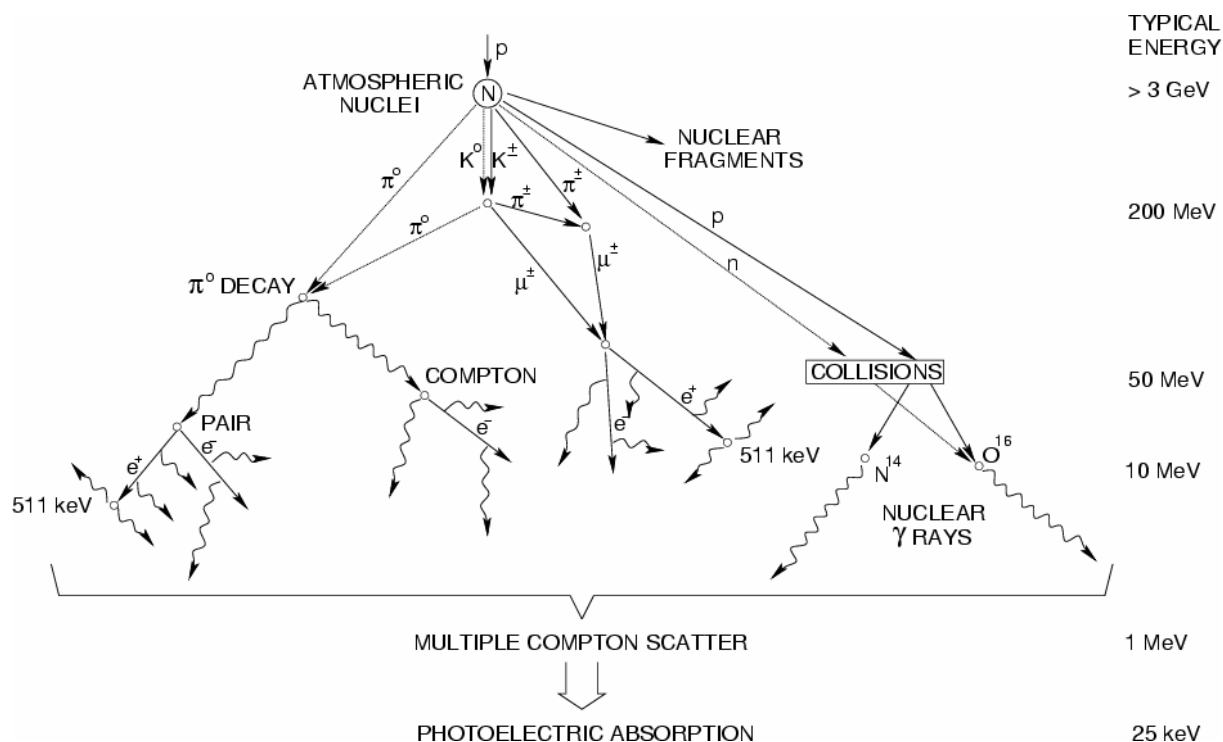
$$I(E) \propto E^{-\gamma} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1} \text{GeV}^{-1}, \quad (1)$$

Kjer je γ spektralni indeks in je glavna karakteristika energijskega zakona. Delci z energijo pod okrog 20-50 GeV so pod vplivom sončne modulacije, zato se tu spekter ne prilagaja povsem potenčnemu zakonu. V intervalu od 10^{10} - 10^{15} eV pa se spekter prilagaja potenčnemu zakonu s spektralnim indeksom $\gamma \sim 2.7$. Spekter nad kolenom se prilega $\gamma \sim 3.1$. Koleno naj bi nastalo, ker mehanizem pospeševanja z udarnimi sunki v supernovah postane pri tej energiji manj učinkovit, saj Larmorjev radij prekorači debelino čela udarnega sunka.

Določen del kozmičnih žarkov je sončnega izvora in njihova jakost je močno odvisna od trenutne sončne aktivnosti. Izvor kozmičnih žarkov z ekstremnimi energijami je še vedno stvar debate, saj ni veliko znanih virov, ki bi lahko delce pospešili do tako enormnih energij, trenutna razlaga so aktivna galaktična jedra. [10] Kozmični žarki se pospešujejo v udarnih valovih supernov (delci do energij $\sim 10^{14}$ eV), ob zvezdnih izbruhih ali v magnetnih poljih nevtronskih zvezd in črnih luknjah. Meritve visokoenergetskih kozmičnih žarkov so izredno zahtevne in kličejo po gradnji ogromnih observatorijev.

2.1. Interakcija z atmosfero

V vrhnjih plasteh atmosfere, 15-30 km visoko (težja jedra se prej absorbirajo), kozmični žarek trči z jedri v atmosferi (npr. dušika ali kisika). Začne se nekakšna kaskada. Povprečna prosta pot kozmičnega žarka v atmosferi je nekaj g/cm^2 . Povprečna gostota snovi v Zemljini atmosferi pa okoli 1000 g/cm^3 (pri tlaku 1 bar), torej je nemogoče, da bi primarni kozmični žarek dosegel površje. Za primerjavo, povprečna gostota snovi v galaktičnem disku, kjer se zaradi magnetnega polja zadržuje največ kozmičnih žarkov je okoli 10^{-24} g/cm^3 . Torej kozmični žarki po vesolju pred absorpcijo lahko potujejo več milijonov let (z našega relativističnega stališča). Ko proton ob vstopu v atmosfero trči v jedra dušika ali kisika, iz njih izbije protone in nevtrone, ti pa potem letijo naprej, ponovno zbijajo in kreirajo nove delce. Sekundarni delci so navadno pioni (ki hitro razpadejo v mione, nevtrine in fotone), kot tudi elektroni in pozitroni, ki nastanejo zaradi razpada mionov in zaradi interakcije fotonov z atomi v atmosferi. Tako nastane plaz delcev. Ti skoraj s svetlobno hitrostjo zletijo skozi atmosfero in se absorbirajo. Na tla prileti lahko 100 milijard nabitih delcev (odvisno od energije vpadlega kozmičnega žarka in atmosferskih pogojev), večinoma elektronov ($\sim 28\%$), mionov ($\sim 6\%$) in fotonov ($\sim 62\%$). [7] Končno število delcev, ki doseže površje, je odvisno od energije primarnega kozmičnega žarka. Večina sekundarnih delcev, ki doseže površje, je mionov s povprečno pogostostjo $100 \text{ /m}^2\text{/sekundo}$. Kljub temu, da gre skozi naše telo na minuto na tisoče kozmičnih žarkov, so sevanja, ki jih prejmemo relativno nizka (glede na radiacijsko ozadje). Ko vsi delci, ki nastanejo ob trkih treščijo na zemljo, tipično ta plaz zavzame površino okoli 100 m^2 (za kozmične žarke z energijami okoli 10^{15} eV), okoli 1 km^2 (za kozmične žarke z energijami okoli 10^{18} eV) ali več. [6], [11] V 60ih letih prejšnjega stoletja so se začeli prvi poskusi meritev kozmičnih žarkov. Vredno je opomniti, da je poleg višine detekcije v atmosferi, pomembna tudi geografska širina kraja, kjer merimo. Magnetno polje namreč odklanja nabite delce, zato intenziteta od ekvatorja proti polom narašča. Področja ob ekvatorju so tako manj izpostavljena spremembam v stopnji oblačnosti zaradi vpliva kozmičnih žarkov, čeprav se ta vliv zaradi gibanj v atmosferi nekoliko razporedi. Primarnega delca ne moremo neposredno meriti, lahko pa ga merimo posredno preko razpadnih produktov, ki jih detektiramo. Plaz delcev, ki ga sproži en proton z ogromno energijo, prikazuje slika 2.



Slika 2: Shematski prikaz razpada primarnega kozmičnega delca (protona) na pione in nevtrone ter nadaljnji plaz sekundarnih nabitih delcev. Shema prikazuje npr. tipičen primer trka $p + O^{16} \rightarrow n + \pi$. Ob strani so zapisane tipične energije, delcev ob trkih. [7]

Kozmični žarki v zemeljski atmosferi preko sekundarnih produktov tvorijo in vzdržujejo koncentracijo nestabilnih izotopov, npr. berilija in ogljika: $n + N^{14} \rightarrow p + C^{14}$, kar je uporabno za geološko datiranje in rekonstrukcije sončne aktivnosti.

2.2. Detekcija kozmičnih žarkov

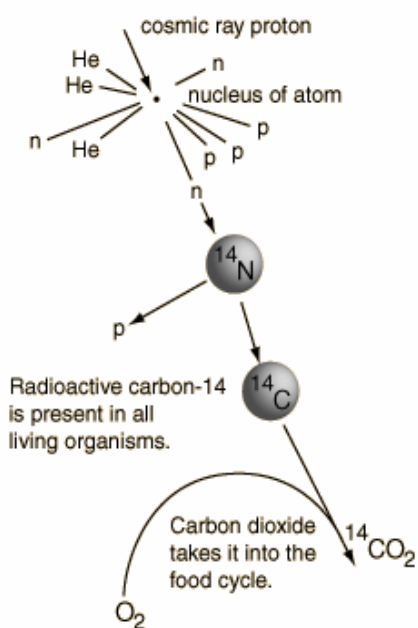
Za detekcijo primarnih visokoenergijskih delcev se uporabljajo geostacionarni sateliti (npr. GEOS, SOHO), vesoljske sonde (npr. Pioner, Voyager) in detektorji na balonih. [7] Te detektorje večinoma sestavlja kombinacija različnih tipov detektorjev. Glavni del je sledilnik (tracer), ki je sestavljen iz tankih pravokotnih silicijevih plošč (~ 2 mm širokih, z več kot 34000 kanali) v trajnem magnetnem polju, ki ga generira superprevodno hlajen magnet. Sledilnik natančno rekonstruira tir delca v magnetnem polju, iz česar se lahko določi gibalna količina in smer, iz katere je prišel. Dodatni detektorji so še detektor sinhrotronskega sevanja za detekcijo elektronov (SRD), detektor prehodnega sevanja (TRD), detektor za čas leta, ki ga delec potrebuje da preleti detektor (TOF), zankovni Čerenkov detektor (RICH) in elektromagnetni kalorimeter (Ecal). [12] Ta kombinacija zadošča, da dobimo smer prihoda, energijo, naboj in maso kozmičnega žarka.

Zemeljski detektorji (fluorescenčni detektorji, nevtronski monitorji, detektorji tipa Čerenkov, podzemni mionski detektorji) so namenjeni preučevanju plazu nastalih delcev in rekonstrukciji podatkov za primarne kozmične žarke. Gre navadno za mrežo koincidenčnih detektorjev porazdeljenih po večji površini. Primer mreže detektorjev Čerenkova je Pierre Auger observatorij. [10] V Pierre Auger observatoriju za kozmične delce v Argentini raziskujejo ultra-visokoenergijske kozmične žarke. Znanstvene meritve obstajajo le za nekaj kozmičnih žarkov z ekstremnimi energijami, ki so zadeli zemljo. Gre za kozmične žarke z

energijo, ki znaša okoli 10^{20} eV. Vemo torej, da ti delci obstajajo in da so redki. Letno na km^2 Zemlje prileti en delec z energijo 10^{19} eV. Delci, ki nosijo višjo energijo, $\sim 10^{20}$ eV, še bolj redki. Na stoletje na km^2 Zemlje prileti samo en tak delec. Dejstvo, da so redki, predstavlja pomemben eksperimentalni problem. Potrebno je zgraditi naprave, ki v doglednem času, omogočijo dovolj meritev, da iz teh meritev kaj razberemo. Observatorij Pierre Auger je od leta 2003 dalje največji ultra-visokoenergijski detektor kozmičnih žarkov na svetu. Dokončan bo imel dva observatorija, enega na severni in enega na južni polobli. Vsak naj bi meril 3000 km^2 ali več. Mreža več kot 1600 detektorskih postaj, ki so občutljive na nabite delce skrbi, da zberemo podatke o vseh teh milijardah delčkov plaz, ki ga je sprožil en sam delec. Observatorij je sestavljen iz dveh tipov detektorjev. Talni detektorji Čerenkova pokrivajo površino 3.000 km^2 in naj bi vzorčevali pljuske kozmičnih žarkov na nadmorski višini 1400 m. V resnici gre za velik tank vode, 10 m^3 vode, ki mora biti kemično in biološko čista. Senzorji, ki so v detektorski postaji, zaznajo, ali so ob detektor trčili nabiti delci. Štirje fluorescenčni detektorji pa merijo fluorescenčno sevanje vzdolž pljuska nad talnimi detektorji. Služijo rekonstrukciji, kako se skozi atmosfero razvije plaz delcev. Ko plaz potuje skozi atmosfero, nabiti delci vzbudijo atome dušika, ki sevajo fluorescenčno svetlobo. Gre za sistem ogledal, velikih približno 10 m^2 , ki gledajo v razne dele neba in svetlobo usmerijo na fotodetektor. Detektorske postaje merijo časovni prihod ter število delcev. Ob pomoči zapletenega algoritma to omogoča, da izračunamo energijo primarnega delca ter smer, od kod primarni delec prihaja.

2.3. Rekonstrukcije kozmičnih žarkov in sončne aktivnosti

Tu le omenimo to metodo. Gre za rekonstrukcijo fluksa kozmičnih žarkov v preteklih geoloških obdobjih iz izotopov v raznih naravnih virih, kot so oceani ali polarne kape ledu. Gre za določanje koncentracije berilija ali ogljika, ki nastaja s trki, po formuli $n + N^{14} \rightarrow p + C^{14}$. Izotop C^{14} je seveda radioaktiven z razpolovnim časom okoli 5700 let in z O_2 tvori CO_2 , ki se porablja v procesu fotosinteze. Slika 3 prikazuje omenjeni proces.



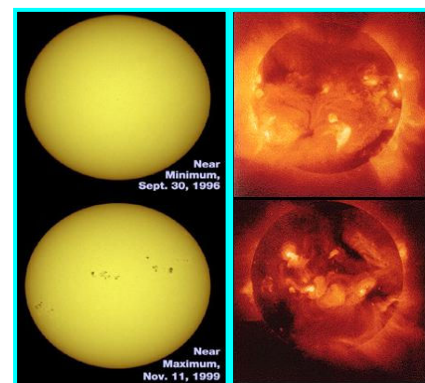
Slika 3: Nastanek C^{14} + hranilni krog CO_2 . CO_2 sovpadajo. [13]

Iz meritev razmerja C^{14}/C^{12} iz fosilnih ostankov (drevesa, fosili, mehurčki zraka iz ledeniških vrtenin na polih) torej lahko rekonstruiramo število kozmičnih žarkov oz. sončno aktivnost (magnetno polje sonca odklanja galaktične kozmične žarke). Podobno lahko na podlagi razmerja izotopov O^{16}/O^{18} iz fosilov oceananskih mikro organizmov določamo spremembe v temperaturi in posledično klimi. Izotopska sestava oceanov lahko marsikaj pove o procesih, ki so potekali v oceanih, vključno s temperaturo vode, njeno sestavo in količino izhlapele vode, ki se je ohranila v ledenikih. Med izhlapevanjem v oceanih se voda bolj obogati s težjim O^{18} izotopom, medtem ko lažji O^{16} izhlapi in se ga več ohrani v ledenikih. Na ta način lahko iz razmerja določimo okvirne temperature Zemlje v geološki preteklosti in primerjamo različne podatke. Pomembno pa je upoštevati vsa geološka dejstva, od kontinentalnih premikov dalje. Rekonstrukcije temperature, fluksa kozmičnih žarkov in

3. Variacije sončne aktivnosti

Variacije v sončevi aktivnosti, kot posledici magnetnih sprememb oz. sprememb v sončevi notranjosti in astronomske spremembe so pomemben dejavnik spreminjanja klime. Poleg samega direktnega vpliva pa se variacije v sončevi aktivnosti, preko sprememb v magnetnem polju, poznajo tudi v intenziteti fluksa kozmičnih žarkov, ki dosežejo Zemljo. Tako posredno vplivajo na stopnjo oblačnosti Zemlje, temperaturni profil in koncentracijo vodne pare ter aerosolov v atmosferi. Solarni veter, ki je močnejši ob večji sončni aktivnosti, odklanja galaktične kozmične žarke. Za dodatno modulacijo, med ekvatorjem in poloma, je krivo geomagnetno polje. Ob močnejši sončni aktivnosti se ojača tudi zemeljsko magnetno polje in z delci okrepljeni Van Allenovi pasovi dodatno ščitijo atmosfero. Fluks kozmičnih žarkov, ki doseže Zemljo je tako moduliran s sončno aktivnostjo oz. heliosfero.

Direktni vpliv sonca lahko merimo s številom sončnih peg, ki jih prikazuje slika 4 desno. Število in ploščina sončnih peg, kot tudi položaj peg se spreminjajo v 11 letnem ciklu sončeve aktivnosti. Prisotnost močnega magnetnega polja blokira pretok vročine iz notranjosti sonca, tako da so sončeve pege okoli 1500 °C hladnejše od fotosfere. [7] Ob maksimumu je peg največ, pojavljajo se v bližini ekvatorja. Okoli minimuma pa je običajno peg zelo malo oz. nič, pojavljajo se tudi 40° in več stran od ekvatorja. Wolfovo število, ki podaja aktivnost sonca, se izračuna po naslednji enačbi:

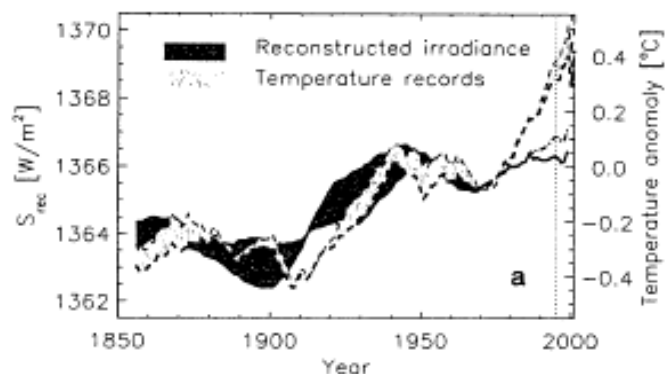
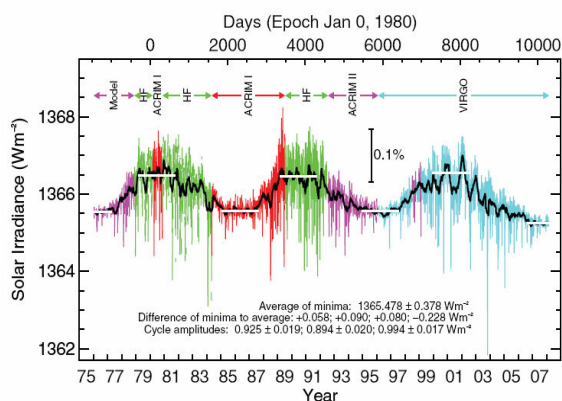


Slika 4: sončne pege, min. 1996, max. 1999

$$Z = (k_1 + k_2 + k_3) (10s + p), \quad (2)$$

kjer je s število skupin opaženih peg p število posameznih peg in k_1 , k_2 , k_3 opazovalni korekcijski faktorji (k_1 določa odprtino teleskopa, k_2 seeing, k_3 pa prosojnost ozračja). [14]

Sončna konstanta se tekom 11 letnega cikla spreminja za 0.1% (1.4 W/m²), vendar so na krajši časovni skali (dnevi) možne tudi variacije okoli 1%, kot prikazuje slika 5 (levo). [15] IPCC AR4 (2007) poročilo ocenjuje, da variacije v sončevi aktivnosti zanemarljivo vplivajo na klimo v primerjavi z antropogenimi vplivi in ne morejo biti glavni faktor pri segrevanju za ~ 0.7 °C od konca male ledene dobe, ne izključuje pa možnosti vpliva v preteklosti. [4] Kljub temu naj bi sončna aktivnost zgolj sprožila mehanizme, ki so glavni krivci za spremembe klime (npr. tak ojačevalni faktor so lahko spremembe v stopnji oblačnosti). Druge študije (npr. Stott et al., 2003 [16]) poročajo, da bi vpliv sonca pri opaženem segrevanju lahko bil do okoli 36%. Za primerjavo, Zemlja reflektira 30% sončnega sevanja, zaradi oblakov in snega z albedom, $\alpha \sim 0.5$. Študije so potrdile tezo (Solanki et al., 2004 [17]), da je naše sonce vse bolj aktivno in dosega najvišjo stopnjo aktivnosti v zadnjih 8000 letih. Kljub temu pa je treba poudariti, da meritve temperature ne sledijo spremembam sončeve aktivnosti v zadnjih desetletjih, kot je razvidno iz slike 6 (desno). Sončevi žarki, ki pridejo do Zemlje danes so za 0,036% bolj topli kot so bili leta 1986, ko se je začel nov sončev 11 letni cikel. NASA je sporočila, da so se močno zmanjšale tudi zaloge zmrznjenega ogljikovega dioksida na južnem polu Marsa. [17] Marsova prst, kot tudi Marsova atmosfera naj bi se v zadnjih 20 letih segrela za 0,65 °C. Razlog naj bi bil v tem, da veter odpihne vrhnjo plast prsti in razkrije temnejšo plast z večjim albedom. Pojav kaže na to, da obstajajo tudi na Marsu klimatske spremembe. Ali so te spremembe na Marsu specifične za planet ali so posledica povečane sončeve aktivnosti, ki prav tako močno segrevajo Zemljo, pa debate še potekajo.

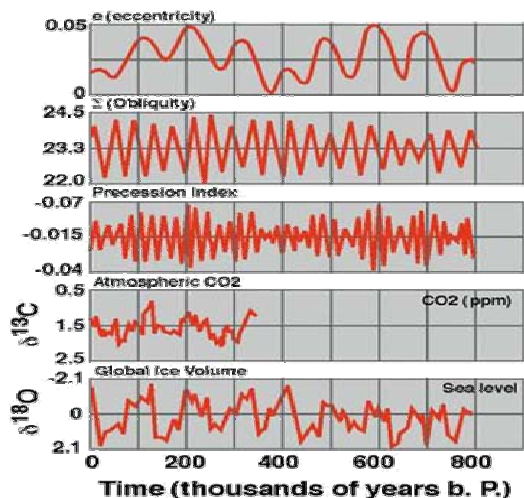


Slika 5 (levo): Graf predstavlja sestavljene podatke meritev sončeve aktivnosti (meritve sončne konstante) z različnih eksperimentov (HF, ACRIM, UARS, VIRGO, SOHO), od leta 1975 dalje. Prikazana je amplituda variacij v treh 11 letnih ciklih, okoli 0.1 %, opazna pa so tudi dnevna odstopanja. [15]

Slika 6 (desno): Graf desno prikazuje rekonstrukciji sončeve aktivnosti in temperature na površju Zemlje, iz geološki virov, od leta 1850 dalje. 11 letni sončev cikel je povprečen, tako da graf prikazuje zgolj naraščanje sončeve aktivnosti v letih od 1850 do 1980. Od 1980 dalje so bili uporabljeni dejanski podatki iz merjenj. Črtkani krivulji prikazujeta nihanje temperature – globalna temperatura (debela črtkana) in temperatura severne poloble (tanka črtkana). Celi črti (debela: Lean et al., 1998, tanjša: Willson et al., 1997) prikazujeta nihanja sončne konstante. Opazimo lahko, da v zadnjih desetletjih trend v temperaturi ne sledi več sončni aktivnosti. [17]

3.1. Milankovičevi cikli

Na podlagi astronomskih sprememb je svojo znano teorijo klimatskih sprememb zasnoval srbski astronom in klimatolog Milankovič. Precesija zaradi delovanja privlačnosti Sonca in Lune je danes taka, da se bo nagib prevesil na drugo stran (od sedanjih $+23,5^{\circ}$ na $-23,5^{\circ}$) v naslednjih 13000 letih. Tudi orbita okrog Sonca se počasi spreminja. To velja za položaj dvižnega vozla, položaj perihelija, ekscentričnost elipse itd. Posledica tega je spreminjanje osončenja. Zato so bili v preteklosti posamezni deli Zemlji različno osončeni.

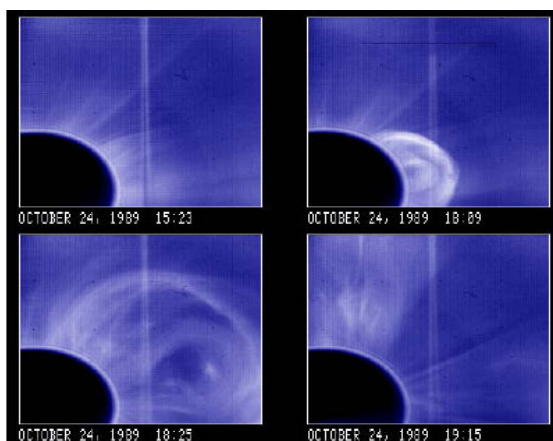


Značilne so periode teh fluktuacij: 41 000 let zaradi spreminjanja nagiba osi vrtenja Zemlje in 19 000 let ter 23 000 let zaradi njene precesije, in 60 000 do 150 000 let (navadno govorimo o 100 000 letnem ciklu) za vso Zemljo zaradi sprememb tirnice okrog Sonca. Primerjava z značilnimi usedlinami posameznih organizmov v nekaterih geoloških vrtnah potrjujejo pomembnost astronomskih vplivov na klimo, kar je razvidno s slike 7. Astronomski faktorji so glavni vzrok za pojav ledenih dob, pa spet toplejših in hladnejših obdobjih. Zdaj je vsa Zemlja v med-ledenem obdobju. Zaradi astronomskih vzrokov naj bi se naslednja tisočletja spet hladila. [18]

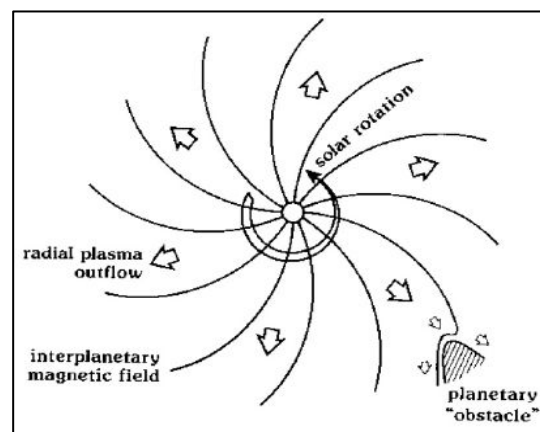
Slika 7: Grafi prikazujejo Milankovičeve cikle in rekonstrukcije izotopov iz geoloških virov, ki sovpadajo z nihanji ledenih dob na Zemlji, v 100 000 letnih ciklih. Glavna cikla opažena tudi v geoloških podatkih sta 41 000 let in 21 000 let. Dominanten cikel opažen v geoloških podatkih pa je 100 000 let in sovpada s ciklom variacij ekscentričnosti (100 000 in 400 000 let). Vendar je pomembno poudariti, da spremembe v Zemljini orbiti zgolj modulirajo 21 000 in 41 000 letne cikle in sončno aktivnost. Orbitalni podatki so iz meritev Quinn et al., 1991. Pomembno bi bilo poudariti, da gre za izjemno majhne spremembe in vpliv na zemeljsko klimo, ki same po sebi ne morejo bistveno vplivati na klimo, lahko pa se jih smatra kot začetni mehanizem, ki sproži vpliva na ostale dejavnike (npr. spremembo v stopnji oblačnosti in notranje dejavnike na Zemlji). [18]

3.2. Sončni kozmični žarki

Sončevi kozmični žarki so bili prvič odkriti 28. februarja 1942. Sunki v številu kozmičnih žarkov, ki so povezani s sončevimi kozmičnimi žarki, se imenujejo GLE (Ground Level Enhancements). GLE-ji se redko pojavljajo takrat, ko je sončeva aktivnost majhna, najbolj tipično pa se pojavijo okrog 1-3 leta po tem, ko je sončeva aktivnost velika. V primerjavi z galaktičnimi kozmičnimi žarki imajo sončevi kozmični žarki precej manjše energije, načeloma pod 1 GeV in le redki okrog 10 -20 GeV. [12] Zato detektorji v bližini ekvatorja pogosto ne zaznajo teh kozmičnih žarkov, saj so najnižje energije izključene zaradi zemeljskega magnetnega polja. Od tod izvira domneva, da so za spremembe v stopnji oblačnosti in s tem povezan vpliv na klimo odgovorni predvsem galaktični kozmični žarki, sonce pa je pomembno le kot modulator, prek vplivanja z magnetnim poljem. Fluks sončevih kozmičnih žarkov se za razliko od galaktičnih kozmičnih žarkov, pri katerih je fluks prisoten vedno, pojavlja bolj redko in naključno. Za GLE in ostale pojave na Zemlji imajo največji vpliv težka jedra in proton-nevtron. Komponenta elektron-pozitron je sicer prav tako pospešena do relativističnih hitrosti, vendar je skoraj povsem odsotna v opazovanih sončevih kozmičnih žarkih na Zemlji, saj so izgube zaradi sevanja (sinhrotronskega ali zavornega) za to komponento reda $(m_p/m_e) \sim 10^{13}$ krat večje kot za proton pri enaki energiji. Elektroni zaradi sevanja namreč izgubijo večino energije v sončevi koroni oz. fotosferi in pri tem generirajo fotone, pa tudi širjenje elektronov ali pozitronov po medplanetarnem prostoru je precej težje. Razlika v kemijski sestavi sončevih in galaktičnih kozmičnih žarkov je večinoma v različnih količinah snovi, ki jo morajo prepotovati, da pridejo do Zemlje. Sončevi kozmični žarki prepotujejo nekako $\leq 0.1 \text{ g/cm}^2$, galaktični kozmični žarki pa $\sim 7 \text{ g/cm}^2$. Rezultat je, da v sončevih kozmičnih žarkih primanjkuje lahkih jeder kot npr. Li, Be, B in ostalih elementov in izotopov, ki so odsotni v izvoru in ki nastanejo pri šibkih trkih. Sestava sončevih žarkov je prav tako zelo odvisna od tega, v kakšni fazi je sonce. Načeloma naj bi vsi sončevi kozmični žarki, ki jih zaznamo, nastali pri sončevih izbruhih, čeprav se kot drug pojav omenja tudi izmetavanje koronalne mase (CME). [7], [19] Delci ob sončevih izbruhih se pospešujejo na račun sproščene magnetne energije. Stabilna magnetna zanka v sončevi atmosferi čuti pritisk zaradi plazme, ki jo obdaja, kar vodi do interakcije med nasprotno usmerjenima magnetnima silnicama in nazadnje do popolne rekonfiguracije magnetne strukture. To magnetno povezovanje vodi do eksplozivne sprostitve energije, ki se kaže v spontanem izbruhu. Posledično je to povezano tudi z vrtenjem in navijanjem sončevega magnetnega polja. Prav zaradi hitrosti procesa je le ta verjetno glavni krivec za pospeševanje velike večine sončevih kozmičnih žarkov, kar kažejo tudi opazovalni podatki. Sliki 8 (levo) in 9 (desno) prikazujeta sončev izbruh in CME ter medplanetarno magnetno polje.



Slika 8: Sončev izbruh, 24. 10. 1989, SMM. [19]



Slika 9: medplanetarno sončno magnetno polje

4. Vpliv kozmičnih žarkov

Kot že omenjeno, visokoenergijski atomski in subatomske delci izven sončnega sistema, ki se premikajo s skoraj svetlobno hitrostjo, trčijo v Zemljino atmosfero in pri tem cepijo molekule zraka v ione ter ustvarjajo kondenzacijska jedra, ki lahko ustvarjajo pogoje za nastanek oblakov, vendar le v primeru, da so tudi pogoji v ozračju pravi. Poleg tega, je kot smo videli, marsikaj tudi odvisno od izvora kozmičnih žarkov, aktivnosti sonca in kraja ter kota vstopa kozmičnih žarkov, ki priletijo v zemljino magnetno polje in atmosfero. Galaktični kozmični žarki naj bi bili dominanten vir atmosferske ionizacije na višinah 1 – 35 km (nad kopnem) in 0 – 35 km (nad oceani), z maksimumom okoli 15 km. [3] Kljub pričakovanju, da se torej spreminja stopnja oblačnosti na teh višinah, le ni tako. Korelacijo med galaktičnimi kozmičnimi žarki in oblačnostjo so opazili pod 4 km, torej v nizki oblačnosti.

4.1. Nastanek in vrste oblakov

Razlikujemo 3 nadstropja ozračja, v katerih se najpogosteje pojavljajo določene vrste oblakov. Najvišje, v višini 7-13 km (visoki oblaki, so čisti ledni oblaki s $T > -35\text{ °C}$), srednje, v višini 3-7 km (srednje visoki oblaki, so mešani oblaki iz ledu in vode s $-10\text{ °C} < T < -35\text{ °C}$) in spodnje nadstropje, od morske gladine do 3 km (vsebuje vodne oblake s T od $-10\text{ °C} < T < \text{nad } 0\text{ °C}$). [3] Za nastanek oblakov so ključnega pomena v zraku prisotne kemikalije, ki lahko tvorijo kondenzacijska jedra (aerosoli, ioni) in vodna para. Te prihajajo iz oceanov in onesnaženega zraka in so prisotne v večjih koncentracijah v spodnjih plasteh ozračja. Posledica tega je, da so na novo nastali oblaki precej nizko ležeči in absorbirajo velik del odbitega UV sevanja. Hkrati je potrebno omeniti, da ima vpliv oblakov na klimo predvsem negativno povratno zanko. Večja stopnja oblačnosti predstavlja večji albedo in s tem manj vpadnega sončnega sevanja. S to teorijo lahko razložimo eno izmed glavnih polemik globalnega segrevanja - zakaj se najnižja plast atmosfere ohlaja, medtem ko se površje Zemlje segreva. Vpliv oblakov na klimo (odboj ali absorpcija) je odvisen od višine oblakov nad površjem in optično debelino. Visoki optično tanki oblaki prepuščajo sončno sevanje, nizki večinoma optično debeli oblaki pa odbijajo sončno sevanje in tako ohlajajo Zemljo. [3] Trenutna ocena o vplivu oblakov na globalno hlajenje Zemlje je med 17 do 35 W/m², kar je pomemben prispevek k energijski bilanci Zemlje. [2] Pomembno je opomniti, da različni tipi oblakov tudi različno nastajajo, torej kozmični žarki z ionizacijo ozračja ne vplivajo na vse vrste oblakov. To in nasičenost s kondenzacijskimi jedri v atmosferi je glavni razlog proti tej teoriji. Kondenzacijskih jeder je v ozračju dovolj in več kot dovolj: v povprečju reda ~100 cm⁻³ maritimnega in ~1000 cm⁻³ kontinentalnega zraka - tako da nekaj jeder več ali manj, ki izvirajo iz trkov kozmičnih žarkov naj ne bi imelo vpliva. Oblaki se tvorijo na kondenzacijskih jedrih in velikost vodnih kapljic je odvisna od gostote in velikosti teh kondenzacijskih jeder, medtem ko je optična debelina oblakov odvisna od vertikalnih temperaturnih profilov ozračja. Številčnost kondenzacijskih jeder je tako odvisna od aerosolov prisotnih v ozračju in nasičenosti. Variacije sončne aktivnosti tako vplivajo na vertikalne temperaturne profile, količino vodne pare v ozračju in nastajanje kondenzacijskih jeder. Troposfera je nasičena z vodno paro, saj le ta hitro nastaja. GCM (Global Climate Model) simulacije kažejo, da se ozračje nasiči že v nekaj dneh, če količino vodne pare v simulacijah postavimo na nullo. Tako da je nastanek oblakov odvisen zgolj od porazdelitve, številčnosti in velikosti kondenzacijskih jeder. Kondenzacijska jedra so tipično velikosti od 0.01 do ~1 μm. Opazovanja in simulacije kažejo na to, da ionizacija pripomore k tvorjenju na stotine kondenzacijskih jeder (> 0.02 μm) v troposferi. To je primerljivo s koncentracijo maritimnega zraka. Nastanek teh kondenzacijskih jeder se razlaga z rastjo manjših aerosolov

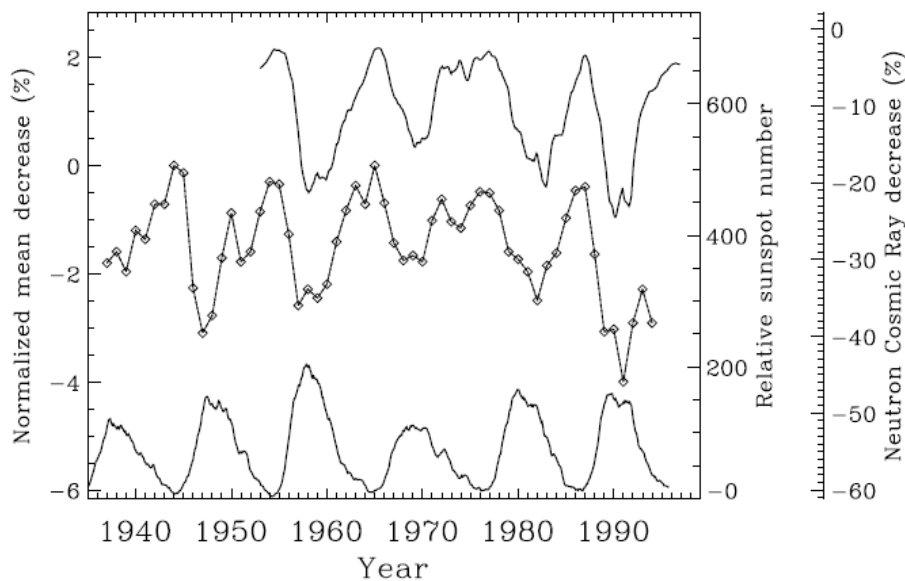
(< 0.02 μm) v procesu ionizacije. V gornjih plasteh atmosfere naj bi bila rast omejena s koncentracijo plinov v zgornjih plasteh, npr. Ar in H_2SO_4 . [3] Kako ultra majhni aerosoli rastejo in tvorijo kondenzacijska jedra je še stvar raziskav, pojav pa bi lahko razložil, zakaj opazamo korelacijo le v spodnjih plasteh troposfere. Skladno s to teorijo pomeni več kozmičnih žarkov tudi več nizko ležečih oblakov, a se glede tega ne strinjajo vsi. Drew Shindell z Nasinega inštituta za vesoljske raziskave v New Yorku [20] razlaga, da morajo kozmični žarki prepotovati prevelike razdalje, da bi lahko prišli do Zemlje v velikem številu, da bi lahko imeli bistven vpliv. Za drugi razlog navaja Sonce. Sonce namreč s svojimi izbruhi ustvarja solarni veter, ki se širi vse do konca našega sončnega sistema in čeprav ob tem ustavi večino sončnih kozmičnih žarkov, z nižjimi energijami, magnetno polje sonca odklanja visoko energijske galaktične kozmične žarke, ki lahko prodrejo Zemljino magnetno polje. Mnogi znanstveniki [4] menijo, da je zbranih premalo podatkov, da bi lahko dokazali povezanost med kozmičnim sevanjem in nastajanjem oblakov, zato lahko pričakujemo, da se bodo raziskave na tem področju nadaljevale. Zanimivo si je ogledati rezultate numeričnih simulacij GCM modela, s študije IPCC, AR4 o vplivu posameznih komponent na globalno segrevanje. Rezultati so predstavljeni v spodnji tabeli 1. Opazimo lahko, da imajo vodna para in oblaki največji vpliv pri absorpciji v UV področju in s tem segrevanju ozračja.

plin	absorbira	GWP	t_a (leta)	volumen v atmosferi [%]
H_2O	60 %	/	ure - dnevi	~ 1-4 %
H_2O + oblaki	66-85 %	/	ure - dnevi	/
CO_2	26 %	1	<120	0.038 %
H_2O + CO_2	69-90 %	/ + 1	/	/
CH_4 + N_2O	~ 6 %	25 in 300	12 in 114	0.00017 % in 0.00003 %
O_3	~ 7 %	/	ure - dnevi	0.000007 %
CFCs	< 1 %	400-15000	>100	0.000000025 %

Tabela 1: Tabela prikazuje relativni prispevek, v absorpciji, posameznih komponent (plinov) k globalnemu segrevanju. Pomembno je poudariti na prekrivanja pri absorpcijah v določenih spektralnih področjih, zato je natančne prispevke težko določiti. GWP (global warming potential) predstavlja merilo za absorpcijo 1 ppmv-ja (parts per milion by volume) posameznih plinov relativno na CO_2 , v obdobju 100 let. Pomembna sta tudi volumski procent teh komponent v ozračju in življenjska doba posameznih plinov v atmosferi. [4], [21]

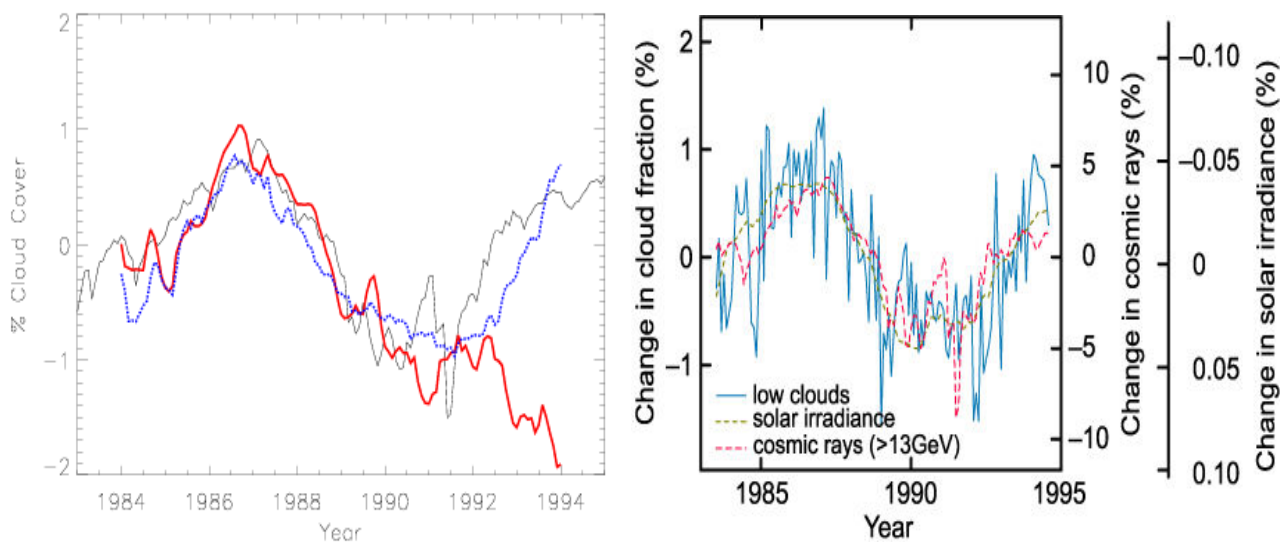
4.2. Rezultati meritev

Da lahko kaj povemo o vplivu kozmičnih žarkov na zemeljsko klimo moramo analizirati kako se je s časom spreminjala stopnja oblačnosti v spodnjem delu troposfere. Ta opazovanja so možna v zadnjih desetletjih, preko merjenj geostacionarnih satelitov. Projekt ISCCP (International Satellite Cloud Climatology Project) D2 [22] zajema meritve od leta 1983 naprej, ki potrjujejo teorijo. Zadnja satelitska opazovanja (ISCCP) in raziskave kažejo na povezavo med sončno aktivnostjo oz. solarnim vetrom, galaktičnimi kozmičnimi žarki in stopnjo oblačnosti na Zemlji, ter s tem posledično klimo, kar prikazujejo tudi grafi na slikah spodaj. Mioni so glavni krivec za ionizacijo spodnjih plasti troposfere. [2] Zanesljive meritve (ISCCP) obstajajo šele kratek čas (zadnji sončev cikel), zato je pomembno, da se rezultate preveri na daljši časovni skali. Grafi na sliki 10 prikazujejo meritve kozmičnih žarkov iz različnih eksperimentov v letih od 1937 do 1994, merjenih v ionizacijskih komorah, kjer so merili visoko energijski del spektra galaktičnih kozmičnih žarkov in CNM (Climax Neutron Monitor [23]) v Koloradu, kjer meritve zajemajo nizko energijski del spektra galaktičnih kozmičnih žarkov. Za primerjavo sončne aktivnosti, je dodano število sončnih peg. Opazimo lahko, da amplitude v nihanju sončne aktivnosti in kozmičnih žarkov niso povezane.



Slika 10: Zgornji graf prikazuje meritve fluksa kozmičnih žarkov nevtronskega monitorja (CNM) v obdobju od 1953 do 1996 leta. Srednji graf prikazuje rezultate meritev kozmičnih žarkov z ionizacijskimi komorami v obdobju od 1937 do 1994 leta. Oba grafa sta bila normalizirana glede na nekajletni začetni interval. Spodnji graf pa prikazuje relativno število sončnih peg. Opazovanja od leta 1964 kažejo, da se je sončni fluks zvečal za 41%, kar pomeni 3.7% padec v fluksu galaktičnih kozmičnih žarkov. [2]

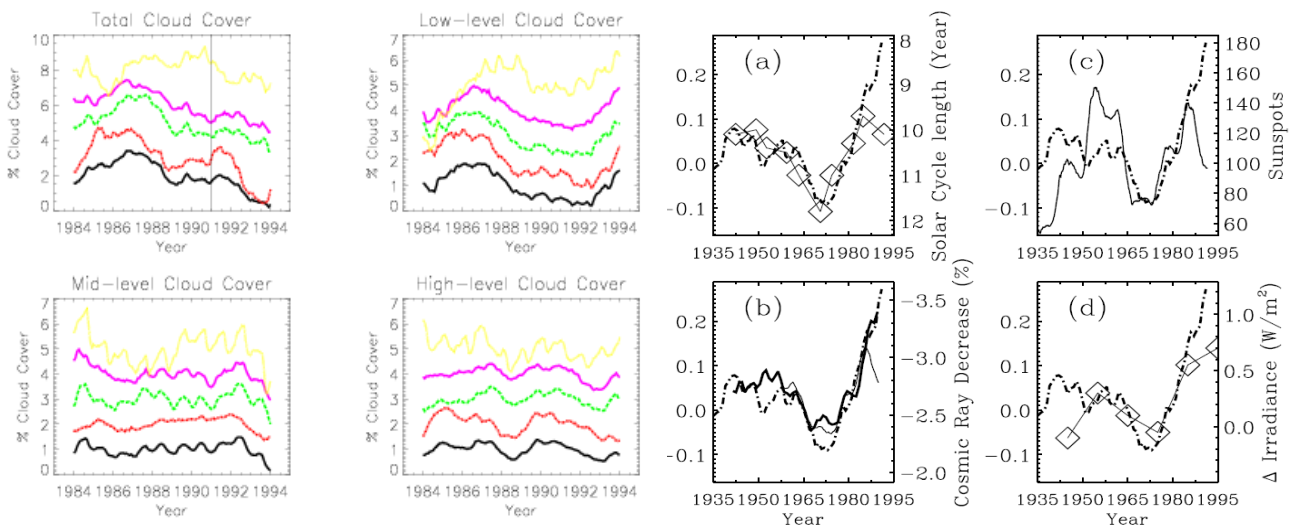
Opazimo lahko, da sončna aktivnost res vpliva na fluks kozmičnih žarkov. Ta vpliva na stopnjo oblačnosti nižjih plasti troposfere, predvsem na srednjih geografskih širinah in nad oceani, brez tropskih območij. S slike 11 in 12 lahko opazimo, da je korelacija precej močna. Edini očitak je glede na kratek časovni interval, zaradi kratkotrajnosti meritev sprememb v stopnji oblačnosti. Slika 11 prikazuje spremembe v stopnji oblačnosti v nižjih plasteh in celoti v primerjavi s podatki iz CNM. Slika 12 pa dodatno tudi variacije v sončni aktivnosti.



Slika 11 (levo): Rdeča krivulja prikazuje spremembe v oblačnosti celotne atmosfere, modra pa le v spodnjih plasteh troposfere, med letom 1984 in 1994. Podatki so pridobljeni iz meritev ISCCP D2 in opazovanj v vidnem ter UV področju. Črna črta predstavlja meritve kozmičnih žarkov CNM. Opazimo lahko močno korelacijo med stopnjo oblačnosti v nižjih plasteh in kozmičnimi žarki, pred letom 1991 pa tudi korelacijo v celotni stopnji oblačnosti, kar namiguje na povezanost med procesi tvorjenja oblakov v nižjih in višjih plasteh. [24]

Slika 12 (desno): Modra krivulja predstavlja spremembe stopnje oblačnosti v nižjih plasteh, rdeča črtkana meritve kozmičnih žarkov in zelena črtkana črta meritve sončne konstante. [25]

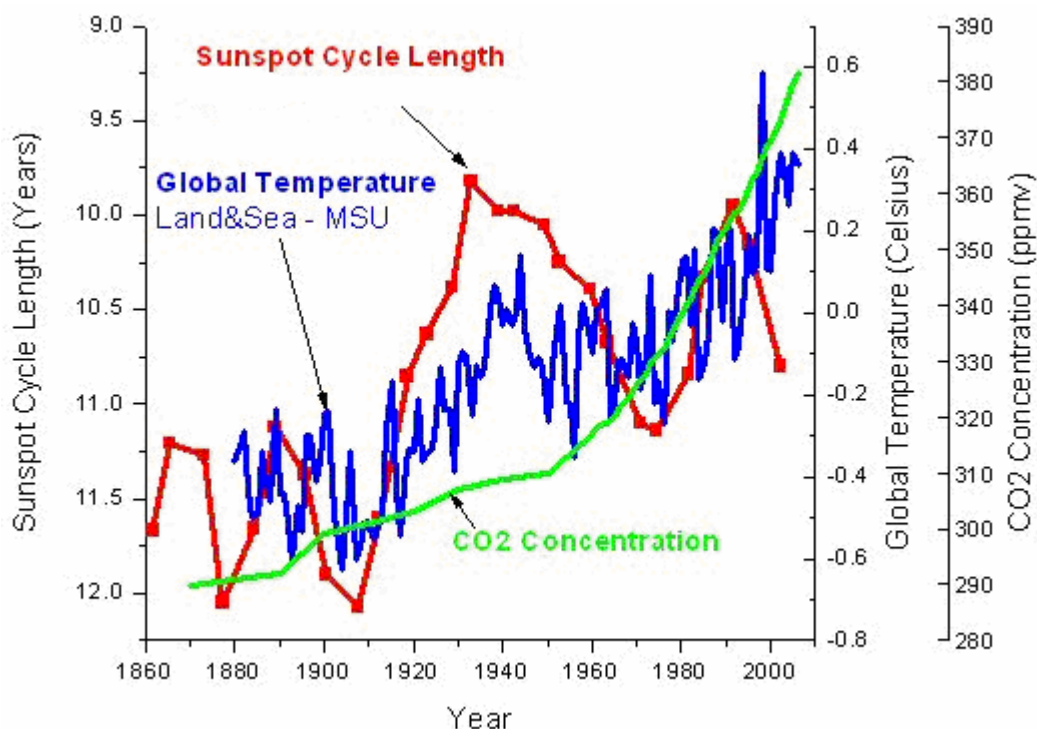
Rezultati ISCCP D2 meritev predstavljeni na sliki 13 (levo) kažejo vpliv kozmičnih žarkov na tvorbo 3 različnih tipov oblakov (selekcija po višinah) in na različnih geografskih širinah. Slika 14 (desno) pa prikazuje štiri različne meritve v primerjavi z meritvami temperature Zemlje, v obdobju od 1935 do 1995.



Slika 13 (levo): Štirje ločeni grafi prikazujejo meritve vpliva kozmičnih žarkov na oblačnosti, od 1984 do 1994. Prvi graf (zgoraj levo) prikazuje meritve oblačnosti za celotno atmosfero, drugi (zgoraj desno) prikazuje meritve v nižjih plasteh, ~ 2 km, tretji (spodaj levo) v srednjih plasteh, ~ 4.5 km, in četrti (spodaj desno) v višjih plasteh ozračja, ~ 10 km. Vsi grafi so normalizirani glede na letna povprečja, da se izničijo sezonski efekti. Vsak graf predstavlja 5 različnih meritev. Pokritost oblakov po celotni Zemlji - črna, tropskih območjih (geografske širine <math>< 22.5^\circ</math>) - rdeča, srednjih geografskih širinah (

Slika 14 (desno): Na sliki so na vseh štirih grafih predstavljene globalne temperature kopna in oceanov, povprečene v 11 letnem ciklu. Na prvem grafu (a) so za primerjavo predstavljene meritve aktivnosti posameznih sončnih ciklov v obdobju od 1935 do 1995 (pravokotniki). Na drugem grafu (c) je predstavljeno število sončnih peg, povprečeno glede na 11 letne cikle. Tretji graf (b) prikazuje število kozmičnih žarkov, povprečeno glede na 11 letne sončne cikle. Tanka črta označuje meritve CNM. Skala kozmičnih žarkov je obrnjena, tako da višja temperatura ustreza manjšemu številu kozmičnih žarkov, kar je sorazmerno z večjo sončno aktivnostjo. Četrti graf (d) pa prikazuje spremembe v rekonstruiranih meritvah sončnega sevanja (solarne konstante), glede na podatke Lean et al. Opazimo lahko močno korelacijo med številom kozmičnih žarkov, povečano aktivnostjo sonca (Solar cycle length) in temperaturo, medtem ko ostale spremembe sončne aktivnosti bolj sledijo številu sončnih peg. [2]

S primerjavo slik 11 in 13 lahko opazimo, da se korelacija med meritvami pokritosti Zemlje z oblaki v celotni atmosferi (prvi graf) in kozmičnimi žarki podre za vsa področja geografskih širin po letu 1991. Prav tako razvidno je tudi, da so korelirane le meritve nižjih plasti oblačnosti, in sicer s korelacijskimi koeficienti 0.87, 0.72, 0.88 in 0.92 v omenjenem vrstnem redu, brez polarnih območij. Kozmični žarki torej najbolj vplivajo na stopnjo oblačnosti v srednjih geografskih širinah in nad oceani. Satelitske meritve nižjih plasti oblačnosti zajemajo tudi spremembe višje ležečih plasti oblakov, skozi katere opazujemo, zato so možna odstopanja v podatkih poleg sistematskih napak, tudi glede na spremembe v višje ležečih plasteh, kar pa ne predstavlja večjega odstopanja, zaradi tanjših optičnih debelin in manjšega števila oblakov v višjih plasteh. Meritve kažejo, da variacije kozmičnih žarkov najbolj sovpadajo z 11 letnim ciklom sončne aktivnosti. Sprememba stopnje oblačnosti za 3% med 11 letnim sončnim ciklom naj bi po ocenah prispevala k globalnemu segrevanju med 0.8 do 1.7 W/m^2 . [2], [3] To je primerljivo z ocenjenim radiacijskim prispevkom CO_2 od leta 1750 dalje, ki je ocenjen na 1.5 W/m^2 [4]. Slika 15 prikazuje korelacijo med številom sončnih peg, temperaturo in CO_2 koncentracijo od leta 1850 dalje.



Slika 15: Rdeča krivulja predstavlja sončno aktivnost na podlagi števila sončnih peg. Razdalja med dvema točkama predstavlja dolžino 1 sončnega cikla, oz. čas med dvema maksimuma ali minimuma. Cikli so primerno uteženi. Podatki za temperaturo do leta 1978 so iz meritev HadCURT3, od 1984 do 2006 pa iz satelitskih meritev MUS. Vmesno obdobje je povprečeno. Letna nihanja niso izvzeta. Meritve koncentracije CO₂ (ppmv) od 1958 do 2007 so iz Mauna Loa observatorija, meritve iz Havajev pred 1958 pa so nezanesljive. Opazimo lahko korelacijo med temperaturo in sončno aktivnostjo do leta 1980,1990. Po tem obdobju pa trend v CO₂ koncentraciji sovпада z naraščanjem temperature, kar IPCC, AR4 študija z GCM numeričnimi modeli potrjuje. Sončno aktivnost in kozmične žarke torej lahko smatramo kot začetni mehanizem in delnega krivca pri vplivu na klimo. [26]

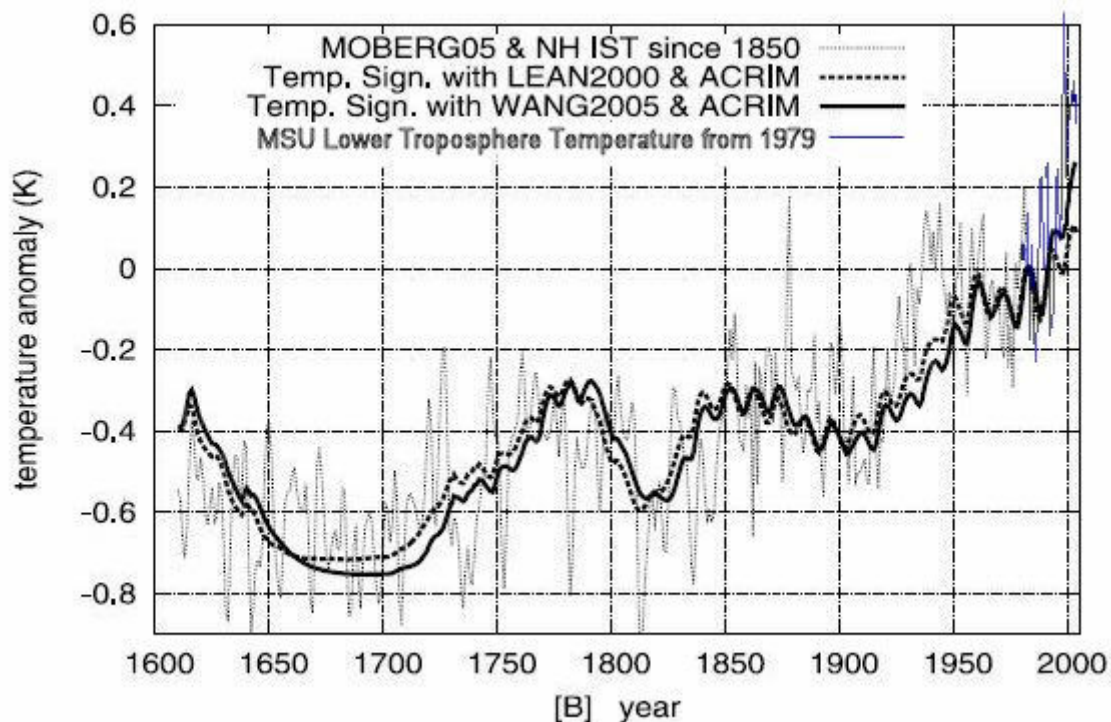
S slike 15 je razvidno, da je temperatura med letoma 1970 in 1990 narasla za približno 0.3 °C. Od leta 1900 dalje pa za $\sim 0,74 \pm 0.18$ °C. [4] Razvidno je tudi »boljše« ujemanje temperature s spremembami sončne aktivnosti. Odstopanje krivulje koncentracije CO₂ med leti 1940-1960 lahko razložimo z antropogenimi izpusti aerosolov, kar si mogoče lahko razlagamo kot večjo občutljivost atmosfere na vpliv kozmičnih žarkov. Z nekaj predpostavkami je možno oceniti in primerjati vpliv kozmičnih žarkov na spremembo temperature. Predpostavimo npr. direkten vpliv kozmičnih žarkov na stopnjo oblačnosti. Iz numeričnih simulacij in meritev je ocenjeno, da 1% sprememba v stopnji oblačnosti atmosfere vpliva na energijsko bilanco Zemlje z 0.5 W/m², kot že omenjeno. Iz meritev ISCCP D2 je ugotovljeno, da se je med letoma 1987-1990 celotna globalna oblačnost spreminjala za maksimalno 3%, kar lahko ocenimo na spremembo 1.5 W/m² vpliva k segrevanju. [2] V istem obdobju so meritve kozmičnih žarkov, iz ionizacijskih komor, nihale za $\sim 3\%$ med 11 letnimi cikli, kot je razvidno iz slike 10. Iz slike 6 in 14, ki sta normirani glede na 11 letne cikle, je lepo videno naraščanje sončne aktivnosti in števila kozmičnih žarkov (slika 14 (b)). Od tod lahko ocenimo 1.2 % porast v številu kozmičnih žarkov med leti 1975-1989, kar če predpostavimo direkten vpliv sovпада z 0.5 W/m² spremembo radiacije zaradi sprememb v oblačnosti. To je štirikrat večji vpliv kot ga predpostavlja IPCC in bi lahko bilo odgovorno za 85% segrevanja Zemlje. [2] Študije iz numeričnih simulacij kažejo na občutljivost med 0.7 °C do 1 °C za 0.25% spremembo v sončni konstanti. Direktnen vpliv sprememb sončnega sevanja se ocenjuje na 0.1 °C, ob upoštevanju zgornje občutljivosti pa lahko vpliv kozmičnih žarkov ocenimo na 0.3-0.5 °C v danem obdobju. [2]

5. Primerjava modela CO₂ in modela kozmičnih žarkov

Najprej je potrebno omeniti, da igra pri klimatskih spremembah Zemlje bistven prispevek vodna para, kar je razvidno tudi iz tabele 1. Naravna topla greda predstavlja 97% vpliva in model kozmičnih žarkov ne izključuje tega efekta. Druga potrebna opomba pa so rezultati numeričnih simulacij IPCC GCM. [4], [21] Študije kažejo, da naravni dejavniki sami ne razložijo opaženih odstopanj v temperaturi v zadnjih desetletjih, medtem, ko simulacije, ki vključujejo oba efekta (naravne in antropogene vplive) sovpadajo s podatki iz opazovanj.

5.1. Geološka ujemanja

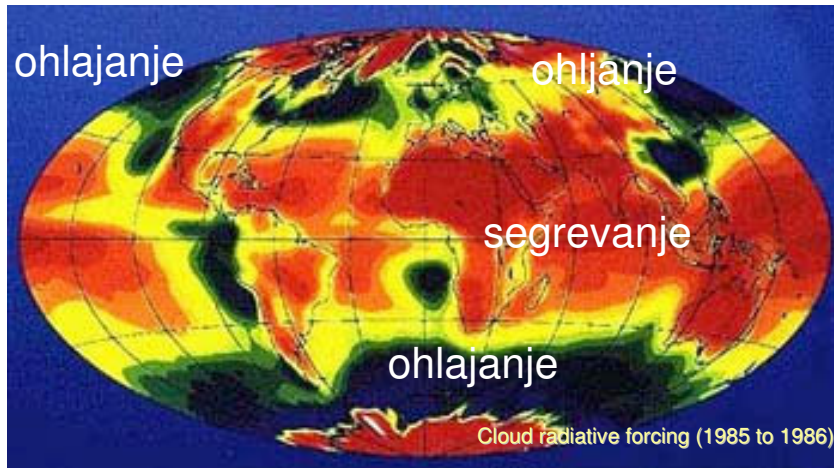
N. Scafetta in B.J. West z Duke univerze, Durham, NC [5] raziskujeta vpliv sončne aktivnosti na Zemljo. Iz rekonstrukcij geoloških podatkov je bila ugotovljena močna korelacija med temperaturo severne poloble in spremembami sončne aktivnosti od 1600 do 1920. Graf prikazuje spodnja slika 16.



Slika 16: Krivulje temperature do 1850 so iz rekonstrukcij geoloških podatkov (Moberg et al., 2005) in različnih merjenih podatkov od 1850 dalje. Prikazani sta 2 različni rekonstrukciji sončne aktivnosti (Lean, 2000 in Wang et al. 2005). Trenda v naraščanju obeh rekonstrukcij sovpadata z meritvami ACRIM satelitov od leta 1980 dalje. Vidna je močna korelacija med meritvami. Opazno je naraščanje sončne aktivnosti v drugi polovici 20. stoletja. Opazen je tudi Mandauerjev minimum (1645-1715) sončne aktivnosti, ki sovpada s časom male ledene dobe. Kot že omenjeno naj bi bile variacije sonca zgolj sprožilni mehanizem in same ne morejo razložiti klimatskih sprememb takih razsežnosti. [26]

Torej CO₂, kot glavni krivec sprememb v 20. stoletju, ali kozmični žarki in spremembe sončne aktivnosti, kot razlog sprememb? Le omenimo, da CO₂ izpusti sami, prav tako kot spremembe v fluksu kozmičnih žarkov same, ne morejo biti razlog opaženih sprememb zadnjih desetletij. Klimatski sistem Zemlje je dinamičen in kaotičen sistem, kjer se različni

vplivi med seboj dopolnjujejo, povezujejo in dodatno vplivajo preko pozitivnih in negativnih povratnih zank. Zato je primerjava zgolj simbolične narave in za tako kratko časovno obdobje brez pomena. Spodnja slika 17 kot povzetek že omenjenih procesov prikazuje vpliv galaktičnih kozmičnih žarkov na stopnjo oblačnosti, kar je razvidno iz področij z različno temperaturo.



Slika 17: Slika sevanja zemlje od leta 1985 do 1986. Neto efekt oblačnosti predstavlja pozitiven (absorpcija) in negativen (odboj in s tem hlajenje) vpliv. Ohlajanje je predstavljeno s temnejšimi barvami. Kot je opazno je vpliv oblačnosti na klimo na nekaterih območjih pozitiven. Pomembno je poudariti, da gre predvsem z območja z visoko oblačnostjo ali minimalno stopnjo. Vpliv oblačnosti na klimo je splošno negativen – oblaki hladijo Zemljo. Podatki so iz Earth Radiation Budget Eksperimenta NOAA-9 satelita. Kompozitum slike pa je bil sestavljen na Univerzi v Washingtonu. [27]

6. Zaključek

Vpliv sončnih sprememb in kozmičnih žarkov na zemeljsko klimo je trenutno negotov. Zadnje raziskave kažejo močno korelacijo med vplivom na stopnjo oblačnosti v nižinah (< 3 km) in sončno aktivnostjo oz. galaktičnimi kozmičnimi žarki, kar kaže na to, da kozmični žarki ionizirajo nižje plasti troposfere in vplivajo na stopnjo oblačnosti. Teorija o vplivu galaktičnih kozmičnih žarkov na klimo predvideva ohlajanje v višjih geografskih širinah. Seveda je odstopanja od opazovanj, ki jih prikazuje slika 17, možno razložiti tudi s kompleksnostjo procesov na Zemlji in v atmosferi ter manjšega sončnega sevanja na teh višinah. Teorija tudi razloži odstopanja v temperaturnem profilu atmosfere. Korelacija med temperaturo in spremembami fluksa kozmičnih žarkov je močna in temperaturne spremembe sledijo spremembam fluksa. Prav tako lahko omenimo geološka ujemanja. Poleg tega pa teorija razloži opažene astronomske spremembe in segrevanje zunanjih planetov, na podlagi naraščajoče sončne aktivnosti in je tako dober kandidat za nadaljnje študije. Nadaljnje raziskave bodo potrdile ali ovrgle vpliv kozmičnih žarkov na klimo, človeštvu pa ne preostane drugega da se na spremembe prilagodi.

7. Reference

- [1] http://www.fmf.uni-lj.si/~podgornik/FMF_SITE/SEM.html
- [2] Henrik Svensmark, Influence of Cosmic Rays on Earth's Climate, 81, PHYSICAL REVIEW LETTERS (1998).
- [3] Henrik Svensmark, Low Cloud Properties Influenced by Cosmic Rays, 85, PHYSICAL REVIEW LETTERS (2000).
- [4] IPCC, AR4, WG1 (2007)
- [5] Nicola Scafetta and Bruce J. West, Is Climate Sensitive to Solar Variability?, 51, PHYSICS TODAY (march 2008).
- [6] <http://www.sciencebits.com/CosmicRaysClimate>
- [7] Claus Grupen, Astroparticle physics, (Springer, New York, 2005).
- [8] INT, Nuclear astrophysics: <http://www.int.washington.edu>
- [9] <http://www.telescopearray.org/outreach/detect.html>
- [10] <http://www.auger.org/>
- [11] http://crescere.lip.pt/introduction_v01.html
- [12] Reinhard Schlickeiser, Cosmic ray astrophysics, (Springer, Germany, 2002).
- [13] <http://physicsworld.com/>
- [14] <http://en.wikipedia.org/>
- [15] <http://www.pmodwrc.ch/pmod.php?topic=tsi/composite/SolarConstant>
- [16] Peter A. Sott, Gareth S. Jones, John F.B. Mitchell, Do Models Underestimate the Solar Contribution to Recent Climate Change?, (HCCPR, December 2003).
- [17] N.A. Krivova and S.K. Solanki, Solar total and spectral irradiance: Modelling and a possible impact on climate (ESA SP, 2004), Solar Variability of Possible Relevance for Planetary Climates (Sp. Sci. Rev., 2006) .
- [18] <http://www.globalchange.umich.edu/>
- [19] http://web.hao.ucar.edu/public/research/svosa/smm/smmcp_cme.html
- [20] <http://www.giss.nasa.gov/~dshindel/#topic3>
- [21] <http://www.realclimate.org/index.php?p=142> GISS-GCM Model simulation
- [22] http://gcmd.nasa.gov/records/GCMD_CIDC_ISCCP_D2.html
- [23] <http://cr0.izmiran.rssi.ru/clmx/main.htm>
- [24] <http://www.solarstorms.org/CloudCover.html>
- [25] Carslaw et al., 2002. *Science*, 298: 1732-1737
- [26] http://members.shaw.ca/sch25/FOS/Climate_Change_Science.html
- [27] <http://earthobservatory.nasa.gov/Library/GlobalClouds/cloudiness2.html>