

Uticaj Sunca na galaktičko kosmičko zračenje

Pogled iz podzemlja

Nikola Veselinovi , Niskofonska laboratorija za nuklearnu fiziku, Institut za fiziku, Beograd

21. maj 2019. Seminar Katedre za astronomiju, MF, Beograd

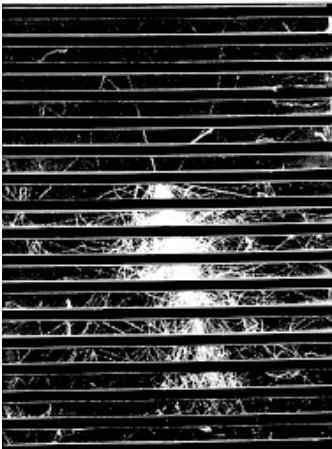


Sadržaj

- “ Primarno kosmi ko zra enje
- “ Transport kroz heliosferu
 - . Aktivnost Sunca i sSpace Weather%
- “ Transport kroz geomagnetno polje
- “ Interakcija sa atmosferom
- “ Detektorski sistemi
 - . Sateliti
 - . Nadzemni
 - . Podzemni
- “ Niskofonska laboratorija u Zemunu
- “ Merenje aktivnosti Sunca
- “ Planovi
- “ Zaključak

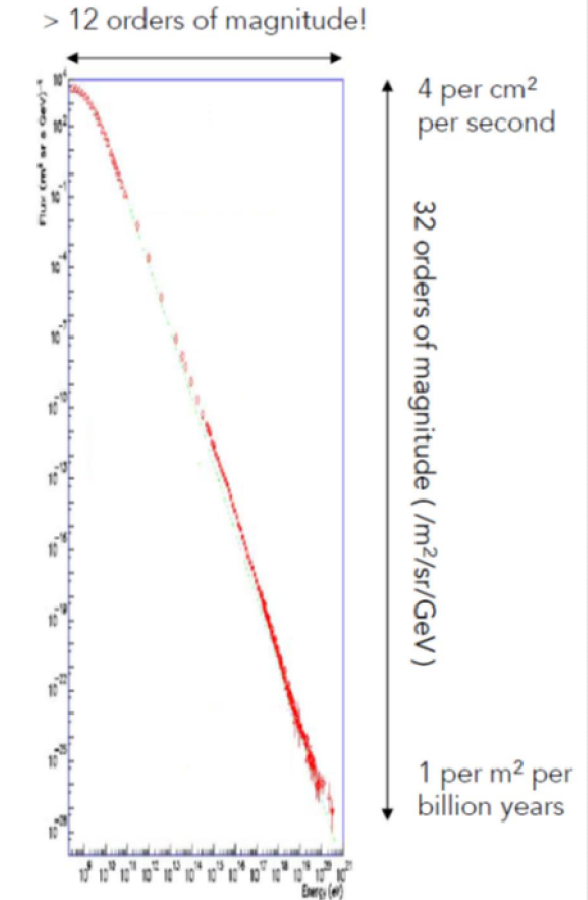
Primarno kosmičko zračenje

- “ Kosmi ki zraki podstakli esti nu fiziku
 - . Uvid u subatomsku fiziku
 - . Otkri e antimaterije (1932)
 - . Otkri e miona (1936)
 - . Otkri e piona (1947)
 - . Otkri e mnogih estica (K, , ,)
- “ Akceleratori
- “ Kosmi ki zraki se vra aju
 - . LHC 10^{13} eV ; UHECR 10^{20} eV
 - . Neutrinska fizika



Primarno kosmičko zračenje

- “ Veoma važan fenomen na kosmičkoj skali
 - . Gustina energije ~ svetlost zvezda, termalna, magnetno polje
 - . Kontrolizuje jonizaciju, zagrevanje
 - . Regulizuje formiranje zvezda
 - . Astrohemija
 - . Stvara turbulentno magnetno polje
 - . Proizvodi Li, Be, B
- “ Mnogo nepoznatih
 - . Izvori nisu dobro poznati
 - . Procesi ubrzanja nisu baš jasni

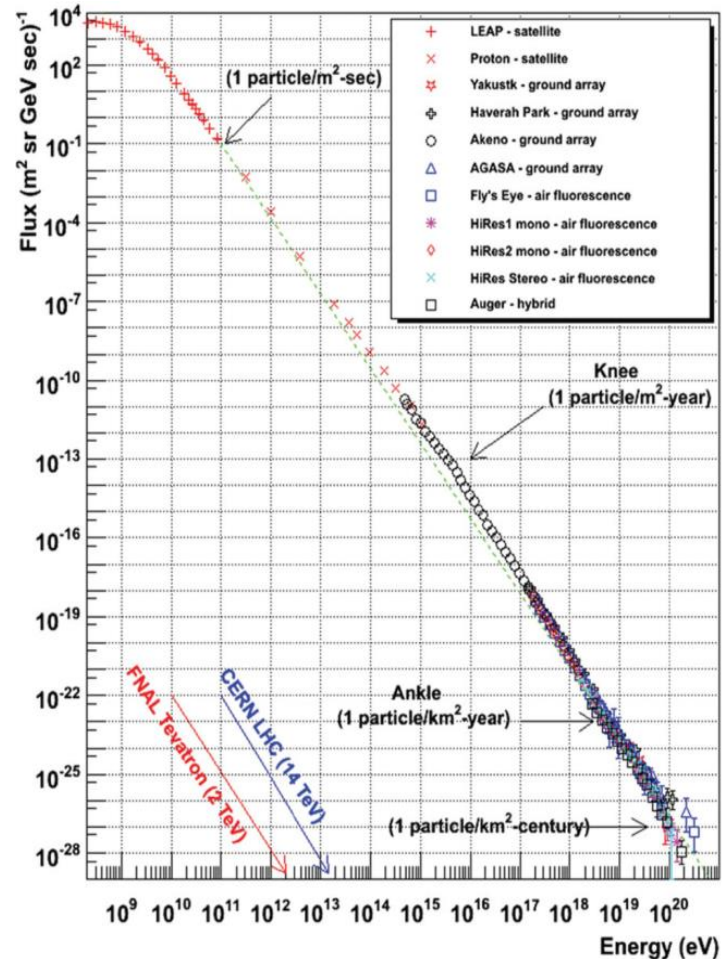
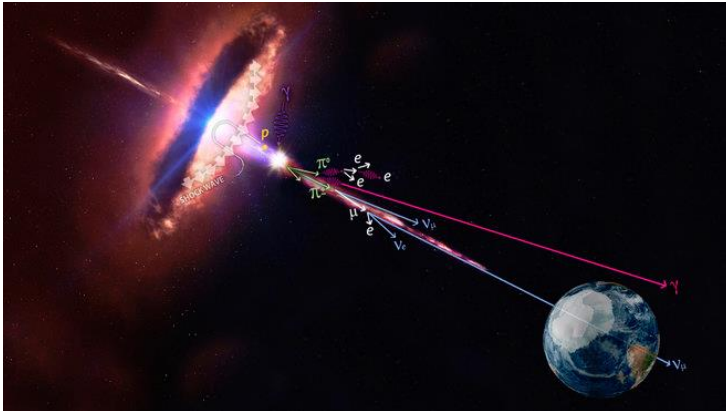


Primarno kosmičko zračenje

- Spektar primarnog KZ
 - Spektralni indeks γ se menja u zavisnosti od energije

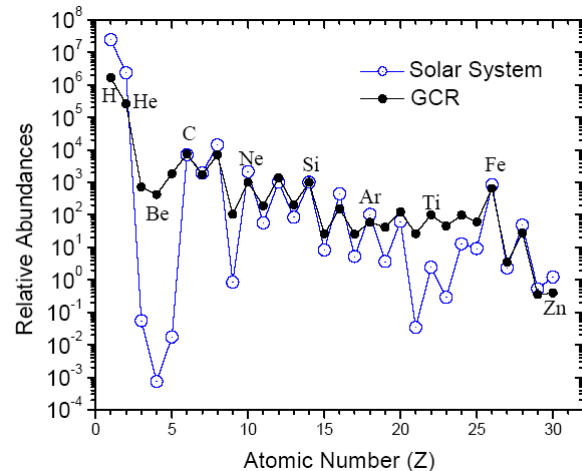
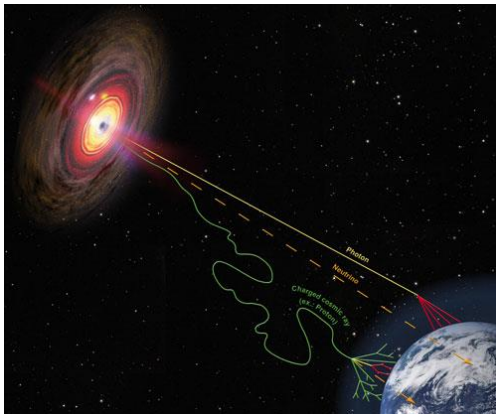
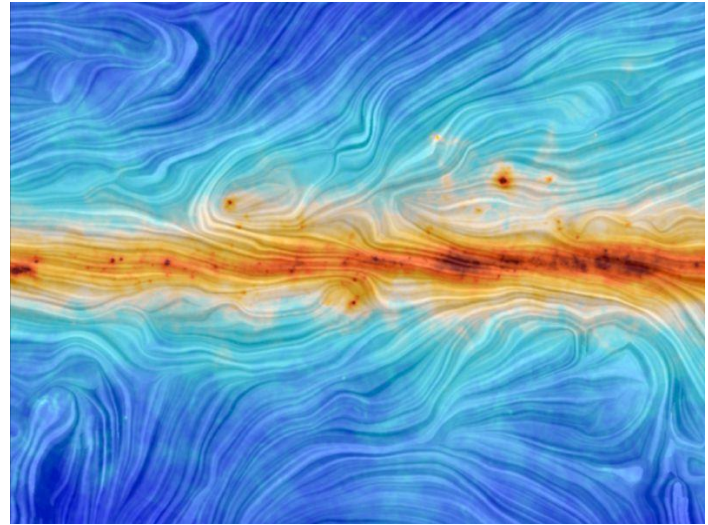
$$j(E) = \frac{dN}{dE} \propto E^{-\gamma}$$

- Izvori primarnog KZ
 - Violentni procesi, galakti ki i vangalakti ki



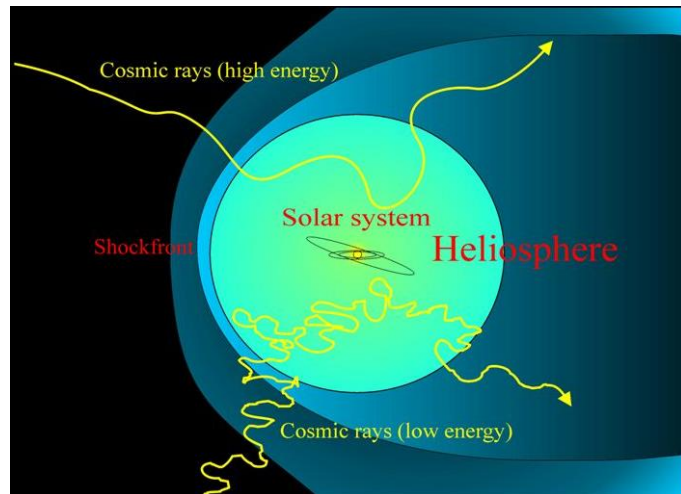
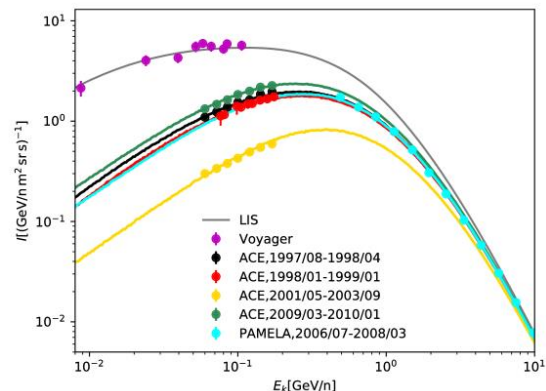
Primarno kosmičko zračenje

- Putanja zavisi od okoline kroz koju se KZ prostire
- Sastav primarnog kosmičkog zračenja
 - 80% protoni, oko 12% alfa čestice ostalo elektroni i jezgra atoma višeg rednog broja. Sastav tako zavisi od energije



Transport kroz heliosferu

- “ **Solarni vetar**, kao elektroprovodna plazma, ima Sunčev magnetno polje zamrznuto u svom toku
- “ čestice galaktičkih KZ različitih energija, koje ulaze u heliosferu su izložene **različitoj modulaciji** koja može jako varirati u zavisnosti od energije čestica.
- “ Magnetno polje i solarni vetar zavise samo od aktivnosti Sunca i modulacija kosmičkih zraka raste tokom veće, a smanjuje tokom manje aktivnosti Sunca.



Transport kroz heliosferu

jednačina

- Transport čestica kroz heliosferu opisao Parker

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\kappa_{ij}^{(S)} \frac{\partial f}{\partial x_j} \right] - \mathbf{U} \cdot \nabla f - \mathbf{V}_d \cdot \nabla f + \frac{1}{3} \nabla \cdot \mathbf{U} \left[\frac{\partial f}{\partial \ln p} \right] + Q$$

Difuzija

Usled malih
iregularnosti
magnetnog
polja

Konvekcija

Usled solarnog
vetra koji se širi
radijalno od
Sunca

Drift

Usled strukture
magnetnog
polja
(gradijent,
zakrivljenost,..)

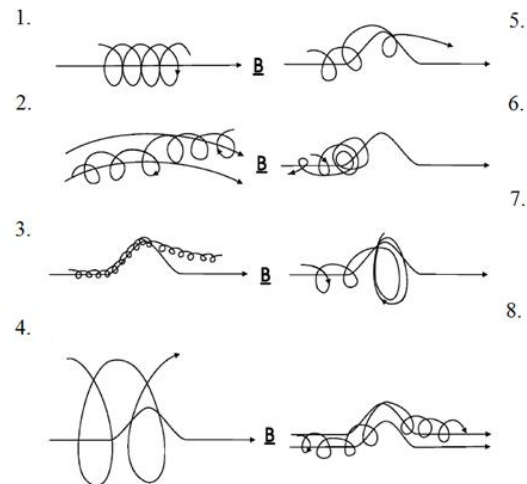
Promena energije

Usled
adijabatskog
širenja solarnog
vetra

Izvori

Unutar
heliosfere

- $f(r,R,t)$ – broj čestica po jedinici zapremine faznog prostora usrednjena po pravcu
- Magnetna čvrstoća (rigidity) $R \equiv pc / Ze$.
- Žiro-radius je dat kao $r_g = R / cB$.



Transport kroz heliosferu

jednačina

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \nabla \cdot (Vf - K \cdot \nabla f) - \frac{1}{3} (\nabla \cdot V) \frac{\partial f}{\partial \ln p} = q$$

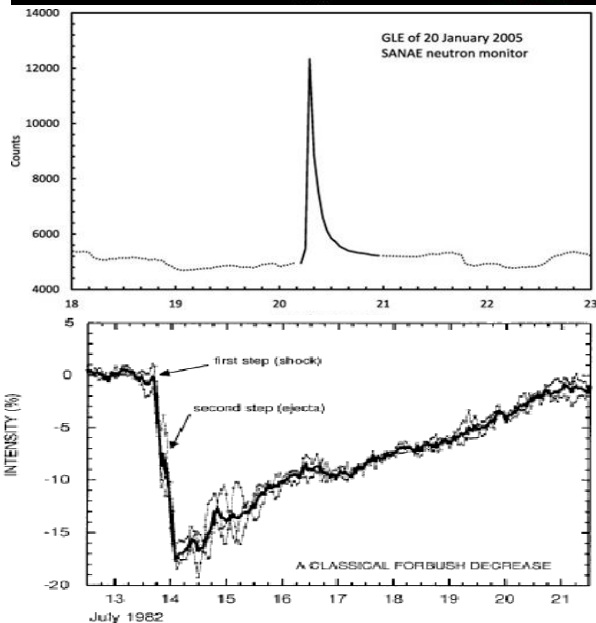
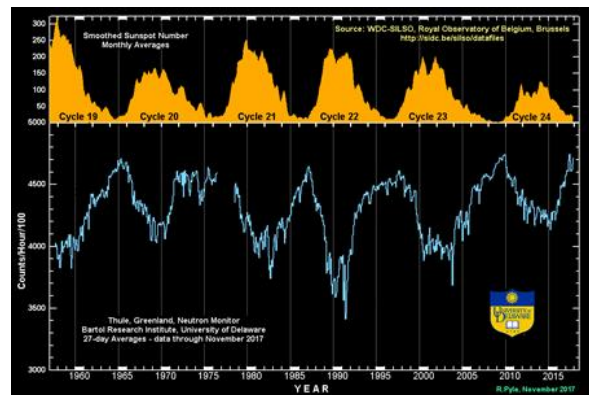
- “ Rasejanje čestica usled turbulencija opisan difuzionim tenzorom
- “ Dijagonalni elementi opisuju turbulenciju čestica paralelno (K_{\perp}) i normalno (K_{\parallel}) na usrednjeno magnetno polje.
- “ Asimetrični članovi (K_A) opisuju drift usled gradijenta i zakrivljenosti mag. polja

$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} K_{\perp} & K_A & 0 \\ -K_A & K_{\perp} & 0 \\ 0 & 0 & K_{\parallel} \end{pmatrix}$$

Varijacije intenziteta kosmičkih zraka

Tip	Amplituda	uzrok
Periodične varijacije		
11-godišnja i 22-godišnja	do 30%	ciklus aktivnosti Sunca
27-dnevna	< 2%	asimetrija interplanetarnog magnetnog polja povezana sa rotacijom Sunca
Dnevna	0,5 %	anizotropnost fluksa kosmičkih zraka usled kretanja Zemlje kroz heliosferu

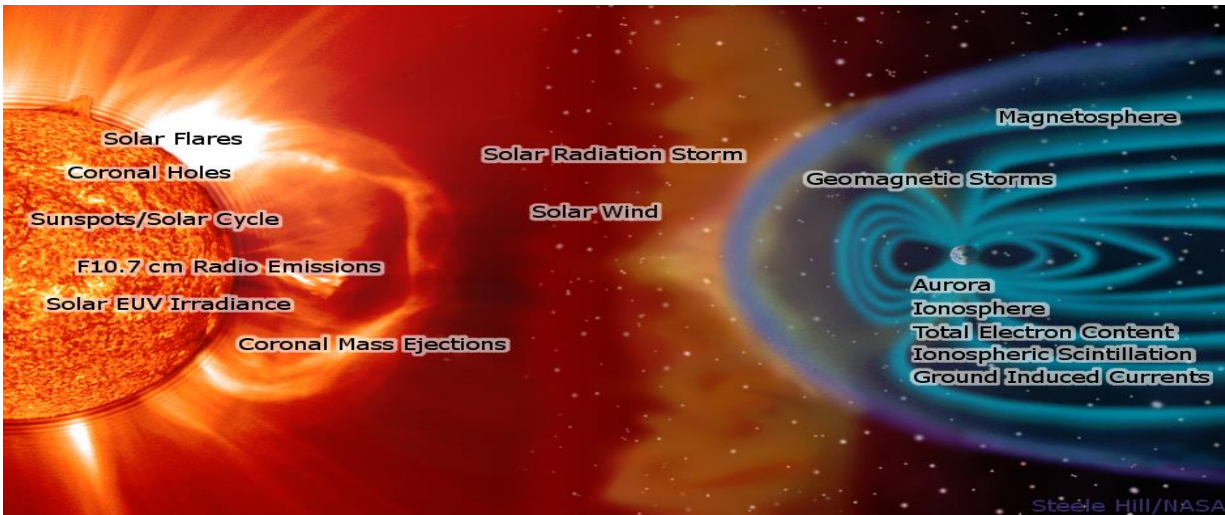
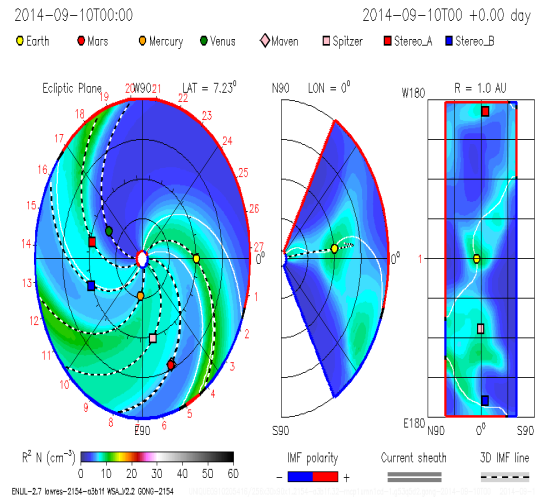
Sporadične varijacije		
GLE	do 300%	pojava usled dodatnog fluksa solarnih kosmičkih zraka
Forbušova smanjenja	do 30%	smanjivanje usled odbijanja niskoenergetskih kosmičkih zraka od udarnog talasa u heliosferi.
Pojačanje pre Forbušovog smanjenja	do 2%	pojava usred refleksije kosmičkih zraka od udarnog talasa.
Smanjenje usled magnetnog oblaka	do 2%	smanjenje uzrokovano odbijanjem niskoenergetskih kosmičkih zraka od korotirajućih područja interakcije.

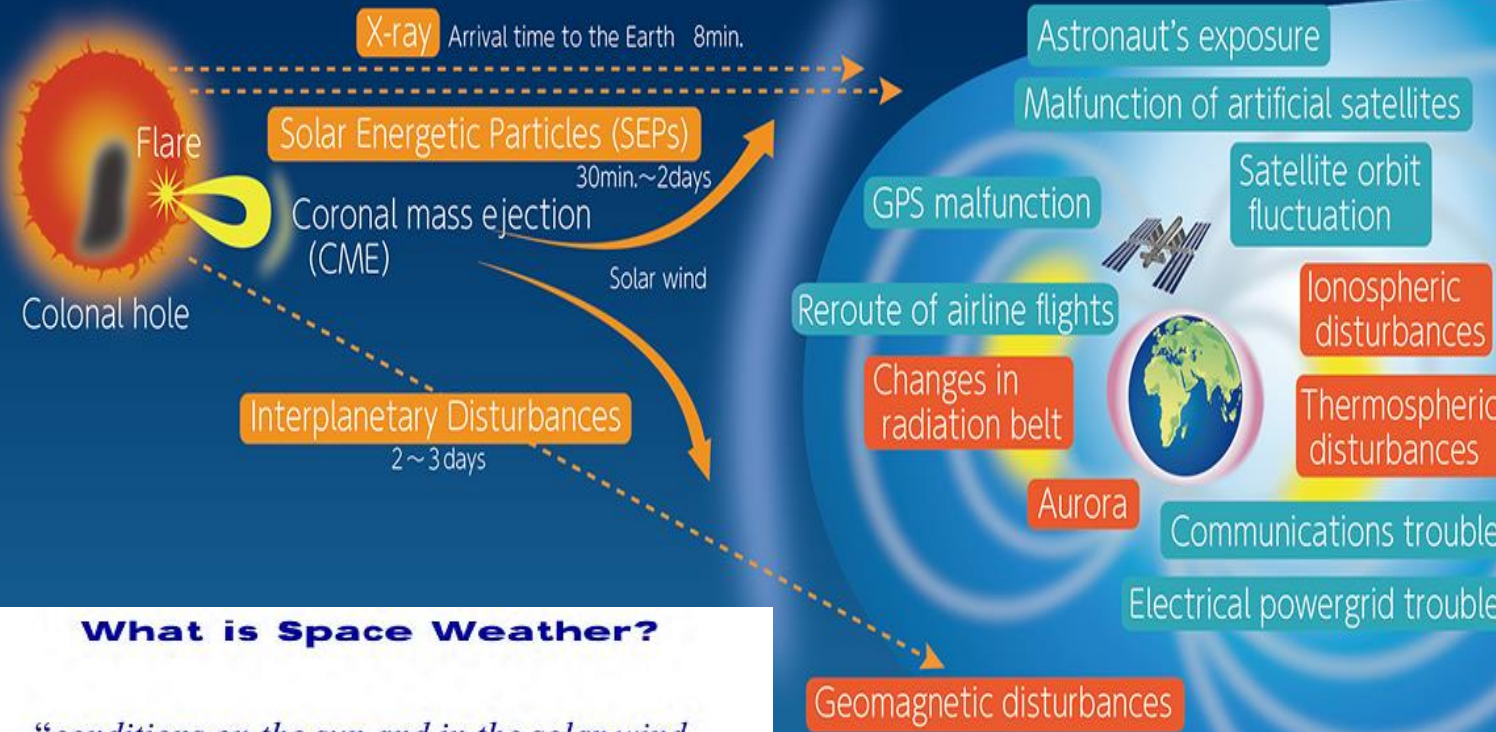


Aktivnost Sunca

Aperiodični događaji

- “ Siloviti procesi na Suncu proizvode promene u heliosferi.
- “ Ove promene mogu intereagovati sa geomagnetnim poljem
- “ Ova interakcija dovodi do raznih smetnji koje mogu uticati na svakodnevni život.





What is Space Weather?

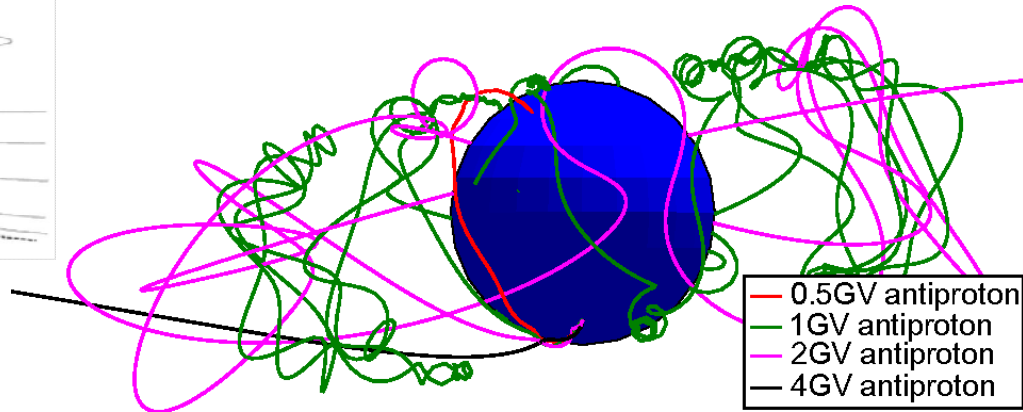
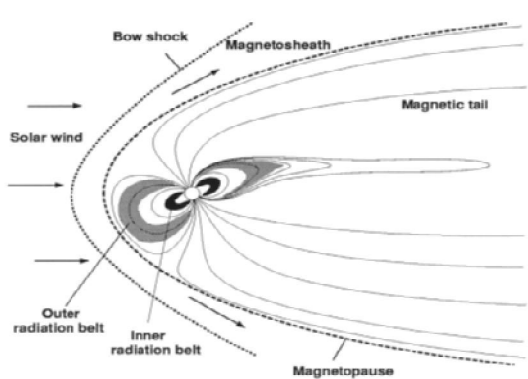
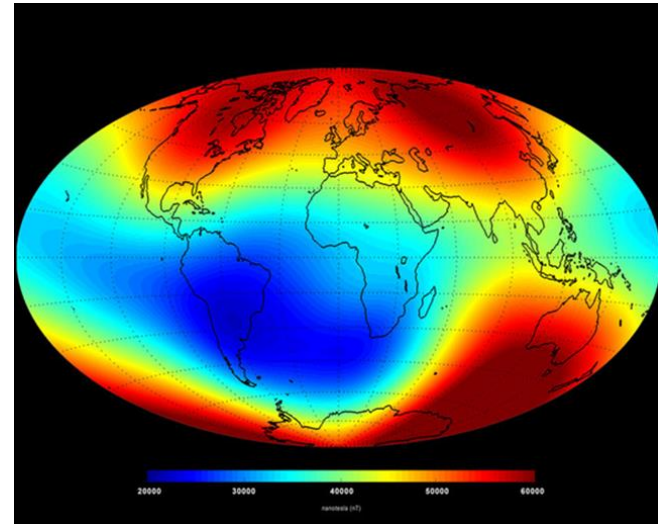
“conditions on the sun and in the solar wind, magnetosphere, ionosphere, and thermosphere that can influence the performance and reliability of space-borne and ground-based technological systems and can endanger human life or health”

[US National Space Weather Programme]

Transport kroz geomagnetno polje

- “ Geomagnetno polje uti e na kosmi ke zrake
- “ Grani na geomagnetna vrsto a R_s (geomagnetic cutoff rigidity)
 - “ najmanja mogu a magnetna vrsto a koju mora imati naelektrisana estica da bi stigla na datu lokaciju na Zemlji

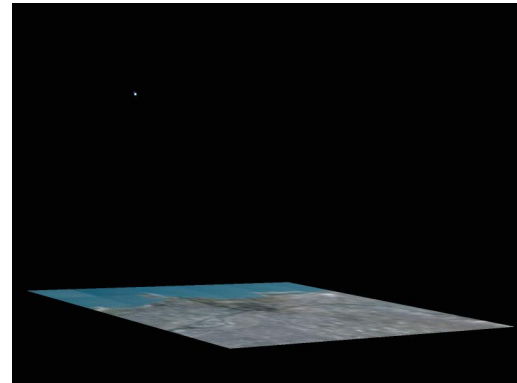
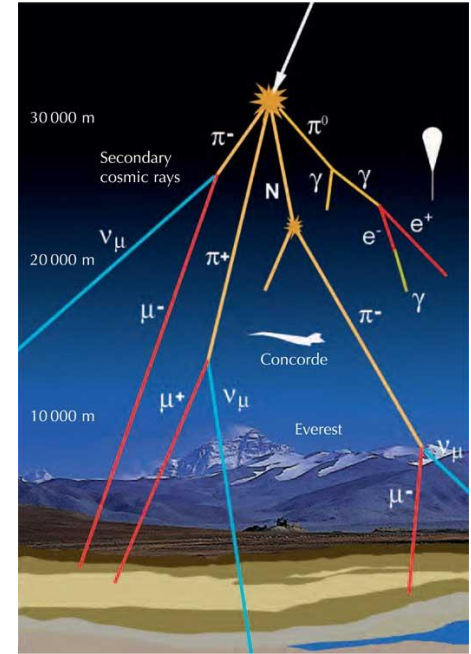
$$R_c = \frac{M \cos^4 \lambda}{4 r^2}$$



Interakcija sa atmosferom

Sekundarno kosmičko zračenje

- “ Primarno kosmičko zračenje interaguje sa jezgrom atoma u vazduhu
- “ **Sekundarni kosmički zraci**
 - čestice koje nastanu u interakciji
- “ Elektromagnetna kaskada
 - $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$
 - $\gamma^* \rightarrow e^- + e^+$ produkcija parova
 - $e^\pm \rightarrow e^\pm + \gamma$ *bremsstrahlung*
- “ Hadronska kaskada
 - $p + p \rightarrow p + \pi^+ \rightarrow p + n + \pi^+$
 - $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$
 - $\pi^- \rightarrow \mu^- + \nu_\mu$
- “ Atmosferski pljusak se ziri sa svakom novom generacijom čestica



Interakcija sa atmosferom

Korekcije

“ Korekcija fluksa KZ na pritisak

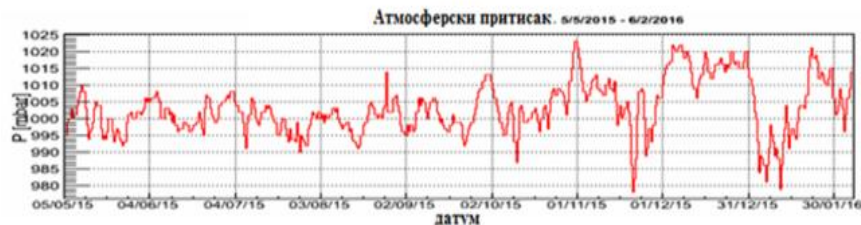
- Barometarski efekat , a barometarki koeficijent

$$\left(\frac{\delta I}{I}\right)_P = \beta \cdot \delta P$$

“ Korekcija fluksa na temperaturu

- Uticaj temperature je mnogo ja e izra0en za kreirane mione
- Negativni temperaturski efekat
- Pozitivni temperaturski efekat

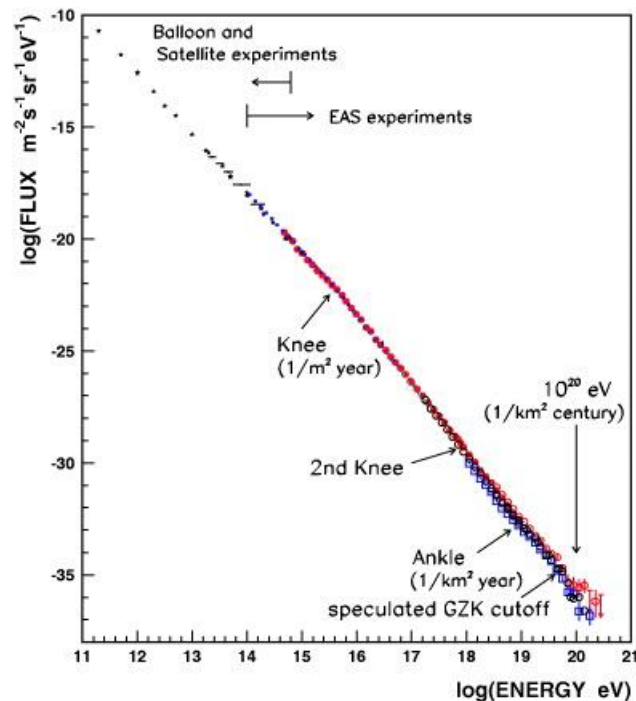
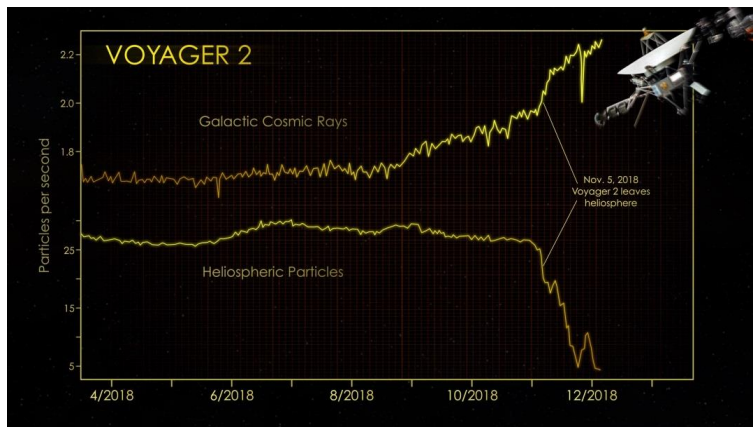
$$\left(\frac{\delta I}{I}\right)_T = \int_0^{h_0} \alpha(h) \cdot \delta T(h) \cdot dh$$

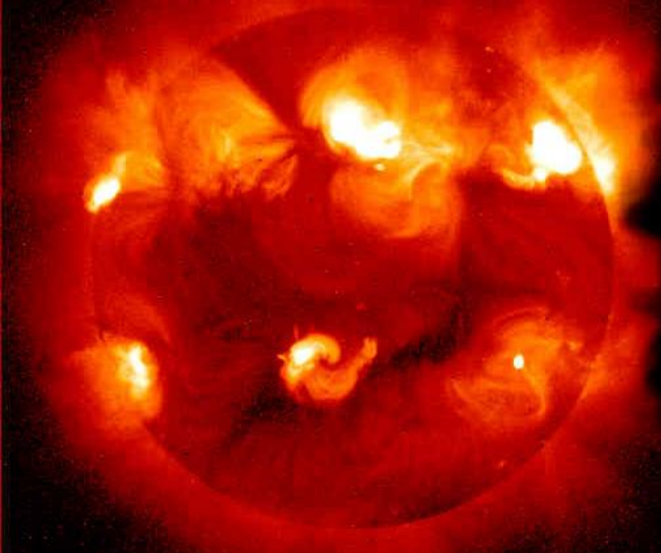


Detekcija kosmičkog zračenja

Može biti:

- “ Izvan heliosfere(Voyager)
- “ Iznad atmosfere i geom. polja(sateliti)
- “ Visoko u atmosferi (baloni)
- “ Na tlu (sekundarno kos. zračenje)
- “ Ispod zemlje (sekundarni mioni, neutrina, neutrinosa)





- “ Events are observed on and near the sun
- “ No measurements until the Particles or CMEs are 99% of the way to Earth
- “ This provides only 30 minutes lead time for CMEs and no lead time for other events

NASA STEREO (Ahead)

• **SOHO**

- Solar EUV Images
- Solar Corona (CMEs)

• **GOES**

- Energetic Particles
- Magnetic Field
- Solar X-ray Flux
- Solar X-Ray Images

• **ACE**

- Solar wind composition, speed, and direction
- Magnetic field strength and direction



NOAA GOES

NOAA POES

• **STEREO**

- CME Direction and Shape
- Solar wind composition, speed, and direction
- Magnetic field strength and direction

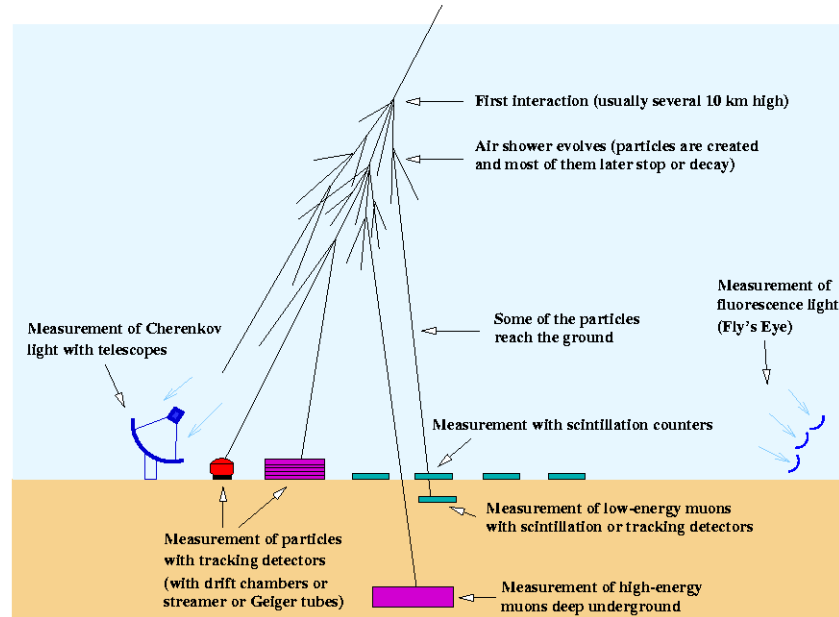
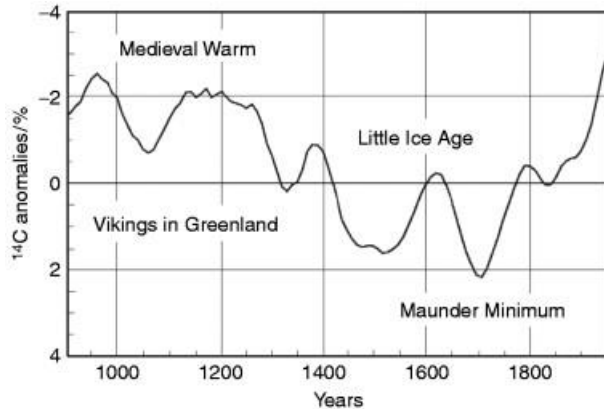
• **POES**

- High Energy Particles
- Total Energy Deposition
- Solar UV Flux

NASA STEREO (Behind)

Detektorski sistemi

- “ KZ se mo0e detektovati na vize na ina
- “ Postoje i indirektne metode merenja kosmi kog zra enja na Zemlji merenj em produkcije kosmogenih radionuklida u atmosferi, poput ¹⁰ ¹⁴



Detektorski sistemi

Niskofonska laboratorija za nuklearnu fiziku Instituta za fiziku u Beogradu

“ Nadmorska visina 78 m,
geografske koordinate
44° 51' N, 20° 23' E



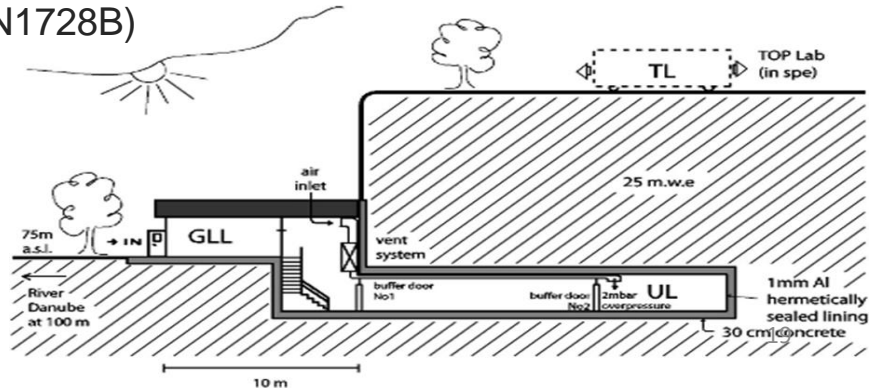
“ Minimalna vertikalna granica na
geomagnetna vrstosa 5.3 GV.

“ Sastoji se od nadzemnog (GLL) i podzemnog (UL)
dela laboratorije, ukopane u 12m lesa.

“ Dva detektora 100cm x 100cm x 5cm, i dva manja
detektora, sa 50cm x 23cm x 5cm.

“ Za akviziciju podataka koriste se brzi analogno-
digitalni konvertori (C.A.E.N. N1728B)

“ Signali sa vremenskom
rezolucijom od 10ns se
snimaju u listu događaja.



Detektorski sistemi

Funkcija odziva (Response function)

- **Odbroj detektora** se može prikazati sa:

$$N_d = \sum_i \int_{E_{th}}^{\infty} Y_i(E, h) \cdot J_i(E, t) dE = \int_{E_{th}}^{\infty} W_t(E, h, t) dE$$

- Funkcija $J_i(E, t)$ je spektar energija primarnog kosmičkog zračenja
- $Y_i(E, h)$ je funkcija prinosa za datu energiju i visinu.

$$Y_i(E, h) = \int_{E_{th}}^{\infty} \int S_i(\theta, \phi) \cdot \Phi_{i,\mu}(E_i, h, E, \theta, \phi) dE d\Omega$$

$S_i(\theta, \phi)$ efektivna površina detektora

$\Phi_{i,\mu}(E_i, h, E, \theta, \phi)$ je diferencijalni fluks miona po primarnoj čestici i tipa sa energijom E_i .

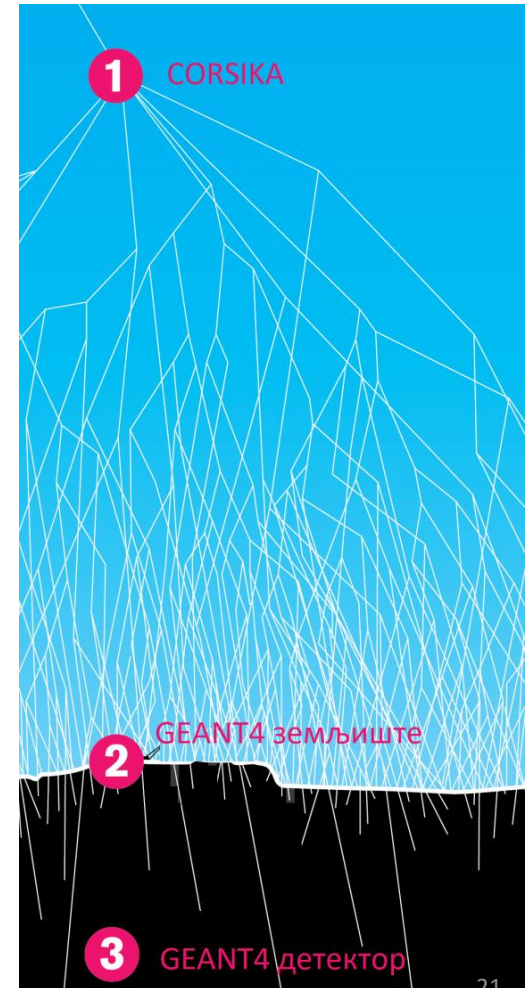
$W_t(E, h, t)$ je diferencijalna **funkcija odziva**

- Metod parametrizacije, teorijski metod ili uz pomoć simulacije se određuje

Detektorski sistemi

Simulacioni paketi

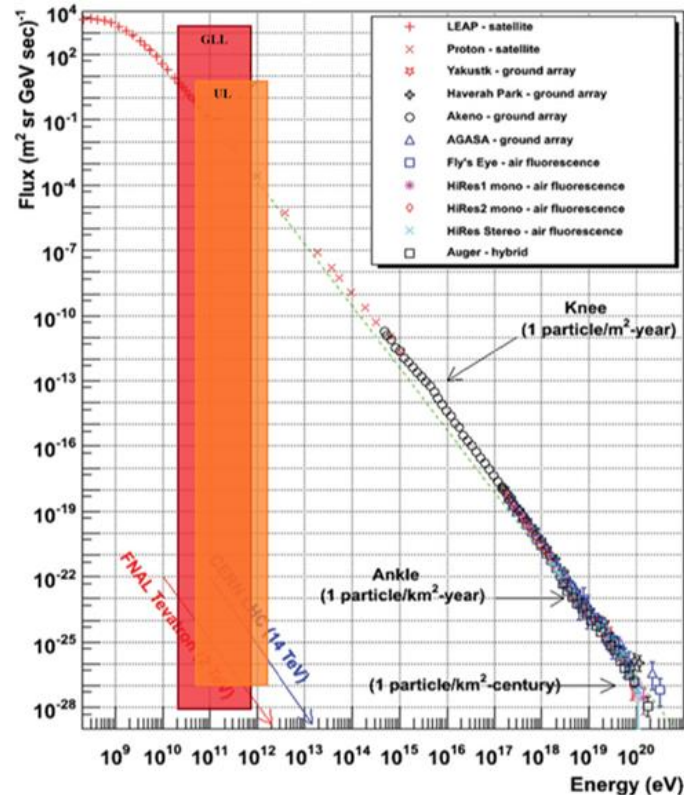
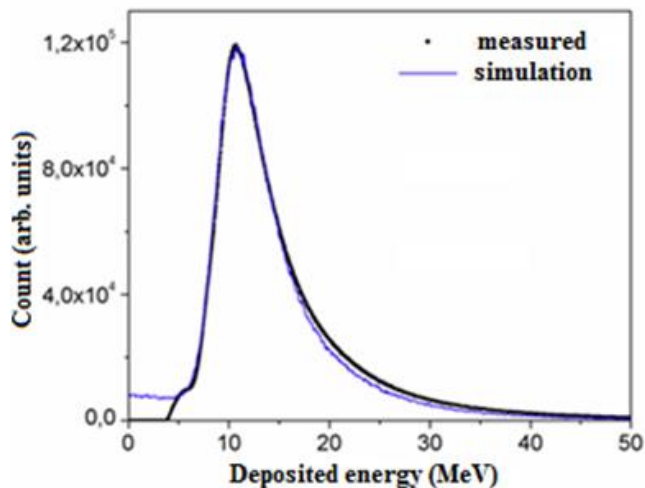
- “ **CORSIKA** je paket simulacije prostiranja pljuska kroz atmosferu Monte Karlo metodama razvijena za potrebe KASCADE eksperimenta u Karlsruheu.
- “ Kontrola simulacije je omogućena izborom parametara simulacije koja određuje njen tok.
- “ **GEANT4** se upotrebljava za Monte Karlo simulaciju transporta čestica kroz materiju.
- “ Koristi se za simulaciju interakcije sekundarnog kosmičkog zračenja sa zemljom iznad podzemnog dela Niskofonske laboratorije kao i samog detektora.



Detektorski sistemi

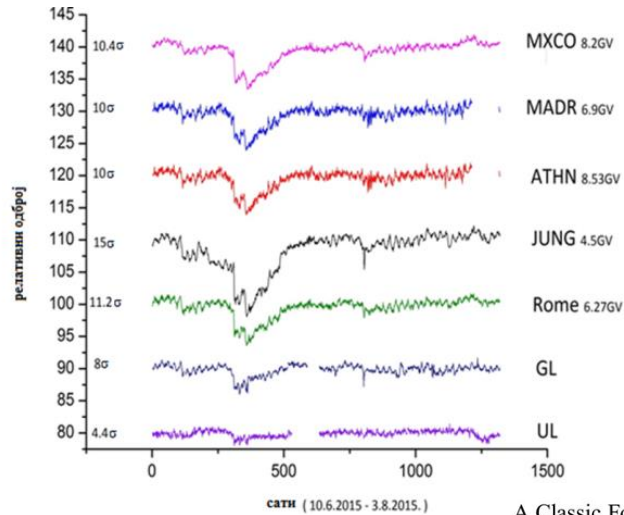
Simulacioni paketi

- “ Simuliran spektar deponovane energije u detektorima
- “ Dobijen je opsek energija primarnog KZ
- “ Dobijen je i spektar energije detektovanih miona.

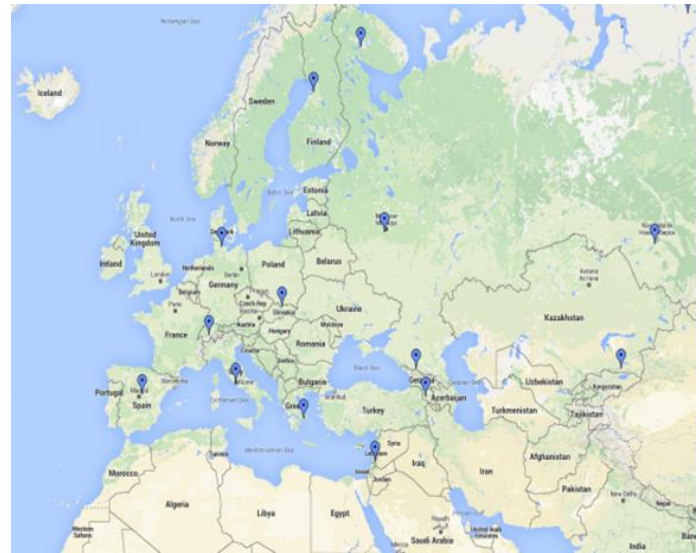
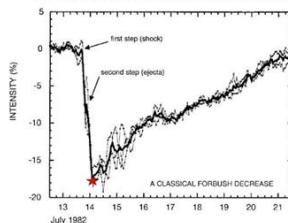


Aktivnost Sunca

- “ Pore enje sa ostalim povrzinskim detektorima (Neutronski monitori)
 - Amplituda Forbuzovog smanjenja je va0na odlika.



A Classic Forbush Decrease



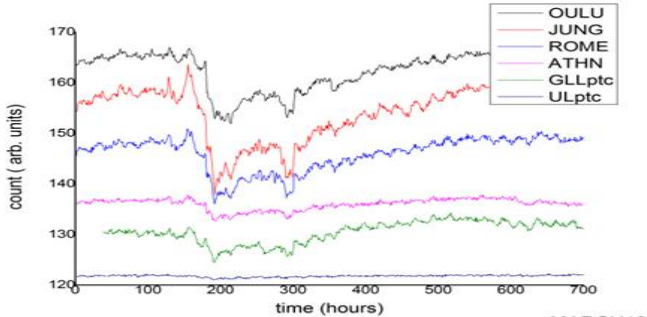
- Zavisnost amplitude od medijane mag. čvrstoće (energije) treba da prati eksponencijalnu zavisnost:

$$\frac{\Delta N}{N} \sim R_{\text{cut}}^{-\gamma}$$

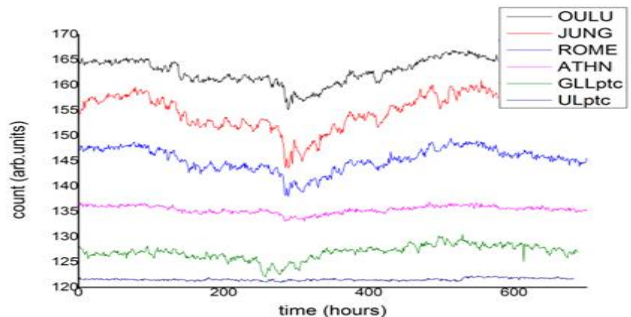
- γ u intervalu $\sim(0,4-1,3)$

Aktivnost Sunca

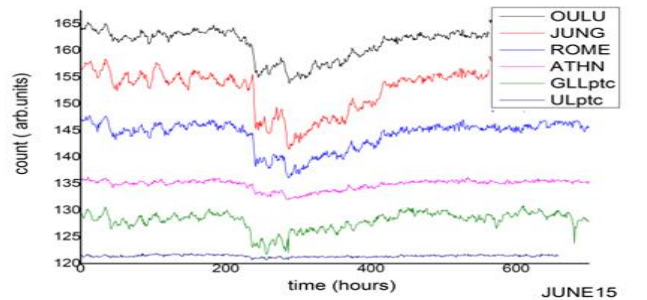
analiza Forbuzovog smanjenja



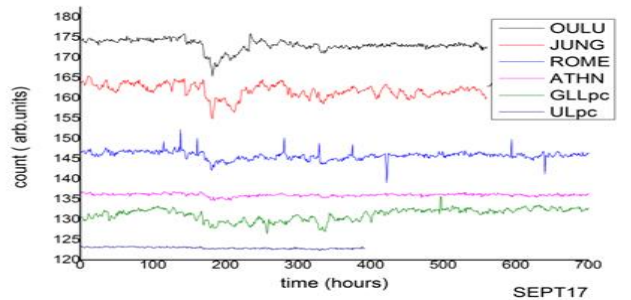
MARCH 12



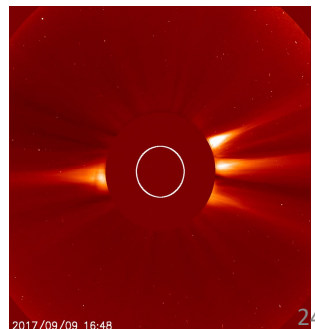
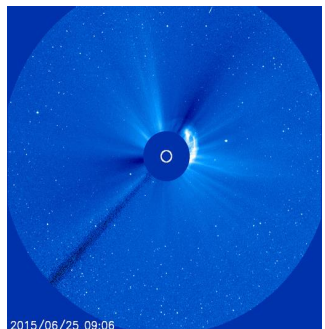
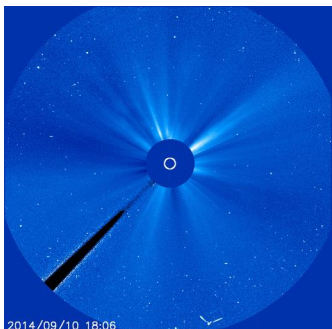
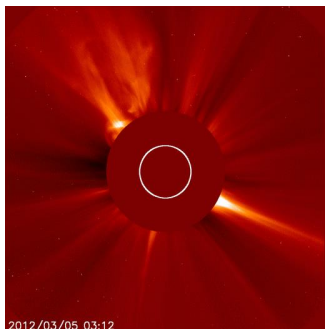
SEPT 14



JUNE 15



SEPT 17



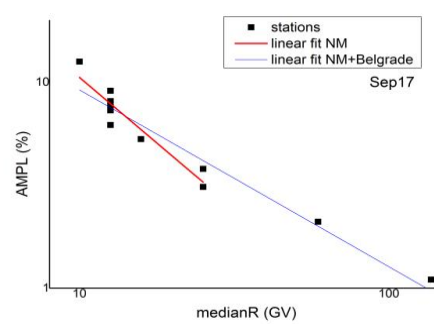
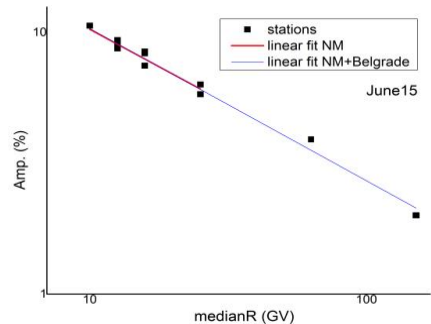
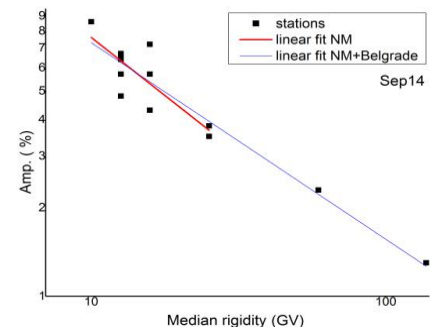
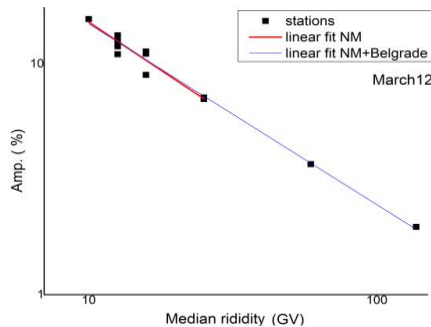
Aktivnost Sunca

analiza Forbuzovog smanjenja

“ Zavisnost izmerene amplitude Forbuzovog smanjenja od medijana magnetne vrsto e detektora. Ovim je omogu eno posmatranje efekata solarne modulacije na energijama koje su vize od energija dostupnih NM.

“ Amplituda Forbuzovog smanjenja je inverzno proporcionalna komponenti difuznog tenzora du0 magnetnog polja koji je sa svoje strane proporcionalan nekom stepenu rigidnosti.

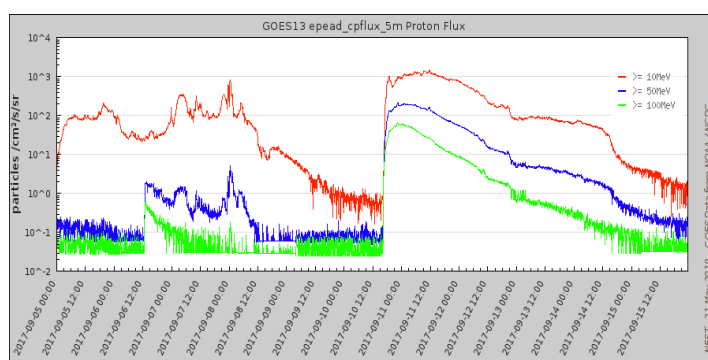
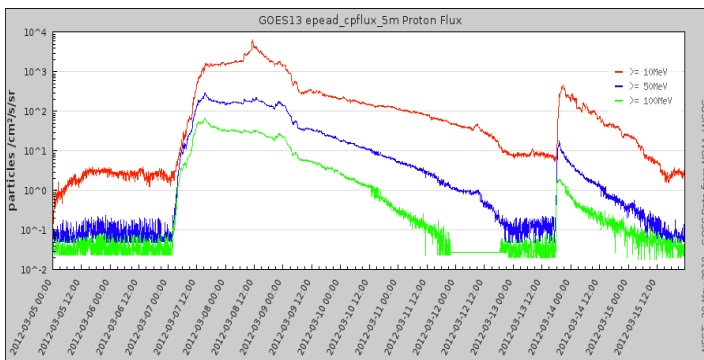
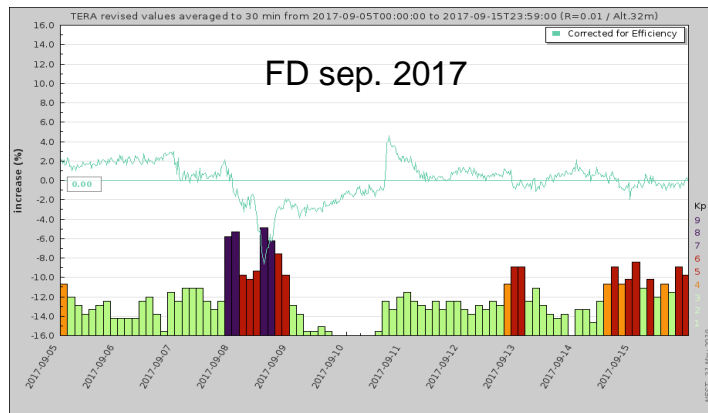
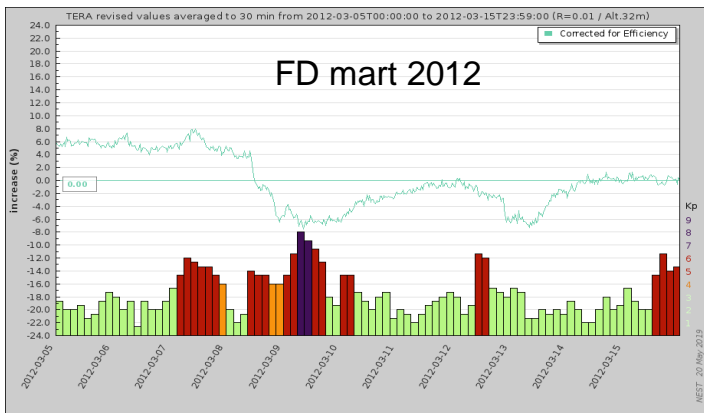
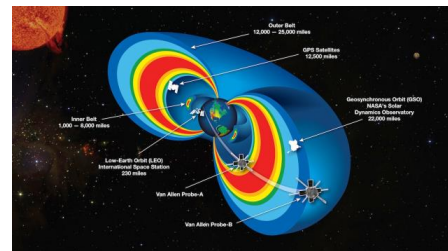
“ Usled kompleksnije varijacije kosmi kog zra enja koeficijenti su ve i. Ova varijacija je rezultat serije CME tokom ovih doga aja koje je dovela do kompleksnih struktura unutar heliosfere.



γ	NM	NM+Belgrade
March 2012.	$0,82 \pm 0,08$	$0,78 \pm 0,03$
Sept. 2014.	$0,79 \pm 0,16$	$0,67 \pm 0,06$
June 2015.	$0,57 \pm 0,05$	$0,58 \pm 0,02$
Sept. 2017.	$1,27 \pm 0,16$	$0,86 \pm 0,07$

Poređenje sa satelitskim podacima

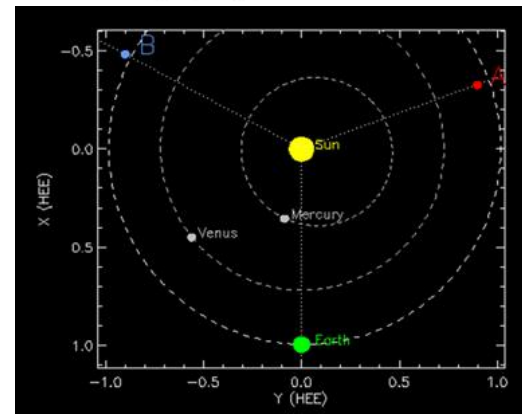
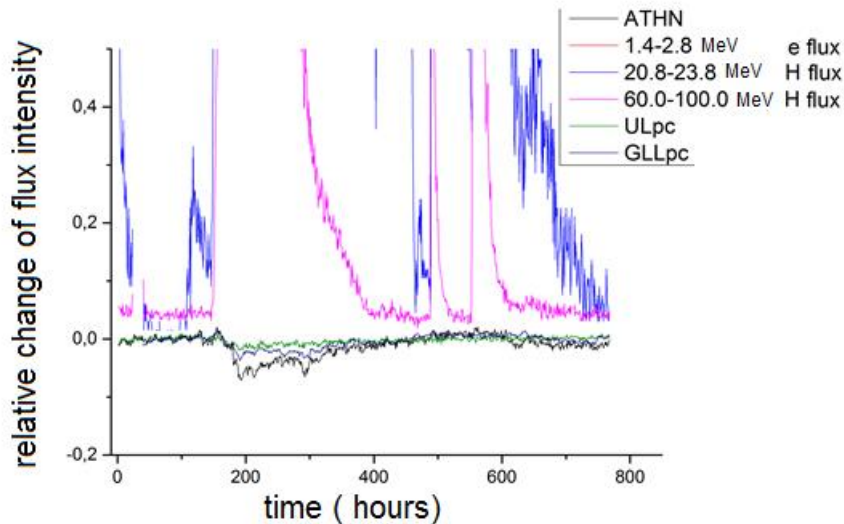
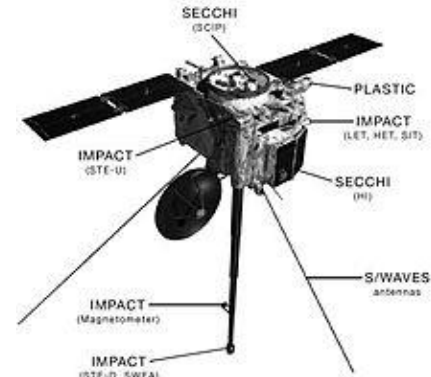
“ Korelacija izme u merenja na povrzini Zemlje i merenja izvan atmosfere



Poređenje sa satelitskim podacima

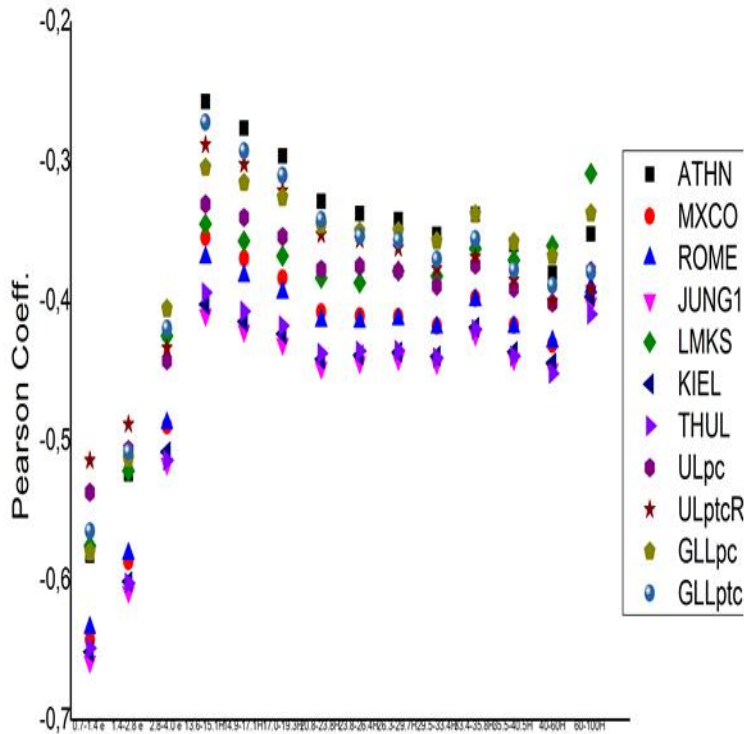
“ STEREO (Solar Terrestrial Relations Observatory)

- Dva skoro identična satelita lansirana 2006. u orbitu oko Sunca
- Komunikacija sa STEREO B prestala 2014.



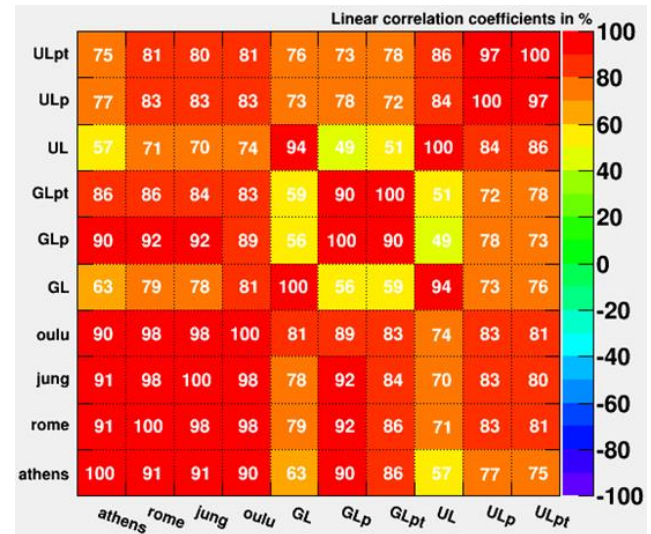
FD Mart 2012

Poređenje sa satelitskim podacima



Energy of detected particles from STEREO

$$r = r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$



Korelaciona matrica linearnih korelacionih koeficijenta (u %) za stanice na povrzini Zemlje kao i beogradsku mionsku stanicu.

Planovi za budućnost

“ Povećanje mreža stanica u kolaboraciji

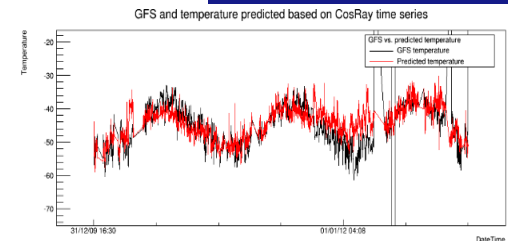
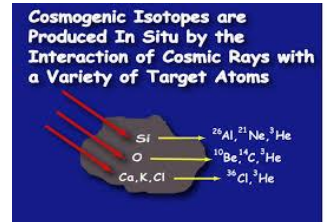
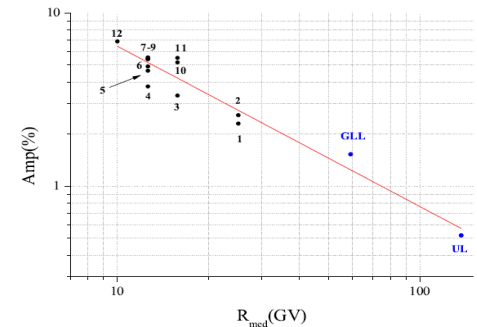
- Prenosni i jeftini mionski detektori koji mogu da se instaliraju bilo gde i gde bi se posmatrala korelacija varijacije fluksa kosmičkog zračenja i varijacije u heliosferi i atmosferi.

“ Radiometričko datiranje

- Poznaju i fluks miona na površini i u podzemlju mogu se je, koristeći reakcije između KZ i nuklidima u tlu, merenjem aktivnosti datirati uzorke kao i posmatrati varijaciju fluksa KZ u dugim vremenskim epohama.

“ Nova metoda temperaturske korekcije mionskog fluksa kosmičkog zračenja.

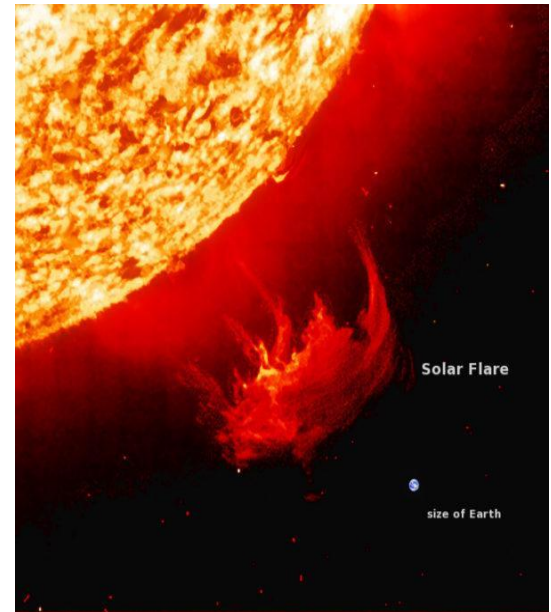
- Ovom metodom se poboljšava kvalitet sakupljenih podataka o fluksu, a time se poboljšava i analiza uticaja heliosfere ali i upotrebe kosmičkih zraka kao termometra za veoma visoke slojeve atmosfere.



Поређење временских серија предвиђених температура и температура израчунатих на основу GFS модела за изабарни ниво средње висине у атмосфери.

Zaključak

- “ Niskofonska laboratorija Instituta za fiziku u Zemunu, zbog svojih specifičnih uslova, pruža mogućnost da se posmatra uticaj Sunca na kosmički zračenje različitih energija.
- “ Naza konfiguracija omogućava posmatranje fluksa kosmičkog zračenja po četiri različite medijane energije primarnog kosmičkog zračenja, od 59 GeV sve do 157 GeV, što je vidljivo od energija primarnog kosmičkog zračenja koji neutronske monitori detektuju.
- “ Pokazano je da postoji zavisnost jačine amplitude Forbuzovih smanjenja i medijane energije kosmičkog zračenja i na vizim energijama.
- “ Upotrebljivost ovog merenja je korisna za studiranje periodičnih varijacija fluksa kosmičkog zračenja na različitim energijama, karakterizaciju ekstremnih događaja na Suncu poput perturbacija ali i za studiranje gradijenta i anizotropije kosmičkog zračenja.



Hvala na pažnji!

