

Slnčná aktivita a kozmické žiarenie: magnetické pole Slnka a úroveň kozmického žiarenia

*M. Bodnárová, J. Rybák, P. Gömöry, Astronomický ústav SAV, Tatranská Lomnica
K. Kudela, Ústav experimentálnej fyziky SAV, Košice*

Abstrakt:

V tejto práci sme analyzovali súvis magnetickej aktivity Slnka s úrovňou kozmického žiarenia v období rokov 1951-2004. Ako indikátor magnetickej aktivity Slnka, ktorá na kozmické žiarenie vplyva, sme zvolili otvorené konfigurácie magnetického poľa, ktoré sme charakterizovali faktorom otvoreného magnetického toku (FOMT). FOMT bol určený na základe patrolných meraní intenzity zelenej koronálnej čiary. Na výpočty súvisu FOMT a úrovně galaktického kozmického žiarenia (GKŽ) bola použitá kroskorelácia týchto radov dát. Cieľom práce bolo zistiť hlavne časové zmeny v priebehu korelácie FOMT a GKŽ. Preto sme okrem korelácie dlhých radov dát FOMT a GKŽ zahrňujúcich celé obdobie rokov 1951-2004 vypočítali aj koreláciu kratších častí (180 dní) radov dát FOMT a GKŽ. Zistili sme, že priebeh kroskorelačnej funkcie sa líši v závislosti od fázy slnečného cyklu. V minime slnečnej aktivity sa jej priebeh vyznačuje nápadnou periodicitou s periódou ~14 dní a kroskorelačná funkcia nadobúda štatisticky významné hodnoty. V maxime perióda variácií nie je výrazná a kroskorelačná funkcia nadobúda nízke hodnoty, ktoré nie sú štatisticky významné.

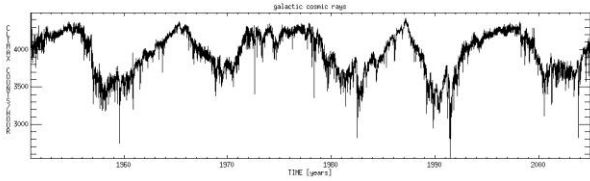
1. ÚVOD

Modulácia kozmického žiarenia slnečnou aktivitou sa študuje už viac ako 50 rokov (napr. Simpson, 1954). V zásade sa pozoruje záporná korelácia medzi slnečnou aktivitou vyjadrenou pomocou Wolfvho čísla slnečných škvŕn (Usoskin a kol., 1998; Kudela, 2009) a nameranou intenzitou kozmického žiarenia, alebo kladná korelácia medzi intenzitou kozmického žiarenia a slnečnou aktivitou vyjadrenou prostredníctvom plôch s nízkou intenzitou zelenej koróny (koronálne diery), ktoré súvisia s rozsiahlymi oblasťami s otvorenými konfiguráciami slnečného magnetického poľa (Kudela a kol., 2004).

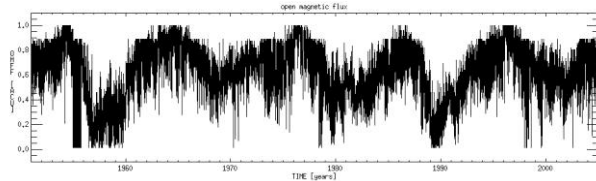
2. DÁTA

V našej práci sme vychádzali z dvoch súborov dát obsahujúcich denné hodnoty intenzít GKŽ a intenzít zelenej koronálnej čiary (Fe XIV, 530,3 nm), ktoré pokrývajú časové obdobie rokov 1951-2004. Súbor dát reprezentujúci GKŽ (obr. č. 1.) obsahuje denné priemery počtov neutrónov za hodinu, ktoré zaznamenal neutrónový monitor Climax (Colorado, USA) a sú voľne prístupné pre analýzu na internete (<ftp://ulysses.sr.unh.edu/NeutronMonitor/DailyAverages.1951-.txt>).

Na základe meraní intenzity zelenej koronálnej čiary okolo slnečného disku (72 meraní po 5° (Rybanský a Rušin, 1992; Rybanský a kol., 2005)) sme vytvorili veličinu FOMT. Intenzita zelenej koronálnej čiary sa udáva v jednotkách 10^{-6} jasnosti centra slnečného disku na tej istej vlnovej dĺžke (1 ACU) a jej denné hodnoty sú voľne prístupné na internete (<http://www.ngdc.noaa.gov/stp/SOLAR/ftpsolarcorona.html#green>). Podľa Kudelu a kol. (2004) miesta okolo slnečného disku s nameranou intenzitou zelenej koronálnej čiary menšou ako 25 ACU považujeme za „elementárne (koronálne) diery“. Potom pomer počtu „elementárnych dier“ k celkovému počtu meraní okolo slnečného disku vyjadruje relatívne zastúpenie koronálnych dier – teda FOMT a udáva sa v relatívnych jednotkách od 0 do 1. Veličina FOMT predstavuje zastúpenie tej časti slnečného okraja, kde sú siločiarly magnetického poľa otvorené do vesmírneho priestoru. Uvedený prístup Kudelu a kol. (2004) sme v práci modifikovali tak, že sme namiesto jednej hraničnej hodnoty intenzity (25 ACU) použili dve rôzne hraničné intenzity (25 ACU a 10 ACU, zvlášť pre maximá a minimá slnečnej aktivity), pretože takáto modifikácia umožňuje lepšie sledovať časové zmeny FOMT (obr. č. 2.) počas dlhých časových úsekov.



Obr. č. 1.: Priebeh GKŽ pre časové obdobie 01.01.1951-31.12.2004, kde horizontálna os znázorňuje čas v rokoch a vertikálna os znázorňuje denné priemery počtov neutrónov za hodinu, ktoré nameral neutrónový monitor Climax.



Obr. č. 2.: Priebeh FOMT pre časové obdobie 01.01.1951-31.12.2004, kde horizontálna os znázorňuje čas v rokoch a vertikálna os znázorňuje hodnoty FOMT v relatívnych jednotkách.

3. METÓDA

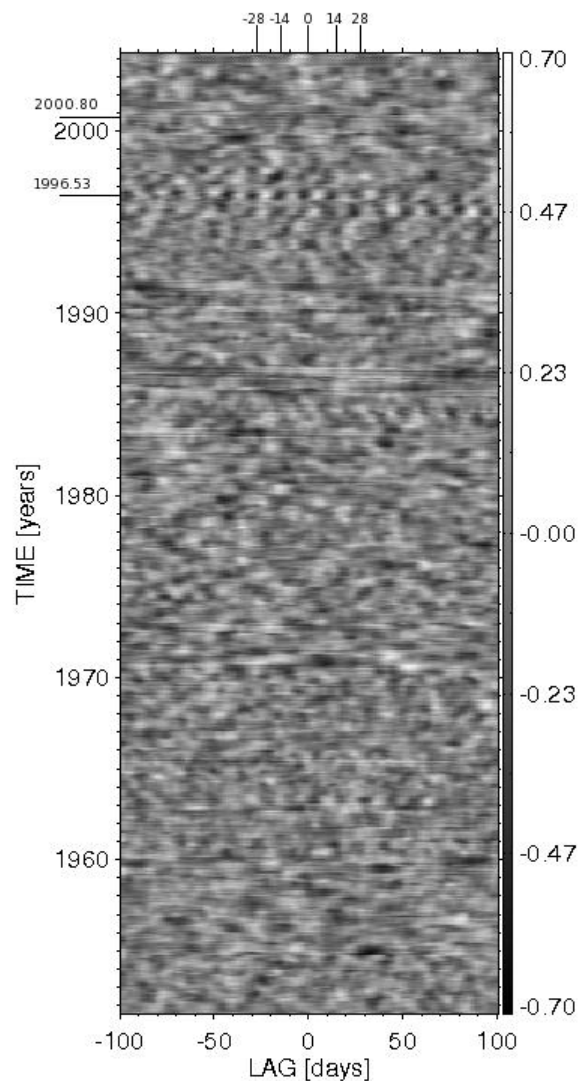
V práci sme posun v čase medzi variáciami v GKŽ a FOMT analyzovali tak, že sme počítali vzájomnú kroskoreláciu oboch súborov dát. Hodnotu kroskorelačnej funkcie pre jednotlivé dvojice dát GKŽ a FOMT sme počítali podľa Pearsonovho algoritmu (Press a kol., 1986). Pre zvýraznenie časových variácií kroskorelačnej funkcie sme korelovali rady dát GKŽ a FOMT po kratších úsekoch s referenčnou dĺžkou 180 dát (dní), pričom vždy po vykonaní kroskorelácie sme robili posun v oboch radoch dát o 30 dní. Rady dát s referenčnou dĺžkou sme z celých radov dát GKŽ a FOMT vyberali metódou vyberacieho okna, ktorá umožňuje aby sa v procese kroskorelácie zachoval rovnaký počet kroskorelovaných dát nezávisle od veľkosti posunu medzi kroskorelovanými radmi dát. Uvedený postup sme opakovali až kým sme takto neprešli celú dĺžku radov dát pokrývajúcich obdobie rokov 1951-2004 a priebehy kroskorelačnej funkcie pre jednotlivé úseky sme pritom zapisovali do riadkov kroskorelačnej mapy.

Pred samotným výpočtom kroskorelácie bol od oboch radov dát (GKŽ a FOMT) odčítaný dlhodobý priebeh, ktorý je preložený cez časové variácie oboch týchto radov dát. Na tento účel sme použili aproximáciu dát pomocou polynómu druhého stupňa. Nutnosť týchto úprav je podrobne opísaná v práci Gömöryho a kol. (2004).

Významnosť hodnôt Pearsonovej kroskorelačnej funkcie sme počítali podľa práce Bailey (1977). Zistili sme, že všetky hodnoty kroskorelačnej funkcie väčšie ako 0,2 alebo menšie ako -0,2 sú štatisticky významné.

4. VÝSLEDKY

Hlavným výsledkom použitej metódy bolo vytvorenie kroskorelačnej mapy (obr. č. 3.) radov dát GKŽ a FOMT. V tejto kroskorelačnej mape sú v jej jednotlivých riadkoch postupne zdola smerom hore zapísané priebehy kroskorelačnej funkcie (príslušná hodnota kroskorelačnej funkcie je znázornená rôznymi úrovňami šede) po úsekoch korelovaných dát dĺžky 180 dní pri vzájomnom posune simultánnych dát GKŽ a FOMT o ± 100 dní. Túto kroskorelačnú mapu sme použili pri štúdiu časových variácií kroskorelačnej funkcie v závislosti na fáze cyklu slnečnej aktivity.



Obr. č. 3.: Kroskorelačná mapa radov denných hodnôt FOMT a GKŽ pre referenčnú dĺžku vyberacieho okna 180 dní. Horizontálna os znázorňuje časový posun L medzi radmi korelovaných dát z radov FOMT a GKŽ referenčnej dĺžky (180 dní) v dňoch. Vertikálna os (na ľavom okraji obrázka) znázorňuje čas v rokoch. Pri pravom okraji kroskorelačnej mapy sa nachádza farebný pás popisujúci aká farba (úroveň šede) na obrázku zodpovedá akej hodnote kroskorelačnej funkcie (maximálnej hodnote zodpovedá biela farba a minimálnej hodnote zodpovedá čierna farba).

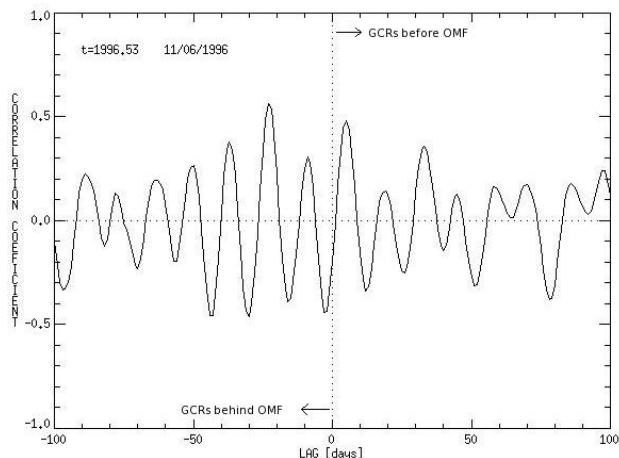
Následne sme podrobne analyzovali dva konkrétne riadky tejto kroskorelačnej mapy, ktoré ilustrujú priebeh kroskorelačnej funkcie počas minima (jún 1996) a maxima (september 2000) slnečnej aktivity posledného 11-ročného cyklu slnečnej aktivity v rámci študovaného časového obdobia pokrývajúceho roky 1951-2004.

Počas študovaného minima slnečnej aktivity bol priebeh kroskorelačnej funkcie (obr. č. 4.) výrazne periodický s periódou $14 \pm 0,5$ dňa a nadobúdala hodnoty, ktoré sú štatisticky významné. Pritom sa pozoroval 9 dňový posun medzi zmenou vo FOMT a jeho odozvou v GKŽ, ktorého príčinou je priestorový posun medzi miestom merania FOMT (nad okrajom slnečného disku) a medzi smerom, z ktorého meriame vplyv GKŽ (stred slnečného disku).

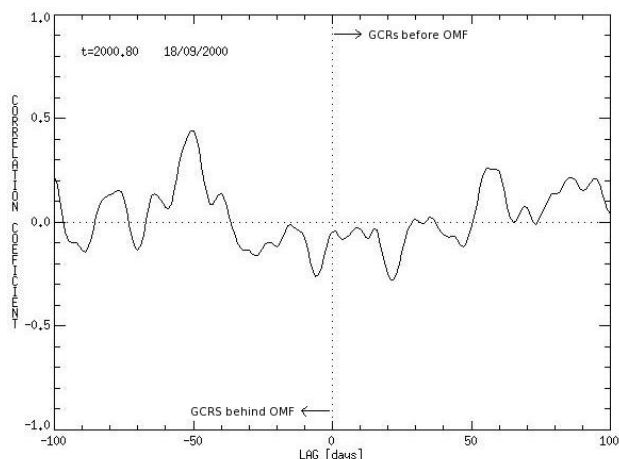
Počas študovaného maxima slnečnej aktivity boli variácie v priebehu kroskorelačnej funkcie (obr. č. 5) nepravidelné a hodnoty, ktoré kroskorelačná funkcia nadobúdala sú pod hranicou štatistickej významnosti.

V prípade keď sme na výpočet kroskorelačnej funkcie (obr. č. 6.) použili rady dát FOMT a GKŽ v ich plnej dĺžke (pokryva celé obdobie rokov 1951-2004), tak jej priebeh vykazoval monotónne narastajúci trend vzhľadom na zväčšujúci sa posun medzi dátami FOMT a GKŽ v pravej časti obrázka a monotónne klesajúci trend vzhľadom na zväčšujúci sa posun medzi dátami FOMT a GKŽ v opačnom smere v ľavej časti obrázka. Na obr. č. 6. sú vynesené dokopy štyri krivky. V prvom prípade (cc_p0_e0) neboli priebehy radov dát GKŽ a FOMT pred výpočtom kroskorelačnej funkcie nijakým spôsobom upravované. V druhom prípade (cc_p1_e1) bol pred výpočtom kroskorelačnej funkcie od priebehov oboch radov dát GKŽ a FOMT odčítaný trend prostredníctvom polynómu prvého stupňa (okrem toho sa v tomto prípade pri vzájomnom posúvaní radov dát GKŽ a FOMT o narastajúce hodnoty L skracovala dĺžka kroskorelovaných radov dát). V treťom prípade (cc_p2_e1) bol pred výpočtom kroskorelačnej funkcie od priebehov oboch radov dát GKŽ a FOMT odčítaný trend prostredníctvom polynómu druhého stupňa (pritom sa rady kroskorelovaných dát skracovali rovnakým spôsobom ako v predchádzajúcom prípade). Štvrtá krivka znázorňuje priebeh kroskorelačnej funkcie, ktorý bol uvedený na obr.3. v práci Kudela a kol. (2004). Hoci je táto krivka na obrázku načrtnutá len malým počtom bodov (celkovo 41) je vidieť, že najvyššiu hodnotu dosahuje kroskorelačná funkcia pre prípad, keď zmeny v intenzite KŽ o ~ 66 dní predbiehajú zmeny v ploche koronálnych dier.

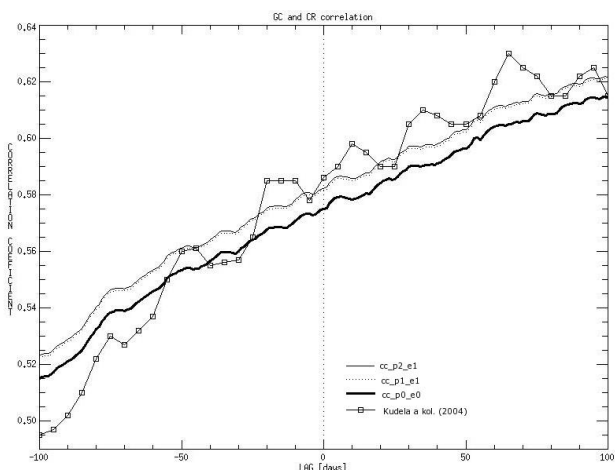
Nami pozorovaná periodická variácia kroskorelačnej funkcie (perióda ~ 27 dní) súhlasí so zisteniami Kudela a kol. (2004) a je spôsobená samotnou rotáciou Slnka. Monotónny rastúci trend v priebehu kroskorelačnej funkcie však nemá fyzikálnu podstatu, ale je spôsobený dlhodobými trendmi naloženými na oba rady dát FOMT aj GKŽ.



Obr. č. 4.: Priebeh kroskorelačnej funkcie radov dát FOMT a GKŽ referenčnej dĺžky 180 dní v závislosti na intervale vzájomného posunutia radov dát FOMT a GKŽ pre 11.06.1996. Časť obrázka vpravo od vertikálnej bodkovanej čiary reprezentuje stav keď GKŽ predbieha v čase zodpovedajúce hodnoty FOMT a časť obrázka vľavo od tejto čiary zase stav keď GKŽ zaostáva v čase za zodpovedajúcou hodnotou FOMT. Horizontálna os znázorňuje časový posun L medzi pármí korelovaných dát z radov FOMT a GKŽ v dňoch. Vertikálna os znázorňuje vypočítanú hodnotu kroskorelačnej funkcie.



Obr. č. 5.: Priebeh kroskorelačnej funkcie radov dát FOMT a GKŽ referenčnej dĺžky 180 dní v závislosti na intervale vzájomného posunutia radov dát FOMT a GKŽ pre 18.09.2000. Časť obrázka vpravo od vertikálnej bodkovanej čiary reprezentuje stav keď GKŽ predbieha v čase zodpovedajúcu hodnotu FOMT a časť obrázka vľavo od tejto čiary zase stav keď GKŽ zaostáva v čase za zodpovedajúcou hodnotou FOMT. Horizontálna os znázorňuje časový posun L medzi pármí korelovaných dát z radov FOMT a GKŽ v dňoch. Vertikálna os znázorňuje vypočítanú hodnotu kroskorelačnej funkcie.



Obr. č. 6.: Závislosť kroskorelačnej funkcie na vzájomnom posune celých radov FOMT a GKŽ. Horizontálna os znázorňuje časový posun L medzi radmi FOMT a GKŽ v dňoch. Vertikálna os znázorňuje hodnotu vypočítanej kroskorelačnej funkcie. Samotný obrázok je bodkovanou čiarou prechádzajúcou cez $L=0$ rozdelený na dve polovice. Na pravo od tejto čiary (pre $L>0$) hodnota GKŽ predbieha v čase zodpovedajúcu hodnotu FOMT a naľavo od tejto čiary (pre $L<0$) hodnota GKŽ zaostáva v čase za zodpovedajúcou hodnotou FOMT.

5. DISKUSIA A ZÁVER

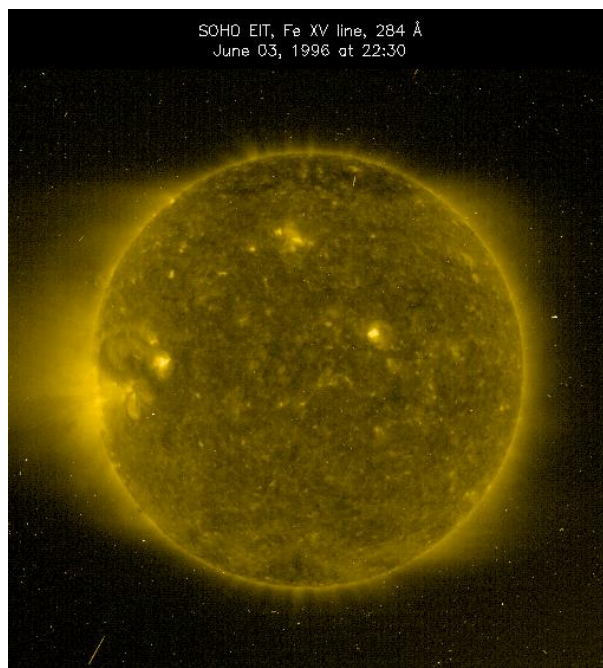
Výsledky štúdia vzájomnej závislosti medzi prejavmi globálneho magnetického poľa Slnka v koróne a meranou intenzitou kozmického žiarenia ukazujú, že ich je potrebné skúmať s dostatočným časovým rozlíšením (na časovej škále kratšej ako 1 rok), keďže skúmané rady dát FOMT a GKŽ poukazujú na značné zmeny ich závislosti počas cyklu slnečnej aktivity.

Zistili sme, že sa priebeh kroskorelačnej funkcie výrazne mení v závislosti od fázy slnečného cyklu. V období minima cyklu slnečnej aktivity je priebeh kroskorelačnej funkcie oveľa pravidelnejší ako v období maxima cyklu slnečnej aktivity. V minime sa jej priebeh vyznačuje nápadnou periodicitou (perióda 14 ± 0.5 dňa) a nadobúda štatisticky významné hodnoty. Zistili sme v tomto prípade aj 9 dňový posun, ktorý bol spôsobený polohou aktívnej oblasti na východnom limbe slnečného disku (obr. č. 7.). Vplyv tejto aktívnej oblasti sa na priebehu GKŽ prejaví so zisteným oneskorením 9 dní, čiže pozorovaný jav má fyzikálny význam. Naopak v maxime cyklu slnečnej aktivity má kroskorelačná funkcia nevýraznú periodicitu a významnosť jej hodnôt je pod hranicou štatistickej významnosti.

Pod'akovanie

Pod'akovanie patrí the University of New Hampshire, "National Science Foundation Grant ATM-0339527" za poskytnutie dát kozmického žiarenia z neutrónového monitoru Climax.

Pod'akovanie patrí aj Slovenskej grantovej agentúre APVV za podporu v rámci projektov 0066-06 a 51-053805.



Obr. č. 7.: Snímok na vlnovej dĺžke 284 Å (Fe XI, teplota 2×10^6 K, pozorovanie aktívnych oblastí) získaný prístrojom EIT na družici SOHO zo dňa 3.06.1996.

LITERATÚRA

- Bailey B. J. R., 1977, *JASA*, Vol. 72, No. 358, p. 469 - 478
 Gömöry P., Rybák J., Kučera A., Curt W. and Wöhl H., 2004, *Dynamics of the Quiet Upper Solar Atmosphere in the Network*, Proceedings of the SOHO 15 Workshop - Coronal Heating, p.400-404
 Kudela K., Minarovjeh M., Rušin V., Rybanský M., and Kollár V., 2004, *Adv. Space Res.*, Vol. 36, p. 2368 - 3271
 Kudela K., 2009, *acta physica slovacica*, Vol. 59, No. 5, p. 537 - 652
 Press W. H., Flanery B. P., Teukolsky S. A. and Vetterling W. T., 1986, *Numerical Recipes*, Cambridge University Press, Cambridge
 Rybanský M. and Rušin V., 1992, Homogeneous Data Set of Coronal Green Line Intensities over the Period 1964-1990, *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso Supplement*, Vol. 22, p. 229-230
 Rybanský M., Rušin V., Minarovjeh M., Klocok L. and Cliver E. W., 2005, *J. Geophys. Res.*, Vol. 110, Issue A8
 Simpson J. A., 1954, *Phys. Rev.*, Vol. 94, p. 426
 Usoskin I. G., Kananen H., Mursula K., Taskanen P. and Kovaltsov G. A., 1998, *J. Geophys. Res.*, Vol. 103, No. A5, p. 9567 - 9574