

Kváziperiodické variácie kozmického žiarenia na zemskom povrchu: niekoľko poznámok

Karel Kudela, Ústav experimentálnej fyziky SAV, Watsonova 47, 04001 Košice.

Abstrakt

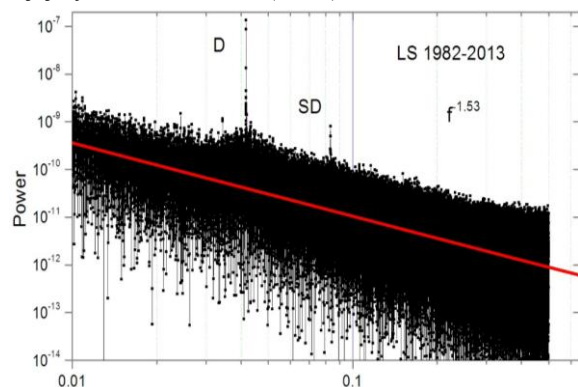
Príspevok prezentuje stručný prehľad niektorých výsledkov týkajúcich sa kváziperiodických variácií kozmického žiarenia (KŽ) meraného na zemskom povrchu, ktoré boli získané v posledných 7 rokoch.

1. ÚVOD

Variácie toku KŽ u Zeme sú spojené nielen s moduláciou galaktického KŽ celou heliosférou, ale prejavujú sa tu aj viaceré prechodové efekty vyvolané rôznymi prejavmi slnečnej aktivity vo vnútornej heliosfére. Periodické procesy v KŽ súvisia hlavne s rotáciou slnečného disku a s otáčaním detektorov pevne spojených so Zemou. Uvedieme niekoľko výsledkov získaných pri skúmaní kváziperiodických variácií KŽ z posledných rokov. Podrobnejší prehľad problematiky možno nájsť v práci Kudela a Sabbah (2016), odkiaľ sú aj prevzaté obrázky 2 a 3.

2. DENNÁ VARIÁCIA

Jedinou „monochromatickou“ zložkou v hustote výkonového spektra signálu KŽ (PSD) je denná variácia a jej vyššie harmonické (obr.1).



Obr.1. Hustota výkonového spektra (PSD, relatívne jednotky) časového radu hodinových hodnôt intenzity KŽ (korigované na barometrický tlak) meraného neutrónovým monitorom (NM) na Lomnickom štíte v rokoch 1982-2013. Vidno príspevok dennej variácie a jej druhej harmonickkej. Na osi x je frekvencia v jednotkách hod^{-1} .

V práci Oh *et al.* (2010) boli podrobne skúmané modulačné cykly v dennej anizotropii KŽ, špecificky v jej fáze. Všetky NM použité v práci poukazujú na 22-ročnú cyklickosť fázy, čo súvisí s driftom KŽ, ktorý má

odlišné hodnoty pre opačné polarities magnetického poľa Slnka (MPS). To bolo zistené už aj v predošlých prácach. Uvedená analýza indikuje, že cyklickosť fázy má 2 zložky: ~ 22 -ročnú aj ~ 11 -ročnú. Pre merania v polohách s vyššou prahovou geomagnetickou rigiditou sa prejavuje silnejší príspevok od ~ 11 -ročnej cyklickosti. To je spôsobené efektami difúzie, ktorá „kopíruje“ veľkosť medziplanetárneho magnetického poľa (MMP) s cyklom slnečnej aktivity. Mohanty *et al.* (2016) analyzovali druhú harmonickú dennej vlny v barometrickom tlaku dôležitom pre korekcie. Vyfiltrovali túto zložku z časového radu a inverznou FFT rekonštruovali nové časové rady miónových meraní aj tlaku. Barometrický koeficient odvodený z takto vytvorených časových radov bol určený s pomerne vysokou presnosťou. Amplitúdu a fázu dennej vlny analyzoval Sabbah (2013) s využitím takmer 60 rokov meraní NM Climax, Deep River, Huancayo/Haleakala a miónového detektoru Nagoya. Fáza v pozorovaniach na nízkej prahovej rigidite závisí silne na polarite MPS, tj. na driftových efektoch. Okpala and Okeke (2011) získali charakteristiky prvých štyroch harmonických dennej vlny a dedukovali z toho, že fáza je silnejšie riadená 22-ročným cyklom než cyklom 11-ročným. Tiwari *et al.* (2012) analyzovali amplitúdu aj fázu dennej vlny a ich zmeny v závislosti na polarite MPS: zistili významný fázový posuv k skorším (miestnym) časom počas obdobia nárastu slnečnej aktivity v nepárnych cykloch (21 a 23) v porovnaní s obdobiami nárastov aktivít v párných cykloch (20 a 22). Vzájomné relácie amplitúda-fáza za dlhé obdobie (1957-2010) boli skúmané v práci Abunina *et al.* (2013). Autori zistili, že pozorovaná anizotropia KŽ súhlasí dobre s predpovediami modelu kombinácie konvekcia-difúzia pre anizotropiu častíc KŽ. Pre cyklus 23 dennú anizotropiu KŽ študovali tiež Mavromichalaki *et al.* (2016) s využitím dát dvoch NM na rozdielnych geomagnetických šírkach. Čas maxima (fáza) je posunutá k skorším hodnotám než je korotačný smer pre danú epochu pre pozitívne smerované MPS ($A > 0$), a k neskorším hodnotám pre opačnú polaritu ($A < 0$). Nedávno Tezari a Mavromichalaki (2016) poukázali na odlišné charakteristiky dennej anizotropie pre odlišné

fázy slnečného cyklu a odlišné polarít MPS. V dennej variácii sa prejavujú aj náhle zmeny KŽ ako sú GLEs (pozemné efekty od slnečných častíc) a FD (Forbushove poklesy), resp. geomagnetické poruchy. V nedávno publikovanej práci Yeeram a Saengdokmai (2015) bola zvýšená denná anizotropia galaktického KŽ analyzovaná počas roku 2010 na NM s vysokou nominálnou prahovou rigiditou (16.8 GV, Thajsko). Rekurentné a niekoľko dní po sebe sa vyskytujúce zvýšenia anizotropie boli pozorované častejšie v sektore A (magnetické pole na zemskej orbite smeruje od Slnka) než v sektore T (opačný smer vektoru \mathbf{B}).

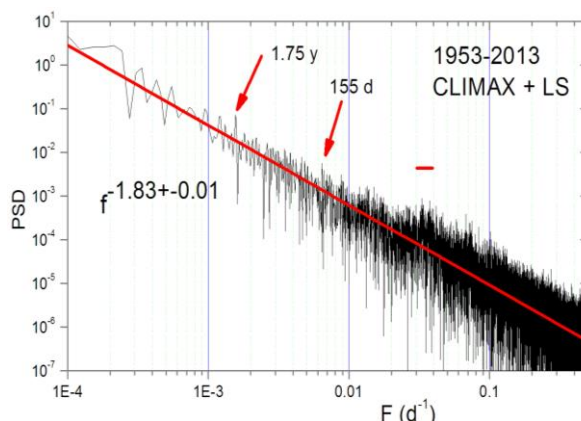
Niekedy sa vyskytujú zvýšené amplitúdy dennej vlny (HAE) po niekoľko dní za sebou – tzv. „wave trains“ (WT). Singh *et al.* (2010) študovali výskyt zvýšených (HAE) aj znížených (LAE) amplitúd WT počas cyklu 23 s využitím dát jedného NM a porovnali ich výskyt v rôznych fázach slnečného cyklu. Mishra a Agarwal (2009) rozobrali prvé tri harmonické udalosti HAE WT za obdobie 1981-1994. S výnimkou amplitúdy 2. harmonickej nemá žiadna iná súvis s geomagnetickou aktivitou.

Denné variácie KŽ boli v nedávnej dobe študované s využitím rôznych meraní NM, NM bez olova ako aj pozorovaní miónovými detektormi (napr. Mailyan a Chilingarian, 2010; Oh a Kang, 2013; Mufti *et al.*, 2011).

3. KVÁZIBIENÁLNE A STREDNE DLHÉ VARIÁCIE.

Niekoľko článkov uvádza maxima v PSD časových radov KŽ v oblasti periodicít od < 1 rok do 4 rokov - tie sú označované ako kvázibienálne oscilácie. Prejavujú sa nielen v KŽ ale aj v časových radoch iných fyzikálnych parametrov vo vonkajšom priestore. Prehľad takýchto variácií v rôznych parametroch spojených so slnečnou aktivitou možno nájsť napr. v práci (Bazilevskaya *et al.* 2014). Bazilevskaya *et al.* (2016) diskutuje otázku pomerne významnej periodicity okolo $T = 1.6$ rokov, ktorá sa prejavuje v KŽ a v heliosferickom magnetickom poli po viac ako 10 rokov, ale nie je stabilná počas uplynulých 60 rokov pozorovaní.

Vyššie uvedená kváziperiodicita (v rôznych prácach uvádzaná v rozsahu 1.6 - 1.8 r) je jednou z jasných rysov časových radov KŽ prejavujúca sa na rôznych NM. Bola po prvý krát uvedená v práci Valdés-Galicia *et al.* (1996) a neskôr skúmaná inými autormi (napr. Kudela *et al.*, 2002; 2010; Chowdhury *et al.*, 2010). Vidno ju aj v spektre na obr. 2.



Obr.2. Výkonové spektrum časového radu NM Climax za obdobie 1953-2006 predĺženého o data Lomnického štítu za obdobie 2006-2013 (predĺženie po 2006 spravené pomocou porovnania oboch NM za obdobie 1982-2005). Frekvencia je v jednotkách deň^{-1} . Červená úsečka vyznačuje oblasť okolo 27 dní.

Chowdhury *et al.* (2016) s využitím waveletovej techniky poukazujú na rad krátko- aj stredne-dobých možných periodicít včítane dobre známej Riegerovej ako aj kvázibienálnych počas špecifického cyklu slnečnej aktivity č. 24. Richardson *et al.* (2016) ukazujú že výskyt SEP (slnečné energetické protóny) s $E > 25 \text{ MeV}$ prejavuje zhľukovanie prípadov v čase s periodicitou ~ 6 mesiacov počas fázy rastu a v okolí maxima slnečného cyklu 24. Je to možno spojené s cyklickosťou okolo 150 dní pozorovanou v rôznych slnečných a medziplanetárnych javoch už v predošlých cykloch. Je to tiež blízko Riegerovej periodicity. Stredne-dobé kváziperiodicity v KŽ boli tiež študované v práci El-Borie *et al.* (2011).

4. VARIÁCIE SÚVISIACE S ROTÁCIOU SLNKA

Gil a Alania (2010; 2011) určili rigiditné spektrum prvej a druhej harmonickej 27-dennej variácie intenzity KŽ z NM Kiel a Rím za obdobie 1965–2002 a zistili, že ich zmeny sú podobné: rigiditné spektrum je tvrdšie v období maxima slnečnej aktivity a mäkkšie v období minima. Spektrá sú aproximované mocninovou funkciou rigidity $R^{-\gamma}$. 3-D model 27-dennej variácie KŽ pre rôzne fázy cyklu slnečnej aktivity uvádza práca (Gil a Alania, 2013). Model poskytuje hodnoty γ pre slnečné minimum a maximum. Závislosť 27-dennej variácie na celkovom MPS je uvedená v práci (Modzelewska a Alania, 2012). Autori zdôrazňujú to, že väčší rozsah helioidžkovej asymetrie rýchlosti slnečného vetra pre pozitívnu orientáciu poľa ($A > 0$) než pre negatívnu ($A < 0$) je dôležitým dôvodom rozdielov v amplitúdach tejto vlny pre odlišné polarít.

Odlišnosť pre rôzne polarít je zrejماً aj v závislostiach fáz 27 dennej vlny od $B.v^2$ ako aj od indexu koronálnej aktivity (Rybanský *et al.*, 2001; Dorotovič *et al.*, 2014) na obr. 3.

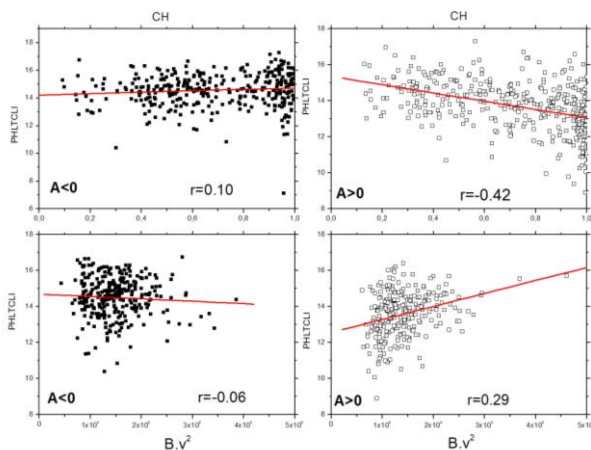


Fig.3. Súvislosť medzi fázou 27 dennej variácie KŽ (PHILT) a súčinom modulu medziplanetárneho magnetického poľa a kvadrátu rýchlosti slnečného vetra ($B \cdot v^2$, KŽ NM Climax, 1953-2006) – dolné panely; resp. s indexom koronálnej aktivity (CH, horné panely).

Obraz o vplyve slnečného magnetického cyklu na korotačnú moduláciu KŽ je diskutovaný tiež napr. v práci Gupta a Badruddin (2009). Gil a Alania (2016) opisujú časové zmeny energetického spektra prvých troch harmoník 27-dennej variácie počas cyklov 20-24 (tvrdšie spektrum amplitúd rekurentnej variácie v období maxim aktivity). Zvláštne je správanie spektra počas nedávneho extrémneho minima medzi cyklami 23 a 24: rigiditné spektrá amplitúd rekurentnej variácie v 1. harmonickej sú obdobné predošlým epochám, ale spektrá 2. a 3. harmonickej sú mäkšie. Výskyt 3. harmonickej ~ 27 dennej variácie študovali Sabbah a Kudela (2011).

V niektorých prípadoch sa WT vyskytujú rekurentne (opakované po ~ 27 dňoch). Tieto udalosti analyzovali Yeeram *et al.* (2014). Autori robia záver, že zdrojom časových zmien dennej anizotropie KŽ v období slnečného minima je gradient anizotropie, a že šírkový gradient KŽ môže byť niekedy vysvetlený morfológiou koronálnych dier. Guo a Florinski (2014) analyzujú ~ 27 dennú vlnu KŽ v období minima medzi cyklami 23 a 24 poukazujú na to, že páry rázových vln (dopredná/opačná) alebo oblastí (zhustenia/zriedenia) hrajú dôležitú úlohu v transporte KŽ a priamo určujú pozorované 27 denné vlny.

5. INÉ KVAZIPERIODICKÉ VARIÁCIE KŽ

Raghav *et al.* (2013) uvádza variáciu KŽ spojenú pravdepodobne so zatmením Mesiaca. Merania boli spravené s využitím scintilačného detektora NaI (TI) s energetickým prahom 200 keV. Aj v minulosti v niektorých prácach boli uvádzané variácie podobného druhu.

Spomedzi dlhších kváziperiodicit v KŽ niektoré práce uvádzajú cyklickosť $\sim 30-34$ r, resp. variáciu s periódou troch slnečných cyklov (e.g. Ahluwalia, 1977, Perez-Peraza *et al.*, 2012; Kudela, 2013).

6. ZÁVEREČNÉ POZNÁMKY

Waveletová (vlnková) technika je veľmi užitočným nástrojom pre skúmanie výskytu kváziperiodicit signálu v čase. Pre slnečný vietor, medziplanetárne magnetické pole a indexy geomagnetickej aktivity boli detailné štúdie v tomto smere spravené napr. v prácach Katsavrias *et al.* 2012; 2016). Pre štúdium „spúšťačov“ kváziperiodických procesov prejavujúcich sa v rôznych charakteristikách reťazca slnečno-zemskej fyziky je dôležitá aj analýza fázových relácií medzi rôznymi fyzikálnymi parametrami. Tento prístup (určovanie vzájomných fázových vzťahov) spojený aj so sledovaním koherencie dvojíc záznamov z pozemných meraní KŽ, je pre budúcnosť štúdia periodicit v KŽ dôležitý.

Druhým smerom, ktorý vyžaduje analýza časových radov KŽ z hľadiska určovania významnosti lokálnych maxím v profile PSD, je správne určenie „pozadia“, ktoré je ale fyzikálne zaujímavé tiež (rozptyl častíc na nehomogenitách MMP rôznych škál). V nedávnej práci Vipindas *et al.* (2016) uviedli výsledky rozsiahlej štúdie spektrálnych charakteristík KŽ (meraného NM) ako aj slnečnej aktivity s použitím rôznych metód – Fourierovskej, Hilbertovej a bispektrálnej. Takto zistili, že KŽ vykazuje rad krátko-, stredne- aj dlhodobých periodicit v rozsahu od 9 dní do 22 rokov. Bispektrálna analýza ukazuje charakteristické rysy nelineárnych väzieb a komplexné fázové vzťahy medzi harmonikami vyskytujúcimi sa v galaktickom KŽ a v charakteristikách slnečnej aktivity.

Zvláštnosťou časových radov KŽ je to že v širokom rozsahu frekvencií sa mení tiež sklon PSD(f), čo je pri hľadaní významných periodicit treba brať ako „pozadie“. Toto „pozadie“ nie je možné považovať za „jednofarebný šum“ (niečo medzi šumom „ružovým“ $1/f$ a „červeným“ $1/f^2$) nakoľko jeho tvar (obr. 2) je približne $1/f^{1.8}$ (v sledovanej oblasti f). Preto bude vhodné simulovať spätnou transformáciou FFT časové rady s určitým sklonom PSD, superponovať na to určité druhy šumov a dopĺňať k tomu monochromatickú vlnu s meniacou sa amplitúdou. Tak bude možné lepšie odhadnúť významnosť lokálnych maxím v PSD.

Pod'akovanie

Táto práca bola podporovaná agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe Zmluvy č. APVV-15-0194.

LITERATÚRA

- Abunina, M.A., Abunin, A.A., Belov, A.V. *et al.*: 2013. *Geomagnetism and Aeronomy*, **53**, 5, 561-570
- Ahluwalia, H.S.: 1997. *Proc. of the 25th ICRC Durban*, vol. **2**, pp. 109-112
- Bazilevskaya, G., Broomhall, A.-M., Elsworth, Y., and Nakariakov, V.M.: 2014. *Space Sci Rev* **186**, 359-386
- Bazilevskaya, G.A., Kalinin, M.S., Krainev, M.B. *et al.*: 2016. *Cosmic Research*, **54**, 3, 171-177
- Chowdhury, P., Khan, P., and Ray, P.C.: 2010. *Planetary and Space Science* **58**, 1045-1049

- Chowdhury, P., Kudela, K., and Moon, Y.-J.: 2016. *Solar Phys* **291**, 581–602
- Dorotovič, I.; Minarovjech, M.; Lorenc, M.; Rybanský, M.: 2014. *Solar Phys* **289**, 7, 2697-2703
- El-Borie, M.A., Aly, N.A., and El-Taher, A.: 2011. *Journal of Advanced Research* **2**, 137–147
- Gil, A., and Alania, M.V.: 2010. *Advances in Space Research* **45**, 429–436
- Gil, A., and Alania, M.V.: 2011. *J. of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* **73**, 294–299
- Gil, A., and Alania, M.V.: 2013. *Solar Phys* **283**, 565–578
- Gil, A., and Alania, M.V.: 2016. *Solar Phys* **291**, 6, 1877–1886
- Guo, X., and Florinski, V.: 2014. *J. Geophys. Res. Space Physics*, **119**, 2411–2429
- Gupta, V., and Badruddin: 2009. *Astrophys Space Sci* **321**, 185–195
- Katsavrias, C., Preka-Papadema, P. & Moussas, X.: 2012, *Solar Phys* **280**, 623 XXX
- Katsavrias, C., Hillaris, A., and Preka-Papadema, P.: 2016. *Advances in Space Research* **57**, 2234–2244
- Kudela, K., Rybák, J., Antalová, A. and Storini, M.: 2002. *Solar Phys* **205**, 1, 165-175
- Kudela, K., Mavromichalaki, H., Papaioannou, A., and Gerontidou, M.: 2010. *Solar Phys* **66**, 173-180
- Kudela, K.: 2013, *Journal of Physics: Conference Series* 409, 012017
- Kudela, K., and Sabbah, I.: 2016, *Science China Technol. Sciences* **59**, 4, 547–557
- Mailyan, B. and Chilingarian, A.: 2010. *Advances in Space Research* **45**, 1380–1387
- Mavromichalaki, H., Papageorgiou, Ch., and Gerontidou, M.: 2016. *Astrophys Space Sci*, **361**, 69
- Mishra, R.K., and Agarwal, R.: 2009. *Astroparticle Physics*, **31**, 4, 329-339
- Modzelewska, R., and Alania, M.V.: 2012. *Advances in Space Research* **50**, 716–724
- Mohanty, P.K., Ahmad, S., Antia, H.M. et al.: 2016. *Astroparticle Physics* **79**, 23-30
- Mufti, S., Darzi, M.A., Ishtiaq, P.M., Mir, T.A., Shah, G.N.: 2011. *Planetary and Space Science* **59**, 394–401
- Oh, S.Y., Yi, Y., and Bieber, J.W.: 2010. *Solar Phys* **262**, 199–212
- Oh, S., and Kang, J.: 2013. *J. Astron. Space Sci.* **30**, 3, 175-178
- Okpala, K.C., Okeke, F.N.: 2011. *Astroparticle Physics* **34**, 878–885
- Perez-Peraza, J., Velasco, V., Libin, I.Ya., and Yudakhin, K.F.: 2012. *Advances in Astronomy*, **2012**, Article ID 691408, 11 pp
- Raghav, A., Bhaskar, A., Lotekar, A., Vichare, G., and Yadav, V.: 2014. *J. Cosmology and Astroparticle Physics*, **10**, 074
- Richardson, I.G., von Rosenvinge, T.T., and Cane, H.V.: 2016. *Solar Phys* **291**, 2117–2134
- Rybanský, M., Rušin, V. a Minarovjech, M.: *Space Science Reviews*, **95**, 1/2, 227-234
- Sabbah, I., and Kudela, K.: 2011. *J. Geophys. Res.*, **116**, A04103
- Sabbah, I.: 2013. *J. Geophys. Res. Space Physics*, **118**, 4739–4747
- Singh, A., Tiwari, A.K., and Agrawal, S.P.: 2010. *J. Astrophys. Astr.* **31**, 89–96
- Tezari, A., and Mavromichalaki, H.: 2016. *New Astronomy* **46**, 78-84
- Tiwari, A.K., Singh, A., and Agrawal, S.P.: 2012. *Solar Phys* **279**, 253–267
- Valdés-Galicia, J. F., Pérez-Enriquez, R., & Otaola, J. A.: 1996. *Solar Phys* **167**, 1-2, 409-417
- Vipindas, V., Gopinath, S., and Girish, T.I.: 2016. *Astrophys Space Sci* **361**, 135
- Yeeram, T., Ruffolo, D., Saiz, A., Kamyam, N., and Nutaro, T.: 2014. *Astrophysical J.* **784**, 2, Article Number: 136
- Yeeram, T. and Saengdokmai, N.: 2015. *Solar Phys* **290**, 2311–2331