

Variácie emisných čiar ultrafialovej slnečnej koróny a koronálny index CI

I. Dorotovič, M. Lorenc, Slovenská ústredná hviezdáreň, Hurbanovo
M. Rybanský, Slovenská ústredná hviezdáreň, Hurbanovo a Ústav experimentálnej fyziky SAV, Košice

Abstrakt.

Príspevok naväzuje na práce prezentované na 19. a 20. slnečnom seminári (Lukáč a Rybanský, 2008; Lorenc a i., 2010). Práce súvisia s cieľom nahradiť koronálny index slnečnej aktivity (CI) odvodený z pozemských meraní spektrálnej koronálnej čiary FeXIV (530,3 nm, Rybanský, 1975, Rybanský et al. 2005) meraniami z družíc v EUV oblasti spektra. Zatiaľ čo v prvom príspevku bol definovaný modifikovaný koronálny index (MCI), odvodený z meraní spektrometra CELIAS/SEM na družici SOHO a porovnaný s CI, v druhom príspevku sme sa zamerali na použitie meraní z družice TIMED SEE na ten istý účel. V tomto príspevku prezentujeme spresnený výpočet MCI pre celé obdobie od roku 1996 až do konca roku 2011 a uvádzame relácie na využitie niektorých meraní družice TIMED a SORCE na nahradenie pozemských koronálnych meraní pri zostavovaní koronálneho indexu slnečnej aktivity.

Štúdium cyklu slnečnej aktivity patrí k základným úlohám slnečnej fyziky. Úroveň aktivity bola pôvodne spájaná s počtom slnečných škvr. Dnes máme množstvo ukazovateľov úrovne – indexov, ktoré môžu charakterizovať slnečnú aktivitu, avšak tradičným astrofyzikálnym merítkom premennosti je úroveň vyžiarenej energie. V integrálnom žiarení sa slnečná aktivita v cykle prejavuje tak nepatrne ($I_{\max}/I_{\min} \cong 1,002$), že existencia variácií bola odhalená až z meraní z umelých družíc. Zároveň sa však zistilo (Elske et al., 1974, Dupree, 1973), že počas cyklu podstatne vzrastajú variácie v UV a EUV obore spektra a to nepriamo úmerne s poklesom vlnovej dĺžky. Už pri vlnovej dĺžke 100 nm je $I_{\max}/I_{\min} \cong 1,5$ a pri 10 nm je to už okolo 2,8. Hodnoty sa týkajú spojitého UV a EUV spektra. Zložitejšia je situácia pri emisných čiarach. Tam intenzita závisí od viacerých parametrov, hlavne od koncentrácie iónu daného stupňa ionizácie a koncentrácie tohoto iónu na hornej hladine. Obecne tieto koncentrácie závisia od koncentrácie voľných elektrónov a teploty.

Nebudeme sa však zaoberať teóriou ionizácie a excitácie. K otázke budeme pristupovať empiricky. Máme k dispozícii dlhodobý rad „koronálneho indexu“ (CI; 1939 – 2008), ktorý je vyjadrený výkonom, vyžiareným celou korónou viditeľnou zo Zeme, v emisnej čiare 530,3 nm. Tento výkon je odvodený z pozemských koronálnych pozorovaní intenzít tejto emisnej čiary (zelenej čiary koróny). Je známe, že CI je jednoznačnou funkciou fázy slnečného cyklu, t.j. rastie s rastom úrovne slnečnej aktivity (Rybanský, 1975, Rybanský et al. 2005).

Zostavovanie časového radu CI bolo na Astronomickom ústave SAV ukončené v roku 2008. Dnes, v ére satelitov existuje množstvo meraní v UV a EUV oblasti spektra, ktoré sú už z princípu ekvivalentné s CI a teda

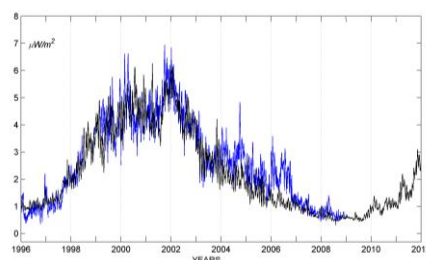
môžu slúžiť pri zostavovaní CI (MCI) pomocou zistených korelačných vzťahov.

Lukáč a Rybanský (2010) takýmto postupom použili merania EUV žiarenia v oblasti 26 - 34 nm prístroja CELIAS umiestneného na družici SOHO. Zostavili modifikovaný koronálny index (MCI), ktorý je pokračovaním CI. V práci boli použité údaje do roku 2005. Porovnanie v ďalších rokoch umožnilo spresniť aproximačné vzťahy o čom pojednávame v časti 2..

V časti 3 porovnáваме CI s meraniami družice TIMED a SORCE a v časti 4 uvádzame celkové závery práce.

2) Modifikovaný koronálny index (MCI)

Lukáč a Rybanský (2010) zostavili modifikovaný koronálny index (MCI) tak, že porovnali merania EUV žiarenia v oblasti 26 - 34 nm (CE) prístroja CELIAS umiestneného na družici SOHO s CI. Z korelácie určili aproximačný vzťah ktorý umožňoval z meraní CE určiť MCI, čo je vlastne pokračovanie CI. Zatiaľ, čo použitie tohto postupu pre roky 1996 – 2003 ukázalo veľmi dobrý súhlas v priebehoch CE a CI, koeficient korelácie dosiahol hodnotu 0,924, v ďalších rokoch sa priebehy niekedy dost odlišovali (obr. 1).



Obr. 1: Priebeh denných priemerných hodnôt CI a MCI za roky 1996 – 2008 (2011) (modrá resp. čierna).

Aby sme rozhodli, ktoré z dvoch meraní: CE, alebo CI sa odchytilo od pôvodne spoločného priebehu, použili sme na porovnanie príbuzné merania z družíc TIMED (EUV v oblasti 27 – 34 nm a FeXVI – 33,5 nm) a SORCE (FeXV – 28,4 nm a FeXVI – 33,5 nm).

Porovnanie ukázalo, že v rokoch 2004 a 2005 sa CI a CE odlišovali iba v absolútnej hodnote, takmer súhlas sa dá dosiahnuť, ak denné hodnoty CI za rok 2004 násobíme koeficientom 0,7 a hodnoty CI za rok 2005 koeficientom 0,8. Hodnoty CI za roky 2006 – 2008 sú nepoužiteľné a pre úplný nesúhlas ich z porovnania vylúčime.

Ďalej postupujeme podľa pôvodného postupu (Lukáč a Rybanský, 2010). Po vylúčení dvojíc meraní, pri ktorých bol CI určený z menej ako 9 denných pozorovaní a tých meraní CE, ktoré boli rušené prechodom CME cez družicu SOHO, ostalo na porovnanie 1733 dvojíc. Výsledok porovnania je znázornený na obr. 2.

Relácia sa dá aproximovať priamkou :

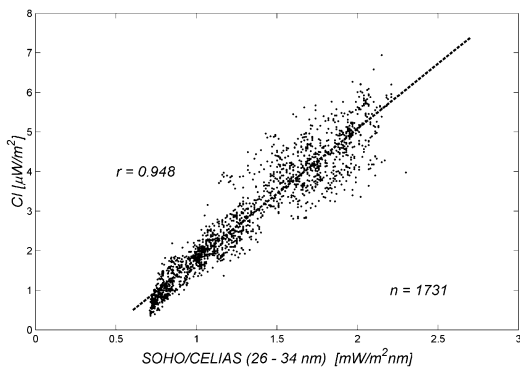
$$(1) \quad MCI [\mu Wm^{-2}] = 3286 * CE - 1.489,$$

kde CE je prepočítané na $[Wm^{-2}]$:

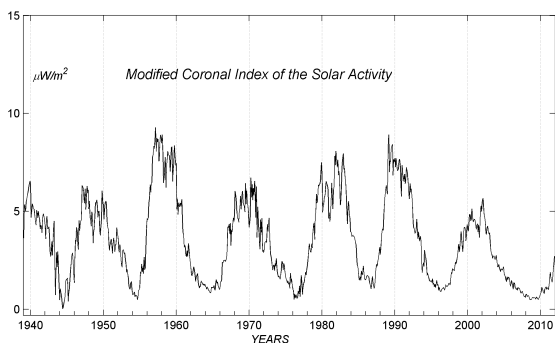
$$CE [Wm^{-2}nm] = 6.622 \cdot 10^{14} [photons cm^{-2} s^{-1}].$$

Koeficient korelácie medzi CE a CI je $r = 0.946$.

http://www.usc.edu/dept/space_science/semdatafolder/semdownload.htm



Obr. 2: Znáznornenie závislosti denných priemerných hodnôt medzi CE a CI (vybrané merania v rokoch 1996 – 2005)



Obr. 3 : Priemerné mesačné hodnoty MCI 1939 – 2011 určené z CI za roky 1939 – 1995 a z CELIAS od roku 1996.

3) Merania v obore EUV z družíc TIMED a SORCE

Družica **TIMED** (Thermosphere, Ionosphere, Mesosphere, Energetics and Dynamics) je počiatočnou misiou v rámci NASA's Solar Terrestrial Probes Program. Jej cieľom je študovať vplyv Slnka na mezoféru a spodnú termosféru/ ionosféru (MLTI), tj. oblasť atmosféry vo výškach 60 -180 km nad zemským povrchom a je prvou z umelých družíc, ktoré majú poskytnúť globálny obraz o tejto pomerne nepreskúmanej oblasti našej atmosféry.

Na kruhovú obežnú dráhu so sklonom 74,1° a výškou 625 km bola vypustená v roku 2001. Jedným zo štyroch prístrojov družice TIMED je **Solar EUV Experiment (SEE)**. Okrem iného s vysokou presnosťou meria slnečné extrémne ultrafialové (EUV) od 0 do 120 nm. Tieto merania sa vykonávajú počas troch minút pri každej otočke, ktorá trvá 97 minút. Počas dňa sa takto získa 14 -15 pozorovaní. Dáta sú k dispozícii od 39. dňa roku 2002 (08.02.2002) a možno ich najst' na internetovej adrese

http://lasp.colorado.edu/see/spwx_data_page.html

Pre všeobecné použitie sú k dispozícii dáta uvedené v tabuľke 1, kde sú zároveň uvedené aj výsledky porovnania s MCI (cca 3600 spoločných meraní za roky 2002 – 2011).

Tabuľka 1:

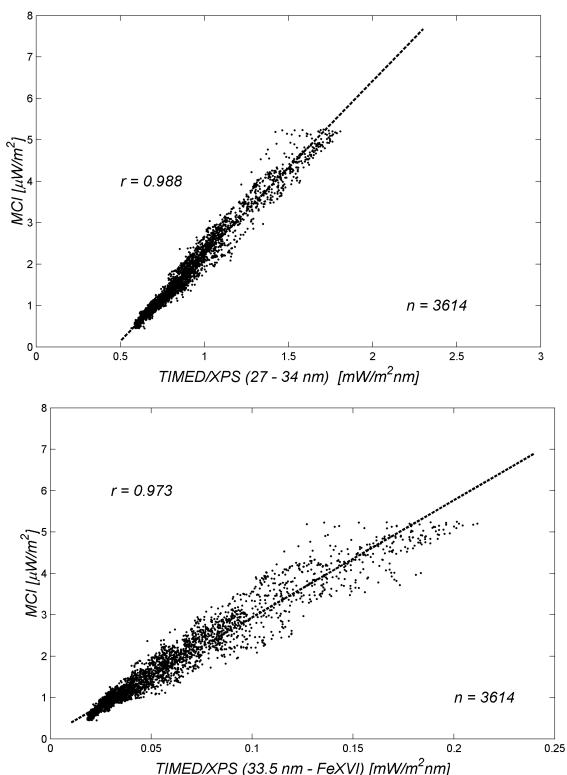
λ [nm]		r	Δ
0.1 – 7.0	cont.	0.877	44.617
27 – 34	lines + cont.	0.988	2.433
30.4	HeII	0.983	2.118
33.5	FeXVI	0.973	7.135
36.8	MgIX	0.906	2.302
121.5	HI	0.981	1.621
133.5	CII	0.978	1.922
145 – 165	cont.	0.963	1.242

V prvom stĺpci je meraný rozsah vlnových dĺžok, v druhom je zdroj žiarenia, v treťom je koeficient lineárnej korelácie a vo štvrtom je pomer maximálnej a minimálnej hodnoty v celom dátovom súbore (hodnoty Δ sú počítané iba z obdobia od 1. marca 2003, aby boli porovnateľné s meraniami na družici SORCE).

Najlepší súhlas priebehov (tučné písmo v tabuľke) s priebehom MCI vykazujú merania globálneho žiarenia Slnka v pásme vlnových dĺžok 27 – 34 nm (2, T11) a v čiare FeXVI – 33,5 nm (3, T12).

$$2) \quad MCI [\mu Wm^{-2}] = 4185 * T11 - 1.953$$

$$3) \quad MCI [\mu Wm^{-2}] = 28330 * T12 + 0.1017$$



Obr 4 a 5: Porovnanie denných priemerných hodnôt meraní družice TIMED v kanáloch 27 – 34 nm a 33.5 nm z hodnotami MCI za roky 2002 – 2011.

Tabuľka 2:

λ [nm]	r	Δ	λ [nm]	r	Δ	λ [nm]	r	Δ	λ [nm]	r	Δ
0.5	0.881	118.173	10.5	0.904	2.919	20.5	0.938	3.858	30.5	0.679	1.399
1.5	0.937	41.956	11.5	0.835	2.503	21.5	0.934	3.317	31.5	0.895	2.120
2.5	0.954	7.968	12.5	0.891	2.518	22.5	0.936	3.335	32.5	0.929	3.010
3.5	0.952	8.008	13.5	0.878	2.451	23.5	0.920	2.591	33.5	0.947	7.457
4.5	0.951	5.296	14.5	0.912	2.572	24.5	0.925	2.779	34.5	0.905	2.275
5.5	0.952	5.284	15.5	0.902	2.223	25.5	0.935	3.429	35.5	0.920	2.624
6.5	0.939	4.091	16.5	0.859	1.823	26.5	0.943	4.912	36.5	0.939	3.920
7.5	0.925	2.806	17.5	0.891	2.081	27.5	0.908	2.319	37.5	0.851	1.788
8.5	0.914	2.509	18.5	0.924	2.766	28.5	0.946	6.706	38.5	0.908	2.316
9.5	0.916	3.177	19.5	0.935	3.440	29.5	0.933	3.288	39.5	0.801	1.611

V prvom stĺpci je meraný rozsah vlnových dĺžok, v druhom je koeficient lineárnej korelácie a v treťom je pomer maximálnej a minimálnej hodnoty v celom dátovom súbore (od 1. marca 2003 do konca roku 2011).

Najlepší súhlas priebehov (tučné písmo v tabuľke) s priebehom MCI vykazujú merania globálneho žiarenia Slnka v pásme vlnových dĺžok 2,5 – 5,5 nm (4, SO1; korelovaný bol priemer zo štyroch kanálov; $r = 0,958$; $\Delta = 6,639$), v čiare FeXV – 28,5 nm (5, SO2) a v čiare FeXVI – 33,5 nm (6, SO3). Hodnoty z družice SORCE sú vo $Wm^{-2}nm^{-1}$.

$$4) MCI [\mu Wm^{-2}] = 60590 * SO1 - 0.16$$

$$5) MCI [\mu Wm^{-2}] = 22460 * SO2 - 0.09$$

$$6) MCI [\mu Wm^{-2}] = 27160 * SO3 + 0.01.$$

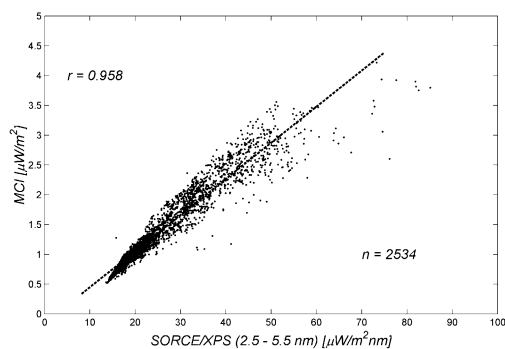
Družica SORCE

Družica SORCE (Solar Radiation and Climate Experiment) je určená na meranie intenzity globálneho slnečného žiarenia a okrem toho v röntgenovom, ultrafialovom, vizuálnom, a blízkom infračervenom obore spektra. Merania majú byť podkladom na štúdiu klimatických zmien. Jedným zo štyroch prístrojov je XPS (XUV Photometer System), ktorý meria spektrálnu intenzitu v globálnom žiarení Slnka v pásme 0,1 – 40 nm ($W m^{-2} nm$)

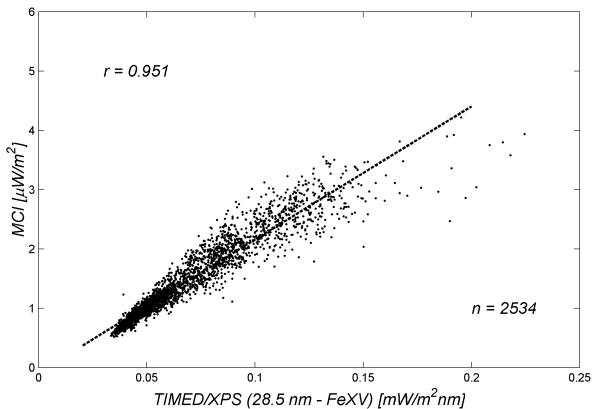
Družica SORCE bola 25. januára 2003 navedená na obežnú dráhu vo výške 645 km, so sklonom 40° . K dispozícii sú denné priemery z meraní v pásmach so šírkou 1 nm v intervale 0,1 – 40 nm s rozlíšením 0,1 nm od 1. marca 2003 na internetovej adrese: http://lasp.colorado.edu/lisird/sorce/sorce_ssi/ts.html

Z analýzy sme vylúčili merania z obdobia predĺženého minima 24. cyklu slnečnej aktivity, od 28. 4. 2008 do 22. 9. 2009, lebo v tom období boli výsledky porovnania pochybné a na získané aproximačné vzťahy to nemá takmer žiadny vplyv.

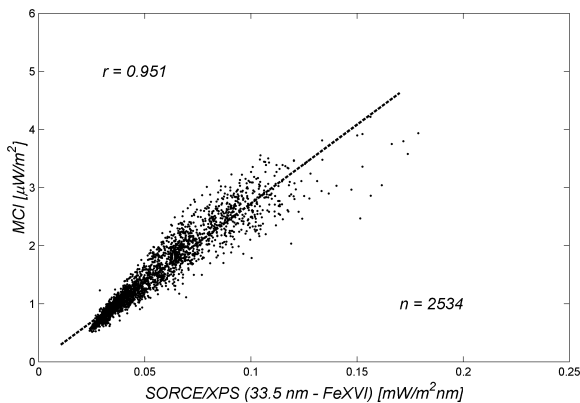
Výsledky porovnania s MCI (cca 2600 spoločných meraní za roky 2003 – 2011) v jednotlivých kanáloch sú uvedené v tabuľke 2.



Obr. 6: Porovnanie denných priemerných hodnôt meraní družice SORCE v kanáli 2.5 – 5.5 nm a MCI za roky 2003 – 2011.



Obr. 7: Porovnanie denných priemerných hodnôt meraní družice SORCE v kanáli 28.5 nm a MCI za roky 2003 – 2011.



Obr. 8: Porovnanie denných priemerných hodnôt meraní družice SORCE v kanáli 33.5 nm a MCI za roky 2003 – 2011.

Záver

a) Korelácia MCI je pomerne vysoká takmer so všetkými vybranými meraniami z družíc. Po skončení misie SOHO máme teda pripravené rôzne možnosti na pokračovanie v zostavovaní časového radu MCI tým aj CI. Už od 1.1.2012 používame na výpočet MCI obidva vhodné kanály družice TIMED. Na webe SÚH uverejňujeme ich priemer.

b) Prekvapujúca je vysoká korelácia MCI s HeII a dokonca s L_{α} na družici TIMED. Naopak, na družici SORCE je korelácia s HeII najnižšia. Tento rozdiel nevieme uspokojivo vysvetliť, súvisí zrejme s vlastnosťami separácie čiary v spektre. V súvislosti s tým sa zdá, že pre náhradu CI by bolo lepšie vybrať iba emisiu v jednej čiare, než úsek spektra, v ktorom sa vyskytujú čiary s veľmi rozdielnymi vlastnosťami.

c) V ďalšom počítame s použitím meraní prístroja EVE družice SDO, kde bude separácia čiar dokonalejšia. Na analýzu potrebujeme však dlhší merací rad, než je zatiaľ k dispozícii.

d) Inverzné aproximačné vzťahy umožnia predĺžiť meracie rady FeXV a FeXVI až do roku 1940.

Pod'akovanie

We thank the many LASP staff who fabricated, tested, operated, and continue operate the TIMED SEE and SORCE solar irradiance instruments. We also thank the CELIAS/SEM is experiment on the Solar Heliospheric Observatory (SOHO) spacecraft. SOHO is a joint European Space Agency and United States National Aeronautics and Space Administration mission. This work was partly supported by VEGA grant project 2/0081/10.

Literatúra

- Elske, V.P., Smith, P., Gottlieb, D.M.: 1974, *Space Sci. Rev.* **16**, 771.
 Dupree, A.K.: 1973, *Astrophys. J.* **182**, 321.
 Rybanský, M.: 1975, *Bull. Astron. Inst. Czechoslov.* **28**, 367.
 Rybanský, M., Rušin, V., Mínavojtech, M., Klocok, L., Cliver, E.W.: 2005, *J. Geophys. Res.* **110**, A08106.
 Lorenc M., Pastorek L. a Rybanský M.: 2010, *Variácie EUV žiarenia Slnka a koronálny index slnečnej aktivity*, 20. slnečný seminár, Papradno 2010
 Lukáč B. a Rybanský M.: 2008, *Pozorovania SOHO a koronálny index slnečnej aktivity*, 19. slnečný seminár, Papradno 2008
 Lukáč B. and Rybanský M.: 2010, *Modified Coronal Index of the Solar Activity*, *Solar Phys.* **263**, 43 – 29.