

# Diferenciálny rotačný profil slnečnej koróny určený pomocou metódy krížovej korelácie

I. Dorotovič a M. Rybanský, Slovenská ústredná hviezdáreň, Hurbanovo,  
ivan.dorotovic@suh.sk

## Abstrakt

V práci určujeme rýchlosť rotácie slnečnej koróny metódou krížovej korelácie použitej na EUV-obrázky, ktoré získava prístroj AIA na družici SDO cez filter 21,1 nm. Problém redukuje na zistenie maxima krížovokorelačnej funkcie, konštruovanej z dvoch obrázkov s časovým odstupom okolo 30 minút. Zo vstupných obrázkov sme vybrali úseky v rozsahu  $\pm 6^\circ$  v heliografickej dĺžke a  $\pm 69^\circ$  v šírke (241 x 2761 pixelov). Rýchlosť rotácie sme určili v každom riadku a pre každý deň v rokoch 2016, ale pre konečné hodnotenie sme vybrali iba tie, kde maximum krížovokorelačnej funkcie bolo vyššie ako 0,5. Priemerná siderická rýchlosť rotácie na rovníku vychádza pre rok 2016  $14,3^\circ/\text{deň}$  (2,009 km/s), čo je o málo menej ako pri starších určeníach. Diskutujeme tiež asymetriu rozdelenia obvodových rýchlostí v päťstupňových šírkových sektoroch. Softvér použijeme postupne pre hromadné spracovanie dát z prístroja AIA/SDO za celé obdobie pozorovania (2011 – zatiaľ 2017). Dá sa využiť aj pre obrázky v iných vlnových dĺžkach.

## 1. ÚVOD

Určenie charakteru diferenciálnej rotácie rôznych vrstiev slnečného telesa patrí stále medzi najväčšie problémy slnečnej fyziky. Slnečný povrch (fotosféra), rotuje podľa skúmania pohybu rôznych “traserov” diferenciálne, aspoň pokiaľ ide o rozsah širok, kde sa tieto trasery vyskytujú. Otázkou ostáva ako sa diferenciálna rotácia prenáša do vyšších, nad fotosférou pozorovaných štruktúr, hlavne do slnečnej koróny.

Charakter rotácie slnečnej koróny sa nepodarilo presne určiť z pozemských pozorovaní. Podľa tvrdení niektorých autorov rotuje koróna ako pevné teleso, podľa iných diferenciálne ako fotosféra. Podrobný opis týchto pokusov je uvedený v práci Lorenc a kol. (2012). Seriózny prístup k problému umožnili až obrázky získané z kozmického priestoru v EUV-, alebo röntgenovej oblasti spektra. Traserami boli zvyčajne jasné koronálne body (coronal bright points – CBPs), t.j. zjasnenia malých rozmerov (cca  $10'' - 15''$ ). CBPs sú spojené s bipolárnymi magnetickými štruktúrami zakotvenými vo fotosfére. Doterajšie výsledky v tejto oblasti výskumu sú zhrnuté napr. aj v prácach Brajša a kol. (2004), Sudar a kol. (2015). Podľa týchto prác slnečná koróna rotuje diferenciálne, podobne ako škrvny vo fotosfére. Výsledky sú prezentované aproximačným vzorcom:

$$\omega = A + B\sin^2 b + C\sin^4 b \text{ [}^\circ/\text{deň}], \quad (1)$$

kde  $b$  je heliografická šírka a  $A$ ,  $B$ ,  $C$  sú koeficienty aproximačného vzťahu, ktoré možno určiť metódou najmenších štvorcov. Tento tvar vzorca pochádza ešte z práce Newton a Nunn (1951), v ktorej rýchlosť rotácie

škrvín za obdobie 1878 - 1944 aproximovali vzťahom:

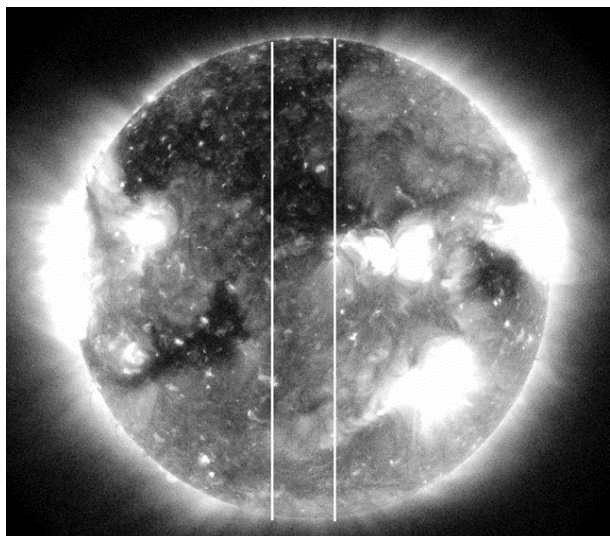
$$\omega = 14.38 - 2.78\sin^2 b.$$

Štruktúry v koróne majú okrem rotačnej rýchlosti aj značné rýchlosti chaotických vlastných pohybov. Aby sme tieto mohli študovať, potrebujeme spoľahlivo poznať priemerné rotačné rýchlosti, čo je jeden z hlavných zámerov tejto práce.

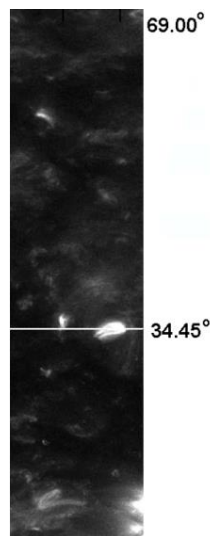
## 2. ÚDAJE A METODIKA URČENIA UHLOVEJ RÝCHLOSTI ROTÁCIE

V našej práci redukuje určenie rýchlosti rotácie na zistenie polohy maxima krížovokorelačnej funkcie konštruovanej z dvoch za sebou idúcich obrázkov s istým časovým odstupom. Používame obrázky koróny v čiare 21,1 nm, ktoré získava prístroj AIA (Lemen et al., 2012) na kozmickom observatóriu SDO (Pesnell et al., 2012). Rozlíšenie na obrázkoch je okolo  $0,6''$  na pixel.

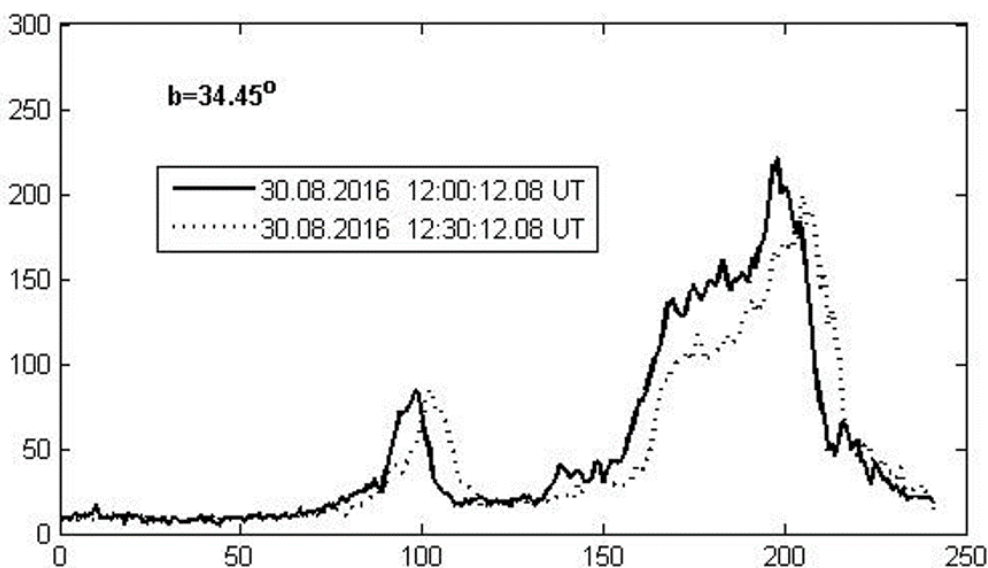
Intenzitný priebeh v určitom riadku na obrázku sa mení jednak pre presun štruktúr rotáciou a jednak následkom ich vlastných pohybov a intenzitných zmien. Aby sme čo najpresnejšie určili uhlovú rýchlosť  $\omega$ , potrebovali by sme časový interval medzi obrázkami okolo dvoch hodín. Za tú dobu sa však intenzitný profil značne zmení následkom vlastných pohybov. Testovaním sme zistili, že najvhodnejší časový odstup medzi dvomi za sebou idúcimi obrázkami je 30 minút. Pre naše účely vyberáme z pôvodného obrázku AIA/SDO 211, t.j. obrázku koróny vo vlnovej dĺžke 21,1 nm iba časť pozdĺž centrálného meridiánu, ako to ilustruje obr. 1.



Obrázok 1. Slnecná koróna dňa 30.8.2016 o 12:00:12,8 UT.



Obrázok 2. Severná časť mapy z 30. augusta 2016. V šírke  $b = 34,45^\circ$  je znázornený rez, ktorý budeme ďalej používať pri popise metódy.



Obrázok 3. Priebehy intenzít na susedných obrázkoch z 30.08.2016 v šírke  $34,45^\circ$ .

Pre určenie uhlovej rýchlosti sme vybrali pozorovania pre celý rok 2016 a pre každý deň okolo poludnia UT. Pre prevod polohy pixlov na obrázku  $(x,y)$  na sférické heliografické súradnice ( $\Delta l$  – vzdialenosť od centrálného meridiánu;  $b$  – heliografická šírka) sme použili vzorce uvedené v práci Lorenc a kol. (2012). Z hodnôt  $\Delta l$  a  $b$  sme vytvorili rovinnú maticu intenzít štruktúr pre každý deň v roku 2016. Táto matica obsahuje 2761 riadkov a 241 stĺpcov pre každý deň, čo odpovedá rozsahu  $\pm 6^\circ$  v dĺžke od centrálného meridiánu a  $\pm 69^\circ$  v šírke. Intenzity v uzlových bodoch siete so vzdialenosťou  $0,05^\circ$  sú získané interpoláciou. Severná časť mapy z 30. augusta 2016 je znázornená na obr. 2. V šírke  $b = 34,45^\circ$  je znázornený rez, ktorý budeme ďalej používať pri popise metódy. Priebeh intenzít v susedných obrázkoch je znázornený na obr. 3.

Pre každý riadok sme určili krížovokorelačnú funkciu  $r(k)$  podľa vzťahu:

$$r(k) = \frac{n \sum x_1(i)x_2(i+k) - \sum x_1(i) \sum x_2(i+k)}{s_1 s_2}, \quad (2)$$

kde

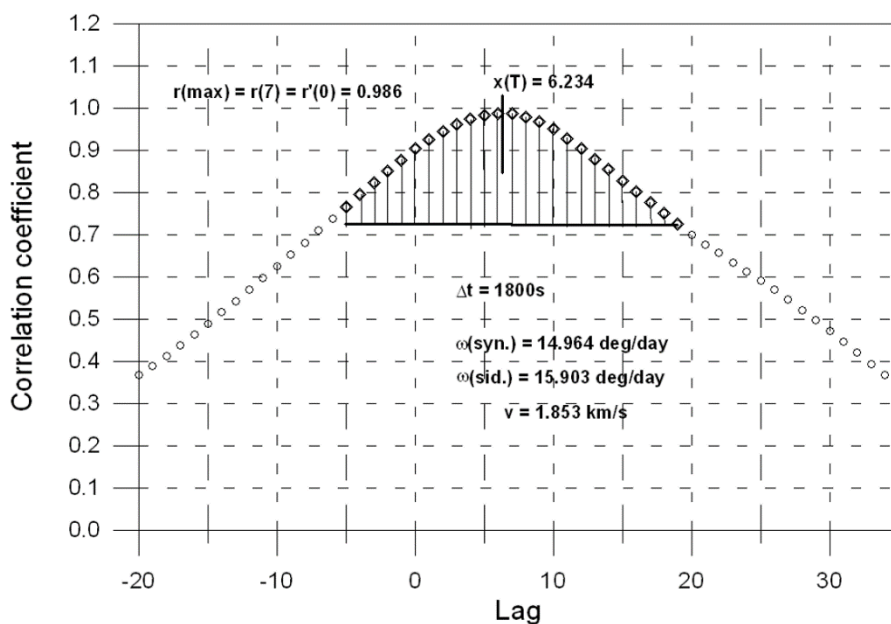
$$s_1 = \sqrt{n \sum x_1^2(i) - (\sum x_1(i))^2}$$

a

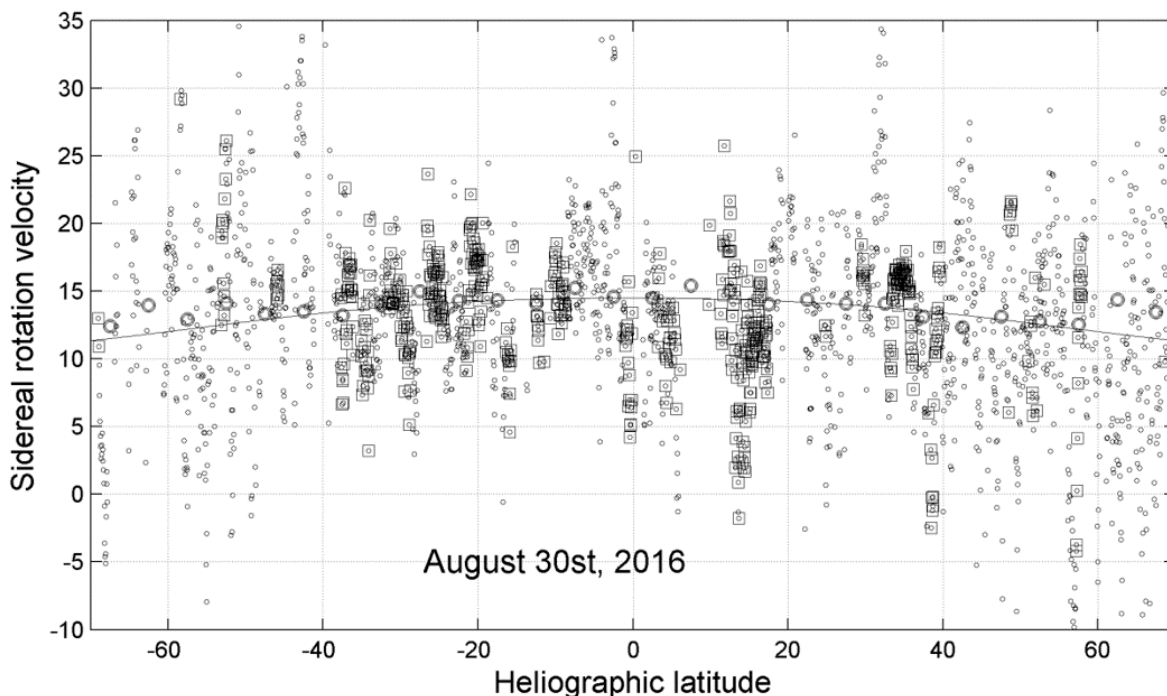
$$s_2 = \sqrt{n \sum x_2^2(i+k) - (\sum x_2(i+k))^2}$$

a  $x_1$  a  $x_2$  sú intenzity z porovnávaných obrázkov a  $k$  je krok z intervalu  $(-50, 50)$ . Krížovokorelačnú funkciu

pre riadok 692 z 30.08.2016, čo odpovedá šírke  $34,45^\circ$  na obr. 2, znázorňujeme na obr. 4. Optimálny posun



Obrázok 4. Krížovokorelačná funkcia pre  $b = 34,45^\circ$  z 30.08.2016 [Lag – krok, Correlation coefficient – korelačný koeficient].



Obrázok 5. Hodnoty uhlovej rotačnej rýchlosti za jeden deň (30.08.2016) [Heliographic latitude / heliografická šírka, Sidereal rotation velocity – siderická rýchlosť rotácie].

medzi dvoma snímkami, z ktorého sa určuje rýchlosť rotácie je daný polohou vrcholu krížovokorelačnej funkcie (CCF). Pre dosiahnutie čo najväčšej presnosti je podstatný výber rozsahu v smere „lag“ aj v smere „r“ (obr. 4). Po mnohých testoch sme vybrali v smere „lag“ rozsah  $\pm 12$  krokov od  $r(\max)$  a v smere „r“ od nižšej krajnej hodnoty  $r$  po  $r(\max)$ . Pre takto ohraničenú oblasť

určujeme polohu ťažiska –  $\text{lag}(T)$ . Synodickú uhlovú rýchlosť rotácie ( $\omega'$ ) potom určujeme z výrazu:

$$\omega' = \text{lag}(T) M / \Delta t, \quad (3)$$

kde  $M = 0,05^\circ$  – rozmer prvku siete dát matice a  $\Delta t$  je časový interval medzi snímkami, z ktorých uhlovú rýchlosť určujeme. Pre určenie siderickej uhlovej

rýchlosti rotácie ( $\omega$ ) pripočítame k synodickej ešte uhlovú rýchlosť obehu Zeme ( $\Delta l_z$ ) pre daný deň, ktorá počas roka kolíše medzi  $0,953^\circ$  a  $1,019^\circ$  za deň. Obvodovú (lineárnu) rýchlosť rotácie, vzhľadom na stred Slnka, určíme zo vzťahu:

$$v = \omega(b) r_0 \cos b, \quad (4)$$

kde  $r_0$  je polomer Slnka,  $r_0 = 696\,300$  km ( $1^\circ/\text{deň}$  na rovníku odpovedá  $2,02 \cdot 10^{-7}$  rad/s a lineárne  $140,6$  m/s).

Z ďalšieho spracovania sme potom vylúčili riadky, pri ktorých je korelácia medzi susednými snímkami nižšia ako  $0,5$ , aby sme čo najviac eliminovali riadky, pri ktorých intenzitný profil neobsahuje jasnú štruktúru. Takýchto riadkov je cca  $25\%$  z celkového počtu. Výsledok určenia  $\omega$  pre jeden deň (30.08.2016) po zohľadnení týchto dvoch kritérií je znázornený na obr. 5 menšími krúžkami. Rozptyl hodnôt  $\omega$  sa o málo zmenší, ak vezmeme do úvahy iba tie dáta, kde  $r_{\max} > 0,9$ . Tieto sú na obr. 5 znázornené štvorčekmi. Tak sa však zmenší počet dát približne na  $20\%$  pôvodného počtu a potom nie je možné určiť priemerné hodnoty rotačných rýchlostí v niektorých šírkových pásmach. Spojitá čiara je rotačná rýchlosť podľa výslednej aproximácie rovnice (7). Pre ďalšie zmenšenie rozptylu sme hodnoty za daný mesiac spriemerovali do päťstupňových intervalov (väčšie krúžky na obr. 5). Pre maximálne možné zmenšenie

rozptylu sme sa rozhodli zhromaždiť do 5 stupňových intervalov merania za celý rok 2016. Potom poklesne stredná kvadratická chyba obvodovej rotačnej rýchlosti na úroveň približne  $3$  m/s.

### 3. VÝSLEDKY

Takto upravené výsledky sú uvedené v tabuľke 2, kde  $b$  je heliografická šírka [ $^\circ$ ],  $n$  označuje počet hodnôt vstupujúcich do priemeru,  $v$  obvodovú rýchlosť [km/s];  $sv$  strednú kvadratickú odchýlku priemernej obvodovej rýchlosti,  $\delta v$  strednú chybu priemernej obvodovej rýchlosti, počítanú podľa vzťahu :

$$\delta = \frac{s}{\sqrt{n-1}}, \quad (5)$$

kde  $s$  je disperzia dát,  $\gamma$  je koeficient asymetrie rozdelenia rýchlostí v danom sektore, počítaný podľa vzťahu:

$$\gamma = \mu_3 / s^3, \quad (6)$$

kde  $\mu_3$  je tretí moment rozdelenia obvodovej rýchlosti.

**Tabuľka 1. Siderická rýchlosť rotácie koróny a s ňou súvisiace parametre pre rozsah heliografických šírok  $-67,5^\circ$  až  $+67,5^\circ$  a pre 30.08.2018.**

$b$	$n$	$v$	$sv$	$\delta v$	$\gamma$	$\omega$
67.5	18774	0.565	0.773	0.0056	-0.1486	10.503
62.5	24365	0.719	0.753	0.0048	-0.0311	11.081
57.5	24737	0.877	0.717	0.0046	0.0861	11.608
52.5	25765	1.047	0.681	0.0042	0.0571	12.237
47.5	28083	1.180	0.633	0.0038	0.0421	12.426
42.5	28259	1.336	0.613	0.0036	0.0343	12.887
37.5	28746	1.495	0.588	0.0035	0.0507	13.401
32.5	29954	1.624	0.567	0.0033	-0.0114	13.692
27.5	30809	1.718	0.513	0.0029	-0.0347	13.779
22.5	32630	1.833	0.489	0.0027	-0.0919	14.115
17.5	33613	1.905	0.454	0.0025	-0.1092	14.207
12.5	34259	1.979	0.417	0.0023	-0.0413	14.415
7.5	33871	2.006	0.444	0.0024	-0.0902	14.387
2.5	33161	2.014	0.476	0.0026	-0.0126	14.339
-2.5	32322	2.010	0.521	0.0029	-0.0944	14.310
-7.5	31938	1.986	0.513	0.0029	-0.0827	14.248
-12.5	32244	1.953	0.524	0.0029	-0.0453	14.225
-17.5	31957	1.894	0.497	0.0028	-0.0798	14.128
-22.5	30962	1.823	0.505	0.0029	-0.0914	14.034
-27.5	29832	1.720	0.542	0.0031	-0.0073	13.794
-32.5	28371	1.611	0.574	0.0034	-0.0581	13.582
-37.5	27334	1.493	0.607	0.0037	-0.0294	13.382
-42.5	25376	1.339	0.627	0.0039	0.0030	12.921
-47.5	24137	1.193	0.667	0.0043	0.0054	12.557
-52.5	24363	1.054	0.668	0.0043	0.0852	12.312
-57.5	23635	0.907	0.698	0.0045	0.1279	12.002
-62.5	21162	0.755	0.775	0.0053	0.0132	11.632
-67.5	15740	0.575	0.874	0.0070	-0.3354	10.695

Priemernú siderickú uhlovú rýchlosť  $\omega$  [°/deň] určujeme inverzne z rovnice (4). Ak pre naše výsledky použijeme obvyklý spôsob aproximácie podľa rovnice (1) dostaneme:

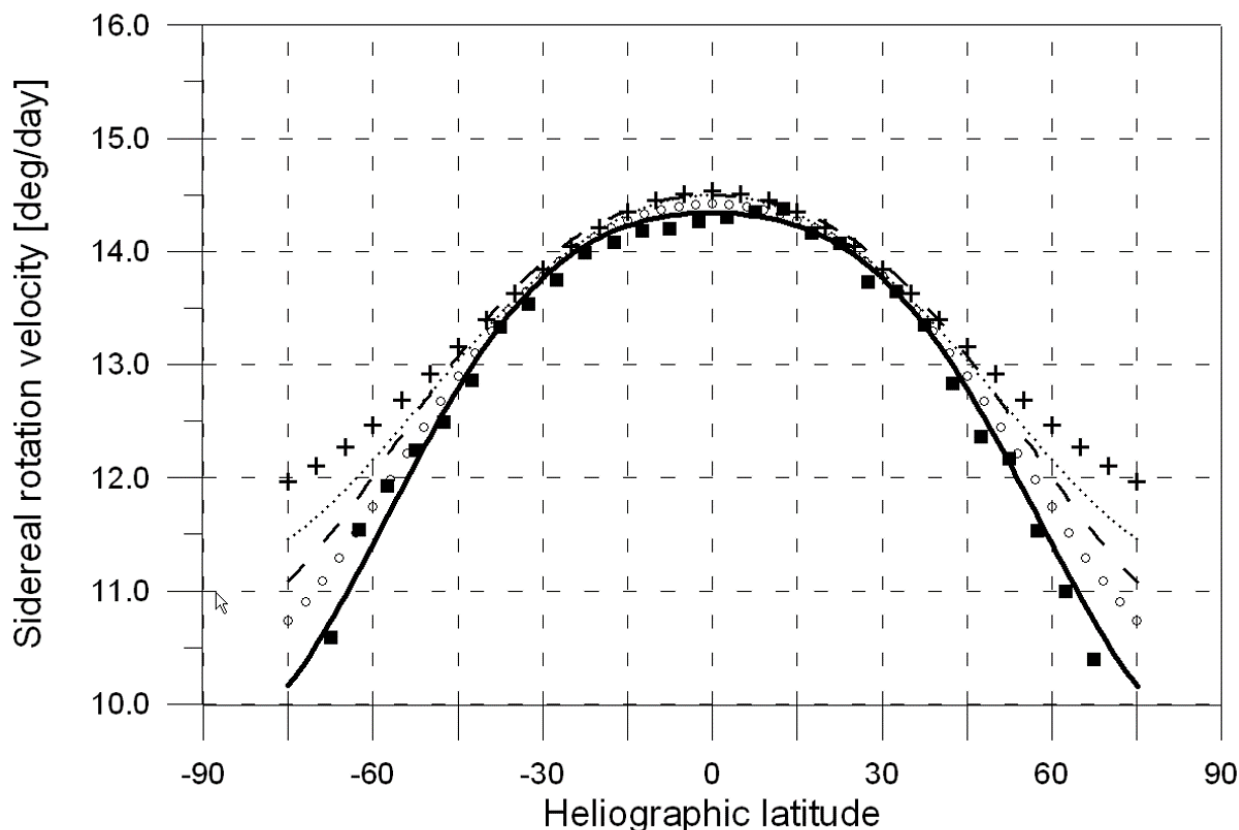
$$\omega = 14,339 - 1,527 \sin^2 b - 3,006 \sin^4 b \quad [^\circ/\text{deň}].$$

(7)

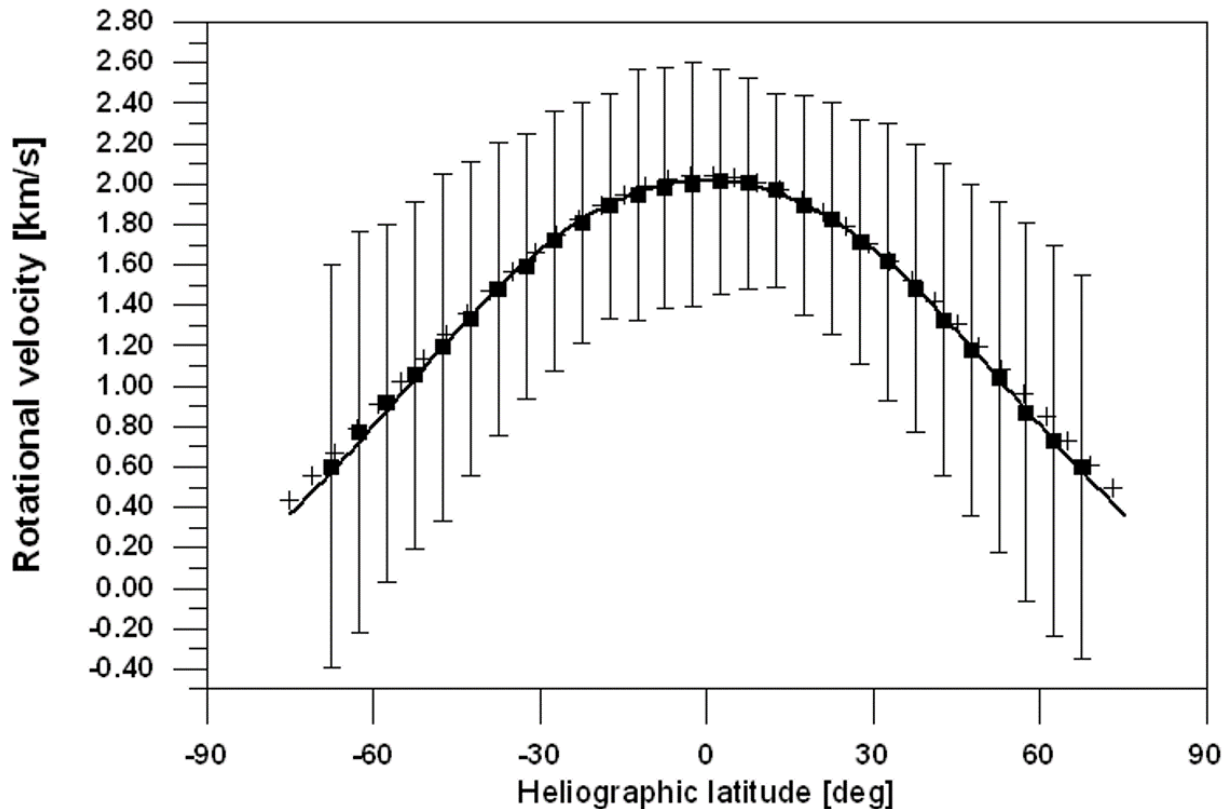
Z výsledkov prezentovaných v tabuľke č. 2 v práci Sudar et al. (2015) sme vybrali pre porovnanie s našimi parametrami aproximačného vzťahu diferenciálnej rotácie slnečnej koróny parametre tých autorov, ktorí sú uvedení v našej tabuľke 2.

Tabuľka 2. Výber parametrov A, B, C niektorých autorov pre porovnanie s našimi výsledkami.

	Parametre aproximačného vzťahu	Symbol na obr. 6	Traser; obdobie; autori
(1)	$A = 14.531 \pm 0.003$ ; $B = -2.75 \pm 0.05$	+++	slnečné škvrny; 1853 – 1996; Pulkkinen a Tuominen (1998)
(2)	$A = 14.499 \pm 0.006$ ; $B = -2.54 \pm 0.06$ ; $C = -0.77 \pm 0.09$	.....	jasné koronálne body; 1998 – 2006; Wöhl a kol. (2010)
(3)	$A = 14.495 \pm 0.06$ ; $B = -1.89 \pm 0.06$ ; $C = -1.89 \pm 0.26$	----	rovnakou metódou ako (2), v inej práci: Brajša a kol. (2004).
(4)	$A = 14.420 \pm 0.02$ ; $B = -2.00 \pm 0.13$ ; $C = -2.09 \pm 0.15$	□□□	magnetické štruktúry; 1975 – 1991; Komm a kol. (1993).
(5)	$A = 14.339 \pm 0.09$ ; $B = -1.527 \pm 0.10$ ; $C = -3.006 \pm 0.10$	—	naša práca; rok 2016



Obrázok 6. Priebehy rýchlosti rotácie v závislosti na héliografickej šírke podľa vyššie uvedených prác a z výsledku tejto práce. Štvorcikami sú označené priemery z meraní v päťstupňových sektoroch.



Obrázok 7. Priebeh obvodových (lineárnych) rýchlostí. Skutočné rozdiely podľa rôznych autorov nie sú tak veľké pri vysokých šírkach ako by sa zdalo z obr. 6. Najväčší rozdiel na obr. 6 je pri  $75^\circ$   $1,7^\circ/\text{deň}$ , čo však na obr. 7 odpovedá iba  $6 \text{ ms}^{-1}$ .

#### 4. ZÁVERY

**A)** Na základe výsledkov uvedených v tabuľke 1, 2 a na obrázku 6 môžeme potvrdiť, že slnečná koróna rotuje diferenciálne, spolu s fotosférou. Ak použijeme pre aproximáciu obvyklý spôsob podľa rovnice (1) dostaneme aproximačný vzťah (7), t.j. rovnicu s parametrami (5) z tabuľky 2. Ročný priemer siderickej rýchlosti rotácie na rovníku vychádza okolo  $14,30^\circ/\text{deň}$  ( $2,009 \text{ km/s}$ ), čo je o niečo menej ako uvádzajú práce založené na sledovaní traserov.

**B)** Disperzia hodnôt  $v$  je veľká. Je spôsobená chybami a vlastnou rýchlosťou štruktúr. V našom prípade, pri veľkom počte meraní môžeme z disperzie v odhadnúť vlastnú rýchlosť štruktúr. Priemer je na úrovni cca  $500 - 700 \text{ m/s}$  a je takmer nezávislý od heliografickej šírky ako vidíme z tabuľky – stĺpec  $\sigma v$  a obrázku 7. Extrémne hodnoty sú na úrovni cca  $10 \text{ km/s}$ . Priemer  $v$  bol získaný zo 100 riadkov a teda skutočné (t.j. pri rozlíšení okolo  $0,6''$ , čo je okolo  $350 \text{ km}$ ) stredné kvadratické odchýlky môžu byť desať krát väčšie.

**C)** Rozdelenie rýchlosti vo všetkých šírkových pásmach je asymetrické. Asymetriu charakterizuje koeficient  $\gamma$  podľa rovnice 7. Podľa tabuľky 2 je v rovníkových oblastiach asymetria záporná, v strednošírkových ( $35^\circ - 55^\circ$ ) kladná a v polárnych zase záporná. Dá sa to interpretovať tak, že malá časť žiariacej hmoty pri klad-

nej asymetrii prúdi v smere rotácie a pri zápornej asymetrii proti rotačnému pohybu.

**D)** Softvér použijeme pre hromadné spracovanie dát z prístroja AIA/SDO za celé obdobie pozorovania (2011 – 2017). Dá sa využiť aj pre obrázky v iných vlnových dĺžkach.

Koróna nie je jednotvárna, skladá sa z rôznych typov javov a štruktúr ako napr. koronálne diery, fibrily a filenty, jasné body, aktívne oblasti, atď. Pri našom spôsobe určenia uhlovej rýchlosti  $\omega$  získame jej akýsi priemer, pričom ak riadok pretína CBP, potom tento má dominantnú úlohu pre určenie  $\omega$  a nemohli by sme odpovedať na otázku, či plazma koróny v okolí CBP rotuje s odlišnou rýchlosťou. Riadky, ktoré pretínajú CBP sa však dajú ľahko identifikovať, preto môžeme výpočet  $\omega$  zopakovať zvlášť pre riadky, ktoré pretínajú CBP a zvlášť pre riadky bez príspevku CBP. To však bude cieľom budúcej práce.

#### Podakovanie

Vďaka patrí tímom SDO (NASA) a konzorcium AIA za údaje, ktoré boli použité v tejto práci. Táto práca bola čiastočne podporená mobilným projektom Slovensko-Portugalsko (APVV, Bratislava, SK-PT-2015-0004). Autori by chceli poďakovať aj ich asistentke p. E. Hodálovej, ktorá vykonala podstatnú časť sťahovania údajov.

## LITERATÚRA

- Brajša,R., Wöhl,H., Vršnak,B., Ruždjak,V., Clette,F., Hochedez,J.-F. and Roša,D.: (2004), A&A, **414**, 707.
- Komm, R. W., Howard, R. F., & Harvey, J. W. 1993, Solar Phys., **145**, 1.
- Lemen, J. R., Title, A. M., Akin, D. J., Boerner, P. F., Chou, C., Drake, J. F., Duncan, D. W. et al., Solar Phys., **275**, 17.
- Lorenc, M., Rybanský, M. a Dorotovič, I.: (2012), Solar Phys., **281**, 611.
- Newton,H.W. and Nunn,M.L.,(1951) Month. Not. Royal Astron. Soc., **111**, 413.
- Pesnell, W. D., Thompson, B. J., Chamberlin, P. C.: (2012), Solar Phys., **275**, 3.
- Pulkkinen, P. a Tuominen, I. (1998), A&A, **332**, 748.
- Sudar, D., Skokič, I., Brajša, R. and Saar, S.H.: (2015), A&A, **575**, A63.
- Wöhl, H., Brajša, R., Hanslmeier, A., & Gissot, S. F. 2010, A&A, **520**, A29.