

Dva režimy (módy) v rotácii slnečnej koróny

O.G. Badalyan, IZMIRAN, Troitsk, Rusko, badalyan @izmiran.troitsk.ru

J. Sýkora, Astronomický ústav SAV, Tatranská Lomnica, sykora @ta3.sk

Abstrakt

Jasnosť zelenej emisnej koronálnej čiary (Fe XIV 530,3 nm) sme použili ako tracer (indikátor) na určenie diferenciálnej rotácie slnečnej koróny. Podrobný výskum rotácie Slnka sa zdá byť kľúčovým pre pochopenie generácie magnetického poľa v slnečnej konvektívnej zóne a pre výklad cyklického vývoja slnečnej aktivity. Našu databázu intenzít zelenej emisnej koróny Fe XIV 530,3 nm, pokrývajúcu skoro šesť slnečných cyklov (1943-2001), sme podrobili "analýze spektrálnych zmien" (SVAN = Spectral Variation ANalysis). Predpoklad o existencii dvoch režimov koronálnej rotácie sa zdá byť veľmi vhodným, aby bolo možné vysvetliť obdržaný zákon diferenciálnej rotácie slnečnej koróny. Podčiarkujeme dobrú oporu nášho predpokladu v posledných zisteniach hélioseizmológie.

1. ÚVOD

Slnko nerotuje ako pevné teleso, naopak, uhlová rýchlosť jeho rotácie sa mení ako s héliografickou šírkou tak aj s hĺbkou v slnečnom telese. Je to preto, že interakcia veľkoškálovej konvekcie s rotáciou vedie k transportu uhlového momentu smerom k rovníku a teda k diferenciálnej rotácii s akceleráciou na rovníku Slnka.

V minulosti boli použité rôzne metódy na určenie zákona diferenciálnej rotácie – merania dopplerovských posuvov spektrálnych čiar, pozorovania driftov rôznych slnečných štruktúr (útvárov) ako "nosičov" rotácie a, samozrejme, hélioseizmické merania. V tomto krátkom príspevku nie sme schopní citovať a sumarizovať obrovské množstvo minulých výsledkov vzťahujúcich sa k určaniu rotácie rôznych prejavov slnečnej aktivity (i neaktivity), nachádzajúcich sa v rôznych vrstvách slnečnej atmosféry. Niektorí môžu byť prekvapení značnými rozdielmi v zistených rýchlostiach rotácie jednotlivých fenoménov, vedúcimi k zdanlivej koexistencii veľmi odlišných zákonov diferenciálnej rotácie. Napriek tomu, výsledky odvodené z rôznych štruktúr v slnečnej atmosfére treba vo všeobecnosti pokladať za správne a pravdivé, odrážajúce rôzne podmienky v rôzne hlbokých vrstvách pod povrchom Slnka, vrátane rôznych vplyvov lokálnych, veľkoškálových a globálnych slnečných magnetických polí na rotáciu Slnka.

Jasnosť zelenej koróny (ďalej len JZK), predstavujúca emisiu v "zakázanéj" spektrálnej čiare Fe

XIV 530,3 nm, bola použitá ako tracer slnečnej (koronálnej) rotácie aj v niektorých minulých prácach (Trellis, 1957; Antonucci a Svalgaard, 1974; Letfus a Sýkora, 1982; Sime a kol., 1989; Rybák, 1994; Sýkora, 1994). Často boli pozorované obdobia nespornej diferenciálnej rotácie striedajúce sa s obdobiami kvázi-rigidnej rotácie a aj možná existencia dvoch režimov koronálnej rotácie bola diskutovaná (Antonucci a Svalgaard, 1974; Sýkora, 1994). V každom prípade bolo zistené, že rotácia JZK je omnoho menej diferenciálna než je tomu u väčšiny iných fenoménov nachádzajúcich sa na povrchu Slnka (v jeho fotosfére a chromosfére). Okrem toho, diferenciálna rotácia koróny Slnka sa ukázala byť prakticky zanedbateľnou v héliografických šírkach nad $40^\circ - 50^\circ$. Stojí za zmienku, že celkom podobný výsledok publikoval Stenflo (1989) pre rotáciu veľkoškálového magnetického poľa.

Pripravili sme unikátnu fotometricky homogénnu databázu JZK, pokrývajúcu skoro šesť slnečných cyklov a majúcu priestorové rozlíšenie 5° v slnečnej šírke a jeden deň, t.j., asi 13° v slnečnej dĺžke. Sme toho názoru, že je to druhá časovo najdlhšia databáza medzi synoptickými indexami slnečnej aktivity. Okrem toho, na rozdiel od indexu slnečných škvŕn, pomocou našej databázy môžu byť veľkoškálové a dlhodobé rozloženie a evolúcia slnečnej aktivity študované oveľa podrobnejšie – vo vzťahu k jednotlivým poglobuliam Slnka, v ľubovoľne zvolených šírkových zónach, ba dokonca, v jednotlivých héliografických šírkach (s krokom 5°). Preto, na rozdiel od fotosférických tracerov

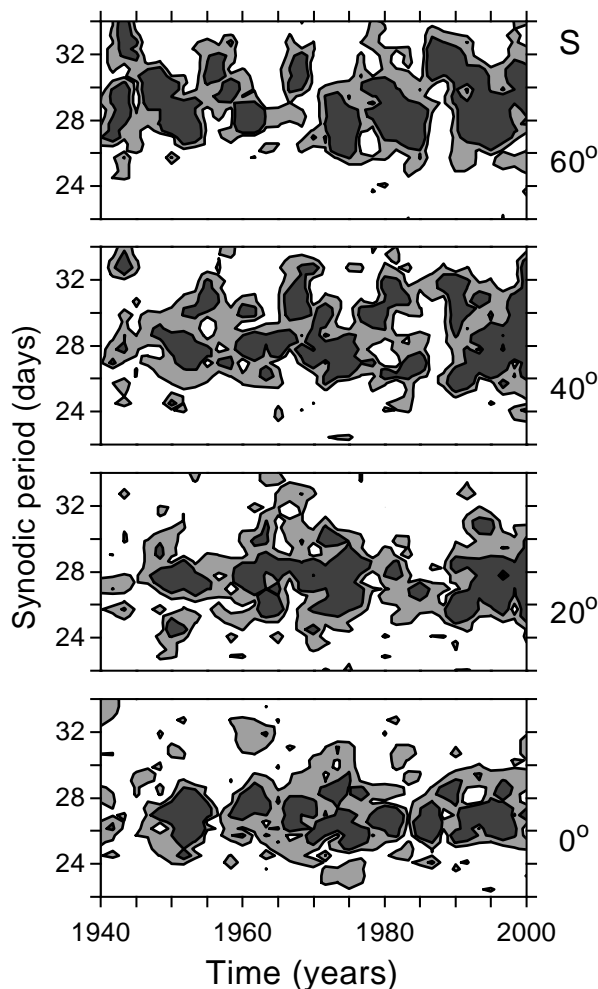
(slnecných škvŕn, fakulových polí, a pod.), máme k dispozícii prakticky kontinuálnu maticu číselných údajov, ktorá umožňuje, aby sme slnečnú (koronálnu) rotáciu mohli študovať v celom intervale heliografických šírok.

2. DIFERENCIÁLNA ROTÁCIA SLNEČNEJ KORÓNY

Pri našom skúmaní časovo-šírkovej závislosti koronálnej rotácie sme použili metódu SVAN. Táto metóda v skutočnosti predstavuje postupné použitie Fourierovskej analýzy v kĺzajúcom sa okne určitej časovej dĺžky. Vo zvolenom okne je Fourierovská analýza aplikovaná na denné JZK data, potom je okno posunuté o určitý časový interval a procedúra sa postupne opakuje cez celú databázu. Následne sú údaje získané zo súboru Fourierovských analýz softvérom spojené do finálnej mapy amplitúd v súradniciach perióda rotácie versus čas. Pochopiteľne, takéto SVAN-diagramy sú skonštruované pre každú heliografickú šírku zvlášť. V tejto práci sme po úvahách a v záujme registrácie väčšieho počtu periód zvolili okno o dĺžke 6 rokov a pre kĺzanie bol zvolený krok 81 dní. Celkom sme tak analýzu prevádzali v 258 oknách pozdĺž celej databázy (1943–2001). Vo vnútri každého okna bola prevedená normalizácia delením každého čísla na 2σ (σ predstavuje strednú kvadratickú odchylku). V priebehu výpočtov sme sa obmedzili na amplitúdy v rozsahu periód 21,9–36,5 dní.

Ako sme spomenuli, SVAN bola prevedená pre každú šírku (s krokom 5°) oddelene. Obdržali sme tak 35 SVAN-diagramov v rozsahu šírok $\pm 85^\circ$, keď výpočet pre oba slnečné póly by bol nezmyslom. Keď sme navyše vzali do úvahy objektívne narastajúce chyby meraní vo vysokých heliografických šírkach, znížili sme hranice nášho skúmania na $\pm 75^\circ$ šírky. Na obr. 1 sú SVAN-diagramy pre štyri rôzne šírky južnej pologule. Tmavé oblasti indikujú periódy s najvyššími amplitúdami, zatiaľ čo, biele plochy označujú periódy s najnižšími amplitúdami. Z obrázka je zrejmé, že ak ideme k vyšším šírkam, tak sa pásmo periód s najvyššími amplitúdami posúva k dlhším periódam rotácie a súčasne sa stáva širším. Toto implikuje spomaľovanie koronálnej rotácie s narastajúcou šírkou. V tretej kapitole sa zmienime aj o príčine rozšírenia zóny vysokých amplitúd.

Hodnotu periódy rotácie približne odpovedajúcu stredu pásu s najvyššími amplitúdami v každej mape perióda–čas možno považovať za periódu rotácie v danej šírke. Presné periódy rotácie sme určili nasledovne. V každom z 258 SVAN okien bola softvérovo vyhledaná perióda rotácie s maximálnou amplitúdou a priemer z 258 hodnôt bol akceptovaný ako perióda koronálnej rotácie v danej šírke. Príklad takého určenia periódy rotácie prezentujeme na obr. 2 (horný panel), kde jednotlivé body znamenajú 258



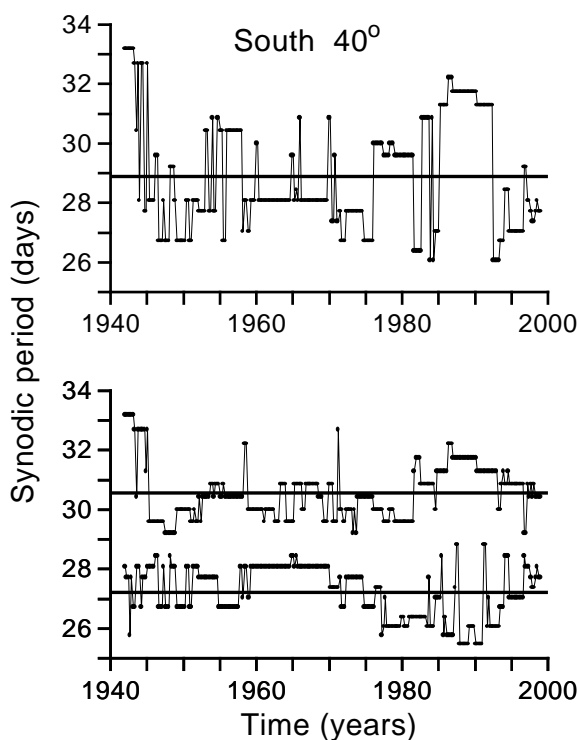
Obrázok 1. Príklady SVAN-diagramov pre štyri šírky južnej (S) pologule. Tmavé tieňovanie indikuje periódy s najvyššími amplitúdami a biele oblasti označujú periódy s najnižšími amplitúdami.

periód nájdených v kĺzajúcom sa SVAN okne a horizontálna čiara predstavuje strednú hodnotu periódy rotácie v odpovedajúcej šírke (v tomto prípade je to 29 dní v šírke 40° južnej pologule).

Následne bolo možné z celej série periód rotácie nájdených pre pre rôzne heliografické šírky odvodiť výslednú závislosť periódy koronálnej rotácie na šírke (viď obr. 3, horný panel). V rámci presnosti, severná a južná pologula Slnka ukazujú identickú závislosť. Periódy sú blízke 27 dňom na nízkych šírkach, potom, od 15° šírky, perióda narastá (t.j., rotačná rýchlosť klesá) a postupne dosahuje 29.2 dňa. Nad $\sim 45^\circ - 50^\circ$ rýchlosť koronálnej rotácie zostáva viacmenej konštantnou.

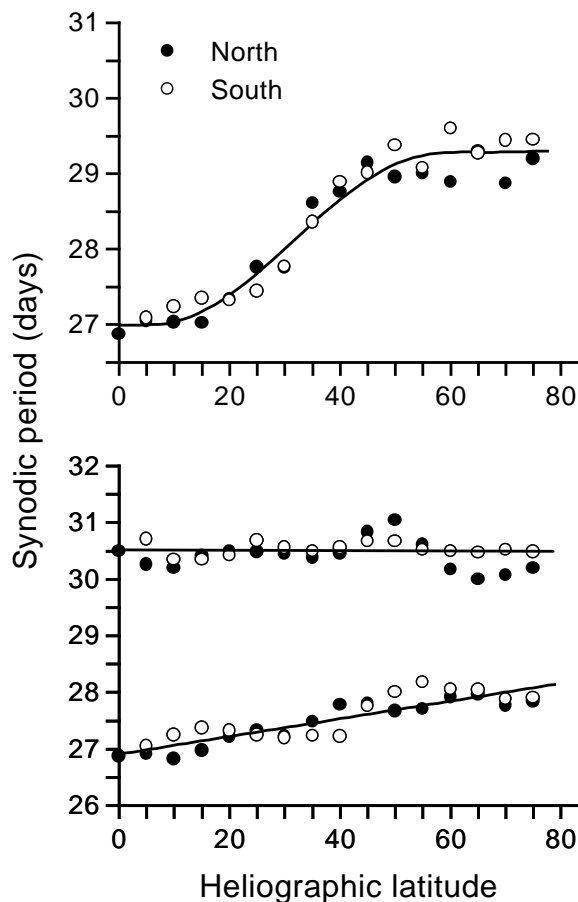
3. DVA REŽIMY KORONÁLNEJ ROTÁCIE

Detailné skúmanie celej obdržanej série máp perióda–čas odhalilo, že pre šírky nad 20° sa pás najvyšších amplitúd, spolu s rozširovaním, štiepi



Obrázok 2. Príklad určenia periódy koronálnej rotácie pre 40° južnej pologule (horný panel). Jednotlivé body odpovedajú periódam s maximálnou amplitúdou nájdeným v každom z 258 SVAN okien. Plná horizontálna čiara predstavuje strednú hodnotu všetkých takých periód. Dolný panel predstavuje príklad určenia dvoch režimov (periód) koronálnej rotácie pre tú istú šírku. V tomto prípade dve horizontálne čiary predstavujú stredné hodnoty z dvoch sérií periód získaných pre tých istých 40° južnej šírky postupom popísaným v texte.

na dva sekundárne pásy. Toto evokuje myšlienku vysvetliť pozorovanú koronálnu rotáciu kombináciou dvoch režimov rotácie, ktorých vstup (prínos) do finálnej závislosti rotácie od šírky je rôzny práve v závislosti od héliografickej šírky. Taká možnosť sa vynára aj z pohľadu na horný panel obr. 3. Možno si totiž predstaviť, že na nízkych šírkach dominuje rýchly režim, a naopak, na vysokých šírkach dominuje pomalý režim rotácie. Súčasne, pre stredné šírky je efektívnou premenlivá kombinácia oboch režimov. Okrem toho, mapy na obr. 1 ukazujú, že striedavo je na danej šírke dominantným jeden alebo druhý režim rotácie (viď relokáciu najtmavších oblastí z dlhších ku kratším periódam, a naopak). Podobnú vec vidno aj na hornom paneli obr. 2, kde v dvoch susedných oknách (odpovedajúcich dvom susedným bodom na obrázku) môže dôjsť k náhlej zmene periódy o 4-5 dní. Porovnanie obr. 2 s obr. 1 naznačuje, že také zmeny rotačnej periódy, menovite ak trvajú dlhší čas, sú pravdepodobne reálne a možno ich interpretovať ako prechod k dominancii jedného alebo druhého



Obrázok 3. Priebeh koronálnej rotácie s héliografickou šírkou (horný panel). Plné krúžky sú pre severnú pologulu a otvorené krúžky pre južnú pologulu Slnka. Na dolnom paneli je tá istá závislosť pre dva predpokladané režimy rotácie.

režimu v danej šírke.

Je jasné, že obecné formulovaná úloha rozložiť koronálnu rotáciu do dvoch režimov je nejednoznačná, nedostatočne definovaná. Aby sa dalo také rozloženie uskutočniť, treba stanoviť nejakú dodatočnú podmienku. Uvážiac štrukturalizmus celej získanej série máp perióda-čas (takých ako sú na obr. 1), podarilo sa nám stanoviť takú podmienku. V týchto mapách (a tiež v grafoch ako na hornom paneli obr. 2) možno vidieť, že k štiepeniu pásu najvyšších amplitúd dochádza približne na úrovni 29-dňovej periódy. Zdá sa, že pre rýchly režim sú charakteristické periódy okolo 27,5 dní a periódy pomalého režimu sa koncentrujú v okolí 30-31 dní.

A tak, aby sme našli dva režimy koronálnej rotácie, urobili sme predpoklad, že jeden režim rotuje s periódou menšou ako 29 dní a druhý s periódou väčšou ako 29 dní. Pri tejto podmienke (úloha sa stala dostatočne definovanou) všetky periódy v každom SVAN okne boli rozdelené na dve skupiny, na periódy vyššie a nižšie ako 29 dní. V oboch

skupinách zvlášť boli opätovne vyhladané periódy s maximálnou amplitúdou. Dostali sme tak dve nové série periód, pričom každá obsahovala zasa 258 hodnôt. V rámci každej z dvoch skupín bola opäť vypočítaná stredná perióda a táto je považovaná za periódu rotácie daného režimu v danej hélio-šírke. Príklad práve popísaného určenia dvoch režimov koronálnej rotácie je prezentovaný na dolnom paneli obr. 2. Je zaujímavé, že lomené čiary predstavujúce periódy rotácie najdené v individuálnych SVAN oknách sa navzájom prakticky nedotýkajú. Toto, do značnej miery, potvrdzuje správnosť nášho predpokladu, že hodnota 29 dní dostatočne dobre oddeľuje dva režimy koronálnej rotácie.

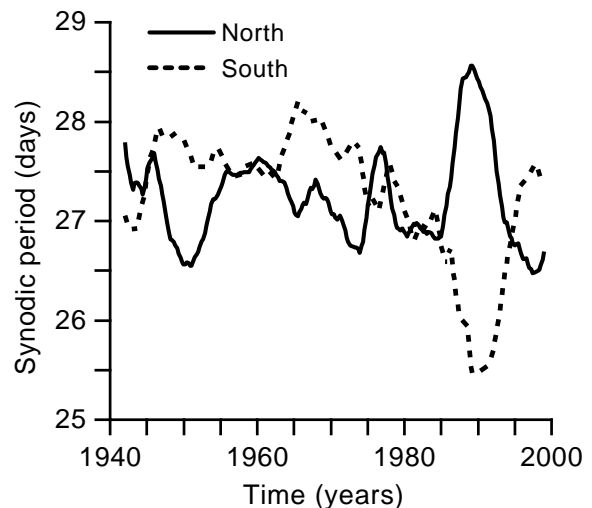
Periódou dvoch režimov koronálnej rotácie, získané vyššie popísaným spôsobom sú znázornené na dolnom paneli obr. 3 v závislosti na hélio-šírke. Rýchly režim je charakteristický periódou 27 dní na nízkych šírkach a je mierne diferenciálny - na vyšších šírkach jeho perióda narastá do 28 dní. Pomalý režim vykazuje periódu 30,5 dní a je konštantný so šírkou. A zasa, v rámci presnosti, severná i južná pologula vykazujú prakticky rovnaké závislosti periód na hélio-šírke.

Výsledky predstavené na oboch paneloch obr. 3 dovoľujú určiť relatívny príspevok oboch režimov k celkovej siderickej rotačnej rýchlosti slnečnej koróny. Nech príspevok rýchleho režimu je D , potom príspevok pomalého režimu bude $1 - D$. Pozorovanú uhlovú siderickú rotačnú rýchlosť koróny ω (odvodenú z horného panelu obr. 3) možno vyjadriť ako $\omega = \omega_1 \times D + \omega_2 \times (1 - D)$, kde ω_1 a ω_2 sú uhlové siderické rotačné rýchlosti rýchleho a pomalého režimu (odvodené z dolného panelu obr. 3). Pochopiteľne, z vyššie uvedenej rovnice možno určiť D -hodnoty v závislosti na hélio-šírke. Výpočet ukazuje, že na nízkych šírkach koronálna rotácia pochádza výhradne z rýchleho režimu. S narastajúcou šírkou príspevok rýchleho režimu postupne klesá a, pochopiteľne, príspevok pomalého režimu narastá. Napriek tomu, aj vo vysokých šírkach príspevok rýchleho režimu zostáva pomerne vysoký - asi 40%. V prvom priblížení by percentuálny príspevok rýchleho a pomalého režimu bolo možné chápať ako percentuálny pomer oblastí "okupovaných" koronálnymi štruktúrami rotujúcimi rýchlejšie a pomalšie.

4. VZŤAH K HÉLIOSEIZMICKÝM VÝSLEDKOM

Hélioseizmológia dosiahla v posledných rokoch veľké úspechy. Sofistikované experimenty umožnili, predovšetkým, popísať rotačnú rýchlosť vo vnútri Slnka v závislosti od hĺbky a hélio-šírky. Sumarizujúci prehľad ilustrujúci dosiahnutý pokrok v tejto oblasti publikoval, napríklad, Kosovichev (2003).

Porovnajme nami najdené koronálne rotačné rýchlosti s hélioseizmickými výsledkami. Našli



Obrázok 4. Zmeny rýchleho režimu na severnej pologuli (plná čiara) a južnej pologuli (prerušovaná čiara) v šírkevej zóne 15° - 35°. Zistený proti-fázový priebeh koronálnej rotačnej rýchlosti na oboch pologuliach môže byť dôsledkom prítomnosti torzných oscilácií na Slnku.

sme, že synodická perióda v rovníkovej zóne je v prípade rýchleho režimu 27 dní. Toto odpovedá rotačnej rýchlosti 13,333 uhlových stupňov za deň. Potom, uhlová siderická rotačná rýchlosť je $\omega_1 = 14,319$ stupňov za deň čo implikuje siderickú periódu rotácie 25,14 dní a to reprezentuje frekvenciu 460 nHz. Táto hodnota veľmi dobre súhlasí s helioseizmickou rotačnou rýchlosťou (frekvenciou) nájdenou pre rovníkovú povrchovú oblasť a ďalej až do hĺbky tzv. tachocline vrstvy. Analogicky, naša 30,5 dňová perióda rotácie pomalého režimu odpovedá uhlovej rotačnej rýchlosti 12,789 stupňov za deň čo implikuje siderickú periódu rotácie 28,15 dní predstavujúcu frekvenciu 410 nHz. Táto hodnota súhlasí s hélioseizmickou povrchovou rotáciou v šírkach 45° - 50° a rotáciou nájdenou na spodnej hranici konvektívnej zóny v uvedených šírkach a v pri-polárnych oblastiach.

Zdá sa teda, že diferenciálna rotácia slnečnej koróny veľmi dobre odráža rotáciu Slnka v jeho vnútorných vrstvách. Rotačná rýchlosť zo slnečnej konvektívnej zóny preniká k povrchu a, súčasne, dochádza k mixovaniu oblastí pohybujúcich sa rôznymi rýchlosťami, pričom sa formuje konečný obraz rotačnej rýchlosti slnečnej koróny. Možno sa domnievať, že aktívne koronálne oblasti situované v nízkych šírkach sú v rozhodujúcej miere "riadené" magnetickými poľami zdroj ktorých sa nachádza v podfotosférických vrstvách, zatiaľ čo slnečná koróna vo vyšších šírkach je ovplyvňovaná hlavne globálnymi veľkoškálovými poľami ukotvenými v blízkosti tachocline vrstvy.

Jeden zo zaujímavých fenoménov na Slnku predstavujú tzv. torzné oscilácie. Získané údaje o

koronálnej rotácii dovoľujú prínajmenšom pokúsiť sa nájsť indikáciu takých oscilácií. Urobili sme časové priebehy rotačnej rýchlosti rýchleho režimu pre šírkovú zónu $15^\circ - 30^\circ$ (v ktorej sa zmeny rotačnej rýchlosti ukázali byť najmarkantnejšími) osobitne pre severnú a južnú pologuľu Slnka. Stredné hodnoty periódy rotácie boli počítané pre uvedenú zónu na každej pologuľi v každom z 258 SVAN okien a 13-bodové vyhladenie bolo aplikované na získané údaje (t.j., asi ročné vyhladenie bolo vykonané). Finálny výsledok je prezentovaný na obr. 4. Evidentný je zreteľný rozdiel v rotácii oboch slnečných pologúľ. Porovnanie oboch kriviek na obr. 4 naznačuje, akoby zmeny rotácie na oboch pologuliach boli v proti-fáze. Podľa našej myšlienky takéto správanie sa koronálnej rotačnej rýchlosti môže svedčiť o prítomnosti torzných oscilácií na Slnku, menovite v jeho koróne.

5. ZÁVERY

Našu vlastnú databázu jasnosti zelenej koronálnej čiary Fe XIV 530.3 nm, pokrývajúcu skoro šesť slnečných cyklov (1943-2001), sme skúmali metódou Spectral Variation Analysis (SVAN) s cieľom odvodiť parametre diferenciálnej rotácie slnečnej koróny. Získali sme nasledovné výsledky:

(a) Stredná (t.j., spriemerovaná cez celú databázu) perióda rotácie narastá od 27 dní na slnečnom rovníku do o niečo viac ako 29 dní na šírkach $\pm 40^\circ$, pričom vykazuje značne menšiu diferencialitu než je tomu v prípade fotosférických prejavov slnečnej aktivity.

(b) Diferencialita koronálnej rotácie prakticky mizne v šírkach $\pm 40^\circ$. Vo vyšších šírkach rotácia ma rigidný charakter s periódou rotácie asi 29,5 dní v polárnych oblastiach.

(c) Detailnejšia analýza odhalila, že rotáciu slnečnej koróny si možno dobre predstaviť ako kombináciu dvoch režimov rotácie, pričom rýchlejší režim je charakteristický periódou rotácie 27 dní, ktorá mierne narastá smerom k vyšším šírkam a pre pomalší režim je typická rotácia s periódou 30,5 dní. Tieto dva režimy rotácie dobre súhlasia s najnovšími výsledkami helioseizmológie. Pozorovaná výsledná závislosť koronálnej rotácie na slnečnej šírke je tak zrejmou kombináciou dvoch uvedených režimov.

(d) Zdá sa, že časové zmeny rýchlejšieho režimu rotácie indikujú prítomnosť torzných oscilácií v koróne. Našli sme, že v rokoch 1945-1955 a 1964-1975 severná pologuľa rotovala rýchlejšie (perióda rotácie bola menšia), zatiaľ čo v rokoch 1985-1995 bola v rotačnej rýchlosti dominantnou južná pologuľa Slnka.

POĎAKOVANIE

Táto práca bola čiastočne podporená Grantom č. 02-02-16199 Ruského Fondu Základného Výskumu a

VEGA Grantom č. 02/4013/04 Slovenskej Akadémie Vied.

LITERATÚRA

- Antonucci, E., Svalgaard, L., 1974, *Solar Phys.* 34, 3
 Kosovichev, A.G., 2003, in "Solar Variability as an Input to the Earth's Environment" (Proc. of the International Solar Cycle Studies Symposium 2003, ed. A. Wilson, ESA SP-535, 795
 Letfus, V., Sýkora, J., 1982, "Atlas of the Green Corona Synoptic Charts for Period 1947-1976", Veda, Bratislava
 Rybák, J., 1994, *Solar Phys.* 152, 161
 Sime, D.G., Fisher, R.R., Altrrock, R.C., 1989, *Astrophys. J.* 336, 454
 Stenflo, J.O., 1989, *Astron. Astrophys.* 210, 403
 Sýkora, J., 1994, *Adv. Space Res.* 14, (4)73
 Trellis, M., 1957, *Ann. d'Astrophysique, Suppl.* No. 5, 1