

Koronálny multikanálový polarimeter pre observatórium Lomnický štít

*J. Rybák, J. Ambróz, P. Gömöry, M. Kozák, A. Kučera, AsÚ SAV, Tatranská Lomnica
S. Tomczyk, S. Sewell, R. Summers, L. Sutherland, A. Watt, HAO/NCAR, Boulder, USA*

Abstrakt

Príspevok predstavuje postup prípravy Koronálneho multikanálového polarimetra (CoMP-S) pre observatórium Lomnický štít Astronomického ústavu SAV. Dizajn prístroja vychádza zo skúseností získaných v posledných rokoch s prístrojom CoMP (High Altitude Observatory/NCAR, Boulder, USA). Jadrom prístroja CoMP-S sú jeho dve hlavné optické časti - Lyotov laditeľný filter a FLC polarimeter. CoMP-S je pripravovaný špeciálne pre jeden z 20cm Zeiss koronagrafov observatória Lomnický štít kde bude nainštalovaný v roku 2011. Prístroj CoMP-S sa bude odlišovať od svojho predchodcu CoMP vo viacerých aspektoch. Najvýznamnejším rozdielom bude že CoMP-S bude môcť pozorovať koronálne a chromosférické emisné čiary v rozsahu vlnových dĺžok od 530 do 1083 nm. Táto vlastnosť bude dosiahnutá použitím superachromatických vlnových doštičiek a dichroických polarizátorov s širokým vlnovým rozsahom. Ako retardéry budú v prístroji CoMP-S použité ako namiesto nematických tekutých kryštálov nové tekuté kryštály SWIFT firmy Meadowlark Optics čo podstatne skráti proces merania. Tieto feroelektrické tekuté kryštály poskytnú meranie plného Stokesovho vektora so skoro optimálnou polarizáciou v celom vlnovom rozsahu prístroja. Nedávno vyvinuté sCMOS kamery majú poskytnúť difrakčne limitové rozlíšenie pozorovaní so zorným poľom 860x680 oblúkových sekúnd a kadenciou 30 snímok za sekundu. Prístroj bude používaný na observatóriu Lomnický štít Astronomického ústavu SAV hlavne na spektropolarimetrii protuberancií a koronálnych slučiek aktívnych oblastí na Slnku.

1. ÚVOD

Na vrchole Lomnického štítu (2635 m n.m.) je od roku 1964 v prevádzke astronomické observatórium AsÚ SAV. Cieľom astronomického observatória je vykonávanie pravidelných patrolných a špeciálnych pozorovaní slnečnej koróny a protuberancií pomocou koronagrafov (Lexa, 1963) a ich prídavných zariadení (Mínavjeh a Rybanský, 1991). Tieto pozorovania viedli nielen k vytvoreniu dlhodobého Homogénneho radu pozorovaní zelenej koronálnej čiary (Rybanský a Rušin, 1992) a zavedeniu „koronálneho indexu“ zelenej koronálnej čiary (Rybanský a kol., 2005) ale i napríklad k astrofyzikálnym výsledkom dokazujúcich prítomnosť oscilácií v slnečnej koróne (Mínavjeh a kol., 2003). Počas viac ako štyroch desaťročí pozorovaní boli pozorovacie prístroje a postupy inovované a vylepšované v rámci možností AsÚ.

V roku 2008 sa otvorila možnosť výrazného vylepšenia pozorovacích prístrojov tohoto observatória zo štrukturálnych fondov EÚ na Slovensku pre podporu vedu a výskumu. AsÚ SAV v partnerstve s ÚeF SAV a PrF UPJŠ preto pripravil projekt Centra excelentnosti s názvom „Centrum kozmických výskumov: vplyvy kozmického počasia“ ktorého výraznou časťou v prvej etape bol plán vylepšenia prístrojového vybavenia

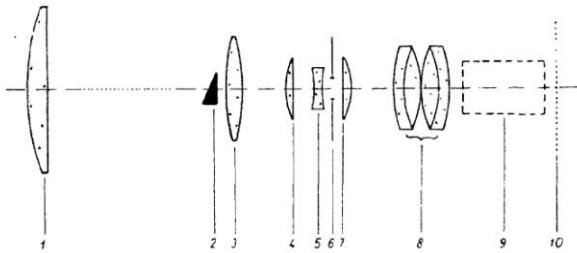
observatória Lomnický štít pre pozorovanie protuberancií a slnečnej koróny. Schválenie vytvorenia a financovania tohoto centra umožnilo objednanie nového prídavného prístroja ku koronagrafu (obr. 1) pre pozorovania emisných čiar protuberancií a slnečnej koróny s názvom „koronálny multipolarimeter“ (CoMP-S). Príspevok obsahuje základné informácie o tomto prístroji a o postupe jeho prípravy.



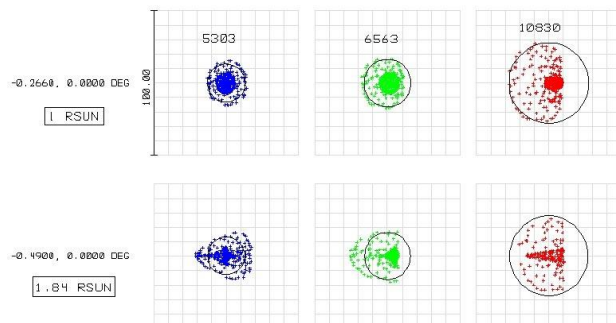
Obr.1 Koronografy observatória Lomnický štít AsÚ SAV.

2. KORONOGRAF

Prístroj CoMP-S bude upevnený ku koncovej časti pravého koronografu na observatóriu. Tento ďalekohľad (Lexa, 1963) bol vyrobený firmou Car Zeiss Jena na základe konceptu vyvinutého B. Lyotom (Lyot, 1932, 1939). Primárny objektív je tvorený jednou šošovkou s užitočnou apertúrou 19,5 cm (sklo BK7, $R_1=1,71$ m, $R_2=17,0$ m) s ohniskovou vzdialenosťou 3 m (obr. 2). Vďaka pohybu objektívu pozdĺž optickej osi v rozsahu 16 cm je možné pozorovať v rozsahu vlnových dĺžok 400-1100 nm. Sada umelých mesiačikov umožňuje odraz obrazu slnečného disku mimo koronografu v závislosti od aktuálneho uhlového priemeru Slnka a vlnovej dĺžky pozorovania. Sekundárna optická sústava koronografu pozostáva z poľnej šošovky, sústavy 3 korekčných šošoviek a Lyotovej clony. Táto clona, realizovaná pomocou nastavovateľnej irisovej clony, umožňuje efektívne potlačenie rozptýleného svetla v koronografe ktoré vzniká na uchytaní primárneho objektívu. Poslednou časťou optickej sústavy je zobrazovací objektív vytvárajúci vo výslednej ohniskovej rovine obraz primárnej ohniskovej roviny. Optická sústava koronografu je difrakčne limitovaná (obr. 3) pričom sekundárnu časť sústavy a zobrazovací



Obr. 2 Optická schéma koronografu: 1 - primárny objektív, 2 - umelý mesiačik, 3 - poľná šošovka, 4,5,7 - korekčné šošovky, 6 - Lyotova clona, 8 - zobrazovací objektív, 9 - priestor pre prídavné optické prvky, 10 - ohnisková rovina (Lexa, 1963).



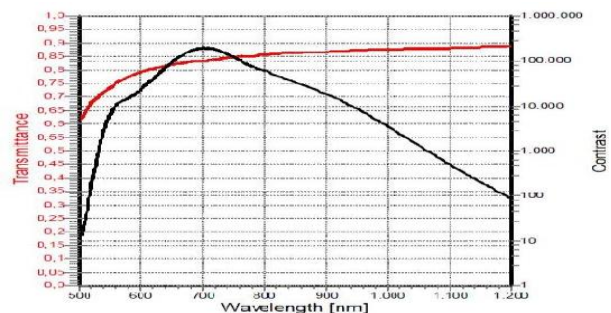
Obr. 3 Rozptylový diagram optickej sústavy koronografu. Horný rad grafov zodpovedá polohe na okraji slnečného disku a dolný rad polohe vzdialenej 0,84 polomeru Slnka nad okrajom disku. Jednotlivé stĺpce zobrazujú výsledok numerického vypočítu šírenia svetla optikou pre vlnové dĺžky 530, 656 a 1083 nm. Kruhy znázorňujú teoretické rozlíšenie pre danú polohu a vlnovú dĺžku spôsobené difrakciou na apertúre primárneho objektívu.

objektív nevyžadujú žiadnu zmenu pri pozorovaniach v celom uvedenom rozsahu vlnových dĺžok. Priestorová škála obrazu je približne $50''/\text{mm}$ a teoretické priestorové rozlíšenie je v intervale od $0,7''$ (530 nm) do $1,4''$ (1080 nm). Na dôvažok je možné mechanicky otáčať prístroje koncovej časti okolo optickej osi koronografu v celom rozsahu pozičných uhlov.

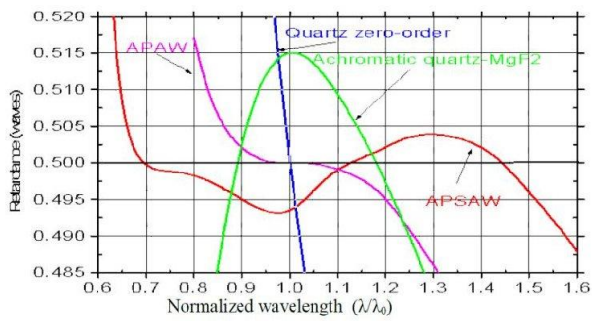
3. PRÍSTROJE CoMP a CoMP-S

Predchodcom pripravovaného prístroja CoMP-S je prístroj CoMP (Tomczyk a kol., 2008), používaný nateraz na observatóriu Maona Loa (Havajské ostrovy, USA). Prístroj patriaci inštitúcii High Altitude Observatory (NCAR, Boudler, USA) pred časom umožnil objavenie existencie Alfénových vln v slučkách slnečnej koróny (Tomczyk a kol., 2007). Objav bol umožnený vďaka unikátnej vlastnosti prístroja ktorý poskytuje s dostatočnou kadenciou, presnosťou a spektrálnym rozlíšením meranie intenzity infračervenej čiary Fe XIII 1074 nm i v jej krídlach. Toto je umožnené vďaka použitiu Lyotovho polarizačno-interferenčného úzkopásmového filtra s pásmom priepustnosti širokým len ~ 0.1 nm, ktorý je jadrom prístroja.

Pokrok vo vývoji optických polarizačných materiálov v posledných rokoch ale umožňuje podstatné technické vylepšenie pôvodného konceptu prístroja CoMP. Kľúčovým je dostupnosť nového polarizačného dvojlomého optického materiálu VIS700BC4 firmy CODIXX, ktorý má viac ako 70% priepustnosť v intervale vlnových dĺžok 530-1100 nm pri vysokom kontraste (obr. 4). Z toho materiálu budú vyrobené jednotlivé optické bloky Lyotovho filtra pre prístroj CoMP-S. Druhým materiálom, ktorý dovoľuje výrazné zlepšenia parametrov prístroja je superachromatický materiál APSAW firmy ASTROPRIBOR z ktorého budú vyrobené $\lambda/2$ polarizačné doštičky. Doštičky z tohoto materiálu poskytujú skoro optimálnu polarizáciu pre rozsah 0.7 - 1.5 násobku nominálnej vlnovej dĺžky (obr. 5). Táto ich vlastnosť umožní optimálnu analýzu polarizačného signálu v celom spomínanom rozsahu vlnových dĺžok použitím jediného optického prvku pripraveného z tohoto materiálu.



Obr. 4 Graf závislosti priepustnosti a kontrastu polarizačného dvojlomého optického materiálu VIS700BC4 firmy CODIXX na vlnovej dĺžke prechádzajúceho svetla.

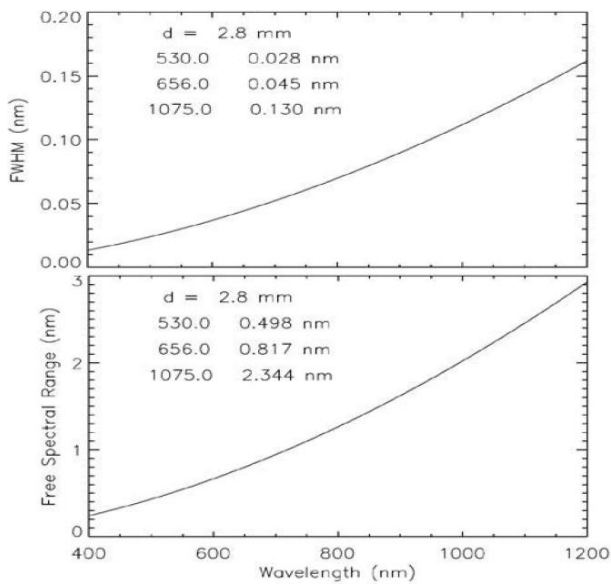


Obr. 5 Graf závislosti retardancie $\lambda/2$ polarizačných doštičiek vyrobených z rôznych druhov polarizačných materiálov. Materiál APSAW poskytuje dostatočnú hodnotu retardancie pre rozsah 0.7- 1.5 násobku nominálnej vlnovej dĺžky.

4. CoMP-S A JEHO VLASTNOSTI

Novopripravovaný prístroj CoMP-S bude pozostávať z 5 základných častí: mechanického interfejsu, bloku samotného prístroja, detektivej časti, elektrickej a optovláknovej kabeláže, bloku riadiacej elektroniky a ovládacej a záznamovej výpočtovej techniky. Prvé 3 časti budú upevnené na konci koronografu, blok riadiacej elektroniky bude na nohe montáže koronografu a výpočtová technika zas v suteréne observatória. Kabeláž prepojí tieto časti navzájom.

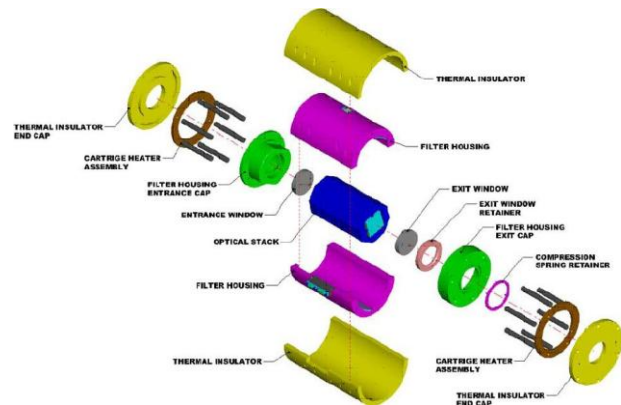
Jadrom prístroja bude Lyotov polarizačno-interferenčný úzkopásmový filter. Filter bude pozostávať zo 4 blokov dvojlomného materiálu pričom každý bude predelený $\lambda/2$ doštičkou, ktoré umožnia veľký priestorový uhol zorného poľa. Priemer blokov bude 28 mm. Šírka pásma priepustnosti a voľný spektrálny inter-



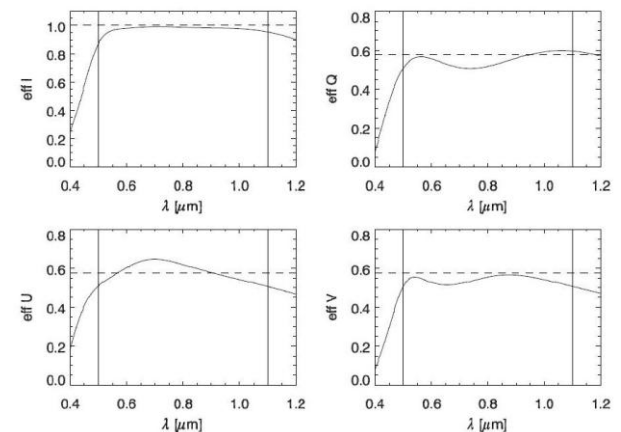
Obr. 6 Závislosti šírky pásma priepustnosti Lyotovho filtra (horný graf) a voľného spektrálneho intervalu (dolný graf) na vlnovej dĺžke. X-os: vlnová dĺžka (nm), y-os: plná šírka pásma priepustnosti filtra (nm) a voľný spektrálny interval filtra (nm). Hodnota d označuje hrúbku najužšieho elementu Lyotovho filtra.

val filtra budú dosahovať špičkové parametre keď šírka pásma bude len zlomkom typickej šírky emisnej spektrálnej čiary koróny a pomer voľného intervalu a šírky pásma bude približne 20 (obr. 6).

Filter bude teplotne stabilizovaný s presnosťou $\pm 0,005$ stupňa na teplotu 30 stupňov Celsia (obr. 7). Nastavenie pásma priepustnosti vo vlnových dĺžke bude zabezpečované LCD kryštalmi umiestnenými v tele filtra. Okrem toho bude v optickej ceste včlenený i modul s LCD polarizačnými filtermi SWIFT firmy Meadowlark Optics ktoré zabezpečia analýzu polarizovaného svetla tak aby bolo možné merať sekvenčne všetky zložky Stokesovho vektora. Pre meranie zložiek Stokesovho vektora bude použitý rovnaký prístup aký bol úspešne vyvinutý a aplikovaný v prístroji Prominence Magnetometer - ProMag (Elmore a kol., 2008) (obr. 8) opísaný v práci Tomczyk a kol. (2010). Pred samotným filtrom budú predradené v optickej ceste 2 karusely pre úzkopásmové spektrálne filtre a kalibračnú polarizačnú optiku. Výstupom z optickej sústavy budú vždy dva na seba navzájom kolmo polarizované zväzky svetla ktoré prejdú samostatnými, dostatočne spektrálne oddelenými, vy-



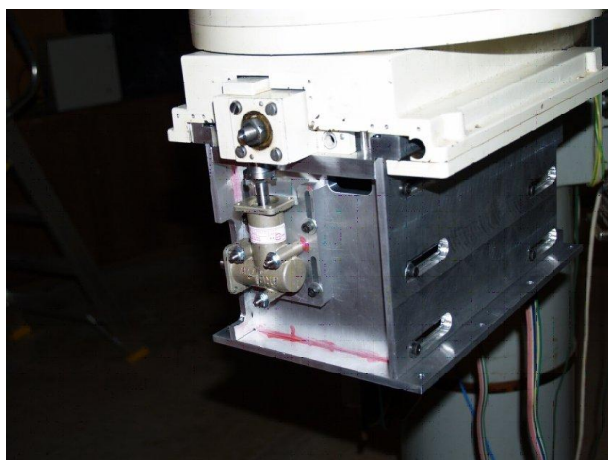
Obr. 7 Schématický diagram komponent Lyotovho filtra prístroja CoMP (Tomczyk a kol., 2008). Identickým spôsobom bude pripravený Lyotov filter pre pripravovaný prístroj CoMP-S.



Obr. 8 Grafy závislosti efektívnej zložky Stokesovho vektora na vlnovej dĺžke izolovanej vďaka algoritmu vyvinutého pre prístroj PromMag (Elmore, a kol., 2008). Identickým spôsobom bude pripravený Lyotov filter pre prístroj CoMP-S.

obraz koróny. V detektorovej časti sa ale tieto zväzky smerovo rozdelia polarizačnou kockou a obrazy sa pásmami priepustnosti. Finálna optická sústava vytvorí tvorí na dvoch samostatných identických detektoroch. Celá krabica prístroja bude termostatovaná na teplotu 25 stupňov Celsia.

Blok prístroja bude upevnený ku koncu koronografu pomocou mechanického interfejsu (obr. 9). Táto časť prístroja už bola testovaná na koronografe observatória Lomnický štít aby bola zabezpečená pripojiteľnosť prístroja CoMP-S ku koronografu využívajúc plnú funkčnosť mechanických pohybov a nastavení koronografu.



Obr. 9 Prototyp mechanického interfejsu (sivý) pripojený ku koncu samotného koronografu (biely) počas testov v máji 2010.

Detektorová časť prístroja bude obsahovať okrem optických členov i 2 dvojice detektorov pre vizuálnu a blízku infračervenú oblasť spektra. Nateraz bol špecifikovaný len detektor pre vizuálnu oblasť pre ktorú bol vybraný inovovaný polovodičový prvok sCMOS vyvinutý firmami PCO, Andor a Fairchild. Jeho základné parametre sú: kvantová účinnosť 60% (500nm), rozmer pixelu 6.5µm, vyčítacia kadencia 30 fps, počty pixelov 2560 x 2160, vyčítavací elektronický šum 2 e⁻, užitočný intenzitný rozsah 14bit (T = -60 stupňov Celsia). Detektor bude mať pokrývať zorné pole s rozsahom 860" x 680".

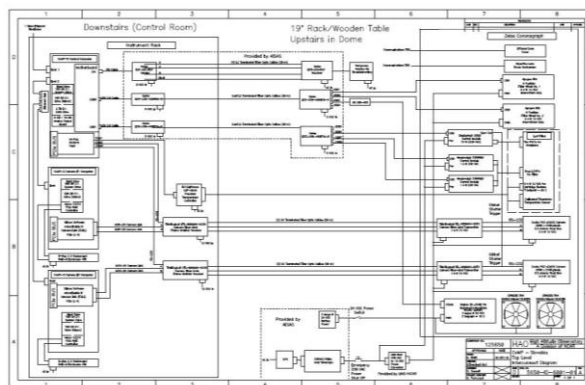
Bloku riadiacej elektroniky, upevnený na nohe montáže koronografu, bude obsahovať viacero elektronických zariadení nevyhnutných pre ovládanie Lyotovho filtra, LCD kryštálov, transformáciu a stabilizáciu elektrických napätí, napájanie elektrickou energiou a pre kontrolné prístroje.

Ovládacia a záznamová výpočtová technika, umiestnená v serverovni, bude pozostávať z riadiaceho počítača prístroja CoMP-S, dvoch počítačov pre riadenie kamier a dvoch diskových polí pre ukladanie pozorovacích dát (24 TB RAID 19" Storage System) ktorých maximálny tok bude až 660 MB/s.

Elektrická a optovláknová kabeláž, pripravená špeciálne pre prístroj CoMP-S, bude zabezpečovať

dodávku elektrickej energie, ovládanie prístroja a prenos dát z detektorov do diskových polí. Kabeláž je navrhnutá špeciálne pre vysokohorské podmienky Lomnického štítu s jeho nedostatočným elektrickým uzemnením. Podstatná jej časť je tvorená optovláknovými káblami a elektronickými prvkami ktoré zabezpečujú konverziu elektronických signálov na svetelný impulz.

Celková schéma prístroja vo forme blokového diagramu je uvedená na obr. 10 kde je schématicky naznačené i priestorové umiestnenie jednotlivých komponent prístroja CoMP-S. Všetky počítače, diskové polia, prostriedky stabilizácie napätia, i transformátor galvanického oddelenia budú umiestnené v serverovni asi 10 metrov pod úrovňou kupoly. Elektronika ovládania LCD kryštálov, stabilizovaného ohrevu samotného prístroja i Lyotovho filtra budú umiestnené v samostatnej temperovanej krabici na nohe montáže. Ovládanie pozorovaní pomocou prístroja CoMP-S bude možné ako priamo z kupoly tak i pomocou VNC aplikácie na iných počítačoch observatória.



Obr. 10 Schématický blokový diagram prístroja CoMP-S kde vľavo sú znázornené prvky uložené v serverovni, v strede prvky umiestnené na nohe montáže a vpravo prvky na konci koronografu v jednotlivých blokoch prístroja.

5. PRÍPRAVY KORONOGRÁFOV A OBSERVATÓRIA

Samotné koronografy, ich montáž, kabeláž i zabezpečenie observatória prekonajú zmeny vyplývajúce zo zavedenia prístroja CoMP-S. Najväčšou zmenou je vytvorenie klimatizovanej serverovne pre umiestnenie počítačov a diskových polí prístroja CoMP-S. Ďalšou zmenou je zabezpečenie galvanicky oddeleného a stabilizovaného napätia pre prístroj v rôznych modifikáciách napätia. Pre samotné riadenie pozorovaní a prenos zaznamenaných dát medzi serverovňou a kupolou bude použité optovláknové spojenie s prevodníkmi elektrických signálov na optovláknové. Montáž koronografu bude vybavená štruktúrovanou elektrickou a optovláknovou kabelážou. Samotný koronograf bude mať motorizované a počítačovo ovládané tri svoje nastavenia: otváranie/zatváranie koronografu difúzerom svetla pre kalibračné merania, fokusáciu primárneho objektívu a rotáciu samotného prístroja CoMP-S okolo optickej osi v celom

rozsahu pozičných uhlov. Pre prístroj CoMP-S bude pripravená nová elektronika fotoelektrického píntra pre navádzanie koronografu za Slnkom počas pozorovaní s požadovanou presnosťou.

6. ZÁVER

Inštalácia základnej verzie prístroja CoMP-S z detektormi previzuálnu oblasť spektra by mala prebehnúť v marci 2011. Predpokladáme že v priebehu roku 2011 sa nám podarí uviesť prístroj do regulárnej prevádzky a zamerať sa na spektropolarimetrické pozorovania protuberancií a koronálnych slučiek aktívnych oblastí meraním emisných čiar vznikajúcich v týchto útvaroch v slnečnej atmosfére.

V ďalšej fáze majú byť v priebehu roka 2012 dodané pre prístroj CoMP-S i detektory pre blízku infračervenú oblasť. Okrem toho je plánované i vylepšenie existujúceho fotoelektrického píntra ktorý by mal v budúcnosti zohľadňovať i deformácie tela koronografu v priebehu pozorovacieho dňa.

Pod'akovanie

Práca vznikla vďaka projektu grantovej agentúry VEGA 02/0064/09.

LITERATÚRA

- Elmore, D.F., Casini, R., Card, Greg, L., Davis, M., Lecinski, A., Lull, R., Nelson, P.G., Tomczyk, S., 2008, Proc. SPIE, 7014, 701416
Lexa, J., 1963, BAC 14, 107
Lyot, B., 1932, Zeitschrift für Astrophysik 5, 73-95
Lyot, B., 1939, MNRAS 99, 580
Minarovjech, M. a Rybanský, M., 1992, Solar Physics 140, 1
Minarovjech, M., Rušin, V., Rybanský, M., Sakurai, T., Ichimoto, K., 2003, Solar Physics 213, 269-290
Rybansky, M.; Rusin, V., 1992, Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso 22, 229-230
Rybanský, M., Rušin, V., Minarovjech, M., Klocok, L., Cliver, E. W. 2005, Journal of Geophysical Research 110, A8, CiteID A08106
Tomczyk, S., McIntosh, S.W., Keil, S.L., Judge, P.G., Schad, T., Seeley, D.H., Edmondson, J., 2007, Science 317, 1192-1196
Tomczyk, S., Card, G.L., Darnell, T., Elmore, D.F., Lull, R., Nelson, P.G., Streater, K.V., Burkepile, J., Casini, R., Judge, P.G., 2008, Solar Physics 247, 411-428
Tomczyk, S., Casini, R., de Wijn, A.G., Nelson, P.G., 2010, Applied Optics 49, 3580