

**Ponuka na konštrukciu
Slniečného Chromosférického Detektora
pre Astronomický ústav
Slovenskej akadémie vied**

Steven Tomczyk, Dennis Gallagher, Scott Sewell a Lee Sutherland
High Altitude Observatory
National Center for Atmospheric Research
Boulder, CO USA

Verzia: 4. marec 2013

1. Úvod

High Altitude Observatory (HAO) Národného centra pre atmosférický výskum (HAO) ponúka skonštruovať prístroj Slniečny Chromosférický Detektor (SCD) pre použitie na jednom z 20 cm koronografov Zeiss na Observatóriu Lomnický Štít. Prístroj SCD bude schopný pozorovať slnečný disk a protuberancie nad slnečným limbom vo viacerých absorpčných a emisných čiarach v rozsahu vlnových dĺžok od 588 nm do 1083 nm. Prístroj umožní merania všetkých stavov polarizácie cez profil týchto slnečných čiar poskytúc tak informáciu o rýchlostnom poli a o vektore magnetického poľa v slnečnej chromosfére.

Zámerom tohoto dokumentu je poskytnúť podrobný popis technických špecifikácií a súpis prác pre uskutočnenie dizajnu a konštrukcie prístroja SCD. Nasledujúce časti tohto dokumentu opisujú:

2. ciele a vlastnosti prístroja SCD
3. vlastnosti 20 cm koronografu Zeiss
4. koncepčný dizajn prístroja SCD
5. odhad ceny prístroja SCD a plán postupu prác
6. detailný zoznam dodaných výstupov
7. súpis prác vykonaných HAO

2. Ciele a vlastnosti prístroja SCD

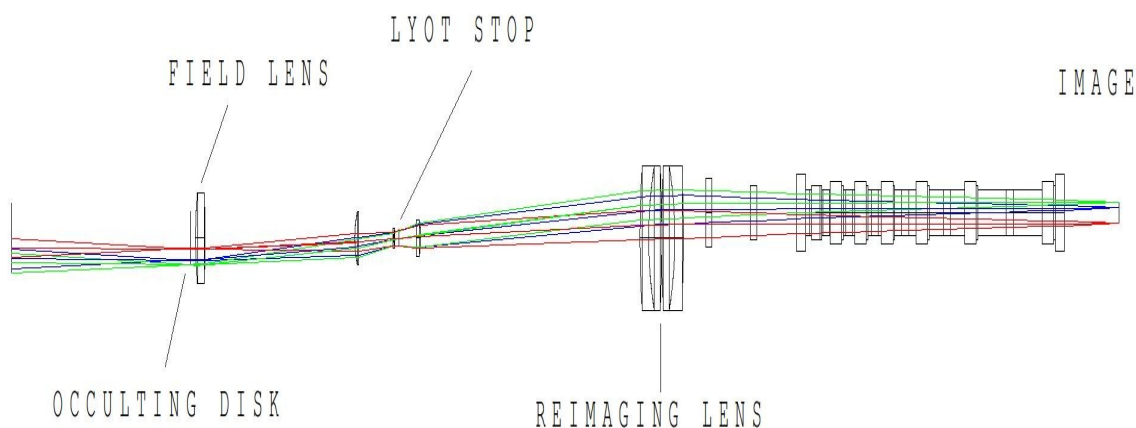
Význam slnečnej chromosféry je určený tým že je medzičlánkom medzi fotosférou, kde dominuje plyn, a korónou, kde dominuje magnetizmus. Pozorovanie chromosféry je rozhodujúce pre porozumenie rovnováhy hmoty a energie vo vonkajšej slnečnej atmosfére a pre vznik slnečnej aktivity. Viac ako 90% neradiačnej energie slnečnej atmosféry je umiestnených v chromosfére a toto je pravdepodobný zdroj toku hmoty do koróny. Chromosféra je vysoko dynamickou oblasťou slnečnej atmosféry ktorá nie je ovládaná lokálnou termodynamickou rovnováhou. Pozorovania tejto oblasti musia byť vykonávané s vysokou kadenciou, rádovo 10 sekúnd, aby boli zachytené dynamické fenomény ako sú vlnenia a rázové vlny. Okrem toho je chromosféra štrukturovaná na veľmi malých priestorových škálach, a tak pozorovania by mali byť vykonávané s rozlíšením aspoň jedna oblúčková sekunda.

Pochopenie tejto komplexnej oblasti vyžaduje pozorovania Dopplerovho javu a polarizácie svetla v slnečných absorpčných a emisných čiarach formujúcich sa prechodom cez túto oblasť atmosféry. Nevyhnutnosť vysokej časovej kadencie vedie k prístroju založenom na použití filtra pretože štrbinový spektrograf nie je schopný preskenovať pole s požadovanou kadenciou 10 sekúnd. Filter musí byť veľmi variabilný a schopný pozorovať vo viacerých chromosférických čiarach v širokom rozsahu

vlnových dĺžok. Navrhujeme že prístroj SCD by mal byť kombináciou polarimetra a úzkopásmového laditeľného filtra ako to vyplýva zo skúseností získaných z prístrojov Coronal Multi-Channel (CoMP) a CoMP-S ktoré sú používané na observatóriách Mauna Loa, Hawaii a Lomnický Štít, Slovensko. Prístroj SCD bude schopný merať dopplerovský posun a všetky polarizačné stavy absorpčných a emisných čiar v širokom rozsahu slnečného spektra pozorujúc žiarenie zo slnečného disku a z ponad slnečného limbu. Umiestnenie prístroja na jednom z 20-cm koronagrafov Zeiss na Observatóriu Lomnický Štít umožní získavanie pozorovaní s rozlíšením na difrakčnom limite koronografu čo je menej ako jedna oblúková sekunda pre zobrazovanie vo vizuálnej oblasti slnečného spektra.

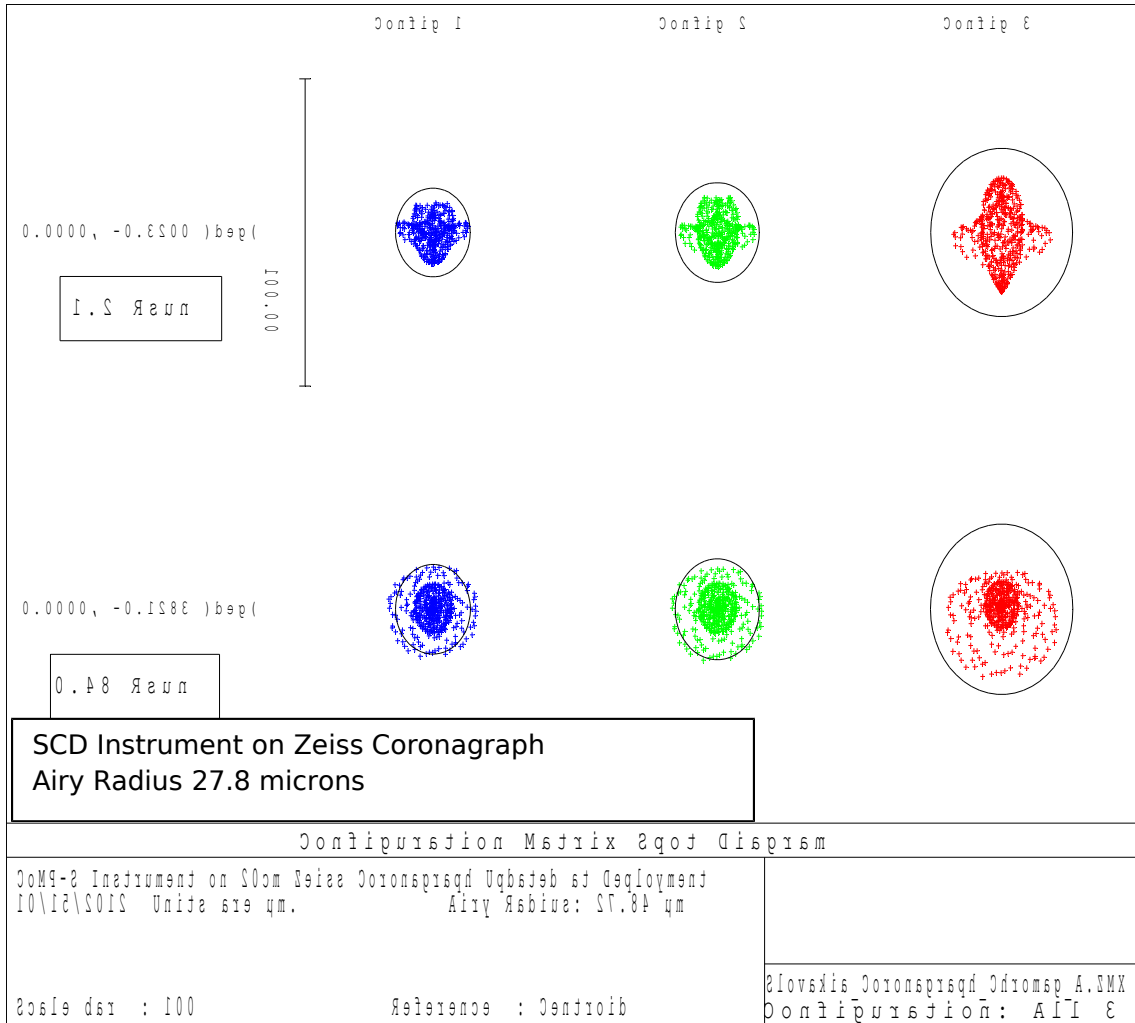
3. 20-cm koronagraph Zeiss

Koronograf, ktorý bude použitý v tomto projekte, je jedným z dvoch koronagrafov Zeiss Observatória Lomnický Štít. Objektív koronografu má apertúru 20 cm a ohniskovú vzdialenosť 3 m. Sekundárna zobrazovacia optika vytvára finálnu ohniskovú vzdialenosť 4 m (4,1 m a $f/21$ pre 656 nm). Informácia o optike bola importovaná do softvéru Zemax pre optický dizajn a bola použitá pre sledovanie svetla na koniec koronografu, Obr. 1. Zodpovedajúci optický diagram (Obr. 2) ukazuje že koronograf dosahuje činnosť na úrovni difrakčného limitu medzi 588 a 1083 nm. Optické diagramy v troch vlnových dĺžkach boli získané posunom fokusu objektívu zatiaľ čo všetka dodatočná optika a ohnisková rovina zostali nezmenené. Existuje mechanizmus pre manuálne ovládanie posunu objektívu. Tento pohyb bude potrebné automatizovať pre posun objektívu pre pozorovanie rôznych vlnových dĺžok.



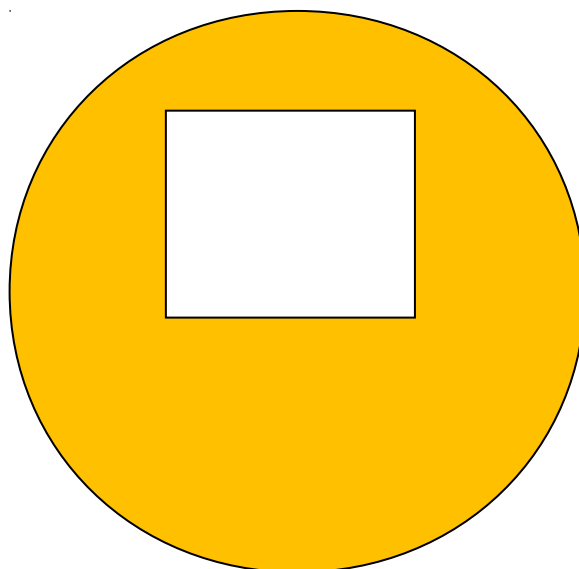
Obr. 1. Diagram šírenia lúčov v zadnej časti 20 cm koronografu Zeiss. Okrem poľnej šošovky and zobrazujúcej optiky sú v koronografe i tri šošovky obkolesujúce Lyotovú clonu. Kalibračná optika, úzkopásmový predfilter a 5 stupňový Lyotov filter sa nachádzajú medzi zobrazujúcou optikou a obrazom. Tieto optické elementy môžu byť mechanicky vysunutú voči hlavnej optickej osi prístroja pre sledovanie ľubovoľnej časti Slnka od 0,0 po 0,32 uhlových stupňov od stredu Slnka.

Optické vlastnosti koronografu Zeiss odvodené z optického dizajnu sú uvedené v tabuľke 1. Rozlíšenie je difrakčne limitované priestorové rozlíšenie v oblúkových sekundách a mikrónoch premietnuté do ohniskovej roviny definované ako polomer Airyho disku ($=1.22\lambda/D$). Optika koronografu obmedzuje dostupné zorné pole na menej ako <0.49 stupňov od stredu slnečného disku.



Obr. 2. Optický diagram pre koronograf Zeiss s indikáciou difrakčne limitované vlastnosti pre vlnové dĺžky 588, 656 a 1083 nm (modrá, zelená, červená) na slnečnom limbe (horný rad) a na vonkajšom okraji zorného poľa (spodný rad). Airyho disky sú označené kruhmi.

Predpoklad priestorovej škály 50.2 obl. sekúnd/mm pre čiaru H alfa a takisto predpokladajúc detektor Andor SCMOS s 2560 x 2120 pixelami s rozmerom pixla 6.5 mikrónov vedú k zornému poľu (field-of-view FOV) na čipe kamery o rozmere 835 x 692 obl. sekúnd alebo 0,87 x 0,72 slnečného polomeru (berúc hodnotu 960 obl. sekúnd ako slnečný polomer). Toto je skoro identické s FOV prístroja CoMP-S. Tento rozmer pixlu umožňuje prinajmenšom kritické vzorkovanie Airyho disku pre všetky vlnové dĺžky. Relatívna veľkosť slnečného disku a FOV prístroja SCD sú zobrazené na Obr. 3.



Obr. 3. Diagram znázorňujúci relatívnu veľkosť Slnka a zorného poľa prístroja SCD.

Tabuľka 1. Optické vlastnosti koronografu Zeiss

Vlnová dĺžka (nm)	Ohnisková vzdialenosť (mm)	Škála obrazu (oblúčková sekunda/mm)	Rozlíšenie (oblúčková sekunda)	Rozlíšenie (mikróny)
588	4089	50.4	0.74	15.1
656	4106	50.2	0.82	16.4
10830	4217	48.9	1.36	27.8

4. Konceptný dizajn prístroja SCD

Ako bolo uvedené v časti 2, prístroj SCD bude kombináciou laditeľného filtra a polarimetra. Bude naväzovať na skúsenosti získané s prístrojmi CoMP a CoMP-S (Tomczyk a kol., 2007), ale bude sa od týchto významne odlišovať v dvoch aspektoch. Po prvé, prístroje CoMP boli vyvinuté špeciálne pre pozorovania slnečnej koróny. Pre koronálne pozorovania je potrebný prístroj s dvoma lúčmi svetla aby bolo možné odstrániť efekty aerosolov v zemskej atmosfére. Keďže prístroj SCD bude pozorovať omnoho jasnejšiu chromosféru dvojcestný pozorovania nie sú potrebné a preto bude prístroj SCD prístrojom s jediným zväzkom svetla. Po druhé, chromosféra je omnoho chladnejšia ako slnečná koróna. Preto sú jej absorpčné a emisné čiary výrazne užšie vo vlnovej dĺžke. Casini (2007) vypočítal že pre pozorovanie polarizačných prejavov chromosféry je potrebné spektrálne rozlíšenie 0,046 nm pre čiaru Hel 1083 nm a 25 pm pre čiaru Hel 587.6 nm. Preto interferenčno-polarizačný filter pre prístroj SCD bude potrebovať jemnejšie spektrálne rozlíšenie ako prístroje CoMP s faktorom približne tri.

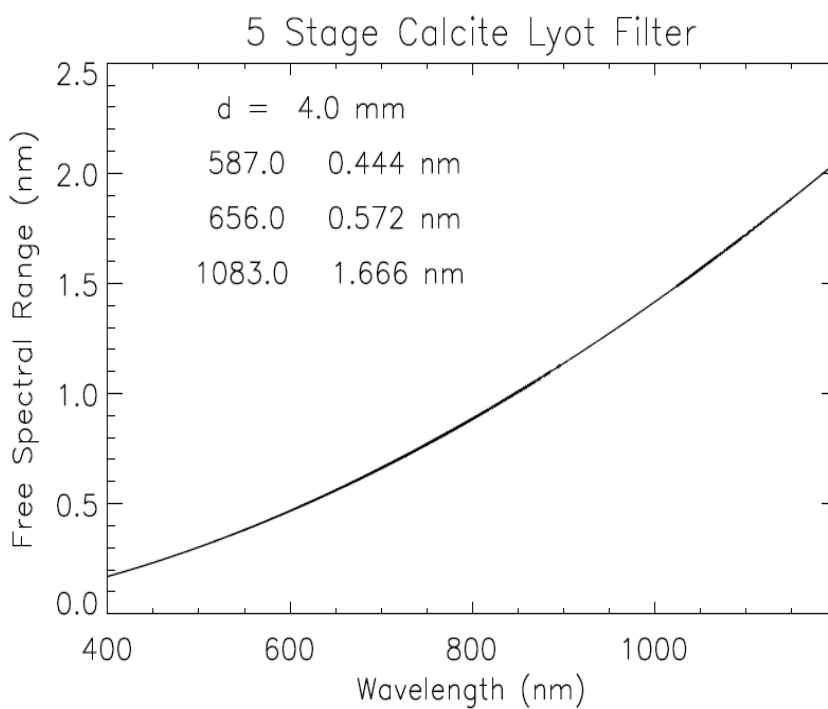
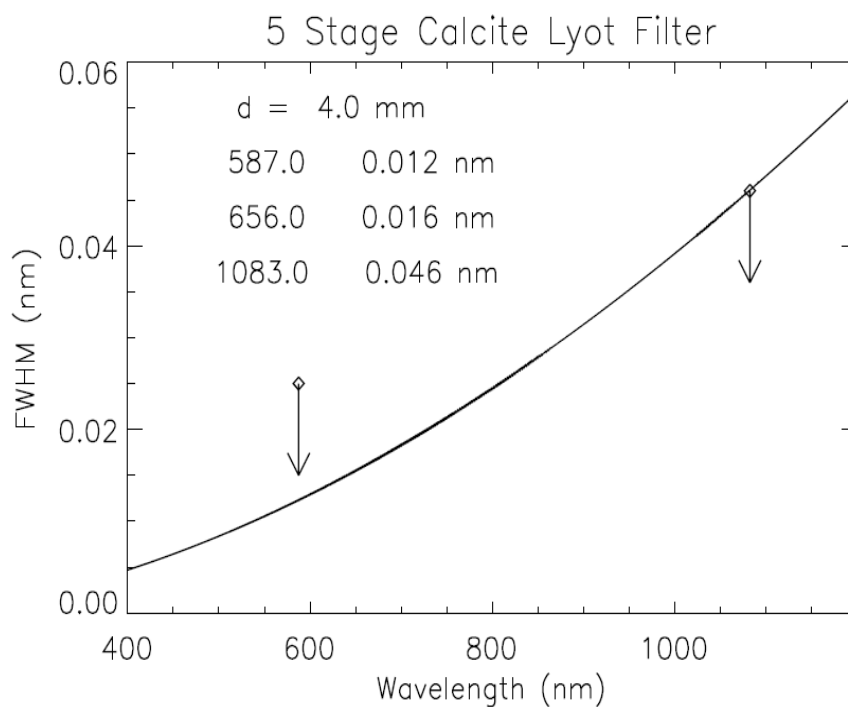
Centrálne komponentom prístroja SCD bude laditeľný filter a polarimeter. Polarimeter bude pozostávať z dvoch ferroelektrických tekutých kryštálov (FLCs), fixného retardéra a polarizátora. Takzvané "poly-chromatické" modulátory sa ukázali ako dostatočné pre pozorovania kompletného Stokesovho vektora žiarenia so skoro optimálnou efektívnosťou pre veľmi široký spektrálny rozsah (Tomczyk a kol., 2010). Takisto FLC kryštály dokážu meniť svoj stav veľmi rýchlo. Filter bude päť-stupňovým kalcitovým interferenčno-polarizačným filtrom s širokým uhlom s hrúbkou kalcitu vybranou aby dosahoval požadované spektrálne rozlíšenie 0,046 nm pre 1083 nm. Šírka pásma priepustnosti filtra FWHM a voľný spektrálny interval sú ukázané ako funkčné závislosti na vlnovej dĺžke na Obr. 4. Najtenší stupeň filtra bude obsahovať 4 mm kalcit a najhrubší bude mať 64 mm kalcit. V porovnaní s prístrojmi CoMP – tieto majú najhrubší stupeň s 22 mm kalcitom. Ako predtým, výber vlnovej dĺžky bude dosiahnutý piatimi nematickými tekutými kryštálmi. Polarizátory budú získané od firmy CODIXX a super super-achromatické retardéry budú od firmy Astropribor ktoré boli úspešne použité v prístroji CoMP-S.

Kontrola teploty filtra bude poskytovaná prístrojom Lightwave pre kontrolu teploty firmy ILX. Tento dokázal v prístroji CoMP-S stabilizovať teplotu s nepresnosťou len niekoľko mK. Optické komponenty budú držané hliníkovými hexagonálnymi držiakmi pre udržanie precíznej rotačnej orientácie. Optické elementy filtra sú spojené olejom s indexom lomu zodpovedajúcim indexu lomu elementov a uzavreté oknami s antireflxným pokovením na vonkajších optických plochách pre redukciu radiačných strát.

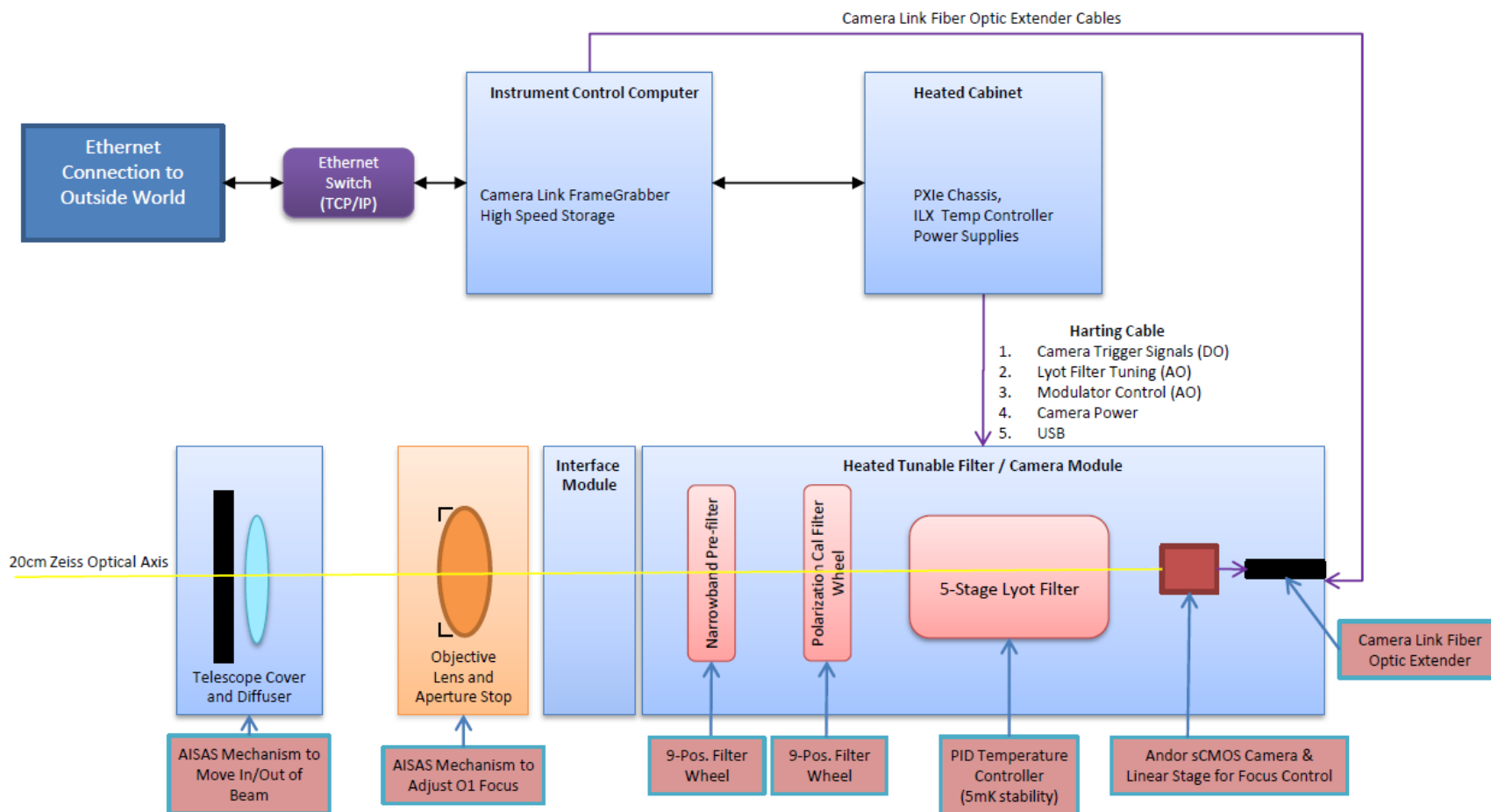
Základným detektorom prístroja SCD je kamera Andor sCMOS s formátom 2560 x 2160 pixlov o rozmere 6,5 mikrónu. Kamera má vyčítavací šum 1,5 elektrónov (posúvajúca sa uzávierka) a 2,5 elektrón (celková uzávierka) a jej maximálna kadencia snímok je 30 obrázkov za sekundu.

Oblasť spektra bude vybraná predfiltrami so šírkou určenou voľnou spektrálnou oblasťou zobrazenou na spodnom paneli Obr. 4. Prístroj SCD bude mať karusel filtrov obsahujúci 9 predfiltrov. Vybrané čiary pre prístroj SCD môžu obsahovať, ale nie sú limitované len, na chromosférické čiary Hel 587.6 nm, NaI 589.2 a 589.6 nm, H α 656.3 nm, CaII 854.2 nm a Hel 1083.0 nm. Prístroj SCD by mal tiež obsahovať niektoré fotosférické čiary umožniac pozorovanie magnetických polí v oblastiach pod chromosférou. Vhodnými fotosférickými čiarami môžu byť Fel 617.3 nm alebo pár čiar Fel at 630.15 a 630.25 nm. Pozorovania v kontinuu budú taktiež možné.

Schématický diagram prístroja SCD je uvedený na Obr. 5. Obr. 6-8 ukazujú mechanický koncept prístroja SCD. Prístroj bude navrhnutý ako mechanicky tak i elektricky tak aby bolo možné ním otáčať plne v rozsahu 360 stupňov za koronografom Zeiss.

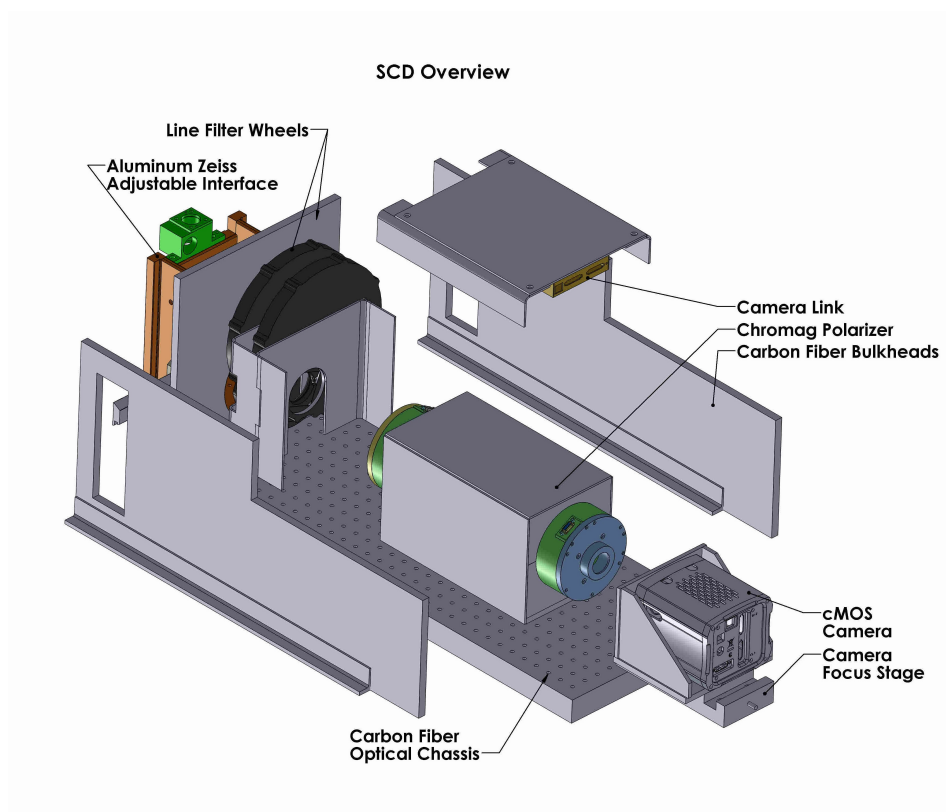


Obr. 4. Polšírka a voľná spektrálna oblasť filtra prístroja SCD. Požadované horné limity vyžadovaného rozlíšenia filtra sú znázornené trojuholníkmi a šípkami v hornom grafe.

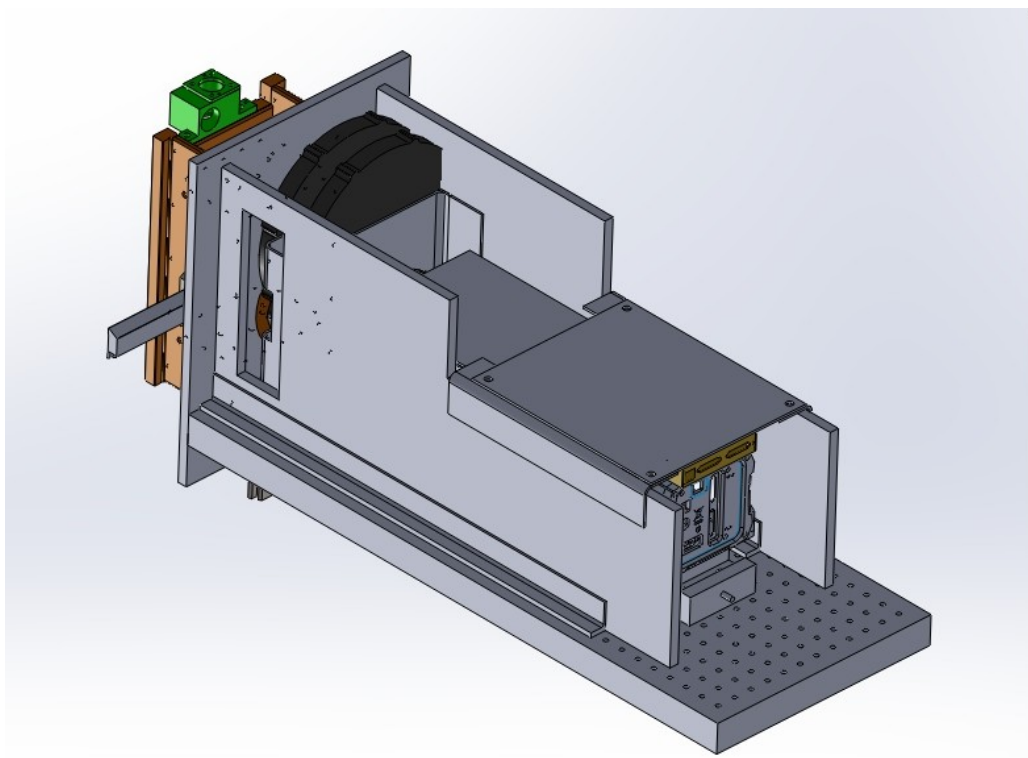


HAO-AISAS
Solar Chromospheric Detector
Block Diagram
4-March-2013

Obr. 5. Schématický diagram prístroja Slniečny Chromosférický Detektor

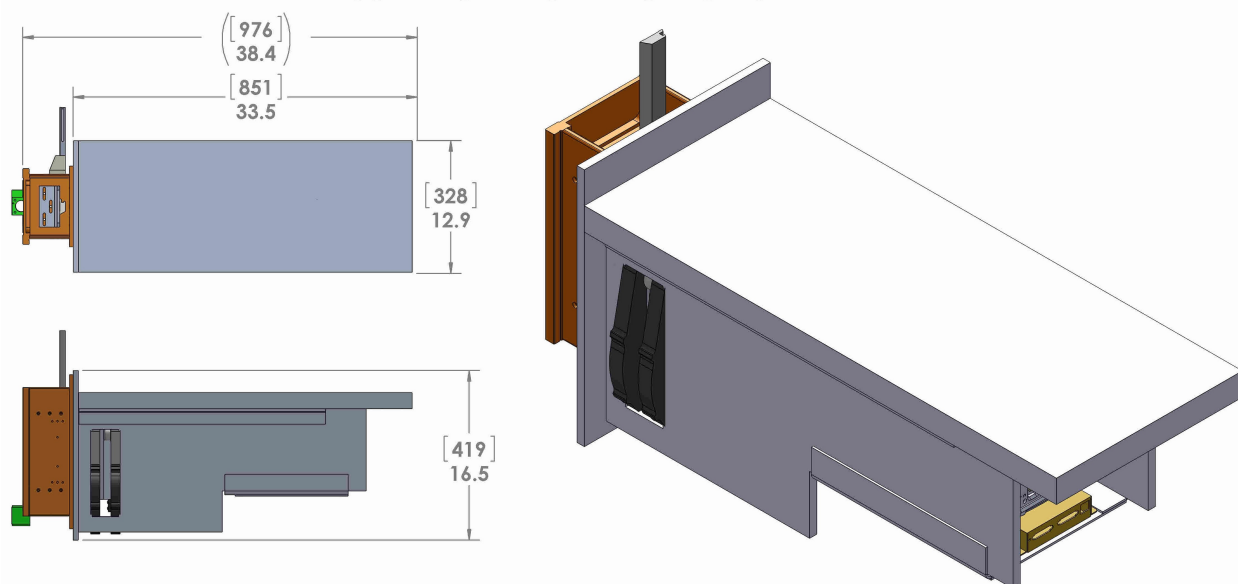


Obr. 6. Mechanické náhľad prístroja SCD



Obr. 7. Celkový pohľad na tvar prístroja SCD

SCD MECHANICAL PACKAGING



Key Features:

- Mass: 30 kg
- Uses existing Zeiss interfaces

Obr. 8. Rozmery a hlavné údaje prístroja SCD

5. Odhad ceny prístroja SCD a plán postupu prác

Cena prístroja SCD bude 500200 EUR bez DPH.

Cena prístroja SCD zahŕňa:

Všetky materiály a konštrukčné práce.

Dodávku prístroja organizáciou HAO do Starej Lesnej.

Prístroj SCD je jedinečným prístrojom na dizajn, výrobu a dodávku bude potrebných 18 mesiacov od dátumu podpisu zmluvy.

6. Zoznam dodaných výstupov

Napájanie: AsÚ SAV poskytne 24V DC na ďalekohľade pre bezpečnostný ohrev a 220VAC 50 Hz bude poskytnutých v blízkosti ďalekohľadu pre periférie. AsÚ SAV poskytne záložný zdroj UPS so záložným generátorom, ale dlhšie výpadky prúdu môžu nastávať a je potrebné sa tomu prispôbiť.

Koronograf: AsÚ SAV poskytne počítačom riadené mechanizmy pre 1) fokusáciu objektívu, a 2) rotáciu zadnej časti (krabice) koronografu. HAO postaví medzičlánok medzi prístrojom SCD a koronografom ktorý bude identický ako v prípade prístroja

CoMP-S. Prierez prístroja SCD bude prispôsobený prierezu existujúcej posúvacej časti za bodom ktorý obsahuje zobrazovaciu optiku.

Filter/Polarimeter: HAO poskytne filter/polarimeter ktorý bude funkčný vo vlnovom rozsahu od 588 do 1083 nm a bude elektro-opticky laditeľný pre emisné čiary vybrané interferenčnými filtermi v karuseli filtrov s 9 pozíciami. Sekcia prístroja SCD obsahujúce karusely filtrov a polarimeter bude odmontovateľná of koronografu v prípade dlhodobého výpadku el. prúdu. HAO zabezpečí udržiavanie teploty vo vnútri obalu prístroja SCD vrátane filtra/polarimetra a karuselov filtrov na 23 stupňov Celzia s presnosťou 1 stupeň Celzia a teplotu samotného filtra/polarimetra na 35 stupňov Celzia s presnosťou 5 milistupňov Celzia.

Karusely filtrov: HAO poskytne 2 karusely filtrov s optickými prvkami. Prvý z nich bude obsahovať 9 interferenčných filtrov vybrané emisné čiary. Druhý bude obsahovať: pozíciu pre temný tok, otvorenú pozíciu, 4 až 6 polarizačných prvkov pre kalibrácie a šošovku ktorá zamení obraz v ohniskovej rovine obrazom objektívu.

Detektor: HAO poskytne 1 Andor Neo sCMOS detektor s 2560x2160, 6,5 mikrónovými pixelmi. Detektory budú mať dostatočné stupne voľnosti pre fokusáciu. Centrovanie a nastavenie kolmo na zväzok svetla. Detektor bude komunikovať s riadiacim počítačom prístroja cez optické káble s káblami a extendermi ktoré dodá HAO. Detektor bude namontovaný spôsobom ktorý umožní jeho ľahké vybratie a výmenu ale vylepšenie.

Počítač: Riadiaci počítač prístroja poskytne HAO. Počítač bude obsahovať monitor, USB klávesnicu, USB myš a bude funkčný pre napätie 220 V. Pozorovací program bude napísaný v programe LabView pre operačný systém Windows 7 (64-bit). Počítač bude mať prinajmenšom 2TB diskového priestoru. Počítač bude vmontovaný do 19" skrinky poskytnutej AsÚ SAV. Počítač bude komunikovať s mechanizmami AsÚ pomocou RS-232 pre: 1) posun fokusu objektívu, 2) rotáciu krabice koronografu, 3) otváranie a zatváranie krytu objektívu koronografu.

Softvér: HAO poskytne softvér pre riadenie prístroja vrátane zdrojových kódov.

Vyhrievaná skrinka: Základňa National Instruments PXIe, stabilizátor teploty ILX a zdroje napätia budú poskytnuté vo vyhrievanej skrinke namontovanej pri základni koronografu Zeiss. Kábel Harting (s dĺžkou <7m) bude poskytnutý pre spojenie tejto vyhrievanej skrinky s modulom prístroja SCD.

Hmotnosť a Rozmer: Hmotnosť prístroja SCD bude menšia ako 30 kg a prístroj nebude dlhší ako 1,1 m.

Dokumentácia: HAO poskytne úplnu sadu dokumentácie, výkresov a zdrojových kódov softvéru s prístrojom SCD.

7. Súpis prác vykonaných HAO

Pri dodávke HAO poskytne prístroj SCD ktorý obsahuje:

Filter/polarimeter ktorý môže byť namontovaný na zadnú časť jedného z koronografov Observatória Lomnický Štít.

Set predfiltrov v karuseli filtrov ktoré je možné zasúvať do optickej cesty pomocou riadenia počítačom pre výber spektrálnej čiary pre pozorovanie.

Prídavný karusel filtrov obsahujúci: opticku pre polarizačnú kalibráciu, temnú vsuvku, otvorenú pozíciu a výmennú šošovku.

Jednotku pre kontrolu teploty ktorá bude stabilizovať teplotu filtra/polarimetra na 35 stupňov Celzia.

Detekčný systém schopný zaznamenávať výstup z filtra/polarimetra s požadovaným priestorovým rozlíšením 1.7 obl. sekundy a časovým rozlíšením 10 sekúnd.

Počítačový systém montovateľný do skrine pre ovládanie systému prístroja SCD. Tento obsahuje klávesnicu, myš, monitor a diskový priestor 2 TB.

Súbor všetkých potrebných káblov.

Pri dodávke HAO poskytne kompletnú sadu dokumentácie vrátane:

Manuály výrobcov všetkých zakúpených zariadení.

Inžinierke výkresy programu SolidWorks pre všetky vyrobené komponenty.

Súbory pre optický dizajn programu Zemax.

Elektrické schémy programu Altium.

Zdrojový kód všetkého softvéru.

Licenciu programu LabView.

Literatúra

Casini, R., "Prominence and Filament Magnetometry Simulations", COSMO Technical Note #12, 2007.

Tomczyk, S., Casini, R., and de Wijn, A., "Wavelength-diverse polarization modulators for Stokes polarimetry", 2010, *Applied Optics*, **49**, 3580.

Tomczyk, S., Card, G.L., Darnell, T., Elmore, D.F., Lull, R., Nelson, P.G., Streander, K.V., Burkepile, J., Casini, R., and Judge, P.G., 2007, "An Instrument to Measure Coronal Emission Line Polarization," *Solar Physics*, **247**, 411.