

UNIVERZITA KOMENSKÉHO V BRATISLAVE
FAKULTA MATEMATIKY, FYZIKY A INFORMATIKY

DYNAMIKA A MAGNETIZMUS VYBRANÝCH JAVOV
V ATMOSFÉRE SLNKA

DIZERTAČNÁ PRÁCA

UNIVERZITA KOMENSKÉHO V BRATISLAVE
FAKULTA MATEMATIKY, FYZIKY A INFORMATIKY

**DYNAMIKA A MAGNETIZMUS VYBRANÝCH JAVOV
V ATMOSFÉRE SLNKA**

DIZERTAČNÁ PRÁCA

Študijný program:	4.1.7-8 astronómia a astrofyzika
Pracovisko (katedra/ústav):	Astronomický ústav Slovenskej akadémie vied
Vedúci diplomovej práce:	Mgr. Peter Gömöry, Phd.
Konzultant diplomovej práce:	Dr. Christoph Kuckein

Pod'akovanie

Chcel by som pod'akovať všetkým, ktorí mi akýmkoľvek spôsobom pomohli, alebo ma usmerňovali pri tvorbe tejto dizertačnej práce. Moje pod'akovanie patrí najmä vedúcemu dizertačnej práce Mgr. Petrovi Gömörymu, PhD. za jeho čas, pomoc a cenné rady, ktoré mi venoval. Taktiež chcem pod'akovať Dr. Christohovi Kuckein, Dr. Horstovi Balthasarovi, Sergiovi Manrique, PhD. a Dr. Andrésovi Asensio Ramos za cenné rady, pomocou ktorých som dosiahol požadované výsledky.

Abstrakt

Práca sa zameriava na výskum dynamiky a magnetického poľa v slnečnej atmosfére. Pre tento účel bolo analyzované spektro-polarimetrické pozorovanie získané spektropolarimetrom GRIS, ktorý je umiestnený na ďalekohľade GREGOR, a pomocou družice HINODE dňa 20.6.2016. Vybraná aktívna oblasť AR12553 bola pozorovaná v spektrálnej oblasti 1 μm (pomocou prístroja GRIS) a vo viditeľnej časti elektromagnetického spektra (prostredníctvom družice HINODE). Zo získaných Stokesových profilov boli pomocou výpočtových programov SIR (Stokes Inversion based on Response functions) a HAZEL (Hanle and ZEeman Light) určené základné fyzikálne parametre magnetického poľa študovanej škvrny (absolútna veľkosť, inklinácia a azimut magnetického poľa) vo fotosfére a chromosfére. Pomocou týchto veličín boli určené jednotlivé zložky vektora magnetického poľa v osiach x, y a z. Dynamické vlastnosti slnečnej škvrny boli študované prostredníctvom Dopplerovských rýchlostí odvodených z pozorovaných spektrálnych čiar formujúcich sa vo fotosfére a chromosfére. Preukázali sme existenciu supersonických tokov chromosférickej plazmy v oblasti vonkajšej hranice penumbry.

Kľúčové slová: magnetické pole, slnečná škvrna, spektro-polarimetria, fotosféra, chromosféra

Abstract

The focus of this thesis is on analysis of dynamics and magnetic field of a sunspot in the solar atmosphere. For this purpose, was analysed the spectro-polarimetric observation acquired by spectropolarimeter GRIS on telescope GREGOR and by the HINODE satellite on 20th of June 2016. The active region AR12553 was observed in the spectral region of 1 μm (GRIS instrument) and in the visible part of the electromagnetic spectra (HINODE satellite). The SIR (Stokes Inversion based on Response functions) and HAZEL (Hanle and ZEeman Light) codes were used to determine the basic physical parameters (such as absolute magnitude, inclination and azimuth of the magnetic field vector) of the studied sunspot magnetic field in the photosphere and the chromosphere. Determined components of the vector magnetic field in the spherical coordinates were used to calculate components of vector magnetic field in the cartesian coordinates. Dynamics properties of the sunspot were studied using Doppler velocities determined using observed spectral lines formed in photosphere and chromosphere. We found clear evidence of supersonic chromospheric flows at the outer edge of penumbra.

Key word: magnetic field, sunspot, spectro-polarimetry, photosphere, chromosphere



Univerzita Komenského v Bratislave
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky

ZADANIE ZÁVEREČNEJ PRÁCE

- Meno a priezvisko študenta:** Mgr. Martin Benko
Študijný program: astronómia a astrofyzika (Jednoodborové štúdium, doktorandské III. st., denná forma)
Študijný odbor: fyzika
Typ záverečnej práce: dizertačná
Jazyk záverečnej práce: slovenský
Sekundárny jazyk: anglický
- Názov:** Dynamika a magnetizmus vybraných javov v atmosfére Slnka
Dynamic and magnetism of selected phenomena in the atmosphere of the Sun
- Anotácia:** Magnetické polia sú kľúčovým faktorom ovplyvňujúcim vlastnosti javov prebiehajúcich v atmosfére Slnka. Výrazné zlepšenie pozorovacích možností dosiahnuté v poslednej dekáde nástupom veľkých, slnečných ďalekohľadov (napr. GREGOR) ako aj vypustením nových satelitov (napr. IRIS, SDO) prinieslo bezprecedentné možnosti detailného výskumu magnetizmu slnečnej atmosféry. Napriek tomu, mnohé dôležité otázky ostávajú stále nevyriešené. Medzi vybrané patria napríklad: aká je výšková stratifikácia vektora magnetického poľa v oblasti slnečných škvŕn a iných magnetických štruktúr v atmosfére Slnka, aké je prepojenie magnetických polí z fotosféry do chromosféry a následne do vyšších oblastí slnečnej atmosféry, aký je vplyv týchto polí na dynamiku okolitej plazmy. V rámci dizertačnej práce sa budeme zameriavať práve na štúdium týchto stále otvorených otázok v oblastiach slnečných škvŕn.
- Cieľ:** Cieľom dizertačnej práce je štúdium magnetických parametrov a dynamických vlastností vybraných objektov (napr. slnečných škvŕn, oblúkových filamentárnych štruktúr, fibril, atď.) v slnečnej atmosfére. Získané výsledky budú interpretované a porovnané s predpoveďami vyplývajúcimi z numerických modelovaní a predchádzajúcich observačných zistení. V rámci dizertačnej práce budú využité obrázkové, spektrálne a spektropolarimetrické merania získané s veľmi vysokým časovým, priestorovým a spektrálnym rozlíšením pomocou najväčších pozemských (napr. GREGOR, VTT, alebo SST) a vesmírnych (IRIS, SDO, alebo Hinode) slnečných ďalekohľadov. Analyzované budú Stokesove profily viacerých spektrálnych čiar formujúcich sa v rozličných výškach slnečnej atmosféry. Jednotlivé komponenty vektora magnetického poľa (t.j. veľkosť magnetickej indukcie, inklinácia a azimut) budú získané prostredníctvom tzv. inverzných kódov, napr. SIR alebo HAZEL. Termodynamické vlastnosti pozorovanej plazmy budú určené prostredníctvom štandardnej spektrálnej analýzy aplikovanej na EUV spektra získané pomocou vesmírnych prístrojov.
- Literatúra:** 1. Physics of The Sun I, II, III. Geophysics and Astrophysics Monographs, eds: P.A. Sturrock, T.E. Holzer, D.M. Mihalas a R.K. Ulrich, Reidel Publ., Dordrecht, 1986.
2. Zirin, H.: Astrophysics of the Sun. Cambridge Univ. Press. Cambridge. 1988.



Univerzita Komenského v Bratislave
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky

3. Landi Degl'Innocenti, E. a Landolfi, M.: Polarization in Spectral Lines, Kluwer, Dordrecht, 2004.
4. Stenflo, J. O.: Solar magnetic fields, Kluwer Academic publishers, 1994.
5. del Toro Iniesta, J. C.: Introduction to spectropolarimetry, Cambridge University Press, 2007.
6. vedecké články z časopisov a zborníkov podľa výberu školiteľa

Kľúčové

slová: slnečná škvrna, magnetické pole, spektro-polarimetria, fotosféra, chromosféra

Školiteľ: Mgr. Peter Gömöry, PhD.
Katedra: FMFI.KAFZM - Katedra astronómie, fyziky Zeme a meteorológie
Vedúci katedry: doc. RNDr. Zdenko Machala, PhD.
Dátum zadania: 27.07.2017

Dátum schválenia: 01.08.2017

doc. RNDr. Ján Svoreň, DrSc.
garant študijného programu

.....
študent

.....
školiteľ

Obsah

Zoznam skratiek a značiek.....	8
Úvod	9
1. Prehľad súčasného stavu výskumu slnečných škvŕn	11
1.1 Magnetické pole slnečnej škvŕny	13
2. Spôsob merania magnetických polí	20
2.1 Opis polarizácie svetla pomocou Stokesových parametrov	20
2.2 Zeemanov jav	21
2.3 Hanle efekt	22
3. Ciele práce.....	24
4. Pozorovací materiál	25
4.1 Ďalekohľad GREGOR	25
4.1.1 Spektrograf GRIS.....	28
4.2 Hinode (Solar-B).....	28
4.2.1 Slnečný optický ďalekohľad (SOT).....	29
4.3 IRIS	31
5. Analyzované dáta	34
5.1 Základné údaje	34
5.2 Analyzované spektrálne čiary	36
6. Spracovanie meraní a ich inverzia.....	41
6.1 Základná fotometrická redukcia a kalibrácia spektier	41
6.2 SIR – Stokes inversions based on response functions	49
6.3 HAZEL – Hanle and Zeeman Light.....	52
7. Výsledky.....	55
7.1 Parametre magnetického poľa pozorovanej škvŕny vo fotosfére a v chromosfére	55
7.2 Dopplerovské rýchlostné polia	63
Diskusia.....	72
Záver	77
Použitá literatúra	79

Zoznam skratiek a značiek

Å – Angstrom - 10^{-1} nm

G – Gauss - 10^{-4} T

Úvod

Magnetické pole zohráva dôležitú rolu pri procesoch v slnečnej atmosfére. V tejto práci sa sústreďíme na popis magnetického poľa a dynamiky slnečnej škvrny, ktorá charakterizuje hlavnú časť aktívnej oblasti. Aktívne oblasti sú zdrojom najenergetickejších javov v atmosfére Slnka ako sú erupcie a CME. Tieto javy majú zásadný vplyv na atmosféru Zeme. Prvými pozorovateľmi slnečných škvŕn boli Galileo Galilei, Thomas Harriot a Johannes Fabricius. Pozorovali ich ako tmavé štruktúry na Slnku. Galileo Galilei prostredníctvom tejto štruktúry dokázal rotáciu Slnka. V rovnakom období sa zaviedlo systematické zaznamenávanie polôh slnečných škvŕn. Neskôr Alexander Willson zistil, že slnečné škvrny sa nachádzajú na povrchu Slnka. Jedným z najdôležitejších míľnikov pri výskume Slnka bol objav G. E. Hale, ktorý preukázal prítomnosť magnetického poľa v slnečných škvŕnách. Dnes sa tieto štruktúry pozorujú s vysokým priestorovým a časovým rozlíšením prostredníctvom pozemských ďalekohľadov (napr. GREGOR, VTT) a družíc (napr. IRIS, HINODE). Pomocou týchto prístrojov sa určujú fyzikálne parametre slnečnej škvrny pomocou ktorých dochádza ku komplexnému pochopeniu zložitej interakcie medzi plazmou a magnetickým poľom v tejto časti atmosféry Slnka.

Hlavným cieľom tejto práce je využitie fotosférických a chromosférických spektro-polarimetrických pozorovaní slnečnej škvrny získaných s vysokým priestorovým rozlíšením za účelom výskumu jej magnetických a dynamických vlastností. Pre tento účel sú použité pozorovania získané prostredníctvom prístroja GRIS na ďalekohľade GREGOR, pozorovania získané prostredníctvom satelitu HINODE/SOT a slit-jaw snímky nasnímané prostredníctvom satelitu IRIS. Jedná sa o simultánne pozorovanie získané prostredníctvom viacerých prístrojov.

V prvej kapitole tejto práce je uvedený prehľad o základných poznatkoch o slnečných škvŕnách. Veľký dôraz sa kladie na popis fyzikálnych vlastností týchto štruktúr, hlavne popis magnetického poľa vo fotosfére a chromosfére. V druhej kapitole je popísaná teória polarizácie svetla pomocou Stokesových parametrov a vznik polarizácie svetla prostredníctvom magnetického poľa. Druhá časť kapitoly opisuje jednotlivé fyzikálne javy, ktoré umožňujú určovať parametre magnetického poľa v pozorovaných oblastiach slnečnej atmosféry. V tretej kapitole sú opísané prístroje pomocou, ktorých boli namerané dáta. V štvrtej kapitole sú zhrnuté informácie

o nameraných dáta a spôsob, akým boli získané. Zároveň je v tejto časti popísaná tvorba analyzovaných spektrálnych čiar a ich vlastnosti. Taktiež je uvedený stručný opis spracovania získaného pozorovania. V ďalšej kapitole sú zhrnuté výsledky získané analýzou spektrálnych čiar, ktoré boli získané pomocou inverzných kódov. A v poslednej kapitole sú diskutované získané výsledky a porovnané s výsledkami publikovanými v rôznych prácach.

1. Prehľad súčasného stavu výskumu slnečných škvŕn

Na slnečnom disku sa vyskytujú oblasti so zníženou intenzitou vyžarovania v porovnaní s okolitou atmosférou. Tieto štruktúry sa nazývajú slnečné škvŕny. Hlavné časti slnečnej škvŕny sa nazývajú umbra a penumbra. Umbra tvorí vnútornú časť slnečnej škvŕny. Táto oblasť je charakteristická najnižšou intenzitou vyžarovania v porovnaní s okolitou atmosférou. Druhá štruktúra ohraničuje túto tmavú oblasť a nazýva sa penumbra (Solanki, 2003). Penumbra je charakteristická svojou filamentárnou štruktúrou.

Slnečné škvŕny sú oblasti s prítomnosťou silného magnetického poľa (detailnejší popis vlastností magnetického poľa v slnečných škvŕnách je uvedený v samostatnej kapitole 1.1), ktoré ovplyvňuje teplotu plazmy v tejto časti slnečnej atmosféry. Priemerná teplota v umbre slnečnej škvŕny dosahuje len približne 3700 K. Smerom k okraju škvŕny teplota postupne narastá, až sa v oblasti vonkajšej penumbry vyrovná priemernej teplote pokojnej fotosféry. Efektívna teplota pokojnej fotosféry je pritom 6700 K. Fyzikálne vysvetlenie nízkej teploty plazmy v oblasti slnečnej škvŕny je založené na argumente, že magnetické pole zabráňuje konvektívnym prúdom z podpovrchových vrstiev dosiahnuť povrch Slnka. Dôsledkom toho je, že v týchto oblastiach je obmedzený prenos energie z podpovrchových častí na povrch Slnka, čo vedie k zníženiu teploty v tejto časti slnečnej atmosféry v porovnaní s okolím. Slnečné škvŕny sa v dôsledku toho javia ako tmavé štruktúry (Solanki, 2003).

V penumbre slnečnej škvŕny je pozorované prúdenie plazmy, ktoré sa nazýva Evershedov tok. Evershedov tok je možné najzreteľnejšie sledovať, ak slnečná škvŕna leží pri okraji slnečného disku. Prejavuje sa totiž ako horizontálny pohyb hmoty pozorovaný prostredníctvom Dopplerovho posunu spektrálnych čiar. Pozorované spektrálne čiary majú navyše asymetrický tvar. Na úrovni fotosféry je orientácia tohto toku hmoty smerom k vonkajšej penumbre. Tok hmoty pozorovaný pri okraji slnečného disku je viditeľný v rôznych výškach fotosféry (Rimmele, 1995). Pozorovania preukázali hodnoty rýchlosti v intervaloch od 1 až do 3 km/s (Solanki, 2006). Vo vnútornej penumbre Evershedov tok stúpa do výšky, teda od povrchu Slnka a vo vonkajšej penumbre Evershedov tok klesá a teda smeruje k povrchu Slnka (Franz a Schlichenmaier, 2009; Tiwari a kol. 2013, 2015, van Noort a kol. 2013). Na hranici

slnečnej škvrny a pokojného Slnka tok hmoty náhle nekončí, ale pokračuje ďalej a vytvára oblasť nazývanú moat (Solanki a kol. 1994; Rezaei a kol. 2006; Shimizu a kol. 2008a; Martinez Pillet a kol. 2009). Evershedov tok je úzko previazaný s jemnou štruktúrou penumbry a teda aj s magnetickým poľom nachádzajúcim sa v penumbre. Evershedov tok je sústredený do penumbrálnych filamentov, ktoré sa vo vnútornej penumbre javia ako jasné štruktúry a smerom k vonkajšiemu okraju penumbry sa ich jas zmenšuje. Tieto štruktúry zodpovedajú slabšiemu a takmer horizontálnemu magnetickému poľu.

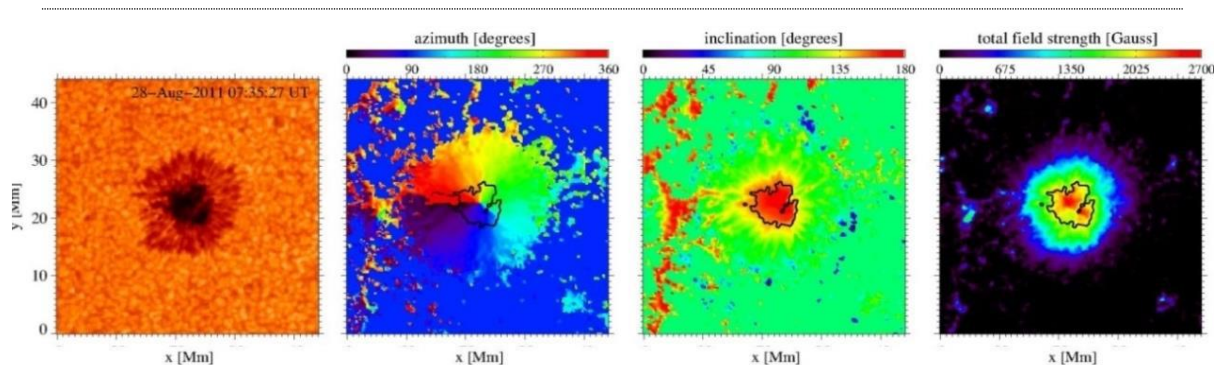
Pozorovania penumbry na úrovni chromosféry preukázali existenciu pohybu hmoty, ktorý je orientovaný v opačnom smere ako Evershedov efekt vo fotosfére. Tento pohyb sa preto nazýva inverzný Evershedov efekt (Evershed 1910; St. John 1911a, 1911b; Maltby 1975; Tsiropoula 2000). Spektroskopické pozorovania preukazujú, že veľkosti rýchlostí pohybov hmoty dosahujú pri inverznom Evershedovom efekte hodnoty v intervale od 3 až do 7 km/s (Haugen 1969; Dialetis a kol. 1985; Dere a kol. 1990). Tento tok sa pozoruje pozdĺž fibríl, ktoré tvoria superpenumbru. Životnosť fibríl je 10 až 60 minút (Beck a kol., 2020). Superpenumbra je vláknitá štruktúra, ktorá tvorí systém menej naklonených magnetických silotrubíc. Prepojenie inverzného Evershedovho efektu a topológie magnetického poľa je dobre známe. Všeobecný predpoklad o inverznom Evershedovom efekte je, že jeho hlavou príčinou je sifónový tok pozdĺž oblúkových magnetických siločiar, ktoré prepájajú oblasť so silným magnetickým poľom v slnečnej škvrne s oblasťou mimo škvrny (oblasť so slabším magnetickým poľom). Rôzne hodnoty magnetického tlaku pri základniach ukotvení magnetických siločiar a nízka teplota v penumbre vedie k rozdielnemu tlaku plynu smerujúcemu k vnútornej základni, ktorý riadi tok pozdĺž magnetických siločiar (Beck a kol., 2019).

Okrem fotosférického Evershedovho toku a inverzného Evershedovho toku sa vo vyšších vrstvách slnečnej atmosféry (chromosfére, prechodovej vrstve a nízkej časti koróny) pozorujú vysokorýchlostné toky smerujúce smerom k slnečnému povrchu cez slučky v aktívnych oblastiach (Degenhardt, 1989; McClymont, 1989; Mariska, 1988). Tieto toky majú životnosť niekoľko hodín (Gebbie a kol., 1981, Dere, 1982, Kjeldseth-Moe a kol. 1988). Takéto pohyby sa často pozorujú v spektrálnych čiarach, ako sú C IV 1548 Å alebo O IV 548 Å (Teriaca et al., 1999; Brekke et al., 1997; Peter & Judge, 1999). Prostredníctvom spektrálnej čiary He I 10830 Å bol prvý krát

vysokorýchlostný tok plazmy v aktívnych filamentoch pozorovaný a popísaný v prácach Penn & Kuhn (1995); Muglach a kol. (1997); Muglach & Sutterlin (1998). Navyše, v spektrálnej čiare He I 10830 Å sa objavuje aj duálny tok, ktorý pozostáva z jednej dynamickej komponenty a jednej statickej. V takomto prípade pozorované rýchlosti presahujú rýchlosť zvuku v tej časti chromosféry, kde sa tvorí spektrálna časť He I 10830 Å. (pozri kapitolu 4.1). Statickú komponentu atmosféry reprezentuje tok hmoty, ktorý nedosahuje rýchlosť zvuku v danej vrstve atmosféry. Hodnoty vysokorýchlostného toku v aktívnych oblastiach dosahujú veľkosti až 42 km/s (Schmidt a kol. 2000). Výrazný vysokorýchlostný tok s hodnotou 40 km/s je analyzovaný v práci Teriaca a kol. (2003), ktorý bol pozorovaný pri erupciách v aktívnych oblastiach. V práci Laag (2006) je analyzovaný vysokorýchlostný tok, ktorý bol pozorovaný v blízkosti aktívnej oblasti. Tento tok bol označený ako duálny keďže sa predpokladá, že sa tvorí v dvoch rôznych vrstvách atmosféry. Namerané hodnoty Dopplerovských rýchlostí v tomto prípade nadobúdali veľkosť 35 km/s pre dynamickú zložku atmosféry a 6 km/s pre statickú zložku atmosféry. Získané pozorovanie obsahovalo cenné spektropolarimetrické dáta, z ktorých bolo možné určiť spojitosť medzi vektorom magnetickej indukcie a duálnym tokom. Veľkosť magnetického poľa v skúmanej časti atmosféry dosahovala hodnotu 1200 G pre dynamickú a pre statickú zložku atmosféry dosahuje vektor magnetického poľa hodnotu 720 G za predpokladu existencie neučesaného modelu chromosféry. Vektor magnetického poľa v statická zložka atmosféry dosahuje hodnoty inklinácie od 10° do 40° a je viac vertikálna ako dynamická zložka atmosféry. Uvažovaním chromosféry, ktorú popisuje cloud model, tak veľkosť magnetického poľa je 625 G a inklináčny uhol je 61 ° ako pre statickú, tak aj dynamickú zložku atmosféry.

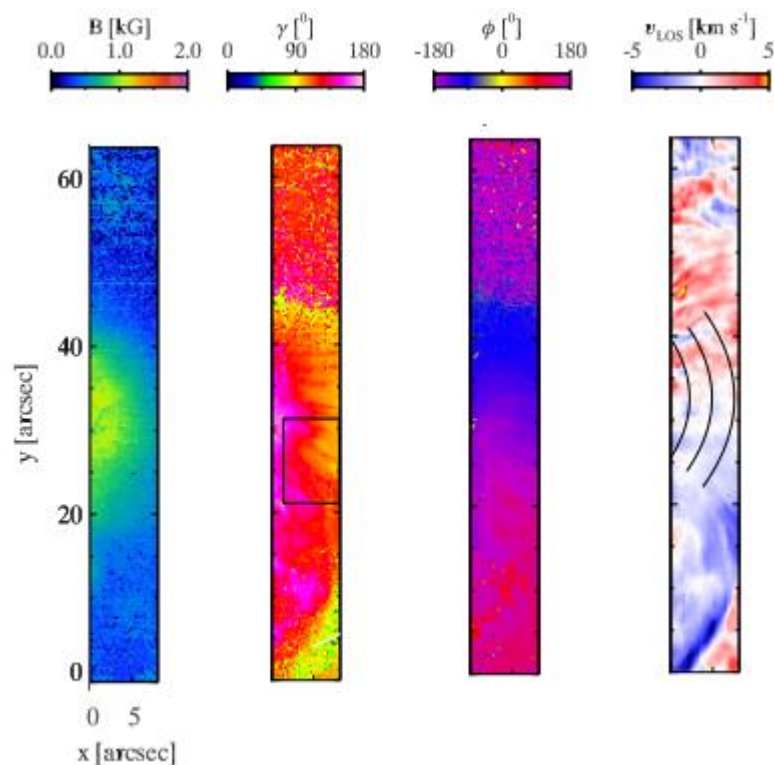
1.1 Magnetické pole slnečnej škvrny

Ako už bolo uvedené, slnečné škvrny sú oblasti so silným magnetickým poľom. Prvým kto popísal spôsob merania magnetického poľa a určil veľkosť vektora magnetickej indukcie v slnečných škvrnách bol Hale (1908). Slnečné škvrny sú považované za typické fotosférické štruktúry, ale sú pozorované aj v chromosfére, prechodovej vrstve a aj koróne. V tejto práci je uvedený opis magnetického poľa pre fotosféru a chromosféru.



Obrázok č. 1: Morfológia pozorovanej škvrny a hodnoty parametrov vektora magnetickej indukcie odvodené z pozorovaní získaných dňa 28. augusta 2018. Prvý obrázok reprezentuje meranie intenzity spektrálneho kontinua pričom zobrazuje detailnú morfológiu pozorovanej škvrny. Druhý až štvrtý obrázok predstavuje: azimut, inklináciu a absolútnu veľkosť vektora magnetickej indukcie v mieste pozorovania. Čierna kontúra reprezentuje intenzitnú hranicu umbry a penumbry. V pravom hornom rohu intenzitnej mapy je znázornený čas a dátum pozorovania (Benko, 2017).

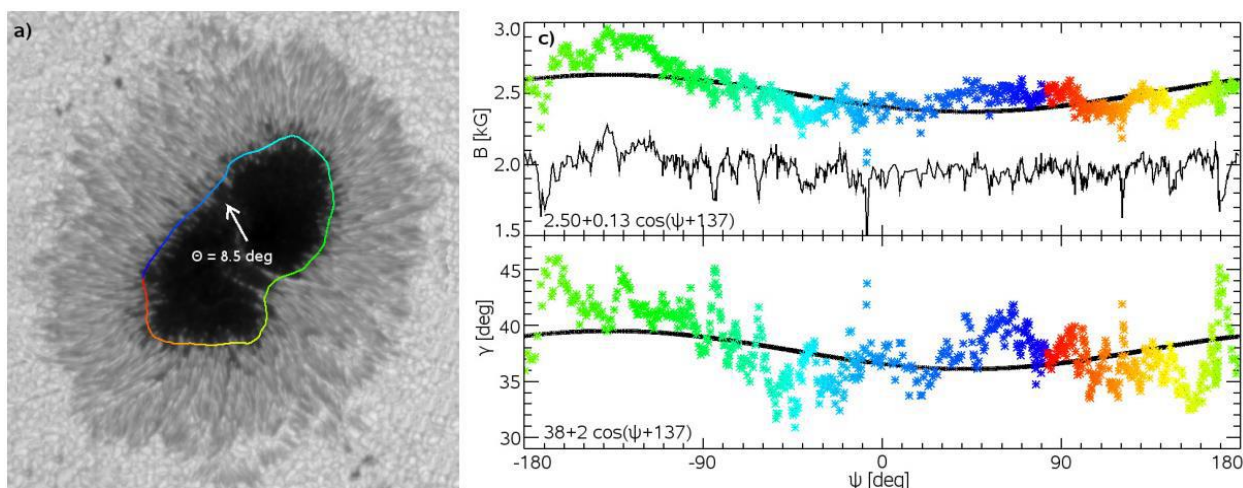
Opis typických vlastností fotosférického magnetického poľa v slnečnej škvрни je demonštrovaný príkladom pozorovania symetrickej slnečnej škvrny zobrazenej na obrázku č.1 (Benko, 2017). Pozorovanie bolo získané s vysokým priestorovým a spektrálnym rozlíšením pomocou prístroja SOT/SP (Tsuneta a kol., 2008) na družici Hinode (Kosugi a kol., 2007). Na obrázku č. 1 sú zobrazené zložky vektora magnetickej indukcie vo sférickej súradnicovej sústave (azimut, inklinácia a veľkosť vektora magnetickej indukcie). Uvedený výsledok ukazuje, že najsilnejšie magnetické pole je v centre pozorovanej slnečnej škvrny a v tomto prípade dosahuje hodnotu približne 2700 G. Smerom k okraju slnečnej škvrny veľkosť indukcie magnetického poľa klesá až k hodnote 600 G. Najväčšie hodnoty magnetického poľa sú v miestach s najmenšou hodnotou intenzity vyžarovania. Inklinácia vektora magnetickej indukcie dosahuje v centre slnečnej škvrny hodnoty na úrovni 180° a smerom k okraju škvrny klesá k hodnote 90°. Hodnoty 180° zodpovedajú miestam, kde je vektor magnetickej indukcie kolmý na povrch Slnka a smeruje k pozorovateľovi. Hodnota 90° zodpovedá miestam, kde je smer vektora magnetickej indukcie horizontálny. Umbre teda odpovedá vertikálne magnetické pole. V penumbre sa zas nachádza horizontálne magnetické pole. Takýto tvar magnetického poľa je typickým znakom symetrických a stabilných slnečných škvŕn. Treťou zložkou vektora magnetickej indukcie je azimut. Tento uhol opisuje smerovanie vektora v rámci dvojrozsmernej horizontálnej plochy v intervale



Obrázok. č. 2: Hodnoty vektora magnetickej indukcie odvodené z pozorovaní získaných 25. júna 2014 v spektrálnej čiare He I 10830 Å. Prvý obrázok reprezentuje veľkosť vektora magnetickej indukcie, druhý panel zodpovedá inklinácii vektora magnetickej indukcie, tretí obrázok reprezentuje azimut vektora magnetickej indukcie a štvrtý obrázok opisuje Dopplerovskú rýchlosť (Joshi a kol., 2016).

hodnôt od 0° do 360° . V prípade slnečnej škvvrny s negatívnou polaritou je zaužívaná konvencia podľa ktorej uhol azimutu narastá v smere proti pohybu hodinových ručičiek.

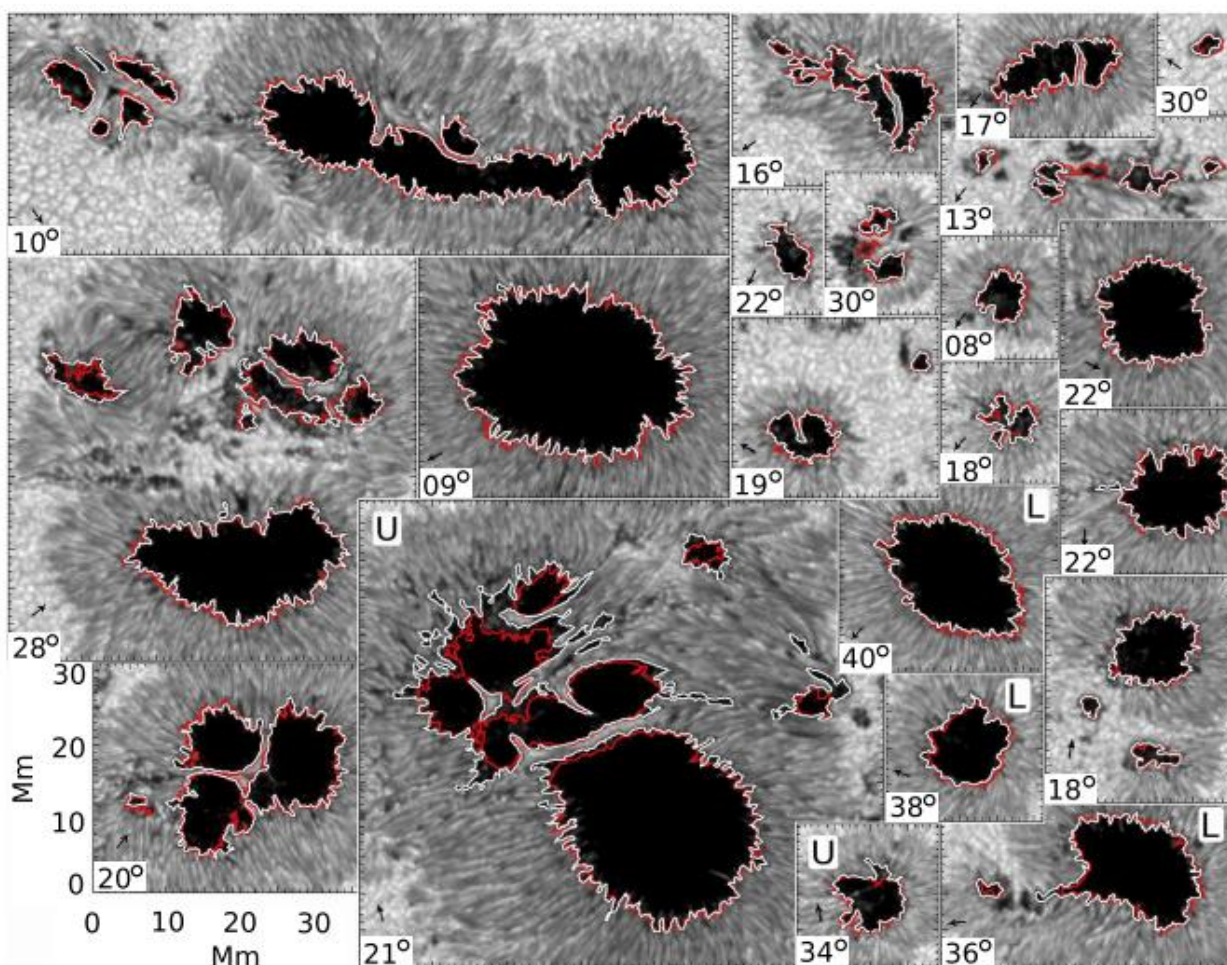
Doterajšie výsledky výskumu slnečných škvŕn v chromosfére naznačujú, že magnetické pole v slnečných škvŕnách je v chromosfére slabšie ako v nižších vrstvách slnečnej atmosféry. Príklad slnečnej škvvrny pozorovanej v chromosfére, presnejšie v spektrálnej čiare He I 10830 Å je zobrazený na obrázku č. 2. V konkrétnom prípade veľkosť vektora magnetickej indukcie je na obrázku č. 2 zobrazená v intervale 0 až 2000 G. V umbre slnečnej škvvrny je veľkosť magnetického poľa 1000 G a smerom do penumbry hodnota veľkosti magnetického poľa klesá podobne ako to je pozorované vo fotosfére. Vo všeobecnosti inklinálny uhol vektora magnetického poľa nadobúda v umbre väčšie hodnoty (vektor magnetickej indukcie je viac horizontálny v porovnaní



Obrázok č. 3: a) Slnečná škvrna pozorovaná 14.11.2006 pomocou prístroja SOT umiestneného na družici HINODE. V znázornenej slnečnej škvrne je farebnou čiarou označená hranica UP. c) Horný graf: Hodnoty veľkosti vektora magnetickej indukcie s označené farebnou čiarou. Použitá farba pritom odpovedá umiestneniu hodnôt na hranici UP. Znáznornená hrubá čierna čiara v grafe zobrazuje hodnoty veľkosti magnetickej indukcie určené pomocou funkcie znázornenej v ľavom-dolnom rohu príslušného grafu. Hodnoty znázornené tenkou čiernou čiarou vyjadrujú vertikálnu zložku vektora magnetickej indukcie B_z . Dolný graf: Hodnoty inklinácie vektora magnetickej indukcie sú znázornené farebnou čiarou. Farba hodnôt opäť odpovedá umiestneniu pozdĺž hranice UP. Hrubá čierna čiara vyjadruje hodnoty inklinácie vypočítané pomocou funkcie zobrazenej v ľavom-dolnom rohu príslušného grafu (Jurčák, 2011).

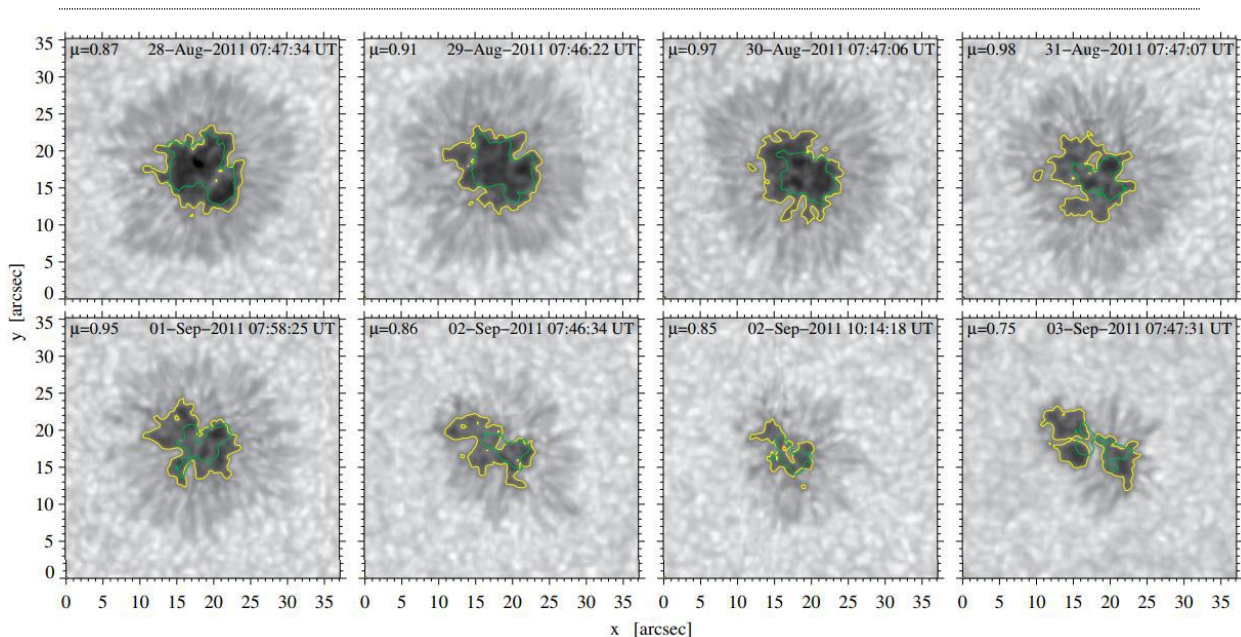
s hodnotami inklináčného uhla vektora magnetickej indukcie vo fotosfére (vektor magnetickej indukcie je viac vertikálny). Pre konkrétny príklad uvedený na obrázku č. 2 inklináčny uhol vektora magnetickej indukcie v umbre dosahuje 180° a smerom do penumbry hodnota inklinácie klesá na hodnotu 90° . Azimutálny uhol vektora magnetickej indukcie sa nachádza v intervale od -180° až do 180° .

V práci Jurčák (2011) sú študované zmeny veľkosti magnetického poľa a inklinácie na intenzitnej hranici umbry a penumbry (UP), ktorá bola definovaná ako 0,5 intenzity lokálneho kontinua. Príkladom je skúmaná slnečná škvrna vyobrazená na obrázku č.3. V pridružených grafoch sú vyobrazené hodnoty veľkosti vektora magnetickej indukcie a hodnoty inklinácie. Všetky tieto hodnoty sú znázornené v závislosti od pozičného uhla miesta na hranici umbry a penumbry. Farby znázornených hodnôt veľkosti vektora magnetickej indukcie a hodnôt inklinácie odpovedajú polohe pozdĺž hranici UP. Vyobrazená hrubá čierna krivka odpovedá



Obrázok č. 4: Vybrané analyzované slnečné škvvrny zobrazené s rovnakou priestorovou škálou. Biele kontúry označujú hranice UP s hodnotou 50% intenzity pokojného Slnka. Červené kontúry sú definované isokontúry s hodnotou $B_z = 1867$ G (Jurčák, 2018).

aproximácii nameraných hodnôt goniometrickou funkciou. Tvar goniometrickej funkcie je znázornený v ľavom dolnom rohu dielčích obrázkov. V časti grafu so znázornenými hodnotami veľkosti vektora magnetickej indukcie sú vyobrazené aj hodnoty vertikálnej zložky magnetického poľa B_z pozdĺž vyznačenej hranice UP. Bolo zistené, že vertikálna komponenta magnetického poľa B_z na hranici UP je konštantná, respektíve, v jej hodnotách sa prejavujú len veľmi malé variácie pre všetky pozičné uhly. Konštantná hodnota B_z je teda preukázateľne vhodná na definíciu stabilnej hranice UP. Tento fakt má dôsledky pre numerické simulácie slnečných škvŕn. Konštantná hodnota B_z má vplyv na formovanie penumbry. Ak je hodnota B_z menšia ako hraničná veľkosť, tak prebieha penumbrálny mód magneto-konvekcie, ktorú opisuje model penumbry, tzv. model padajúcej magnetickej silotrubice (Jurčák, 2015). Materiál vystupujúci na povrch pozdĺž magnetických silotrubíc sa ochladí vyžiarovaním energie. Následne sa zväčší hustota materiálu v magnetickej silotrubici a pôsobí na magneticкую silotrubicu svojou



Obrázok č. 5: Časový vývoj slnečnej škvrny pozorovanej v aktívnej oblasti NOAA 11277 počas siedmych dní. Pozorovanie prebiehalo od 28. augusta 2011 do 3. septembra 2011. Všetky pozorovania sú normalizované na lokálne kontinuum. Žltá kontúra reprezentuje intenzitnú hranicu UP určenú ako $0.5 I/I_C$. Zelená kontúra vyobrazuje hranicu UP určenú pomocou vertikálnej komponenty magnetického poľa B_z s hodnotou 1867 G (Benko a kol., 2018).

váhou. To spôsobí, že sa magnetická silotrubica ohne pod vplyvom hmotnosti celkového materiálu (Wentzel, 1992). Jurčák a kol. (2018) prezentovali výsledky štatistickej analýzy vlastností magnetického poľa pre viac ako 100 škvŕn, ktorých časť je zobrazená na obrázku č. 4. Pri analýze definovali intenzitnú hranicu UP ako oblasť s hodnotou 0.5 intenzity kontinua pokojného Slnka. Porovnaním tvaru hranice UP, ktorá je definovaná pomocou intenzity kontinua s tvarom hranice UP, ktorá je určená prostredníctvom vertikálnej zložky vektora magnetickej indukcie sa zistilo, že tieto hranice sa najviac zhodujú (sú takmer identické) ak je hodnota B_z stanovená na 1867 G. Zároveň bola potvrdená nemennosť tejto hodnoty. Empirický zákon sa prezentuje ako kritérium stability v slnečnej škvŕne a protoškvŕne. Póry a umbrálne oblasti s hodnotou vertikálneho magnetického poľa väčšou ako 1867 G sú stabilné, ale oblasti dosahujúce hodnoty menšie ako 1867 G sú nestabilné (Jurčák, 2018).

Benko a kol. (2018) skúmali kritérium stability na sérii pozorovaní zachytávajúcich rozpad slnečnej škvrny počas siedmych dní. Tieto pozorovania sú znázornené na obrázku č. 5. Séria pozorovaní bola získaná pomocou družice Hinode v spektrálnej čiare Fe I 6302,5 Å. Heliocentrický uhol a dátum pozorovania je uvedený

v hornej časti jednotlivých obrázkov. Intenzitné kontúry hranice UP s hodnotou $0.5 I_c$ sú zvýraznené žltou farbou. Jurčákové kritérium s hodnotou 1867 G je zvýraznené zelenou farbou. Pre tento uvedený prípad rozpadávajúcej sa slnečnej škvrny bolo zistené, že Jurčákové kritérium neplatí. Taktiež bolo zistené, že neexistuje ani žiadna iná konštantná hodnota B_z , ktorá by zodpovedala intenzitnej hranici UP pre všetky pozorované dni (Benko a kol., 2018).

2. Spôsob merania magnetických polí

2.1 Opis polarizácie svetla pomocou Stokesových parametrov

Prostredníctvom teórie elektromagnetického poľa je svetlo možné popísať vo forme priečnej elektromagnetickej vlny. Priečna elektromagnetická vlna pozostáva z dvoch komponentov, elektrickej a magnetickej zložky, ktoré kmitajú v rovinách kolmých na smer šírenia vlny.

Jednou zo základných vlastností elektromagnetického vlnenia je, že môže dôjsť k jeho polarizácii. Pod touto vlastnosťou sa myslí stav, kedy jednotlivé komponenty elektromagnetickej vlny už nekmitajú vo všetkých, ale len vo vybranom smere. K tomuto javu môže dôjsť napríklad pri prechode elektromagnetickej vlny cez dve rozličné optické prostredia alebo prechodom cez oblasť s magnetickým poľom.

Na opis polarizovaného svetla sa v astronómii používajú Stokesové parametre. Stokesové parametre sú definované vzťahmi:

$$I = E_{12} + E_{22} \quad (1)$$

$$Q = E_{12} - E_{22} \quad (2)$$

$$U = 2E_1E_2\cos(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (3)$$

$$V = 2E_1E_2\sin(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (4)$$

Stokesov parameter I charakterizuje celkovú intenzitu dopadajúceho žiarenia. Parametre Q a U udávajú lineárnu polarizáciu zaznamenávaného žiarenia (rozdiel medzi lineárne polarizovanými komponentami x a y opisuje parameter Q , parameter U udáva rozdiel medzi lineárne polarizovanými komponentami meranými pod uhlami 45° a 135° od osi x v kladnom smere, t.j. proti smeru hodinových ručičiek). Parameter V udáva rozdiel medzi ľavotočivou a pravotočivou kruhovou polarizáciou dopadajúceho žiarenia. Takto určené Stokesové parametre I , Q , U , V úplne a jednoznačne charakterizujú akýkoľvek druh polarizácie svetla.

Pri analýze pozorovaní je nutné modifikovať namerané Stokesové parametre do referenčného smeru. V slnečnej fyzike je referenčný smer stanovený Stokesovým parametrom Q pre ktorý platí $Q > 0$. Transformácia do referenčného smeru sa uskutočňuje pootočením Stokesových parametrov o uhol α z pozorovanej súradnicovej sústavy (I , Q , U , V) do referenčnej súradnicovej sústavy (I' , Q' , U' , V'). Takto opísanú transformáciu je možné zapísať nasledovne:

$$I' = I \quad (5)$$

$$Q' = Q\cos(2\alpha) + U\sin(2\alpha) \quad (6)$$

$$U' = -Q\sin(2\alpha) + U\cos(2\alpha) \quad (7)$$

$$V' = V \quad (8)$$

Parametre I' , V' poukazujú na to, že sú invariantné voči zmene referenčného smeru. Kým parametre lineárnej polarizácie sú vzájomne previazané uhlom 2α v rovine $Q-U$. Pričom hodnota celkovej lineárnej polarizácie zostáva nezmenená. Uhol α dosahuje hodnoty v intervale $\langle 0^\circ ; 180^\circ \rangle$ a je výtýčený priamkou, ktorá spája stred pozorovanej oblasti so stredom slnečného disku a priamkou, v ktorej Stokesov parameter lineárnej polarizácie Q nadobúda kladné hodnoty ($Q > 0$). Uhol α sa meria v protismere pohybu hodinových ručičiek (Landi Innocenti, 2004).

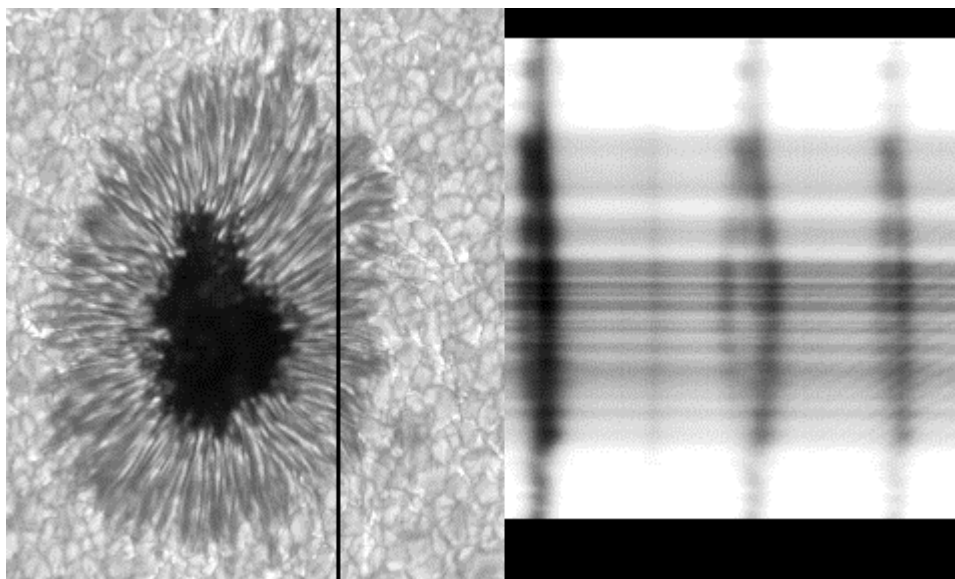
2.2 Zeemanov jav

Zeemanov jav je úkaz pri ktorom dochádza ku štiepeniu energetických hladín v atóme v dôsledku pôsobenia vonkajšieho magnetického poľa. Rozštiepenie energetickej hladiny závisí od hodnoty jej magnetického kvantového čísla. Energia potrebná na prechod medzi rôznymi energetickými hladinami sa pôsobením vonkajšieho magnetického poľa zmení o hodnotu danú vzťahom

$$E = \mu_B B m_l, \quad (9)$$

kde m_l - magnetické kvantové číslo, μ_B - Bohrov magnetrón, B - magnetická indukcia vonkajšieho poľa.

Rozlišujú sa dva typy Zeemanovho javu: normálny a abnormálny Zeemanov jav. Normálny Zeemanov jav charakterizuje rozštep energetickej hladiny v atóme, ktorý je závislý od kvantového magnetického čísla danej energetickej hladiny. Pri abnormálnom Zeemanovom jave je rozštep energetických hladín závislý od spinového momentu a kvantového magnetického čísla danej hladiny. Veľkosť rozštepú spektrálnych čiar a polarizácia žiarenia je závislá od veľkosti vektora indukcie magnetického poľa v miestach, ktorými sa žiarenie šíri ako aj od uhla, ktorý zvierá vektor magnetickej indukcie so smerom šírenia sa žiarenia. Rozoznávame dva hraničné prípady šírenia žiarenia. Ak sa žiarenie šíri v smere kolmom na magnetické siločiar, tak sú viditeľné rozštiepené komponenty spektrálnej čiary spoločne s pôvodnou spektrálnou čiarou. V takomto prípade je žiarenie lineárne polarizované. V prípade, keď sa žiarenie šíri v smere rovnobežnom s magnetickými siločiarami, tak sú viditeľné



Obrázok č. 6: Vyobrazený Zeemanov rozštep spektrálnych čiar vplyvom silného magnetického poľa. Vľavo: Snímka slnečnej škvrny, zdroja silného magnetického poľa, s vyznačenou polohou štrbiny spektrografu (vertikálna čierna čiara), ktorý rozkladá svetlo na jeho jednotlivé spektrálne zložky. Vpravo: Výsledné spektrum s viditeľným rozštepom jednotlivých spektrálnych čiar v oblastiach, ktoré priestorovo zodpovedajú slnečnej škvrne (<http://science.nasa.gov/>).

len rozštiepené komponenty spektrálnej čiary. V takomto prípade je žiarenie kruhovo polarizované. Vzdialenosť rozštiepených komponent spektrálnej čiary od pôvodnej spektrálnej čiary je rovnaká.

Zeemanov jav je veľmi dobre využiteľný pri meraniach v oblastiach so silným magnetickým poľom, t.j. v miestach keď je indukcia magnetického poľa väčšia ako 100 G. Takéto polia sa vyskytujú v aktívnych oblastiach. Jeden takýto príklad pozorovania Zeemanovho javu v aktívnej oblasti je vyobrazený na obrázku č.6. Štúdiom slnečnej atmosféry sa zistilo, že aj malé koncentrácie magnetických polí v intergranulárnych priestoroch pokojnej fotosféry môžu dosahovať takéto vysoké hodnoty.

2.3 Hanle efekt

Ďalší jav pomocou, ktorého sme schopní určiť veľkosť magnetického poľa sa volá Hanleho efekt. Tento jav charakterizuje zmenu atómovej polarizácie atómových hladín vplyvom nakloneného magnetického poľa. Magnetické pole je možné vypočítať pomocou nasledovnej rovnice:

$$2\pi\nu_L g_J = 8,79 \cdot 10^6 B_H g_J \approx 1 t_{life}, \quad (10)$$

kde B_H reprezentuje kritickú veľkosť indukcie magnetického poľa, pri ktorom sa Hanle efekt prejaví. Parameter B_H je určený v Gaussoch. Ďalšími členmi v rovnici sú: g_J - Landé faktor, ν_L popisuje Larmorovu frekvenciu a t_{life} reprezentuje dĺžku zotrvania elektrónu na energetickej hladine J . Táto veličina je určená v sekundách.

Dôsledkom rozptylu svetla magnetickým poľom je ovplyvnená polarizácia svetla a vzniká lineárne polarizované svetlo. Prostredníctvom takto vzniknutého lineárneho polarizovaného svetla je možné určiť veľkosť magnetického poľa, ktoré je rádovo rovnaké ako kritické magnetické pole. Ak sú magnetické polia slabšie ako $0.1 B_H$, tak lineárna polarizácia rozptylného svetla nie je pozmenená. Ak je magnetické pole väčšie ako $10 B_H$, tak hovoríme o saturovanom magnetickom poli. V intervale hodnôt 0.1 až $10 B_H$ je lineárne polarizované svetlo citlivé na smer vektora magnetického poľa (Trujillo Bueno, 2001).

Hanleho efekt je možné použiť na meranie magnetických polí s veľkosťou magnetickej indukcie na úrovni len niekoľko desiatok Gaussov. Pre magnetické polia s takouto indukciou je Zeemanov jav nepoužiteľný. Takto slabé magnetické polia sa nachádzajú na Slnku napríklad v pokojných oblastiach chromosféry.

3. Ciele práce

Dizertačná práca sa venuje štúdiu magnetických a dynamických vlastností javov v slnečnej atmosfére, konkrétne slnečných škvŕn. Výskumu slnečných škvŕn sa venujú astronómovia niekoľko storočí. V posledných rokoch sa výskum zameriaval hlavne na štúdium pozorovaní získaných s vysokým priestorovým rozlíšením. Výskum slnečných škvŕn je dôležitý pre pochopenie vlastností a vplyvu ich magnetického poľa na atmosféru Slnka.

Ako hlavné ciele výskumu sú stanovené:

- Štúdium vlastností vektora magnetickej indukcie v oblasti slnečnej škvŕny pomocou analýzy spektrálnych čiar formujúcich s vo fotosfére a chromosfére.
- Štúdium prepojenia magnetického poľa medzi fotosférou a chromosférou.
- Štúdium dynamických vlastností pozorovanej slnečnej škvŕny.
- Interpretácia získaných výsledkov a ich porovnanie s predchádzajúcimi zisteniami.

4. Pozorovací materiál

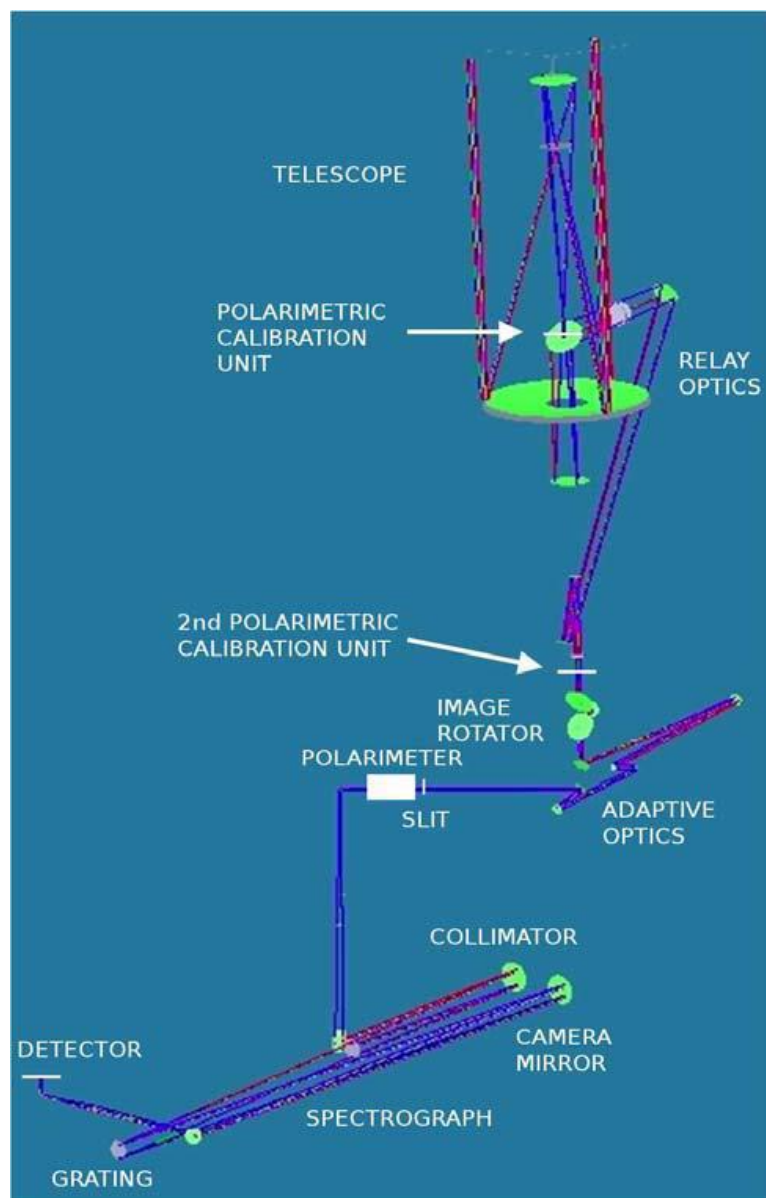
Merania analyzované v tejto práci boli získané prostredníctvom viacerých prístrojov: ďalekohľadu GREGOR so spektrografom GRIS, družice IRIS a satelitu Hinode, na ktorom je umiestnený ďalekohľad SOT. Všetky tieto prístroje patria medzi jedny z najlepších zariadení používaných v súčasnosti na výskum Slnka. Kľúčovým prístrojom z pohľadu analýzy dát v tejto práci je ďalekohľad GREGOR. Prostredníctvom družíc HINODE a IRIS boli získané doplnkové merania. Pozemské pozorovania uskutočnené pomocou ďalekohľadu GREGOR boli získané v rámci pozorovacej kampane podporenej projektom SOLARNET. Dáta z družíc HINODE a IRIS boli namerané ako súčasť pozorovacieho programu HOP 307.

4.1 Ďalekohľad GREGOR

Najväčším slnečným ďalekohľadom v Európe je ďalekohľad GREGOR. S priemerom primárneho zrkadla 1,5 m je zaradený medzi štyri najväčšie ďalekohľady určené na výskum Slnka na svete. Ďalekohľad je situovaný na Observatóriu del Teide (Tenerife, Španielsko). Na jeho konštruovaní sa podieľali zväčša nemecké inštitúcie (KIS, AIP, AIG, MPS) s partnermi zo Španielska (IAC), Švajčiarska (IRSOL) a Českej republiky (AV ČR).

Ďalekohľad GREGOR bol navrhnutý tak, aby dosahoval excelentné polarimetrické vlastnosti. To umožňuje získavať presné merania indukcie magnetického poľa rôznych magnetických štruktúr v rôznych výškach slnečnej atmosféry vo viditeľnej a blízkej infračervenej oblasti spektra s vysokým priestorovým rozlíšením (Schmidt a kol., 2012). Takéto pozorovania sú uskutočňované pomocou zaznamenávania Stokesových parametrov.

Optická schéma ďalekohľadu GREGOR je zobrazená na obrázku č. 7. Ďalekohľad je navrhnutý ako dvojité Gregoryho systém s tromi zrkadlami (Soltau a kol. 2012). Slnečné svetlo dopadá na primárne zrkadlo ďalekohľadu. Priemer primárneho zrkadla je 1,5 m a jeho ohnisková vzdialenosť je 2,5 m. Svetlo sa po odraze od primárneho zrkadla koncentruje v primárnom ohnisku. V tomto mieste je inštalovaná



Obrázok č. 7: Optická schéma slnečného ďalekohľadu GREGOR a prístroja GRIS (Collados a kol., 2012). Telescope – teleskop, polarimetric calibration unit – polarimetrická kalibračná jednotka, relay optics – prenosová optika, image rotator – rotátor obrazu, adaptive optics adaptívna optika, polarimeter – polarimeter, colimator – kolimátor, camera mirror – kamerové zrkadlo, spectrograph – spektrograf, grating – mriežka, detector - detektor

clona so zrkadlovým povrchom a vodným chladiacim systémom. Jej úlohou je ďalej prepustiť len malú časť dopadajúceho slnečného svetla so žiarivým výkonom menej ako

2 kW. Následne svetlo prechádza na druhé zrkadlo s eliptickým tvarom, priemerom 0,4 m a ohniskovou vzdialenosťou 0,52 m. V ohnisku sekundárneho zrkadla je umiestnená kalibračná jednotka pre meranie polarizácie (GPU, Hofmann a kol., 2012). Svetlo potom pokračuje k tretiemu zrkadlu, ktoré vytvára konečný obraz. Terciárne zrkadlo je eliptické, s priemerom 0,3 m a ohniskovou vzdialenosťou 1,4 m. Odtiaľ svetlo prechádza systémom zrkadiel a šošoviek do optického laboratória. V optickom laboratóriu sa nachádzajú postfokusové zariadenia spolu s derotátorom obrazu.

Sekundárne a terciárne zrkadlo bolo v čase pozorovania zhotovené z Césickej keramiky. Hlavné pozitíva tohto materiálu sú efektívnejšie chladenie, redukovaný zrkadlový seeing a menšia váha zrkadiel. Primárne zrkadlo ďalekohľadu GREGOR sa ale z tohto materiálu opakovane neporadilo vyrobiť. V dôsledku toho bolo nakoniec skonštruované z nízkoexpanzného sklokeramického materiálu Zerodur (Schmidt a kol., 2012).

Nosná časť ďalekohľadu je umiestnená na alt-azimutálnej montáži. Vlastnosťou tohto typu montáže je, že nekompenzuje otáčanie obrazu Slnka v obrazovej rovine ďalekohľadu počas dňa. Na korekciu tohto nežiaduceho vplyvu sa používa derotátor, ktorý je umiestnený v ohniskovej rovine ďalekohľadu. Spomenutý optický člen pozostáva z troch rôznych zrkadiel, ktoré sú umiestnené v polohe nazývanej K-konfigurácia (Kleint, 2019). Po korekcii rotácie obrazu svetlo prechádza do adaptívnej optiky. V zemskej atmosfére je svetlo ovplyvňované turbulentnými pohybmi vzduchu. Dôsledkom týchto pohybov je, že získaný obraz je deformovaný a rozostrený. Na kompenzovanie vplyvov atmosféry sa používa práve adaptívna optika.

Po prechode svetla adaptívnou optikou postupuje svetlo k systému optických hranolov. Pomocou hranolov sa prerozdeľuje dopadajúce žiarenie medzi postfokusové zariadenia ďalekohľadu GREGOR, menovite: GREGOR Fábry- Perót Interferometer (GFPI, Denker a kol., 2010; Puschmann a kol., 2012), the Broad-Band Imager (BBI, von der Lüche a kol., 2012) a GREGOR infračervený spektrograf (GRIS, Collados a kol., 2012). Prvý hranol navyše posiela svetlo s vlnovou dĺžkou z oblasti 500 nm k wavefront senzoru. Druhý hranol odráža svetlo s vlnovou dĺžkou pod 660 nm k GFPI. Následne svetlo prejde cez štrbinu, ktorá je zároveň prvým optickým členom prístroja GRIS. Všetky tieto prístroje je možné ovládať pomocou kontrolného systému (Halbgewachs a kol., 2012).

4.1.1 Spektrograf GRIS

Postfokusové zariadenie GREGOROV infračervený spektrograf (The GREGOR Infrared Spectrograph, Collados a kol. 2012) je známe aj pod akronymom GRIS. Na jeho vývoji sa podieľalo Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC). Účelom prístroja je získavanie spektro-polarimetrických meraní s vlnovou dĺžkou v intervale od 10000 až do 23000 Å. Najviac používaným spektrálnym oknom je oblasť v okolí 10000 Å, ktorá obsahuje spektrálne čiary fotosféry Si I, Ca I a spektrálnu čiaru chromosféry He I. Ďalšou možnosťou pre pozorovanie je spektrálna oblasť v okolí fotosférickej spektrálnej čiary neutrálneho železa s vlnovou dĺžkou 15 650 Å. Menej využívaná na pozorovania je spektrálna oblasť v okolí vlnovej dĺžky 2230 Å (Collados a kol., 2012).

V predchádzajúcej kapitole bola stručne opísaná optická schéma ďalekohľadu GREGOR, v ktorej závere bolo uvedené, že svetlo prechádza systémom optických elementov a dopadá na štrbinu prístroja GRIS. Odtiaľ svetlo prechádza na polarimeter. Polarimeter sa skladá z dvoch fotoelektrických tekutých kryštálov a polarizačného deliča obrazu (beamsplittru). V ďalšom kroku svetlo preniká do spektrografu. Spektrograf sa skladá z dvoch mimoosých parabolických zrkadiel s ohniskovou vzdialenosťou 5,986 m a 5,976 m. Tieto zrkadlá sú vzájomne pootočené o 45°. Účelom zrkadiel je kolimácia zväzku lúča bez zmeny ohniskovej roviny. Takto modifikovaný lúč vstupuje do kolimačných dvojitého šošoviek. Úlohou tohto optického člena je, že zodpovedá za úpravu ohniskovej roviny pre detektor. Následne sa svetlo odráža na mriežku. Mriežka je pokrytá reflexným materiálom, v dôsledku čoho sa svetlo od nej odrazí na dvojité kamerové zrkadlo. Tento optický člen taktiež zodpovedá za úpravu ohniskovej roviny pre detektor. Potom svetlo prechádza od kamerového zrkadla k pomocnému zrkadlu. Funkciou tohto zrkadla je, že usmerní svetelný lúč do detektora, ktorý sníma dopadajúce svetlo. Opísaná optická zostava zodpovedá Czerny-Turnerovmu spektrografu. Konečný obraz na detektore má rozlíšenie 0,13"/pixel.

4.2 Hinode (Solar-B)

Družica Hinode bola vypustená 22. septembra 2006 z japonského vesmírneho strediska Uchinoura (Kosugi a kol., 2007). Na vytvorení a prevádzkovaní tohto projektu

sa podieľali hlavne JAXA s NAOJ (japonská vesmírna agentúra s domácim partnerom) a partnermi zo zahraničia NASA (USA) a STFC (UK).

Družica Hinode bola po vypustení navedená na heliosynchronnú obežnú dráhu. Nachádza sa na takmer polárnej obežnej dráhe s výškou 680 km nad povrchom Zeme a periódou obehu 98 minút. V praxi to znamená, že jednotlivé prístroje môžu nepretržite pozorovať Slnko.

Cieľom projektu bolo vyvinúť satelit za účelom získavania fotometrických, spektroskopických a spektro-polarimetrických pozorovaní Slnka s vysokou priestorovou, spektrálnou a časovou rozlišovacou schopnosťou. Pre tento účel bol vyvinutý systém sofistikovaných prístrojov, ktoré umožňujú získavanie rôznych typov slnečných pozorovaní v širokom intervale vlnových dĺžok elektromagnetického spektra. Družica Hinode pracuje s tromi samostatnými prístrojmi: XRT, EIS a SOT. V tejto práci boli použité dáta získané pomocou prístroja SOT.

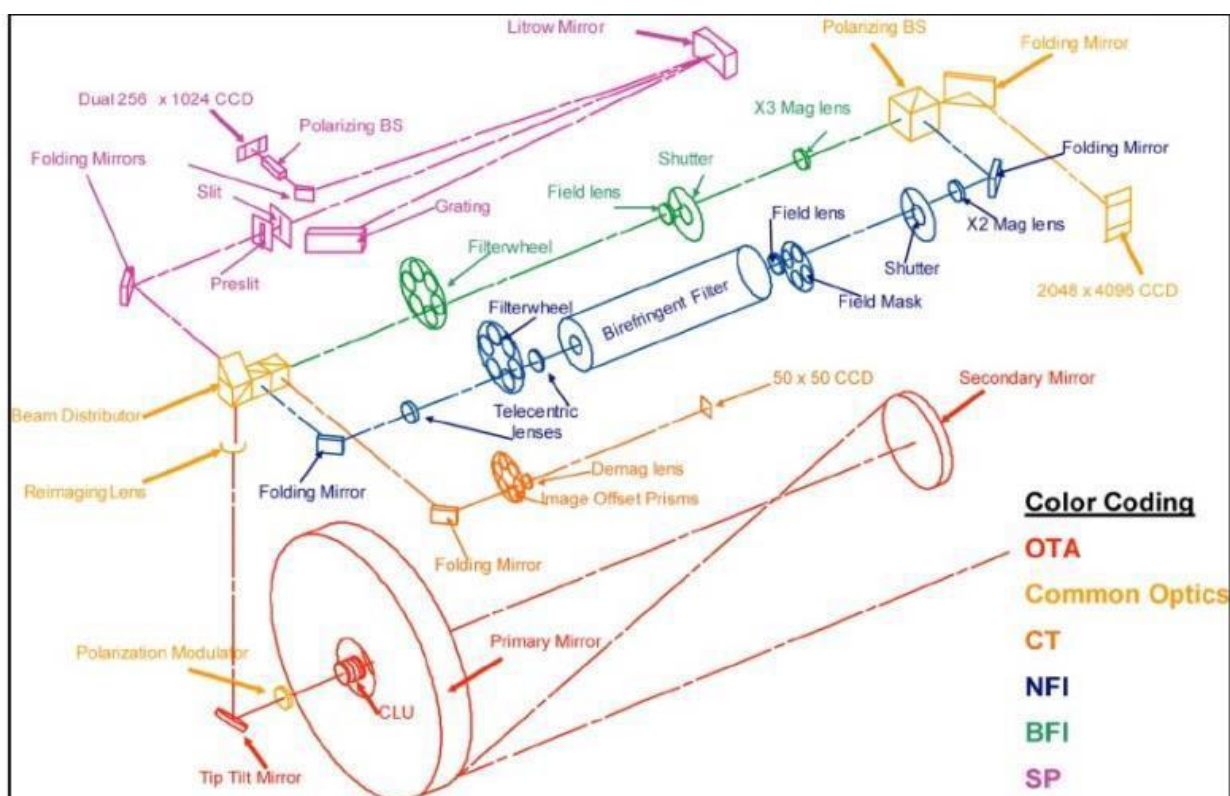
4.2.1 Slnčný optický ďalekohľad (SOT)

Prístroj SOT je navrhnutý ako ďalekohľad Gregoryho typu. Optická schéma prístroja SOT je zobrazená na obrázku č.8. Slnčné svetlo dopadá na primárne zrkadlo prístroja SOT. Primárne zrkadlo je konkávne s parabolickým tvarom. Priemer primárneho zrkadla je 0,5 m. Odtiaľ sa svetlo odrazí smerom na sekundárne zrkadlo, ktoré je konkávne. Po odraze od sekundárneho zrkadla prechádza svetlo cez rôzne optické členy. Prvým z nich je kolimačná šošovka (CLU). Jej úlohou je vytvoriť z prichádzajúceho lúča rovnobežný zväzok. Druhým optickým členom je rotačný polarizačný modulátor. Modulátor je hlavným členom celého polarizačného systému. Modulátor pozostáva z dvoch tenkých polarizačných filtrov. Odtiaľ polarizovaný lúč smeruje na rovinné tip-tilt zrkadlo. Úlohou tohto optického člena je odstrániť veľkoškálové pohyby zaznamenávaného obrazu. Takto modifikovaný lúč svetla prechádza optickými hranolmi (beam distributor), ktorých funkciou je nasmerovať žiarenie do jedného z troch dostupných postfokusových zariadení ďalekohľadu SOT: prístroj so širokopásmovým filtrom (The Broad-band Filter Imager, BFI), prístroj s úzkopásmovým filtrom (The Narrow-band Filter Imager, NFI), spektropolarimeter.

Merania získané pre potreby tejto práce sú získané spektropolarimetrom. V tomto prípade sa jedná o modifikovaný Littrow spektrograf. Zariadenie meria profily

spektrálnych čiar citlivých na magnetické pole (spektrálne čiary Fe 6301,5 Å a 6302,5 Å). Výsledkom pozorovaní je teda záznam profilov Stokesových parametrov I, Q, U a V, ktoré úplne popisujú stupeň a typ polarizácie meraného žiarenia. Spektrálne rozlíšenie získaných dát je 21mÅ/pixel. Efektívne priestorové rozlíšenie prístroja je 0,32"x0,32".

Optický dizajn polarimetra je vyobrazený pomocou ružovej farby na obrázku č. 8 (Berger, 2009). Z „beam distribútora“ prichádza kolimované svetlo k systému štrbín, ktorý sa skladá z dvoch častí (tzv. predštrbina a samostatná štrbina spektrografu).



Obrázok č. 8: Schéma slnečného optického ďalekohľadu SOT (Berger, 2008).

Primary Mirror- primárne zrkadlo, *secondary mirror*- sekundárne zrkadlo, *polarization modulator*- polarizačný modulátor, *tip tilt mirror*- tip tilt zrkadlo, *reimaging lens*- zobrazovacia šošovka, *beam distributor*- delič lúča, *folding mirror*- pohyblivé zrkadlo, *preslit*- predštrbina, *slit*- štrbina, *littrow mirror*- littrowové zrkadlo, *grating*- mriežka, *polarizing BS*- polarizačný delič lúča, *filterwheel*- koleso s filtrami, *field lens*- poľová šošovka, *shutter*- uzávierka, *X3 Mag lens*- X3 Mag šošovka, *telecentric lens*- telecentrická šošovka, *birefringement filter*- širokopásmový filter, *field mask*- poľná maska, *X2 Mag lens*- X2 Mag šošovka, *image offset prisms*- kompenzačné optické hranoly, *demag lens*- demag šošovka.

Táto optická časť spektrografu vymedzuje časť svetla, ktoré dopadá na Littrowé zrkadlo. Littrowé zrkadlo je mimoosé parabolické zrkadlo. Odtiaľ sa lúč svetla odrazí smerom na mriežku, kde sa vytvorí spektrum. Mriežka je pokrytá reflexným materiálom. Takto skonštruovaná mriežka spôsobí, že sa svetlo odrazí späť na Littrowé zrkadlo, ale už pod iným uhlom. Odtiaľ svetelný lúč prechádza polarizačným deličom („beam splitter“), ktorého súčasťou je aj šošovka, ktorá redukuje vplyv astigmatizmu na kvalitu obrazu. Následne svetlo prechádza na spektrálnu masku, ktorá ohraničuje vybranú spektrálnu oblasť. Takto modifikované svetlo dopadne na retardér z kalcitu medzi ktorými je polovlnová doštička. Na tomto optickom člene sa svetelný lúč začne deliť dvojlomom. Takto oddelené lúče dopadajú na CCD kameru, kde vznikne obraz. Výstupom z prístroja sú Stokesové parametre I, Q, U a V (Ichimoto a kol., 2008, Lites a kol., 2013) .

4.3 IRIS

Údaje uvedené v tejto časti boli prevzaté z práce B. de Pontieu (2014). Družica IRIS (Interface region imaging spectrograph) vyštartovala na obežnú dráhu Zeme 27. júna 2013. Po vypustení bola navedená na synchrónnu dráhu Slnka. Družica obieha Zem po takmer polárnej kruhovej dráhe v priemernej vzdialenosti 644 km od povrchu Zeme s periódou 97 minút. Výhodou synchrónnej dráhy je, že prechádza každý deň približne ponad rovnaké miesta na Zemi, čo uľahčuje prenos dát medzi satelitom a pozemným centrom. Na konštrukcii družice IRIS sa podieľali zväčša inštitúcie z USA, ale aj zahraniční partneri z Nemecka, Austrálie, Anglicka, Nórska, Japonska a Dánska.

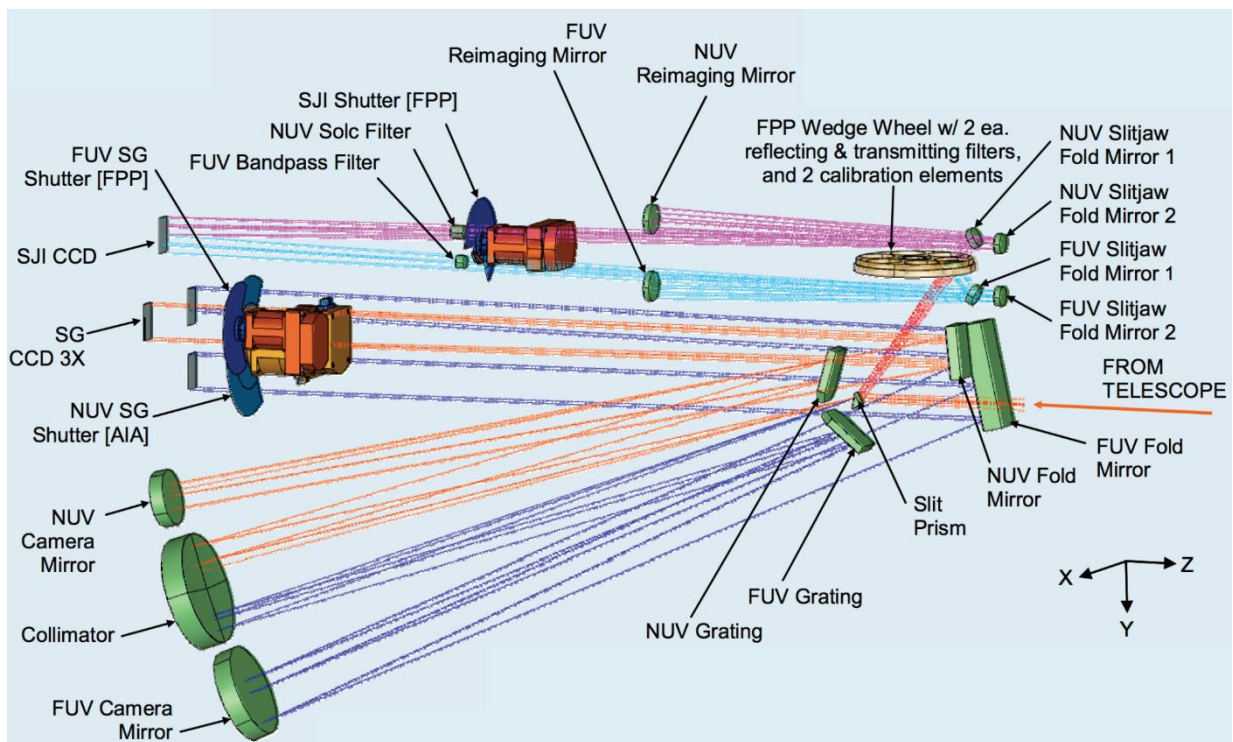
Satelit IRIS bol vyvinutý za účelom štúdia oblastí slnečnej atmosféry medzi fotosférou a korónou. Umožňuje získavať spektroskopické a fotometrické pozorovania s vysokým priestorovým, spektrálnym a časovým rozlíšením.

Satelit IRIS pozostáva z ďalekohľadu typu Cassegrain s aktívnym sekundárnym zrkadlom. Priemer primárneho zrkadla ďalekohľadu je 19 cm a jeho ohnisková vzdialenosť je 6,895 m. Zrkadlo je vyrobené z ultra nízko expanzného skla (označované ako „ULE sklo“). Na tomto zrkadle sa nachádza dielektrická vrstva, ktorá odráža UV svetlo k sekundárnemu zrkadlu. Viditeľné a infračervené svetlo je potlačené a to tým spôsobom, že prechádza cez ULE zrkadlo a je pohltené chladiacim systémom. UV

svetlo sa po odraze od primárneho zrkadla dostáva na sekundárne zrkadlo. Sekundárne zrkadlo bolo vyvinuté ako aktívne. To znamená, že slúži na jemné doladzovanie a stabilizovanie obrazu. Odtiaľ je svetlo nasmerované do spektrografu.

Spektrograf:

Optická schéma družice IRIS je zobrazená na obrázku č. 9. Svetlo zo sekundárneho zrkadla smeruje do Czerny-Turnerovho spektrografu. Svetlo z ďalekohľadu dopadá na štrbinu. Tento optický člen pozostáva z optického hranola a štrbiny. Optický hranol je pokrytý reflexnou vrstvou. Svetlo odrážané z reflexnej vrstvy smeruje do snímkovacieho zariadenia. Svetlo prechádzajúce cez štrbinu v optickom hranole je rozložené na spektrum svetla. V ďalšom kroku svetlo dopadá na



Obrázok č. 9: Optická schéma družice IRIS (<https://iris.lmsal.com/itm51>) :

FUV/NUV Fold Mirror – FUV/NUV sklopené zrkadlo, slit – štrbina, prism – hranol, FUV/NUV grating – FUV/NUV mriežka, FUV/NUV Camera Mirror – FUV/NUV kamerové zrkadlo, FUV SG shutter – uzávierka, FUV/NUV slitjaw fold mirror – FUV/NUV slíťjau zrkadlo, FPP Wedge wheel, reflecting and transmitting filters and 2 calibration elements – koleso pozostávajúce z filtrov, ktoré odráža svetlo, prechádza svetlo a 2 kalibračné elementy FUV/NUV reimaging mirror, SJI shutter – urávierka, NUV Solc filter – NUV Šolcov filter, FUV bandpass filter – širokopásmový filter, FUV SJI CCD – slíťjau CCD kamera.

kolimačné zrkadlo v dvoch zväzkoch a na jeho rozdielne časti. Jedna časť zväzku s vlnovou dĺžkou od 1332 do 1407 Å, tzv. ďaleké ultrafialové žiarenie, známe aj pod skratkou FUV dopadá na jednu časť zrkadla. Druhá časť zväzku s vlnovou dĺžkou 2783 - 2835 Å, tzv. blízke ultrafialové žiarenie, známe aj pod skratkou NUV, dopadá na druhú časť kolimátora. Od kolimátora sa odráža rovnobežný zväzok lúčov. Následne zväzky lúčov (FUV a NUV) dopadajú na samostatné mriežky. Odtiaľ svetlo pokračuje na FUV a NUV kamerové zrkadlo. Potom sa svetlo odráža na FUV a NUV sklopené zrkadlá. Zo zrkadiel sa zväzky odrážajú na CCD kamery. V ďalekej ultrafialovej oblasti môžeme identifikovať spektrálne čiary C II 1334 Å a 1335 Å, Si IV 1402 Å a 1393 Å, O IV 1399 Å a 1401 Å, O I 1355 Å, Fe XII 1349 Å a Fe XXI 1354 Å. V blízkej ultrafialovej oblasti sa nachádzajú spektrálne čiary Mg II h 2803 Å a k 2796 Å a krídlo Mg II 2820 Å. Tieto spektrálne čiary sa formujú v oblastiach s teplotou $\log T [K] = 3.7 - 7$.

Snímkovač:

Svetlo z ďalekohľadu, ktoré neprejde štrbinou, je od optického hranola odrazené k systému filtrov. Systém filtrov tzv. filtrové koleso, obsahuje 6 rôznych filtrov, z toho 4 sú vhodné na použitie pre slnečnú fyziku a 2 sa využívajú na testovanie. Filtre vhodné pre vedecké merania môžeme rozdeliť do dvoch skupín, prvá skupina sú filtre pre ďalekú ultrafialovú oblasť (FUV) a druhá skupina pre blízku ultrafialovú oblasť (NUV). Filtre pre FUV oblasť majú tú vlastnosť, že svetlo odrážajú a filtre pre NUV oblasť majú tú vlastnosť, že svetlo prepúšťajú. Počas merania sa filtrové koleso otáča. Týmto spôsobom svetlo postupne dopadá na rôzne typy filtrov. Svetelný lúč prechádza cez NUV filtre alebo sa odráža cez FUV filtre. Takto rozdelené svetlo postupuje k ďalším optickým členom. Svetlo po prechode týmito filtermi prechádza cez uzávierku, ktorá určuje koľko svetla dopadne na CCD kameru, ktorá zaznamenáva fotometrické snímky slnečnej atmosféry. Výsledkom sú snímky v spektrálnych čiarach, ale aj v ich blízkom okolí, s vlnovou dĺžkou: krídlo Mg II 2830 Å, Mg II k 2796 Å, C II 1330 Å, Si IV 1400 Å.

5. Analyzované dáta

5.1 Základné údaje

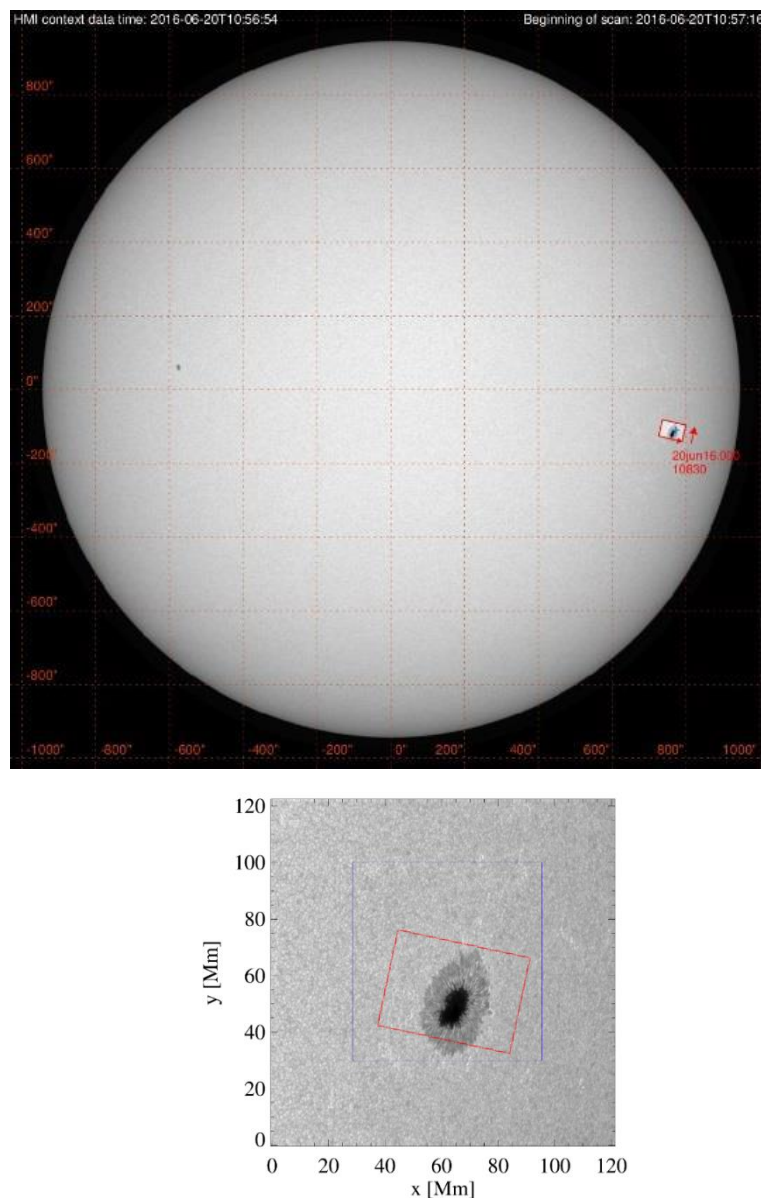
Merania analyzované v tejto práci boli získané 20. júna 2016. Bola pozorovaná aktívna oblasť AR 12553 na súradniciach $831,1''$ heliocentrickej šírky a $-232,3''$ heliocentrickej dĺžky, čo odpovedá heliocentrickému uhlu 54° ($\mu = 0.58$).

Pri pozemnom pozorovaní prostredníctvom ďalekohľadu GREGOR boli napozorované dve sady spektro-polarimetrických meraní. V tejto práci je opísaná len jedna sada napozorovaných dát, keďže výsledky z oboch sád sú takmer identické. Pozorovanie–spektropolarimetrom GRIS prebiehalo v spektrálnom okne $1\mu\text{m}$, ktoré obsahuje spektrálne čiary Si I 10827 Å, He I 10830 Å a Ca I 10839 Å. Pozorovanie bolo získané v čase od 10:57:16 UT do 11:23:58 UT.

Pozorovaná slnečná škvrna bola sekvenčne skenovaná. Pozorovanie pozostávalo z 340 krokov štrbiny v preddefinovanom smere. Použitá štrbina mala výšku 477 pixelov. Veľkosť pixelu pozdĺž výšky štrbiny je $0.136''$. Veľkosť šírky štrbiny je $0.134''$. Výsledné zorné pole získaných dát má teda veľkosť $64.82''$ v x-ovej osi a $45.56''$ v y-ovej osi. Veľkosť zorného poľa ďalekohľadu GREGOR je na obrázku č. 10 (panel dole) znázornená kontúrou červenej farby.

Pozorovanie na družici Hinode prebiehalo v čase od 10:57:16 UT do 11:23:58 UT pomocou spektro-polarimetra prístroja SOT v spektrálnych čiarach Fe I 6302,5 a Fe I 6301,5 Å. Pre našu analýzu je použitá len spektrálna čiara Fe I 6302,5 Å. Veľkosť pixelu pozdĺž výšky štrbiny a pozdĺž šírky štrbiny je $0.32''$. Slnečná škvrna bola taktiež sekvenčne skenovaná. Pozorovanie pozostávalo z 508 krokov štrbiny v preddefinovanom smere. Výška štrbiny bola 512 pixelov. Výsledné zorné pole získaných dát má veľkosť $162.56''$ v smere x-ovej osi a $163,84''$ v smere y-ovej osi. Veľkosť zorného poľa je totožná s rozmermi panela dole na obrázku č. 10.

Pozorovanie získavané pomocou družice IRIS prebiehalo v čase od 10:01:15 UT až do 13:30:55 UT. Pozorovanie prebiehalo vo viacerých spektrálnych oblastiach: v krídle Mg II 2830 Å, Mg II k 2796 Å, C II 1330 Å a Si IV 1400 Å. Výsledkom meraní sú snímky s vysokým časovým a priestorovým rozlíšením. Snímky boli urobené v priemere každých 20 s.



Obrázok č. 10 Hore: Intenzita spektrálneho kontinua nameraná v aktívnej oblasti AR 12553 znázorňujúca morfológiu pozorovanej slnečnej škvrny. Osi x a y popisujú reálne rozmery pozorovanej oblasti a navyše os x vyobrazuje smer k okraju slnečného disku. Snímok je získaný pomocou ďalekohľadu SOT/Hinode. Modrá farba kontúry zobrazuje zorné pole družice IRIS. Červená farba kontúry zobrazuje zorné pole ďalekohľadu GREGOR.

Dole: Snímka slnečnej fotosféry získaná dňa 20.6.2016. Čierne izolované oblasti predstavujú slnečné škvrny. Pozorovaná oblasť je označená červenou farbou. Osi x a y vyjadrujú vzdialenosť od centra slnečného disku v oblúkových sekundách. Pozorovaná oblasť má súradnice $831,1''/-232,3''$.

Vytvorených teda bolo 608 snímkov pre každú spomenutú spektrálnu oblasť. V prípade týchto dát je veľkosť pixelu 0.33'' v smere x-ovej osi a 0.34'' v smere y-ovej osi. Veľkosť zorného poľa je 281x295 pixelov, tomu zodpovedá pole na Slnku s veľkosťou 92.73''x100.3''. Veľkosť zorného poľa ďalekohľadu IRIS vyobrazuje kontúra modrej farby na obrázku č. 10. Pre potreby tejto práce sa použili len slit-jaw obrázky odpovedajúce spektrálnym oblastiam: krídlo Mg II 2830 Å, Mg II k 2796 Å, C II 1330 Å a Si IV 1400 Å.

5.2 Analyzované spektrálne čiary

Spektrálna čiara Ca I 10839 Å

Analyzovaná spektrálna čiara neutrálneho vápnika má vlnovú dĺžku 10839 Å (obrázok č. 11). Vzniká prechodom medzi energetickými hladinami $^3P_2 - ^3P_2$ atómu vápnika. Podmienky pre uskutočnenie tohto energetického prechodu sú v nižšej časti fotosféry. Pre interpretovanie tejto spektrálnej čiary sa používa predpoklad lokálnej termodynamickej rovnováhy (LTE). Spektrálna čiara Ca I 10839 Å je citlivá na prítomnosť magnetického poľa v aktívnych oblastiach vo fotosfére.

λ_{lab}	$E_{p_{low}}$ [eV]	$\log(gf)$	Term	α_V	$\sigma[cm^2]$
10838,983	4,88	-0,28	$^3P_2 - ^3P_2$	0	0

Tabuľka č. 1: Fyzikálne parameter charakterizujúce spektrálnu čiaru Ca I: laboratórna vlnová dĺžka spektrálnej čiary, hodnota excitačného potenciálu dolnej hladiny EP_{low} , sila oscilátora $\log(gf)$, kvantovomechanistické označenie termov prechodu, rýchlostný parameter a účinný prierez.

Spektrálna čiara Fe I 6302,5 Å

Spektrálna čiara neutrálneho železa sa vyskytuje vo viditeľnej oblasti slnečného spektra s vlnovou dĺžkou 6302.5 Å (obrázok č. 11). Táto spektrálna čiara vzniká prechodom medzi energetickými hladinami $^3P_1 - ^3D_0$. Podmienky pre formovanie tejto spektrálnej čiary sa nachádzajú vo vyššej časti fotosféry. Táto spektrálna čiara je taktiež citlivá na prítomnosť magnetického poľa. Dôsledkom toho je často pozorovaná pre zisťovanie magnetických vlastností štruktúr vyskytujúcich sa v slnečnej fotosfére.

λ_{lab}	E_{low} [eV]	$\log(gf)$	Term	α_v
6302,4990	3,69	-1,16	$^5P_1 - ^5D_0$	0,240

Tabuľka č. 2: Fyzikálne parametre charakterizujúce spektrálnu čiaru Fe I: laboratórna vlnová dĺžka spektrálnej čiary, hodnota excitačného potenciálu dolnej hladiny E_{low} , sila oscilátora $\log(gf)$, kvantovomechanistické označenie termov prechodu, rýchlostný parameter.

Spektrálna analýza čiary Fe I je často vykonávaná za podmienky lokálnej termodynamickej rovnováhy. Ale nadmerná ionizácia atómov železa spôsobená ultrafialovým žiarením vedie k nedostatočnej obsadenosti energetických hladín atómov železa. Jadro spektrálnej čiary Fe I sa tvorí približne vo výške 200 až 350 km (Grec a kol., 2010) a teda jadro spektrálnej čiary Fe I je plytšie ako jadro spektrálnej čiary vznikajúce za podmienky lokálnej termodynamickej rovnováhy tzv. LTE. Smith a kol. (2021) skúmali rozdiel medzi lokálnou termodynamickou rovnováhou a štatistickou rovnováhou pri inverzii Stokesových profilov. Inverziu vykonali pomocou výpočtových kódov LTE a 3D NLTE. Vo výsledku zistili, že pre veľkosť vektora magnetickej indukcie bola určená chyba 100 až 500 G a 10° až 50° pre inklináciu magnetického poľa. A preto navrhli uvažovanie vplyvu 3D efektov na prenos žiarenia čo povedie k lepšiemu pochopeniu štruktúr v slnečnej škvrne. Hlavne v oblastiach na hranici jednotlivých štruktúr, napríklad na hranici medzi umbrou a penumbrou, pretože v týchto oblastiach sa nachádza veľký horizontálny gradient teploty.

Spektrálna čiara Si I 10827 Å

Spektrálna čiara Si I sa vyskytuje v oblasti s vlnovou dĺžkou 10827 Å (obrázok č. 11). Táto oblasť je blízko tripletu He I 10830 Å a to umožňuje súbežnú detekciu týchto spektrálnych čiar jedným pozorovacím prístrojom. Spektrálna čiara Si I je tvorená prechodom medzi energetickými hladinami $3p4s\ ^3P_2$ a $3p4p\ ^3P_2$. Podmienky na formovanie predmetnej spektrálnej čiary neutrálneho kremíka sú v hornej časti fotosféry. Bard a Carlsson (2008) zistili, že spektrálna čiara Si I 10827 Å vzniká za predpokladu platnosti štatistickej rovnováhy, tzv. NLTE. Najpodstatnejším rozdielom medzi oblasťou, ktorá je v stave lokálnej termodynamickej rovnováhy (LTE) a oblasťou

λ_{lab}	$E_{\text{plow}} [\text{eV}]$	$\log(gf)$	Term	α_V	$\sigma[\text{cm}^2]$
10827,14	4,93	-1,03	$3P_2 - {}^3P_2$	0,231	$2,0413 \cdot 10^{-14}$

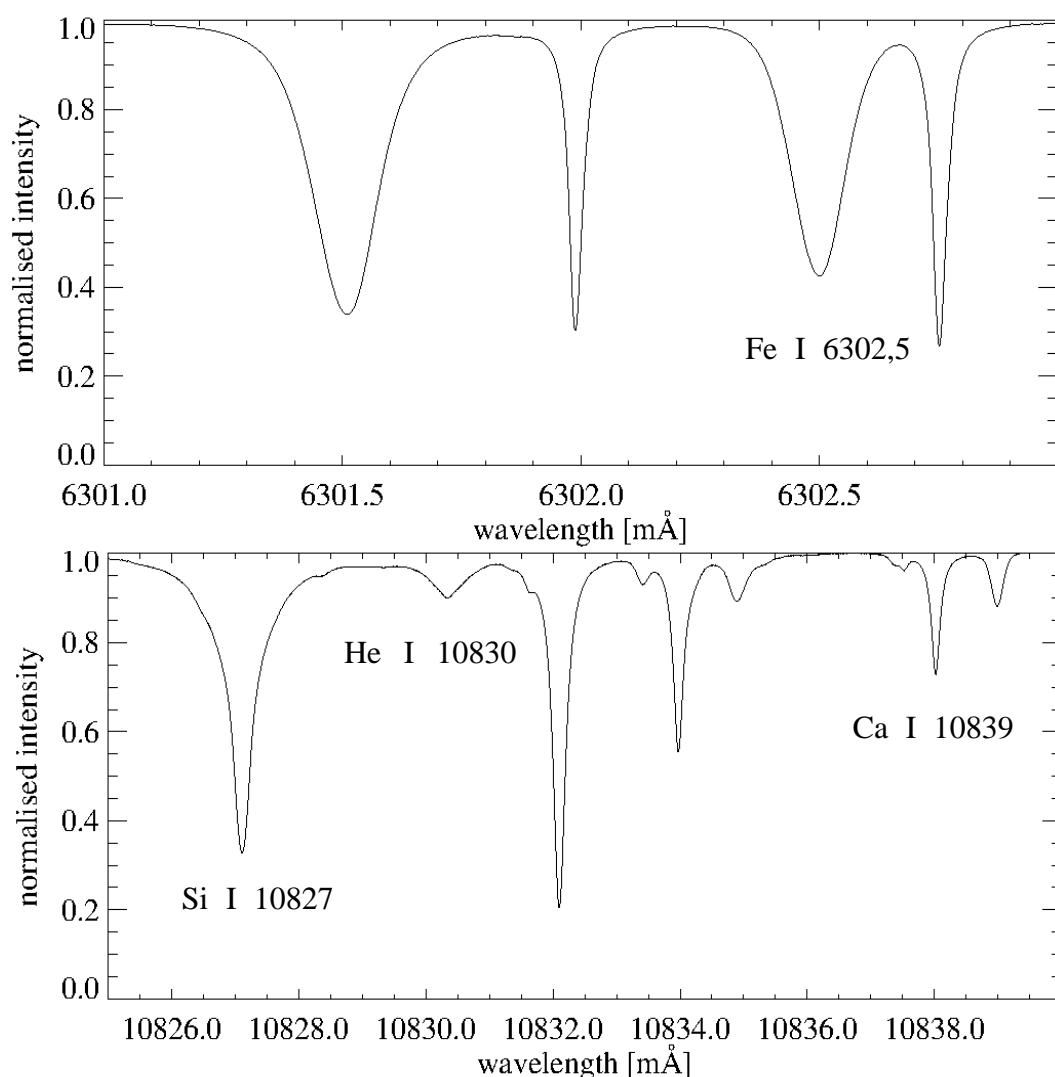
Tabuľka č.3 : Fyzikálne parameter charakterizujúce spektrálnu čiaru Si I: laboratórna vlnová dĺžka spektrálnej čiary, hodnota excitačného potenciálu dolnej hladiny E_{plow} , sila oscilátora $\log(gf)$, kvantovomechanistické označenie termov prechodu, rýchlostný parameter a účinný prierez.

v NLTE stave je ten, že jadro formujúcej sa spektrálnej čiary pri NLTE podmienkach je podstatne hlbšie ako v stave LTE. Výsledkom toho je, že vypočítaná teplota za predpokladu platnosti LTE je nepresná. Jednotlivé fyzikálne parametre a hodnoty charakterizujúce spektrálnu čiaru neutrálneho kremíka sú uvedené v tabuľke č.3.

Fotosférická spektrálna čiaru Si I 10827 Å je citlivá na magnetické pole a preto je vhodná na štúdium vlastností vektora magnetického poľa v aktívnych oblastiach vo fotosfére (pozri Lites a kol. (1985)). Fontenla a kol. (1993) zistili, že pre model pokojného Slnka je stredná výška formovania sa tejto spektrálnej čiary okolo 540 km a pre slnečné škvrny je to 300 km nad povrchom Slnka (Maltby a kol. 1986).

Spektrálna čiaru He I 10830 Å

Študovaná spektrálna čiaru neutrálneho hélia (He I) sa vyskytuje v oblasti s vlnovou dĺžkou 10830 Å (obrázok č. 11). Táto spektrálna čiaru sa skladá z troch zložiek. To znamená, že je tvorená až troma prechodmi medzi energetickými hladinami $2s^3S_1 - 2p^3P_{(0,1,2)}$. Každý takýto prechod medzi energetickou hladinou tvorí jednu komponentu spektrálnej čiary. Nižšia energetická hladina prechodu 3S je metastabilná. Energetické hladiny tripletu neutrálneho hélia sa líšia len veľkosťou celkového uhlového momentu. Celkový uhlový moment je rovný hodnotám 0, 1 a 2. Prechod na energetickú hladinu celkového uhlového momentu s hodnotou $J_u=0$ nazývame modrou komponentou spektrálnej čiary neutrálneho hélia s vlnovou dĺžkou 10829,09 Å. Prechody na energetickú hladinu s celkovým uhlovým momentom s hodnotou $J_u=1$ s vlnovou dĺžkou 10830,25 Å a $J_u=2$ s vlnovou dĺžkou 10830,34 Å sa nazývajú červené komponenty. Červené komponenty tripletu He I 10830 Å sa pozorujú zmiešané v dôsledku vysokých teplôt v chromosfére (Lagg, 2007).



Obrázok č. 11: Intenzitné spektrum normalizované na intenzitu kontinua. X-ová os zobrazuje vlnovú dĺžku. Intenzitné spektrum je získané z atlasu IAG. Jednotlivé menovky označujú spektrálne čiary analyzované v tejto práci.

Fyzikálne podmienky na formovanie spektrálnej čiary tripletu He I 10830 Å sú vo vyššej časti chromosféry bez žiadneho príspevku z fotosféry. Táto výška zodpovedá približne 1600 až 2000 km nad povrchom Slnka. Na absorpciu žiarenia v triplete He I 10830 Å má vplyv hustota častíc v smere zorného lúča, výška v chromosfére a žiarenie z koróny, ktoré osvetľuje pozorovanú oblasť svetlom s $\lambda < 504$ Å (Avrett a kol., 1994). Rýchlosť zvuku v chromosfére, kde sa tvorí táto spektrálna čiara je $C_s = 10$ km/s (Aznar Cuadrado a kol. 2005, 2007).

Spektrálna čiara He I 10830 Å je vhodná pre výskum dynamiky a magnetických vlastností štruktúr v slnečnej chromosfére, ako sú aktívne oblasti (napríklad: Harvey&Hall 1971; Rüedi a kol. 1996; Lagg a kol. 2004; Centeno a kol. 2006),

filamenty (napríklad: Lin a kol. 1998; Trujillo Bueno a kol. 2002b), protuberancie (napríklad: Merenda a kol. 2006), a spikule (napríklad: Trujillo Bueno a kol. 2005; Socas-Navarro & Elmore 2005). Jemná štruktúra viditeľná v spektrálnej čiare tripletu He I je spôsobené ionizačným žiarením pochádzajúcim z prechodovej vrstvy (Leenaarts a kol., 2016).

6. Spracovanie meraní a ich inverzia

6.1 Základná fotometrická redukcia a kalibrácia spektier

V tejto kapitole je zhrnutý proces spracovávania pozorovaní získaných prostredníctvom ďalekohľadu GREGOR a družice HINODE. Meranie získané prostredníctvom ďalekohľadu GREGOR nieje v predspracovanom stave. Takéto dáta preto nie je možné priamo využiť na vedeckú analýzu. Pozorovanie získané prostredníctvom družice HINODE je už v predspracovanom stave, tzv. „level 1“ dáta. Level 1 dáta predstavujú kalibrované merania, ktoré je možné priamo využiť na vedeckú analýzu.

Dáta získané prostredníctvom ďalekohľadu GREGOR je v prvom kroku potrebné fotometricky korigovať. To znamená, že merania je potrebné upraviť flat-field obrazom a opraviť o vplyv temného prúdu. V ďalšom kroku je potrebné vykonať kalibráciu vlnových dĺžok. Na tento účel boli použité telurické čiary vody, ktoré sa nachádzajú v pozorovanej oblasti spektra. Telurické čiary vznikajú v zemskej atmosfére. To má za následok, že ich vlnová dĺžka sa nemení a teda môžu byť použité na výpočet disperzie. Vlnové dĺžky jadier pozorovaných telurických čiar boli porovnané s referenčným spektrom, ktoré môže predstavovať napríklad IAG atlas (Reiners a kol., 2016). Výsledkom toho je vypočítaná disperzia, ktorá v prípade analyzovaných meraní nadobúda hodnotu 1.8 mÅ/pixel . Pozorované spektrum je nakoniec potrebné normalizovať na hodnotu kontinua pokojného Slnka.

Pozorovania získané v spektrálnych čiarach Ca I a Si I prístrojom GRIS a merania v spektrálnej čiare Fe I zo satelitu Hinode boli analyzované pomocou programu Stokes inversions based on response functions (detailný opis programu SIR je uvedený v kapitole 6.2). Pred samotnou analýzou pomocou programu SIR je ale potrebné uskutočniť ďalšie korekcie nameraných spektier.

V pozorovaných dátach je totiž viditeľný vplyv okrajového stmnenia, ktorý sa prejavuje úbytkom jasů v rôznych pozičných uhloch od stredu Slnka. Pozorované dáta je preto potrebné normalizovať vzhľadom na intenzitu žiarenia v strede slnečného disku. Pre určenie hodnoty faktora korigujúceho pôsobenia okrajového stmnenia na pozorované dáta bola aplikovaná rovnica:

$$I(\lambda, \mu) = A(2) + B(2) * \mu + C(2) * \mu^2 \quad (11)$$

uverejnená v práci Pierce a Slaughter (1977). Koeficienty $A(2)$, $B(2)$, $C(2)$ vystupujúce v rovnici sú závislé od vlnovej dĺžky. Pre spektrálne čiary Si I a Ca I sú v spomenutom článku, ale určené len hodnoty pre vlnové dĺžky 10 467 Å a 10 989 Å. Jednotlivé koeficienty pre vlnovú dĺžku 10 467 Å sú: $A(2)=0,54617$, $B(2)=0,72014$, $C(2)=-0,26631$ a koeficienty pre vlnovú dĺžku 10 989 Å dosahujú hodnoty $A(2)=0,55443$, $B(2)=0,73187$, $C(2)=-0,28630$. Korekčné koeficienty pre vlnovú dĺžku 10 827 Å, ktorá odpovedá analyzovanej spektrálnej čiare Si I, boli získané lineárnou interpoláciou uvedených hodnôt. Takto získané koeficienty nadobúdajú hodnotu $A(2)=0,553$, $B(2)=0,728$, $C(2)=-0,28$. Pre spektrálnu čiaru Ca I s vlnovou dĺžkou 10839 Å sú korekčné koeficienty s hodnotami $A(2)=0,552$, $B(2)=0,728$, $C(2)=-0,28$.

Koeficienty $A(2)$, $B(2)$, $C(2)$ pre spektrálnu čiaru Fe I taktiež nie sú publikované v uvedenom článku. Najbližšie hodnoty koeficientov sú určené len pre vlnové dĺžky 6205,9 Å a 6326 Å. Pre vlnovú dĺžku 6205,9 Å sú hodnoty koeficientov $A(2)=0,36019$, $B(2)=0,90010$, $C(2)=-0,26029$ a koeficienty pre vlnovú dĺžku 6326 Å majú určenú hodnotu $A(2)=0,36131$, $B(2)=0,91682$, $C(2)=-0,27813$. A teda pre vlnovú dĺžku 6302,5 Å, ktorá zodpovedá spektrálnej čiare Fe I sú hodnoty určené pomocou interpolácie $A(2)=0,361$, $B(2)=0,9135$, $C(2)=-0,2476$.

Pre určenie syntetického spektra pri inverzii dát pomocou programu SIR je ďalším dôležitým parametrom abundancia prvku emitujúceho pozorovanú spektrálnu čiaru. Abundancia vyjadruje aká je koncentrácia konkrétneho prvku v atmosfére Slnka voči koncentrácii vodíka. To znamená, že abundancia y prvku x je daná vzťahom:

$$y = 12 + \log(xH). \quad (12)$$

Z uvedeného vzťahu vyplýva, že pri takejto definícii dosahuje abundancia vodíka hodnotu 12. Pre výpočet inverzie je použitá abundancia kremíka, ktorá má hodnotu 6,28, abundancia vápnika s hodnotu 4,85 a abundancia železa s hodnotu 7,46.

Pred samotnou inverziou spektrálnych čiar Si I 10827 Å, Ca I 10839 Å a Fe I 6302,5 Å je nutné merania samostatne opraviť aj o vplyv rozptýleného svetla. Pre túto korekciu sa požadujú typické profil jednotlivých spektrálnych čiar, ktoré sú neovplyvnené prítomnosťou magnetických štruktúr. Na tento účel bola v pozorovaniach vybraná oblasť, v ktorej je vplyv magnetického signálu zanedbateľný.

Po oprave dát o vyššie uvedené vplyvy a s použitím parametrov spektrálnych čiar a abundancie kremíka, kalcia a železa boli namerané pozorovania invertované

pomocou kódu SIR. Z vypočítaných modelov, ktoré najlepšie zodpovedali pozorovaniam boli následne získané informácie o teplote, elektrónovej hustote, mikroturbulencii, veľkosti, inklinácii a azimute vektora magnetickej indukcie a rýchlosti v smere zorného lúča. Všetky uvedené parametre boli vypočítané pre viaceré hodnoty optických (a teda aj geometrických) hĺbok. Keďže sa ale analyzované spektrálne čiary formujú len v úzkom intervale výšok nad povrchom Slnka, potenciálne výškové gradienty jednotlivých parametrov získané pre jednotlivé spektrálne čiary z inverzie nie sú relevantné a v ďalšej analýze sa preto nebrali do úvahy.

V spektrálnom okne pozorovaní získaných ďalekohľadom GREGOR sa okrem fotosférických spektrálnych čiar nachádza taktiež chromosférická spektrálna čiara He I 10830 Å. Pre túto spektrálnu oblasť bolo potrebné vykonať binovanie 2x2. Taktiež bolo nutné nájsť masku, ktorá ohraňovala slnečnú škvrnu. Pretože inverzia je časovo náročná na výpočet a týmito zjednodušeniami sa zrýchlil proces invertovania. Pre analýzu spektrálnej čiary He I 10830 Å bol použitý špeciálne vyvinutý inverzný program HAZEL (opísaný v kapitole 6.3). Pre uskutočnenie syntézy a inverzie pozorovacích dát je aj v tomto prípade dáta potrebné špeciálne predprípraviť.

Pred inverziou dát pomocou programu HAZEL sa požaduje, aby namerané spektrá boli normalizované na hodnotu kontinua v strede disku. Predpríprava dát zahŕňa aj výpočet uhlov charakterizujúcich miesto pozorovania. Ide o heliocentrický uhol μ a uhol α , ktorý určuje smer medzi priamkou, ktorá spája centrum pozorovanej oblasti so stredom slnečného disku a slnečným rovníkom. Potom sa prostredníctvom uhla α určí uhol γ , ktorý určuje smer medzi priamkou spájajúcou centrum stredu pozorovanej oblasti so stredom slnečného disku a priamkou pre ktorú platí, že Stokesov parameter Q je väčší ako 0. Následne je nutné dáta transformovať do referenčného systému pre ktorý platí, že Stokesov parameter $Q > 0$. K tomuto kroku sú využité poznatky z kapitoly 2.1.

Predpríprava dát pre inverziu zahŕňa aj ich korekciu o hodnotu okrajového stemnenia. Pre tento účel bol vytvorený modul, ktorý je priamou súčasťou inverzného kódu HAZEL. Modul určí konkrétnu hodnotu, o ktorú je potrebné pozorovanie poopraviť. Teda nieje potrebné vypočítavať jednotlivé korekčné koeficienty pre rovnicu (11), ako v prípade programu SIR. Posledným krokom v predpríprave dát je určenie hraničných podmienok pre jednotlivé Stokesové parametre a zvlášť pre intenzitný parameter. Po korekcii nameraných dát je nutné pripraviť konfiguračný súbor, ktorý je

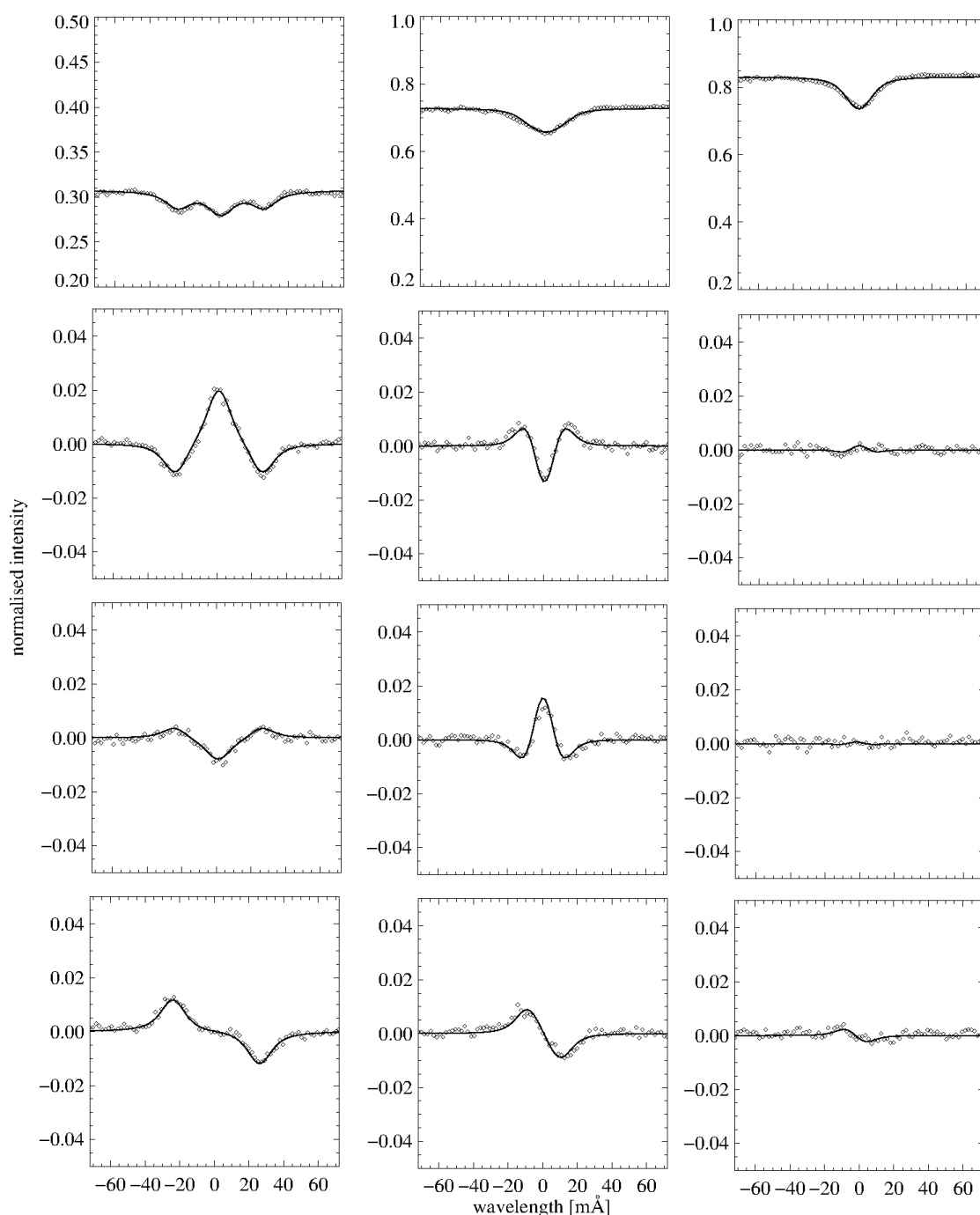
nosnou časťou celého výpočtu. Pre syntézu Stokesových profilov je pre účely tejto práce (ak nie je uvedené inak) uvažovaná jednokomponentná atmosféra, teda, chromosféra, ktorá je osvetľovaná odspodu svetlom z fotosféry. Pri výpočte sa určujú tieto fyzikálne parametre: vektor magnetickej indukcie v karteziánskej súradnicovej sústave, optická hĺbka, tepelné rozšírenie a Dopplerovská rýchlosť.

Výstupom inverzie spektrálnych čiar pomocou kódov SIR a HAZEL sú syntetické Stokesové profily pre každú spektrálnu čiaru. Príklad Stokesových profilov pre spektrálnu čiaru Ca I 10839 Å sú uvedené na obrázku č. 12. Vyobrazené sú typické Stokesové profily pre merania v umbre, penumbre a oblasti pokojného Slnka. Vzájomným porovnaním syntetických a pozorovaných profilov bolo zistené, že syntetizované profily veľmi dobre odpovedajú pozorovaným Stokesovým profilom. Z toho je odôvodnené usudzovať, že fyzikálne parametre modelových atmosfér, ktoré boli použité pre výpočet syntetických spektier je možné stotožniť s reálnymi podmienkami vyskytujúcimi sa v oblasti pozorovanej slnečnej atmosféry.

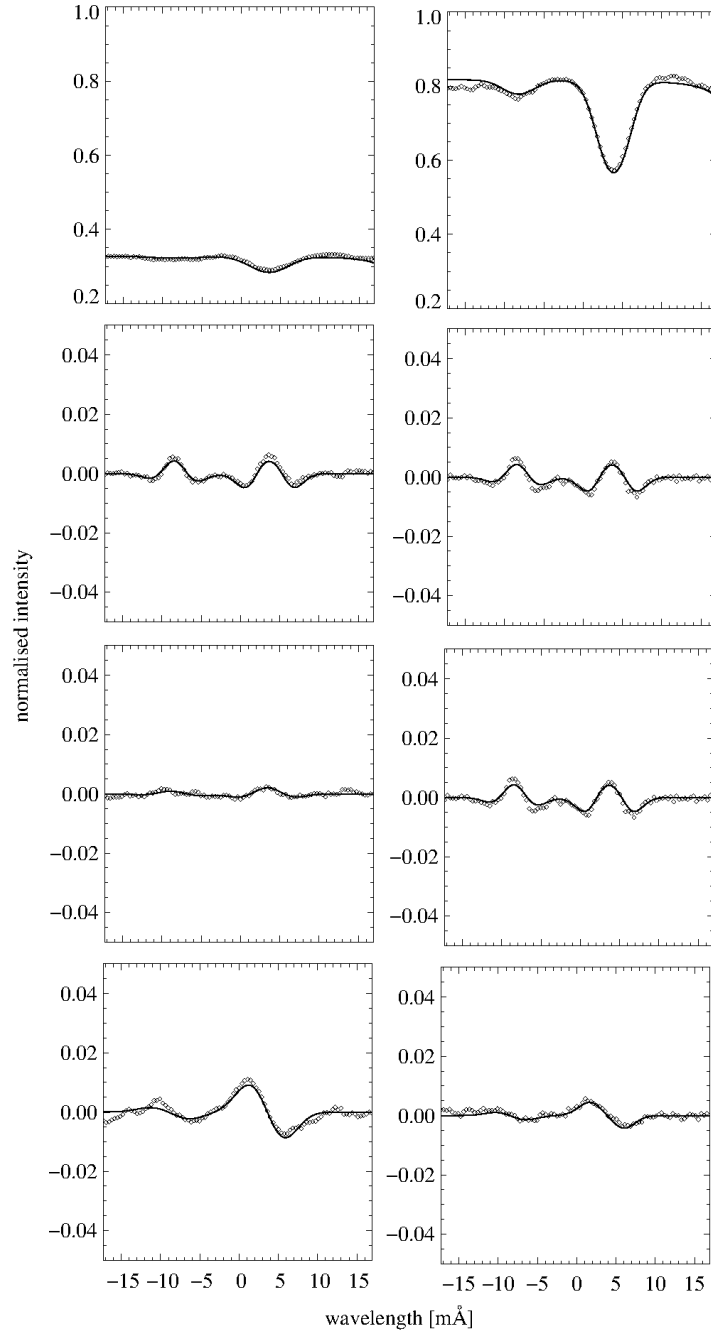
Prvý stĺpec na obrázku č. 12 znázorňuje charakteristické Stokesové profily spektrálnej čiary Ca I 10839 Å v umbre. Intenzitný profil spektrálnej čiary Ca I má v tomto prípade tvar Lorentzovho tripletu a lineárna (Stokes Q a U) a kruhová polarizácia (Stokes V) dosahuje relatívne vysoké hodnoty. Prejav takto vysokej hodnoty Stokesovho parametra V zodpovedá silnému magnetickému poľu o sile 3029 G s chybou 4,73 %. Druhý stĺpec reprezentuje Stokesové profily spektrálnej čiary Ca I 10839 Å v penumbre. Tvar spektrálnej čiary už nenadobúda tak nápadný Lorentzov triplet, ale vo výsledku intenzitný parameter je iba rozšírený. Takýto tvar spektrálnej čiary odpovedá slabšiemu magnetickému poľu ako je tomu v prípade umbry slnečnej škvry. Magnetické pole dosahuje hodnoty 1255 G s chybou 15,48%. Tretí stĺpec predstavuje Stokesové profily predmetnej spektrálnej čiary v oblasti pokojného Slnka. Intenzitný profil má tvar jednoduchšej absorpčnej spektrálnej čiary. Takmer nulové hodnoty kruhovej a lineárnej polarizácie sú prejavom neexistencie, alebo existencie len slabého, magnetického poľa v oblasti pozorovania.

Príklady Stokesových parametrov zodpovedajúcich chromosférickej spektrálnej čiare He I 10830 Å sú znázornené na obrázku č. 13. Keďže v tomto prípade bola pri invertovaní nameraných profilov použitá maska, ktorá z výpočtu vylučovala oblasti pokojného Slnka, sú na obrázku č. 13 zobrazené len Stokesové profily odpovedajúce penumbre a umbre. Prvý stĺpec zodpovedá typickým Stokesovým profilom nameraným

v umbre. Pre zobrazené Stokesové profily bola určená veľkosť magnetického poľa 2588 G. Druhý stĺpec zobrazuje typické Stokesové profily vyskytujúce sa v penumbre

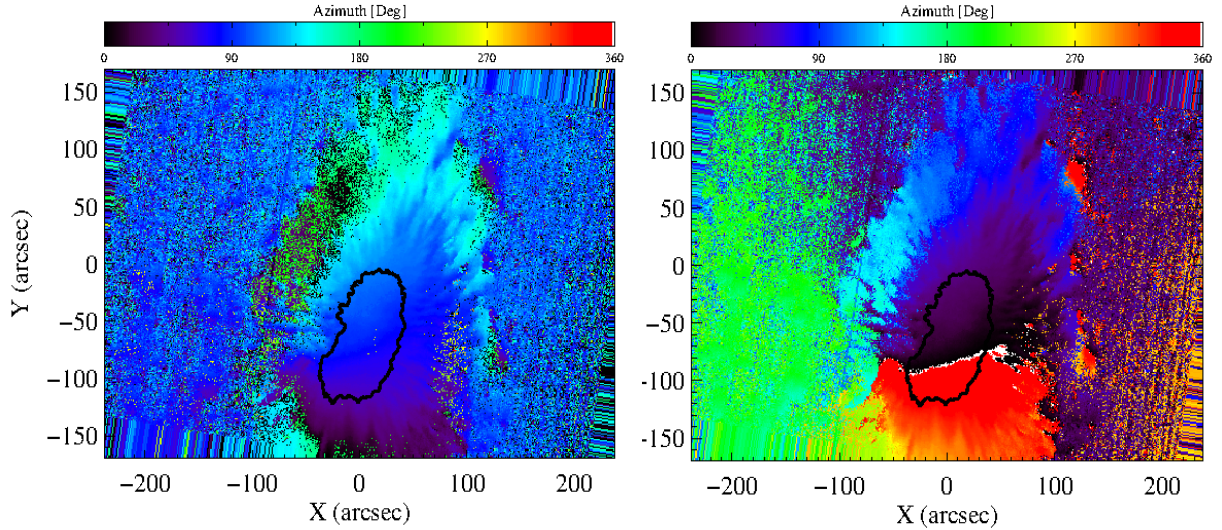


Obrázok č. 12: Na obrázku sú znázornené typické pozorované a syntetické Stokesové profily I , Q , U a V (v smere zhora nadol) spektrálnej čiary $\text{Ca I } 10839 \text{ \AA}$. V ľavom stĺpci sa nachádzajú Stokesové profily z oblasti umbry. Stredný stĺpec zobrazuje Stokesové profily z penumbry a pravý stĺpec zodpovedá meraniam z pokojného Slnka. Plnou čiarou je znázornený syntetický profil. Bodkovanou čiarou je znázornený pozorovaný profil.



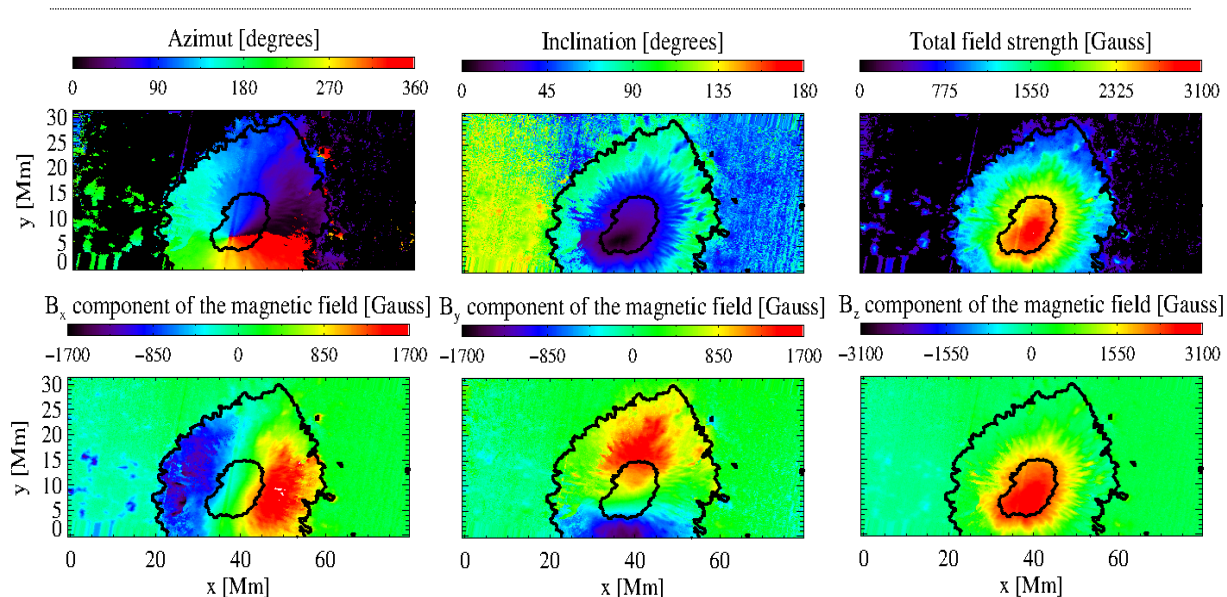
Obrázok č. 13: Na obrázku sú znázornené typické pozorované a syntetické Stokesové profily I , Q , U a V (v smere zhora nadol) spektrálnej čiary He I 10830 Å. V ľavom stĺpci sa nachádzajú Stokesové profily z oblasti umbry. Stredný stĺpec zobrazuje Stokesové profily z penumbry a pravý stĺpec z pokojného Slnka. Plnou čiarou je znázornený syntetický profil. Bodkovanou čiarou je znázornený pozorovaný profil.

Pozorovanej slnečnej škvŕny. Pre zobrazené Stokesové profily bola stanovená veľkosť magnetického poľa 308 G.



Obrázok č. 14: Vypočítané hodnoty azimutu určené pomocou analýzy spektrálnej čiary $\text{Ca I } 10839 \text{ \AA}$ pre aktívnu oblasť AR 12553 dňa 20. júna 2016. Vľavo sú vyobrazené hodnoty azimut získané priamo ako výstup z programu SIR, teda bez korekcie 180° nejednoznačnosti. Vpravo je znázornená mapa azimutu po korekcii 180° nejednoznačnosti.

Výsledkom inverzie profilov jednotlivých spektrálnych čiar sú okrem iného hodnoty veľkostí zložiek vektora magnetickej indukcie vo sférických súradniciach (t.j. veľkosť magnetickej indukcie, inklinácia a azimut). Avšak, vektor magnetickej indukcie v tvare, ktorý je získaný ako výstup z inverzného kódu, nieje vhodný na okamžitú interpretáciu. Problémom je, že vektor magnetickej indukcie je určený s takzvanou „ 180° nejednoznačnosťou“. To znamená, že azimuty vektora magnetickej indukcie s hodnotami z intervalu 0° až 180° sú interpretované rovnako ako hodnoty azimutov z intervalu 180° až 360° . Pre opravu tohto problému je potrebné určiť centrum azimutu študovanej magnetickej štruktúry a v prípade slnečnej škvrny predpokladať kruhovú symetriu azimutov. Ak uvažujeme jednoduchú magnetickú konfiguráciu slnečnej škvrny (prípád napríklad unipolárnej slnečnej škvrny), tak je postačujúce uvažovať len jedno centrum azimutu. Taktiež je vhodné stotožniť stred kruhovej symetrie slnečnej škvrny s centrom azimutu. Smerom k okraju slnečného disku ale dochádza k zväčšovaniu rozdielu medzi týmito centrami. Centrum azimutu sa posúva mimo slnečnú škvrnu, ak je slnečná škvrna blízko slnečného okraja. Pomocou procedúr sme hodnoty azimutu korigovali tak, aby nadobúdali veľkosti z intervalu 0° až 360° . Pritom je nevyhnutné, aby zmeny hodnôt azimutov nastávali spojitě a nie skokom. Typický výsledok korekcie azimutu o „ 180° nejednoznačnosť“ je znázornený na obrázku č. 14.



Obrázok č. 15: Na obrázku je vyobrazený vektor magnetickej indukcie slnečnej škvrny odvodený z pozorovaní získaných v spektrálnej čiare Ca I 10839 Å. pozorovanej dňa 20. júna 2016 pomocou ďalekohľadu GREGOR. Vektor magnetickej indukcie je zobrazený so všetkými zložkami vo sférickej súradnicovej sústave (azimut, inklinácia a veľkosť vektora magnetickej indukcie) a v karteziánskej súradnicovej sústave (B_x , B_y , B_z), kde os z smeruje kolmo na povrch Slnka. Kontúry označené čiernou farbou reprezentujú intenzitnú hranicu umbry - penumbry a penumbry – pokojné Slnko.

Ľavý panel na tomto obrázku zodpovedá hodnotám azimutov získaným priamo po inverzii. Pravý panel zobrazuje hodnoty azimutov po korekcii, teda v celom rozsahu hodnôt z intervalu 0° až 360° .

Po vykonaní korekcie azimutu je možné získať jednoznačnú informáciu o úplnom vektore magnetickej indukcie v sférickej súradnicovej sústave (veľkosť magnetickej indukcie, inklinácia a azimut). Z určených parametrov je následne možné určiť zložky vektora magnetickej indukcie v karteziánskej súradnicovej sústave (zložky B_x , B_y a B_z). Všetky uvedené zložky vektora magnetickej indukcie sú určené v súradnicovej sústave vzťahovanej na smer zorného lúča („line-of-sight“). Pre fyzikálne výpočty je ale väčšinou potrebné transformovať vektor magnetickej indukcie z takejto súradnicovej sústavy (v ktorej smeruje vertikálna os v smere zorného lúča) do súradnicovej sústavy, v ktorej je vertikálna os kolmá na povrch Slnka. Pre takúto transformáciu je potrebné vypočítať dvojicu uhlov. Prvým uhlom je heliocentrický uhol. Druhý uhol zvierá pomyselná časť osi prechádzajúcej východo-západným smerom cez stred slnečného disku so smerom spájajúcim stred slnečného disku s miestom pozorovania..

Poslednou úpravou je korekcia získaných hodnôt o geometrické skreslenie. Pozorovaná oblasť na Slnku sa nachádza na sfére a preto je tvar slnečnej škvrny pozorovanej v blízkosti limbu geometricky deformovaný, skreslený. Teda každý pixel zaznamenáva rôzne veľký element plochy a výsledný obraz nezodpovedá skutočnosti. Pri korekcii geometrického skreslenia sa dáta upravujú tak, aby každý pozorovaný element plochy mal rovnaký rozmer, t.j. štvorcový. Navyše, konečný rozmer priestorového pixela závisí od uhlovej rozlišovacej schopnosti použitého prístroja. Ukážka konečného stavu vektora magnetickej indukcie pre spektrálnu čiaru Ca I 10839 Å vo sférickej a karteziánskej súradnicovej sústave vzťahovanej na normálu k miestu pozorovania je znázornená na obrázku č. 15. V hornom riadku obrázka sú zobrazené zložky vektora magnetickej indukcie vo sférickej súradnicovej sústave (azimut, inklinácia a veľkosť vektora magnetickej indukcie). V dolnom riadku sú vyobrazené zložky vektora magnetickej indukcie v karteziánskej súradnicovej sústave (B_x , B_y , B_z). V jednotlivých dielčích obrázkoch je znázornená kontúra hranice umbra – penumbra a penumbra – pokojné Slnko.

6.2 SIR – Stokes inversions based on response functions

Analýza meraní získaných vo fotosférických spektrálnych čiarach Si I 10827 Å, Ca I 10839 Å a Fe I 6302.5 Å je uskutočnená pomocou programu SIR (Stokes inversion based on response function). Popis kódu uvedený v tejto práci je založený na publikácii Ruiz Cobo a del Toro Iniesta (1992). Cieľom vývoja programu SIR je syntéza a inverzia spektrálnych čiar ovplyvnených magnetickým poľom. Stokesov vektor je syntetizovaný za predpokladu existencie hydrostatickej a lokálnej termodynamickej rovnováhy v pozorovanej časti slnečnej atmosféry. Všetky tieto podmienky sú splnené iba v najhustejších vrstvách slnečnej atmosféry, v ktorých sa tvoria fotosférické spektrálne čiary. V prípade spektrálnej čiar Si I 10827 Å nie je podmienka existencie LTE splnená, preto sa nebrali do úvahy vypočítané teploty. Cieľom výpočtu je získať hodnoty fyzikálnych parametrov v rôznych optických hĺbkach slnečnej atmosféry, napríklad: veľkosť, azimut a inklinácia magnetického poľa, teplota, Dopplerovská rýchlosť, hustota voľných elektrónov a tlak plynu.

Program SIR numericky rieši rovnicu prenosu žiarenia danú vzťahom:

$$\frac{dI}{d\tau} = K(I(\tau) - S(\tau)) \quad (13)$$

kde premenná τ označuje optickú hĺbku. Riešením rovnice (13) je matica \mathbf{I} , ktorej jednotlivé členy odpovedajú Stokesovým parametrom I, Q, U a V. Pre uskutočnenie výpočtu je nutné poznať členy matice šírenia \mathbf{K} s veľkosťou 4x4. Matica šírenia má tú vlastnosť, že je symetrická a teda stačí poznať sedem nezávislých prvkov. Jednotlivé prvky matice \mathbf{K} reprezentujú absorpciu, dichroizmus a disperziu pre Stokesové parametre I, Q, U a V. Významom matice je, že popisuje základné vlastnosti atmosféry za predpokladu lokálnej termodynamickej a hydrostatickej rovnováhy. Posledným členom, ktorý vystupuje v rovnici prenosu žiarenia je matica zdrojovej funkcie \mathbf{S} . Matica zdrojovej funkcie je stĺpcová matica s veľkosťou 4x1. Jednotlivé prvky matice \mathbf{S} odpovedajú zdrojovej funkcii pre jednotlivé komponenty Stokesovho vektora I, Q, U a V. Za predpokladu LTE sú členy Q, U a V vystupujúce v matici zdrojovej funkcie nulové. Jediným nenulovým členom je intenzitný parameter I, ktorý je možné aproximovať Plankovou funkciou. Výsledkom úvahy je, že matica \mathbf{S} nadobúda len jeden nenulový prvok závisiaci len od teploty.

Všeobecným riešením rovnice prenosu žiarenia je syntetizovaný Stokesov vektor v tvare

$$I(\tau_1) = O(\tau_1, \tau_0)I(\tau_0) - \int_{\tau_0}^{\tau_1} O(\tau_1, \tau) K(\tau) S(\tau) d\tau, \quad (14)$$

parameter \mathbf{O} reprezentuje evolučný operátor (Landi Degl'Innocenti, E. a Landi Degl'Innocenti, M., 1985). Evolučný operátor opisuje vývoj Stokesovho vektora medzi dvoma optickými hĺbkami τ_0 a τ_1 .

Vzťah (14) pozostáva z dvoch členov. Prvý člen má význam homogénneho vývoja Stokesovho vektora z hladiny optickej hĺbky τ_0 na hladinu optickej hĺbky τ_1 . Za predpokladu, že medzi optickými hĺbkami τ_0 a τ_1 sa neemituje žiadne ďalšie žiarenie. Druhý člen riešenia rovnice prenosu žiarenia reprezentuje súhrn jednotlivých infinitezimálnych príspevkov vrstiev atmosféry, v ktorých sa emituje žiarenie.

V prípade hviezdnej atmosféry reprezentuje optická hĺbka s hodnotou $\tau_1 = 0$ povrch hviezdy. Optická hĺbka $\tau_0 = \infty$ vyjadruje vonkajšiu hranicu hviezdnej atmosféry. Stokesov vektor je funkciou parametrov atmosférického modelu. Uvažovaním malých „lineárnych“ zmien plazmových parametrov v atmosfére (napr. teplota, rýchlosti, veľkosť a smer magnetického poľa) dochádza k zmene intenzity, ktorá závisí od atmosférických parametrov a funkcie odozvy (Bellot Rubio, 2002). Potom riešenie rovnice (13) nadobúda tvar:

$$\delta I(0) = \int_0^{\infty} R_x(\lambda, \tau) \delta x(\tau) d\tau, \quad (15)$$

kde, δx popisuje zmenu atmosférických parametrov x a R_x je funkcia odozvy (Bellot Rubio, 2002). Funkcia odozvy R_x (response function) je popísaná vzťahom:

$$R_x(\tau) = O(0, \tau) \left\{ K(\tau) \frac{\partial S(\tau)}{\partial x} - \frac{\partial K(\tau)}{\partial x} [I(\tau) - S(\tau)] \right\}. \quad (16)$$

Opis priebehu inverzie:

Proces výpočtu bol navrhnutý tak, aby prebiehal v dvoch krokoch. Prvý krok spočíva vo výpočte syntetického spektra a druhý krok pozostáva z inverzie dát. Pred samotným výpočtom je nutné do programu SIR zadať nasledovné parametre:

- atómové parametre: táto skupina parametrov pozostáva z označenia atómu, ionizačného stupňa, laboratórnej vlnovej dĺžky spektrálnej čiary λ_{lab} , korekčného faktora zrážkového rozšírenia, excitačného potenciálu dolnej hladiny prechodu EP_{low} , silu oscilátora $\log(gf)$, kvantovomechanistické označenie termov prechodu, rýchlostného parametra α , účinného prierezu σ a abundancie jednotlivých prvkov.
- model slnečnej atmosféry: pod týmto názvom označujeme skupinu štartovacích hodnôt fyzikálnych parametrov popisujúcich priemerný stav slnečnej atmosféry. Sú to: optická hĺbka $\log(\tau)$, teplota [K], tlak elektrónov [dyn/cm²], mikroturbulentná rýchlosť [cm/s], veľkosť magnetického poľa [G], LOS rýchlosť (rýchlosť v smere zorného lúča) [cm/s], inklinácia magnetického poľa [deg], azimut magnetického poľa [deg], makroturbulentnú rýchlosť [km/s], filling factor f (interval hodnôt je 0-1), faktor rozptýleného svetla (tzv. stray-light factor), geometrická hĺbka, tlak plynu a hustota.
- namerané profily: označenie jednotlivých normovaných zložiek Stokesovho vektora (I/I_c , Q/I_c , U/I_c , V/I_c).

Syntetický modul programu SIR počíta rovnicu prenosu žiarenia svetla pomocou numerickej metódy. Pri riešení syntetického modulu sú požadované atómové parametre, abundancie prvkov a modelová atmosféra. Výsledkom tohto procesu je syntetický Stokesov vektor. Tieto profily nie sú konečné a preto je ich nevyhnutné korigovať o vplyv inštrumentálneho profilu spektrografu a o efekt makroturbulencie. Konečný Stokesov vektor vznikne až konvolúciou už korigovaných hodnôt Stokesovho vektora s profilom rozptýleného svetla. V ďalšom kroku sa určí kvalita syntetického spektra pomocou funkcie odozvy. Funkcia odozvy porovnáva syntetické spektrum s pozorovaným. Výsledkom porovnania je parameter χ^2 (meritná funkcia), ktorým je charakterizovaná podobnosť spektier.

Cieľom inverzného modulu je teda nájsť také riešenie, pri ktorom je rozdiel medzi syntetickým a pozorovaným spektrom čo najmenší. To je dosiahnuté sofistikovanou

zmenou parametrov modelovej atmosféry tak, že opätovne vypočítané syntetické Stokesové profily budú v lepšej zhode s pozorovaniami.

V ďalšom kroku sa následne stanoví nová modifikácia atmosférických modelov. Atmosférický model sa pozmení len v určitých hĺbkových bodoch modelu, ktoré sú následne interpolované na všetky hĺbkové body atmosféry. Zopakuje sa výpočet syntetického spektra s korekciou o efekty, ktoré sú popísané vyššie. Vypočíta sa znovu meritná funkcia χ_{2i+1} zodpovedajúca novému iteračnému cyklu. Ak je novovypočítaná hodnota χ_{2i+1} je menšia ako hodnota tohto parametra v predchádzajúcom cykle, tak sa nový, modifikovaný model atmosféry ponechá a iterácia pokračuje znovu s týmto modelom. Ak nie, ponechá sa starý model a hľadajú sa iné úpravy atmosférického modelu, ktoré by viedli k menšiemu χ^2 . Ak po troch až štyroch iteráciách nenastala žiadna výraznejšia variácia χ^2 , tak posledný model je prijatý ako finálny a nasleduje ďalší výpočtový cyklus, ale už pre novú sadu napozorovaných Stokesových profilov. Opísaným procesom sú určené hodnoty jednotlivých fyzikálnych parametrov v rôznych optických hĺbkach, ktoré najlepšie odpovedajú nameranému spektru Stokesových profilov.

6.3 HAZEL – Hanle and Zeeman Light

Program HAZEL (Asensio Ramos, 2008) je vyvinutý pre syntézu a inverziu Stokesových parametrov ovplyvnených pôsobením polarizácie atómových hladín, Hanleho a Zeemanovým efektom. Pomenovanie programu HAZEL je akronymom anglického výrazu HAnle and ZEeman Light. Program je schopný popri syntéze chromosférických spektrálnych čiar zároveň syntetizovať fotosférické spektrálne čiary a dokonca započítať aj vplyv telurických čiar. Predpoklady pri syntéze fotosférických čiar sú hydrostatická a lokálna termodynamická rovnováha vo vybranej časti slnečnej atmosféry. Pri syntéze chromosférickej spektrálnej čiary je to predpoklad štatistickej rovnováhy.

Pri zohľadnení spomenutých termodynamických predpokladov je nevyhnutné vziať do úvahy aj ďalšie, t.j. predpoklad opticky tenkej atmosféry a konštantných vlastností atmosféry. Atmosféra, kde sa tvorí spektrálna čiara He I 10830 Å, pozostáva z chromosférického zmagnetizovaného materiálu, ktorý sa nachádza vo výške 3'', čo zodpovedá 2000 km, nad viditeľným slnečným povrchom. Takáto atmosféra pozostáva z atómov, ktoré sa nachádzajú vo vnútri definovanej vrstvy a sú ožarované nepolarizovaným fotosférickým radiačným poľom. Do úvahy sa berie efekt okrajového stemnenia, ktorého

vplyv závisí od pozorovanej vlnovej dĺžky a heliocentrického uhla. Pre zjednodušenie výpočtu je vhodné zanedbať efekt žiarivého prenosu vo vnútri vrstvy, pretože takéto radiačné pole produkuje nerovnováhu.

Syntetický Stokesov vektor $\mathbf{I}(\nu, \Omega) = (I, Q, U, V)$ je získavaný riešením rovnice prenosu žiarenia:

$$\frac{d\mathbf{I}(\nu, \Omega)}{ds} = \epsilon(\nu, \Omega) - K(\nu, \Omega)\mathbf{I}(\nu, \Omega) \quad (17)$$

Rovnica prenosu žiarenia pozostáva z emisného vektora ϵ , vypočítaného Stokesovho vektora \mathbf{I} a matice šírenia \mathbf{K} , premenná s je geometrická vzdialenosť pozdĺž lúča. Všetky veličiny sú závislé od frekvencie žiarenia a smeru šírenia žiarenia. Koeficienty emisného vektora a matice šírenia sú funkciou multipolárnych koeficientov matice atómovej hustoty $\rho_Q^K(J, J')$. Multipolárne komponenty atómovej matice hustoty sa využijú pre určenie atómovej polarizácie atómových hladín atómov Héliu. Emisný vektor a koeficienty matice prenosu žiarenia sú opísané v práci Landi Degl'Innocenti a Landolfi (2004). Tieto koeficienty sú závislé na hustote atómov He I a na Voight a Faraday-Voigtovom profile (pozri kapitolu 5.6 Landi Degl'Innocenti a Landolfi, 2004). Pre definovanie profilov sú potrebné nasledujúce parametre: a je parameter útlmu, v_{th} je tepelné rozšírenie, ktoré charakterizuje tepelný pohyb plazmy a nakoniec parameter v_{mac} , ktorý reprezentuje Dopplerovský posun (Asensio Ramos, 2008). Výstup z inverzie závisí od voľby atmosférického modelu. Vo všeobecnosti platí, že pre fotosféru je možné určiť komponenty vektora magnetického poľa B_x, B_y, B_z , priebeh teploty a Dopplerovskú rýchlosť. Pre model chromosféry je možné získať komponenty vektora magnetického poľa B_x, B_y, B_z , Dopplerovskú rýchlosť, tepelné rozšírenie, optickú hrúbku, parameter beta a parameter útlmu.

Opis priebehu inverzie:

Proces výpočtu je zadaný v konfiguračnom súbore, ktorý je kľúčovým súborom pri syntéze a inverzii dát. Pomocou syntetického modulu programu HAZEL 2.0 sa určuje výsledok riešenia rovnice prenosu polarizovaného žiarenia numerickou metódou. Pre riešenie syntetického modulu sú nutné modelová atmosféra a konfiguračný súbor. Výsledkom je syntetické spektrum, ktoré je následne porovnané s pozorovaným. Ich vzájomná podobnosť je pritom charakterizovaná parametrom χ^2 . Cieľom inverznej stratégie je minimalizovanie meritnej funkcie (χ^2) kvantifikovanej rozdielom medzi vypočítanými Stokesovými profilmi a pozorovanými profilmi. Minimalizácia meritnej funkcie je

dosiahnutá sofistikovanou zmenou parametrov modelovej atmosféry tak, že opätovne určené syntetické Stokesové profily sú v lepšej zhode s pozorovaniami. Pre ďalší krok sa znovu určí modifikácia atmosférického modelu. Pomocou neho sa potom vypočíta nová meritná funkcia χ_{2i+1} odpovedajúca novému iteračnému cyklu. Ak novo vypočítaná hodnota χ_{2i+1} je menšia ako je hodnota meritnej funkcie v predchádzajúcom cykle (χ_{2i}), tak sa prijme modifikovaný model atmosféry. Ak nie je splnená podmienka pre prijatie nového modifikovaného modelu atmosféry, tak sa ponechá starý model a hľadajú sa iné úpravy pôvodného modelu, ktoré by viedli k menšiemu χ^2 .

7. Výsledky

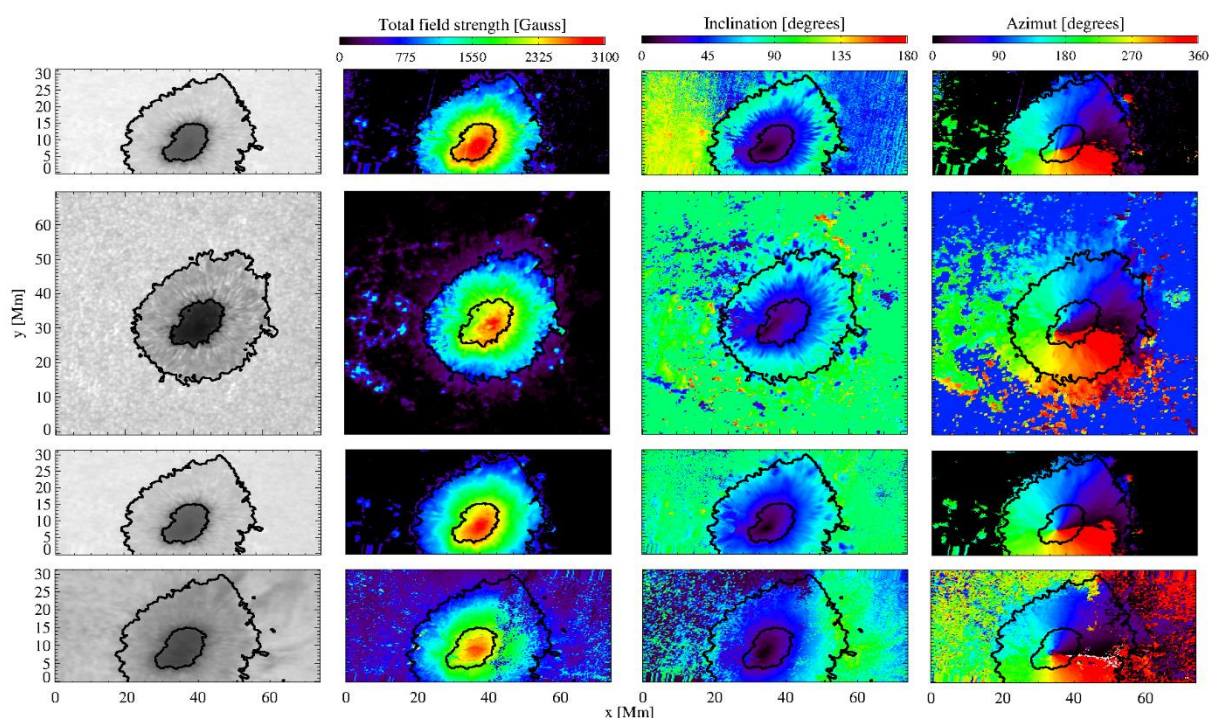
V tejto časti dizertačnej práce sú zosumarizované výsledky získané pomocou inverzných kódov SIR a HAZEL, ktoré boli aplikované na vybrané pozorovania analyzovanej slnečnej škvrny. Výstupom inverzných kódov SIR a HAZEL sú fyzikálne parametre charakterizujúce časť slnečnej atmosféry v mieste pozorovania.

V prvej časti tejto kapitoly sú opísané parametre magnetického poľa v oblasti študovanej slnečnej škvrny v rôznych výškach slnečnej atmosféry, ktoré odpovedajú výškam formovania spektrálnych čiar Ca I 10839 Å, Fe I 6302,5 Å, Si I 10827 Å a He I 10830 Å. Jednotlivé zložky vektora magnetickej indukcie sú prezentované vo sférickej a taktiež v karteziánskej súradnicovej sústave. V ďalšej časti sú zosumarizované výsledky získané analýzou Dopplerovských rýchlostí plazmy v mieste pozorovania.

Programy SIR a HAZEL umožňujú určenie hodnôt jednotlivých fyzikálnych parametrov v rôznych optických hĺbkach. Pri výpočtoch prezentovaných v tejto práci ale neboli povolené výškové gradienty pre zložky vektora magnetickej indukcie. Dôvodom je, že postup výpočtu inverzie pri povolení gradientov smeruje veľakrát k nefyzikálnym riešeniam.

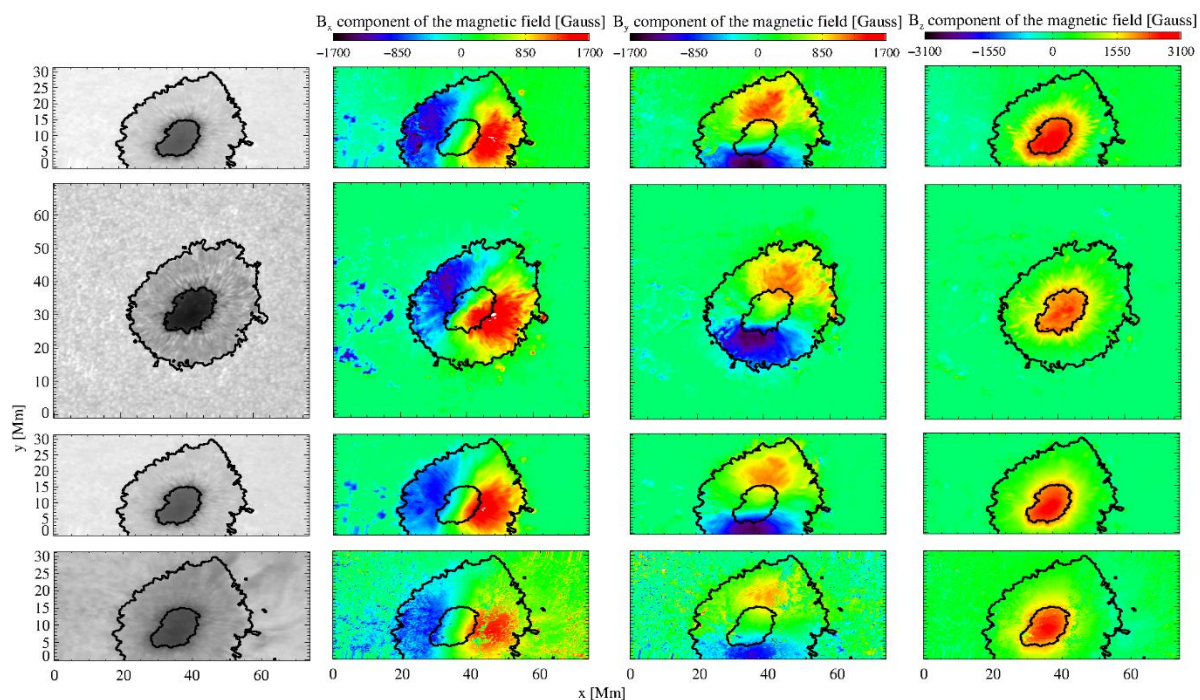
7.1 Parametre magnetického poľa pozorovanej škvrny vo fotosfére a v chromosfére

Vypočítané parametre vektora magnetickej indukcie určené pre oblasť pozorovanej slnečnej škvrny sú uvedené na obrázku č. 16. Táto séria obrázkov reprezentuje parametre indukcie magnetického poľa vo sférickom súradnicovom systéme. Jednotlivé stĺpce reprezentujú intenzitné pozorovanie slnečnej škvrny, absolútnu veľkosť vektora magnetickej indukcie, hodnoty inklináčného uhla a azimutu. Riadky na obrázku č. 16 pritom odpovedajú pozorovaniam získaným v jednotlivých spektrálnych čiarach (prvý riadok zodpovedá spektrálnej čiare Ca I 10839 Å, druhý riadok spektrálnej čiare Fe I 6302,5 Å, tretí riadok spektrálnej čiare Si I 10827 Å, štvrtý riadok chromosférickej spektrálnej čiare He I 10830 Å). Jednotlivé dielčie mapy majú osi x a y znázornené v jednotkách Mm, t.j. 10^6m .



Obrázok č. 16: Morfológia pozorovanej slnečnej škvrny (prvý stĺpec) a parametre vektora magnetickej indukcie vo sférickej súradnicovej sústave (druhý až štvrtý stĺpec) získané prostredníctvom analýzy spektrálnych čiar Ca I 10839 Å (prvý riadok), Fe I 6302,5 Å (druhý riadok), Si I 10827 Å (tretí riadok) uskutočnenej pomocou programu SIR a prostredníctvom analýzy spektrálnej čiary He I 10830 Å (štvrtý riadok) vykonanej pomocou programu HAZEL. Prvý stĺpec zľava popisuje morfológiu slnečnej škvrny. Druhý až štvrtý stĺpec popisuje zložky vektora magnetickej indukcie (absolútnu veľkosť vektora magnetickej indukcie, veľkosť inklinácie a azimut). Kontúry označené čiernou farbou reprezentujú intenzitnú hranicu umbry - penumbry a penumbry – pokojného Slnka.

Výsledky transformované do karteziánskej súradnicovej sústavy (s osou z smerujúcou kolmo k slnečnému povrchu) sú zobrazené na obrázku č. 17. Jednotlivé stĺpce obrázka č. 17 reprezentujú intenzitné pozorovanie slnečnej škvrny a jednotlivé význačné priemety vektora magnetickej indukcie do osí x, y a z. Pričom os x opisuje smer východ a západ, os y opisuje smer sever a juh. Zložky B_x a B_y je preto možné stotožniť s horizontálnym magnetickým poľom. Priemet vektora magnetickej indukcie do osi z opisuje zložka B_z , ktorú je možné stotožniť s vertikálnym magnetickým poľom. Riadky na obrázku č. 17 odpovedajú pozorovaniam získaným v jednotlivých spektrálnych čiarach rovnako ako je to uvedené v prípade obrázka č. 16. Jednotlivé dielčie mapy majú osi x a y opäť vykreslené v jednotkách Mm.



Obrázok č. 17: Morfológia pozorovanej slnečnej škvrny (prvý stĺpec) a parametre vektora magnetickej indukcie v karteziánskej súradnicovej sústave (druhý až štvrtý stĺpec) získané prostredníctvom analýzy spektrálnych čiar Ca I 10839 Å (prvý riadok), Fe I 6302,5 Å (druhý riadok), Si I 10827 Å (tretí riadok) uskutočnenej pomocou programu SIR a prostredníctvom analýzy spektrálnej čiary He I 10830 Å (štvrtý riadok) vykonanej pomocou programu HAZEL. Prvý stĺpec z ľavej strany popisuje morfológiu slnečnej škvrny. Druhý až štvrtý stĺpec popisuje zložky vektora magnetickej indukcie (B_x , B_y , B_z). Jednotlivé kontúry označené čiernou farbou reprezentujú intenzitnú hranicu umbry - penumbry a penumbry – pokojného Slnka.

Najtmavšiu pozorovanú oblasť slnečnej škvrny tvorí umbra, ktorú ohraničuje penumbra. Vonkajšiu hranicu penumbry tvorí rozhranie medzi samotnou škvrnou a okolitou slnečnou atmosférou. V oblasti penumbry je zreteľne viditeľná jej filamentárna štruktúra (obrázok č. 16 a 17). V okolitej pokojnej fotosfére je dobre viditeľná granulácia, ktorá zodpovedá vrcholkom podpovrchových konvektívnych prúdov. V chromosfére je viditeľná slnečná škvrna spolu s filamentami.

Vlastnosti magnetického poľa slnečnej škvrny v spodnej fotosfére boli určené prostredníctvom analýzy spektrálnej čiary Ca I 10839 Å (pozri kapitolu 5.2) a sú znázornené v prvom riadku obrázkov č. 16. Veľkosť vektora magnetickej indukcie v umbre dosahuje v tomto prípade v niektorých miestach hodnoty prevyšujúce až 3000 G. Priemerná hodnota zistená v umbre dosahuje veľkosť 2560 G. Veľkosť vektora

magnetickej indukcie klesá smerom od umbry ku okraju slnečnej škvry. V penumbre je priemerná hodnota veľkosti vektora magnetickej indukcie na úrovni 1200 G.

Druhou zložkou vektora magnetickej indukcie vo sférickej súradnicovej sústave (obrázok č. 16) je inklinálny uhol. Inklinácia dosahuje hodnoty z intervalu 0° až 180° . Hraničná hodnota 0° pritom vyjadruje, že vektor magnetickej indukcie je kolmý na povrch Slnka v mieste pozorovania a smeruje od pozorovateľa zatiaľ čo hodnota 180° opisuje orientáciou vektora smerom k pozorovateľovi. Prostredníctvom analýzy spektrálnej čiary Ca I 10839 Å sme ukázali, že v umbre slnečnej škvry nadobúda inklinácia hodnoty až na úrovni 2° (obrázok č. 16). To znamená, že v umbre dominuje takmer vertikálne magnetické pole ktoré smeruje od pozorovateľa. Priemerná hodnota inklinácie v umbre dosahuje hodnoty 21° . Inklinálny uhol narastá smerom k vonkajšiemu okraju penumbry. Priemerná hodnota inklináčného uhla v penumbre je 57° , t.j. v penumbre je takmer horizontálny smer vektora magnetickej indukcie. Treťou zložkou vektora magnetickej indukcie je azimut, ktorý spojite narastá v protismere hodinových ručičiek z hodnoty 0° až na hodnotu 360° (obrázok č. 16).

Výsledky odvodené z pozorovaní v spektrálnej čiare Ca I 10839 Å transformované do karteziánskej súradnicovej sústavy (obrázok č. 17) preukazujú, že zložka B_x nadobúda maximálne hodnoty v penumbre slnečnej škvry a dosahuje hodnoty ± 1700 G. Priemet vektora magnetickej indukcie do osi y opisuje zložka B_y . Maximálne hodnoty sú lokalizované opäť v penumbre slnečnej škvry. Typické hodnoty pre zložku B_y sú z intervalu ± 1700 G. Keďže zložky B_x a B_y sú dominantné v penumbre, znamená to, že je tam silnejšie horizontálne pole ako v umbre. Dominantnou zložkou vektora magnetickej indukcie je ale priemet do osi z opisujúci vertikálny smer vektora. Priemet do osi z nadobúda maximálne hodnoty nad 3000 G a to v izolovaných bodoch umbry slnečnej škvry. Priemerná hodnota zložky B_z v umbre je 2366 G. Hodnoty zložky B_z nadobúdajú menšie hodnoty smerom k vonkajšiemu okraju penumbry. Priemerná hodnota B_z v penumbre je len približne 646 G.

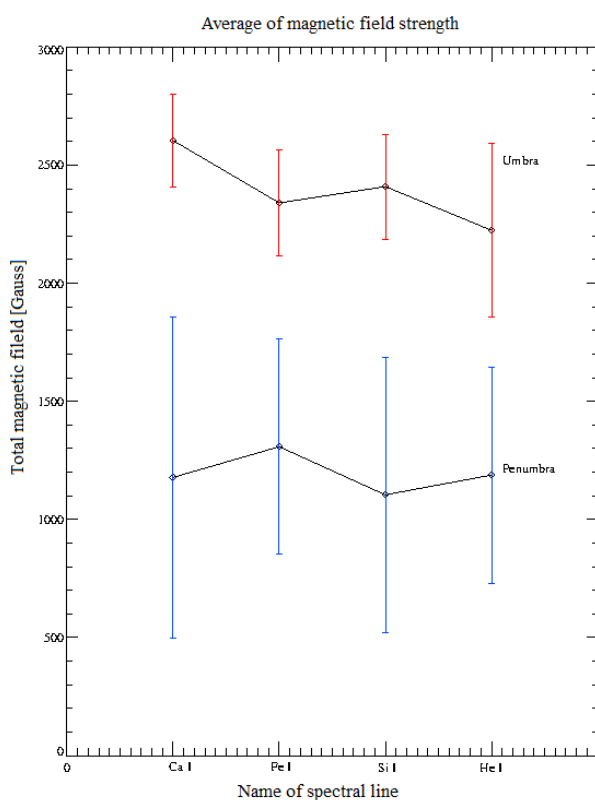
Druhou skúmanou spektrálnou čiarou je Fe I 6302,5 Å (pozri kapitolu 5.2), ktorá sa formuje vyššie vo fotosfére ako už spomínaná spektrálna čiara Ca I 10839 Å. Veľkosť vektora magnetickej indukcie vo sférickej súradnicovej sústave (obrázok č. 16) v umbre dosahuje hodnoty takmer 3000 G. Priemerná hodnota veľkosti vektora magnetickej indukcie v umbre je rovná 2330 G. Veľkosť vektora magnetickej indukcie

smerom ku vonkajšiemu okraju škvŕny klesá. Priemerná hodnota veľkosti magnetickej indukcie v penumbre dosahuje 1310 G. V umbre inklinácia nadobúda extrémne hodnoty na úrovni 2° ale jej priemerná hodnota je rovná 26° . Hodnoty inklinácie narastajú smerom ku vonkajšiemu okraju penumbry. V penumbre je priemerná hodnota inklinácie rovná 64° . Azimut nadobúda spojité hodnoty v intervale od 0° do 360° . V prípade karteziánskej súradnicovej sústavy (obrázok č. 17) nadobúda zložka B_x pre spektrálnu čiaru Fe I 6302,5 Å hodnoty v intervale ± 1700 G a zložka B_y nadobúda hodnoty v intervale ± 1520 G. Priemet vektora magnetickej indukcie do osi z dosahuje v niektorých častiach umbry hodnoty nad 2600 G. Priemerná hodnota zložky B_z v umbre je rovná 2070 G. Zložka B_z nadobúda menšie hodnoty smerom k okraju slnečnej škvŕny. Priemerná hodnota B_z v penumbre je 612 G.

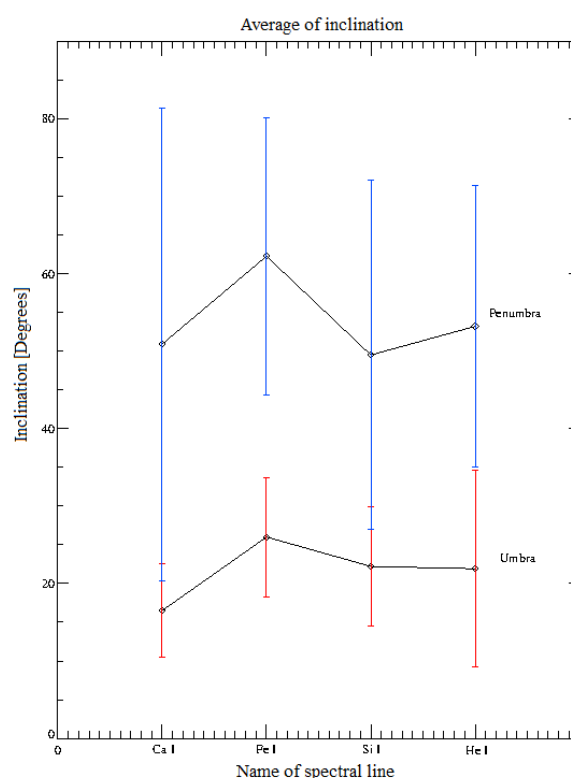
Tretou skúmanou spektrálnou čiarou je Si I 10827 Å (pozri kapitolu 5.2). Táto spektrálna čiara sa tvorí nad oblasťami spektrálnych čiar Ca I 10839 Å a Fe I 6302,5 Å. Veľkosť vektora magnetickej indukcie určená prostredníctvom spektrálnej čiary Si I 10827 Å dosahuje maximálne hodnoty 2900 G v umbre slnečnej škvŕny (obrázok č. 16). Priemerná hodnota vektora magnetickej indukcie v umbre je pritom 2440 G. Smerom ku vonkajšiemu okraju penumbry veľkosť vektora magnetickej indukcie klesá podobne ako v predchádzajúcich prípadoch. Priemerná hodnota veľkosti vektora magnetickej indukcie v penumbre je 1090 G. Inklinácia vektora magnetickej indukcie v umbre dosahuje minimálne hodnoty na úrovni 2° (obrázok č. 16). Vypočítaná priemerná hodnota inklinácie v umbre je $22,6^\circ$. Inklináčny uhol v penumbre dosahuje priemerné hodnoty 50° . Azimut vektora magnetickej indukcie opäť nadobúda spojité hodnoty v intervale od 0° do 360° . Priemety vektora magnetickej indukcie B_x , B_y dosahujú v prípade spektrálnej čiary Si I 10827 Å hodnoty ± 1560 G (obrázok č. 17). Maximálne hodnoty dosahujú zložky B_x , B_y v penumbre slnečnej škvŕny. Zložka B_z dosahuje maximálne hodnoty v umbre. Sú na úrovni 2700 G. Priemerná hodnota zložky B_z v umbre je rovná 2230 G. Smerom ku okraju sa hodnoty zložky B_z znižujú. Priemerná hodnota zložky B_z v penumbre dosahuje 596 G.

Štvrtá skúmaná oblasť zodpovedá miestam tvorby chromosférickej spektrálnej čiary He I 10830 Å (pozri kapitolu 4.2). Veľkosť vektora magnetickej indukcie v chromosfére dosahuje v umbre maximálne hodnoty do 2700 G (obrázok č. 16). Priemerná hodnota veľkosti vektora magnetickej indukcie v umbre je 2200 G. V penumbre dosahuje priemerná hodnota vektora magnetickej indukcie 1160 G.

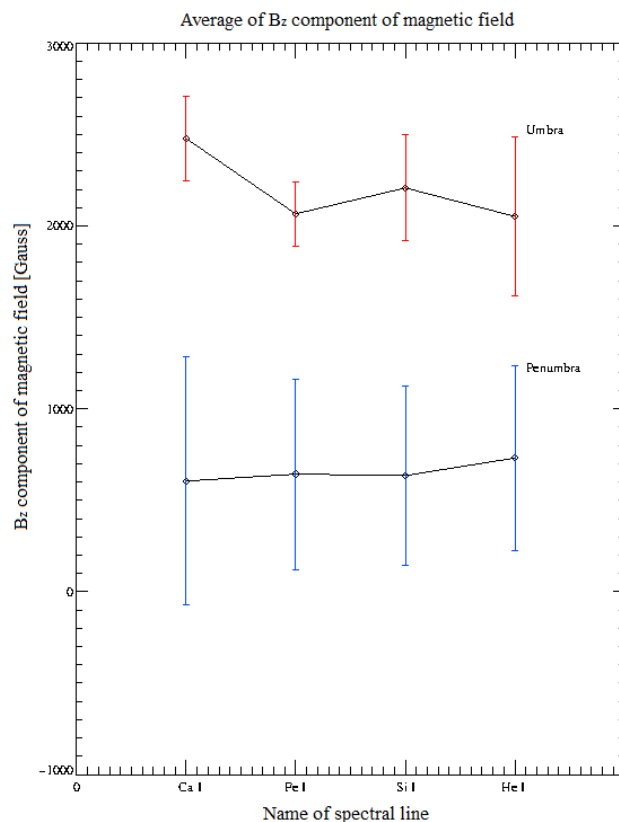
Inklinácia vektora magnetickej indukcie v umbre dosahuje v niektorých izolovaných bodoch hodnotu až 0° (obrázok č. 17), čo naznačuje, že smer vektora magnetickej indukcie je dominantne vertikálny. Priemerná hodnota inklináčného uhla v umbre je 26° . Priemerná hodnota inklináčného uhla v penumbre dosahuje 54° . Azimut vektora magnetickej indukcie v chromosfére dosahuje spojité hodnoty od 0° až do 360° . Zložky B_x , B_y dosahujú v chromosfére maximálne hodnoty v penumbre a minimálne hodnoty v umbre (obrázok č. 17). Maximálne hodnoty zložky B_x dosahujú veľkosti ± 1500 G a maximálne hodnoty zložky B_y dosahujú 1200 G. V penumbre teda naďalej dominuje horizontálny smer vektora magnetickej indukcie. Zložka vektora magnetickej indukcie B_z dosahuje maximálne hodnoty v umbre. Maximálna hodnota zložky B_z v umbre je 2400 G. Priemerná hodnota zložky B_z v umbre je 1966 G. To vyjadruje, že v umbre



Obrázok č. 18: Priemerné hodnoty veľkosti vektora magnetickej indukcie pre jednotlivé spektrálne čiary v umbre a penumbre s vypočítanými štandardnými odchýlkami. Os x popisuje názov spektrálnej čiary. Odchýlky zobrazené modrou farbou zodpovedajú penumbre.



Obrázok č. 19: Priemerné hodnoty inklinácie vektora magnetickej indukcie pre jednotlivé spektrálne čiary v umbre a penumbre s vypočítanými štandardnými odchýlkami. Os x popisuje názov spektrálnej čiary. Odchýlky zobrazené modrou farbou zodpovedajú penumbre.



Obrázok č. 20: Priemerné hodnoty B_z zložky vektora magnetickej indukcie s vypočítanými chybami pre jednotlivé spektrálne čiary v umbre a penumbre. Os x popisuje názov spektrálnej čiary. Odchýlky zobrazené modrou farbou zodpovedajú penumbre. Odchýlky zobrazené červenou farbou reprezentujú umbru.

dominuje vertikálny smer vektora magnetickej indukcie. Priemerná hodnota zložky B_z v penumbre je 691 G.

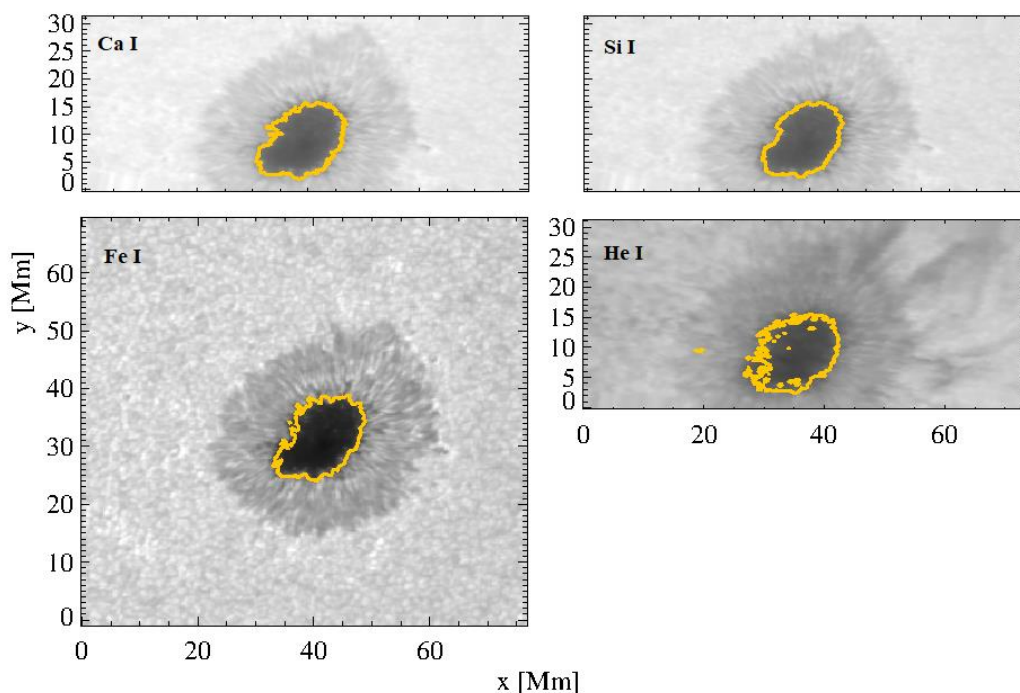
Na obrázkoch č. 18, 19 a 20 sú grafy s typickými hodnotami parametrov magnetického poľa, menovite: veľkosť vektora magnetickej indukcie, inklinácie a veľkosti zložky B_z . Os x reprezentuje spektrálnu čiaru, ktorej hodnota patrí a os y reprezentuje zobrazený parameter vektora magnetickej indukcie.

Priemerné hodnoty absolútnej veľkosti vektora magnetickej indukcie určené pre spektrálne čiary Ca I 10839 Å, Fe I 6302,5 Å, Si I 10827 Å, He I 10830 Å v umbre a penumbre skúmanej slnečnej škvrny sú znázornené na obrázku č. 18. Priemerné

hodnoty veľkosti vektora magnetickej indukcie sú v intervale od 2224 G až do 2604 G. K jednotlivým priemerným hodnotám je určená odchýlka hodnôt. Odchýlka popisuje rozloženie hodnôt okolo priemernej hodnoty vo vybranej oblasti. Získané hodnoty naznačujú tendenciu, že absolútna veľkosť magnetického poľa v umbre s narastajúcou výškou klesá. Priemerné hodnoty veľkosti vektora magnetickej indukcie v penumbre naopak indikujú, že veľkosť tohto parametra sa v penumbre s výškou takmer nemení.

Priemerné hodnoty inklináčného uhla určené pre všetky analyzované spektrálne čiary v oblastiach umbry a penumbry sú vyobrazené na obrázku č. 19. Priemerné hodnoty inklináčného uhla v umbre sa nachádzajú v intervale od 16° až 26° . Získané výsledky preukazujú, že priemerná hodnota inklinácie vektora magnetickej indukcie v umbre s narastajúcou výškou mierne narastá. Hodnoty inklináčného uhla v penumbre sú zaťažené výraznou chybou. Čiastočne ale naznačujú, že inklináčny uhol je s narastajúcou výškou takmer nemenný.

Na obrázku č. 20 sú znázornené veľkosti priemerných hodnôt zložky vektora magnetickej indukcie B_z určené pre spektrálne čiary Ca I 10839 Å, Fe I 6302,5 Å, Si I 10827 Å a He I 10830 Å.



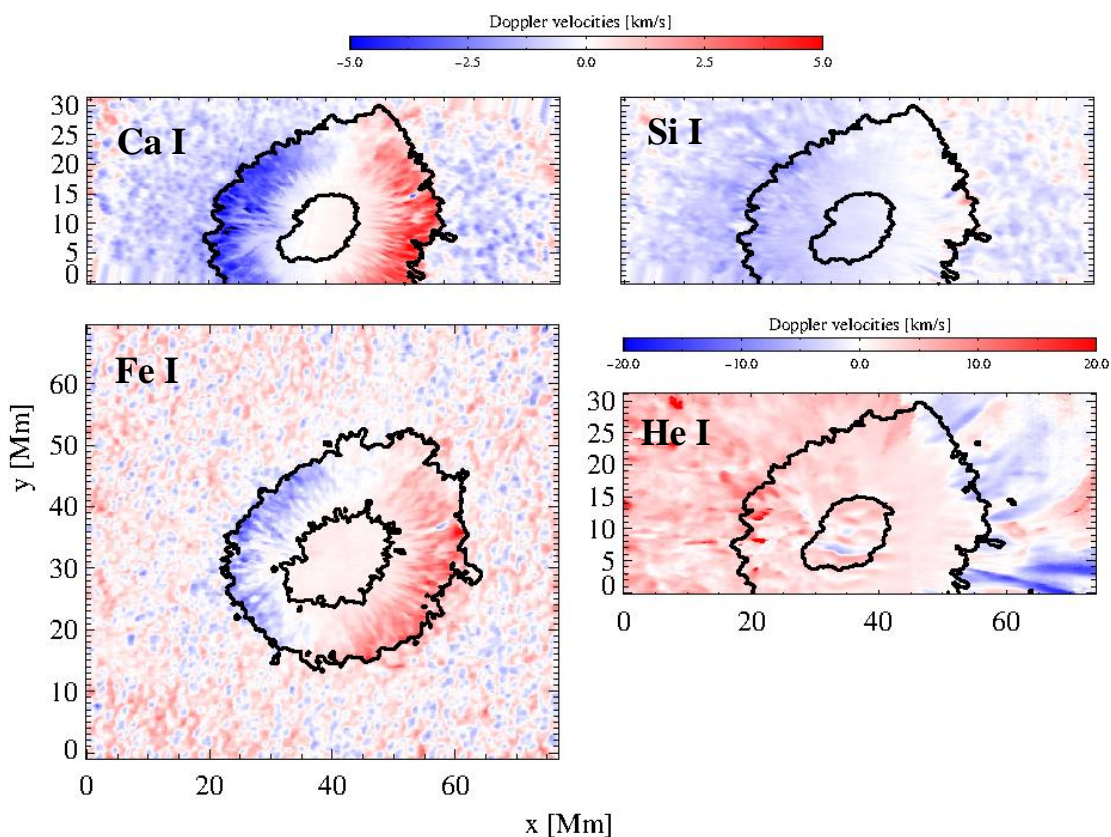
Obrázok č. 21: Intenzitné mapy získané z pozorovaní spektrálneho kontinua v blízkosti spektrálnych čiar Ca I, Fe I a Si I a v jadre spektrálnej čiary He I. Žltou farbou sú vyobrazené najoptimálnejšie kontúry pre spektrálne čiary Ca I 10839 Å, Fe I 6302,5 Å, Si I 10827 Å a He I 10830 Å. Os x a y sú škálované v Mm.

10827 Å, He I 10830 Å v umbre a penumbre. Priemerné hodnoty vypočítané pre umbru sa nachádzajú v intervale od 2052 G až do 2478 G. K jednotlivým priemerným hodnotám sú určené odchýlky hodnôt. Získané výsledky poukazujú, že zložka vektora magnetickej indukcie B_z má v umbre tendenciu s výškou klesať. V penumbre má zložka B_z tendenciu mierne narastať s výškou. Výsledky sú ale opäť zaťažené veľkou chybou určenia.

Získané výsledky uvedené vyššie popisujú kompletný vektor magnetickej indukcie v pozorovanej slnečnej škvrne, a preto umožňujú aj overiť platnosť Jurčákovho kritéria v rôznych atmosférických výškach. Jurčákové kritérium pre spektrálnu čiaru Fe I odpovedá hodnote $B_z = 1867$ G (pozri kapitolu 1.2). Táto hodnota odpovedá intenzitnej hranici umbra – penumbra (UP) v spomínanej spektrálnej čiare. Uvedenú hodnotu Jurčákovho kritéria nieje možné použiť pre identifikovanie hranice umbra – penumbra pre naše merania v spektrálnych čiarach Ca I 10839 Å, Fe I 6302,5 Å, Si I 10827 Å a He I 10830 Å. Najoptimálnejšie hodnoty zložky B_z vyhovujúce hranici umbra – penumbra pre naše merania v spektrálnych čiarach Ca I 10839 Å, Fe I 6302,5 Å, Si I 10827 Å a He I 10830 Å sú vyobrazené na obrázku č. 21. Najvhodnejšou hodnotou B_z , ktorou sa identifikuje hranica umbra – penumbra, je pre spektrálnu čiaru Ca I 10839 Å hodnota 2010 G. Pre spektrálnu čiaru Fe I 6302,5 Å je najvhodnejšou nami určenou hodnotou pre stanovenie hranice umbra – penumbra veľkosť zložky B_z na úrovni 1800 G. Intenzitnú hranicu umbra – penumbra v prípade spektrálnej čiary Si I 10827 Å najlepšie reprezentuje veľkosť $B_z = 1700$ G. Pre chromosférickú spektrálnu čiaru He I 10830 Å určuje intenzitnú hranicu umbra – penumbra hodnota $B_z = 1730$ G.

7.2 Dopplerovské rýchlostné polia

Prostredníctvom inverzie fotosférických spektrálnych čiar Ca I 10839 Å, Fe I 6302,5 Å a Si I 10827 Å a chromosférickej spektrálnej čiary He I 10830 Å boli určené Dopplerovské rýchlosti plazmy v mieste pozorovania. Získané výsledky sú znázornené na obrázku č. 22. Červená farba v tomto prípade popisuje pohyb slnečnej plazmy smerom od pozorovateľa. Modrá farba popisuje pohyby hmoty smerom k pozorovateľovi.



Obrázok č.22: Dopplerovské rýchlosti plazmy vo fotosfére určené prostredníctvom inverzie spektrálnych čiar Ca I 10839 Å, Fe I 6302,5 Å, Si I 10827 Å pomocou programu SIR a chromosférické Dopplerovské rýchlosti odvodené z analýzy spektrálnej čiar He I 10830 Å pomocou program HAZEL.

V prípade fotosférickej spektrálnej čiar Ca I 10839 Å sú v penumbre slnečnej škvrny zreteľne viditeľné horizontálne pohyby smerom von od jej stredu (obrázok č. 22, panel vľavo hore). Jedná sa o typický prejav takzvaného Evershedovho toku (pozri kapitolu 1.1). Dopplerovské rýchlosti dosahujú v penumbre hodnoty až 6 km/s, pričom typická Dopplerovská rýchlosť v penumbre je na úrovni 4 km/s. Priemerné hodnoty Dopplerovských rýchlostí zaznamenaných v umbre slnečnej škvrny dosahujú vo všeobecnosti oveľa nižšie veľkosti ako v penumbre. Priemerná hodnota odvodenej Dopplerovskej rýchlosti v umbre je pre spektrálnu čiaru Ca I 10839 Å na úrovni 0,2 km/s (odchýlka je 0,012 km/s).

Dopplerovské rýchlosti odvodené z pozorovaní fotosférickej spektrálnej čiar Fe I 6302,5 Å majú v penumbre slnečnej škvrny porovnateľný charakter ako v prípade spektrálnej čiar Ca I 10839 Å. Ide o horizontálne pohyby smerom von od stredu

slnečnej škvrny, ktoré, ako už bolo uvedené, sú typickým príkladom pre Evershedov tok. Dopplerovské rýchlosti dosahujú v tomto prípade v penumbre maximálnu hodnotu 5 km/s, pričom typická Dopplerovská rýchlosť v penumbre je 3,4 km/s. Priemerná hodnota odvodená Dopplerovskej rýchlosti v umbre je pre spektrálnu čiaru Fe I 6302,5 Å na úrovni 0,32 km/s (odchýlka je 0,006 km/s).

Pre fotosférickú spektrálnu čiaru Si I 10827 Å nie sú horizontálne pohyby plazmy v penumbre slnečnej škvrny už tak zreteľne viditeľné ako v prípade spektrálnych čiar Ca I 10839 Å a Fe I 6302,5 Å. Maximálne hodnoty Dopplerovských rýchlostí v penumbre sú 2,8 km/s. Typické hodnoty Dopplerovských rýchlostí pre penumbru dosahujú veľkosť 1,7 km/s. Rozdiel medzi Dopplerovskými rýchlosťami v umbre a penumbre nieje až taký veľký ako je to pri spektrálnych čiarach Ca I 10839 Å a Fe I 6302,5 Å. Priemerná hodnota Dopplerovských rýchlostí v umbre slnečnej škvrny je 0,59 km/s (odchýlka je 0,028 km/s).

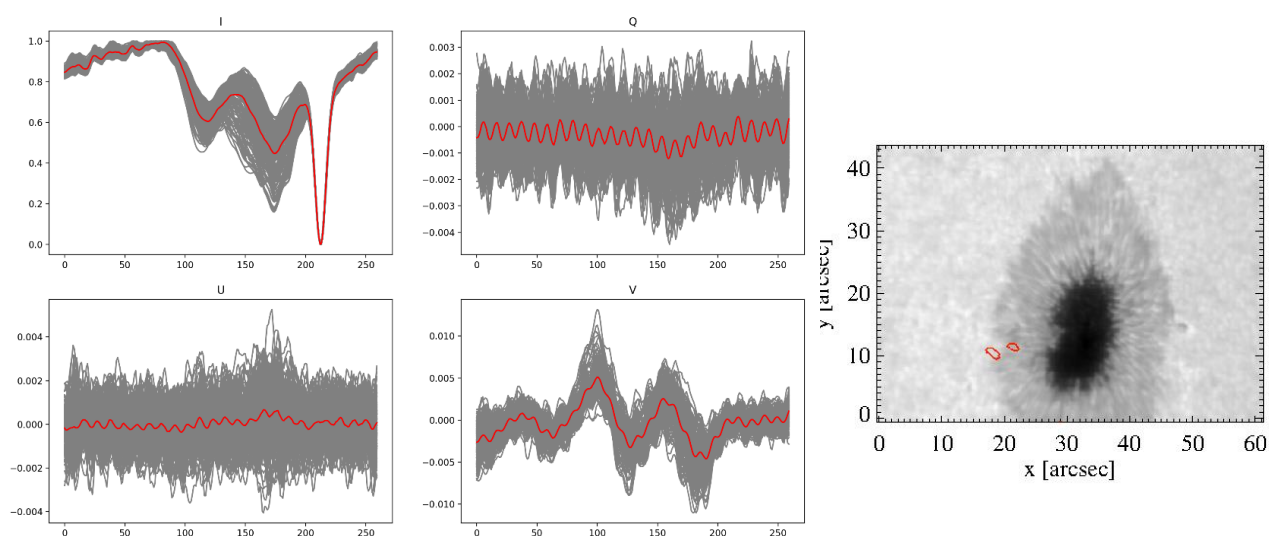
Pre chromosférickú spektrálnu čiaru He I 10830 Å sú Dopplerovské rýchlosti v penumbre zreteľne viditeľné a dosahujú výrazne vyššie hodnoty ako vo fotosfére (škála rýchlostí použitá na obrázku č. 22 je v prípade tejto spektrálnej čiary výrazne širšia). Tieto rýchlosti predstavujú horizontálne pohyby v penumbre. V porovnaní s fotosférickými spektrálnymi čiarami je, ale situácia iná. Horizontálne pohyby prevažne smerujú do vnútra slnečnej škvrny. Jedná sa o typický prejav tzv. inverzného Evershedovho toku, ktorý je detailne popísaný v kapitole č. 1.1. Tieto pohyby dosahujú v penumbre hodnoty až 15 km/s. Priemerné hodnoty prúdenia hmoty v umbre dosahujú veľkosti 2,1 km/s (odchýlka je 1,59 km/s).

Z uvedených priemerných hodnôt vyplýva, že hodnoty Dopplerovských rýchlostí či v umbre alebo v penumbre závisia od výšky, v ktorej sú pozorované. V penumbre slnečnej škvrny hodnoty fotosférických Dopplerovských rýchlostí vo všeobecnosti s narastajúcou výškou klesajú. Pre spektrálne čiaru Ca I 10839 Å a Fe I 6302,5 Å sú zreteľne identifikovateľné prejavy Evershedovho toku, ktorý nie je pozorovaný v prípade spektrálnej čiary Si I 10827 Å. V chromosfére opäť hodnoty Dopplerovských rýchlostí v penumbre narastajú, ale tok smeruje opačným smerom ako vo fotosfére. Pre umbru slnečnej škvrny hodnoty Dopplerovských rýchlostí vo všeobecnosti s narastajúcou výškou rastú.

Supersonické pohyby v chromosfére:

V chromosfére boli nájdené aj izolované oblasti na hranici penumbry a pokojného Slnka, ktoré zodpovedajú vysokorýchlostným tokom plazmy (pohyby presahujúce rýchlosť zvuku v danom prostredí). Tieto extrémne pohyby sa prejavujú vo forme dvojkomponentného tvaru profilov spektrálnej čiary He I 10830 Å. Pre korektnú interpretáciu takýchto profilov je ale predpoklad jednokomponentnej modelovej atmosféry absolútne nevhodný. Použitie dvojkomponentnej modelovej atmosféry však môže pri inverzii viesť k diametrálne rozdielnym výsledkom pre rozličné typy spektrálnych profilov. Preto bolo v prvom kroku potrebné roztriediť pozorované profily do jednotlivých skupín na základe ich vzájomnej podobnosti. Pre identifikovanie všetkých takýchto skupín bola použitá metóda k-means.

Algoritmus k-means pracuje so vstupnými dátami ku ktorým je potrebné predom určiť počet takzvaných zhlukov. Ako vstupné dáta boli použité Stokesové parametre. Intenzitný Stokesov parameter bolo potrebné normovať na hodnoty 0 a 1. Pričom



Obrázok č. 23: Vľavo: Výsledok metódy k-means pre Stokesové profily I , Q , U a V nachádzajúce sa vo vybranej skupine. Zobrazená skupina obsahuje Stokesové profily, v ktorých bola zaznamenaná druhá (vysokorýchlostná) komponenta spektrálnej čiary He I 10830 Å. Šedou farbou sú zobrazené pozorované Stokesové profily. Červenou farbou sú vyobrazené priemerné Stokesové profily.

Vpravo: Intenzitná mapa pozorovania v spektrálnom kontinuu. Červenou kontúrou sú vyznačené polohy skupiny Stokesových profilov zobrazených na dielčích paneloch vľavo.

hodnota 0 odpovedala najnižšej a hodnota 1 najvyššej nameranej hodnote intenzity v spektrálnej čiare He I 10830 Å. Týmto spôsobom sa vylúči hľadanie podobnosti medzi jednotlivými profilmi na základe hodnoty intenzity kontinua. Výpočet pomocou algoritmu k-means prebieha tak, že každému spektrálnemu profilu je priradené prirodzené číslo. Nadobudnuté číslo odpovedá poradovému číslu zhluku, ku ktorému bol Stokesov profil priradený. Každý takýto Stokesov profil odpovedá polohe v mape. Cieľom výpočtu je, aby jednotlivé body mapy boli priradené k najbližším skupinám. Priradenie jednotlivých spektrálnych profilov podlieha podmienke, aby vzdialenosti jednotlivých centier skupín od jednotlivých Stokesových profilov boli minimálne. Každá takáto skupina je nositeľom určitej črty (vlastnosti), ktoré majú Stokesové profily spoločné. V tomto prípade je to tvar spektrálnej čiary. Vo výsledku sa očakáva mapa, ktorá obsahuje prirodzené čísla. Tieto čísla reprezentujú skupinu podobných kriviek spektrálnych profilov. Vo výsledku je taktiež určený aj priemerný Stokesov profil. Takýmto spôsobom sa vytvára oblasť, ktorá reprezentuje priemerné spektrum spektrálnej čiary He I 10830 Å.

Zo získaných výsledkov, ktoré boli určené pomocou metódy zhlukovania, boli vybrané tie Stokesové profily, ktoré odpovedajú vysokorýchlostným tokom plazmy. Porovnaním priemerného spektra so vstupnými dátami sa určila vierohodnosť výsledkov. Týmto spôsobom sme identifikovali oblasti so špecifickými tvarmi spektrálnej čiary He I 10830 Å. Ukážka vybraného výsledku metódy k-means je zobrazená na obrázku č. 23. Jednotlivé dielčie obrázky zobrazujú Stokesové parametre I, Q, U a V. Intenzitný parameter poukazuje na existenciu sekundárnej vrstvy atmosféry, v ktorej sa vyskytujú pohyby plazmy s vysokými hodnotami Dopplerovských rýchlostí. Ostatné parametre Q, U a V poukazujú na prítomnosť magnetického poľa v atmosfére a potvrdzujú existenciu sekundárnej vrstvy chromosféry. Poloha vybranej oblasti je znázornená na panely na pravej strane obrázka č. 23. Táto mapa zobrazuje morfológiu slnečnej škvrny. Červenou farbou sú vyznačené polohy vybraných skupín Stokesových profilov. Vyznačené oblasti sa nachádzajú v blízkosti hranice penumbra – pokojné Slnko.

Pre identifikovanú izolovanú oblasť bola vykonaná inverzia, v ktorej bola použitá dvojkomponentná atmosféra namiesto jednodokomponentnej. Dvojkomponentná modelová atmosféra obsahuje dve samostatné zložky a to statickú a dynamickú. Statická modelová atmosféra je totožná s modelovou atmosférou použitou pre inverziu

slnečnej škvry. Dynamická modelová atmosféra obsahuje upravený počiatočný model. Modifikovaným fyzikálnym parametrom je Dopplerovská rýchlosť, ktorá v tomto prípade dosahuje vysoké hodnoty. Okrem spomínanej dvojkomponentnej chromosféry bola použitá modelová atmosféra pre fotosféru. Topológia použitej modelovej atmosféry bola nasledovná: svetlo najskôr prechádza cez fotosféru, kde je časť svetla absorbovaná atómami kremíka, následne svetlo prechádza do chromosféry, kde je absorbované atómami hélia nachádzajúcimi sa v statickej vrstve a následne svetlo vstupuje do dynamickej vrstvy chromosféry, kde je taktiež absorbované atómami hélia, ktoré majú vysokú supersonickú rýchlosť. Následne svetlo zo Slnka prechádza do zemskej atmosféry, kde je časť svetla absorbovaná molekulami vody. Pre takto nastavenú topológiu atmosféry je možné použiť simultánnu syntézu spektrálnych čiar Si I 10827 Å, He I 10827 Å a telurickej čiary vody s vlnovou dĺžkou 10832 Å a následne vykonať inverziu vybranej oblasti.

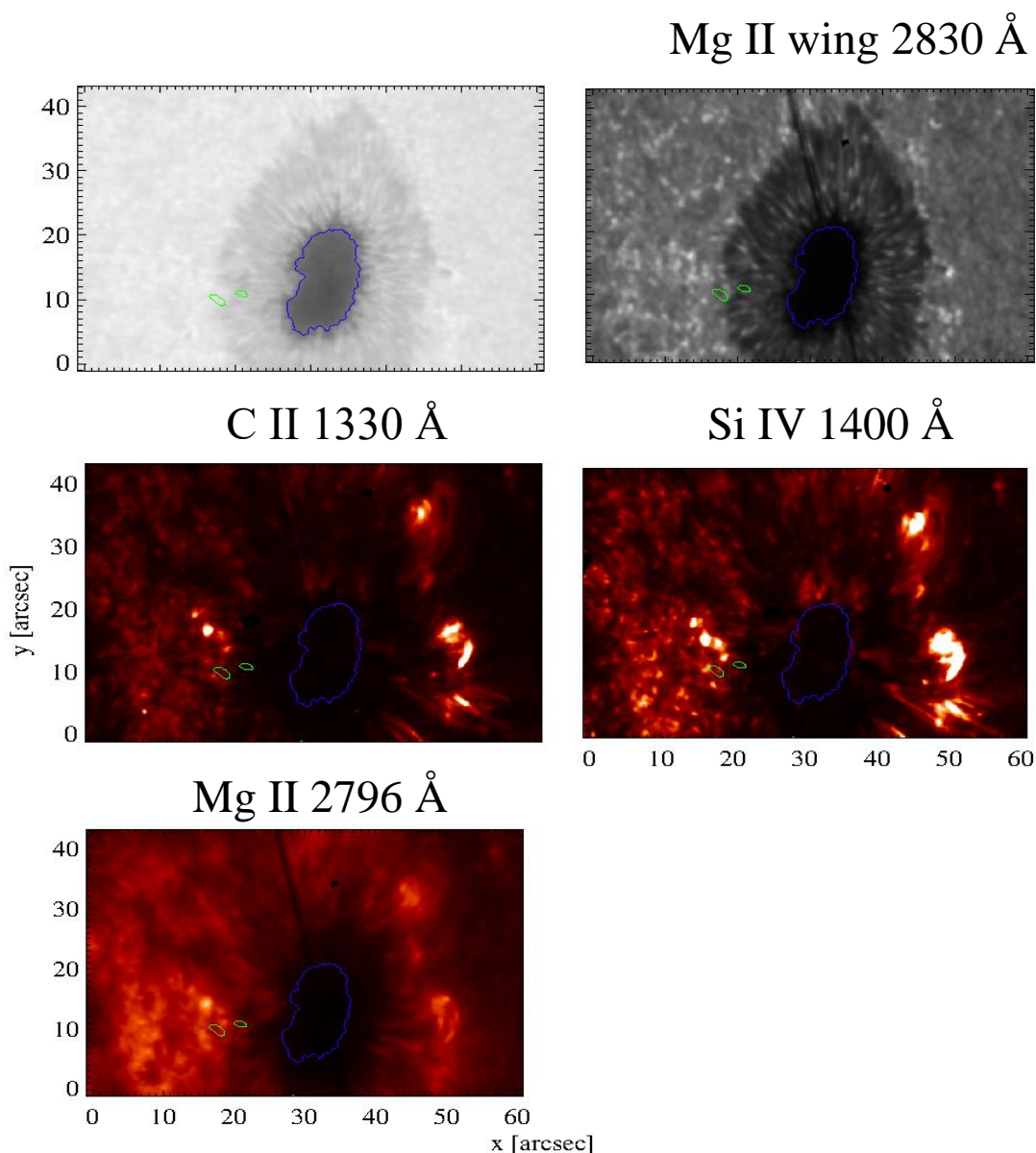
Výsledkom takto upravenej inverzie sú hodnoty zložiek vektora magnetickej indukcie v smere LOS pre karteziánsky a sférický súradnicový systém a Dopplerovské rýchlosti pre všetky tri zložky modelovej atmosféry.

Pre pozorovanú štruktúru je vypočítaná veľkosť vektora magnetickej indukcie pre spektrálnu čiaru Si I 10827 Å, ktorý dosahuje hodnoty od 200 do 1000 G, pričom veľkosť vektora magnetickej indukcie klesá v smere od slnečnej škvry. Priemerná hodnota vektora magnetického poľa je 577 G pre pozorovanú štruktúru vo fotosfére. Druhým vypočítaným parametrom pre pozorovanú štruktúru je inklináčny uhol, ktorý vo fotosfére smeruje takmer v smere zorného lúča. a jeho priemerná hodnota je 21°. Priemerná hodnota priemetu vektora magnetickej indukcie do osi z (B_z) je pre pozorovanú štruktúru vo fotosfére 540 G.

Usporiadanie hodnôt veľkosti vektora magnetickej indukcie pre pozorovanú štruktúru v statickej časti chromosféry je značne chaotické. Priemerná hodnota veľkosti vektora magnetickej indukcie pre pozorovanú štruktúru v statickej časti chromosféry je 637 G. Inklináčny uhol vektora magnetickej indukcie pre pozorovanú štruktúru v statickej časti chromosféry dosahuje hodnoty od 40° do 90°. Priemerná hodnota inklináčného uhla je 73°. Priemerná hodnota priemetu vektora magnetickej indukcie do osi z (B_z) je v statickej vrstve chromosféry pre pozorovanú štruktúru na úrovni 189 G.

V dynamickej vrstve chromosféry je usporiadanie hodnôt veľkosti vektora magnetickej indukcie neusporiadané pre pozorovanú štruktúru. Priemerná hodnota

veľkosti vektora magnetickej indukcie pre pozorovanú štruktúru v dynamickej časti chromosféry je 426 G. Inklinačný uhol vektora magnetickej indukcie pre pozorovanú štruktúru v dynamickej časti chromosféry dosahuje hodnoty od 40° do 95° . Priemerná hodnota inklináčného uhla pre pozorovanú štruktúru v dynamickej časti chromosféry je $77,5^\circ$. Priemerná hodnota priemetu vektora magnetickej indukcie do osi z (B_z) je pre štruktúru pozorovanú v dynamickej časti chromosféry 93 G.



Obrázok č. 24: Intenzitné mapy slnečnej škvrny získané ďalekohľadom GREGOR (vľavo hore) a družicou IRIS v rôznych vlnových dĺžkach. Pozorovania boli zaznamenané 20. júna 2016 o 11:08. Modrou farbou sú znázornené kontúry intenzitnej hranice umbra-penumbra. Zelenou farbou je znázornená kontúra oblasti so supersonickými rýchlosťami.

Dopplerovské rýchlosti určené pre pozorovanú štruktúru vo fotosfére dosahujú hodnoty v intervale 0 až 4 km/s priemernou hodnotou približne 2km/s. V statickej vrstve chromosféry Dopplerovské rýchlosti dosahujú hodnoty 10km/s, pričom typická hodnota je 3 km/s. V dynamickej vrstve chromosféry sú určené hodnoty Dopplerovských rýchlosti v intervale 20 až 40km/s. Typická Dopplerovská rýchlosť pre túto oblasť je pritom 30 km/s. Pozorovanú štruktúru je preto možné označiť ako oblasť so supersonickými rýchlosťami.

Za účelom určenia zdroja týchto vysokorýchlostných pohybov v chromosfére boli použité pozorovania získané prostredníctvom družice IRIS (pozri kapitolu 4.4). Pomocou tejto družice boli získané slit-jaw obrázky z oblasti spektrálnych čiar Mg II, S IV, C II. Slit-jaw pozorovanie v oblasti spektrálnej čiary C II s vlnovou dĺžkou 1330 Å odpovedá plazme s teplotou od 10 000 až do 30 000 K. Slit-jaw pozorovanie v oblasti spektrálnej čiary S IV s vlnovou dĺžkou 1400 Å odpovedá plazme s teplotou 65 000 K. Tieto slit-jaw obrázky zobrazujú vyššiu časť chromosféry a spodnú časť prechodovej vrstvy. Obidva slit-jaw obrázky obsahujú príspevok kontinua tvoreného v nižšej časti chromosféry. V oblasti spektrálnej čiary Mg II sú znázornené dva slit-jaw obrázky. Prvý slit-jaw obrázok je tvorený v oblasti s vlnovou dĺžkou 2796 Å, ktorý znázorňuje štruktúru vo vyššej chromosfére. Druhý slit-jaw obrázok je tvorený v krídle spektrálnej čiary Mg II, s vlnovou dĺžkou 2832 Å. V tomto slit-jaw obrázku je zobrazená vyššia časť fotosféry. V jednotlivých mapách sa zobrazuje čierna vertikálna čiara, ktorá odpovedá polohe štrbiny.

Jednotlivé slit-jaw obrázky zo satelitu IRIS boli porovnané s mapou intenzitného kontinua získanou pomocou ďalekohľadu GREGOR (obrázok č. 24). Pre priestorové zosúladenie poslúžilo slit-jaw pozorovanie získané v krídle spektrálnej čiary Mg II 2830 Å. V tejto intenzitnej mape sú viditeľné fotosférické štruktúry a teda je najvhodnejšia pre tento účel. Pre ľahšie zorientovanie sa v jednotlivých slit-jaw obrázkoch je znázornená kontúra intenzitnej hranice umbra-penumbra pomocou modrej farby vo všetkých dielčích obrázkoch. Kontúra umbry bola vytvorená pomocou intenzitnej mapy získanej prostredníctvom ďalekohľadu GREGOR. Kontúra ohraničuje hodnoty menšie ako 0,5 I/I_c. Znázornené sú taktiež kontúry oblastí, v ktorých bola identifikovaná supersonická zložka pohybu plazmy zaznamenaná pomocou spektrálnej čiary He I 10830 Å. Táto štruktúra je zobrazená zelenou farbou.

V blízkosti kontúry ohraničujúcej vysokorýchlostný tok plazmy sa nachádzajú zjasnenia, ktoré by mohli odpovedať zdroju tohto toku. Pozorovanie v oblasti kontúry ohraničujúcej supersonickú oblasť prebiehalo približne v čase 11:08. Určenému času zodpovedajú aj znázornené slit-jaw pozorovania z družice IRIS, ktoré sú znázornené na obrázok č. 24.

Diskusia

V tejto práci sme sa venovali štúdiu magnetických a dynamických vlastností slnečnej škvrny vo fotosfére a v chromosfére. Pre túto analýzu sme použili pozorovania získané viacerými prístrojmi pričom kľúčové boli spektropolarimetrické merania získané v spektrálnych čiarach Ca I 10839 Å, Fe I 6302,5 Å, Si I 10827 Å a He I 10830 Å. Úplný opis zložiek vektorového magnetického poľa pozorovanej škvrny bol stanovený na základe štúdia meraní získaných spektropolarimetrom GRIS, ktorý je súčasťou ďalekohľadu GREGOR, a pomocou polarimetra, ktorý je súčasťou prístroja SOT na družici Hinode. Namerané spektropolarimetrické dáta boli spracované a analyzované pomocou programov SIR a HAZEL. Na štúdium dynamických vlastností sme použili parameter Dopplerovského rýchlostného poľa a slit-jaw obrázky získané družicou IRIS.

Ťažisko práce predstavujú výsledky odvodené z pozorovaní slnečnej škvrny, ktoré boli získané v rôznych spektrálnych čiarach, a teda odpovedajú rôznym výškam v slnečnej atmosfére (od fotosféry až do chromosféry). V doposiaľ publikovaných prácach boli prevažne prezentované výsledky z jednej alebo dvoch analyzovaných fotosférických spektrálnych čiar. Hlavné zistenia z analyzovaného magnetického poľa slnečnej škvrny a jej dynamických vlastností je možné zosumarizovať v nasledujúcich odsekoch.

Azimutálny uhol vektora magnetickej indukcie analyzovanej slnečnej škvrny sa spojitne mení v intervale od 0° do 360° . Boli lokalizované mierne odchýlky v pravidelnom usporiadaní azimutu vektora magnetického poľa, ktoré môžu byť spôsobené tým, že sa slnečná škvrna nachádza blízko okraja slnečného disku. Takéto usporiadanie magnetického poľa je v súlade s prácami Westendorp Plaza (2001) a Joshi (2014). Naše výsledky potvrdzujú, že azimut vektora magnetickej indukcie sa s výškou v slnečnej atmosfére takmer nemení.

Hodnoty inklináčného uhla vektora magnetickej indukcie naznačujú, že umbru slnečnej škvrny tvorí dominantné vertikálne magnetické pole. Priemerná hodnota inklinácie je v umbre pozorovanej slnečnej škvrny v nižšej časti fotosféry na úrovni približne 16° . S narastajúcou výškou inklinácia magnetického poľa v umbre rastie, magnetické pole sa odchyľuje od vertikálneho smeru. V chromosfére je priemerná

hodnota na úrovni 21° . Pre spektrálnu čiaru Fe I 6302,5 Å je priemerná hodnota inklinácie v umbre 26° . V práci Benko a kol. (2018) bola analyzovaná inklinácia magnetického poľa v umbre pre slnečnú škvrnu s negatívnou polaritou. Hodnoty inklinácie v umbre boli stanovené s veľkosťami v intervale od 155° do 161° pre spektrálnu čiaru Fe I 6302,5 Å. Tieto hodnoty zodpovedajú vypočítanej hodnote v tejto práci.

V penumbre pozorovanej slnečnej škvrny prevažuje horizontálne magnetické pole. Nami zistená priemerná hodnota inklinácie magnetického poľa je 50° pre spektrálnu čiaru Ca I 10839 Å. Pre spektrálnu čiaru Fe I 6302,5 Å je hodnota inklinácie 62° . V chromosfére je priemerná hodnota inklinácie 53° . V práci Benko a kol. (2018) bola reportovaná priemerná hodnota inklinácie pre penumbru v intervale od 120° do 132° v spektrálnej čiare Fe I 6302,5 Å. Tieto hodnoty inklinácie približne odpovedajú hodnote inklinácie uvedenej v tejto práci. Hodnota inklináčného uhla v penumbre sa s narastajúcou výškou takmer nemení. Tento výsledok je v protiklade s výsledkami uvedenými v prácach Borrero & Ichimoto (2011), Tiwari a kol. (2013), Joshi a kol. (2014) a Balthasar a kol. (2008) v ktorých sa uvádza, že inklinácia magnetického poľa s narastajúcou výškou v penumbre rastie. Naopak, naše výsledky sú v súlade so zisteniami prezentovanými v práci Cuberes a kol. (2005). V tomto prípade autori zistili, že inklinácia v penumbre je nezávislá od výšky.

Najsilnejšie magnetické pole sa v rámci pozorovanej slnečnej škvrny nachádza v umbre, kde priemerné hodnoty vo fotosfére dosahujú veľkosť približne 2600 G, ale maximálne hodnoty presahujú v izolovaných miestach veľkosť až 3000 G. Spomínaná hodnota bola získaná pomocou inverzie Stokesových parametrov spektrálnej čiary Ca I 10839 Å. Zistili sme, že s narastajúcou výškou sa veľkosť magnetického poľa v umbre zmenšuje na hodnotu 2200 G. Táto hodnota bola určená pre chromosférickú spektrálnu čiaru He I 10830 Å. V práci Balthasar a Gomory (2008) zistili, že v slnečnej škvrne magnetické pole s narastajúcou výškou klesá pre spektrálne čiary Fe I 1078,3 Å a Si I 1078,6 Å. Pokles magnetického poľa závisí od umiestnenia v slnečnej škvrne a to tak, že v umbre magnetické pole klesá s hodnotou $-2,6$ G/km, (pokles približne o 260 G). V penumbre je pokles magnetického poľa v intervale od -1 do -2 G/km (pokles približne o 100 až 200 G). Joshi (2014) skúmal magnetické pole slnečnej škvrny vo fotosfére a chromosfére. Zistil, že veľkosť magnetického poľa v umbre dosahuje hodnoty 2500 G až 2800 G vo fotosfére a vo vyššej časti chromosféry sa nachádza magnetické pole s hodnotou 1600 G a 1800 G. Uvedené hodnoty potvrdzujú naše

zistenie, že sa magnetické pole v umbre slnečnej škvrny s narastajúcou výškou zmenšuje. V práci Westendorp Plaza (2001) sa uvádza veľkosť magnetického poľa v slnečnej umbre vo fotosfére na úrovni 2500 G. Výsledok podporujú aj výsledky zverejnené v práci Xu a kol. (2010). Autori stanovili veľkosť magnetického poľa v umbre slnečnej škvrny na 1850 G vo fotosfére a s narastajúcou výškou táto hodnota klesala na hodnotu 850 G. Uvedené výsledky boli určené pre spektrálne čiary Si I 10827 Å a He I 10830 Å.

V penumbre slnečnej škvrny sme zistili, že magnetické pole vo fotosfére dosahuje hodnotu 1200 G pre spektrálnu čiaru Ca I 10839 Å a s narastajúcou výškou klesá na hodnotu 1092 G pre spektrálnu čiaru Si I 10827 Å. Hodnoty veľkosti magnetického poľa uvedené v práci Joshi a kol. (2016) dosahujú pre vnútornú a vonkajšiu časť penumbry vo fotosfére hodnoty 1700 G a 800 G. V chromosfére vnútorná a vonkajšia časť penumbry dosahuje hodnoty veľkosti magnetického poľa 1050 G a 550 G. Uvedené hodnoty sú určené pre spektrálnu čiaru Si I 10827 Å a He I 10830 Å. Teda magnetické pole sa v umbre s narastajúcou výškou zmenšuje rýchlejšie ako v penumbre. V prácach Rüedi a kol. (1995); Joshi (2014); Schad a kol. (2015); Joshi (2014) bolo naopak zistené, že magnetické pole v penumbre s narastajúcou výškou rastie.

V karteziánskej súradnicovej sústave je usporiadanie magnetického poľa pozorovanej slnečnej škvrny nasledovné: v penumbre dominujú zložky B_x a B_y vektora magnetickej indukcie, v umbre je dominantnou zložka B_z . Takéto usporiadanie zodpovedá rozloženiu magnetického poľa zisteného v predošlých bodoch. Vertikálna zložka vektora magnetickej indukcie B_z v umbre s narastajúcou výškou klesá. V najspodnejšej vrstve fotosféry zložka B_z dosahuje hodnoty 2500 G v hornej časti fotosféry je to 2200 G a v spodnej vrstve chromosféry je to len 2050 G. V penumbre slnečnej škvrny vertikálna zložka vektora magnetického poľa vo fotosfére je takmer nemenná, ale v chromosfére je táto zložka silnejšia o viac ako 100 G. Výsledky prezentované v práci Benko a kol. (2018) uvádzajú, že vypočítaná zložka magnetického poľa B_z dosahuje v umbre hodnoty v intervale od -1500 G do -1900 G a v penumbre dosahuje zložka B_z hodnoty v intervale od -600 G do -820 G. V práci Balthasar a kol. (2008) zistili, že zložka B_z dosahuje menšie hodnoty s narastajúcou výškou v umbre a vo vonkajšej penumbre s narastajúcou výškou hodnota B_z rastie.

Zistili sme, že hodnota Jurčákového kritéria, teda hodnota veľkosti B_z zložky vektora magnetickej indukcie použitá na definíciu hranice umbra-penumbra (UP),

nadobúda v prípade pozorovanej slnečnej škvrny pre spektrálnu čiaru Ca I 10839 Å hodnotu až 2010 G. Pre spektrálnu čiaru Fe I 6302,5 Å dosahuje Jurčákové kritérium menšiu hodnotu, ktorá je na úrovni 1800 G. V práci Jurčák (2015) je hranica UP pre spektrálnu čiaru Fe I 6302,5 Å určená na $B_z = 1867$ G. Lindner a kol. (2020) určil hodnotu Jurčákového kritéria pre slnečnú škvrnu pozorovanú v spektrálnych čiarach Fe I 15648 Å a Fe I 15662 Å. Hodnota pre hranicu UP je v tomto prípade stanovená na úrovni $B_z = 1787 \pm 100$ G. V spektrálnej čiare Si I 10827 Å sme hodnotu pre hranicu UP stanovili na $B_z = 1700$ G a v chromosfére, pomocou spektrálnej čiary He I, na hodnotu $B_z = 1730$ G. Na potvrdenie predpokladu, že hodnota Jurčákovho kritéria sa z výšky mení je potrebné vykonať ďalšie analýzy meraní indukcie magnetického poľa v rôznych spektrálnych čiarach formujúcich sa v rozličných výškach v atmosfére Slnka.

V penumbre slnečnej škvrny sme zaznamenali prejavy Evershedovho javu. Najväčšie Dopplerovské rýchlosti boli zaznamenané najhlbšie vo fotosfére, kde typické rýchlosti nadobúdajú veľkosť 4 km/s. S narastajúcou výškou charakteristické rýchlostné pole zodpovedajúce Evershedovmu javu postupne klesá na hodnoty 2 km/s. V spektrálnej čiare Si I 10827 Å už nie je Evershedov jav takmer viditeľný. Dopplerovské rýchlosti zaznamenané v chromosfére zodpovedajú prúdeniu hmoty v chromosférických štruktúrach. V spomínanej vrstve sa pozoruje tzv. inverzný Evershedov tok, ktorého rýchlosti dosahujú až 15 km/s.

V práci Joshi a kol. (2017) zistili, že hodnota Evershedovho toku, určená pre fotosféru pomocou spektrálnej čiary Si I 10827 Å, je na úrovni $v_{los} = \pm 3$ km/s. V chromosfére bol pozorovaný inverzný Evershedov tok, ktorý nadobúda hodnotu $v_{los} = \pm 5$ km/s pre spektrálnu čiaru He I 10830 Å (Joshi a kol. 2017). Tento výsledok podporuje ďalšia práca Joshi a kol. (2016), kde Evershedov tok s narastajúcou výškou v slnečnej atmosfére klesá a v chromosfére nadobúda hodnoty typické pre prúdenie hmoty v chromosférických štruktúrach.

V umbre slnečnej škvrny dosahujú Dopplerovské rýchlosti nižšie veľkosti v porovnaní s penumbrou. Rýchlosť pohybu plazmy v umbre je taktiež závislá od výšky, v ktorej je pozorovaná. V najnižších vrstvách fotosféry je to 0,2 km/s. S narastajúcou výškou sa hodnota zvyšuje na 0,59 km/s. V chromosfére prúdenie hmoty v umbre dosahuje až 2,1 km/s.

V chromosfére sme identifikovali izolované oblasti na hranici penumbra – pokojné Slnko, ktoré zodpovedajú vysokorýchlostným tokom plazmy. Priemerná

hodnota rýchlosti hmoty v tejto oblasti je až 30 km/s. Nadzvukové rýchlosti boli v chromosfére detegované pomocou spektrálnej čiary He I 10830 Å pri pozorovaní filamentu (Sowmya, 2020). Pri štúdiu rýchlosti bola podobne ako v našom prípade použitá dvojkomponentná atmosféra. Typické rýchlosti pre dynamickú vrstvu atmosféry boli identifikované v intervale od 15 až do 35 km/s. Takto vysoké rýchlosti sú určené aj v práci Kuckein a kol. (2020). Manrique a kol. (2020) pozorovali aktívnu oblasť s pórmí. V tejto oblasti namerali hodnoty Dopplerovských rýchlostí v intervale od 20 do 24 km/s v spektrálnej čiare He I 10839 Å. Vysokorýchlostné toky boli pozorované v oblúkových filamentoch („arch filament system“). Publikované výsledky nedosahujú až také vysoké hodnoty Dopplerovských rýchlostí ako hodnoty uvedené v tejto práci. V práci Manrique a kol. (2019) skúmali prejavy zaznamenaných vysokorýchlostných tokov aj v spektrálnych čiarach Ca II 8542 Å a Si I 10827 Å. Hodnoty zodpovedajúcich Dopplerovských rýchlostí pritom dosahovali 1,5 km/s pre spektrálnu čiaru Si I 10827 Å a 11,5 km/s pre spektrálnu čiaru Ca II 8542 Å. Pre spektrálnu čiaru Si I 10827 Å sme určili typické Dopplerovské rýchlosti, ktoré dosahujú hodnotu 2 km/s.

Všetky vysokorýchlostné toky spomenuté vyššie však boli pozorované mimo oblastí slnečnej škvŕny. Pre lepšie pochopenie nami pozorovanej štruktúry sú potrebné ďalšie pozorovania slnečných škvŕn získané v rôznych spektrálnych čiar, ktoré reprezentujú rôzne vrstvy slnečnej atmosféry.

Záver

Cieľom tejto práce bolo štúdium magnetických a dynamických vlastností slnečnej škvvrny, konkrétne: komponentov vektora magnetickej indukcie a Dopplerovských rýchlostných polí, pomocou spektrálnych čiar formujúcich sa vo fotosfére a chromosfére. Taktiež štúdium prepojenia magnetických polí medzi fotosférou a chromosférou.

Na dosiahnutie týchto cieľov bol použitý pozorovací materiál, získaný pomocou ďalekohľadu GREGOR a družíc HINODE a IRIS. Pozorovací materiál pozostával zo spektropolarimetrických meraní a slit-jaw obrázkov, ktoré boli získané s vysokým priestorovým a časovým rozlíšením dňa 20.6.2016. Spektropolarimetrické pozorovania boli uskutočnené v spektrálnych čiarach, Ca I 10839 Å, Fe I 6302,5 Å, Si I 10827 Å, He I 10827 Å. Slit-jaw obrázky boli získané v blízkosti spektrálnych oblastí Mg II 2830 Å, Mg II 2796 Å, Si IV 1400 Å a C II 1330 Å. Napozorované spektropolarimetrické dáta boli analyzované pomocou výpočtových programov SIR a HAZEL. Výsledkom boli fyzikálne parametre popisujúce fyzikálne vlastnosti pozorovanej atmosféry v slnečnej škvvrne.

Zistili sme, že azimut vektora magnetickej indukcie sa výrazne nemení s výškou v slnečnej atmosfére. Inklináčny uhol vektora magnetickej indukcie naznačuje, že umbru slnečnej škvvrny tvorí dominantné vertikálne magnetické pole. S narastajúcou výškou inklinácia magnetického poľa v umbre rastie, teda magnetické pole sa odchyľuje od vertikálneho smeru. Inklináčny uhol v penumbre sa s narastajúcou výškou takmer nemení. Najsilnejšie magnetické pole sa v rámci slnečnej škvvrny nachádza v umbre. Zistili sme, že s narastajúcou výškou sa veľkosť magnetického poľa v umbre znižuje. Magnetické pole s narastajúcou výškou v penumbre je takmer nemenné. V umbre je dominantná zložka B_z . Vertikálna zložka vektora magnetickej indukcie B_z pritom v umbre s narastajúcou výškou klesá. V penumbre slnečnej škvvrny je vertikálna zložka vektora magnetického poľa vo fotosfére takmer nemenná. V chromosfére je táto zložka silnejšia. Preukázali sme, že hodnota Jurčákovho kritéria sa z výšky v slnečnej atmosfére mení. Na potvrdenie tohto predpokladu je ale potrebné vykonať ďalšie analýzy meraní indukcie magnetického poľa v rôznych spektrálnych čiarach.

V penumbre slnečnej škvvrny sme zaznamenali prejavy Evershedovho javu. Typické rýchlosti zodpovedajúce tomuto javu dosahujú v najnižších vrstvách fotosféry

hodnoty 4 km/s. S narastajúcou výškou charakteristické rýchlostné pole postupne klesá na hodnoty 2 km/s. V chromosfére je pozorovaný inverzný Evershedov tok, ktorý nadobúda hodnotu $v_{\text{los}} = 15$ km/s. V chromosfére boli navyše nájdené izolované oblasti na hranici penumbra – pokojné Slnko, ktoré zodpovedajú vysokorýchlostným tokom plazmy. Priemerná hodnota rýchlosti hmoty v tejto oblasti je až 30 km/s. V mieste pozorovania supersonických rýchlostí bolo určené magnetické pole s veľkosťou 100 až 700 G.

Použitá literatúra

- Asensio Ramos, A., Trujillo Bueno, J., a Landi Degl'Innocenti, E. 2008, ApJ, 683, 542
- Avrett, E. H., Fontenla, J. M., a Loeser, R. 1994, in IAU Symp. 154, Infrared Solar Physics, ed. D. M. Rabin, J. T. Jefferies, a C. Lindsey (Dordrecht: Kluwer), 35
- Balthasar, H., & Gömöry, P. (2008, September). The three-dimensional structure of sunspots. I. The height dependence of the magnetic field. Astron. Astrophys., 488, 1085-1092. doi: 10.1051/0004-6361:200809575
- Aznar Cuadrado, R., Solanki, S. K., a Lagg, A. 2005, in ESA Spec. Publ., Vol.596, Chromospheric and Coronal Magnetic Fields, ed. D. E. Innes, A. Lagg, & S. K. Solanki, 49.1
- Aznar Cuadrado, R., Solanki, S. K., & Lagg, A. 2007, in Modern Solar Facilities – Advanced Solar Science, ed. F. Kneer, K. G. Puschmann, a. D. Wittmann, 173–176
- Bard, S. and Carlsson, M.: 2008, ApJ 682, 1376
- Beck, C., a Choudhary, D. P. 2020, ApJ, 891, 119
- Beck, C. and Choudhary, D. P., 2019, A&A, ArXiv e-prints [arXiv:1902.04660]
- Beckers, J. M. 1964, PhD thesis, Sacramento Peak Observatory, Air Force
- Bellot Rubio, L. R.: 2002, in: A user guide to SIR
- Benko, M. 2017, Časový vývoj vektorového magnetického poľa slnečnej škvrny: Diplomová práca, Univerzita Pavla Jozefa Šafárika v Košiciach - Prírodovedecká fakulta
- Benko a kol., 2018, A&A, 620A, 191B, ArXiv e-prints[arXiv:1810.13185v1]
- Berger T., Slater G.: 2009, in: Hinode Solar optical telescope data analysis guide, Version 3.3
- Brekke, P., Hassler, D. M., a Wilhelm, K. 1997, Sol. Phys., 175, 349
- Borrero, J. M., Solanki, S. K., Bellot Rubio, L. R., Lagg, A., a Mathew, S. K. 2004, A&A, 422, 1093
- Centeno, R., Collados, M., & Trujillo Bueno, J. 2006, ApJ, 640, 1153
- Collados, M. a kol. : 2012, Astron. Nachr. 333, 872. doi: 10.1002/asna.201211738
- Degenhardt, D. 1989, A&A, 222, 297
- Denker, C. a kol.: 2010, Proc. SPIE 7735, 77356M
- De Pontieu B., et al., 2014, Sol. Phys., 289, 2733

-
- Dere, K. P., Schmieder, B., & Alissandrakis, C. E. 1990, *A&A*, 233, 207
- Dere, K. P. 1982, *Sol. Phys.*, 77, 77
- Dialetis, D., Mein, P., & Alissandrakis, C. E. 1985, *A&A*, 147, 93
- Evershed, J. 1910, *MNRAS*, 70, 217
- Franz, M., & Schlichenmaier, R. 2009, *A&A*, 508, 1453—. 2013, *A&A*, 550, A97
- Fontenla, J. M., Avrett, E. H., & Loeser, R. 1993, *ApJ*, 406, 319
- Gebbie, K. B., Hill, F., November, L. J., et al. 1981, *ApJ*, 251, L115
- Halbgewachs, C. & kol.: 2012, *Astron. Nachr.* 333, 840. doi: 10.1002/asna.201211732
- Hale, G. E. 1908, *ApJ*, 28, 315
- Harvey, J. & Hall, D. 1971, in *IAU Symposium, Vol. 43, Solar Magnetic Fields*, ed. R. Howard, 279
- Haugen, E. 1969, *SoPh*, 9, 88
- Hofmann, A., & kol.: 2012, *Astron. Nachr.* 333, 854. doi: 10.1002/asna.201211733
- Joshi, J.: 2014, *Magnetic and Velocity Field of Sunspots in the Photosphere and Upper Chromosphere*. PhD Thesis, Technische Universität Braunschweig, ISBN 978-3-944072-01-2, uni-edition GmbH 2014.
- Joshi, J., Lagg, A., Solanki, S. K., et al. 2016, *A&A*, 596, A8
- Joshi J, Lagg A, Hirzberger J and Solanki S. K., 2017 *Astron. Astrophys.* 604 A98
- Jurčák, J. 2011, *A&A*, 531, A118
- Jurčák, J., Bellot Rubio, L. R., & Sobotka, M. 2014b, *A&A*, 564, A91
- Jurčák, J., Bello González, N., Schlichenmaier, R., & Rezaei, R. 2015, *A&A*, 580, L1
- Jurčák, J., Bello González, N., Schlichenmaier, R., & Rezaei, R. 2017, *A&A*, 597, A60
- Jurčák, J., Rezaei, R., González, N. B., Schlichenmaier, R., & Vomlel, J. 2018, *A&A*, 611, L4
- Khomenko, E., Collados, M., Shchukina, N., & Díaz, A. 2015, *A&A*, 584, A66
- Kosugi, T., Matsuzaki, K., Sakao, T., et al. 2007, *SoPh*, 243, 3
- Kjeldseth-Moe, O., Brynildsen, N., Brekke, P., et al. 1988, *ApJ*, 334, 1066
- Kleint, L., Berkefeld, T., Esteves, M., et al. 2020, *A&A*, 641, A27
- Kuckein, C. & kol. 2020, *A&A*, 640, A71
- Landi Degl'Innocenti, E., Landi Degl'Innocenti, M.: 1985, *Solar Physics*, 97, 239.
- Landi Degl'Innocenti, E., & Landolfi, M. 2004, *Polarization in Spectral Lines* (Dordrecht:Kluwer)
- Lagg, A., Woch, J., Krupp, N., & Solanki, S. K. 2004, *A&A*, 414, 1109
-

-
- Lagg, A., Woch, J., Solanki, S. K., & Krupp, N. 2007, *A&A*, 462, 1147
- Leenaarts, J., Golding, T., Carlsson, M. et al., 2016, *A&A*, 594, A104
- Lin, H., Penn, M. J., & Kuhn, J. R. 1998, *ApJ*, 493, 978
- Lindner, P., Schlichenmaier, R., & Bello González, N. 2020, *A&A*, 638, A25
- Lites, B. W., Keil, S. L., Scharmer, G. B., and Wyller, A. A.: 1985, *Sol. Phys.* 97, 35
- Maltby, P. 1975, *SoPh*, 43, 91
- Maltby, P., Avrett, E. H., Carlsson, M., et al. 1986, *ApJ*, 306, 284
- Manrique González, S., J., Kuckein, Ch. and Pastor Yabar, A. 2020, 890, 82
- Mariska, J. T. 1988, *ApJ*, 334, 489
- Martínez Pillet, V., Katsukawa, Y., Puschmann, K. G., & Ruiz Cobo, B., 2009, *ApJL*, 701, L79
- McClymont, A. N. 1989, *ApJ*, 347, L47
- Merenda, L., Trujillo Bueno, J., Landi Degl’Innocenti, E., & Collados, M. 2006, *ApJ*, 642, 554
- Moore, R. L. 1981, *SSRv*, 28, 387
- Muglach, K., Schmidt, W., & Knoelker, M. 1997, *Sol. Phys.*, 172, 103
- Muglach, K., & Sütterlin, P. 1998, in *Three-Dimensional Structure of Solar Active Regions*, ed. C. E. Alissandrakis, & B. Schmieder, *ASP Conf. Ser.*, 155, 341
- Peter, H., & Judge, P. G. 1999, *ApJ*, 522, 1148
- Penn, M. J., & Kuhn, J. R. 1995, *ApJ*, 441, L51
- Pierce, A.K., Slaughter, C.D.: 1977 *Solar Physics*, 51, 2
- Puschmann, K.G. a kol. : 2012, *Astron. Nachr.* 333, 880. doi: 10.1002/asna.201211734
- Reiners, A., Mrotzek, N., Lemke, U., Hinrichs, J., & Reinsch, K. 2016, *A&A*, 587, A65
- Rezaei, R., Schlichenmaier, R., Beck, C., & Bellot Rubio, L. R. 2006, *A&A*, 454, 975
- Rimmele, T. R., 1995, *A&A*, 298, 260-276
- Ruiz Cobo, B. & del Toro Iniesta, J. C. 2012 *SIR: Stokes Inversion based on Response functions*, *Astrophysics Source Code Library*
- Rüedi, I., Solanki, S. K., & Livingston, W. 1995, *A&A*, 302, 543
- Sánchez Cuberes, M., Puschmann, K.G. and Wiehr, E., 2005, “Spectropolarimetry of a sunspot at disk centre”, *Astron. Astrophys.*, 440, 345–356.
- Socas-Navarro, H., & Elmore, D. 2005, *ApJ*, 619, L195
- Schmidt, W., Muglach, K., & Knölker, M. 2000, *ApJ*, 544, 567
- Schmidt, W. a kol. : 2012, *Astron. Nachr.* 333, 796. doi: 10.1002/asna.201211725
- Shimizu, T., Lites, B. W., Katsukawa, Y., et al. 2008a, *ApJ*, 680, 1467
-

-
- T. A. Schad, M. J. Penn, H. Lin, and A. Tritschler, *Solar Physics* 290, 1607 (2015)
- Solanki, S. K. 2003, *A&A Rev.*, 11, 153
- Solanki, S. K. 2006, *IAUJD*, 3E, 69S
- Solanki, S. K., Montavon, C. A. P., & Livingston, W. 1994, *A&A*, 283, 221
- Soltau, D. a kol.: 2012, *Astron. Nachr.* 333, 847. doi: 10.1002/asna.201211730
- Sowmya, K. a kol. 2020, *IAU Symposium*, 354, 454-457
- St. John, C. E. 1911a, *ApJ*, 34, 57
- St. John, C. E. 1911b, *ApJ*, 34, 131
- Teriaca, L., Banerjee, D., a Doyle, J. G. 1999, *A&A*, 349, 636
- Teriaca, L., Falchi, A., Cauzzi, G., et al. 2003, *ApJ*, 588, 596
- Tiwari, S. K., van Noort, M., Lagg, A., a Solanki, S. K. 2013, *A&A*, 557, A25
- Tiwari, S. K., van Noort, M., Solanki, S. K., a Lagg, A. 2015, *A&A*, 583, A119
- Trujillo Bueno, J., Landi Degl’Innocenti, E., Collados, M., Merenda, L., a Manso Sainz, R. 2002b, *Nature*, 415, 403
- Trujillo Bueno, J., Merenda, L., Centeno, R., Collados, M., a Landi Degl’Innocenti, E. 2005, *ApJ*, 619, L191
- Tsiropoula, G. 2000, *A&A*, 357, 735
- Tsuneta, S., Ichimoto, K., Katsukawa, Y. a kol.: 2008, *Solar Physics*, 249, 167.
- Tiwari, S. K., van Noort, M., Lagg, A., a Solanki, S. K. 2013, *A&A*, 557, A25
- Trujillo Bueno, J. 2001, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 236, *Advanced Solar Polarimetry – Theory, Observation, and Instrumentation*, ed. M. Sigwarth, 161
- Trujillo Bueno, J. a kol., 2005, *ApJ*, 619, L191
- van Noort, M., Lagg, A., Tiwari, S. K., a Solanki, S. K. 2013, *A&A*, 557, A24
- von der Lühe, O. a kol. : 2012, *Astron. Nachr.* 333, 894. doi: 10.1002/asna.201211735
- Westendorp Plaza, C., del Toro Iniesta, J. C., Ruiz Cobo, B., et al. 2001, *ApJ*, 547, 1130
- Xu, Z., Lagg, A., a Solanki, S. K. 2010, *A&A*, 520, A77
- Wentzel, D. G. 1992, *ApJ*, 388, 211