

MASARYKOVA UNIVERZITA
Přírodovědecká fakulta
Ústav teoretické fyziky a astrofyziky



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
**Segmentace celodiskových snímků sluneční
chromosféry**

Bára Gregorová

Vedoucí práce: Mgr. Michal Švanda, PhD.

2016

Bibliografický záznam

Autor:	Bára Gregorová Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita Ústav teoretické fyziky a astrofyziky
Název práce:	Segmentace celodiskových snímků sluneční chromosféry
Studijní program:	Fyzika
Studijní obor:	Astrofyzika
Vedoucí práce:	Mgr. Michal Švanda, PhD.
Akademický rok:	2016/2017
Počet stran:	viii + číslo
Klíčová slova:	segmentace, chromosféra, filamenty, erupce, sluneční skvrny, pláže

Bibliographic Entry

Author: Bára Gregorová
Faculty of Science, Masaryk University
Department of Theoretical Physics and Astrophysics

Title of Thesis: Segmentation of full-disc observations of solar chromosphere

Degree Programme: Physics

Field of Study: Astrophysics

Supervisor: Mgr. Michal Švanda, PhD.

Academic year: 2016/2017

Number of Pages: viii + číslo

Keywords: segmentation, chromosphere, filaments, flares, sunspots, plages

Abstrakt

V předložené práci studuji metody segmentace obrazu a vytvářím algoritmus pro segmentaci celodiskových snímků sluneční chromosféry. Práce je rozdělena do tří hlavních částí. V první části popisují útvary pozorované ve sluneční chromosféře, jejichž segmentací se zabývám a popisují snímky, které jsou použity pro testování algoritmu. Následuje část věnující se segmentaci obrazu a nejběžnějším metodám segmentace obrazu a v poslední části se věnuji metodám rozpoznání útvarů ve sluneční chromosféře a samotnému vytvářenému algoritmu.

Abstract

In the presented work, I study the methods of image segmentation and create an algorithm for segmentation of full-disc images of the solar chromosphere. This work is divided into three main parts. In the first part, I describe the observed features in solar chromosphere whose segmentation I deal with and describe the images used for the analysis of the algorithm. In the next part, the most common methods of image segmentation are discussed and in the last section, I describe methods of solar features recognition and the algorithm itself.



MASARYKOVA UNIVERZITA
Přírodovědecká fakulta

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Akademický rok: 2015/2016

Ústav: Ústav teoretické fyziky a astrofyziky

Studentka: Bára Gregorová

Program: Fyzika

Obor: Astrofyzika

Ředitel *Ústavu teoretické fyziky a astrofyziky* PŘF MU Vám ve smyslu Studijního a zkušebního řádu MU určuje bakalářskou práci s tématem:

Téma práce: Segmentace celodiskových snímků sluneční chromosféry

Téma práce anglicky: Segmentation of full-disc observations of solar chromosphere

Oficiální zadání:

Automatické dalekohledy rutinně poskytují celodiskové snímky sluneční chromosféry, nejčastěji pořizované ve spektrálních čarách H-alfa nebo vápníkových čarách H a K. Cílem práce je navrhnout a implementovat algoritmus pro rozpoznávání a klasifikaci objektů v těchto obrazech dobře patrných – filamentů, pláží, slunečních skvrn a pod. Vstupem programu bude celodiskový snímek Slunce, případně jejich sekvence. Výstupem budou segmentované objekty, případně popisné parametry (souřadnice, plochy apod.) těchto objektů.

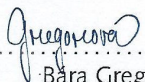
Jazyk závěrečné práce:


Vedoucí práce: Mgr. Michal Švanda, Ph.D.

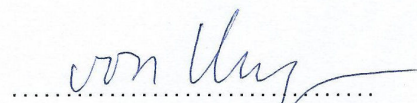
Datum zadání práce: 16. 9. 2015

V Brně dne: 29. 9. 2015

Souhlasím se zadáním (podpis, datum):


12.10.2015
Bára Gregorová
studentka


Mgr. Michal Švanda, Ph.D.
vedoucí práce


prof. Rikard von Unge, Ph.D.
ředitel Ústavu teoretické fyziky a
astrofyziky

Děkuji svému vedoucímu Mgr. Michalu Švandovi, PhD. za nesmírnou trpělivost, ochotu a pochopení. Také bych chtěla poděkovat Hvězdárně ve Valašském Meziříčí, p. o. za svolení použít ve své práci snímky sluneční chromosféry pořízené na hvězdárně a svým přátelům a příteli, kteří mě drželi nad vodou.

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci napsala samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů. Souhlasím se zapůjčováním práce a jejím zveřejňováním.

V Brně dne 18. května 2017

Bára Gregorová

Obsah

Úvod	1
1 Naše nejbližší hvězda	3
1.1 Struktura Slunce	3
1.2 Sluneční atmosféra	6
1.3 Projevy sluneční aktivity	7
1.3.1 Sluneční skvrny	8
1.3.2 Filamenty	8
1.3.3 Erupce	9
1.3.4 Pláže	10
1.4 Použité snímky a jejich charakteristika	11
1.4.1 Obecná charakteristika obrazu	11
1.4.2 Filtrogramy ve významných spektrálních čarách	13
2 Segmentace obrazu	14
2.1 Prahování	14
2.2 Regionální metody	15
2.3 Metody založené na hranici a detekci hran	15
2.4 Watershed	16
3 Předzpracování obrazu	17
3.1 Získání užitečných informací	17
3.2 Okrajové ztemnění	20
4 Detekce aktivních oblastí	23
4.1 Implementace vlastního algoritmu	25
4.2 Série snímků	27
5 Výsledky	29

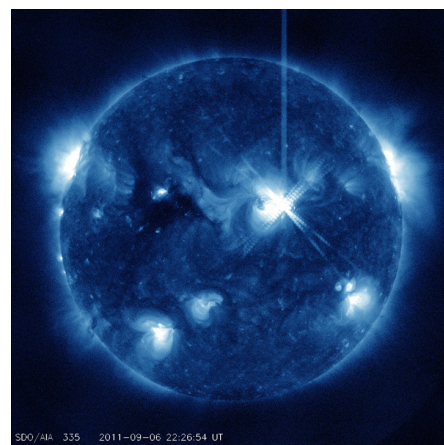
6 Závěr a výhledy do budoucna	31
Literatura	32

Úvod

Slunce fascinuje člověka už od pradávna. Svou aktivitou ovlivňuje Zemi a její blízké okolí. Při interakci slunečního materiálu a slunečních magnetických polí „zamrzlých“ v plazmatu meziplanetárního pole s magnetosférou Země dochází ke geomagnetickým bouřím a ty následně ovlivňují dálkové rozvodné sítě, zejména elektřiny, ale také satelity, navigační systémy a družice na oběžné dráze kolem Země. Abychom Slunci a těmto dynamickým dějům lépe porozuměli, stavíme po celém světě specializované observatoře s důmyslnými přístroji, pomocí nichž pozorujeme Slunce v různých spektrálních oblastech, studujeme jeho magnetické pole, jeho složení a zaznamenáváme vnější projevy sluneční aktivity. Za poslední půlstoletí jsme vyslali do vesmíru několik družic, které mají za cíl zkoumat Slunce v oblastech elektromagnetického spektra, které nám naše zemské atmosféra neumožňuje pozorovat. Pozorování je naším základním a hlavním nástrojem při poznávání Slunce, projevů jeho aktivity, ale také při poznávání jeho vnitřní stavby.

Ohromné objemy dat, které tyto observatoře a družice produkují, však již není možné zpracovávat jinak než automatizovaně. S rozvojem výpočetní techniky se rozvíjí tzv. data-mining, jehož podstatou je získávání požadovaných informací různého charakteru (číselných, textových, logických, obrazových apod.) z obrovských datových objemů uložených v rozsáhlých databázích různého typu.

Cílem mé práce je navrhnout, naprogramovat, odladit a implementovat algoritmus, který umožní automaticky a efektivně analyzovat jednotlivé snímky projevů sluneční aktivity, případně jejich série. Metodou segmentace obrazu vybere ze snímku oblasti odpovídající typickým útvarům ve sluneční chromosféře. Uživatel tak získá díky programu informace o těchto útvarech, aniž by byl nucen prohlížet stovky a tisíce snímků. Díky programu si může vybrat



Obrázek 1: Snímek z družice Solar Dynamics Observatory (SDO).[1]

jen ty snímky, které pro svou konkrétní práci potřebuje (podle typu objektů, kterým se chce věnovat). Tato práce je rozdělena do tří částí. První část se věnuje samotnému Slunci a projevům sluneční aktivity - útvarům, které můžeme pozorovat v jeho atmosféře, druhá část je zaměřena na nejčastěji používané metody segmentace obrazu a třetí část se zabývá vlastním vytvářeným algoritmem.

Kapitola 1

Naše nejbližší hvězda

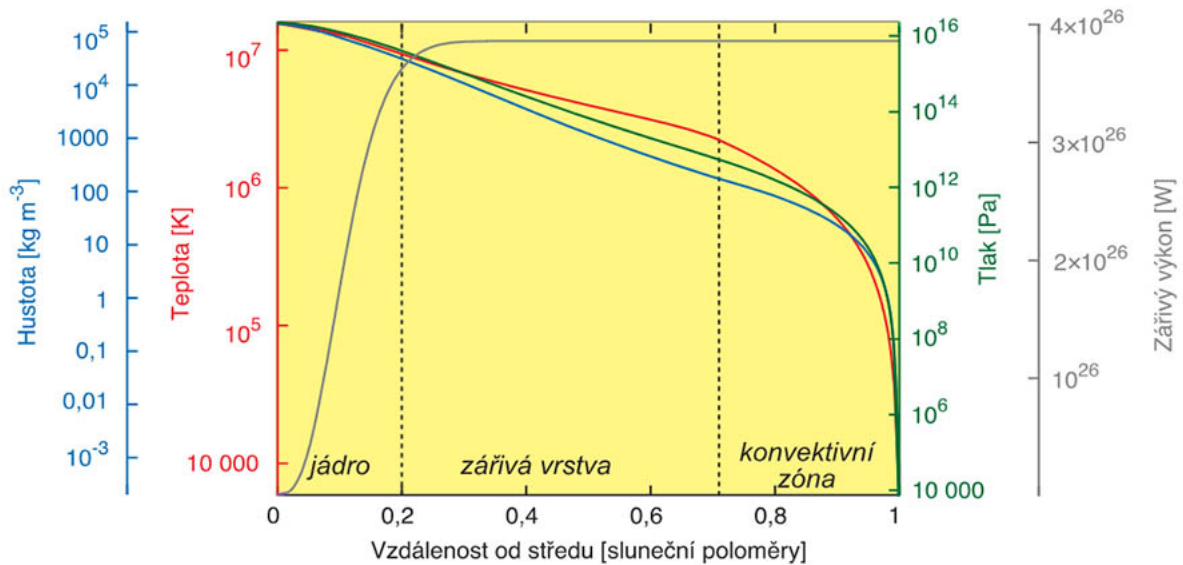
Slunce je vzdálené od Země jednu astronomickou jednotku, jenž udává hodnotu střední vzdálenosti Země od Slunce $149\,597\,870 \pm 2$ km. Skutečná vzdálenost se však mění v rozmezí $1,471 \cdot 10^{11}$ m – $1,521 \cdot 10^{11}$ m. Na základě vzdálenosti a úhlového průměru viditelného slunečního kotouče můžeme určit poloměr Slunce $(6,9626 \pm 0.0007) \cdot 10^8$ m. Kdybychom vzali v úvahu také sluneční atmosféru, byl by tento poloměr pochopitelně větší. Současná hodnota sluneční hmotnosti určená z třetího Keplerova zákona je $(1,9891 \pm 0,0012) \cdot 10^{30}$ kg. Tato hodnota závisí na přesnosti určení gravitační konstanty a je také třeba si uvědomit, že Slunce ztrácí část své hmotnosti jednak vyzařováním energie do prostoru, jednak část hmoty odnáší sluneční vítr. Během slunečního života bude tato ztráta činit méně než 10^{27} kg, což je v rámci standardní chyby dnešní hodnoty sluneční hmotnosti obvykle zanedbatelné.[12, s. 3–4]

Slunce je koulí složenou ze žhavých plynů – plazmatu. Z pohledu chemického složení jsou v něm nejhojněji zastoupeny vodík a hélium, ostatní prvky jako např. kyslík, dusík a uhlík tvoří už jen stopové množství. Na Hertzsprungově-Russelově diagramu leží Slunce na hlavní posloupnosti a jeho stáří je přibližně 4,6 miliardy let.

1.1 Struktura Slunce

O vnitřní stavbě Slunce jsme dlouho nic nevěděli. Kromě pozorování slunečních neutrin neexistuje žádný způsob, jak studovat vnitřní strukturu Slunce přímo. Veškeré informace, které tak o slunečním nitru máme, jsme získali na základě výpočtů a teoretických modelů. Tyto modely jsou založeny na všeobecné platnosti fyzikálních zákonů a pravděpodobných předpokladech jako je zachovávání energie nebo hmotnosti, stejné chemické složení či projevy magnetických a odstředivých sil. Standardní model Slunce navíc předpokládá, že všechny fyzikální veličiny závisí jen na vzdálenosti od centra, je to tedy sféricky symetrický model (viz obrázek 1.1)[12, s. 15]. Studium Slunce má na rozdíl od studia vzdálených hvězd tu výhodu,

že můžeme srovnávat výsledky modelů s přímým pozorováním slunečního povrchu a ověřit tak platnost modelu. O podpovrchových vrstvách Slunce se můžeme dozvědět i díky relativně novému odvětví sluneční fyziky - helioseizmologii. Tento obor vznikl poté, co byly na Slunci roku 1960 objeveny tzv. 5-minutové oscilace, později i oscilace s jinými periodami[12, s. 150]. Tyto oscilace souvisí se šířením zvukových vln a studiem nízkofrekvenčních oscilací s delšími periodami můžeme zkoumat sluneční nitro. Z pozorování zvukových vln na Slunci můžeme pak určit základní fyzikální vlastnosti jako je teplota, chemické složení, rotace či proudění hmoty.



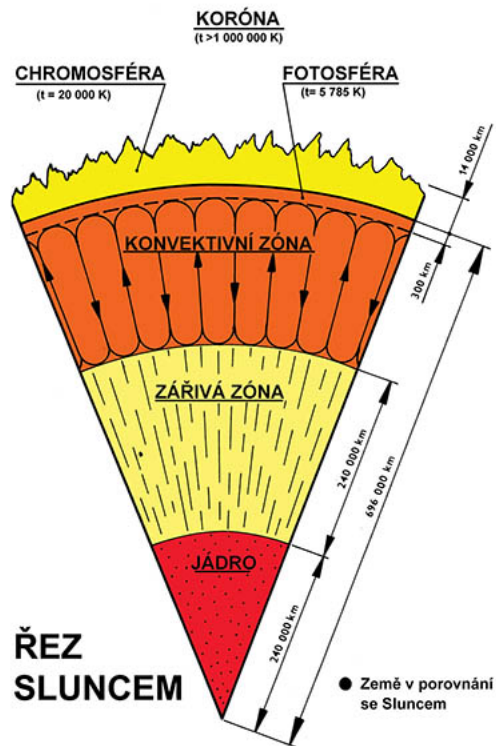
Obrázek 1.1: Model slunečního nitra. Zdroj: poskytnuto vedoucím.

Dnešní představa slunečního nitra je taková, že v jádru Slunce dochází k termojaderné fúzi vodíku, který se přeměňuje na hélium. Ze spektroskopických měření a také díky helioseizmologii víme, že směrem do centra roste abundance hélia, tj. mění se poměr zastoupení hélia a vodíku, což je ve shodě s představou probíhajícími termonukleárními reakcemi v nitru. Termojaderné reakce mohou probíhat jen za velkého tlaku a teplot vyšších než 10⁷ K. Při těchto reakcích vznikají jako vedlejší produkt výše zmiňovaná neutrina a uvolňují se gama fotony, které se dále šíří vrstvou v zářivé rovnováze. Jádro zaujímá až 25 % poloměru Slunce, což je přibližně 1,75 · 10⁵ km od jeho středu.

Vrstva v zářivé rovnováze se rozprostírá až do vzdálenosti 70 % slunečního poloměru, tj. 4,90 · 10⁵ km od centra. V této vrstvě se energie přenáší pomocí záření (zanedbatelnou mírou také vedením, tento přenos zprostředkovávají elektrony, jež hrají velmi malou roli

ve slunečním nitru). Střední volná dráha fotonů zprostředkujících přenos zářením je zde velmi malá (ale stále větší než střední volná dráha částic). Dochází k neustálému pohlcování a znovu vyzáření fotonů a to i v místech, která nemají příliš rozdílnou teplotu. Tímto způsobem gama foton ztrácí svou energii, resp. se gama foton „rozpadá“ na velké množství fotonů o menší energii a jeho cesta k povrchu může trvat tisíce i milióny let, jelikož může být znovu vyzářen do libovolného směru, tedy například i zpět k jádru.

S klesajícím tlakem a teplotou a rostoucí opacitou začíná převládat mnohem účinnější forma přenosu energie – konvekce. Vrstvě o tloušťce přibližně $2 \cdot 10^5$ km, kde se energie přenáší konvekcí, říkáme konvektivní zóna. Ohřátá hmota proudí směrem k povrchu, kde se ochladí (vyzáří energii) a začne klesat zpět do nitra Slunce, kde se opět ohřívá. Vrcholky těchto výstupných a sestupných proudů můžeme pozorovat v podobě sluneční granule ve fotosféře - nápadná „zrnitá“ struktura slunečního povrchu (fotosféry). Představu slunečního nitra znázorňuje obrázek 1.2.



Obrázek 1.2: Řez Sluncem.[2]

Při studiu slunečního nitra se lze také setkat s pojmem tachoklina. Jedná se o vrstvu na rozhraní vrstvy v zářivé rovnováze a konvektivní vrstvy objevenou na základě heliosesmo-

logického měření družice SOHO (SOlar and Heliospheric Observatory). Ve sluneční fyzice je tato tenká vrstva významná tím, že právě zde se pravděpodobně generuje magnetické pole Slunce tzv. magnetickým dynamem. V této vrstvě se mění jednak rychlosti a jednak se předpokládá, že zde nastávají změny v chemickém složení.

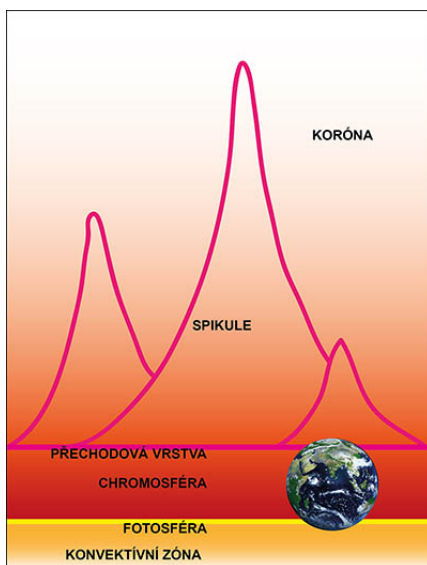
1.2 Sluneční atmosféra

V předchozím textu jsem opakovaně zmiňovala sluneční povrch. Slunce však žádný pevný povrch nemá, je to koule žhavých plynů, resp. plazmatu. Pokud tedy hovoříme o „povrchu“, myslí se tím ostře ohraničená hranice slunečního kotouče, kterou pozorujeme volným okem a z níž k nám přichází nejvíce záření – této povrchové vrstvě říkáme fotosféra. Většinou bývá fotosféra definována pomocí optické hloubky τ . Pokud je τ mnohem větší než jedna, je daná vrstva neprůhledná a naopak je-li τ mnohem menší než jedna, daná vrstva je průhledná. Fotosféru definujeme pak jako vrstvu s optickou hloubkou $0,1 \leq \tau \leq 3,0$ [10, s. 3]. Fotosféra je tvořena tzv. granulemi, které odpovídají proudům horkého plazmatu stoupajících z konvektivní zóny. V těchto místech se začíná opět uplatňovat přenos energie zářením. Ve fotosféře můžeme pozorovat jedny z nejnápadnějších projevů sluneční aktivity – sluneční skvrny, které se vyskytují v místech s velkou koncentrací magnetického toku. Fotosféra je poměrně tenká vrstva o tloušťce asi 200 km a tvoří nejspodnější část sluneční atmosféry. Teplota fotosféry je přibližně 5 700 K.

Nad fotosférou se nachází vrstva sluneční atmosféry, kterou nazýváme chromosféra. Jejímu spektru dominuje H_{α} emise, která dává chromosféře typický červený odstín při zatmění Slunce. Volným okem ji pozorovat nelze, jelikož ji přezáří světlo přicházející z fotosféry. Abychom mohli tuto vrstvu pozorovat, musíme použít speciální filtr, přičemž mezi nejrozšířenější a nejdostupnější patří H_{α} filtr. Chromosféra je složena z buněk odpovídajících výstupným a sestupným proudům plazmatu a těmto velkoškálovým buňkám říkáme supergranule. Supergranule jsou ukotveny na dně konvektivní zóny a mají obecně větší rozměry s průměrem přibližně 35 000 km než granule s typickými průměry 300 až 2 000 km [10, s. 4]. Na okraji supergranulí bylo naměřeno silnější magnetické pole než v jejich středu. Právě na hranici supergranulí můžeme pozorovat dynamické útvary jako jsou spikule a sluneční skvrny. Podíváme-li se na snímek sluneční chromosféry, zjistíme, že spikule, výběžky hmoty podobné plamínkům vypínající se do výšky cca 5 000 km s životností několika minut (viz obrázek 1.3), se koncentrují do zvláštní sítě [12, s. 321]. Říkáme jí chromosférická síť a odpovídá hranicím supergranulí. Teplota chromosféry narůstá od 6 000 K až do cca 30 000 K a její hustota postupně klesá. Chromosféře dominuje magnetické pole Slunce a je zodpovědné za její strukturovaný vzhled.

Chromosféra je mnohem dynamičtější a na první pohled zajímavější než fotosféra a lze v ní pozorovat řadu jevů za pomoci relativně snadno dostupných prostředků. Kromě spe-

cializovaných observatoří se zabývají pozorováním chromosféry i mnohé lidové hvězdárny. V jejich archivech můžeme nalézt mnoho obrazového materiálu, ale bohužel jeho zpracováním, interpretací a dalším využitím se zabývá málokdo. Vytvářený algoritmus proto zaměřuji především na snímky chromosféry, neboť s jeho pomocí bude možné s těmito daty efektivněji pracovat.



Obrázek 1.3: Znázornění sluneční atmosféry a spikulí ve srovnání s velikostí Země.[3]

Oblast atmosféry, kde se náhle mění teplota z přibližně 20 000 K na 1 milion K, se nazývá přechodová vrstva. Představuje přechod mezi chladnější chromosférou a teplejší korónou. Koróna je vnější a nejrozsáhlejší vrstva sluneční atmosféry, která pozvolna přechází do meziplanetárního prostoru. Je velmi řídká, velmi horká (až několik milionů K) a její vzhled se výrazně mění s cyklem sluneční aktivity.

1.3 Projevy sluneční aktivity

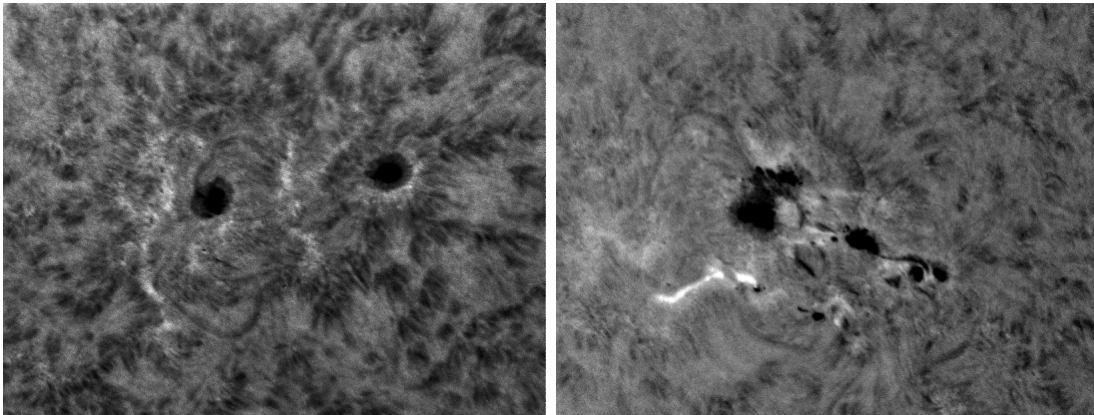
Na Slunci pozorujeme celou řadu proměnných jevů, které označujeme jako projevy sluneční aktivity. Pod pojmem sluneční aktivity se tedy rozumí řada nestacionárních jevů, jež pozorujeme ve sluneční atmosféře. Tyto jevy jsou důsledkem změn konfigurací zejména lokálních magnetických polí na Slunci a konvektivních proudů slunečního plazmatu. Mnohé tyto časově proměnné jevy se vyskytují s určitou periodicitou. Projevy sluneční aktivity můžeme pozorovat ve všech vrstvách sluneční atmosféry. Mezi neznámější a nejčastěji pozorované patří

sluneční skvrny pozorované ve fotosféře i chromosféře a v chromosféře pak můžeme pozorovat filamenty, sluneční erupce a pláže.

1.3.1 Sluneční skvrny

Nejnápadnějším projevem sluneční činnosti a její periodicity je výskyt slunečních skvrn (viz obrázek 1.4). Jedná se o místa s teplotou až o 2 000 K nižší než okolí. Sluneční skvrny jsou první objekty, které byly na slunečním kotouči spatřeny, další objekty zmiňované v této práci, byly pozorovány až mnohem později. Skupina slunečních skvrn společně s aktivními jevy, které provázejí vývoj skupiny a velmi úzce spolu souvisí, se označuje jako aktivní oblast.

Sluneční skvrny můžeme pozorovat jako tmavá místa vysoké magnetické intenzity ve sluneční fotosféře, potažmo chromosféře. Na celodiskových snímcích sluneční chromosféry vidíme sluneční skvrny jako drobné černé tečky pravidelného, téměř kruhového tvaru a patří mezi vůbec nejtmaší objekty, které na snímcích spatříme (viz obrázek 1.5).

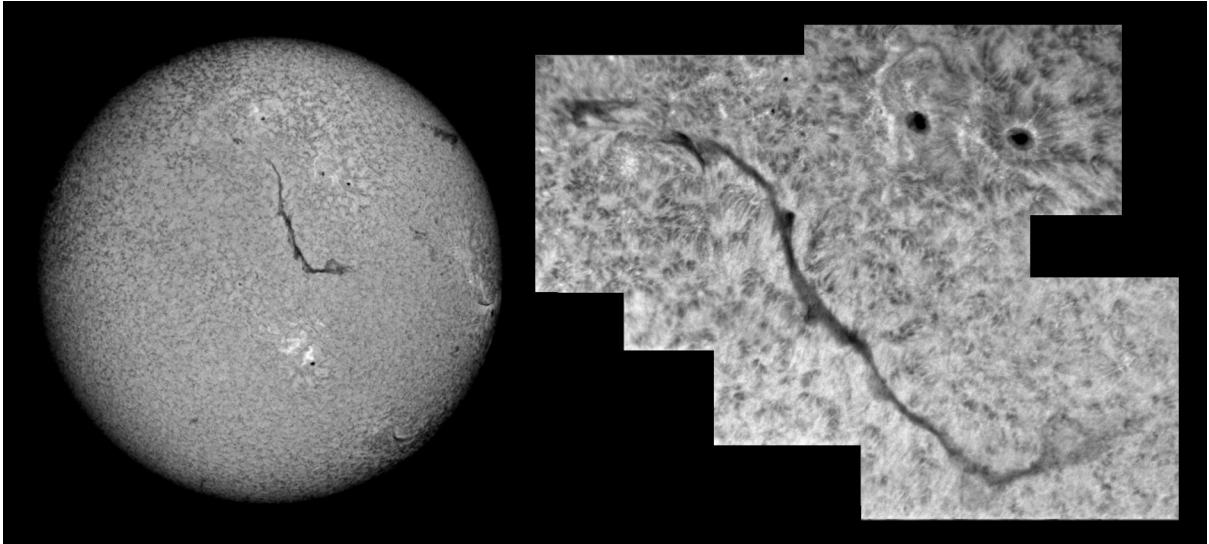


Obrázek 1.4: Snímky dvojice bipolárních slunečních skvrn (vlevo) a komplexní skupiny slunečních skvrn (vpravo) v chromosféře pořízené na Hvězdárně Valašské Meziříčí dne 6. 8. 2012. Na druhém snímku lze vidět bílé zjasnění v podobě erupce. Zdroj: archiv autora.

1.3.2 Filamenty

Ve sluneční chromosféře můžeme často pozorovat podlouhlé tmavé oblasti připomínající svým tvarem tmavou stužku. Těmto útvarům říkáme filamenty (viz obrázek 1.5). Filamenty nebo také protuberance (fyzikálně se od sebe neliší) jsou oblasti vyplněné chladnějším, ale výrazně hustším plazmatem, které je formováno magnetickými poli. Tyto oblasti procházejí chromosférou, zasahují až do koróny a obsahují materiál o teplotě kolem 10 000 °C. Protuberance

absorbují a znovu emitují světlo fotosféry ležící pod nimi. Pokud se protuberance promítá na sluneční disk, část světla je rozptýlena do ostatních směrů a protuberance se jeví tmavší, takové protuberanci pak říkáme filament. Filament má typicky kolem 10 % intenzity slunečního disku, ale i přesto je stále jasnější než obloha [11, s. 1]. Filamenty se nacházejí na rozhraní magnetických polarit.



Obrázek 1.5: Celkový a detailní snímek sluneční chromosféry byly pořízeny téhož dne 6. 8. 2012 na Hvězdárně Valašské Meziříčí. Tmavá stužka - filament poblíž středu disku na levém obrázku odpovídá téměř filamentu na složeném snímku vpravo. Snímky nebyly pořízeny ve stejnou hodinu a vzhledem k tomu, že se tento filament velmi rychle vyvíjel a měnil svůj tvar, není jeho podoba na těchto dvou snímcích zcela totožná. Černé kruhové tečky jsou sluneční skvrny. Zdroj: archiv autora.

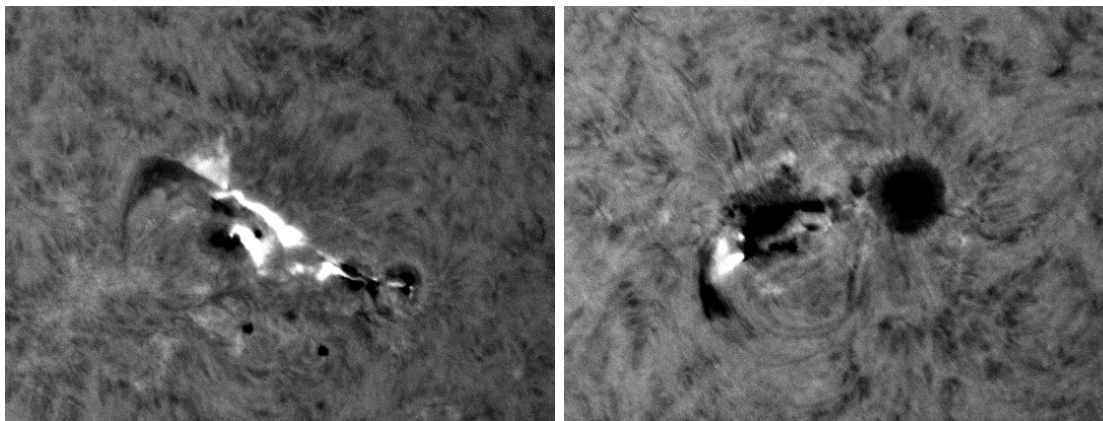
Při pozorování v úzkopásmovém filtru dochází často k tomu, že nevidíme část filamentu a jeví se nám pak roztržený anebo jej můžeme považovat za dva oddělené filamente. Přitom může jít jen o to, že vlivem pohybu materiálu a vlivem Dopplerova jevu září část filamentu na jiné vlnové délce, než jakou nám filtr umožňuje pozorovat.

1.3.3 Erupce

Chromosféra je první vrstva, v které můžeme běžně pozorovat náhlá bílá zjasnění v podobě erupce. Zjasnění bývá natolik jasné, že může při pořizování snímku dojít k saturaci, tj. nasycení a přetečení pixelů. Erupce vzniká v důsledku zamrzlých magnetických polí v plazmatu a díky pohybům plazmatu, díky nimž mohou magnetická pole spolu intenzivně interagovat.

Pokud dojde k těsnému přiblížení magnetických polí (magnetických indukčních čar) opačné orientace, nastane magnetický „zkrat“ – rekonexe. Stávající složitější magnetická pole se začnou velmi rychle rekonfigurovat do nižšího energetického stavu a jednodušší konfigurace za uvolnění velkého množství energie za relativně krátkou dobu v omezeném prostoru. K rekonexi dochází v koróně, odkud se svazky částic šíří dolů, bombardují chromosféru a v důsledku ohřevu (až několik milionů K) pozorujeme v chromosféře zjasnění – erupci. Při rekonexi magnetických indukčních čar se nejprve propojují smyčky blíže k sobě. Na snímcích tento jev pak pozorujeme jako „vzdalování“ vláken erupce. Erupce vykazují několik fází vývoje – přederupční, impulzivní, vrcholová a klesající.

Erupce pozorovaná v chromosféře sestává často ze dvou vláken, které odpovídají ukotvení koronálních smyček, u nichž došlo k rekonexi, jak je patrné na obrázku 1.6. Erupce se objevují poblíž slunečních skvrn, podél rozhraní magnetických polarit. Jasnost erupce vzrůstá po dobu několika minut a následuje pokles jasnosti trvající obvykle 30 minut až hodinu. Na Slunci se objevují také tzv. mikro-erupce, vzplanutí jen o málo jasnější než pláže.

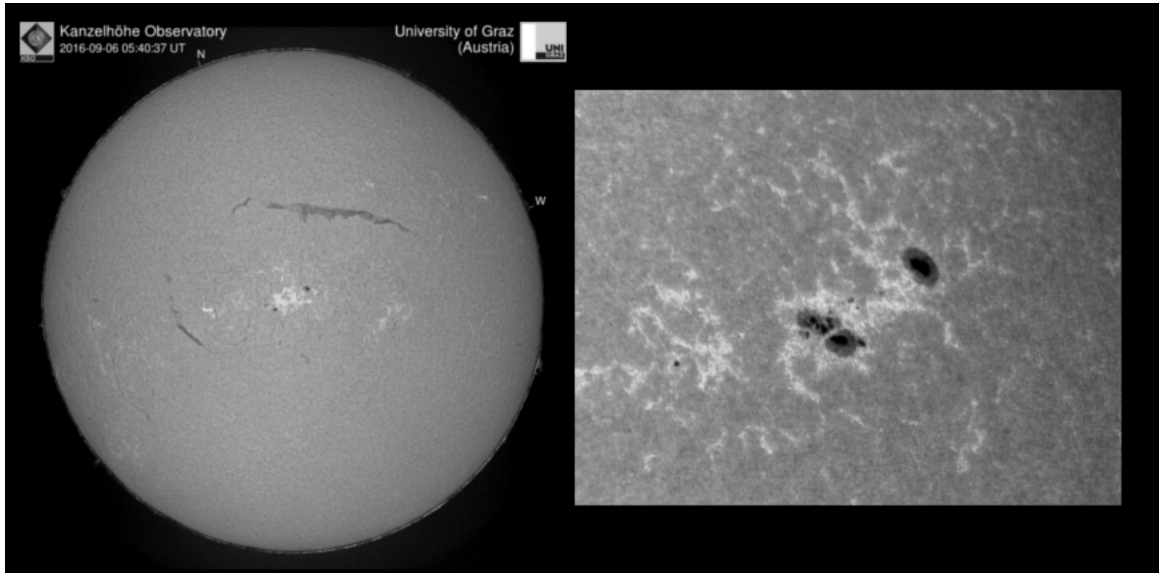


Obrázek 1.6: Snímky chromosférických erupcí ze dne 2. 8. 2011 (vpravo) a 3. 8. 2011 (vlevo) pořízeny na Hvězdárně Valašské Meziříčí. Erupce vzplála v aktivních oblastech označovaných jako NOAA 11263 a 11261. Zdroj: archiv autora.

1.3.4 Pláže

Jasnější oblasti v chromosféře, typicky v okolí slunečních skvrn, nazýváme pláže, viz obrázek 1.7. Pojmenování pochází z francouzského slova *plages*. Nejlépe lze pláže pozorovat ve spektrální čáře vodíku H_{α} . Jedná se o místa koncentrovanějšího magnetického pole a tvoří síť jasných emisí, které jsou charakteristické pro chromosféru. Někdy bývají oblasti pláží natolik

jasné a vyzařují na tolika vlnových délkách, že je lze pozorovat i ve fotosféře jako jasná fukulová pole kolem slunečních skvrn. Pláže mají vyšší teplotu a hustotu než okolní klidné Slunce. Na snímcích spatříme pláže jako oblasti jasnější než okolní chromosféra, ale ne tolik jasné jako sluneční erupce. Erupce bývají navíc koncentrované do menší oblasti, zatímco pláže jsou oproti nim rozlehlejší.



Obrázek 1.7: Celkový snímek sluneční chromosféry pořízený na Kanzelhöhe Solar Observatory pomocí H_{α} filtru dne 6. 9. 2016 a detailní snímek ze dne 9. 9. 2016 pořízený na Hvězdárně Valašské Meziříčí pomocí Ca II K filtru. Světlé oblasti na slunečním disku odpovídají plážím.[4][5]

1.4 Použité snímky a jejich charakteristika

V následující kapitole se zabývám snímky chromosféry použitými v této práci. Nejprve shrnuji základní obecné charakteristiky obrazu pro ujasnění významu používaných pojmů a popisují základní datové formáty běžně využívané při pozorování Slunce. Poté se věnuji dostupným a použitým snímkům, jejich charakteristice a zdrojům těchto snímků.

1.4.1 Obecná charakteristika obrazu

Pořídíme-li libovolný snímek, převádíme tím trojrozměrnou scénu na dvourozměrný obraz. Na tento 2D obraz pak pohlížíme jako na matici. Nejmenší obrazový bod se nazývá pixel.

V případě monochromatického obrazu má pixel tři vlastnosti – x-ová souřadnice (sloupec), y-ová souřadnice (řádek) a číselná hodnota pixelu. Barevný snímek má více vlastností, jelikož místo jedné hodnoty pixelu má několik těchto hodnot odpovídajících různým barvám. Jeden pixel pak odpovídá jednomu prvku matice a je možné jej nalézt pomocí jeho celočíselných souřadnic. Číselná hodnota pixelu je úměrná jasů v odpovídajícím místě snímané scény a ačkoli při pořízení snímku bývá celočíselná, může se po kalibraci změnit i na číslo s pohyblivou desetinnou čárkou. Velikostí obrazu se rozumí počet sloupců, tj. x-ová osa a počet řádků, tj. y-ová osa v tomto pořadí, např. 1024×768 . Snímek tedy není nic jiného než data – čísla rozmístěná v mřížce tvořené pixely. Maximální možná hodnota pixelu v obrázku je dána bitovou hloubkou, jinými slovy bitová hloubka udává počet všech možných odstínů šedi v obrázku. Například pro 8 bitů bude nejvyšší možná hodnota pixelu 255 (počítá se od nuly, nikoli jedničky), pro 12 bitů 4 095 a pro 16 bitů 65 535.

Při práci s obrázky a jejich analýze potřebujeme znát počet pixelů, které mají stejnou číselnou hodnotu. Znázornění této závislosti se nazývá histogram. Na x-ové ose histogramu vynášíme číselné hodnoty pixelů a na y-ovou osu vynášíme počet pixelů náležející dané hodnotě pixelu. Pomocí histogramu jsme pak schopni vymezit oblasti, které mají stejnou jasnost. Místa, kde se hodnoty pixelů výrazně mění, tedy mění se prudce jasnost scény, odpovídají hranám objektu zobrazeném na obrázku. Místa s nulovou číselnou hodnotou pixelu či velmi nízkou odpovídají pozadí. Histogram je velmi užitečný nástroj, který umožňuje zjistit mnoho zajímavých informací o obrázku, v případě Slunce lze například nalézt okraj slunečního disku a vyhledat podezřelé oblasti – kandidáty na hledané objekty.

Používá se několik různých odsouhlasených datových formátů pro ukládání obrazových informací - každý pro jiné účely. V prvním přiblížení se datové formáty dělí na komprimované a nekomprimované. Datovou kompresi pak rozlišujeme na bezztrátovou a ztrátovou. V této práci se předpokládá, že použité snímky mohou být ve formátu fits a jpg, případně png.

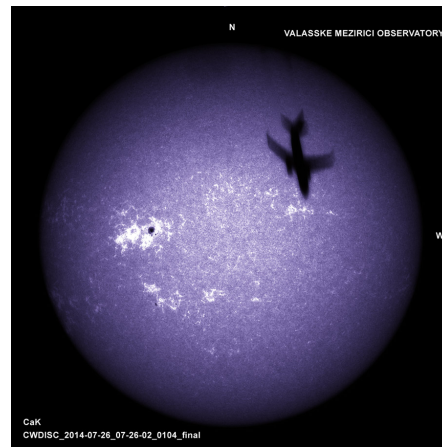
FITS neboli Flexible Image Transport System vznikl pro vědecké účely a je to nejčastěji používaný formát v astronomii. Fits je tvořen jednou nebo více HDU (Header Data Unit). První HDU odpovídá obrázku, resp. N-rozměrnému poli pixelů a další HDU (extenze) odpovídají tabulkám. Každá HDU obsahuje hlavičku ve formátu ASCII, za níž pak následují vlastní data. Komprimovaný datový formát JPEG se ztrátovou kompresí neboli Joint Photographic Experts Group vznikl pro vkládání a zobrazování snímků na internetu. Ač není vhodný pro použití v astronomii, jedná se o nejběžnější a nejpoužívanější datový formát v běžném životě. Komprimovaný datový formát PNG s bezztrátovou kompresí neboli Portable Network Graphics je vhodnější náhradou za JPEG, nicméně astronomické snímky bývají často i tak zveřejňovány ve formátu FITS a JPEG. Při práci v pythonu lze pro JPEG a PNG použít tutéž knihovnu.[9, s. 61–75]

1.4.2 Filtrogramy ve významných spektrálních čarách

Ve slunečním spektru rozlišujeme několik výrazných spektrálních čar. Mezi nejvýznamnější patří spektrální čára vodíku H_{α} o vlnové délce 656,28 nm, která se nachází v červené oblasti spektra. V této spektrální čáře můžeme pozorovat vyšší vrstvy sluneční chromosféry a řadu dynamických útvarů popsaných v první kapitole. Dalšími neméně významnými jsou spektrální čáry vápníku Ca II H a K o vlnových délkách 396,84 nm a 393,37 nm. Tyto čáry se formují v nižších vrstvách chromosféry a jsou velmi citlivé na lokální magnetická pole. Sluneční monochromatické filtry bývají nejčastěji konstruovány tak, abychom Slunce viděli právě v těchto vlnových délkách.

Snímky, které jsou pořízeny přes takovýto monochromatický filtr, se nazývají filtrogramy. Při pořizování filtrogramu je celé zorné pole snímáno najednou na rozdíl od spektroheliogramu, kdy se snímek pořizuje postupným skenováním, čili nezískáme okamžitou informaci a nemůžeme jej použít ke studiu časových řad. V této práci se budu zabývat filtrogramy pořízenými ve spektrální čáře vodíku H_{α} , především pro jejich snadnou dostupnost. Tyto snímky poskytují observatoře jako například rakouská Kanzelhöhe Solar Observatory (KSO), americká Big Bear Solar Observatory (BBSO) nebo u nás Hvězdárna Valašské Meziříčí (HVM). HVM poskytuje na internetu náhledy snímků Slunce ve formátu JPEG, původní snímky ve formátu FITS poskytuje na vyžádání. Další observatoře, které se zabývají pozorováním sluneční chromosféry jsou např. francouzská L'Observatoire à Meudon či observatoře, které jsou součástí pozorovatelské sítě GONG (Global Oscillation Network Group).

První tři zmíněné observatoře poskytují 16ti bitové snímky. Snímky z KSO a BBSO mají rozměry 2048×2048 a v hlavičce obsahují informace o maximální a minimální hodnotě pixelu v celém snímku, maximální hodnotě pixelu klidného Slunce, středu slunečního disku a jeho poloměru v pixelech. Snímky z HVM mají rozměry 1628×1236 a neobsahují další informace zmíněné u KSO a BBSO.



Obrázek 1.8: Snímek Slunce ve spektrální čáře vápníku Ca II K pořízený na Hvězdárně Valašské Meziříčí. Zdroj: archiv autora.

Kapitola 2

Segmentace obrazu

Segmentace obrazu je metoda digitálního zpracování obrazu, která umožňuje nalezení a vymezení požadovaných útvarů na snímku pomocí vhodného algoritmu a pomocí dalšího algoritmu umožňuje tyto útvary identifikovat. Jedná se o velmi užitečnou a rozšířenou metodu v mnoha vědních disciplínách. Segmentace obrazu je náročná disciplína už jen proto, že data bývají často zatížená šumem či špatným, nerovnoměrným osvětlením. Segmentované objekty mohou být navíc složité, mohou se překrývat a stává se, že i vycvičené lidské oko má obtíže s rozlišením takových objektů.

Při segmentaci je původní snímek rozdělen do segmentů. Segmenty jsou shluky pixelů, které sdílejí nějaké společné vlastnosti. Na snímku Slunce jednotlivé segmenty v ideálním případě představují námi hledané objekty (filamenty, sluneční skvrny, erupce, pláže) oddělené od pozadí. Segmentací obrazu zjednodušíme nebo měníme reprezentaci snímků tak, abychom je dokázali snadněji analyzovat. Obvykle nemůžeme dosáhnout dokonalé segmentace a je třeba segmentační algoritmus doplnit algoritmy, které snímek dodatečně upraví. Častým problémem je „přesegmentování“ nebo „podsegmentování“, kdy jediný objekt může být rozdělen do dvou či více objektů anebo pixely patřící různým objektům jsou přiřazeny k jednomu objektu, tudíž jeden segment zahrnuje více objektů.

2.1 Prahování

Základní metodou segmentace je tzv. prahování (thresholding), které patří mezi nejstarší metody segmentace obrazu. Spočívá v tom, že stanovíme určitý práh T , podle kterého následně rozhodujeme, zda daný pixel patří objektu anebo pozadí. Prahování vzhledem ke své jednoduchosti a rychlosti výpočtu patří k často používaným statistickým metodám segmentace obrazu, obvykle v kombinaci s dalšími metodami zpracování obrazu.

Důležitým nástrojem při prahování jsou histogramy, které nám usnadní stanovení vhod-

ného prahu T . V případě snímků v úrovních šedi se jedná o histogramy intenzity, kdy na x-ové ose vynášíme stupně šedi a y-ové ose počet pixelů, který odpovídá danému stupni. Výsledkem prahování je binární obraz.

Prahovací pravidlo pro případ slunečních skvrn či filamentů, které aplikujeme na snímek, by se dalo zapsat následovně

$$f(x, y) = \begin{cases} 1, & I(x, y) < T \text{ a } T < \text{průměrná hodnota disku} \\ 0, & \text{jinak} \end{cases}, \quad (2.1)$$

kde T je práh a $I(x, y)$ představuje filament[8, s. 58]. Hodnota 1 tedy náleží pixelům, které tvoří filament a hodnota 0 je přiřazena pixelům pozadí. V případě slunečních erupcí by to bylo přesně naopak.

Lze se také setkat s metodou adaptivního prahování, kdy je stanoven automatický práh T pomocí histogramu. Snímek je rozdělen na několik podobrazů a každý podobraz má pak stanoven vlastní lokální práh. Pokud nelze určit práh podobrazu, používá se práh získaný interpolací sousedních prahů.

2.2 Regionální metody

Další ze skupiny segmentačních metod jsou tzv. regionální metody (region-based methods) – metody založené na hledání oblastí. Těmito metodami hledáme pixely, které mají nějakou společnou vlastnost. Metoda spočívá v tom, že v snímku nějakým algoritmem rozmístíme iniciální body, buď rovnoměrně nebo náhodně a segment pak vytvoříme iterativním rozrůstáním kolem iniciálního bodu. Výhodou těchto metod je, že dokáží segmentovat i obraz, který obsahuje značné množství šumu a detekují v obraze přímo hledané oblasti. Důležitou podmínkou však je homogenita oblasti, ať už úrovně šedi nebo tvar či textura. Mezi tyto metody bývá řazena např. transformace *watershed*, ale zde ji zmíníme zvlášť.

2.3 Metody založené na hranici a detekci hran

Dalšími používanými metodami jsou metody založené na hranici (boundary-based methods) a metody založené na detekci hran (edge detection). Metoda založená na hranici využívá skutečnosti, že hranice oblastí v snímku tvoří hrany. Hrany jsou často místem, kde se výrazně a náhle mění jas. K detekci hran se využívá buď první nebo druhá derivace. Nejprve jsou na snímku vyhledány a zvýrazněny hrany a teprve poté se pomocí těchto hran vyhledají hranice segmentů. Existuje mnoho metod, jak detekovat hrany, avšak s rozdílnými výsledky. Záleží na přesné definici hrany a přístupu k segmentovanému snímku. K detekci hran se používají různé operátory, např. Sobelův operátor nebo Cannyho detektor hran. Tyto metody

je vhodné doplňovat další metodou, např. prahováním, jelikož není příliš spolehlivá. Obraz může obsahovat artefakty, falešné hrany, případně přerušené hrany, které je třeba spojit. Je proto důležité snímek ještě dále zpracovat.

2.4 Watershed

Občas bývá metoda watershed (povodí) řazena mezi regionální metody, nicméně jedná se o hybridní metodu, v které lze nalézt prvky z několika jiných typů algoritmů. Název metody prozrazuje její spojení s geografíí. Na snímek je nahlíženo jako na topografický reliéf, kde vysoká intenzita odpovídá vrcholům a kopcům, zatímco nízká intenzita odpovídá údolím. Snímek postupně zaplavujeme z počátečních bodů – lokálních minim podobně jako voda zaplavuje krajinu a pokaždé, když narazíme na pík intenzity (vrcholek kopce), kde se spojí voda z různých povodí, umístíme zde zářku (hráz) a pokračujeme, dokud není zaplavený celý snímek. Tímto způsobem nalezneme místa s rozdílnou intenzitou a zářky nám vytvoří jednotlivé segmenty. Problémem této metody bývá přesegmentování příliš zašuměného obrazu, kdy musíme některé segmenty opět spojit.

Kapitola 3

Předzpracování obrazu

Předpokladem je vstupní snímek již částečně upraven a zkalibrován o darkframe a flatfield, a tudíž zbaven vad jako jsou skvrny způsobené zrnky prachu na čipu kamery, tepelný šum apod. Snímek je následně předzpracován. V první fázi musí algoritmus detekovat samotný sluneční disk. Až poté, co nalezneme hranu – okraj disku, jsme schopni určit střed disku a průměr slunečního kotouče na snímku. Někdy bývá důležité odstranit okrajové ztemnění, což znamená nalézt funkci, která popisuje okrajové ztemnění sluneční chromosféry. K provedení těchto i dalších kroků používám programovací jazyk Python díky jeho snadné dostupnosti, velkému množství knihoven usnadňujících práci s daty a možnosti pracovat s objekty.

3.1 Získání užitečných informací

Existuje mnoho metod, které jsou schopny detekovat objekty na snímku. Některé jsou zmíněné výše v kapitole o používaných metodách segmentace. Každá má však své výhody i nevýhody. První metoda, kterou jsem zvolila k nalezení disku a detekci jeho okraje, byla metoda watershed, nicméně ta se ukázala jako příliš náročná, zpracování jednoho snímku trvalo dlouho, cca 15 min. Metodu watershed, ač její použití je snadné, se ukazuje lepší aplikovat na snímek, který je rozdělen do několika částí a aplikovat jej postupně na tyto bloky. Mnohem rychlejší a účinnější bylo stanovení prahu pro pozadí z histogramu.

```
self.border_threshold = np.histogram(img.flatten())[1][1]
```

Předzpracování obrazu zajišťuje pak skupina funkcí třídy `SolarImg`, které krom jiného za pomoci stanoveného prahu umožňují nalezení středu slunečního disku na snímku a určení jeho poloměru a detekují na snímku samotný disk. Pomocí inicializační metody `__init__` zavědeme proměnné, které budou obsahovat načtený snímek, který reprezentuje pole `numpy.array`,

rozměry snímku a stanovený práh. Další funkce zmíněné v této části patří taktéž do třídy `SolarImg`.

```
class SolarImg():

    def __init__(self, img):

        self.img = img
        self.dim = img.shape

        # threshold for background/solar surface
        self.border_treshold = np.histogram(img.flatten())[1][1]
```

Následující funkce detekuje sluneční disk na snímku a uloží jej do seznamu `mags`. Při použití programu voláme jen tuto funkci. Touto funkcí určíme střed slunečního disku, jeho poloměr a základní statistické údaje o disku.

```
def process(self):

    self.center, self.radius = self.getInfo()

    mags = []
    for x in range(self.dim[0]):
        for y in range(self.dim[1]):
            if self.isOnSurface(x,y):
                mags.append(self.img[x][y])
    self.mean = np.mean(mags)
    self.std = np.std(mags)
    self.max = np.max(mags)
    self.min = np.min(mags)
```

Funkce `getInfo`, která nalezne střed disku ve směru x i y z krajních bodů ležících na kraji disku a vypočte také poloměr disku na snímku, předá tyto informace funkci `process`. Funkce `getInfo` funguje tak, že vybere ze snímku přímku ve směru osy x procházející středem snímku (nemusí procházet středem disku) a taktéž přímku ve směru osy y procházející středem snímku. Pak na výřezy aplikujeme funkci `_getCenter`, která nám umožní najít průnik těchto přímk s diskem porovnáním s prahem a z těchto hodnot $x1$, $x2$, $y1$, $y2$ jsme schopni nalézt střed disku a vypočítat poloměr disku. Funkce `_getCenter` prochází jednotlivé sloupce pixelů tvořící snímek a porovnává prvky v těchto sloupcích s prahem, pokud je hodnota prvku větší než práh, přiřadí tento prvek disku.

```

def getInfo(self):
    x_cut = self.img[int(self.dim[1]/2)]
    y_cut = self.img[:,int(self.dim[0]/2)]

    x1, x2 = self._getCenter(x_cut), self._getCenter(x_cut, reverse=True)
    y1, y2 = self._getCenter(y_cut), self._getCenter(y_cut, reverse=True)

    return [np.mean([x1, x2]), np.mean([y1, y2])], np.mean([x2-x1, y2-y1])/2.

def _getCenter(self, cut_line, reverse=False):
    if reverse:
        cut_line = cut_line[::-1]
    for i, val in enumerate(cut_line):
        if val > self.border_treshold:
            if reverse:
                return len(cut_line) - i
            return i

```

Funkce `getDistance` spočte vzdálenost od středu slunečního disku ve směru osy x a y . Slouží k tomu, abychom pomocí další funkce `isOnSurface` našli pixely, které patří disku pomocí podmínky, že vypočtená vzdálenost bodů musí být menší než poloměr disku.

```

def getDistance(self, x, y):
    return np.sqrt( (self.center[0]-x)**2 + (self.center[1]-y)**2 )

def isOnSurface(self, x, y):
    return self.getDistance(x,y) < self.radius

```

3.2 Okrajové ztemnění

Jeden z neduhů, s kterým se u slunečních snímků potýkáme, je okrajové ztemnění. Na fotografiích Slunce si lze všimnout nápadného ztmavení od středu směrem k slunečnímu okraji, viz obrázek 3.1. Okraje disku jsou tak tmavší než střed disku. S výškou totiž klesá hustota a teplota sluneční atmosféry, tedy hlubší vrstvy jsou teplejší než vrstvy vyšší. Díváme-li se na sluneční disk, vidíme v jeho středu hlouběji, a tudíž se díváme na teplejší vrstvy, než je tomu na okrajích disku, odkud se k nám dostávají jen fotony z vyšších, chladnějších vrstev. Rozdíl těchto teplot v nižších a vyšších vrstvách se pak projevuje jako okrajové ztemnění.

Aby bylo možné provést analýzu snímku, je vhodné okrajové ztemnění odstranit. Poblíž okraje disku bývá ztemnění natolik výrazné, že je jas srovnatelný s jasnými filamenty, dokonce může být v těchto místech disk tmavší než filamenty nacházející se poblíž středu snímku. Snímky z HVM 3.2 a KSO 3.3 ukazují závislost hodnot pixelů na pozici na x -ové ose procházející středem disku, tedy průběh okrajového ztemnění. Na snímku z HVM je patrné, že ztemnění není symetrické. Z toho můžeme usoudit, že se nejedná jen o okrajové ztemnění, ale i další vliv, nejspíše způsobený použitým filtrem. Snímky z HVM nejsou upraveny o flatfield, což může způsobovat tuto nerovnoměrnost osvětlení.

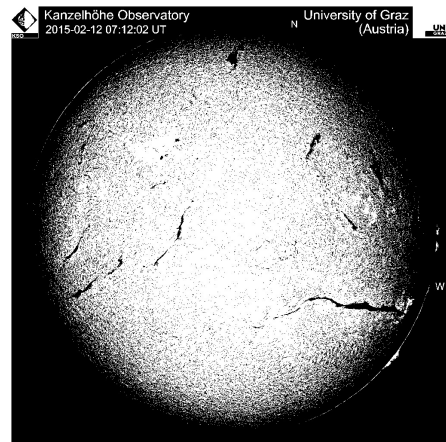
Okrajové ztemnění se dá popsat funkcí

$$f(\mu, k) = a + b\mu + 2c\mu^2, \quad (3.1)$$

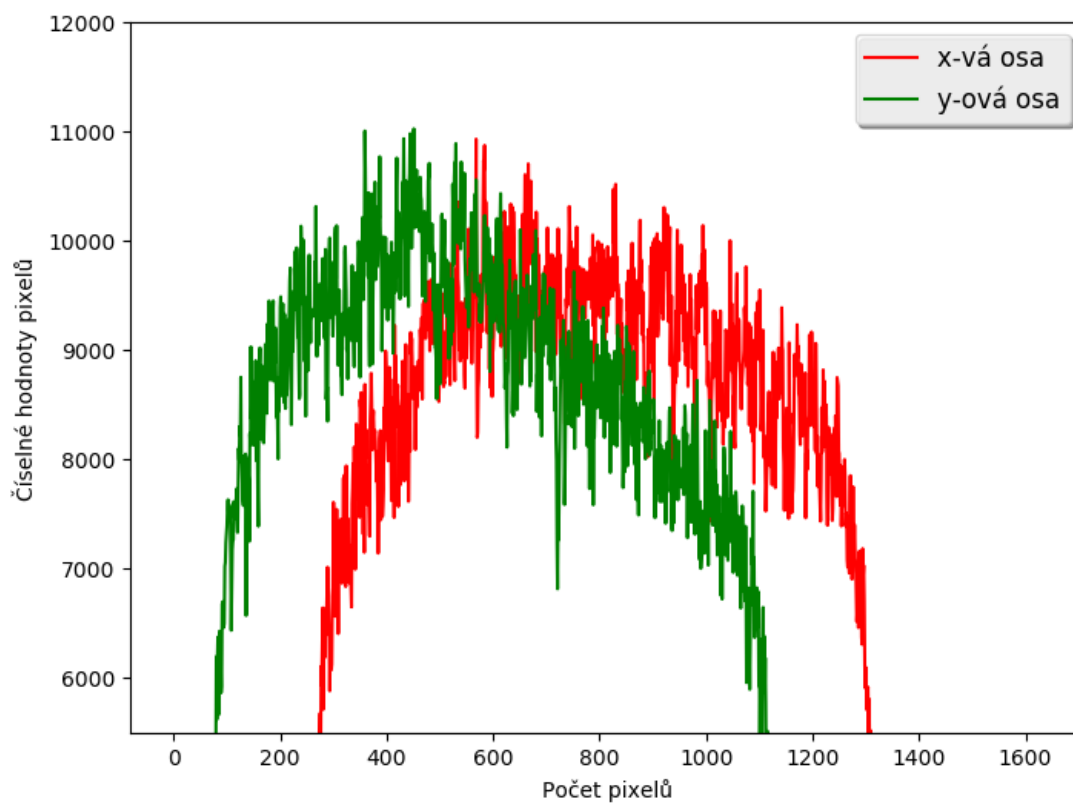
kde μ je

$$\mu = \sqrt{1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2}, \quad (3.2)$$

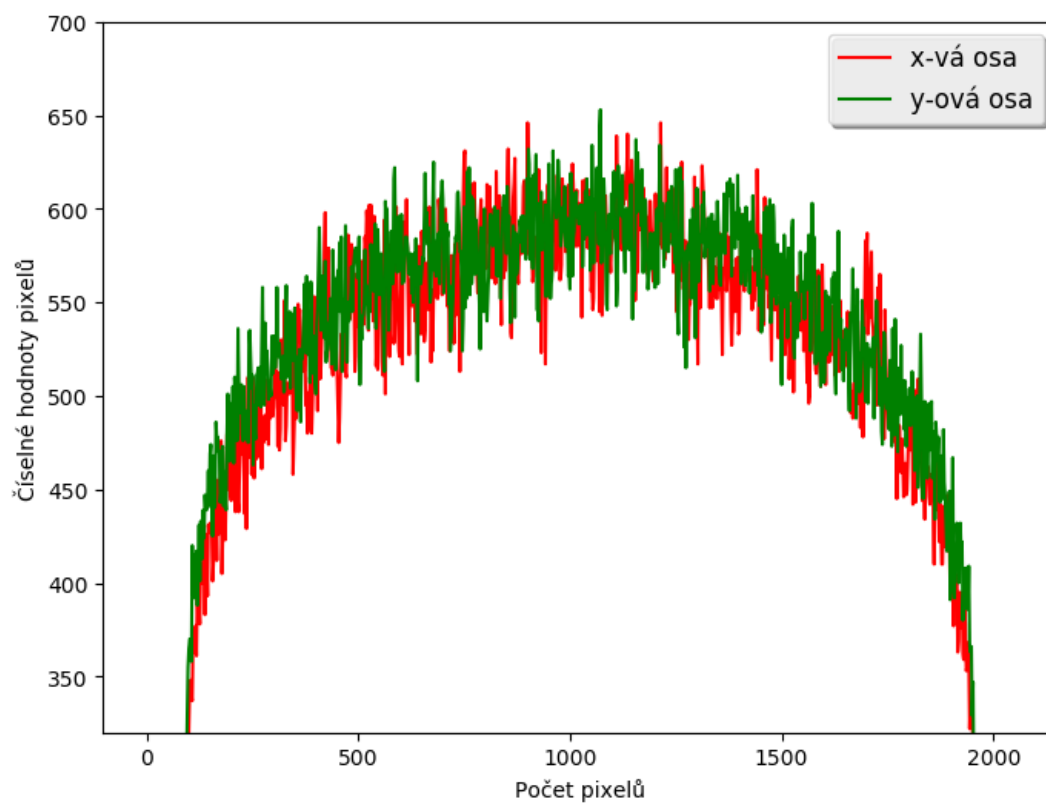
přičemž r je vzdálenost bodu na slunečním disku od středu disku, R je poloměr slunečního disku a $k = (a, b, c)$ jsou koeficienty, které lze získat z fitu grafu zobrazujícím okrajové ztemnění [13, s. 4–10]. Odstranění okrajového ztemnění chromosféry nebylo v pythonu dosud vyřešeno. Knihovna SunPy, která slouží k práci se snímky Slunce, se teprve vyvíjí a zaměřuje se především na družicové snímky.



Obrázek 3.1: Snímek Slunce z KSO upravený programem GIMP tak, aby vyniklo okrajové ztemnění.[6]



Obrázek 3.2: Průběh jasnosti disku na snímku chromosféry z HVM podél x -ové osy procházející středem slunečního disku (červeně) a podél y -ové osy procházející středem slunečního disku (zeleně).



Obrázek 3.3: Průběh jasnosti disku na snímku chromosféry z KSO podél x -ové osy procházející středem slunečního disku (červeně) a podél y -ové osy procházející středem slunečního disku (zeleně).

Kapitola 4

Detekce aktivních oblastí

Po upravení snímku lze na snímek aplikovat různé segmentační algoritmy určené k vyhledání požadovaných útvarů ve sluneční chromosféře - slunečních skvrn, filamentů, pláží a erupcí. Pouhým okem jsme schopni poměrně dobře rozlišit oblasti tmavší než povrch klidného Slunce a oblasti naopak světlejší. Pro počítač je však toto rozdělení komplikovanější, jestliže není snímek upraven o okrajové ztemnění a taktéž je-li na snímku dobře patrná chromosférická síť. Na upraveném snímku můžeme pak pomocí vhodně definovaného prahu vyčlenit dvě skupiny objektů. Skupina tmavých útvarů, jež zahrnuje sluneční skvrny a filamenty a skupina světlých objektů, do níž patří erupce a pláže. Nicméně i klidné oblasti sluneční chromosféry mohou být občas zaměněny za světlejší sluneční skvrny nebo méně výrazné pláže, jelikož chromosférická síť je tvořena tmavšími oky a světlejšími buňkami.

V prvním přiblížení lze ideální objekty rozlišit stanovením několika vhodných prahů. Ideálními objekty jsou myšleny výrazně tmavé skvrny pravidelného tvaru a jasnější filamenty, které jsou výrazně odlišné od kruhového tvaru. U erupcí a pláží jde opět o rozdíl v jejich jasnosti, ideální je erupce, jejíž jasnost obsahuje maximální hodnoty pixelů v snímku a ideální pláže mají jasnost větší než okolní disk, ale menší než sluneční erupce a jejich plocha bývá větší než plocha erupcí.

K rozlišení slunečních skvrn se dají použít matematické morfologické operace pomocí morfologických operátorů jako např. erozní operátor, dilatační operátor a jiné. Podstatnou metodou je zde prahování, v citovaném článku byla použita na snímky fotosféry metoda Otsu prahování. Prahování také umožňuje vynechat krok odstranění okrajového ztemnění, jelikož můžeme nastavit jeden práh pro střed disku a jiný práh pro část disku vzdálenější od středu. V citované práci použili jiný threshold ve vzdálenosti 0,8 slunečního poloměru. Testováním a provedením statistiky snímků lze stanovit práh pro sluneční skvrny jako procentuální část intenzity disku klidného Slunce. Pro sluneční skvrny poblíž okraje disku je třeba stanovit práh menší. Jako příklad uvedu stanovení prahu jako 20% intenzity disku klidného Slunce do

vzdálenosti 0,8 slunečního poloměru a 15% intenzity klidného Slunce ve vzdálenosti od 0,8 slunečního poloměru, převzato z citované práce. Ověření, zda nalezené objekty jsou sluneční skvrny, můžeme provést tak, že za sluneční skvrny budeme považovat jen ty objekty, u nichž rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou šedi pixelu je větší než experimentálně ověřená hodnota. V zmíněném článku použili hodnotu 5 pro snímky fotosféry, ale v případě snímků sluneční chromosféry musí být tato hodnota větší (např. 100), aby byly vyloučeny oblasti chromosférické sítě. V případě snímku z HVM musí být práh pro nalezení slunečních skvrn vyšší, jelikož skvrny zde mají 25 – 80% intenzity disku, v případě KSO cca 80% intenzity disku. Než začala samotná detekce skvrn, byl snímek v citované práci rozmazán pomocí Gaussova filtru, čímž i v případě chromosféry lze omezit rušení chromosférickou sítí. [14]

Detekce filamentů byla diskutována v několika člancích. Provedeme-li statistiku snímků, můžeme určit průměrnou hodnotu šedi pixelů pro filament a standardní odchylku od této hodnoty. Pak lze opět aplikovat threshold, který musí splňovat podmínku 2.1. Na detekované oblasti lze pak použít metodu růstu oblasti, kterou použili v citovaném článku. Ukázka pseudokódu procesu detekce filamentu[8, s. 58]:

```

For i=1 to number of images
  For j=1 to number of filaments in each image

    Step1: Compute filament mean value
    Step2: Compute filament standard deviation
    Step3: Over 5x5 window:

      (i) Compute the window min and max.
      (ii) Compute the threshold value (T)
      (iii) If(pixel_value<T) AND (T<mean) then

        PixelValue=1;

      Otherwise

        PixelValue=0;
  
```

Detekcí filamentu se má na mysli nalezení jeho hranice a pomocí této hranice lze pak nalézt páteř filamentu, což je hladká křivka charakterizující tvar, velikost a orientaci filamentu na disku. V citované práci našli hranici filamentu pomocí erozního operátoru. Páteř pak lze najít několika metodami, až už např. prahováním anebo pomocí morfologických operátorů (což však vyžaduje mnoho výpočetního času).[8]

Detekce slunečních erupcí lze provést prahováním podobně jako v předchozích případech anebo nalezením klíčového pixelu, případě pixelů a jejich spojením a detekováním celé erupce

metodou růstu oblasti.

Detekce pláží pak může probíhat podobně jako předchozí oblasti, stanovením vhodného prahu, tj. práh pro pláž bude menší než práh pro erupci, ale větší než práh pro pozadí. Vzhledem k různorodosti snímků, musí být tento práh stanoven procentuálně.

Je třeba mít na paměti, že použití známých hodnot intenzit může vnášet chybu už jen proto, že expoziční doba při pořizování snímku se může lišit podle denní doby a podmínek, za kterých je snímek pořízen. Je-li vysoká oblačnost anebo prochází-li přes sluneční disk mrak, poklesne tím samozřejmě intenzita. Pro ověření spolehlivosti detekce se používá metoda srovnání objektů na snímcích detekovaných programem a detekovaných manuálně. Pokud je objekt detekován manuálně, ale nikoli programem, používá se tzv. FRR (false rejection rate) a pokud je detekován programem, ale nikoli manuálně, používá se tzv. FAR (false acceptance rate).

4.1 Implementace vlastního algoritmu

Celý program je rozdělen do čtyř tříd: `SolarImg`, `FeaturesFinder`, `Shape`, `SolarFeature`. Třída `SolarImg` obsahuje funkce pro předzpracování obrazu, jež jsou popsány výše v kapitole Předzpracování obrazu. Třída `FeaturesFinder` je určena k hledání vybraných objektů na snímcích Slunce, především chromosféry v čáře vodíku H_{α} . Třída `Shape` reprezentuje tvar objektu a třída `SolarFeature` vykreslí nalezený objekt. Samotný program ještě není dobře propracován, jelikož jeho tvorba se nemůže příliš opírat o zkušenosti jiných programátorů – zatím nebyl vytvořen v pythonu algoritmus pro nalezení objektů na Slunci a zpracování snímků chromosféry se ukázalo být náročným úkolem.

Python nabízí několik knihoven pro práci s obrazem, které jsem použila v této práci. K načtení snímků ve formátu FITS jsem použila knihovnu `astropy`, k načtení snímků ve formátu JPEG, případně PNG lze použít knihovnu `PIL`. Pro práci s polem dat, vykreslování funkcí a hledání obrysů slouží další knihovny vypsány níže.

```
from PIL import Image
from astropy.io import fits
import numpy as np
from matplotlib import pyplot as plt
from skimage import measure
```

Ukázka otevření a načtení FITS snímku:

```
sol_img = fits.getdata('nazev_snimku.fits')
```

Ukázka otevření a načtení JPEG snímku:

```
sol_img = np.asarray(Image.open('nazev_snimku.jpg').convert('L'))
```

Pokud si chceme načtený snímek vykreslit, lze k tomu použít knihovnu určenou pro vykreslování obrázků či grafů `matplotlib.pyplot`:

```
plt.imshow(sol_img, cmap="gray")
```

Detekci aktivních oblastí můžeme zahrnout do třídy `FeaturesFinder`. V této třídě lze definovat funkce pro hledání vybraných objektů, jak je schematicky naznačeno níže. Tato třída by měla být schopná najít objekty i ve fotosféře a chromosféře v čáře vápníku Ca II K, naopak vyhledání objektů na snímcích těchto vrstev je jednodušší, jelikož zde hledání nenarušuje chromosférická síť.

```
class FeaturesFinder():

    def __init__(self, solImg):
        self.solImg = solImg

    def getSunspots(self)

        Otsu Threshold Method

        return spot

    def getFilaments(self)
        return filament

    def getFlares(self)
        return flare

    def getPlages(self)
        return plage
```

U nalezených objektů pak můžeme určit jejich tvar, tj. souřadnice hranic objektů.

```
class Shape():

    def __init__(self, contours, background):

        self.countours = contours
        self.background = background
```

```

self.entangled = self.entangleShape()

def entangleShape(self):
    entangled = []
    for i in range(len(xc)):
        entangled.append(np.sqrt((coo[0][0] - xc[i])**2 + (coo[1][0] - yc[i])**2
        ))
    return np.array(entangled)

```

Poslední třída, která reprezentuje nalezené objekty, umožňuje jejich vykreslení.

```

class SolarFeature():

    def __init__(self, center_coords, shape, feature_name=""):

        self.center_coords = center_coords
        self.shape = shape
        self.feature_name = feature_name

    def showFeature(self):
        plt.imshow(self.shape.background, interpolation='nearest', cmap=plt.cm.gray)
        plt.plot(self.center_coords[0],self.center_coords[1], "ro")

        plt.plot(self.shape.countours[:,1], self.shape.countours[:,0], linewidth=2)
        plt.show()

        plt.plot(np.linspace(0,1, len(self.shape.entangled)), self.shape.entangled
        - self.shape.entangled.mean() )
        plt.ylabel("Distance of the edge from the center")
        plt.xlabel("Azimut")
        plt.show()

```

4.2 Série snímků

K načtení série fits snímků existuje v knihovně `astropy` několi cest, jedna delší a jedna kratší. Do seznamu `image_list` načteme snímky série, s kterými chceme pracovat. Vytvoříme prázdný seznam zde nazvaný `image_concat` a do tohoto seznamu ukládáme všechny snímky načtené do seznamu `image_list`.

Načtení snímků do seznamu:

```
image_list = [download_file('http://data.astropy.org/tutorials/FITS-images/  
M13_blue_000'+n+'.fits', cache=True ) \  
for n in ['1','2','3','4','5'] ]
```

Ukázka delší cesty:

```
image_concat = []  
for image in image_list:  
    image_concat.append(fits.getdata(image))
```

Ukázka kratší cesty:

```
image_concat = [ fits.getdata(image) for image in IMAGE_LIST ]
```

Zde uvedené ukázky jsou z tutoriálu ke knihovně Astropy.[7]

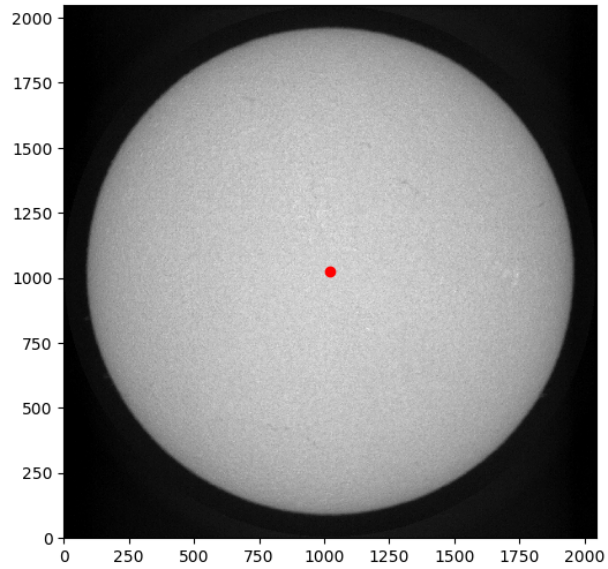
Kapitola 5

Výsledky

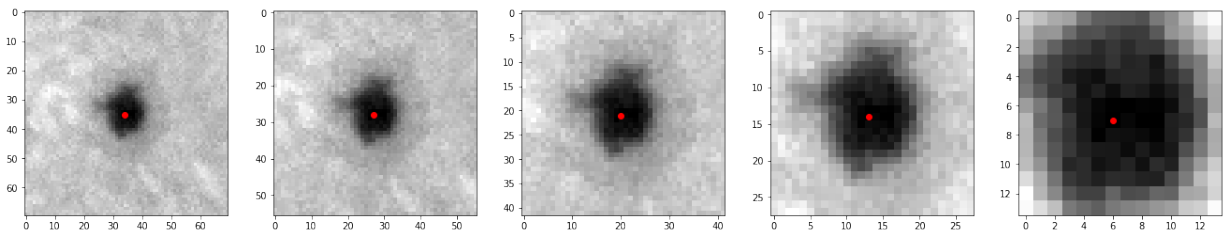
V tomto místě shrnuji výsledky, jichž bylo dosaženo a diskutuji nejtěžší problémy, se kterými jsem se při práci setkala. Výsledkem této práce je detekce slunečního disku na snímku. Toho bylo dosaženo tak, že ze snímku lze vybrat výřez ve směru x -ové i y -ové osy. Oba procházejí středem snímku, který však nemusí být totožný se středem slunečního disku. Pomocí výřezů, vhodných funkcí a stanoveného prahu byly nalezeny průsečíky těchto výřezů se slunečním diskem a z těchto průsečíků byly spočteny střed a poloměr slunečního disku. Určení středu a poloměru pak umožnilo najít sluneční disk. Byly spočteny také základní statistické údaje jako je průměrná hodnota pixelu slunečního disku, maximální a minimální hodnota, standardní odchylka. Tyto hodnoty pak mohou sloužit jako vstupy pro hledání vhodných prahů k vymezení typických útvarů ve sluneční chromosféře.

Dále následovalo navržení postupu při hledání známých objektů na Slunci, slunečních skvrn, filamentů, erupcí a pláží, jejichž realizace vyžaduje značně znalosti v oblasti programování a morfologických operací se snímky. Součástí práce je návrh, jak by mohl vypadat algoritmus pro vyhledání těchto objektů pomocí programovacího jazyka Python. Posléze následují algoritmy, které určí tvar nalezeného objektu a vykreslí tento segment, případně zjistí jeho polohu na disku. Na obrázku 5.2 lze vidět ukázkou, jak by mělo vypadat vyhledávání sluneční skvrny.

Výrazným problémem se ukázala být chromosférická síť tvořená supergranulemi, která pokrývá celý sluneční disk a způsobuje nehomogenitu snímku. Program má tendenci detekovat tmavé okraje supergranulí namísto slunečních skvrn. Detekce aktivních oblastí v chromosféře je tak mnohem komplikovanější než detekce aktivních oblastí ve fotosféře, kde granulace nebývá tolik patrná. Program má tedy obtíže se snímky chromosféry, na kterých bude třeba ještě zapracovat. Jedna z možností, jak snížit rušení chromosférickou sítí, je nalezení vhodného filtru pro vytvoření rozostřeného snímku a jeho odečtení od původního snímku. Podobně funguje vestavěný příkaz v interaktivním programovacím jazyku IDL. U snímků z KSO a BBSO



Obrázek 5.1: Zobrazení nalezeného středu snímku po detekci okraje.



Obrázek 5.2: Ukázka hledání sluneční skvrny.

lze pozorovat symetrické okrajové ztemnění. V tomto případě není nutné okrajové ztemnění odstranit, použije-li se několikanásobný práh pro hledání objektů jednak pro objekty nacházející se ve vzdálenosti do $2/3$ a jednak pro objekty nacházející se ve zbývající třetině, tj. poblíž okraje slunečního disku.

Kapitola 6

Závěr a výhledy do budoucna

V dnešní době vzrůstá zájem o poznání Slunce. S překotným vývojem společnosti a její závislosti na elektrických zařízeních je pozorování Slunce a včasné varování před silnou sluneční aktivitou nutností. Slunce sledují observatoře po celém světě a taktéž jsou vysílány družice za účelem monitorování sluneční aktivity. S množstvím dat se objevila taktéž nutnost vytvářet vhodné algoritmy, které urychlí zpracování dat. V poslední době se stále častěji objevují články, případně disertační práce, jejichž autoři si kladli za cíl najít na snímcích požadované útvary pomocí metod segmentace obrazu.

Metod segmentace obrazu existuje v dnešní době nepřehledné množství, nicméně nelze libovolnou metodu použít pro jakýkoli snímek. Cílem mé práce bylo studium zpracování obrazu, metod segmentace obrazu a jejich aplikace na snímky sluneční chromosféry libovolného datového formátu. V této práci jsem započala práci na segmentaci snímků sluneční chromosféry, jejímž cílem je získat segmenty odpovídající typickým útvarům ve sluneční chromosféře. Vzhledem k strukturovanému a komplikovanému vzhledu chromosféry a nepravidelnému vzhledu hledaných objektů se ukazuje nejlepší metodou několikanásobné prahování jednak pro samotné útvary a jednak pro útvary nacházející se poblíž středu disku a poblíž okraje slunečního disku.

V budoucím pokračování práce bych chtěla dokončit tvorbu programu a chtěla bych se zaměřit na náročnější metody segmentace obrazu a následně na metody neuronových sítí, které se jeví být lepší nástrojem pro tuto práci a jejichž vstupem k učení mohou být objekty nalezené pomocí segmentace obrazu.

Literatura

- [1] <https://sdo.gsfc.nasa.gov/assets/gallery/preview/X2flarefive.jpg> [Cit. 2017-05-15].
- [2] <http://pozorovanislunce.eu/userfiles/images/slunce/sss-slunce-006-m.jpg> [Cit. 2017-05-16].
- [3] <http://pozorovanislunce.eu/userfiles/images/slunce/sss-slunce-02-atmosfera-m.jpg> [Cit. 2017-05-16].
- [4] http://www.astrovm.cz/userfiles/image/odborne/slunce/vysledky/2016/C12585-12588_2016-09-09_09-42-01_0893_final.jpg [Cit. 2017-05-16].
- [5] http://cesar.kso.ac.at/halpha3a/2016/20160906/JPEG/kanz_halph_fi_20160906_054037.jpg [Cit. 2017-05-16].
- [6] http://cesar.kso.ac.at/halpha3a/2015/20150212/JPEG/kanz_halph_fi_20150212_071202.jpg [Cit. 2017-05-16].
- [7] Viewing and manipulating fits images. <http://www.astropy.org/astropy-tutorials/FITS-images.html> [Cit. 2017-05-17].
- [8] I. A. Atoum and M. Ali. Automated Algorithms for Detecting Solar Filaments in H-Alpha Solar Images and Detecting Their Spines. *International Journal of Astronomy*, 2:56–64, 2013.
- [9] R. Berry and J. Burnell. *The Handbook of Astronomical Image Processing*. Willmann-Bell, 2005.
- [10] Kirk, M. S. *The Anatomy of Chromospheric Flares and Associated Ephemeral Brightenings*. PhD thesis, New Mexico State University, 2013.
- [11] Gernot Riegler, Thomas Pock, Werner Pötzi, and Astrid Veronig. Filament and flare detection in $h\alpha$ image sequences. *CoRR*, abs/1304.7132, 2013.

- [12] M. Stix. *The Sun: An Introduction*. Astronomy and Astrophysics Library. Springer Berlin Heidelberg, 1989.
- [13] Youles, S. Solar limb darkening, 2017. https://twiki.ph.rhul.ac.uk/twiki/pub/Public/SamYoules/PH3010_Solar_limb_darkening.pdf [Cit. 2017-05-15].
- [14] C. Zhao, G. Lin, Y. Deng, and X. Yang. Automatic Recognition of Sunspots in HSOS Full-Disk Solar Images. *Publications of the Astronomical Society of Australia*, 33:e018, May 2016.