

MASARYKOVA UNIVERZITA
Přírodovědecká fakulta
Ústav teoretické fyziky a astrofyziky



DIPLOMOVÁ PRÁCE
**Spektroskopické studium slunečních
a hvězdných erupcí**

Šárka Dyčková

Vedoucí diplomové práce: Prof. RNDr. Petr Heinzl, DrSc.

2013

Bibliografický záznam

Autor: Bc. Šárka Dyčková
Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita
Ústav teoretické fyziky a astrofyziky

Název práce: Spektroskopické studium slunečních a hvězdných erupcí

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: Teoretická fyzika a astrofyzika

Vedoucí práce: Prof. RNDr. Petr Heinzl, DrSc.

Akademický rok: 2012/2013

Počet stran: 77

Klíčová slova: Slunce, sluneční erupce, Slunce jako hvězda, hvězdné erupce, spektroskopie, fotometrie, Perkův dalekohled.

Bibliographic Entry

Author: Bc. Šárka Dyčková
Faculty of Science, Masaryk University
Department of Theoretical Physics and Astrophysics

Title of Thesis: Spectroscopic study of solar and stellar flares

Degree programme: Physics

Field of Study: Theoretical Physics and Astrophysics

Supervisor: Prof. RNDr. Petr Heinzel, DrSc.

Academic Year: 2012/2013

Number of Pages: 77

Keywords: Sun, solar flares, Sun - star, stellar flares,
spectroscopy, photometry, Perek telescope.

Abstrakt:

Cílem této práce je pochopení eruptivních dějů na naší nejbližší hvězdě Slunci a na ostatních hvězdách ve vesmíru, především typu dM. Je zde popsáno několik možností studia Slunce jako hvězdy pomocí pozemních přístrojů i družic. Rozebírají se zde vlastnosti hvězdných erupcí. Je zde studována možnost zaznamenat hvězdnou erupci na dvoumetrovém dalekohledu v Ondřejově.

Klíčová slova: Slunce, sluneční erupce, Slunce jako hvězda, hvězdné erupce, spektroskopie, fotometrie, Perkův dalekohled.

Abstract:

The purpose of this study is understanding of eruptive processes on our nearest star, the Sun, and on other stars in the universe, of type dM. Work describes several options of studying the Sun as a star with ground telescopes and space satellites. It also deals with characteristics of stellar flares. The study proves the ability to detect a stellar flare on 2 m telescope.

Keywords: Sun, solar flares, Sun - star, stellar flares, spectroscopy, photometry, Perek telescope.

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně za použití uvedené literatury a podle pokynů vedoucího práce Prof. RNDr. Petra Heinzela, DrSc.

V Brně dne 17.5.2013:

Podpis:

Tato práce by nevznikla bez podpory mnoha lidí a různých vědeckých oddělení. Ráda bych poděkovala svému vedoucímu diplomové práce Prof. RNDr. Petru Heinzelovi, DrSc. za užitečné rady, věcné připomínky a dobré nápady, které obohatily mé znalosti a umožnily mi napsat tuto práci.

Mé velké díky patří pozorovatelce na 2m dalekohledu, Bc. Lence Kotkové, která věnovala nemalé množství svého času k záznamu a úpravě spekter eruptivních hvězd. Děkuji též Bc. Šárce Dvořákové, Mgr. Viktoru Votrubovi, Ph.D., Bc. Janu Rokosovi a zainteresovaným lidem Stelárního oddělení, za pomoc s programem IRAF. Ze slunečního oddělení bych chtěla poděkovat Dr. Y. Kuprjakovovi a RNDr. P. Kotrčovi, CSc. za pomoc při zaučení obsluhy slunečního spektrografu a pořizování slunečních dat.

Hvězdárně v Uherském Brodě, Oddělení planetek a mezihvězdné hmoty v Ondřejově, Ústavu teoretické fyziky a astrofyziky Masarykovy univerzity děkuji za poskytnutí pozorovací techniky pro získání světelných křivek. Dr. Adamu Kowalskimu, RNDr. Evě Markové, RNDr. Miroslavu Šlechtovi, Ph.D. děkuji za poskytnutí dat.

Na závěr chci říct ještě jedno velké díky svým kamarádům, rodině, milovaným a především rodičům. Děkuji za podporu v průběhu celého studia a za to, že ve mě a mou práci věříte víc než já a než si zasloužím.



Masarykova univerzita

Přírodovědecká fakulta



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student : Bc. Šárka Dyčková, učo 270198
Studijní program : Fyzika
Studijní obor : Teoretická fyzika a astrofyzika

Ředitel Ústavu teoretické fyziky a astrofyziky PřF MU Vám ve smyslu Studijního a zkušebního řádu MU určuje diplomovou práci s tématem:

Spektroskopické studium slunečních a hvězdných erupcí Spectroscopic study of solar and stellar flares

Zásady pro vypracování: Aktuálním tématem sluneční fyziky je studium energetických procesů ve slunečních erupcích a jejich projevu v dolních vrstvách sluneční atmosféry, zejména v chromosféře (tzv. chromosférické erupce). Jedná se šíření svazků urychlených částic z místa jejich akcelerace (korona) do chromosféry a fotosféry a dále o šíření tepelné a zářivé energie. Tyto procesy se pak výrazně projeví ve spektrech erupcí, ve spektrálních čarách a kontinuiích. Z intenzit čar a kontinuí lze usuzovat na relativní význam těchto procesů. Důležité je také studovat časové korelace mezi jednotlivými druhy spektrálních emisí. Kvalitativně novou spektrální diagnostiku umožňuje EUV spektroskopie založená na datech z nové družice NASA Solar Dynamics Observatory (SDO), kde je umístěn EUV teleskop (imager) AIA a EUV spektrograf EVE. Zatímco AIA monitoruje sluneční povrch v několika EUV čarách, EVE detekuje spektrální tok záření z celého Slunce, tj. sleduje Slunce jako hvězdu. Analýza takovýchto dat je podobná jako analýza spekter erupčních hvězd. Předmětem diplomové práce bude zpracování dat z EVE a AIA pro vybrané erupce a možné navázání na pozemní pozorování. Spektra budou analyzována z hlediska různých časových korelací a kvantitativně porovnána se syntetickými spektry získanými na základě non-LTE modelů erupcí. Cílem práce bude také získání spekter vybraných erupčních hvězd. K tomu bude možné využít ondřejovský 2m teleskop, součástí diplomové práce bude studie možnosti sledování erupcí na vybraných hvězdách tímto nebo jiným teleskopem. Práce budou probíhat ve spolupráci se zahraničními institucemi, zejména s University of Washington (Seattle, USA), kde se tradičně erupčními hvězdami zabývají a mohou poskytnout i doplňující pozorovací materiál.

Poznámka: Literatura: Tandberg-Hanssen, E. and Emslie, A.G. 1988, The physics of solar flares, Cambridge Univ. Press, Cambridge Reid, I.N. and Hawley, S.L. 2005, New Light on Dark Stars, Springer – Praxis, Chichester Heinzel, P. 2000, Models of the Solar Atmosphere, eds. J.-P. Zahn and M. Stavinschi, NATO Sci. Ser. C Vol. 558, Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, 201 Heinzel, P. 2003, Understanding solar flares from optical observations: How do particle beams affect the lower atmosphere ?, Adv. Space Res. 32, No. 12, 2393 Varady, M. et al. 2010, Modeling of solar flare plasma and its radiation, IEEE Trans. Plasma Sci., Vol. 38, No. 9, 2249 Solar Physics (Springer journal), Vol. 275, Jan. 2012, special volume The Solar Dynamics Observatory


Po domluvě s vedoucím DP může být DP napsána v českém, slovenském a anglickém jazyce.

Vedoucí diplomové práce : doc. RNDr. Petr Heinzel, DrSc.
Datum zadání diplomové práce : únor 2012
Datum odevzdání diplomové práce : dle harmonogramu ak. roku 2012/2013

V Brně únor 2012


Rikard von Unge
ředitel ÚTFA

Zadání diplomové práce převzal dne:


Podpis studenta

Obsah

1	Úvod	10
2	Slunce	11
2.1	Základní informace	11
2.1.1	Sluneční aktivita	12
3	Spektroskopie	14
3.1	Atom vodíku, energetické hladiny	14
3.1.1	Klasifikace spekter	17
3.2	Záření absolutně černého tělesa	19
4	Erupce	20
4.1	Historie pozorování a klasifikace erupcí	20
4.2	Magnetické pole a teorie dynama	21
4.3	Eruptivní procesy	22
5	Slunce jako hvězda	27
5.1	Sluneční spektrograf v Ondřejově	27
5.2	Družice SDO - Slunce jako hvězda v UV oblasti	29
5.3	Data z observatoře v Úpici	32
5.3.1	Zpracování dat v programu SAOImage DS9	33
6	Hvězdné erupce	43
6.1	Základní charakteristiky hvězdných erupcí	43
6.2	Hvězdy spektrálního typu G a M	46
6.3	Přehled eruptivních hvězd	49
6.4	Červení trpaslíci třídy dM	50
7	Metodika pozorování	52
7.1	Spektroskopie	52
7.1.1	Ondřejov	52
7.1.2	Perkův dalekohled	53

7.1.3	Coudé spektrograf	54
7.1.4	Ondřejovský ešletový spektrograf OES	55
7.1.5	Redukce dat	56
7.1.6	Spektroskopická pozorování	58
7.2	Fotometrie	58
7.2.1	Fotometrická pozorování Uherský Brod, Brno, Ondřejov	58
7.3	Výsledky měření	61
7.4	Erupce na hvězdě AD Leo?	65
7.5	Návrh na robotické pozorování	66
8	Diskuze a závěr	69

Kapitola 1

Úvod

Slunce je naše nejbližší hvězda. Bez jeho tepla by na Zemi nemohl vzniknout život a rozvinout se v inteligentní bytosti. Je tedy důležité, abychom se mu snažili porozumět a pochopili princip jeho chování.

Slunce je k nám relativně blízko, proto můžeme jeho povrch studovat v detailech. Především rozvoj techniky v posledních letech nám ukazuje jeho zajímavou a měnící se tvář. A právě změny probíhající na povrchu nás nikdy nepřestanou udivovat i deset zároveň. Proto je sluneční fyzika neustále rozvíjející se oblastí, na kterou se kladou velké nároky.

Nejenergetičtější děje ve Sluneční soustavě jsou erupce. Nedokážeme je předpovídat, ani předem určit jejich sílu. Fyzikální procesy, při nichž dochází ke vzájemnému působení slunečního plazmatu se magnetickým polem, se zatím nepodařilo napodobit v pozemských laboratořích. Studium erupcí a pochopení jejich energetických procesů nás jednou může zachránit před blížící se energetickou krizí a má rovněž velký význam pro ochranu civilizace před slunečními vlivy.

Kapitola 2

Slunce

2.1 Základní informace

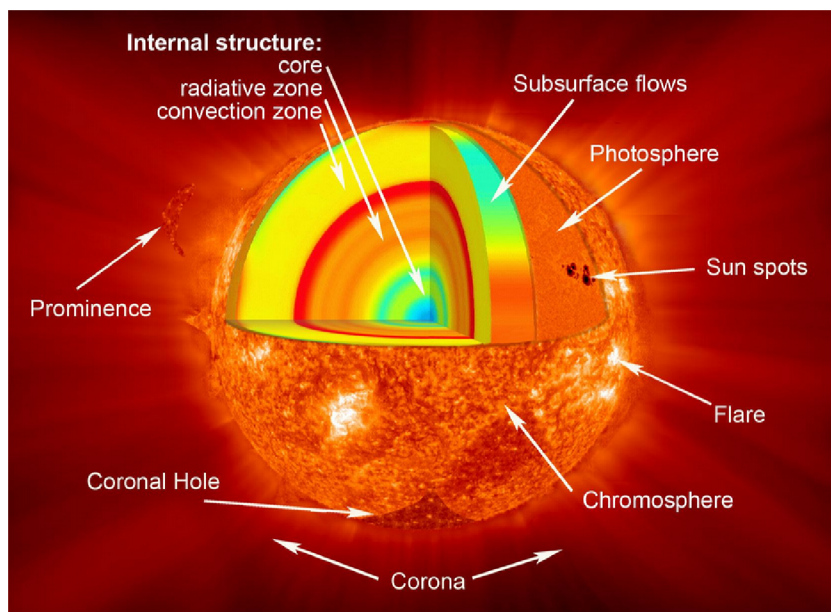
Slunce je 4,6 miliardy let stará hvězda hlavní posloupnosti, která patří do spektrální třídy G2V. Je to velká koule horkého plazmatu, v jejímž nitru probíhají termonukleární reakce. Přeměňuje se zde vodík na hélium, přičemž se uvolňuje vazebná energie. Teplota zde má hodnotu 15,7 milionu K a hustota dosahuje $1,48 \cdot 10^5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Jádrem představuje čtvrtinu poloměru Slunce.

Nad jádrem se nachází slupka, která zasahuje do 70 % poloměru a nazývá se žářivá zóna. Zde neprobíhají termonukleární reakce, jelikož teplota 2 milionů kelvinů není dostatečná pro jejich zažehnutí a udržení. Zbýlých 30 % je prostor zvaný konvektivní zóna. Přenos energie je zde formou proudů, které stoupají směrem vzhůru. Tam se ochladí a sestupují zase směrem dolů do nižších vrstev této zóny.

Při pohledu na Slunce pouhým okem vidíme nejspodnější část atmosféry Slunce. Jmenuje se fotosféra. Je silná 300 km a většina viditelného světla, až 98 %, k nám přichází právě z ní. Teplota se zde pohybuje v rozmezí 9000 - 5000 K a hustota spodní části fotosféry je $2 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Dalšími dvěma oblastmi atmosféry je řídká chromosféra a horká koróna. Obě tyto oblasti, na rozdíl od všech předchozích vrstev, nejsou ani v lokálně termodynamické rovnováze. V chromosféře dochází k nárůstu teploty až nad 10 000 K a nejlépe je pozorovatelná v čáře $H\alpha$. V koróně může teplota dosahovat až několika milionů stupňů. Tvar koróny je zcela podřízen magnetickému poli. Je viditelný zejména při zatměních Slunce, kdy můžeme pozorovat dlouhé koronální paprsky a koronální díry. Výrazně také září v dalekém ultrafialovém nebo rentgenovém oboru spektra, které nejsme schopni pozorovat na povrchu Země. A jaká budoucnost čeká na Slunce? Po přeměně všeho vodíku v jádře na hélium, se hvězda začne smršťovat. Při tom začnou vodíkové reakce

v obalu. To vyvolá rychlou expanzi obálky a její chladnutí. Ze Slunce se stane červený obr. Do závěrečné etapy svého vývoje se dostane za 7,8 miliardy let. Konečné stádium Slunce bude chladnoucí bílý trpaslík o hmotnosti $1,1 \cdot 10^{30}$ kg s poloměrem $8,5 \cdot 10^6$ m. Složení bude převážně uhlík, kyslík a menší procento těžších prvků. V této fázi vydrží po řadu miliard let. Nakonec se stane neaktivní, vychladlou, elektronově degenerovanou hvězdou.



Obrázek 2.1: Schéma slunce. Zdroj:[16].

2.1.1 Sluneční aktivita

Slunce se v průběhu svého života neustále mění. Někteří dokonce zastávají názor, že se řadí k proměnným hvězdám. Aktivitu na Slunci způsobuje magnetické pole. To je nejspíše pozůstatkem magnetického pole obsaženého v původním prachovém oblaku, ze kterého se zformovala Sluneční soustava. Toto pole by bylo velmi slabé, kdyby ho neumocnily dynamické projevy na rozhraní konvektivní a zářivé vrstvy až na tisícinásobnou hodnotu. Sluneční aktivita je rozdělena do několika projevů:

Sluneční skvrny

Nejstarší pozorované projevy sluneční aktivity, jejichž amplituda výskytu se mění v závislosti na slunečním cyklu. Poprvé je dalekohledem pozoroval Galileo Galilei. Jsou to tmavá místa na slunečním povrchu, kde je teplota mnohem nižší, než fotosférická teplota. Vznikají na místě se zvýšenou lokální intenzitou magnetického pole, která potlačuje konvekci. Většinou se vyskytují po dvojicích s opačnou polaritou magnetického pole. Jejich tvary i velikosti jsou různorodé, od 1000 - 10 000 km. Životnost od jednoho dne po několik měsíců. Skládají se ze dvou částí, tmavé umbry a světlé penumbry.

Fakule

Jasně vláknité struktury, které jsou o několik stovek stupňů chladnější než okolní fotosféra. Jsou to projevy slabších magnetických polí.

Protuberance

Oblak plazmatu, který se vypíná nad fotosférou do chromosféry a koróny. Má nízkou teplotu 10 000 K a délka oblaku může dosahovat několik tisíc kilometrů. Doba trvání se pohybuje v rámci jednoho dne až měsíce.

Sluneční vítr

Proud částic z koróny, který se šíří do všech směrů. Částice mají rychlost přes $400 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, jenž je dostatečná pro odpoutání se z vlivu Slunce.

Erupce

Erupcemi se tato práce podrobněji zabývá v následujících kapitolách.

Kapitola 3

Spektroskopie

3.1 Atom vodíku, energetické hladiny

Atom je tvořen jádrem a elektronovým obalem. Díky jaderným silám jsou v jádře atomu udržovány protony a neutrony v prostoru 10^{-15} m. V obalu atomu o průměru 10^{-10} m se pohybují záporně nabitě elektrony. Nejjednodušším neutrálním atomem, skládajícím se z protonu a elektronu, je vodík. Elektron v obalu vodíku má jen určité hodnoty energie E_n , zvané též hladiny n . Základní hladina má hodnotu $n = 1$. Energii stavů atomu vodíku vypočteme pomocí rovnice:

$$E_p = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{-eq}{r}, \quad (3.1)$$

kde q je náboj nabitého jádra, r je vzdálenost elektronu, $-e$ náboj záporně nabitého elektronu a ϵ_0 permitivita vakua.

Řešením rovnice (3.1) je:

$$E_n = -\frac{m_e e^2 q^2}{8(\epsilon_0 h n)^2} = -\frac{13,598}{n^2} \left(\frac{q}{e}\right)^2 = \frac{E_1}{n^2}. \quad (3.2)$$

Symbol E_n označuje energii n -té energetické hladiny, m_e hmotnost elektronu, Planckova konstanta $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ J.s, n je hlavní kvantové číslo. E_1 je nejnižší energie, tedy první energetická hladina (pro hodnotu $n = 1$ je energie $E_1 = -13,6$ eV). Hladin je nekonečně mnoho a s rostoucím n se snižuje rozdíl jejich energií. Přejde-li atom ze základního stavu na energeticky vyšší hladinu, říkáme, že atom byl excitován. Může k tomu dojít:

- a) Pohlcením fotonu o energii odpovídající rozdílu mezi dvěma energetickými hladinami atomu. Frekvence atomu ν musí vyhovovat rovnici:

$$h\nu = \Delta E. \quad (3.3)$$

- b) Nepružnou srážkou s jiným atomem (iontem, elektronem), kdy se energie pro excitaci odčerpá z kinetické energie srážejících se částic.

V excitovaném stavu atom nezůstává dlouho, dojde k přechodu na nižší energetické hladiny, nebo-li k deexcitaci. Pokud atom přechází spontánně do nižšího stavu, mluvíme o spontánním přechodu. Může se tak dít přímo nebo postupně. Postupný proces též nazýváme fluorescence. Na nižší hladinu se atom dostane tak, že:

- a) Atom emituje foton, který má potřebnou energii, jenž je rozdílem energie původního a výsledného stavu.
- b) Atom se dostane do nižší hladiny díky nepružné srážce s jiným atomem (iontem, elektronem). Po srážce se suma kinetických energií zvýší o rozdíl energií excitovaného a neexcitovaného stavu.

Čárové spektrum vodíku vzniká díky povoleným přechodům mezi vázanými stavy s různými energiemi. Jsou to vázaně - vázané přechody. Dojde k vyzáření či pohlcení fotonu o energii, odpovídající rozdílu energií těchto hladin. Ve spektru vodíku můžeme pozorovat několik spektrálních sérií:

Lymanova - Odpovídá přechodům do první energetické hladiny.

Balmerova - Odpovídá přechodům do druhé energetické hladiny.

Paschenova - Odpovídá přechodům do třetí energetické hladiny.

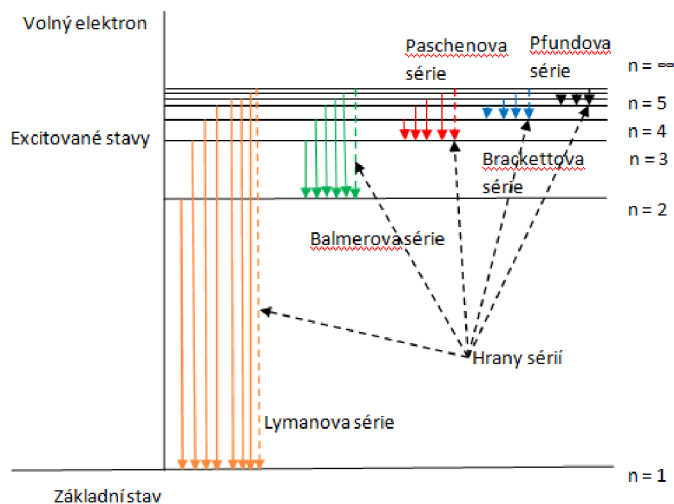
Brackettova - Odpovídá přechodům do čtvrté energetické hladiny.

Pfundova - Odpovídá přechodům do páté energetické hladiny.

Tyto série vznikají při přechodu z vyšších hladin do hladin předem daných. Pojmenování čar začíná od nejintenzivnější čáry, která vzniká při přechodu z nejbližší hladiny od hladiny zvolené. Vlnové délky čar lze spočítat pomocí vzorce:

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_j^2}\right). \quad (3.4)$$

Označení R je Rydbergova konstanta, která má hodnotu $R = 1,097.10^7 \text{ m}^{-1}$.



Obrázek 3.1: Spektrální série atomu vodíku.

Písmeno i značí počáteční stav a j stav konečný. Každá série má svou hranu, která odpovídá minimální vlnové délce čáry série:

$$\lambda = \frac{n_1^2}{R}. \quad (3.5)$$

Atomy mohou zářit i v kontinuu. Elektrony se při vázaně - volných přechodech stávají volnými a opustí atom. Tento proces nazýváme ionizace. Opačný proces, kdy se elektron srazí s iontem a je jím zachycen v jeho vázaných stavech, je rekombinace. Spojité záření též může vznikat při volně - volných přechodech. Elektron při pohybu kolem iontu vyše foton a ztratí zlomek své kinetické energie, ale i pak má dostatečnou rychlost pro únik.

Vznik spektra na hvězdách

Ve fotosférách hvězd dochází k poklesu teploty i hustoty v závislosti na pozici od spodní vrstvy. Atmosféra je zde ochlazována, protože zde dochází k vyzařování. Toto záření je ovlivněno prostředím, ze kterého bylo emitováno. Fotony, které pocházejí z nejhlubších míst, kam dohlédneme, mají největší teplotu. Pokud bychom chtěli zobrazit toto spektrum, neviděli bychom zde žádnou čáru. Ale jelikož k nám fotony přicházejí z různých částí fotosféry, můžeme ve spektru pozorovat různé rozložení energie. Při vázaně - vázaných přechodech většina fotonů přichází z geometricky vyšších vrstev fotosféry. Na rozdíl

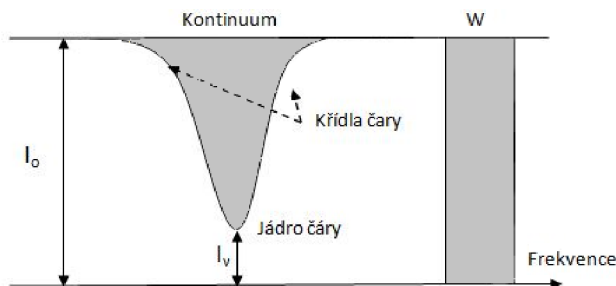
od kontinua, zde pozorujeme relativní pokles jasu. Ve spektru se tyto oblasti projevují tmavěji, jsou to tzv. absorpční čáry. V centru těchto čar jsou zaznamenány nejsvrchnější části hvězdy. Ve směru ke křídům čáry uvidíme stále hlouběji, až k vrstvám, kde vzniká záření kontinua. Ve hvězdných spektrech se můžeme setkat i s čarami emisními. Emise vzniká ve vrstvách, které jsou teplejší než vrstvy, odkud k nám přichází záření v okolí čáry. Tyto čáry pozorujeme při teplotní inverzi na hvězdě nebo u řídkých hvězdných atmosfér.

Profily spektrálních čar

Spektrální čára se skládá z centrální oblasti, kde je jádro čáry a na ní navazují křídla. Čáry mohou být slabé či výrazné, úzké nebo široké. Čára nemusí mít široká křídla vůbec. Profil čáry je normován k hladině spojitého spektra, ke kontinuu. Každá čára má ekvivalentní šířku W , jenž vyjadřuje její plochu. Ekvivalentní šířku vypočítáme:

$$W = \int (1 - \frac{I_\nu}{I_0}) d\nu. \quad (3.6)$$

Intenzita záření v kontinuu je I_0 , I_ν je intenzita dané čáry (energie za jednotku času v intervalu frekvencí $(\nu, \nu + d\nu)$, která prochází jednotkovou plochou do jednotkového prostorového úhlu).



Obrázek 3.2: Popis absorpční čáry s vyznačenou ekvivalentní šířkou.

3.1.1 Klasifikace spekter

Základní metodou výzkumu hvězd je spektrální analýza jejich záření. Počátkem devatenáctého století pozoroval W. H. Wollaston na některých místech

spektra Slunce zeslabení světla. O pár let později, roku 1814, tento jev znovu zaznamenal Joseph von Fraunhofer (1826 - 1878), který jej pečlivě prozkoumal a naměřil vlnové délky jednotlivých zeslabených čar. Fraunhoferova pozorování byla později použita jako pomůcka k určení složení Slunce a ostatních hvězd. Spektra byla rozdělena podle svého vzhledu do tříd podle tzv. Harvardské klasifikace:

Třída	Charakteristika	Teplota [K]
W	Wolfovy–Rayetovy hvězdy. Intenzivní spojitě spektrum, jasné emisní čáry vodíku, neutrální a ionizované hélium, uhlík, dusík.	30 000 - 100 000
O	Spojitě spektrum, absorpční čáry HeII.	30 000
B	Absorpční čáry HeI, zesilující se čáry Balmerovy série vodíku.	11 000 - 30 000
A	Nejintenzivnější čáry Balmerovy série vodíku, jasnější čáry CaII, čáry kovů.	7500 - 11 000
F	Čáry vodíku slabější, sílí čáry Ca a kovů.	5900 - 7500
G	Tlusté čáry CaII, série vodíku slábne, čáry kovů jsou výraznější.	5200 - 5900
K	Nejtlustší čáry kovů, pásy molekul CN a CH, tenké čáry vodíku.	3900 - 5200
M	Pásy molekul výrazné, TiO.	2500 - 3900
L	Pásy molekul FeH, CrH, H ₂ O, CO ₂ .	1300 - 2500
T	Čáry metanu.	700 - 1300

Při objevování nových typů hvězd se tato klasifikace obohatila o doplňkové třídy R (uhlíkové hvězdy, tlusté pásy CN, pásy C₂), N (pásy CN, C₂) a S (absorpční pásy ZrO).

Uvedené třídění je ještě velmi hrubé, proto každá třída byla rozdělena na podtřídy, které se značí čísly 0 - 9. Ke znaku spektra se též pro lepší zařazení začaly používat předpony (g - obr , d - trpaslík, *sd* - podtrpaslík, c - veleobr, sg - podobr, wd - bílý trpaslík) a přípony (e - spektrum s emisními čarami, s - ostré čáry, n - rozmazané čáry ve spektru (mlhoviny, rotace), v - proměnné spektrum, p - zvláštní, neobyčejné spektrum, k - čáry mezihvězdného plynu, f - široké emisní čáry vodíku v horkých hvězdách, m - čáry kovů, pec - zvláštní, nepravidelné).

V roce 1943 vznikla Yerkeská klasifikace. Je založena jak na spektrálních čarách závislých na teplotě, tak i na svítivosti hvězdy. Třídy svítivosti se dělí:

Třída	Název	Třída	Název
0	Hyperobří	IV	Podobří
I	Veleobří	V	Hvězdy hlavní posloupnosti (trpaslíci)
II	Jasní obří	VI	Podtrpaslíci
III	Normální obří	VII	Bílí trpaslíci

3.2 Záření absolutně černého tělesa

Vzhled spektra záleží jak na chemickém složení hvězd, tak hlavně na jejich teplotě. Slunce, jako zahřáté těleso, které vysílá elektromagnetické záření na všech vlnových délkách, má spojité spektrum. Toto záření nese informaci o teplotě vyzařujícího tělesa. Energie vyzařovaná absolutně černým tělesem v jednotkovém intervalu vlnových délek λ je dána Planckovým zákonem:

$$E_{(\lambda)} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}, \quad (3.7)$$

kde $e = 2,718$. Planckova konstanta $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ J.s, rychlost světla ve vakuu má hodnotu $c = 2,997 \cdot 10^8$ m.s⁻¹ a Boltzmannova konstanta je $k = 1,380 \cdot 10^{-23}$ J.K⁻¹. Vlnová délka, při níž se vyzařuje nejvíce energie, se řídí Wienovým zákonem posunu:

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T}, \quad (3.8)$$

kde b je konstanta o hodnotě $b = 2,898 \cdot 10^{-3}$. Tím je určeno i zabarvení hvězdy. Zářivý výkon, jenž vysílá do prostoru absolutně černé těleso o ploše S a teplotě T_{ef} , popisuje Stefan-Boltzmannův zákon:

$$\phi_e = \sigma S T_{ef}^4, \sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} = 5,670 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{ K}^{-4}. \quad (3.9)$$

Kapitola 4

Erupce

4.1 Historie pozorování a klasifikace erupcí

První sluneční erupce byla pozorována 1.9.1859. Pánové R. C. Carrington a R. Hodgson pozorovali oblast slunečních skvrn. Na tmavém pozadí uviděli intenzivní světlý bod, který trval několik minut. Viděli tzv. bílou erupci, která se projevuje v optické oblasti spektra. Pozdější pozorování se pak přesunula i do dalších oblastí vlnových délek. V únoru 1942, v průběhu druhé světové války, se začalo pozorovat Slunce v radiové oblasti. Avšak první oficiální radio-astronomické pozorování na frekvenci 160 MHz nahlásil až roku 1943 Grote Reber. Velký rozvoj v této oblasti umožnil podrobnější studování sluneční aktivity, především erupcí. Pozemní stanice většinou přijímaly signál v rozmezí 100 Hz - 400 GHz. Nejčastější a také nejpočetnější pozorování však byla prováděna v čáře $H\alpha$ (6563 Å).

V šedesátých letech minulého století se začaly do vesmíru vypouštět družice, díky nimž se Slunce studovalo v rentgenové a ultrafialové oblasti spektra. Tato pozorování ukázala, že erupce jsou lépe zaznamenatelné právě v těchto dvou oblastech. Proto se kolem roku 1970 zavedla klasifikace na základě rentgenového toku, přicházejícího ze Slunce. V dnešní době se tok záření na měkkých rentgenových kanálech měří pomocí satelitů GOES (0,1 - 0,8 nm) a je rozdělen do několika tříd:

Třída	Tok [W/m^2]	Subjektivní mohutnost
A, B	$F < 10^{-6}$	Slabá
C	$10^{-6} \leq F < 10^{-5}$	Slabá
M	$10^{-5} \leq F < 10^{-4}$	Střední
X	$F > 10^{-4}$	Velká

Každá třída má ještě lineární podkategorie 1 - 9, kromě třídy X, která má rozsah větší. Intuice nám říká, že erupce s označením X2 je dvakrát silnější než erupce třídy X1. Mezi nejsilnější jevy se řadí erupce ze srpna 2003, která dostala označení X28.

V průběhu existence erupce na povrchu Slunce lze pozorovat její časový vývoj, především změnu intenzity. Na základě těchto údajů byla zavedena i další klasifikace, podle zářící plochy a vzhledu v chromosféře:

Označení	Plocha [mil. km ²]
S0	$S < 300$
S1	$S = 300 - 750$
S2	$S = 750 - 1800$
S3	$S = 1800 - 3600$
S4	$S > 3600$

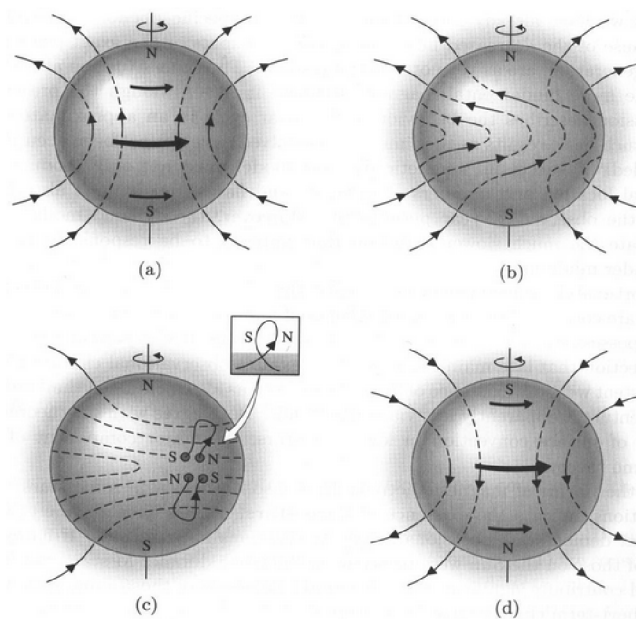
V současné době je studiu erupcí věnováno velké úsilí. Dokazuje to i nemalé financování pozorovací techniky, především sond TRACE, STEREO, SDO a RHESSI.

4.2 Magnetické pole a teorie dynama

Na začátku 19. století George Hale použil spektroheliograf na určení silného magnetického pole v oblasti skunečných skvrn. Teorii, která pak popisovala tvorbu magnetického pole, navrhl Parker (1955). Předložil návrh dynama, které vytváří a udržuje pole v konvektivní vrstvě Slunce. Tento model a veškeré jeho pozdější varianty známe pod názvem $\alpha\Omega$ dynamo. Symboly $\alpha\Omega$ značí dvě síly, které působí na plazma.

Pozorování Slunce ukazuje, že dynamový proces v sobě zahrnuje změnu existujícího poloidálního magnetického pole na toroidální, které dává vzniknout aktivitám na Slunci. Počáteční poloidální pole podléhá vnitřní diferenciální rotaci Slunce. Magnetické pole je v konvektivní zóně v plazmatu zamrzlé, diferenciální rotace namotává magnetické siločáry, mění se tak jejich intenzita i orientace. Je-li původní silokřivka vytahována azimutálním směrem, jedná se o Ω efekt. Rotace může tuto silokřivku vytáhnout a ovinout kolem Slunce zhruba za 8 měsíců.

Po přeměně těchto polí musí dojít k navrácení do původního stavu. Tento proces označujeme jako α efekt. Do děje zasahuje bipolární magnetické pole. Vlivem diferenciální rotace a Coriolisovy síly se bipolární magnetické oblasti vynořují do fotosféry. Mají toroidální i poloidální složku. Tato oblast má opačnou



Obrázek 4.1: Schéma slunečního dynama. a) Diferenciální rotace Slunce, počáteční pole směřuje od jihu k severu. b) Rotace na rovníku je rychlejší a dochází k namotávání siločar do spirály se silnými toroidálními vlastnostmi. c) Vznik smyček na povrchu Slunce a vznik aktivních oblastí. d) Nahromadění smyček vyruší existující pole a vytvoří nové s opačnou polaritou. Zdroj: [13].

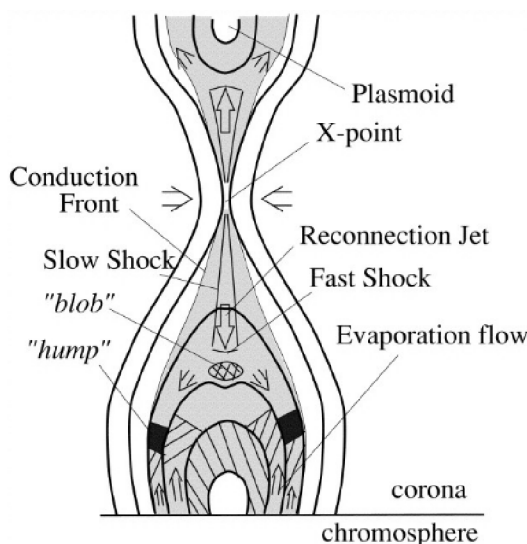
orientaci oproti celkovému poloidálnímu poli. Polarita je pak v této aktivní oblasti opačná oproti dalším částem. Toto opačně orientované magnetické pole je pak odnášeno do vyšších heliografických šířek pomocí meridionálního proudění. Zde interaguje s původním polem a dojde k jejich vyrušení. Postupně se vytvoří nové poloidální pole s opačnou orientací, než u výchozího stavu. Tento popsany děj se uskuteční během 11 let, mluvíme o 11-ti letém cyklu sluneční aktivity.

4.3 Eroptivní procesy

Erupce jsou vysoko - energetické procesy v atmosféře Slunce, které během své existence uvolní energii o velikosti $10^{17} - 10^{25} \text{ J}^1$. Proto jsou tyto děje po-

¹Jedna megatunová bomba uvolní energii 10^{16} J .

važovány za jedny z nejenergetičtějších událostí ve Sluneční soustavě. Erupce vznikají v oblastech se silnou intenzitou magnetického pole, například v oblasti slunečních skvrn. Dochází zde k napínání smyček. Pokud se v této oblasti k sobě přibližují dvě magnetické siločáry opačné polarity, může dojít k jejich přepojení do energeticky nižší hladiny. Dojde k tzv. rekonexi.



Obrázek 4.2: Standardní model erupce. Zdroj: [14].

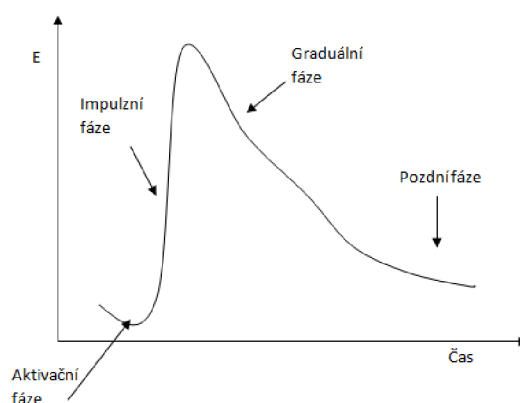
Při tom se uvolní velké množství energie, která se v magnetickém poli nahromadila. Tato energie zahřeje přítomné plazma až na desítky milionů stupňů. Část vyzáří v celém spektrálním oboru (gama záření - radiové vlny) a především v rentgenových vlnových délkách. K zažehnutí dochází hluboko v koróně. Svazky nabitých částic se pak šíří podél uzavřených smyček magnetického pole od místa rekonexe. Díky svazkům se plazma v koróně ohřívá a vyzařuje na rentgenových délkách jako synchrotronové záření. Jestliže smyčky projdou do chromosféry, ohřívají zde přítomné částice a ty září především v čáře $H\alpha$. Dochází ke vzniku chromosférické erupce. Formují se zde dvouvláknové útvary, které se během erupce od sebe vzdalují. Podle geometrické struktury dělíme erupce na dvě třídy:

1. Kompaktní erupce (Jednoduchá smyčková struktura trvající 10^3 sekund, během kterých se uvolní 10^{30} erg.)
2. Dvouvláknové erupce (Arkáda smyček trvající 10^4 sekund s uvolněnou energií 10^{32} erg.)

Pokud je erupce hodně silná, mohou vzniklé svazky proniknout až do fotosféry. Horké plazma zde září ve všech vlnových délkách a rozsvítí se i v bílém

světla, vznikne bílá erupce. Při magnetické rekonexi může dojít i k odtržení oblaku plazmatu a jeho následovnému putování Sluneční soustavou. Takový oblak nazýváme plazmoid a celému ději říkáme koronální výron hmoty. Časový průběh erupce má čtyři základní fáze:

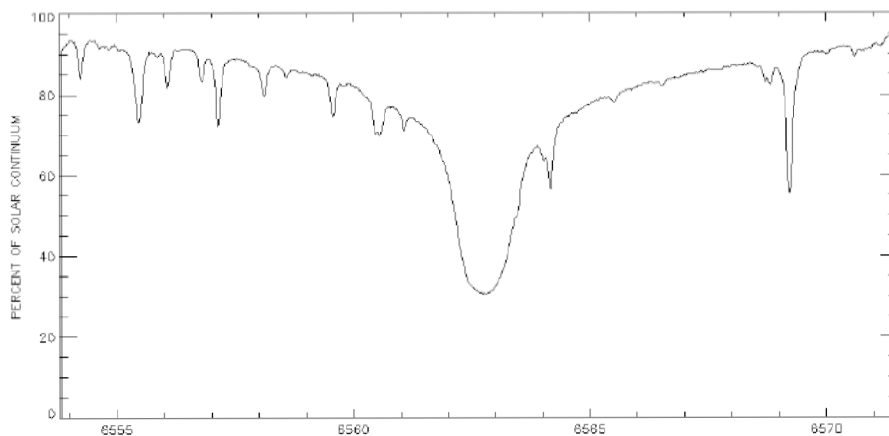
1. **Aktivační fáze** Výrazné změny v dané aktivní oblasti a přederupční aktivitě.
2. **Impulzní fáze** Hlavní fáze. Dochází k silnému ohřevu erupčního plazmatu na úkor nahromaděné magnetické energie.
3. **Graduální fáze** Ohřev plazmatu pokračuje, celková emise ale postupně klesá.
4. **Pozdní fáze** Pokračující graduální fáze.



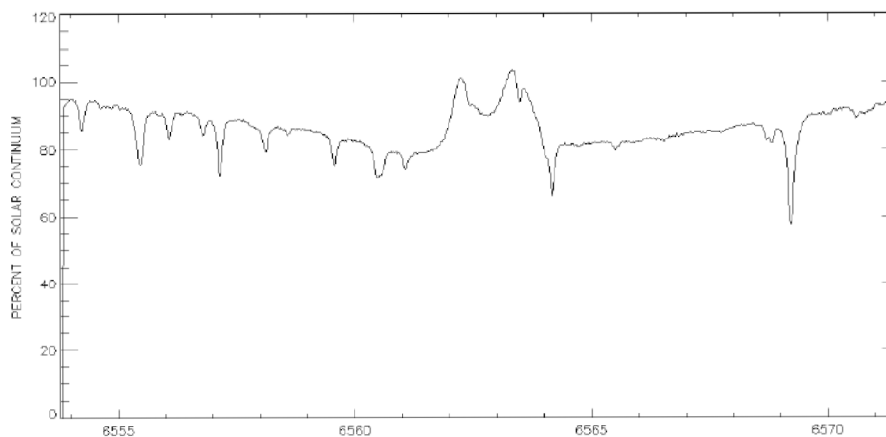
Obrázek 4.3: Křivka popisující časový průběh erupce.

Při pozorování slunečních erupcí dochází ve spektru ke změnám především v čarách, obrázky 4.4, 4.5, 4.6. Při silnějších erupcích může dojít ke změně absorpčních čar až na čáry emisní. V časovém sledu pozorujeme postupné snižování hloubky čáry až k nárustu čáry do emise. Po dosažení vrcholu erupce se pak spektrální čáry vrací zpět do původních hodnot v průběhu doznívající erupce. Změnu kontinua zaznamenáváme pouze při velmi silných erupcích, tzv. bílých erupcích. U hvězd se spíše setkáváme se změnou kontinua než tvaru spektrálních čar.

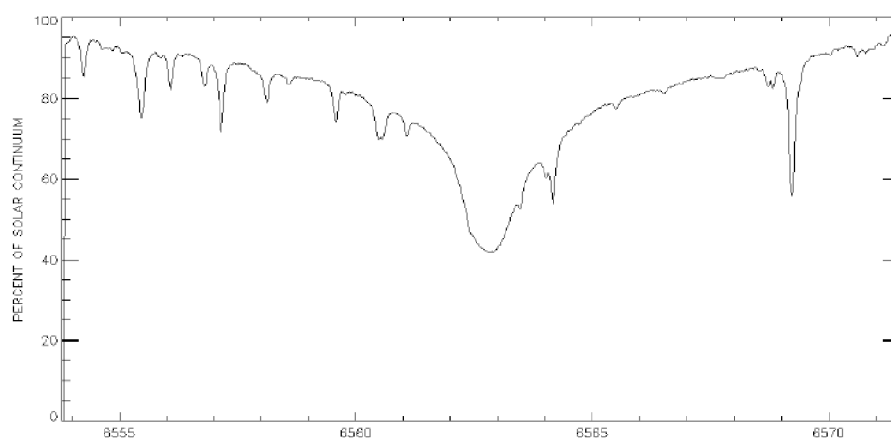
Data na obrázcích 4.4, 4.5 a 4.6 byla pořízena na slunečním spektrografu HSFA 2 v Ondřejově. Erupce byla naměřena 27.4.2012 a dosahovala třídy M1. Na snímcích je nejvíce změn v čáře $H\alpha$. Data byla zpracována v programu IDL. Osa x značí vlnovou délku v angstromech.



Obrázek 4.4: Snímek označuje čáru $H\alpha$ u klidného Slunce.



Obrázek 4.5: Snímek označuje čáru $H\alpha$ během erupce při impulzní fázi.



Obrázek 4.6: Snímek označuje čaru $H\alpha$ při pozdní fázi erupce.

Kapitola 5

Slunce jako hvězda

Jelikož je Slunce naše nejbližší hvězda, můžeme podrobně sledovat sluneční činnost a jevy, jež na ní probíhají. Přestože je tato hvězda dlouhodobě zkoumána, nejsou některé fyzikální procesy zatím zcela vysvětleny. Nitro hvězdy můžeme popisovat pouze modely, jež se shodují s pozorováním.

Zaměříme-li se na Slunce jako hvězdu a chtěli bychom vědět, jaké změny vyvolá erupce, která se zde objeví, musíme odhadnout celkový tok záření. Budeme vycházet z empirických modelů F1, F2, F3 (Avrett a kol. 1986). Relativní tok záření ze Slunce jako hvězdy s erupcí, normovaný na tok klidného Slunce, vypočteme podle rovnice:

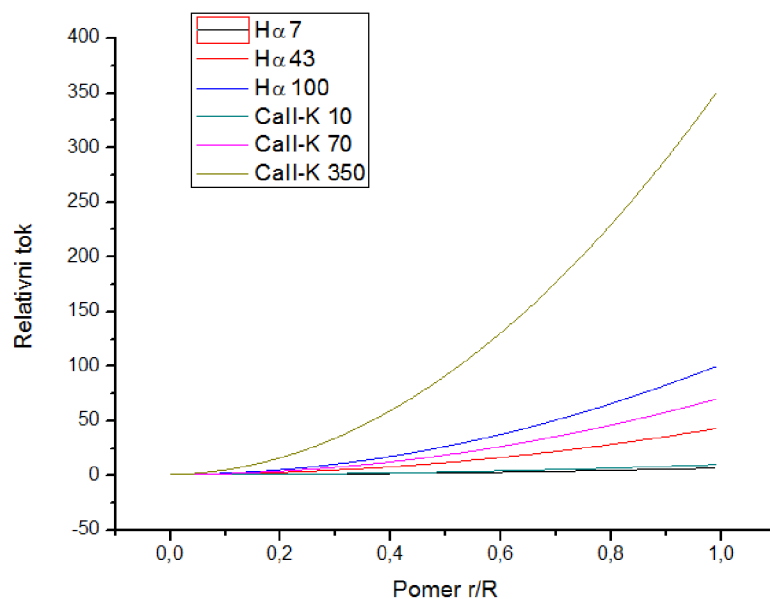
$$F = 1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2 + \left(\frac{r}{R}\right)^2 \left(\frac{I_f}{I_Q}\right). \quad (5.1)$$

Intenzita během erupce je označena I_f , intenzita klidného Slunce I_Q , r je poloměr kruhové erupce a R značí poloměr Slunce. Poměr I_f / I_Q je pro čáru α roven 7, 43, 100 a pro čáru CaII K je 10, 70, 350 (Heinzel 1992).

Výpočty byly provedeny až do hodnoty 1 poměru r/R . Na grafu 5.1 (Heinzel 1992) lze vidět, že zjasnění v těchto dvou čarách je velmi těžce detekovatelné pro slabé erupce. Čím větší bude povrch erupce, tím více bude zjasnění Slunce výrazné.

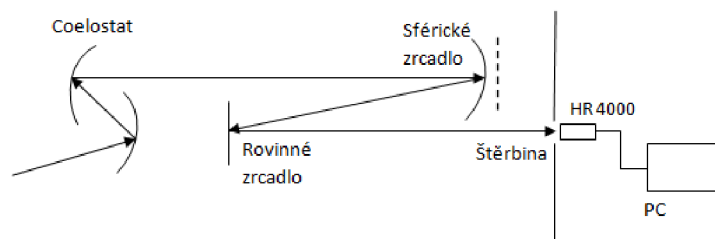
5.1 Sluneční spektrograf v Ondřejově

Sluneční spektrograf umožňuje vědcům pozorovat povrch Slunce v detailním měřítku. Na slunečním disku tak máme možnost podrobně zkoumat sluneční skvrny, protuberance nebo erupce v různých spektrálních čarách. Pokud však



Obrázek 5.1: Relativní tok Slunce jako hvězdy v čarách H α a CaII K.

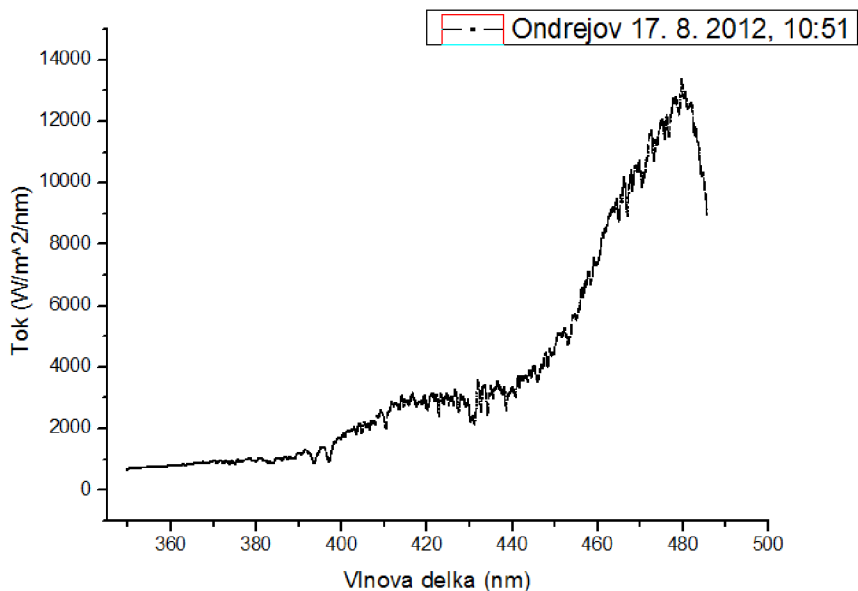
změníme některé části tohoto celku, nepozorujeme slunce v detailu, ale jako celek, hvězdu. Měření probíhalo na slunečním spektrografu v Ondřejově. Zařízení se nachází na hlavní budově Slunečního oddělení.



Obrázek 5.2: Schéma slunečního spektrografu v Ondřejově.

Sluneční paprsky dopadají na dvě zrcadla coelostatu, která se v průběhu dne natáčejí. Jejich průměry jsou 360 a 280 mm. Dále světlo pokračuje do místnosti, kde se odráží od sférického zrcadla o průměru 230 mm a ohniskové vzdálenosti 1350 cm. Zde dochází k fokusování světla. Pak paprsek po odrazu od rovinného zrcadla dopadá na místo, kde původně byla štěrbin. V současnosti se na tomto místě nachází spektrograf HR 4000, který přímo pomocí programu SpektraSuite zobrazuje spektrum Slunce v rozsahu 349,46 - 485,48 nm. Abychom získali rozptýlený paprsek od Slunce, jako hvězdy, bylo do apa-

ratury umístěno rovinné zrcadlo namísto zrcadla sférického. Pozorování probíhalo 17.8.2012 dopoledne. Doba expozic spekter byla $100\mu\text{s}$.



Obrázek 5.3: Spektrum Slunce pořízené přístrojem HR 4000.

5.2 Družice SDO - Slunce jako hvězda v UV oblasti

V únoru roku 2010 byla na geosynchronní dráhu Země vynesena sluneční observatoř NASA nesoucí jméno SDO (zkratka anglických slov Solar Dynamics Observatory). Pozice na této dráze umožňuje udržovat SDO na stálé pozici nad povrchem Země. Toto umístění je důležité pro komunikaci s pozemní stanicí White Sands v Novém Mexiku. Zde se data přijímají nepřetržitě radioanténou, díky čemuž můžeme Slunce vidět v přímém přenosu. Zemi poskytuje přenos dat rychlostí 130 Mb/s, což činí 1,4 terabajtů dat denně. Současně se pořizuje až několik snímků Slunce od měkkého rentgenového záření až po vizuální obor. Tato družice navazuje na úspěšné projekty (TRACE nebo SOHO). Solar Dynamics Observatory je první družicí, kterou Národní úřad pro letectví a vesmír vypustil v rámci programu "Living With a Star" (Život s hvězdou). Velikost přístroje je 4,5x4 m, s otevřenými panely má šířku 6,5 m. Sonda je

natočena ke Slunci částí, na které jsou uloženy tři pozorovací zařízení: AIA, HMI a EVE.

AIA (Atmospheric Imaging Assembly)

Obsahuje čtyři dalekohledy o průměru 20 cm a ohniskové vzdálenosti 4125 mm. Má k dispozici deset filtrů (9,4 nm, 13,1 nm, 17,1 nm, 19,3 nm, 21,1 nm, 30,4 nm, 33,5 nm, 155 nm, 160 nm, 450 nm), CCD kameru s rozlišením 4096x4096 pixelů. Každý pixel má velikost pouhých 12 mikrometrů a rozlišení 0,6 ". Zorné pole dalekohledu je 41 '. Podrobně zkoumá vznik a průběh projevů sluneční aktivity.

HMI (Helioseismic and Magnetic Imager)

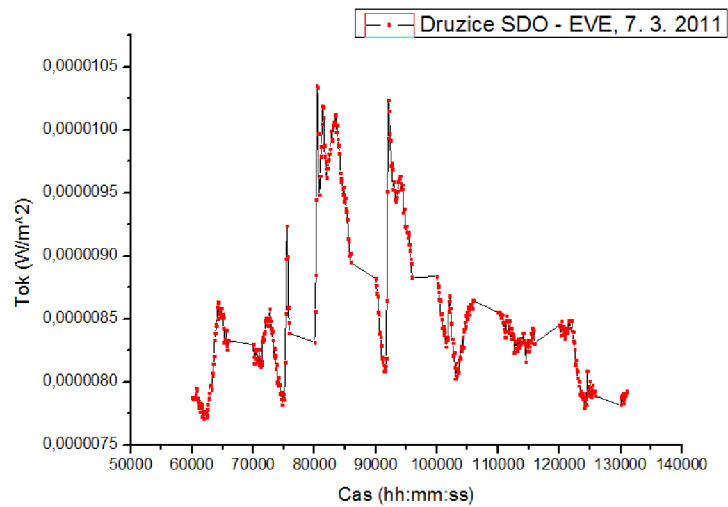
Skládá se z helioseismetru a magnetogramu. Helioseismetr zkoumá sluneční oscilace, která vznikají prouděním plazmatu na rozhraní konvektivní a zářivé vrstvy a šíří se celým Sluncem. Magnetogram zobrazuje magnetické pole a jeho polaritu. Snímkování probíhá v okolí spektrální čáry FeI s vlnovou délkou 617,3 nm. Cílem přístroje je zkoumat sluneční dynamo, které má vliv na aktivitu Slunce.

EVE (Extreme Variability Experiment)

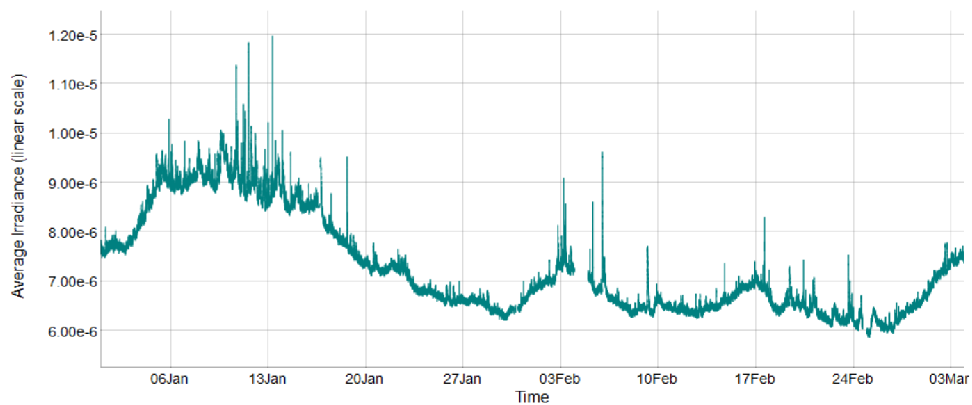
Snímkuje Slunce jako hvězdu v UV oboru. V této extrémně ultrafialové části spektra je Slunce nejvíce variabilní. Pozoruje fluktuace ultrafialového záření, které dopadá na Zemi. Toto záření nejvíce ovlivňuje horní vrstvu atmosféry, zahřívá ji a ionizuje atomy.

Předpokládá se, že družice by měla sloužit 5 - 10 let. Povrch Slunce snímá 24 hodin denně a data zasílá přímo na stanoviště v Novém Mexiku, jelikož na palubě SDO nejsou záznamové přístroje. Jeden snímek lze proto pořídit za 10 s.

Veškeré informace o tomto projektu jsou uvedeny na internetových stránkách *sdo.gsfc.nasa.gov*. Stránky obsahují i databázi snímků od roku 2010, které si zde můžeme přímo prohlížet nebo stáhnout pro další zpracování. Pro porovnání byla z této databáze stažena data v průběhu erupce ze dne 7.3.2011, které se věnuji v kapitole 5. 3. 2. Snímky byly pořizovány v minutovém intervalu ve vlnové délce 94 nm (FeXVIII). V první polovině roku 2013 se předpokládá maximum sluneční aktivity. Na obrázku 5.5 můžete vidět data v období 1. 1. 2013 - 3. 3. 2013 pořízené touto sondou na vlnové délce 94 nm.



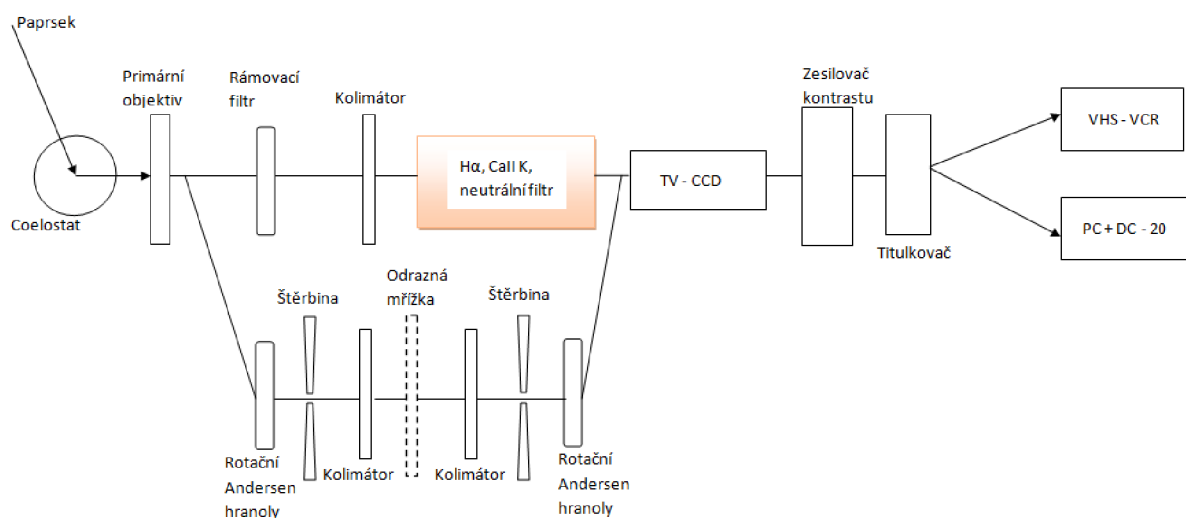
Obrázek 5.4: Data družice SDO-EVE, která ukazují tok od Slunce v průběhu erupce ze dne 7. 3. 2011.



Obrázek 5.5: Data družice SDO-EVE v období 1. 1. 2013 - 3. 3. 2013. Zdroj:[17].

5.3 Data z observatoře v Úpici

Hvězdárna v Úpici byla otevřena v roce 1959. Počátkem šedesátých let se hlavní odborná činnost začala věnovat pozorování Slunce. V roce 1966 byl pořízen úzkopásmový $H\alpha$ filtr pro sledování a záznam chromosférických erupcí. Díky pravidelným pozorováním slunečních dějů se tato hvězdárna zařadila mezi naše přední, věnující se pozorování Slunce. Na základě jejich pečlivých měření byla poskytnuta pozorování erupcí Slunce, v čáře $H\alpha$ a CaII K, RNDr. Evou Markovou, CSc. Pro záznam těchto dat byl použit horizontální dalekohled s coelostatem pro pozorování sluneční fotosféry. Přístroj se skládá z primárního objektivu 2000/120 mm. Po průchodu objektivem je paprsek zúžen na 100 mm pevnou clonou, prochází rámovacím filtrem až ke kolimátoru o velikosti 300 mm do vybraného filtru. Filtry jsou Šolcovy interferenční monochromatické filtry pro $H\alpha$ (6565 Å), CaII K (3934 Å) a pro bílé světlo neutrální filtry. Pološířka zkoumaných dvou čar je 0,8 Å. Měření se snímá CCD kamerou T340 C. Rozlišení snímků je 752x582 pixelů. Z kamery jde signál do zesilovače kontrastu přes titulkovač, který jednotlivým snímkům dá přesný popis s datem. Takto zdigitalizovaná data jsou zaznamenána do počítače pro další možné zpracování. Tento přístroj má i druhý režim, kdy lze pozorovat Slunce v jakékoliv vlnové délce optického oboru.



Obrázek 5.6: Schéma přístroje, který pořizuje snímky Slunce v čáře $H\alpha$ a CaII K na observatoři v Úpici.

5.3.1 Zpracování dat v programu SAOImage DS9

Program SAOImage DS9, zkráceně DS9, je vhodný pro úpravu astronomických dat. Podporuje obrázky typu fits, jpeg a další formáty jako nrd, tiff, png. Umožňuje pokročilé funkce pro zobrazování ve 2D, 3D a RGB snímků. Dokáže určovat souřadnice, parametry, horizontální a vertikální grafy snímku. Dobrý je v manipulaci s barevným škálováním, ořezáváním a otáčením. Vhodný je především k procházení jednotlivých pixelů na snímku a určování jejich parametrů. Programem lze upravovat více snímků naráz. Hlavním tvůrcem a správcem tohoto programu je William Joye, který poskytuje tento nástroj na úpravu dat volně ke stažení na internetu. Data pořízena v Úpici byla zpracována v programu DS9. Na vybraných snímcích formátu jpg je zachyceno několik erupcí vyvíjejících se v čase. Pozorování probíhalo ve dvou filtrech, $H\alpha$ a CaII K. Na jednotlivých snímcích byla vybrána těsná, kruhovitá oblast kolem erupce. Ve vybrané oblasti byla sečtena intenzita S_E od všech pixelů, které se v daném okruhu nacházely. Vzdálenost erupce od středu Slunce byla vždy u všech snímků dodržena. Ve stejné vzdálenosti od centra Slunce se označila oblast, kde se nevyskytovaly žádné projevy sluneční aktivity. Tato oblast se nacházela v blízkosti oblasti první.

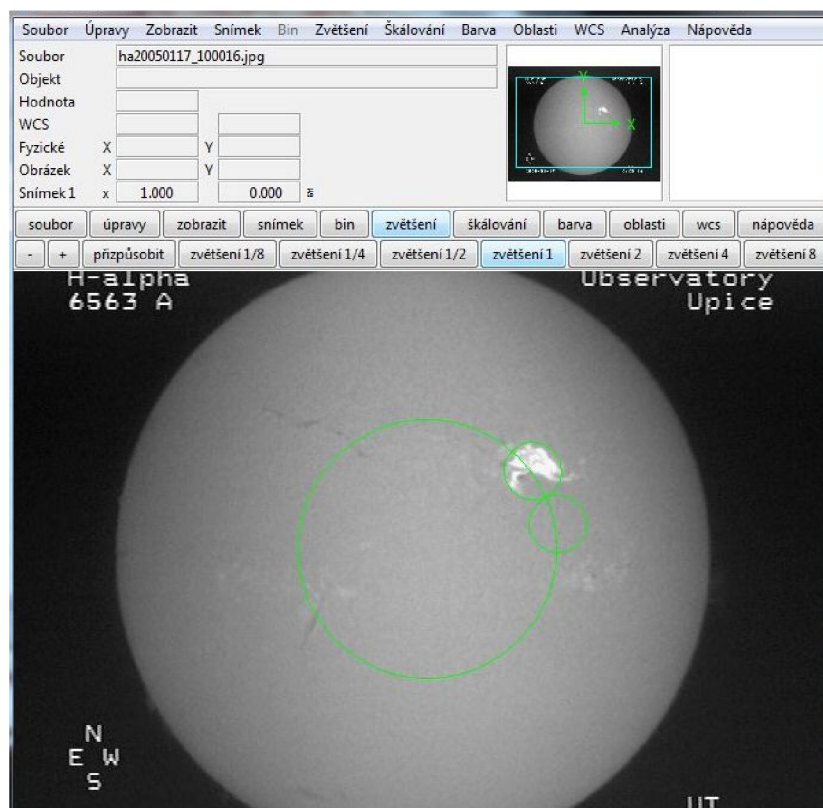
I zde se sečetla intenzita S_K všech pixelů. Výsledná normovaná intenzita erupce ve vybraných čarách se vypočítala podle vzorce:

$$I_n = \frac{S_E - S_K}{S_K}. \quad (5.2)$$

V průběhu pořizování snímků občas docházelo ke změně počasí. Proto se rozdíl intenzit ($S_E - S_K$) dělil intenzitou klidného Slunce S_K . Výsledkem je normovaná intenzita I_n . Takto vypočtená intenzita byla vykreslena v programu OriginPro 8.

Erupce 17.1.2005

Ze všech dat, která byla poskytnuta ke zpracování, byla erupce ze dne 17.1.2005 nejsilnější. Její záznam trval skoro dvě hodiny a její velikost byla hodnoty M. Vývoj čar ve dvou filtrech ukazuje prudký nárůst intenzity v místě erupce. Křivky po dosažení maxima pozvolna klesají v průběhu čtyř hodin. Pokud porovnáme grafy s daty družice GOES, průběhy těchto dějů jsou podobné. Křivky se liší pouze v maximu, protože data z Úpice neobsahují tento časový úsek. Abychom porovnali účinky erupce na celkovou plochu Slunce, byly sečteny všechny pixely na snímku jpg, které zobrazovaly sluneční disk.



Obrázek 5.7: Ukázka úpravy dat pomocí programu SAOImage DS9.

Z výsledku je zřejmé, že i silná erupce třídy M nemá velký vliv na celkovou intenzitu hvězdy spektrální třídy G. Data zobrazena na obrázku 5.10 byla vykreslena v čáře CaII K a normována na střed Slunce. Velký výkyv dat na konci měření je způsoben přechodem mračen přes snímané pole.

Erupce 29.7.2002

Celkový záznam dat trval kolem šesti hodin. Samotná erupce s impulzivní a pozdější graduální fází trvala skoro 3 hodiny. V první části grafu lze vidět náznak nárůstu intenzity, který však není zazmenán družicí GOES. Velká zašuměnost dat je způsobena malou velikostí erupce.

Erupce 30.5.2003

Při snímání Slunce dne 30.5.2003 se podařilo na slunečním disku zaznamenat dvě erupce v krátkém časovém úseku. První erupce začala o půl sedmé ráno a trvala necelou hodinu. Druhá erupce začala o dvě hodiny později a v průběhu tří hodin postupně slábla. Údaje z družice GOES se dobře shodují s průběhy naměřených dat.

Erupce 9.6.2003

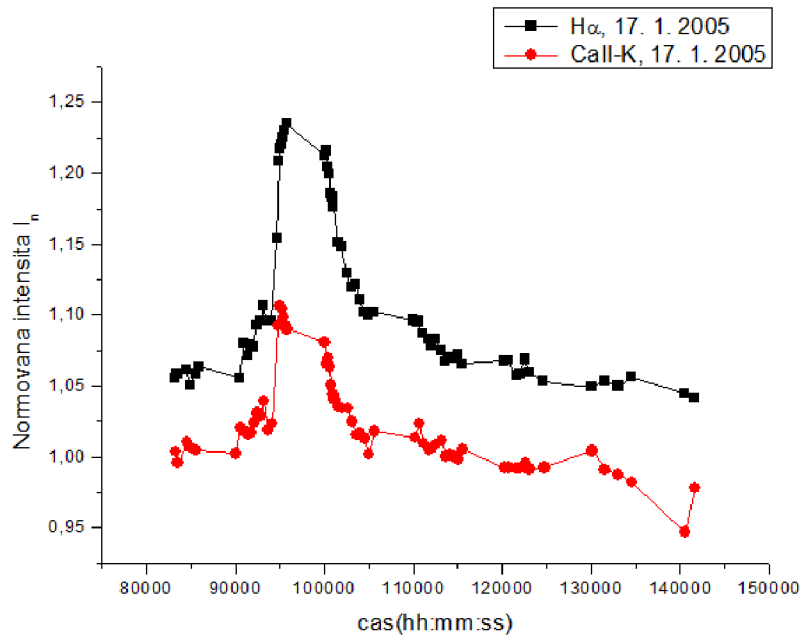
Kvůli nevýrazné a krátké erupci nemají grafy hladký průběh. Lze vidět několik píků, které by mohly značit výskyt erupce. Ta skutečná proběhla po jedenácté hodině dopoledne a trvala jen půl hodiny.

Erupce 7.6.2007

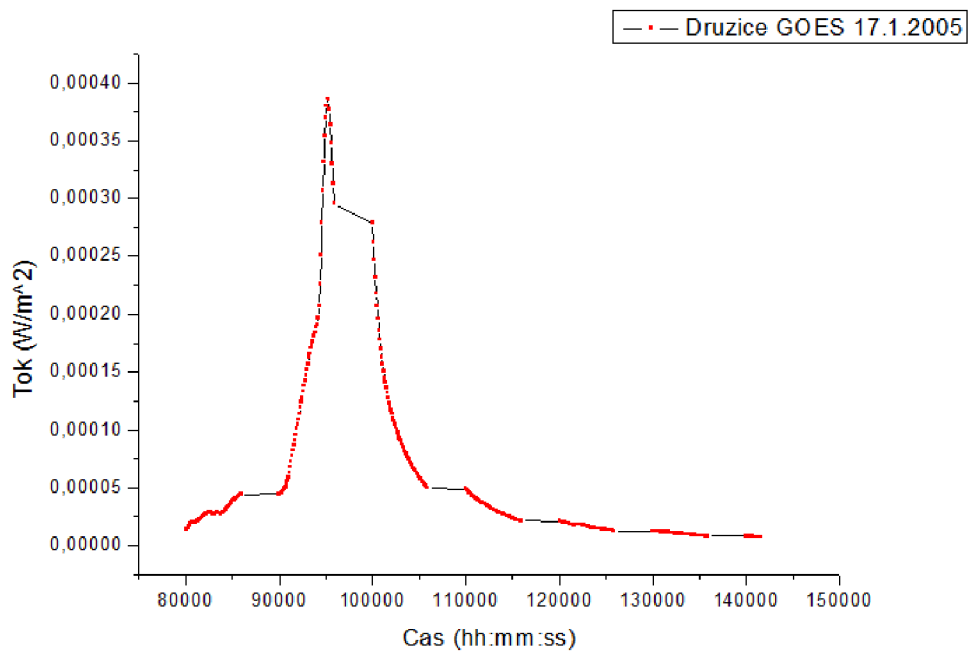
Záznam z tohto dne trval 6 hodin. V této době se na vybraném úseku Slunce vytvořily dvě erupce. Poprvé o půl sedmé ráno a později kolem desáté hodiny. Obě trvaly necelé dvě hodiny.

Erupce 7.3.2011

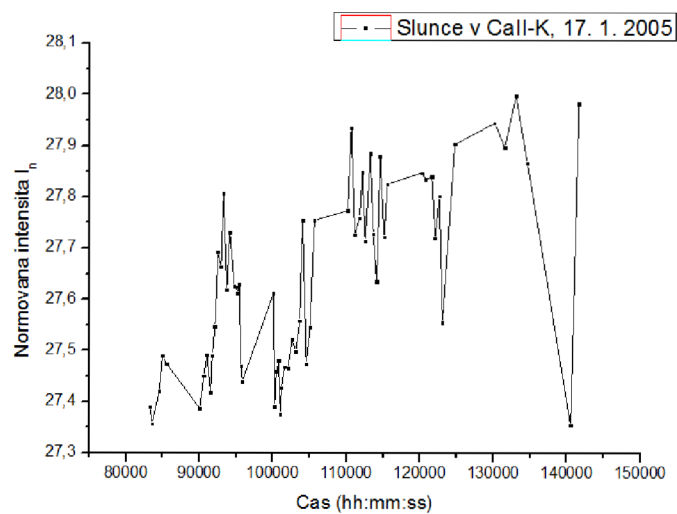
Záznam dat v tento den probíhal od 7 - 13 hodin. V ranních hodinách 7:30 byla zaznamenána erupce. Bohužel výsledky nejsou porovnány se satelitem GOES, jelikož databáze neobsahuje tato data. Proto je tento průběh porovnáván s družicí SDO v kapitole 5.2.



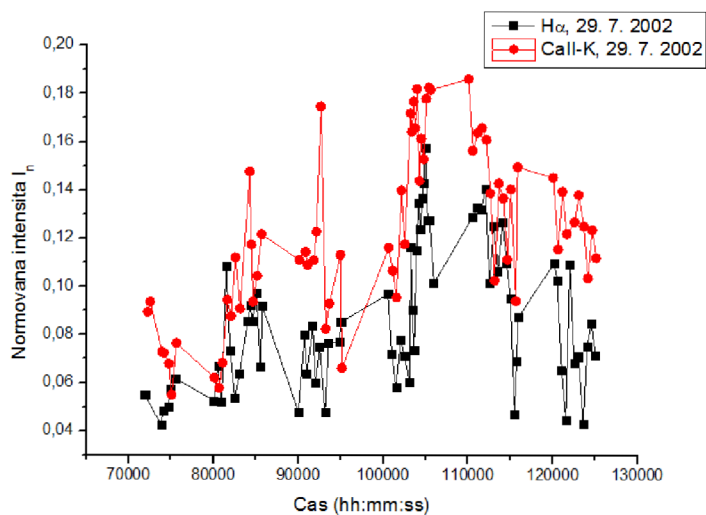
Obrázek 5.8: Graf znázorňující vývoj čar $H\alpha$ a CaII K v průběhu erupce.



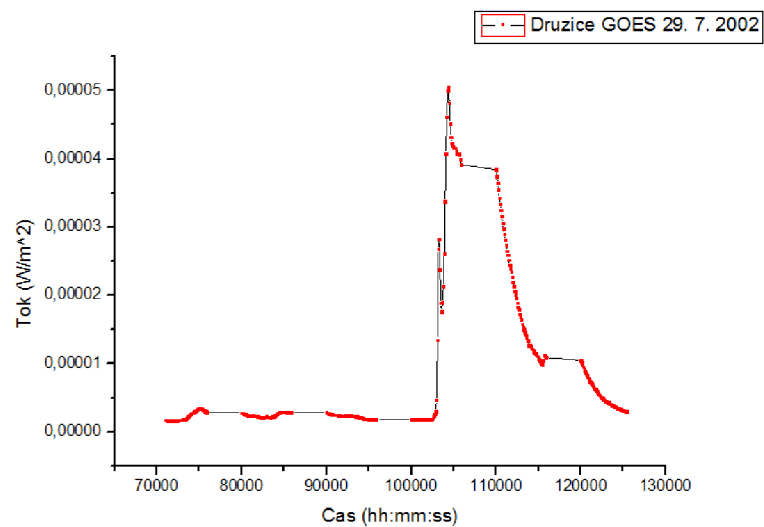
Obrázek 5.9: Data z družice GOES ze dne 1.1.2005.



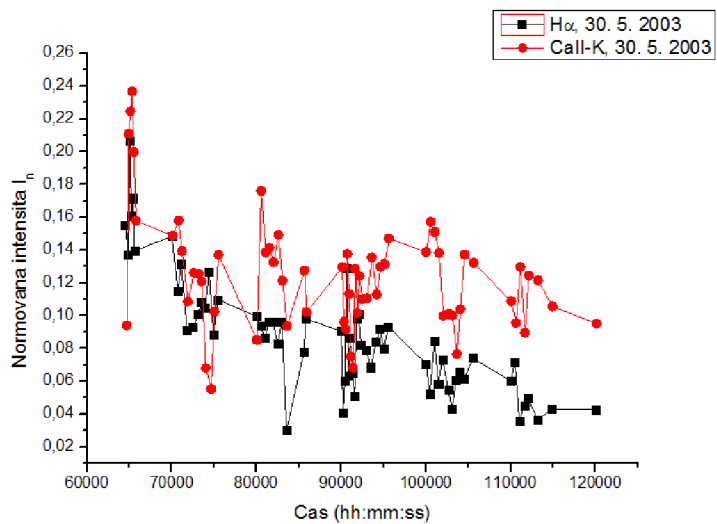
Obrázek 5.10: Graf znázorňující celkovou normovanou intenzitu Slunce s erupcí.



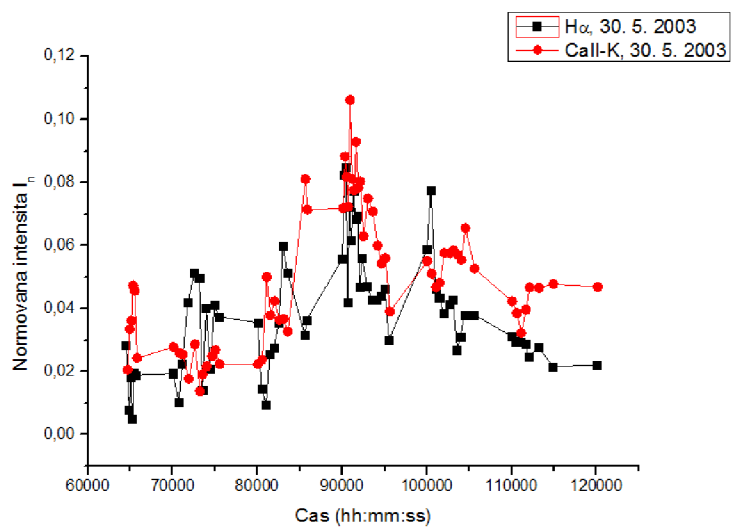
Obrázek 5.11: Graf znázorňující vývoj čar $H\alpha$ a CaII K v průběhu erupce.



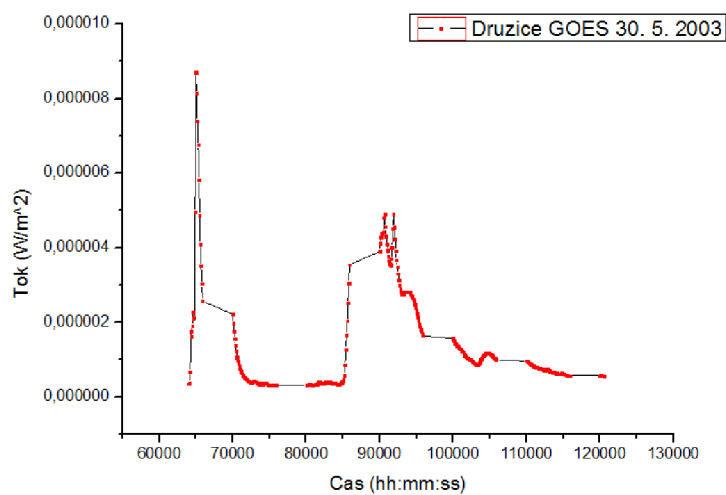
Obrázek 5.12: Data z družice GOES ze dne 29.7.2002.



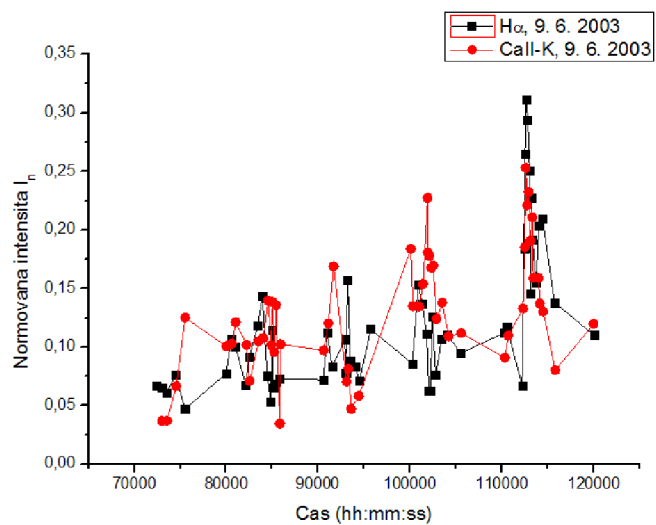
Obrázek 5.13: Graf znázorňující vývoj čar H α a CaII K v průběhu erupce.



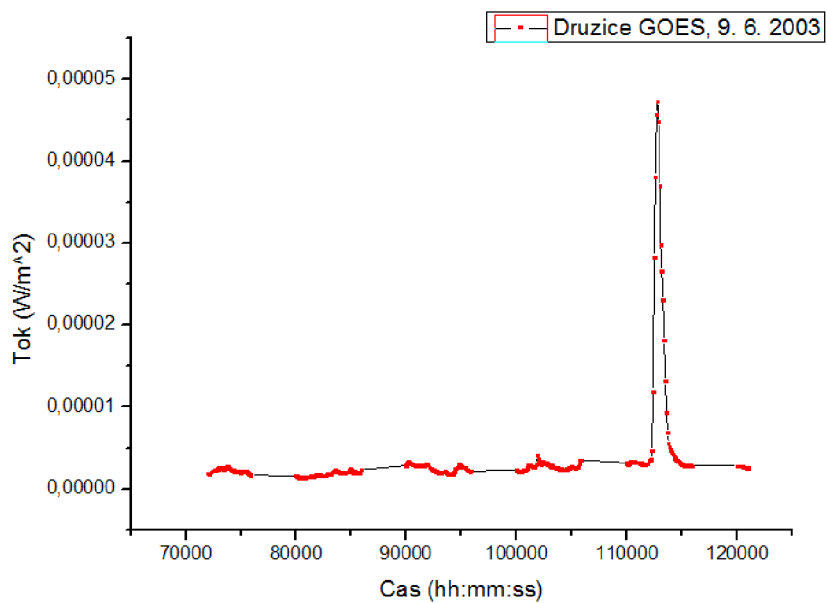
Obrázek 5.14: Graf znázorňující vývoj čar $H\alpha$ a CaII K v průběhu erupce.



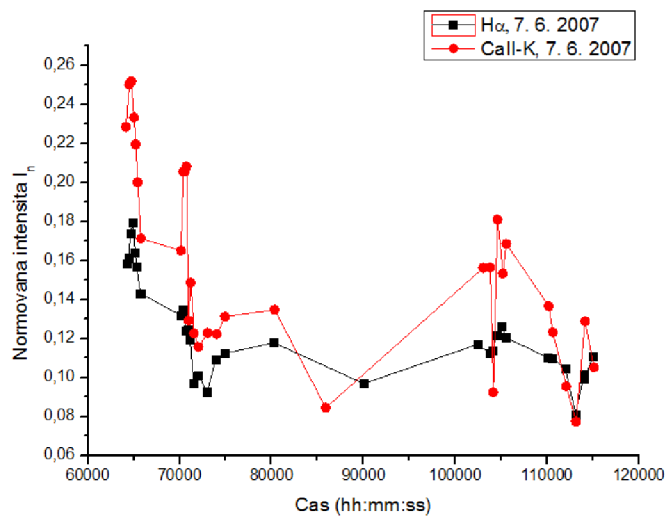
Obrázek 5.15: Data z družice GOES ze dne 30.5.2003.



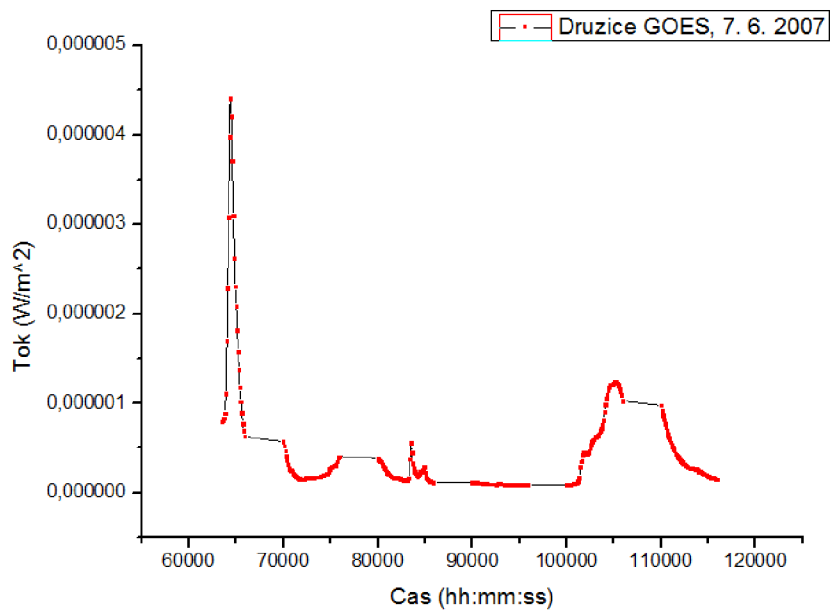
Obrázek 5.16: Graf znázorňující vývoj čar $H\alpha$ a CaII K v průběhu erupce.



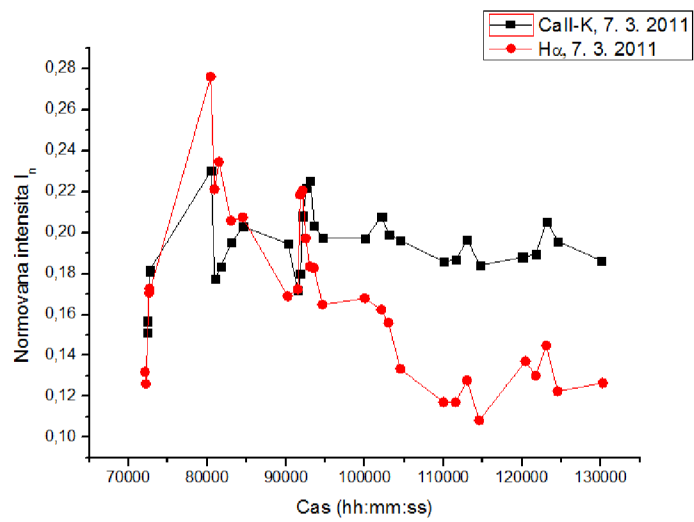
Obrázek 5.17: Data z družice GOES ze dne 9.6.2003.



Obrázek 5.18: Graf znázorňující vývoj čar H α a CaII K v průběhu erupce.



Obrázek 5.19: Data z družice GOES ze dne 7.6.2007.



Obrázek 5.20: Graf znázorňující vývoj čar H α a CaII K v průběhu erupce.

Kapitola 6

Hvězdné erupce

6.1 Základní charakteristiky hvězdných erupcí

Od dob, kdy se na Slunci začala pozorovat jeho aktivita, vyvstala myšlenka, zda-li i na ostatních hvězdách probíhají podobné děje. Po uvědomění si spojitosti mezi aktivitou a magnetickým polem se erupce začaly vyhledávat na hvězdách se silným magnetickým polem. Bohužel zachycení tohoto jevu není až tak jednoduchou záležitostí jako u slunečních pozorování. I když nejsme schopni u Slunce dopředu odhadnout erupční děje, dokážeme alespoň odhadnout zvýšenou aktivitu v určitém období. U ostatních hvězd se podobná periodičnost teprve zkoumá. Jelikož jsou ostatní hvězdy pro detailnější zachycení erupcí příliš vzdálené, máme jen nepřímý důkaz, že hvězdné erupce jsou energetické procesy v magnetickém poli. Vycházíme tak z předpokladu, že Slunce a erupční hvězdy typu dKe a dMe jsou si v mnoha ohledech podobné.

První vzplanutí bylo zaznamenáno v roce 1924 u hvězdy V 1396 Cygni. Lépe známý záznam však pochází až z roku 1948 od hvězdy UV Ceti. Podrobnější výzkum na přelomu 50-tých a 60-tých let dal vznik dvěma skupinám erupčních hvězd:

UV Ceti

Teplota erupční koróny byla stanovena na hodnotu $T = 1 - 5 \cdot 10^7$ K. Erupční procesy těchto hvězd dosahují výkonu $10^{32} - 10^{34}$ erg a jejich délka trvání může dosahovat několik minut až hodin.

RS CVn (Canum Venaticorum variables)

Těsné dvojhvězdy spektrální třídy F - G na hlavní posloupnosti, chladní podobně pozdního typu G nebo K. U těchto hvězd se energie uvolněná během erupce pohybuje v rozmezí $10^{34} - 10^{36}$ erg a děj může trvat až

několik hodin (byla zaznamenána erupce trvající až 7 hodin). Teplota erupční koróny dosahuje $T = 10^8$ K.

Mezi eruptivní hvězdy též řadíme mladé obří hvězdy, hvězdy před příchodem na hlavní posloupnost a hvězdy typu T Tauri. Společným symbolem je výrazná magnetická aktivita, která je zdrojem erupcí.

Jako u Slunce předpokládáme magnetické pole, které je formované pomocí vnitřního dynamu. Na povrchu hvězdy se tedy nejspíše vyskytují skvrny, erupce a další projevy aktivity. Magnetické pole zahřívá horní vrstvy atmosféry nad fotosférou, které jsou považovány za zdroj emisních čar v optické, ultrafialové a rentgenové oblasti. Právě v těchto oblastech dochází k emisi a zjasnění hvězdy o několik magnitud (ve filtru U až o 6 magnitud) během pár sekund. Spektra hvězd pořízená na širší škále vlnových délek ukazují zcela odlišné chování erupce v různých oblastech spektra (Ostel a kol. 2005). Změny ve spektru sice dokážeme zaznamenat, ale původ změn kontinua a čar jsou stále nevysvětlitelnou záležitostí. Trpasličí třídy dM produkují emisi napříč elektromagnetickým spektrem od měkkého rentgenového záření (1 - 10 keV¹) až po radiový obor (1 - 10 GHz). Mladší typy dM0 - dM3 produkují erupce o vyšší energii, které jsou méně časté. U typů dM4 se mohou vyskytnout erupce několikrát za noc o malé a střední velikosti. Velké erupce se vyskytují jen párkrát do roka.

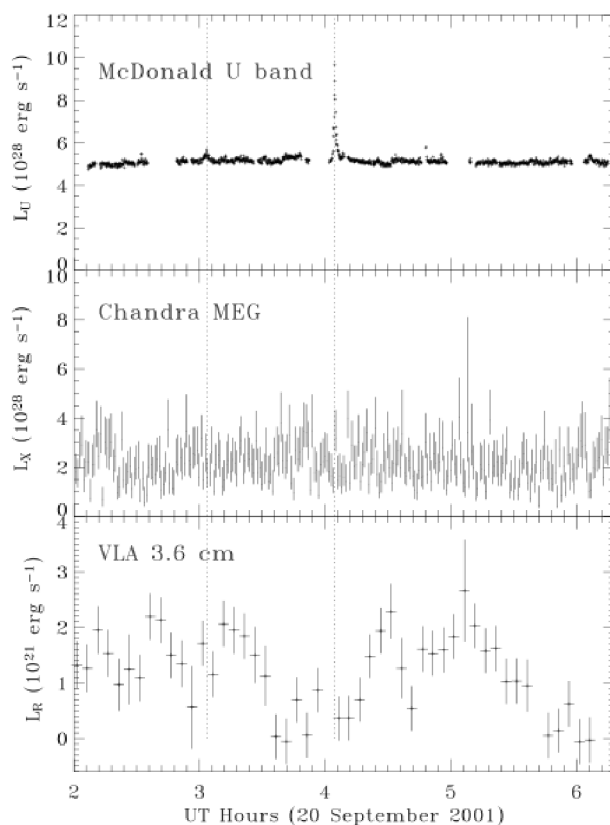
Hvězdné erupce produkují výrazné emisní čáry vodíku Balmerovy série, čáry CaII H a K, HeI, HeII, infračervený triplet CaII, jednou i dvakrát ionizované kovy. V ultrafialové oblasti to jsou čáry CIV a NV, které se během erupce zesílí, což znamená zvýšené množství materiálu v této oblasti.

Eruptivní křivka se skládá z impulzní a graduální fáze jako u slunečních erupcí. Impulzní fáze, která trvá několik minut, je následována fází graduální s pozvolným průběhem až několika hodin. Čím je erupce energetičtější, tím déle jednotlivé části trvají. Vodíkové čáry při malých erupcích dosahují v první fázi 4 % celkové energie a u fáze graduální je to 17 %. U velkých erupcí je to 30 - 50 %.

Profily čar, získané během erupcí, nejsou ještě zcela vysvětlené. Čáry vodíku Balmerovy série se dokáží rozšířit až o 30 Å, především při impulzní fázi. Tento jev se připisuje několika faktorům: Starkův jev, turbulence nebo hvězdný vítr. Bohužel současné modely zahrnující tyto vlivy na profily čar se neshodují s pozorováním.

Jako jedno z možných vysvětlení aktivity hvězd se v posledních letech mluví o vlivu okolních planet. Přirovnání se nabízí přímo ve Slunenční soustavě. Naše největší planeta Jupiter má oběžnou dobu kolem Slunce rovnu

¹Jednotka elektronvolt eV = 1,602176565.10⁻¹⁹ J.

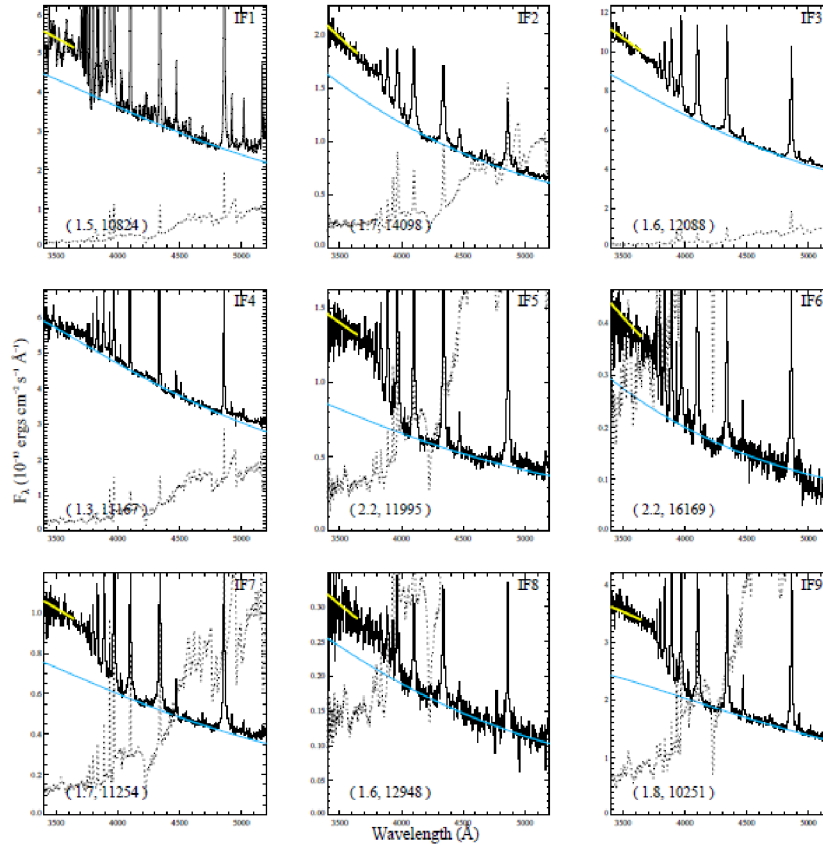


Obrázek 6.1: Erupce na hvězdě EV Lac ze dne 20. 9. 2001. Měření probíhalo od 8:00 - 12:00 UT. Na prvním grafu je záznam optické světlené křivky s erupcí. Na druhém snímku, v radiové oblasti, nejsou zaznamenány žádné změny. Na poslední křivce jsou data v rentgenové oblasti.

11,86 let. Tato číselná hodnota se shoduje se základním cyklem sluneční aktivity, který trvá více než 11 let. Proto se hodně diskutuje o gravitační síle a slapovém působení planet na Slunce, které by mohly zapříčinit sluneční aktivitu. U hvězd podobných Slunci, jako je spektrální třída M a K, jsou zaznamenány exoplanety, tzv. plynní obři, jejichž velikost je rovna i několika poloměrům Jupiteru. Důležitým faktorem je jejich vzdálenost od mateřské hvězdy, která je u většiny menší než 1 AU^2 . Plynný obr tak působí na hvězdu prostřednictvím své magnetosféry na velmi malou vzdálenost. Díky tomuto vlivu se u hvězd předpokládají tzv. super - erupce, které se prozatím nevyskytly na našem Slunci. Jedna taková super - erupce byla zaznamenána 7.9.2011 u hvězdy HD189733, která je spektrální třídy K1. Okolo této hvězdy se ve vzdálenosti 5-ti milionů kilometrů nachází exoplaneta o 14 % větší než

²Astronomická jednotka $1 \text{ AU} = 149\,597\,870\,700 \text{ m}$. Střední vzdálenost Země - Slunce.

Jupiter. Zmiňovaný den proběhla na hvězdě erupce, která měla 3 milion krát větší tok záření v rentgenové oblasti, než erupce na Slunci třídy X. Erupce byla nasměrována přímo na exoplanetu a dokázala z její atmosféry odnést 1000 tun materiálu za sekundu.

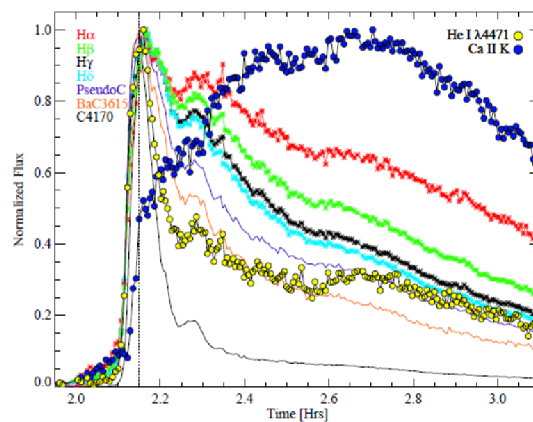


Obrázek 6.2: Ukázky spekter v průběhu několika napozorovaných erupcí. Černá čára je spektrum při maximální emisi kontinua. Přerušovaný graf značí klidné spektrum. Světle modrá barva je fitování Planckovou funkcí. Zdroj: [32].

6.2 Hvězdy spektrálního typu G a M

V dnešní době lze sledovat Slunce díky družicím takřka nepřetržitě. Vědci se neustále snaží co nejlépe zaznamenávat a prozkoumávat sluneční aktivitu.

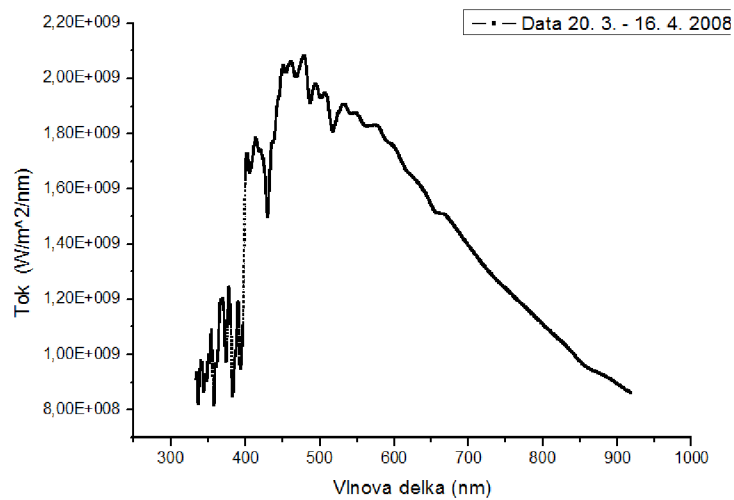
I přes veškerou snahu zcela ještě nechápeme některé děje probíhající na naší nejbližší hvězdě. Důležité je také sledovat Slunce jako jeden celek, abychom jeho chování mohli porovnávat s ostatními hvězdami ve vesmíru a vylepšit tak dnešní představy o hvězdném vývoji. Výsledky měření slunečních erupcí v kapitole 5.3.2 ukazují na stejný průběh čar $H\alpha$ a $CaII K$ v čase. Jejich impulzní a graduální fáze dosahují ve stejném okamžiku podobných hodnot. Tato pozorování prováděná na Slunci však nejsou stejná v porovnání s ostatními hvězdami, například spektrálního typu dM. U těchto odlišných typů hvězd dochází ke značnému zpoždění čáry $CaII K$ oproti čáře $H\alpha$ (A. Kowalski 2012). Jelikož se vědci příliš nezabývají podobným druhem pozorování, není prozatím dostatek vhodného materiálu pro porovnání a vysvětlení této problematiky.



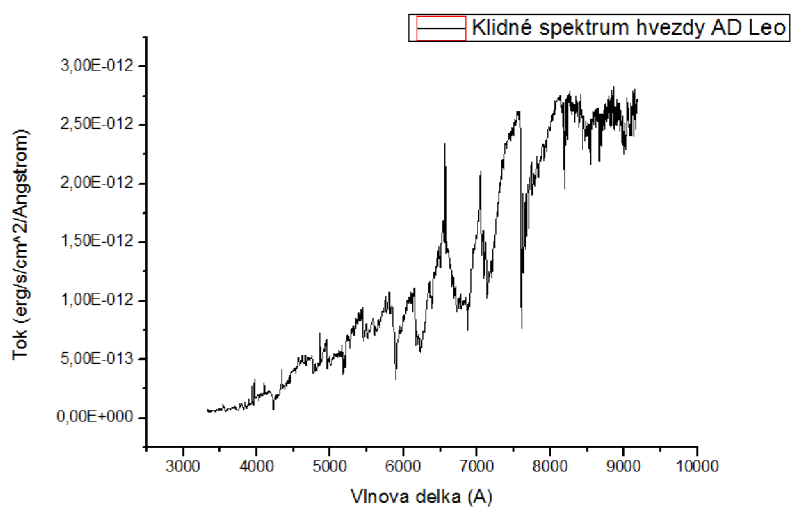
Obrázek 6.3: Vývoj jednotlivých čar v průběhu erupce na hvězdě spektrální třídy M, AD Leo. Zdroj: [32].

Zajímavé je též zkoumat spektrální čáry těchto vybraných typů hvězd. Na Slunci se pozoruje čára $H\alpha$ (6565 \AA) v absorpci, viz. obrázek 6.4. Tato data byla původně poskytnuta z interaktivního datového centra LASP. Centrum poskytuje širokou škálu solárních dat, včetně denních měření a referenčního spektra. Dostupné vlnové délky jsou zde v rozsahu $0,1 \text{ nm} - 2400 \text{ nm}$. Záznam byl naměřen v období 20.3. - 16. 4. 2008 a ke zpracování byla vybrána oblast $300 - 1000 \text{ nm}$. Čáru $H\alpha$ tu vidíme v absorpci. Naopak je tomu u hvězd spektrálního typu dM. Tito zástupci patří k chladnějším hvězdám s T_{eff} kolem 3000 K a jejich počet v Galaxii se odhaduje až na 75% . Jejich spektrum je poněkud odlišné od spektra našeho Slunce. Spektrální čára $H\alpha$ je zde v emisi, viz. obrázek 6.5.

Zobrazená data byla naměřena na APO (Apache Point Observatory) na $3,5 \text{ m}$ dalekohledu. Poskytl je A. Kowalski.



Obrázek 6.4: Spektrum Slunce jako hvězdy v rozmezí 300 - 1000 nm.



Obrázek 6.5: Klidné spektrum eruptivní hvězdy spektrální třídy M, AD Leo.

6.3 Přehled eruptivních hvězd

Od počátku pozorování hvězdných erupcí v 50-tých letech se seznam eruptivních hvězd neustále rozrůstá, především vlivem nových pozorovacích přístrojů.

	EV Lac	YZ CMi	AD Leo
Souhvězdí	Ještěrka	Malý pes	Lev
Viditelnost v roce	duben - leden	listopad - březen	prosinec - červen
Spektrální typ	M4.5Ve	M4.5Ve	M4.5Ve
Souřadnice Ra (2000)	22 46 49.7317	07 44 40.17401	10 19 36.277
Souřadnice De (2000)	+44 20 02.3569	+03 33 08.8350	+19 52 12.06
Vzdálenost (pc)	5,1	5,96	4,9
U (mag)	13,000	13,761	12,000
B (mag)	11,450	12,831	10,970
V (mag)	10,090	11,225	9,430
R (mag)	9,500	9,950	8,600

Tabulka 6.1: Tabulka s parametry eruptivních hvězd.

V posledních letech přispívá do tohoto seznamu i družice Kepler, která byla především sestrojena pro studium exoplanet. Sleduje široké hvězdné pozadí a zaznamenává změnu jasností hvězd v čase. Občas se podaří zachytit i eruptivní děje, které jsou u hvězd jiného spektrálního typu než M a K. V tabulkách 6.1, 6.2, 6.3 je uveden seznam nejběžněji sledovaných eruptivních hvězd, který byl poskytnut A. Kowalskim. Celkový počet je však mnohem větší. V literatuře věnující se této problematice se můžeme setkat i s jinými zástupci: UV Cet (M6e), PZ Mon (K2e), DK Leo (K7e), DT Vir (M0,5e), EQ Vir (K5e), Prox Cen (M5,5e), VB 8 (M7e), BY Dra (K7e), VB 10 (M8e), AU Mic (M0e), CM Dra (M4,5e), AT Mic (M4,5e), 61 Cyg AB (K5e, K7e) a dalšími. Spektroskopické pozorování těchto hvězd probíhá i v pozemních observatořích po celém světě. Vyhlašují se pozorovací kampaně na zachycení erupcí pomocí různých velikých přístrojů. Pozorovací střediska jsou například: Byurakan Observatory (2,6 m), National Astronomical Observatory of the Bulgarian Academy of Sciences (2 m), Apache Point Observatory - APO (3,5 m), El Roque de los Muchachos Observatory (2,5 m), Mc Donald Observatory Spectroscopy (2,7 m), Kitt Peak (1,5 m MacMath).

	YY Gem	V1054 Oph	V711 Tau
Souhvězdí	Blíženec	Hadonoš	Býk
Viditelnost v roce	září - květen	duben - srpen	červenec - duben
Spektrální typ	dM1e + dM1e	dM3e + dM3e	K2
Souřadnice Ra (2000)	07 34 37,584	16 55 28,8	03 36 47,3
Souřadnice De (2000)	+31 52 11,05	- 08 20 10,8	+00 35 15,9
Vzdálenost (pc)		6,20	
U (mag)		11, 647	
B (mag)	10,560	10,593	6,800
V (mag)	9,830	9,023	5,905
R (mag)	8,700	7,937	5,400

Tabulka 6.2: Tabulka s parametry eruptivních hvězd. Hvězda V1054 Oph má také označení GJ644 AB. Hvězdy v Hadonoši a Býku jsou dvojsložkové.

	FL Vir	EQ Peg AB	V733 Tau
Souhvězdí	Panna	Pegas	Býk
Viditelnost v roce	duben - srpen	červen - prosinec	září - březen
Spektrální typ	dM5e + dM7e	dM3,5e + dM4,5e	K3
Souřadnice Ra (2000)	12 33 17,4	23 31 52,2	04 14 12.92168
Souřadnice De (2000)	+09 01 15,8	+19 56 14,1	+28 12 12.2960
U (mag)	15,397	12,737	13,160
B (mag)	14,313	11,749	11,800
V (mag)	12,467	10,165	10,700
R (mag)	10,937	8,982	7,490

Tabulka 6.3: Tabulka s parametry eruptivních hvězd. Hvězda FL Vir má též označení Wolf424 AB. U EQ Peg AB se můžeme setkat také s názvem IDS 23267+1923 A. V733 Tau nese označení HD 283447. První dvě hvězdy této tabulky jsou dvojhvězdami, poslední hvězda v Býku je dokonce čtyřsložková.

6.4 Červení trpaslíci třídy dM

Červení trpaslíci patří k nejpočetnějším hvězdám ve vesmíru, jejich počet se odhaduje až na 75 procent v Galaxii. V okruhu 10 světelných let³ od našeho Slunce najdeme až 7 zástupců. Patří k nim i naše nejbližší hvězda Proxima Centauri nebo hvězda s největším vlastním pohybem – Barnardova hvězda.

³Světelný rok $ly = 9,46 \cdot 10^{15}$ m.

Tyto hvězdy patří k malým a poměrně chladným. Efektivní teplota má pro spektrální typ M0 hodnotu 3900 K a pro M8 dosahuje 2600 K. Poloměr je v rozmezí $0,1 - 0,7R_{\odot}$ ⁴ a hmotnost $M \leq 0,8M_{\odot}$ ⁵. V centru je plně ionizovaný vodík a hélium. Materiál zde má hustotu $\rho = (10^3 - 10^6) \text{ kg.m}^{-3}$ a teplotu $T_C = (10^6 - 10^7) \text{ K}$. Ve vnější vrstvě je zastoupen molekulární vodík a hélium. Ve spektru se vyskytují molekuly TiO, VO, absorpční čáry CO a rotačně - vibrační pásy H₂O. Vlivem nízké teploty je i menší zářivý výkon těchto hvězd. Porovnáme-li je se zářivým výkonem Slunce, dosahují hodnoty jen 1/10 000.

Uvnitř hvězdy dochází k přeměně jádra vodíku na jádro hélia pomocí proton - protonového děje. Tato reakce zajišťuje pomalé hoření vodíku v jádru. Protohvězdy typu dM mají dlouhou odhadovanou délku života desítky miliard až bilionů let. Při hmotnostech $M < 0,25M_{\odot}$ je trpaslík plně konvektivní v podstatné části svého vývoje, odhadovaná doba je $5,74 \cdot 10^{12}$ roků. V centru hvězdy se nikdy nezažehne jaderná fúze hélia, nedojde tedy k přeměně na červeného obra. Bude docházet k postupnému smršťování a zahřívání, dokud se nespálí všechno vodík. V dnešní době nepozorujeme toto stádium vývoje, jelikož ještě neuběhl dostatečně dlouhý čas od vzniku vesmíru, aby červený trpaslík opustil hlavní posloupnost.

V posledních letech se výzkum červených trpaslíků dostal do popředí zájmu, především kvůli studiu exoplanet. Vědci na základě dat pořízených družicí Kepler odhadují, že až 6 % planet zemského typu a poloměru $0,5 - 1,4R_Z$ ⁶ obíhá právě kolem červených trpaslíků.

⁴Poloměr Slunce $R_{\odot} = 6,960 \cdot 10^8 \text{ m}$.

⁵Hmotnost Slunce $M_{\odot} = 1,989 \cdot 10^{30} \text{ kg}$.

⁶Poloměr Země $R_Z = 6378 \text{ km}$.

Kapitola 7

Metodika pozorování

7.1 Spektroskopie

7.1.1 Ondřejov

Za dob velkých badatelů, jako byli Tycho Brahe, Johannes Kepler nebo Tadeáš Hájek z Hájku, se město Praha stalo světovým astronomickým centrem. Avšak po velkém rozkvětu v této oblasti začala třicetiletá válka (1618 - 1648) a svět se ocitl v úpadku. Po válce, kdy všichni znovu nabírali síly, byla nutná změna. A tu si kupodivu nejvíce uvědomovali kněží. Roku 1750 páter Stepling zakládá při jezuitské koleji v Klementinu pražskou hvězdárnu. Bohužel později při rozrůstání města se podmínky pro pozorování zhoršovaly a umístění hvězdárny bylo zcela nevhodné. Navíc od konce 19. století byla tato instituce podřízena německé univerzitě. Proto díky profesorovi Seydlerovi byla v Praze na Letné zřízena nová česká univerzitní hvězdárna, která byla později přemístěna na Smíchov do Švédské ulice. Tam pak byla po dlouhá léta i katedra astronomie pražské Karlovy univerzity.

Dalšími obdivovateli astronomie byli bratři Josef a Jan Fričovi. Původně studovali paleontologii a chemii, ale srdce je více táhlo k astronomii, proto si také založili dílnu na výrobu astronomických přístrojů. Hodně je lákala i myšlenka na vlastní observatoř. Bohužel tyto plány byly poznamenány Janovou smrtí, kdy po zápalu plic ve 33 letech umírá. Josef, nyní už sám, hledá vhodné místo bez městských vlivů v okolí Prahy, kde by se dalo pozorovat. Volba padla na Ondřejov nedaleko Sázavy, odkud pocházela Fričova matka. Dne 21. ledna 1898 se Josef Frič stává majitelem zalesněného vrchu Manda, který leží půl kilometru na severozápad od Ondřejova. Jelikož byla koupě ur-

čena pro vědecké účely, zaplatil za pozemek o výměře 8 jiter¹ částku 900 zlatých². Zde založenou hvězdárnu nazval na počest svého bratra Žalovem. Nové observatoři pak profesor Šafařík odkázal bohatou odbornou knihovnu a astronomické přístroje, včetně 8 "Clarkova refraktoru, patřícího tehdy k největším dalekohledům v Čechách. Jak čas plynul, rozrůstalo se i technické zázemí. Na pozemku se postavila řada radioteleskopů, malých dalekohledů i největší dalekohled v České republice. Vybuďovalo se tu vhodné zázemí pro obdivovatele vědy z celého světa, jako byli bratři Fričovi. V současnosti zde existuje observatoř Astronomického ústavu AV ČR.

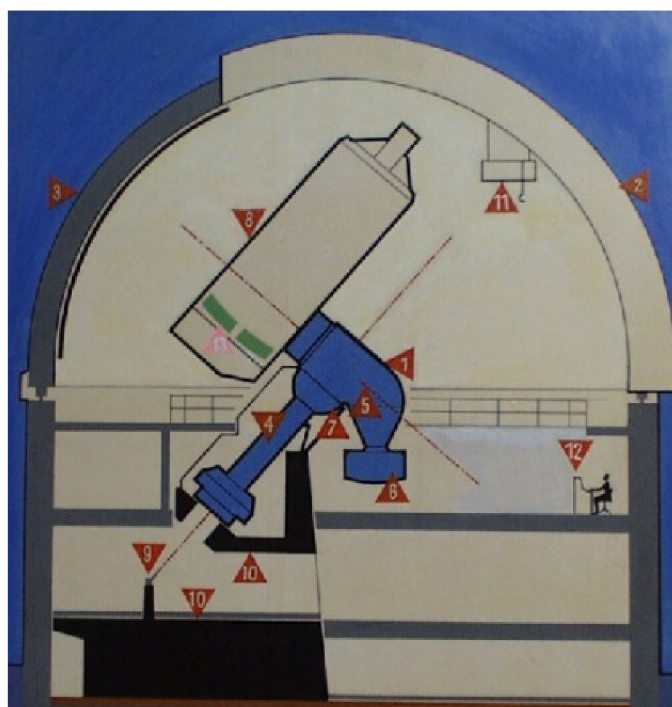
7.1.2 Perkův dalekohled

Dvoumetrový dalekohled v Ondřejově je největším dalekohledem (astronomickým přístrojem svého druhu) v České republice. Jeho výroba začala nejdříve zhotovením kopule roku 1964 v Kolíně. Její vnější průměr má velikost 21,11 m, váží 195 tun a velikost štěrbin, která umožňuje pozorování, je 5 m.

Stavba samotného přístroje byla zahájena firmou Carl Zeiss v Jeně, v Německu roku 1966. Hlavní zrcadlo má tvar rotačního paraboloidu. Bylo zhotoveno ze skla Tempax (směs křemíku a oxidu bóru) a jeho reflexivní vrstva z hliníku. Zrcadlo váží 2,34 tuny, je silné 30 cm a jeho průměr činí 2 m. Montáž, která nese celou tíhu dalekohledu, je biaxiálně paralaktická a byla navržena Alfredem Jenschem. Protizávaží dalekohledu má hmotnost 27 tun. Celý pohyb přístroje je umožněn prostřednictvím elektrických motorů. V polární ose se opisuje denní pohyb oblohy, rychlost je 15 stupňů za hodinu a v deklinační ose existují tři rychlosti pohybu: velmi jemná, jemná a hrubá. Po zhotovení všech částí byl dalekohled převezen do Ondřejova. Jeho závěrečná montáž proběhla v únoru 1967 a první světlo přes okulár prošlo 8. března téhož roku. Oficiálně byl teleskop uveden do provozu 23. srpna 1967 během třináctého shromáždění valné hromady Mezinárodní astronomické unie. V průběhu jeho existence docházelo k postupné modernizaci především díky rozvoji nových technologií. V srpnu 2012, po 45-ti letech své služby, byl přístroj pojmenován po Doc. RNDr. Luboši Perkovi DrSc. Drhc. na Perkův dalekohled.

¹jitro byla výměra, kterou zemědělec zoral od jitra do večera, 1 jitro = 3084,83m²

²1 zlatý = 2 koruny



Obrázek 7.1: Schéma dvoumetrového dalekohledu: 1. podpůrná montáž, 2. kopule, 3. otvor, 4. polární osa, 5. deklinační osa, 6. protizávaží, 7. hydraulické ložisko, 8. tubus, 9. coudé ohnisko, 10. sloup, 11. jeřáb, 12. kontrolní místnost, 13. primární zrcadlo. Zdroj: [36].

7.1.3 Coudé spektrograf

Dalekohled je vybaven třemi ohnisky: primární, Cassegrain a coudé. V současné době se využívá pouze ohnisko coudé, které je umístěno v přízemí budovy dalekohledu. Světelný paprsek je do něj přiváděn přes dutou hodinovou osu pomocí odrazů od zrcadel. Coudé místnost je chráněna před změnami teplot a dalšími nepříznivými vlivy, které by zhoršovaly pozorování, pomocí oddělovací skleněné desky. Paprsek dále směřuje k zrcadlu, které jej pošle do spektrografu nebo na flat-field lampu. V cestě následuje hranol, jenž umožní paprsku pokračovat dále nebo do okuláru dalekohledu. Okulár slouží k navádění, aby se pozorovaný objekt udržel uprostřed snímaného pole. Světlo se pak odráží na dichroických zrcadlech. Hlavní výhodou dichroických zrcadel je schopnost odrážet a propouštět světlo v závislosti na vlnové délce. Umožňují pozorovat vybranou oblast spektra bez nežádoucího vlivu okolních oblastí. Jsou zde 4 typy těchto zrcadel: modrý, infračervený, hliníkový a červený. Paprsek pak pokračuje na hranol, odkud je veden ke šterbině. Zároveň je posí-

lán do ThAr lampy. Před štěrbinou se nachází karusel s šesti filtry HK1-HK6, které redukují světlo. Od štěrbin se pak paprsek dostává na polopropustné zrcadlo, které 5 % světla pošle na expozimetr a zbylých 95 % pokračuje dále na kolimátor, který z rozbíhavého svazku utvoří svazek rovnoběžný. Před kolimátorem se nachází sada 5-ti barevných filtrů.

Číslo	Označení	Typ	Rozsah [Å]
1	otvor		
2	červený	RG2	6350 - 7910
3	červený	OG4	4800 - 9000
4	dethermal	C997	<6000
5	modrý	BG39	3500 - 5500

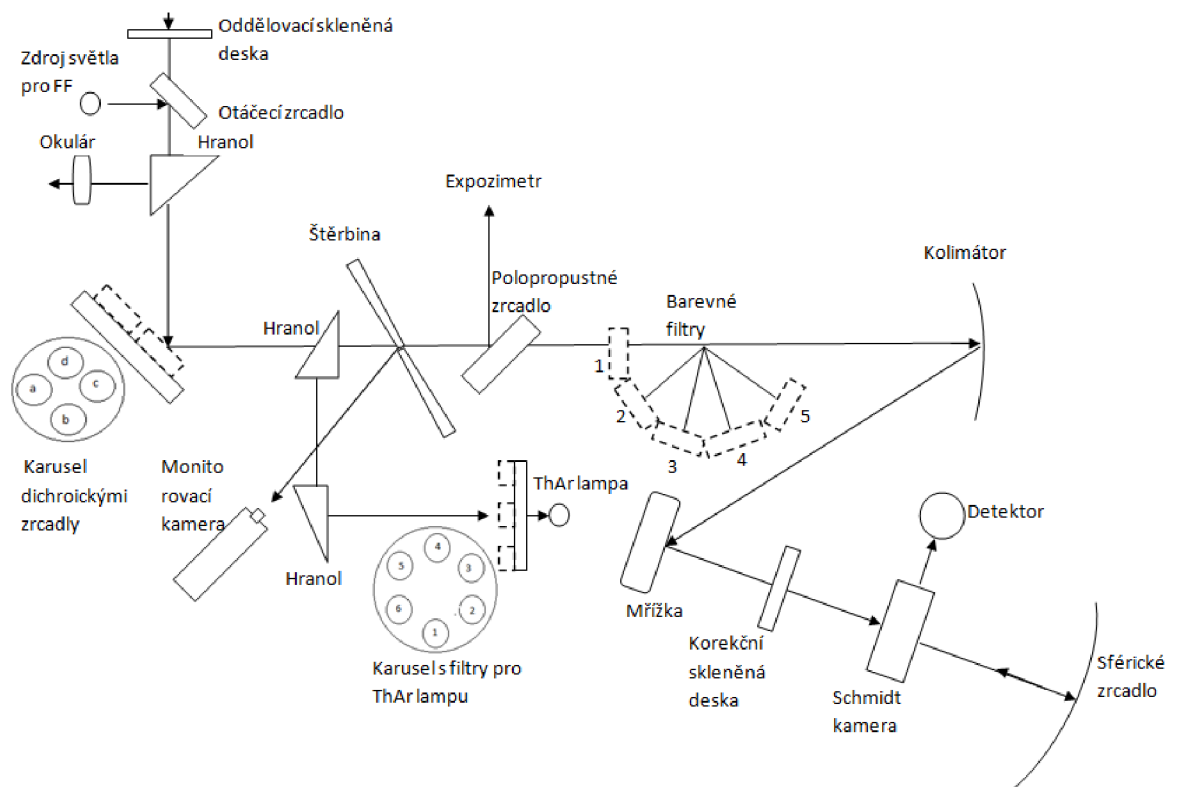
Tabulka 7.1: Seznam barevných filtrů.

Od kolimátoru světelný paprsek směřuje na mřížku velikosti 154x206 mm, která má 833,77 vrypů na milimetr. Nakonec se paprsek odrazí od sférického zrcadla a je nasměrován do Schmidt kamery na CCD SITE čip o velikosti 2000x800 pixelů a šířce štěrbin 0,2 mm. Využit se dají tři kamery Schmidovy: 700 mm, 400 mm a 1400 mm. V dnešní době se používá kamera 700 mm. Takto zkonstruovaný spektrograf umožní zobrazit spektrum v rozsahu 40 nm. Hodnota se liší v závislosti na modrém a červeném oboru spektra, ve kterém pozorujeme.

7.1.4 Ondřejovský ešletový spektrograf OES

Přístroj OES se nachází v místnosti naproti spektrografu coudé, symetricky položen vůči ohnisku coudé. Toto umístění je vhodné pro překlápění rovinného zrcadla, díky čemuž můžeme v průběhu noci používat oba typy spektrografů. Výhodou ešletových spektrografů je zobrazení velmi rozsáhlých úseků spektra.

Světlo přichází z coudé ohniska na šterbinu. Odráží se na kolimátoru, který má tvar sférického zrcadla. Průměr kolimovaného svazku je 150 mm. Paprsek pak dopadá na mřížku o velikosti 154x408 mm s počtem 54,5 vrypů na milimetr. Mřížka má sklon 21 stupňů od vodorovné roviny. Ve spektrografu se pak nachází parabolické zrcadlo s průměrem 450 mm. Paprsek se odráží od rovinného zrcadla, který má úhel sklonu 45 stupňů a plochu 50x260 mm. V cestě pak následuje druhý kolimátor, parabolické zrcadlo o průměru 300 mm. To odráží paprsek na hranol, který od sebe oddělí jednotlivé řády a dokáže je



Obrázek 7.2: Schéma coudé spektrografu.

naskládat nad sebe. Paprsek pak míří do kamery Canon a na CCD čip o rozměru 2000x800 pixelů. Rozměr jednoho pixelu je 15 mikrometrů. Bohužel, v současnosti se používá pouze výše zmíněný spektrograf coudé.

7.1.5 Redukce dat

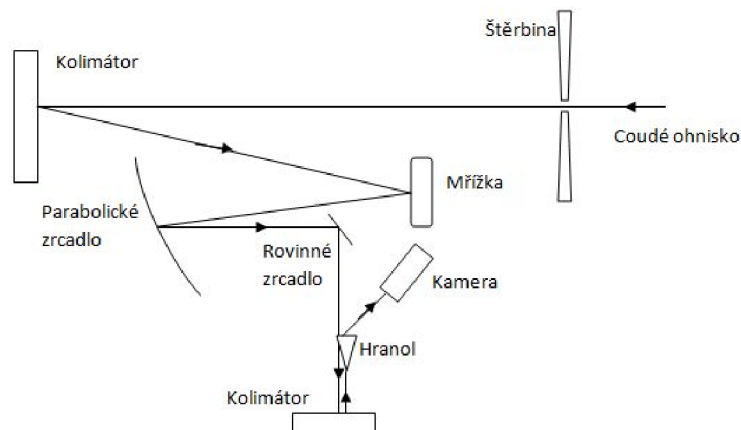
Redukce dat je prováděna pomocí programu IRAF. Skládá se z několika částí:

Flat fielding

Plošné osvětlení detektoru. Slouží k určení účinnosti jednotlivých pixelů na CCD. V současnosti se nevyrábí čipy, které by měly u všech pixelů stejnou účinnost. K vyrovnání této odlišnosti se do detektorů pustí bílé světlo žárovky. Toto pořizované spektrum, které je ovlivněno vlastnostmi přístroje, je pak odečteno od snímků.

Temný snímek

I přes chlazení zařízení v průběhu celé expozice dochází k postunému



Obrázek 7.3: Schéma ešletového spektrografu v Ondřejově.

zahřívání přístroje. Na temném pozadí se pak objevuje šum. Proto se pořizují temné snímky, při jejichž expozici se uzavře závěrka. Expoziční doba těchto snímků je stejná jako doba pozorovaného spektra. Snímek se též označuje jako dark frame.

Bias

Temný snímek se po zpracování převádí na snímek Bias. Úprava spočívá v tom, že ke zjištěnému šumu se přičte určitá (nevelká) konstantní hodnota náboje. Tím se dosáhne toho, že žádný náhodně generovaný náboj v pixelu nebude mít zápornou hodnotu. Takto určený bias se pak od snímku flat fieldu a hvězdy odečte, neboť představuje náboje navíc.

Srovnávací spektrum

Slouží ke kalibraci na vlnové délky. Srovnávací spektra mají velké množství úzkých, dobře definovaných čar. Jejich laboratorní vlnová délka je dobře známa. U coudé spektrografu se pro srovnání používá Thorium - Argonová lampa. Hvězdné spektrum lze pak dobře okalibrovat pomocí dvou srovnávacích spekter, pořízených před expozicí a po ní. Tato dvě spektra se zprůměrují a určí se z nich disperzní křivka, která každému pixelu přiřadí vlnovou délku.

Heliocentrická korekce

Je eliminování vlivu pohybu pozorovatele na povrchu Země vůči pozorovanému objektu na obloze. Korekce udává rychlost, jakou se pozorovatel blíží k hvězdě nebo se od ní vzdaluje v důsledku svého vlastního pohybu. Pokud eliminujeme tento efekt, dostaneme hodnotu rychlosti, jakou se k nám blíží nebo se od nás vzdaluje samotná hvězda.

Další průběžné korekce

Ořezání snímků, navázání řádů atd.

7.1.6 Spektroskopická pozorování

Data v této diplomové práci byla naměřena na dvoumetrovém Perkově dalekohledu v Ondřejově. Při získávání spekter byl použit spektrograf coudé a 700 mm kamera. Pozorovány byly eruptivní hvězdy uvedené v kapitole 6.3, především hvězda AD Leo, V 1054 Oph a EV Lac. Naměřená data byla upravena v programu IRAF. Jednotlivé korekce jsou uvedeny v kapitole 7.1.5.

Jelikož pozorujeme velmi rychlé změny v průběhu erupce na těchto hvězdách, je nutné, aby doba expozice spektra byla co nejmenší časový úsek, abychom mohli co nejlépe pokrýt celý průběh tohoto děje. Zároveň však potřebujeme nasnímat dobré spektrum, abychom získali kvalitní informace. Proto byla zvolena 10-ti minutová délka expozic, především kvůli pozorování v oblasti čáry $H\alpha$. Oblast pokrývala rozmezí 6255 - 6767 Å. V podobném módu, jako byla nasnímána spektra hvězd, byly provedeny i srovnávací snímky a flat field snímky.

Zkušebně bylo též pořízeno několik spekter v oblasti 8200 - 8705 Å, 8080 - 8588 Å, 8390 - 6767 Å. Oblast v okolí Paschenovy hrany vodíku je však hodně poznamenána vlivem zemské atmosféry, vyskytuje se zde mnoho vodních čar. Hledané změny, způsobené erupcí na hvězdě, by byly těžko zjištělné. Pozorování neprobíhalo v kratších vlnových délkách. Vybrané hvězdy jsou spektrální třídy M, jsou to hvězdy červené. Proto by se jejich délka expozice v modré oblasti spektra blížila hodině, což je pro pozorování erupcí nevhodné.

7.2 Fotometrie

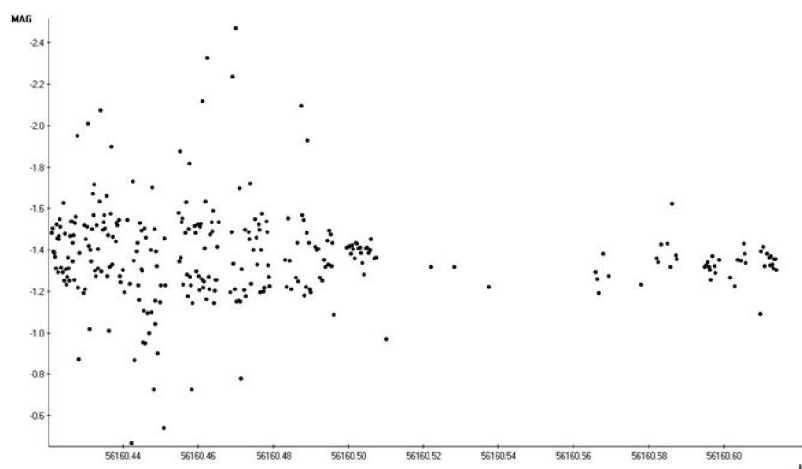
7.2.1 Fotometrická pozorování Uherský Brod, Brno, Ondřejov

Jelikož se nacházíme na dně zemské atmosféry, jsou naše pozorování ovlivněna všemi procesy, které zde probíhají. Při prvním zpracování dat eruptivních hvězd z archivů stelárního oddělení bylo zřejmé, že jednotlivá spektra se mění, obzvláště v čáře $H\alpha$, v emisi. Tyto změny však byly nevýrazné, pokud bychom je porovnali s daty erupcí uvedených například v disertační práci

Adama Kowalského. Proto bylo pozorování spektroskopické podpořeno fotometrií. Hvězda, na které očekáváme erupci, nemusí být neustále snímána spektroskopicky. Stačí pozorovat její světelnou křivku fotometricky a pokud zaznamenáme změny, upozornit pozorovatele u spektrografu. Fotometrie byla prováděna na třech observatořích v České republice. Hvězdárna DK Uherský Brod, observatoř Masarykovy univerzity v Brně a na Astronomickém ústavu v Ondřejově. Data byla zpracována v programu Munipack, který vytvořil Mgr. Filip Hroch, Ph.D. U naměřených dat proběhla korekce o temné snímky, flat field snímky a porovnávací hvězdy byly vybrány podle serveru <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>.

Uherský Brod

Tato hvězdárna je v provozu od roku 1961. Disponuje pětmetrovou kopulí, kde se nachází zrcadlový dalekohled Newton o průměru 500 mm. Na něm je umístěna kamera CCD SBIG ST-2000XM s filtry C, R, G, B. Pozorování zde probíhalo na konci srpna roku 2012 u hvězd EV Lac a V 1054 Oph. Používal se filtr G a expozice v rozmezí 1-10 s.



Obrázek 7.4: Světelná křivka hvězdy EV Lac, pozorována dne 20. 8. 2012. V průběhu celého večera byla na obloze mračna. V první části křivky je délka expozice 1 s, potom následuje pauza způsobená mraky. V pozorování se dále pokračovalo s 10 s expozicí.

Astronomický ústav v Ondřejově

K pozorování byl také poskytnut 65 cm dalekohled Oddělení meziplanetární hmoty vybavený CCD kamerou. Dálkově na něm pozorovala Bc. Lenka Kotková především v období úplňku.

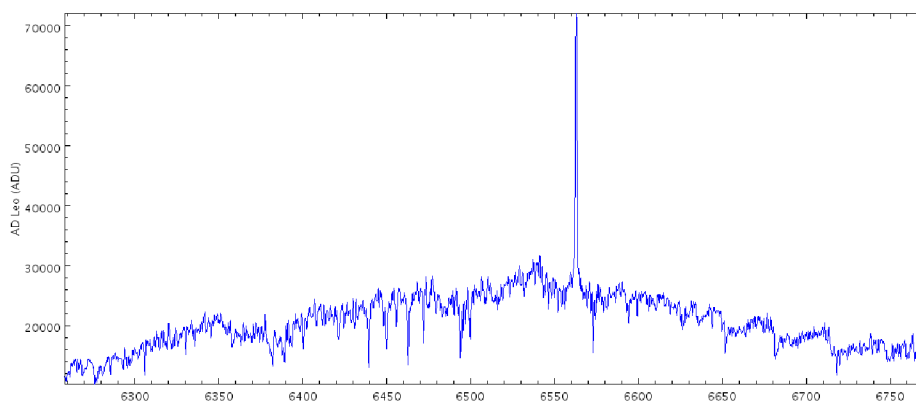
Brno, Masarykova univerzita

Tato observatoř se nachází na Kraví hoře a byla postavena roku 1948. Byla využita na společnou pozorovací kampaň při sledování eruptivní hvězdy V711 Tau, která je spektrální třídy K2. Pozorování probíhalo v noci 26./27. ledna 2013, ve spolupráci s A. Kowalskim, který sledoval hvězdu na Apache Point Observatory v Novém Mexiku (USA). V kosmu byla tato hvězda snímána IR teleskopem Herschel ESA. V Brně se využíval dalekohled Celestron CGE 1400 XLT s průměrem primárního zrcadla 355 mm, který je instalován na budově Hvězdárny a planetária Mikuláše Koperníka. Zvolená hvězda je jasná ($V = 5,905$ mag) a ve svém okolí má málo hvězd, které by byly vhodné pro srovnání. Proto se použil dalekohled s menším průměrem než při předešlých nocích. Snímky byly pořízeny kamerou G2-4000 se Stromgrenovými filtry. Expozice dat byla 1 - 3 s ve filtru y , který je přibližně ekvivalentem Johnsonova filtru V .

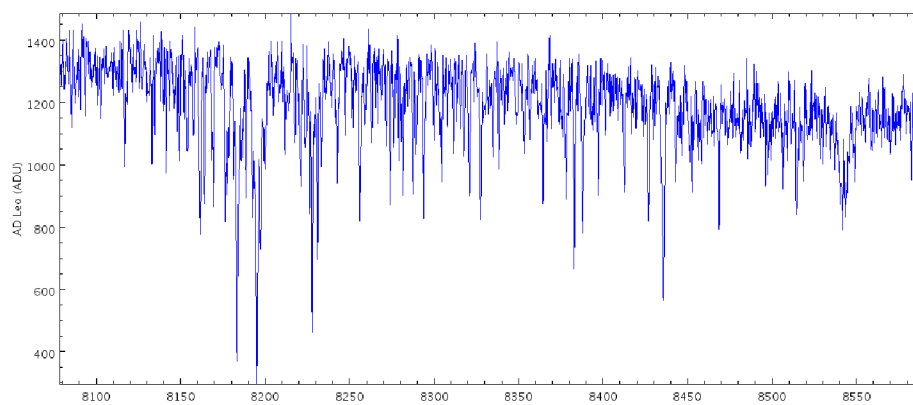
7.3 Výsledky měření

Na následujících grafech jsou uvedena klidná spektra eruptivních hvězd v různých oblastech spektra. Úprava spekter z dvoumetrovém dalekohledu není jednoduchá. Proto jsem se zúčastnila kurzu pod vedením Bc. Šárky Dvořákové, Mgr. Viktora Votruby, Ph.D. a RNDr. Miroslava Šlechtu, Ph.D., kde jsem se naučila redukovat spektra hvězd. Zpracovala jsem spektra hvězdy AD Leo v programu IRAF a později v programu SPLAT - VO. Jeden z upravených snímků můžeme vidět na obr. 7.5. Zbylá data jsou převzata z databáze stelárního oddělení, kde jsou redukována Bc. Lenkou Kotkovou a RNDr. Miroslavem Šlechtou, Ph.D., kvůli přesnějším výsledkům spekter. Na ose x jsou vlnové délky uvedeny v angstromech.

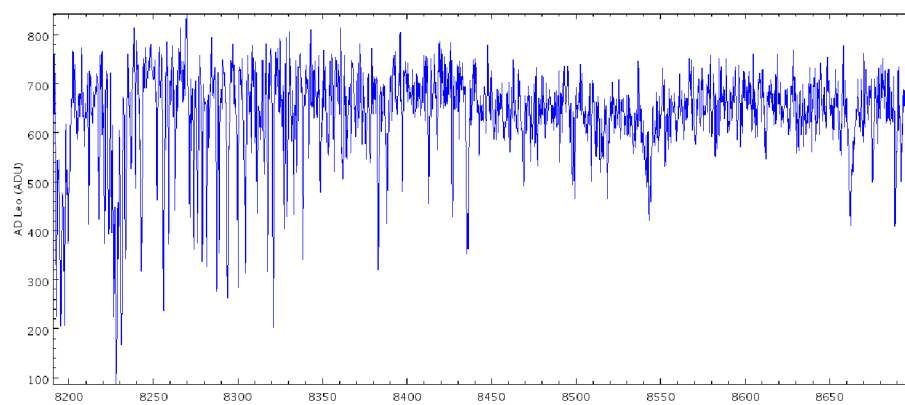
AD Leo



Obrázek 7.5: Klidné spektrum hvězdy AD Leo v oblasti 6253 - 6765 Å.

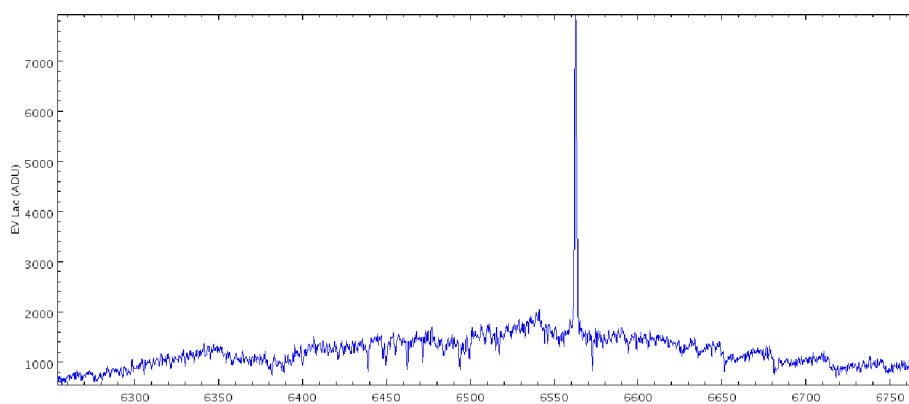


Obrázek 7.6: Klidné spektrum hvězdy AD Leo v oblasti 8080 - 8588 Å.

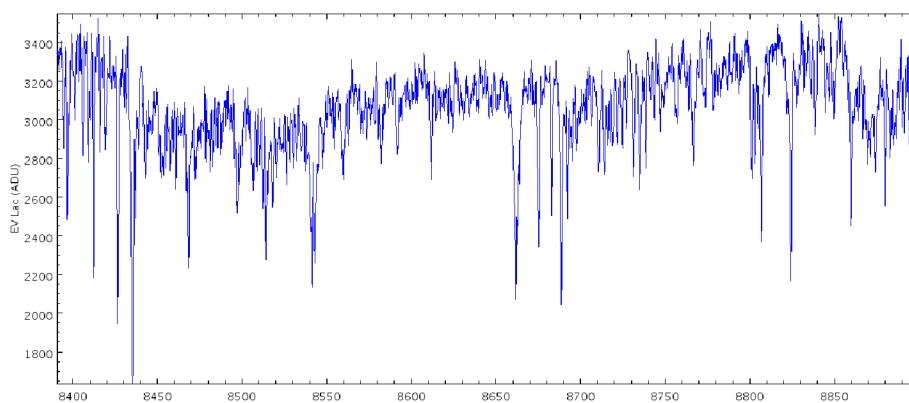


Obrázek 7.7: Klidné spektrum hvězdy AD Leo v oblasti 8200 - 8705 Å.

EV Lac

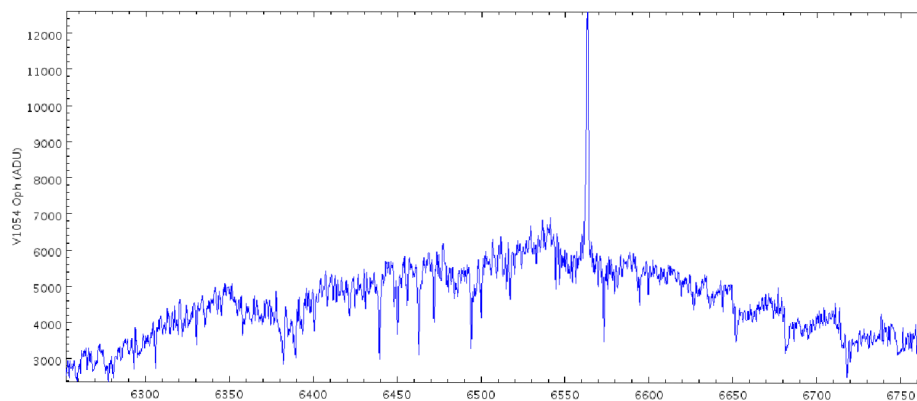


Obrázek 7.8: Klidné spektrum hvězdy EV Lac v oblasti 6255 - 6767 Å.

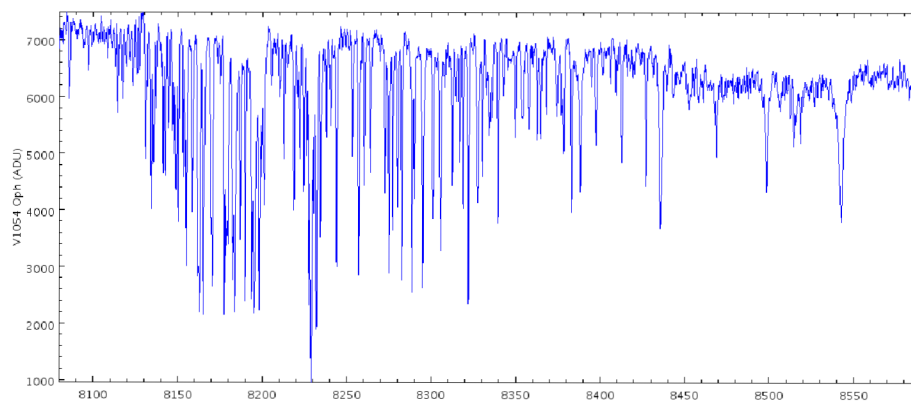


Obrázek 7.9: Klidné spektrum hvězdy EV Lac v oblasti 8390 - 8900 Å.

V1054 Oph



Obrázek 7.10: Klidné spektrum hvězdy V1054 Oph v oblasti 6255 - 6767 Å.



Obrázek 7.11: Klidné spektrum hvězdy V1054 Oph v oblasti 8080 - 8588 Å.

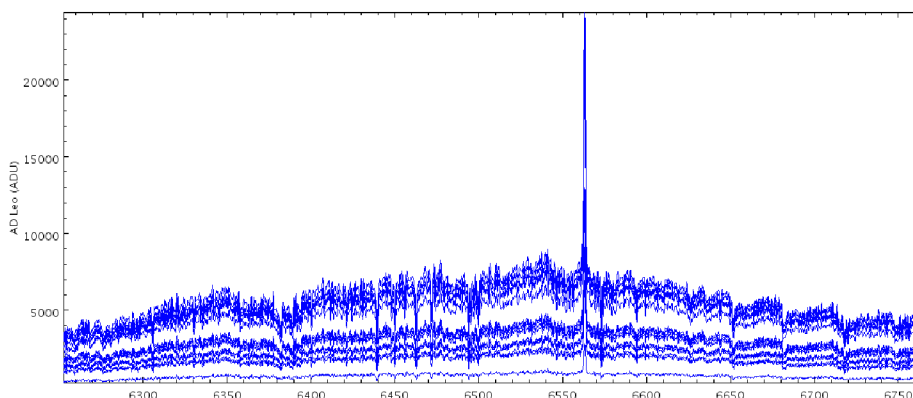
7.4 Erupce na hvězdě AD Leo?

V noci 15.4.2013 se podařilo zachytit zjasnění na hvězdě AD Leo. Proces probíhal přibližně od 21:00 UTC do 23:00 UTC, trval tedy skoro dvě hodiny. V průběhu pozorování a předběžného prozkoumání spektra v okolí čáry $H\alpha$ se nepozorovaly žádné výrazné změny. Bohužel na tuto noc nebyla zajištěna fotometrická kontrola. Teprve až po redukci dat se zde projevila změna emise v čáře $H\alpha$, obr. 7.12.

U eruptivních hvězd typu dM bychom měli spíše pozorovat změny kontinua než profilů spektrálních čar, obr. 7.13. V disertační práci A. Kowalského jsou zaznamenány změny v čarách FeI, FeII i v kontinuu, napříč blízkou ultrafialovou oblastí až po modrou optickou oblast.

Abychom se přesvědčili o změně intenzity čáry $H\alpha$, zintegrovali jsme plochu pod touto křivkou. Dostali jsme integrovanou intenzitu této čáry v čase. Graf na obrázku 7.14 ukazuje změnu intenzity z hodnoty 4,30 - 4,90, což je velmi malá změna. Pokud se tedy podařilo zaznamenat nějakou hvězdnou aktivitu, nejspíše se jednalo o velmi malou erupci. Pro přesnější zpracování těchto údajů v režimu dvoumetrového dalekohledu by bylo zapotřebí napozorovat více těchto dějů, abychom měli větší přehled o chování eruptivních změn. Při zpracování dat v programu IRAF dochází k proložení kontinua jednotkovou hodnotou. Po této standardní úpravě spekter tedy ztrácíme důležité informace o změně kontinua. Návodem, jak upravovat data, by mohl být postup A. Kowalského, kdy od integrální intenzity jednotlivých čar odečteme spektrum klidné hvězdy. Do budoucna by bylo jistě přínosné pozorovat spektrum v širší oblasti vlnových délek, třeba pomocí ešletového spektrografu.

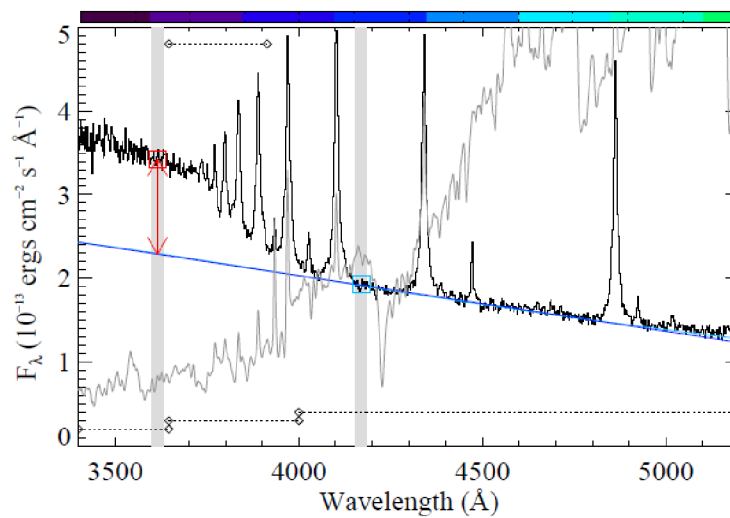
Pro ověření erupce pomocí fotometrie byla poskytnuta data od Roberta Uhláře, obr. 7.15. Ta byla pořízena přístrojem Sonar 135 a kamerou ST - 7 v Itálii. Používal se filtr I. Začátek erupce se v juliánském datu pohybuje kolem hodnoty 2456398,38. Na ose y, označení (V - C), je hodnota rozdílu jasností mezi dvěma naměřenými hvězdami.



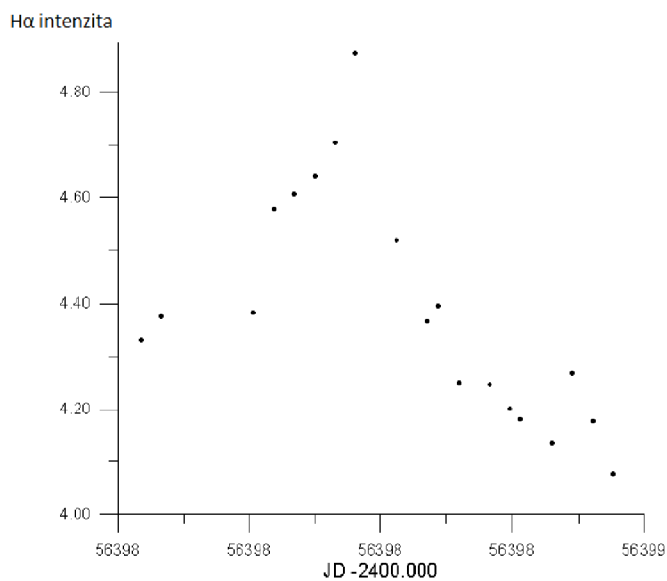
Obrázek 7.12: Spektra hvězdy AD Leo v noci 15.4.2013 v časovém intervalu 19:13 - 23:32 UTC.

7.5 Návrh na robotické pozorování

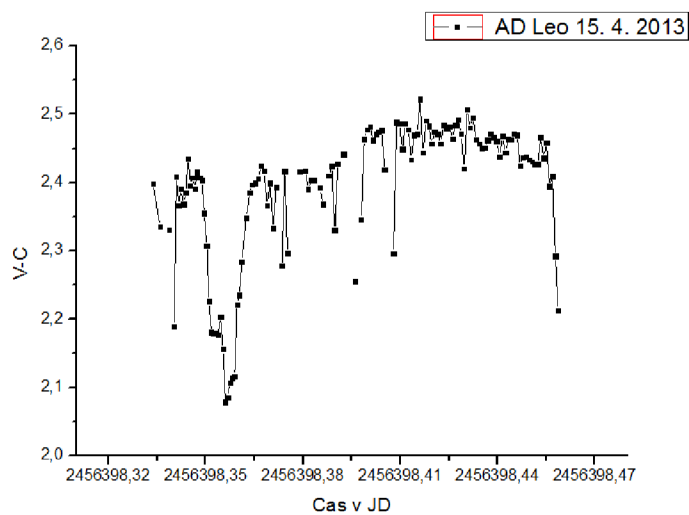
Erupce na Slunci i na ostatních hvězdách jsou děje, které nedokážeme předpovídat. Pro detekci prvních náznaků eruptivních dějů na Slunci používáme především družice v kosmu, například družici GOES. U hvězd probíhá sledování změn jasnosti, které značí erupci, především fotometricky. Pokud se podíváme na seznam eruptivních hvězd uvedených v kapitole 6.3, zjistíme, že v průběhu celého roku se na noční obloze objevuje více objektů tohoto typu. Kdybychom se při pozorování soustředili pouze na jeden objekt, aktivita na ostatních stálicích by nám mohla zbytečně uniknout. Proto by bylo efektivnější přejíždět s dalekohledem z jednoho objektu na další v průběhu celé noci. Doba expozice by byla rámcově 1 - 10 sekund. Čas trvání erupce na hvězdách se pohybuje v řádech hodin. Proto při vhodně zvoleném počtu hvězd, by se mělo podařit zaznamenat erupce i většina doby jejího trvání. Tento typ pozorování klade velké nároky na pozorovací přístroje. Dalekohled by měl mít přesné robotické navádění a pohybovat by se měl co nejrychleji. Nejvhodnější je samonaváděcí dalekohled, který by předem znal pozici hvězd a dobu expozice. V průběhu noci by sám přejížděl mezi objekty hvězdného nebe bez zásahu člověka.



Obrázek 7.13: Tento graf ukazuje spektrum v průběhu erupce na hvězdě AD Leo dne 3.4.2010. Spektrum je v rozsahu od blízké UV oblasti až po modrou optickou oblast. Klidné spektrum hvězdy má barvu šedou. Světle modrou barvou je označený lineární graf, kterým bylo proloženo klidné spektrum. Tmavě modrá barva je vypočtená pro teplotu černého těles, kdy $T_{BB} = 10\,250$ K. Čtverečky nacházející se v šedých páscích vymezují dvě spektrální oblasti. První v rozsahu $3600 - 3630$ \AA , se aproximuje na střed vlnových délek U filtru. Je zde emise čar FeI a FeII. Druhá je v rozmezí $4155 - 4185$ \AA . Zdroj: [32].



Obrázek 7.14: Integrovaná intenzita čáry H α v průběhu erupce. Data poskytla Bc. Lenka Kotková.



Obrázek 7.15: Světelná křivka hvězdy AD Leo v průběhu erupce ze dne 15.4.2013.

Kapitola 8

Diskuze a závěr

Tato práce měla za cíl prozkoumat několik témat z oblasti eruptivních procesů na Slunci a ostatních hvězdách. V druhé kapitole se věnuji základním informacím o Slunci a jeho vnitřní stavbě. Popisuji atmosféru této hvězdy se základními projevy sluneční aktivity.

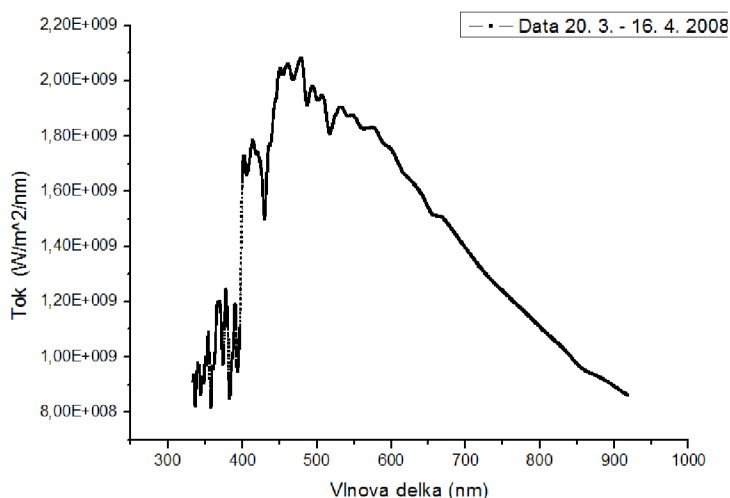
Třetí kapitola popisuje vznik spekter na hvězdách, profily spektrálních čar a klasifikaci hvězd podle teploty a vzhledu spektra.

Čtvrtá kapitola obsahuje základní informace o erupcích. První historické záznamy, klasifikace erupcí podle toku rentgenového záření a podle zářící plochy. Popisuje se zde i vznik magnetického pole pomocí teorie $\alpha\Omega$ dynama, které dává vzniknout aktivním oblastem na hvězdách. V kapitole 4.3 se věnuji vzniku erupcí prostřednictvím rekonexe magnetických siločar, kdy dojde k uvolnění velkého množství energie a vyzařování v různých oblastech spektra. Na obrázcích 4.4, 4.5, 4.6 jsou zobrazeny změny spektrální čáry $H\alpha$ v průběhu erupce ze dne 27.4.2012. Data byla pořízena na slunečním spektrografu v Ondřejově a zpracována v programu IDL.

V páté kapitole se zabývám pozorováním Slunce jako hvězdy. Teoreticky popisují změnu toku záření z celého Slunce během erupce v závislosti na velikosti erupce. Výcházím z empirických modelů Avretta. Studuji také možnosti pozorování pomocí slunečního spektrografu v Ondřejově s přístrojem HR 4000. Popisuji družici SDO (Solar Dynamics Observatory), která sleduje tok od Slunce jako od hvězdy. Prezentuji její data pořízená v ultrafialové oblasti především v prvních třech měsících roku 2013. V poslední části této kapitoly popisují pozorovací přístroj na monitorování Slunce na hvězdárně v Úpici a zpracovávám jím pořízená data. Přístroj pořizuje snímky celého Slunce v čáře $H\alpha$ a $CaII K$. V programu SAOImage DS9 jsem upravila erupce ze dnů 17.1.2005, 29.7.2002, 30.5.2003, 9.6.2003, 7.6.2007 a 7.3.2011. V kapitole 5.3.1 jsou vyobrazeny světelné křivky jednotlivých čar v závislosti na normované intenzitě. Průběhy eruptivních křivek jsou si velmi podobné, impul-

zivní a graduální fáze dosahuje podobných hodnot ve stejný časový okamžik. Výsledky a průběhy těchto měření jsem porovnávala s daty družice GOES, která nepřetržitě monitoruje tok rentgenového záření ze Slunce. Podobnost těchto grafů je velká.

Šestá kapitola pojednává o hvězdných erupcích. O jejich prvních záznamech a rozdělení do skupin. Jsou zde ukázky hvězdných erupcí v různých oblastech spektra. Na tuto úvodní část navazují pojednáním o hvězdách typu G a M. Porovnávám jejich rozdílná spektra v čarách $H\alpha$ a $CaII K$. V klidném spektru hvězd typu G pozorujeme čáru $H\alpha$ v absorpci obr. 8.1, u hvězd typu M v emisi obr. 8.2. Tvar křivek u těchto typů hvězd nebyl zatím ještě teoreticky objasněn.

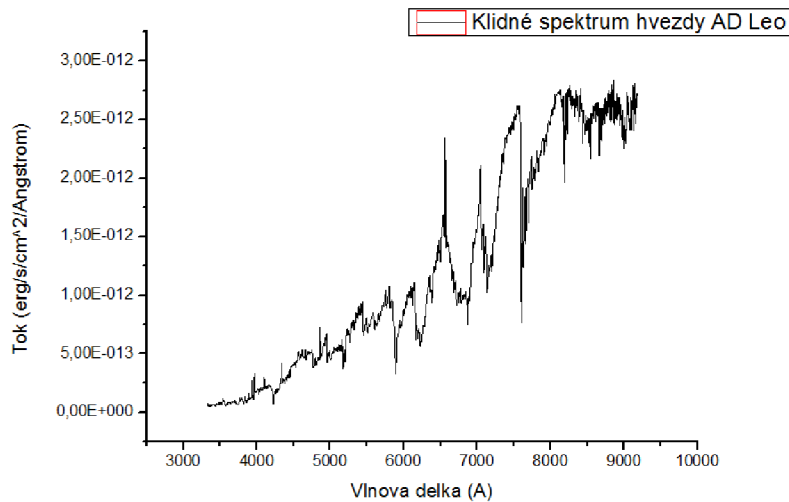


Obrázek 8.1: Spektrum Slunce jako hvězdy v rozmezí 300 - 1000 nm.

U hvězd typu M dochází v průběhu erupce ke zpoždění $CaII K$ čáry oproti ostatním čarám, obr. 8.3.

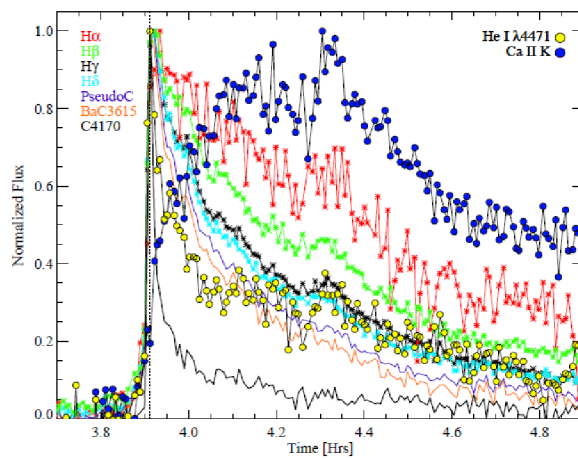
V kapitole 5.3.1 jsme na šesti slunečních erupcích dokázali, že na hvězdách typu G k žádnému zpoždění této čáry nedochází, což je velmi důležité zjištění. Uvádím zde seznam eruptivních hvězd, které se nejběžněji pozorují, včetně jejich základních parametrů. Seznam je doplněn i přehledem observatoří, kde se tyto děje pozorují. Na závěr kapitoly se věnuji stručnému popisu červených trpaslíků třídy dM.

V poslední sedmé kapitole rozebírám metodiku pozorování hvězdných erupcí. Jelikož byl spektroskopický záznam dat prováděn na dvoumetrovém dalekohledu v Ondřejově, uvádím zde stručnou historii založení této observatoře. Navazuji na ni popisem našeho největšího dalekohledu v České republice,



Obrázek 8.2: Klidné spektrum eruptivní hvězdy spektrální třídy M, AD Leo.

Perkova dalekohledu. Jsou zde popsány jeho parametry a jeho konstrukce. Věnuji se popisu ešletového spektrografu OES a coudé spektrografu, se kterým byla data naměřena. Zběžně zde uvádím redukci dat pomocí programu IRAF. Spektroskopické pozorování probíhalo u hvězd AD Leo, V1054 Oph a EV Lac. Délka expozic byla 10 minut a snímala se vlnová délka v rozmezí 6260 - 6710 Å, v okolí čáry $H\alpha$. Pro ukázkou klidného spektra hvězd jsou zde zobrazeny i oblasti 8200 - 8705 Å, 8080 - 8588 Å, 8390 - 6767 Å. Abychom se ujistili, že na hvězdě skutečně probíhá erupce, byla spektroskopie podpořena fotometrickým pozorováním. Fotometrie probíhala na třech observatořích: hvězdárna Uherský Brod, observatoř Masarykovy univerzity na Kraví hoře a na Astronomickém ústavu v Ondřejově. Délka expozic se pohybovala v rozmezí 1 - 10 s a pozorovalo se ve filtrech C, G, y . V kapitole 7.3 jsou předložena klidná spektra hvězd z nocí, kdy se na nich nevyskytla žádná erupce. Uvedena je zde i erupce z noci 15.4.2013 na hvězdě AD Leo. Erupce začala ve 21:00 UTC a její graduální fáze trvala až do 23:00 UTC. Erupce nebyla pravděpodobně příliš velká, což naznačuje změna intenzity v čáře $H\alpha$ i fotometrické pozorování získané dalekohledem v Itálii. Důležitým přínosem tohoto měření je schopnost zaznamenat eruptivní děj na hvězdě pomocí dvoumetrového dalekohledu v Ondřejově. Obzvláště u tak málo výrazného děje. Na závěr této kapitoly je předložen návrh na robotická pozorování, která by mohla vylepšit a zefektivnit postup při vyhledávání erupcí na vybraných hvězdách.



Obrázek 8.3: Vývoj jednotlivých čar v průběhu erupce na hvězdě spektrální třídy M, AD Leo. Zdroj: [32].

Literatura

- [1] Bumba, V.; Ceplecha, J.; Grygar, J.; Sehnla, L.; Šternberk, B.; Zacharov, I.; Observatoř astronomického ůstavu ČSAV Ondřejov, Orbis, Praha, 1964

- [2] Melikian, N.D.; Tamazian, V.S.; Docobo, J. A.; Karpetian, A. A.; Natsvlisvill, R. Sh.: Spectral study of the flare star EV Lac, 2006, Astrophysics, Vol. 49, No. 4

- [3] Osten, R. A.; Hawley, S. L.; Allred J.; Johns-Krull, Ch. M.; Brown, A., Harper, M.: From Radio to X-ray: The quiescent atmosphere of the dMe flare star EV Lacertae, 2006, The Astrophysical Journal, 647: 1349-1374

- [4] Kowalski, A. F.; Hawley, L. S.; Holtzman, J. H.; Wisniewski, P. J.; Hilton, E. J.: A white light megaflare on the dM4,5e star YZ CMi, 2010, The Astrophysical Journal Letters, 714: L98-L102

- [5] Kahler, S.; Golub L.; Harnden, F. R.; Liller, W.; Seward, F.; Vaiana, G.; Lovell, B.; Davis, R. J.; Spencer, R. E.; Whitehouse, D. R.; Feldman, P. A.; Viner, M. R.; Leslie, B.; Kahn, S. M.; Mason, K. O.; Davis, M. M.; Crannell, C. J.; Hobbs, R. W.; Schneeberger, T. J.; Worden, S. P.; Schommer, R. A.; Vogt, S. S.; Pettersen, B. R.; Coleman, G. D.; Karpen, J. R.; Giampapa, M. S.; Hege, E. K.; Pazzani, V.; Rodono, M.; Romeo, G.; Chugainov, P. F.: Coordinater X-ray, optical, and radio observations of flaring activity on YZ Canis Minoris, 1982, The Astrophysical Journal, 252: 239-249

- [6] Gunn, A. G.; Doyle, J. G.; Mathioudakis, M.; Avgoloupis, S.: An optical flare on YZ Canis Minoris, 1994, Astronomy and Astrophysics, 285: 157-160

- [7] Hawley, S. L.; Allred, J. C.; Johns-Krull, Ch. M.; Fisher, G. H.; Abbett, W. P.; Alekseev, I.; Avgoloupis, S. I.; Deustua, S. E.; Gunn, A.; Seiradakis, J. H.; Sirk, M. M.; Valenti, J. A.: Multiwavelength observations of flares on Ad Leonis, 2003 *The Astrophysical Journal*, 597: 535-554
- [8] Hawley, S.L; Pettersen, R.B: The great flare of 1985 April 12 on AD LEONIS, 1991, *The Astrophysical*, 378:725-741
- [9] Jr. Fekel F.C.: Spectroscopy of V711 Tauri (= HR 1099): Fundamental properties and evidence for starspot, 1983, *The Astrophysical Journal*, 268: 274-281
- [10] Bopp B. W.; Talcott J. C.: Survey of H α emission in V711 Tau (HR 1099) and related CaII emission binaries, *The Astrophysical Journal*, Vol 83, No 12
- [11] Foing B. H.: Spectrophotometry and energy budget of exceptional white-light flares on HR 1099 from the MUSICOS 89 campaign, 1994, *Astronomy and Astrophysics*, 292: 543-568
- [12] <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad>
- [13] <http://go.owu.edu>
- [14] <http://svanda.astronomie.cz>
- [15] <http://science.nasa.gov>
- [16] <http://www.geyserlandobs.org/sun.html>
- [17] <http://www.sdo.gsfc.nasa.gov>
- [18] <http://www.asu.cas.cz>

- [19] <http://pleione.asu.cas.cz/slechta>
- [20] Švanda, M.: Slunce, 2012, Praha
- [21] Heinzel, P.: Sluneční a hvězdné erupce, 1922, sborník vydalo Donovaly
- [22] Tandberg - Hanssen, E., Emsline, A.: The physics of solar flares, 1988, Cambridge University Press
- [23] Valníček, B.; Letfus, V.; Blaha, M.; Švestka, Z.; Seidl, Z.: The flare spectrograph at Ondřejov, 1959, BAC 10
- [24] <http://www.obsupice.cz/new/index.php>
- [25] <http://www.hvezdarnaub.cz>
- [26] <http://www.asu.cas.cz>
- [27] Šlechta, M.; Škoda, P.: 2-meter telescope devices: Coudé slit spectrograph and HEROS, 2002, Publ. Astron. Inst. ASCR 90, 1 - 4
- [28] Šlechta, M.; Škoda, P.: The overview of spectra reduction process, 2002, Publ. Astron. Inst. ASCR 90, 5 - 8
- [29] Heinzel, P.: Understanding solar flares from optical observations: How particle beams affect the lower atmosphere?, 2003, Adv. Space Res. Vol. 32, No. 12, pp. 2393 - 2402
- [30] Švestka, Z.: Solar flares, 1976, D. Reidel Publ., Dordrecht
- [31] <http://www.aldebaran.cz/astrofyzika>

- [32] Kowalski, A.F.: Time-Resolved Properties and Global Trends in dMe Flares from Simultaneous Photometry and Spectra, 2012, University of Washington
- [33] Mikulášek, Z.; Krtička, J.: Základy fyziky hvězd, 2005, Brno
- [34] Štefl, V.: Fyzika chladných hvězd, 2010, Brno
- [35] <http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr>
- [36] <https://stelweb.asu.cas.cz/web/index.php>