

MASARYKOVA UNIVERZITA
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
ÚSTAV TEORETICKEJ FYZIKY A ASTROFYZIKY

Bakalářská práce

BRNO 2013

ROMANA GROSSOVÁ



MASARYKOVA UNIVERZITA
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
ÚSTAV TEORETICKEJ FYZIKY A ASTROFYZIKY



Observační studium supernov

Bakalářská práce

Romana Grossová

Vedoucí práce: Mgr. Filip Hroch, Ph.D. Brno 2013

Bibliografický záznam

Autor: Romana Grossová
Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita
Ústav teoretické fyziky a astrofyziky

Název práce: Observační studium supernov

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: Astrofyzika

Vedoucí práce: Mgr. Filip Hroch, Ph.D.

Akademický rok: 2012/13

Počet stran: viii + 40

Klíčová slova: supernovy; spektrum; IRAF; radiální rychlost

Bibliografický záznam

Autor:	Romana Grossová Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita Ústav teoretické fyziky a astrofyziky
Názov práce:	Observačné štúdium supernov
Študijný program:	Fyzika
Študijný odbor:	Astrofyzika
Vedúci práce:	Mgr. Filip Hroch, Ph.D.
Akademický rok:	2012/13
Počet strán:	viii + 40
Kľúčové slová:	supernovy; spektrum, IRAF, radiálna rýchlosť

Bibliographic Entry

Author: Romana Grossová
Faculty of Science, Masaryk University
Department of Theoretical Physics and Astrophysics

Title of Thesis: Observation Study of Supernovae

Degree Programme: Physics

Field of Study: Astrophysics

Supervisor: Mgr. Filip Hroch, Ph.D.

Academic Year: 2012/13

Number of Pages: viii + 40

Keywords: supernovae, spectrum, IRAF, radial velocity

Abstrakt

Cílem bakalářské práce je studium supernovy SN 2011fe, identifikace jednotlivých spektrálních čar a určení jejich radiálních rychlostí a efektivních teplot. První kapitoly práce jsou zaměřené na základní podmínky vzplanutí supernovy. Okrajově nahlížíme i do hlavního rozdělení supernov podle chemického složení a mechanismu vzniku. Tato práce obsahuje také postup zpracování spekter v programu IRAF. Na závěr se zaměříme na shrnutí a analýzu dosažených výsledků.

Abstract

The main task of this bachelor thesis is the spectral study of the supernova SN 2011fe, the identification of spectral lines and the determination of radial velocity and the effective temperature. First parts are focused on the astrophysical description of the supernova explosion. The short description of the distribution of supernovae by its chemical composition and the mechanism of origin will be given. This thesis contains the process of processing spectrum using the IRAF software. In the last part we will concentrate on the summary set and the analysis of the results we obtain.

Abstrakt

Cílem bakalářské práce je studium supernovy SN 2011fe, identifikace jednotlivých spektrálních čar a určení jejich radiálních rychlostí a efektivních teplot. První kapitoly práce jsou zaměřené na základní podmínky vzplanutí supernovy. Okrajově nahlížíme i do hlavního rozdělení supernov podle chemického složení a mechanismu vzniku. Tato práce obsahuje také postup zpracování spekter v programu IRAF. Na závěr se zaměříme na shrnutí a analýzu dosažených výsledků.

Místo tohoto listu vložte kopii oficiálního (podepsaného) zadání práce.

Poděkování

Chcela by som veľmi poďakovať svojmu vedúcemu práce Filipovi Hrochovi za veľkú pomoc a užitočné rady, Petrovi Škodovi za poskytnutie nameraných spektier a veľkej pomoci pri spracovávaní, svojim spolužiakom, rodine a kamarátom za rady a podporu.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svoji bakalářskou práci vypracovala samostatně s využitím informačních zdrojů, které jsou v práci citovány.

Brno 23. května 2013

.....
Romana Grossová

Obsah

Úvod	1
Kapitola 1. Stručný úvod do problematiky supernov	2
1.1 Hviezdny vývoj	2
1.2 Základne charakteristiky supernov	5
1.3 Historický prehľad supernov	6
1.4 Význam supernov	7
Kapitola 2. Delenie supernov	8
2.1 Supernovy typu II = SN II	8
2.2 Supernovy typu Ib, Ic = SN Ib, SN Ic	10
2.3 Supernovy typu Ia = SN Ia	10
Kapitola 3. Spracovanie spektier	13
3.1 Spektroskopia hviezd	13
3.2 Supernova SN 2011fe	14
3.3 Redukcia s IRAFom	16
3.4 Výstupné spektrá	24
3.5 Ďalšia analýza spektier	29
3.5.1 Radiálne rýchlosti	29
3.5.2 Efektívna teplota	32
Kapitola 4. Záver	34

Úvod

Supernovy patria k najdramatickejším procesom/jav vo vesmíre. Pre nás predstavujú významné astrofyzikálne laboratória, vďaka ktorým sme schopní skúmať aj vzdialenejšie vesmírne časti. Dokonca niektoré typy supernov známe ako štandardné sviečky nám slúžia napríklad na určovanie vzdialeností galaxií, v ktorej explodovali. Bol to práve tento typ, supernovy typu Ia, ktorých štúdium získalo v roku 2011 trom fyzikom Nobelovú cenu za potvrdenie zrýchľovania rozpínania vesmíru. Hoci sa s novými technológiami prehľbuje štúdium supernov, stále nie sme schopní niektoré procesy a javy úplne vysvetliť. Štúdium predchodcov, hlavne pri supernovách typu Ia, je veľmi náročné. Podľa predpokladov by sa malo jednať o bielych trpaslíkov, ktorých jasnosť a rozmery sú veľmi malé. Všeobecné informácie o týchto vesmírnych divadlách získavame hlavne z výskumu spektier a svetelných kriviek.

V tejto práci sa postupne definujú základne vlastnosti, charakteristiky, význam, delenia supernov a rozoberieme priaznivé podmienky, pri ktorých môže k takej obrovskej explózii dôjsť. Dôležitou časťou mojej práce je spracovanie a rozbor spektra supernovy s označením SN2011fe z konca augusta roku 2011. S tým je spojené aj stanovenie veličín prislúchajúcim rozpínajúcej sa obálke (odhodenej po výbuchu) ako sú jej rýchlosť a teplota.

supernovy síce značia koniec života hviezdy, no dôležité je samozrejme aj to, čo sa odohrávalo predtým. Najskôr sa teda zameriame na samotný vývoj hviezd.

Kapitola 1

Stručný úvod do problematiky supernov

1.1 Hviezdny vývoj

Každá hviezda, či už viac alebo menej hmotná, má svoje rodisko v obrovských gravitačne viazaných objektoch, veľkých molekulárnych mračnách. Zahrňujú v sebe podstatnú časť medzihviezdnej látky v rámci galaxií. K základným charakteristikám týchto mračien patrí rozmer približne 50 parsekov, hmotnosti od $10^5 M_{\odot}$ do $10^6 M_{\odot}$. Keďže ide o rodiská hviezd, rozprestierajú sa hlavne v oblasti špirálnych ramien galaxií.

Prvým krokom pri vývoji hviezd je formovanie protohviezdy z vyššie spomínaného molekulárneho oblaku. V niektorých oblastiach oblaku dochádza k fluktuácii hustoty. Vzniknuté zhustené časti sa môžu rozpadáť vďaka neusporiadanému pohybu tepelných molekúl. Hmotnosť zhustku je viazaná tzv. Jeansovým kritériom, čo znamená, že po prekročení kritickej Jeansovej hmotnosti M_J dochádza k tomu, že gravitačná príťažlivosť je natoľko veľká, aby odolala rušivým elementom pôsobiacim proti nej.

Zhustené časti sa môžu postupne rozdeliť a vytvárať protohviezdy. Vývoj počiatočného stavu prebieha v centrálnych oblastiach protohviezdneho disku, ktorý na seba viaže časť momentu hybnosti a tým zabraňuje, aby sa proces vývoja zastavil.

Ďalšiu alternatívu v sebe zahrňujú práve výbuchy supernov, ktoré sú hlavnou náplňou mojej bakalárskej práce. Na hranici relatívne prázdneho priestoru vzniknutého po explózii sa vytvára rázová vlna, ktorá pred sebou hrnie materiál. Po náraze na molekulový oblak môže dôjsť k zhutneniu a zahriatiu látky v oblaku na milióny kelvinov a k naštartovaniu tvorby nových hviezd, protohviezd.

Protohviezda prechádza najskôr rýchlou fázou gravitačného zrútenia vo forme voľného pádu materiálu do centrálnych oblastí. Dochádza k jej zahrievaniu, zhutňovaniu a zvyšovaniu tlaku. Až po ustálení hydrostatickej rovnováhy sa zvyšovanie gradientu tlaku zastaví. Keďže sa jedná o gravitačne viazaný systém, uplatňuje sa veľmi dôležitý astrofyzikálny teorém, Viriálový teorém:

$$-\langle E_k \rangle = \frac{1}{2} \langle E_p \rangle,$$

kde $\langle E_k \rangle$ označuje strednú hodnotu kinetickej energie častíc a $\langle E_p \rangle$ strednú hodnotu potenciálnej energie. To nám teda ukazuje, že celková energia gravitačne viazaného systému je vždy rovná polovici strednej hodnoty potenciálnej energie systému a záporne vzatej celkovej strednej kinetickej energie.

Na ďalší vývoj je potrebný zdroj, ktorý by hviezde neustále dodával energie. Na túto úlohu sa podujali termonukleárne reakcie prebiehajúce vo vnútorných častiach. Najskôr sa do reakcii zapájajú ľahšie prvky ako je lítium, bór a deutérium, ktorých výsledný produkt je hélium.

Ak teplota pri zhutňovaní dosiahne hodnotu troch miliónov kelvinov, zapália sa v jadre vodíkové reakcie. Hlavnou reakciou je protón-protónový reťazec, pri ktorom dochádza k premene 4 jadier vodíka na hélium. Patria medzi najúčinnnejšie reakcie, pretože sú schopné úplne nahradiť straty vo forme vyžarovania, čím sa zmršťovanie hviezd zastaví.

Hviezda sa dostáva do najdlhšej etapy svojho vývoja a prechádza na vetvu hlavnej postupnosti, kde môže stráviť 80–90 % svojho života. Jedná sa o takzvanú hlavnú postupnosť, ktorá je definovaná štandardným chemickým zložením, z ktorého väčšiu časť predstavuje vodík, najbežnejší prvok vo hviezdach aj v celom vesmíre. Tie najhmotnejšie hviezdry trávajú na hlavnej postupnosti rádovo milióny rokov, menej hmotné rádovo miliardy rokov.

Ako náhle je vodík v jadre z 95 % vyčerpaný, odsúva sa hviezda z hlavnej vetvy. Nutne dochádza k rýchlemu hviezdnomu zmršťovaniu, aby sa nahradili straty vyžarovaním. Jadro hviezdry sa zhutňuje a zahrieva a jeho rozmery sa znižujú.

Neaktívne časti (bohaté na vodík) okolo jadra sú sťahované na takmer vyhorené zmrštené jadro. Kvôli vysokej teplote sa v týchto častiach môžu zapáliť vodíkové reakcie. Horenie najrozšírenejšieho prvku sa v týchto vrstvách stane hlavným energetickým zdrojom hviezdry. Obal hviezdry je zásobovaný väčším množstvom energie prichádzajúcej z centrálnych častí, čo vedie k expanzii.

V dôsledku viriálového teorému dochádza k obrovskému zväčšeniu veľkosti a ochladnutiu hviezdry. Vodíková vrstva je stále tenšia, ale teplota stúpa a jadro je tým stále viac energeticky účinnejšie. Hviezda sa postupne stáva rozmerným červeným obrom.

V tejto fáze sa môže vývoj menej hmotných hviezd ukončiť. V jadre sa vyčerpajú všetky zásoby vodíka, termojadrové reakcie pomaly ustanú a začne prevažovať vlastná gravitácia hviezdry nad gradientom tlaku, pôsobiacemu proti nej. Pri zmršťovaní jadra ešte dochádza k syntéze hélia na uhlík alebo kyslík a jeho vonkajšie vrstvy sa začnú rozpínať a chladnúť. Po čase sa minú aj posledné zásoby hélia, jadrové reakcie sa zastavia a jadro sa gravitáciou zmrští na niekoľko tisíc kilometrov a na hustotu rádovo tisíc kg/cm^3 .

Látka je úplne ionizovaná a gravitačné sily sú vyrovnávané hlavne Fermiho tlakom degenerovaného elektrónového plynu. Podľa Fermiho pravidla môže jedna energická hladina obsahovať len jeden fermión s rovnakým spinom. Pri vysokých hustotách sú všetky energetické hladiny obsadené, každý ďalší elektrón zaujme vyššiu hladinu. Tlak elektrónového plynu rastie rýchlejšie ako tlak ideálneho plynu.

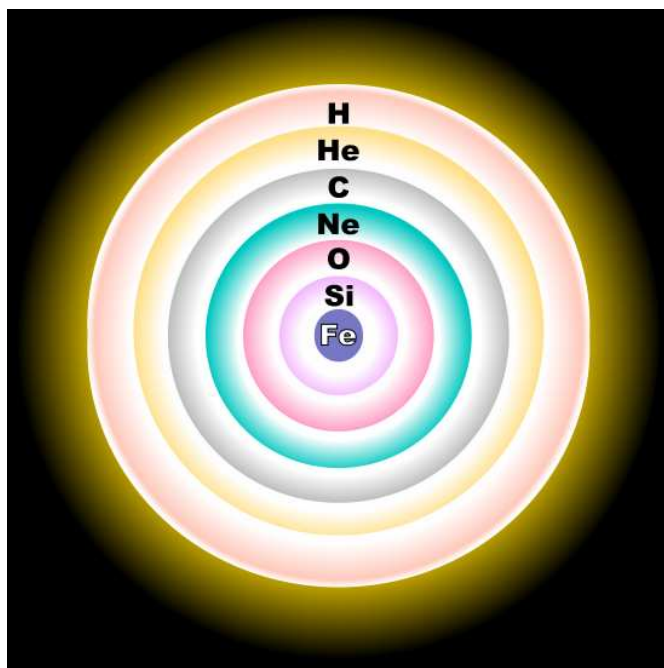
Biely trpaslík ďalej využíva veľkú zásobu tepelnej energie pochádzajúcej z predošlých termonukleárných reakcií. Postupne sa zbavuje tejto energie vyžarovaním a veľmi pomaly chladne, až sa z neho stane čierny trpaslík.

Pre hmotnejšie hviezdry vývoj pokračuje. Pri rýchlej kontrakcii a zahrievaní jadra narastá aj jeho hmotnosť. Pri presiahnutí teploty 100 miliónov kelvinov dôjde k zapáleniu héliových reakcií v jadre a následnej produkcii uhlíka, prípadne kyslíka. Energetická účinnosť týchto reakcií je síce malá, no aj tak sa vďaka nej jadro opäť rozpína. Rozpínaním sa ale ochladí vrstva horiaceho vodíka okolo héliového jadra a teda klesne celkový výkon uvoľňovaný termonukleárnymi reakciami. Obal hviezdry sa zmrští a zahreje.

Po vyhorení hélia v jadre sa začne hviezda opäť rútiť do seba. Tým pádom začne horieť na povrchu neaktívneho uhlíkovo-kyslíkového jadra hélium. Nad touto vrstvou nachádzame vrstvu neaktívneho hélia a nakoniec tam svoje miesto zaberá vrstva vodíku. Hviezda sa rozopne ešte viac a v tomto štádiu sa stáva hviezdou asymptotickej vetvy obrov. V závere tejto fázy stráca obrovské množstvo svojej látky pulzáciami alebo hviezdny vetrom.

Zhutňovaním a zahrievaním jadra v tomto stave hviezdry dochádza k zapáleniu uhlíka a kyslíku za vzniku ťažších prvkov. Jadrové reakcie prebiehajú rýchlejšie než možná desintegrácia ich obalu. Jadro (Obr.1.1) teda dokáže dôjsť až do stavu syntézy železa, ktorého hmotnosť sa stále zvyšuje vďaka intenzívnemu e-procesu. Jedná sa o proces prebiehajúci pri teplotách $4 \cdot 10^9$ K pri pomere po-

čtu $p^+/n^0 < 300$, pri ktorom sa syntetizujú prvky skupiny železa, ako napr. Ni, Co a Fe. Pri takýchto procesoch je energia spotrebovávaná a nie vyžarovaná.



Obr. 1.1: Popis vrstiev vo vyvíjajúcej sa veľmi hmotnej hviezde. Zdroj [36].

Akonáhle železné jadro presiahne tzv. Chandrasekharovu medzu, čo predstavuje približne $M_{CH} \approx 1,4 M_{\odot}$, nedokáže viac gradient tlaku elektrónovo-degenerovanej látky odolať tiaži, dochádza k ďalšiemu gravitačnému zmršťovaniu, ktoré prebieha rýchlosťou voľného pádu. Táto rýchlosť dosahuje desiatky tisíc $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$. Podľa viriálového teorému, uvoľnenie veľkého množstva potenciálnej energie vedie k prudkému zahriatiu látky, nasleduje fotodisociácia železného jadra gama žiarením najskôr na héliové jadrá a neutróny, až na jednotlivé voľné protóny a neutróny.

Úplne závery hviezdneho života sú rozvedené pri popise rôznych typov supernov. Kapitola spracovaná podľa [29], [15] a [5].

Energia uvoľnená pri výbuchu menšej supernovy sa odhaduje na 10^{41} J (od 10^{41} do 10^{45} J), čo približne odpovedá energii uvoľnenej z rozpadu 10^{27} kg ^{254}Cf alebo taktiež uvoľnenej energii zo Slnka za 10 miliónov rokov jeho života [15].

Z latinského slova nova¹, čo znamená „nový“, pričom prefix „super“ rozlišuje supernovu od obyčajnej novy. Hoci za novu taktiež považujeme hviezdu, ktorá náhle zvýšila svoju jasnosť, ale asi tisíckrát menej, odlišným mechanizmom a na menšom priestore ako v prípade supernov (SNe Ia).

U novy ide o explozívne horenie vodíku pri povrchu bieleho trpaslíka a tento jav sa môže u jedného bieleho trpaslíka opakovať aj viackrát, až pokiaľ nevyčerpá všetok svoj materiál, alebo vyprodukuje tak silnú novu, že je pri tomto procese zničený.

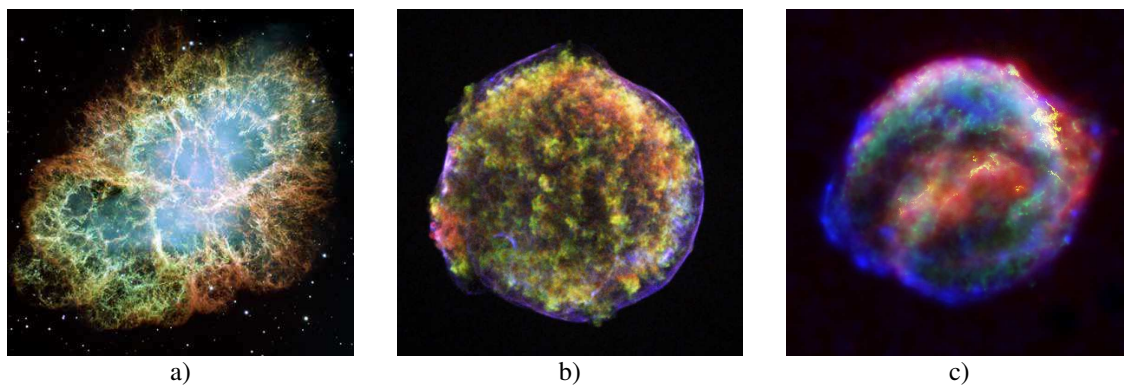
1.3 Historický prehľad supernov

Vďaka značným zmenám svetelných jasností boli supernovy pozorované ako jediné z premenných hviezd už v minulosti. No keďže si ľudia takéto javy na oblohe nevedeli vysvetliť, často ich len odsudzovali alebo považovali za kométy, a teda si o nich záznamy neviedli.

Dôležité informácie o všetkých supernovách za posledné tisícročie sa zachovali vďaka čínskym a japonským astronómom a astrológom.

Prvý záznam o identifikácii hviezdnej explózie sa datuje na rok 185, ktorý sa objavil v knihe *The Book of the Later Han*, popísanej ako „hviezda na návšteve“ (L. A. Marschall, 1988; R. Stothers, 1977) [4].

Jasných supernov, ktoré by bolo možné zachytiť len zrakom, nie je veľa. V roku 383 vzplanula supernova v Škorpiónovi. Vôbec najjasnejšia bola supernova v súhvezdí Vlka z roku 1006. Ďalej v roku 1054 vybuchla známa supernova (SN 1054) v Býkovi, po ktorej nám zostala Krabia hmlovina (M1) s rýchlo rotujúcim pulzarom uprostred (Obr.3.1a)). V rokoch 1572 a 1604 sa na oblohe objavili dve supernovy, ktoré sa pýšia menami po svojich známych objaviteľoch, a to: tzv. Tychonova supernova (SN 1572) v súhvezdí Kasiopeji, ktorú Tycho Brahe zahliadol bez použitia optického prístroja (Obr.3.1b)) a Keplerova supernova (SN 1604) v Hadonosovi (Obr.3.1c)). Nezvyčajné je, že pozostatky po Tychonovej supernove boli objavené neskôr ako po Keplerovej.



Obr. 1.3: Obrázky znázorňujú pozostatky po výbuchu supernov: a) Krabia hmlovina, pozostatok po supernove SN 1054 v súhvezdí Býka. Zdroj [31], b) pozostatok po Tychonovej supernove (SN 1572). Zdroj [35], c) Pozostatok po Keplerovej supernove (SN 1604) v Hadonosovi. Zdroj [31].

¹v pluráli novae

Medzi jasných supernov ďalej patrí supernova, ktorá bola v roku 1885 objavená Ernstom Hartwigom, nazvaná supernova Andromeda v galaxii Andromeda.

Významná supernova SN1987A bola prvou, ktorá bola od rozvoja modernej techniky pozorovaná v neďalekej² susednej galaxii, vo Veľkom Magelanovom Mračne. Pri tomto výbuchu bol zmeraný aj slabý tok neutrín. A teda poskytla prvú možnosť otestovania teórie osudu hmotných hviezd [24].

1.4 Význam supernov

- Výbuchy supernov hrali pre naše životy (hlavne v ďalekej minulosti) dôležitú úlohu. Predpokladá sa, že práve tieto dynamické procesy podnietili centrálnu hviezdu našej Slnčnej sústavy k jej vzniku. Hmlovinu, z ktorej sa vyformovalo naše Slnko obohatili o chemický materiál [15].
- Ako bolo už vyššie povedané, obohacujú medzihviezdnu látku o ťažšie prvky (Obr.1.2) než je hélium, a tým zabezpečia, aby mladšie objekty obsahovali viac ťažších prvkov. Tie sú zrejme veľmi dôležité pri vzniku planetárnych systémov a planét zemského typu, ktoré môžu byť nositeľkami života [15].
- Vďaka supernove Geminge sa už pred 340 tisíc rokmi vyčistil priestor v okolí Slnka, a tým pádom sme boli schopní nahliadnuť do vzdialeného vesmíru [15].
- SN Ia sú vo väčšine prípadov charakteristická homogenitou, keďže k výbuchu dochádza pri prekročení tej istej hmotnostnej hranice, a tým pádom ich môžeme považovať za štandardné sviečky pre určovanie vzdialeností pri štúdiu potvrdzujúcom rozpínanie vesmíru [4].
Traja fyzici Saul Perlmutter, Adam Riess a Brian Schmidt zistili, že vesmír sa dostal do fázy zrýchľovania rozpínania, keď sa hodnota červeného posunu pohybovala okolo hodnoty 0,5 a za pôvodcu označili neznámu temnú energiu. Za tento objav si páni v roku 2011 vyslúžili najvyššie možné ocenenie vo vedeckej spoločnosti, Nobelovú cenu za fyziku [20].
- Je dôležité podotknúť, že sú zdrojom kozmického žiarenia, a taktiež pri nich dochádza k uvoľňovaniu veľkého množstva neutrín.

² vzdialená od nás približne 50 kpc.

Kapitola 2

Delenie supernov

Výbuch supernovy je nesmierne významná udalosť. Odhaduje sa, že je možné zahliadnuť tento jav približne raz za sto rokov v danej galaxii [16]. Podrobné štúdiá spektier a svetelných kriviek preukázali existenciu rôznych typov supernov s odlišnými pôvodcami a mechanizmami. Podľa návrhu H. Minkowského (1941) [4] sa rozdeľujú supernovy na dva základné typy: supernovy typu I a II.

2.1 Supernovy typu II = SN II

Sú výsledkom vývoja mimoriadne hmotných hviezd o počiatkových hmotnostiach pohybujúcich sa v rozmedzí $11\text{--}50 M_{\odot}$, v ktorých sa počas ich vývoja vytvorilo hmotné degenerované železné jadro zložené aj z ďalších prvkov skupiny železa, ako je napríklad nikel a chróm. Jadrá týchto prvkov sú silne viazané a tým pádom nedochádza k jadrovému vzplanutiu.

Vďaka vysokej centrálnej teplote, v prípade veľmi hmotných hviezd, môže dôjsť aj k zapáleniu týchto prvkov a syntéze ďalších ako napríklad neón, či horčík. Veľmi dôležitou je ale reakcia, pri ktorej ^{20}Ne vyprodukuje ^{24}Mg , pretože pri nej vznikajú voľné neutróny, ktoré umožňujú syntézu ťažších prvkov vďaka tomu, že ľahšie prenikajú Coulombovskou potenciálovou bariérou ťažkých prvkov.

Pri počiatkových hmotnostiach hviezd do $50 M_{\odot}$ dochádza k degenerácii neutrónového plynu pri hustotách $10^{17}\text{--}10^{18} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, a teda ku vzniku extrémne hustej neutrónovej hviezdy. Podstatná časť potenciálnej energie je odnášaná z hviezdy prostredníctvom neutrín. K ohodeni obálky dochádza, keď časť neutrín poskytne svoju energiu vonkajším vrstvám. Zároveň sa uvoľní dostatok žiarivej energie, a vtedy dochádza k splanutiu supernovy.

Čo sa týka výskytu nálezu, sa objavujú SN II len v špirálnych galaxiách¹ alebo nepravidelných galaxiách. Tento poznatok jasne dokazuje príslušnosť týchto supernov k mladej populácii I.

Svetelné krivky

V roku 1979 Roberto Barbon rozdelil svetelné krivky supernov typu II podľa ich príznačných vzhľadových vlastností:

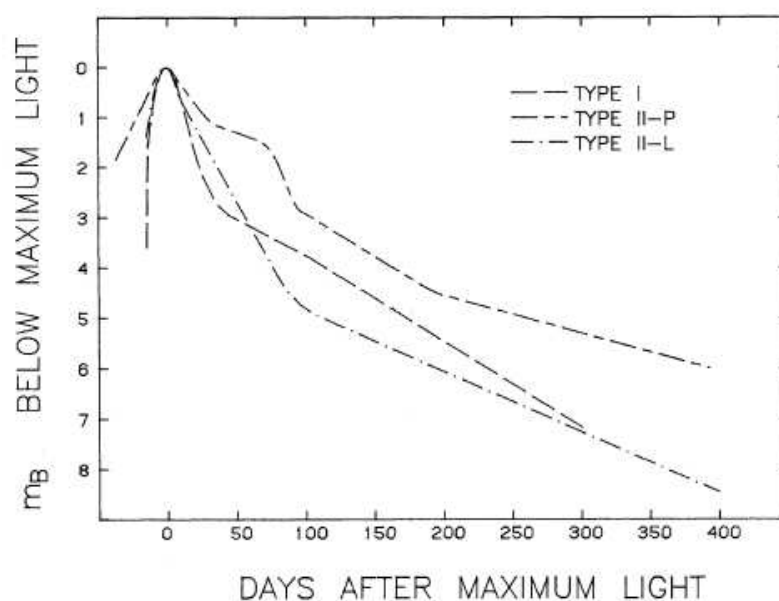
- „plató“ (SN II-P): Vykazuje po dosiahnutí maxima takmer konštantnú jasnosť. Jej tvar je spôsobený kolapsom jadier hviezd, ktorých hmotnosť presahuje $8 M_{\odot}$, ktoré sú vďaka svojej hmotnosti schopné vyprodukovať v jadre ťažšie prvky. Dochádza k zrúteniu hviezdy na neutrónovú hviezdu a odhodeniu a zahrievaniu² vodíkovej obálky mohutnou rázovou vlnou.

¹a to vo vonkajších častiach špirálnych ramien

²teplota presahuje 10^5 K

Vodík v tejto časti je úplne ionizovaný, takže jeho opacita je veľmi vysoká (prevažne vďaka Thomsnovmu rozptylu termálnych fotónov na voľných elektrónoch). Toto difúzne uvoľnenie energie z obrovskej rozpínajúcej sa obálky reprezentuje práve tento typ svetelnej krivky. Trvanie „plata“ závisí od veľkosti obálky³ [14] a [8].

- „lineárne“ (SN II-L): Explózia prebieha v tomto prípade podobne ako pri SN II-P, s tým rozdielom, že pôvodca pred explóziou stráca väčšiu časť vodíkových vrstiev, a preto vykazuje kratšie a plytkejšie „plato“. Tento typ je charakteristický tým, že po prechode maximom preukazuje pomerne rýchlo a plynulo klesajúcu svetelnú krivku. Svetelná krivka SN II-L by mohla nápadne pripomínať tvar svetelnej krivky SN I (Obr. 2.1). Rozdiely sa však objavujú pri porovnaní miesta výskytu týchto dvoch typov. Na rozdiel od SN I, SN II-L detekujeme v špirálnych ramenách. Čo nám naznačuje, že ich pôvodcovia sa musia líšiť [8].



Obr. 2.1: Porovnanie svetelných kriviek v modrom filtri pre supernovy typu I, II-P a II-L. Zdroj [8].

³tá je zase určená rýchlosťou rozpínania

Ďalší priebeh svetlenej krivky, po prejení rekombinačnej vrstvy celou obálkou, je už zhruba pre všetky SN II rovnaký a určený hlavne rádioaktívnym rozpadom ^{56}Co a ^{58}Fe . Zložitejší je výklad neskorej fázy svetelnej krivky. Do popredia sa dostáva žiarenie disku okolo hviezdy, ktorý je ionizovaný rázovou vlnou a žiarením supernovy. Zhruba 1500 dní po výbuchu presahuje žiarenie vlastnej obálky nad žiarením disku [14].

Optické spektrá

U SNe II je taktiež známy typ SN II-n, ktorý vo svojom spektre vykazuje užšie emisné čiary. Čo sa týka svetelných kriviek, vyvíjajú sa pomalšie a ostávajú jasnejšie po dlhú dobu. Vysvetlením by mohla byť interakcia rázovej vlny s okolitou látkou, pričom premena kinetickej energie predstavuje dostačujúci zdroj žiarivej energie. Optické spektrá tohto typu sa vyznačujú veľkou heterogenitou ako v ranných tak aj v neskorších fázach.

2.2 Supernovy typu Ib, Ic = SN Ib, SN Ic

Vďaka podobe svojich spektier sa radia k supernovám typu I, pretože neobsahujú čiary vodíka. Ich spektrá vo všeobecnosti sú vzájomne súvisiace, no líšia sa predovšetkým výskytom silných čiar hélia pri type Ib, ktoré však u supernovách typu Ic nepozorujeme. Hlavný rozdiel určujú ich svetelné krivky.

Od typu Ia sa ich spektrá odlišujú absenciou veľmi intenzívnych čiar ionizovaného kremíku Si II na vlnovej dĺžke 615 nm. Predpokladá sa, že tieto typy supernov sú podobne ako pri supernovách typu II, záverečnou fázou veľmi hmotných gravitačne kolabujúcich hviezd, no s nízkym zastúpením vodíka. Jedná sa o hviezdy s hmotnosťou väčšou ako $50 M_{\odot}$. Žiarením urýchľovaný hviezdny vietor odhadzujúci hviezdny materiál sa postupne dostane k oblasti, ktorá obsahuje hélium a iné pozostatky po predchádzajúcich reakciách. Typ týchto hviezd nazývame Wolf-ove-Rayetove kyslíkové a uhlíkové hviezdy. Keďže sú to veľmi hmotné a horúce hviezdy končia svoj život veľmi rýchlo a pokiaľ pri zmršťovaní prekonajú aj neutrónovú degeneráciu, končia svoj život ako čierne diery [15].

Môžeme ich nájsť výhradne v špirálnych alebo nepravidelných galaxiách, teda v rodiskách nových hviezd.

2.3 Supernovy typu Ia = SN Ia

Typ s príznačne najväčšou jasnosťou zo všetkých typov v obore elektromagnetického žiarenia.

Carroll a Ostlie ([5]) zhrnuli charakteristiky supernov tohto typu a stanovili, že v maxime jasnosti SNe Ia dosahujú priemernú absolútnu magnitúdu v B a viditeľnom filtre :

$$\langle M_B \rangle \cong \langle M_V \rangle \cong -19,3 \pm 0,03.$$

Hviezdy s nižšou hmotnosťou ako je $8 M_{\odot}$ sa považujú za pôvodcov supernov typu Ia [5]. Najpravdepodobnejším scenárom je akrecia látky na uhlíkovo-kyslíkového bieleho trpaslíka z jeho partnera v blízkom dvojhviezdnom systéme. Dnes sú ale známe viaceré alternatívy v podobe modelov závislých na type spoločníka a vzniku explózie:

- Samotný degenerovaný systém, kedy je druhým členom hviezda hlavnej postupnosti, héliová hviezda alebo červený obor.

- Dvojito degenerovaný systém. V spoločenstve sa nachádzajú dva biele trpaslíky, pričom k explózii dochádza po ich splynutí alebo zrážke. Niektoré analýzy modelu naznačovali, že takýto hviezdny systém skôr skolabuje do neutrónovej hviezdy ako vybuchne v podobe SN Ia [2].

Väčšina pozorovaných SNe Ia predpokladá samotný degenerovaný systém, kedy spoločník bieleho trpaslíka naplňa pod vplyvom vývoja svoj Rochelov lalok. Po čase sa dostane do stavu, kedy mu ani objem laloku nevystačí a vtedy prichádza na rad výhoda dvojhviezdného spoločenstva. Nadbytočnú látku začne prenášať do Rochelovho laloku kompaktného bieleho trpaslíka cez Lagrangeov bod.

Moment hybnosti prenášanej látky spôsobuje, že ide o dopad materiálu v tvare špirály na akrečný disk obklopujúci bieleho trpaslíka. Jedna časť materiálu je vyvrhnutá von do okolitého priestoru a ďalšia ostáva vo vnútri disku s postupným dosiahnutím povrchu bieleho trpaslíka.

Takto sa postupne hromadí vrstva akreovanej látky na povrchu kompaktného objektu. Dochádza k stlačovaniu jej spodnej časti ako gravitačným pôsobením od bieleho trpaslíka, tak aj pokračujúcim dopadom materiálu. Dochádza k neustálemu hromadeniu látky a pozvoľnému zväčšovaniu motnosti trpaslíka až po hraničnú Chandrasekharovú medzu ($M_{CH} \approx 1,4 M_{\odot}$). Následne dochádza k zapáleniu uhlíkových termonukleárných reakcií kvôli obrovskému nárastu teploty a hustoty. Pretože táto teplota prekročí v centrálnych častiach teplotu degenerácie, látka vo hviezde sa zmení na plyn a rýchlo expanduje do priestoru.

Pri tomto type ide vlastne o vratný dej, kedy sa všetky látka hviezdy vráti do veľkých molekulárnych mračien, z ktorých sa na začiatku vývoja vyformovala a dochádza aj ku chemickému obohateniu rodísk nových hviezd.

Tieto supernovy sa vyskytujú v eliptických galaxiách, ktoré sú zložené z hviezd starej hviezdnej populácie (s vekom približne 10^9 rokov), ale taktiež by sme ich mohli nájsť aj v špirálnych galaxiách.

Nedávne zaujímavé objavy boli odhalené pri výskume Chandrasekharovej medze. Das a Mukhopadhyay určili vo svojej práci ([7]), že silno zmagnetizované biele trpaslíky môžu dosahovať tzv. super-Chandrasekharovu medzu, ktorú stanovili na $2,58 M_{\odot}$ a zakončujú svoju životnú púť ako mimoriadne jasné pekuliárne typy SNe Ia⁴.

Svetelné krivky

Podobne ako aj pri ostatných typoch supernov je ich svetelná krivka po prechode maximom určovaná rozpadom rádioaktívnych prvkov, predovšetkým $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co}$ a ďalej ^{56}Co na stabilné ^{56}Fe . Práve tieto supernovy asi najviac obohacujú medzihviezdnu látku o nie len prvky železa, ale aj o uhlík a kyslík.

Po dosiahnutí maxima jasnosti, svetelná krivka najskôr klesne približne o 3 mag za mesiac. Neskôr pozorujeme skôr exponenciálny pokles jednej magnitúdy za mesiac.

V infračervenej a blízkej infračervenej oblasti dosahuje druhé maximum po 20 dňoch od prvého.

Optické spektrá

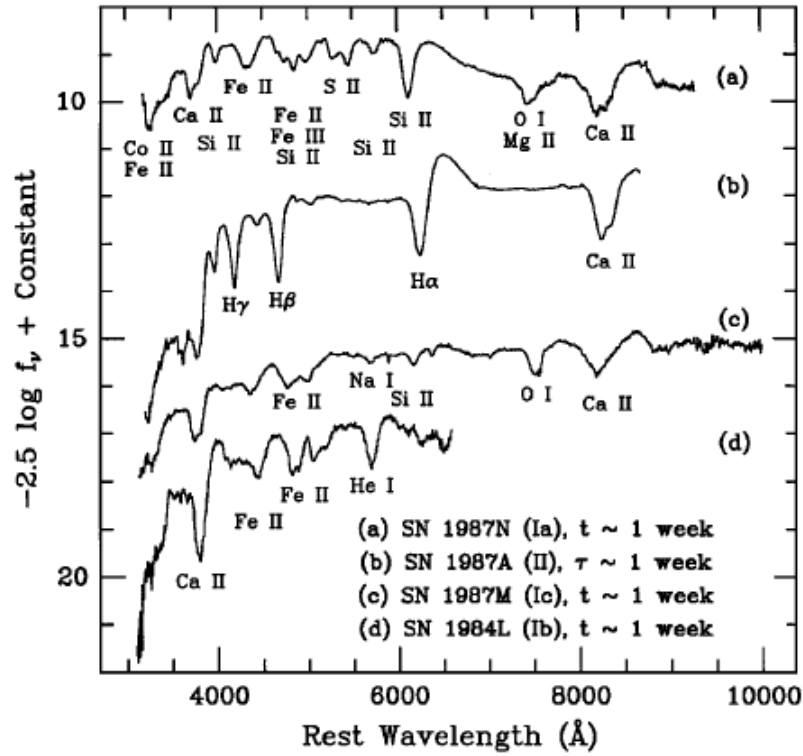
Optické spektra triedy „normálnych“⁵ supernov typu Ia obsahujú v maxime jasnosti neutrálne alebo z časti ionizované absorpčné čiary Si, Ca, Mg, S a O, čiže čiary patriace stredne hmotným prvkom nachádzajúcich sa vo vonkajších vrstvách vyvrhnutého materiálu. Absorpčné čiary Ca II môžu dokonca pretrvať aj do neskorších fáz spektier.

⁴ nedávno pozorované pekuliárne supernovy: SN 2006gz, SN 2007if, SN 2009dc, SN 2003fg

⁵ do triedy normálnych SNe Ia patria napríklad SN 1972E, SN 1994D, SN 2005cf

Po dvoch týždňoch začnú výrony bohaté na železo prenikať fotosférou, a tým pádom dominujú v spektre čiary Fe II. Taktiež sa môžu objaviť zakázané emisné čiary Fe II, Fe III a Co III asi mesiac po maxime.

Ranné fázy spektra (približne týždeň po výbuchu) sú charakterizované neutrálnymi alebo z časti ionizovanými prvkami ako O, Mg, Si, S a Ca s malým príspevkom Fe a Co (Obr.2.2). Ide hlavne o absorpčné čiary Si II $\lambda 6355$, ktoré sú posunuté do modrej časti spektra a taktiež Ca II $\lambda\lambda 3934, 3968$ [18].



Obr. 2.2: Obrázok znázorňuje ranné spektrá rôznych typov supernov. Pričom t a τ označujú čas po pozorovaní maxima, alebo čas, kedy došlo k výbuchu [18].

Kapitola 3

Spracovanie spektier

3.1 Spektroskopia hviezd

Spektrum¹ vyjadruje rozklad bieleho svetla na jednotlivé, ďalej nerozložiteľné farebné zložky. Rozklad svetla sa prevádza buď pomocou hranolu alebo optickej mriežky. Isaac Newton bol jeden z prvých, ktorí skúmali slnečné spektrum pomocou hranolu. S prípadom sústavy navzájom rovnobežných štrbín (optická mriežka) sa stretávame aj v astronomických spektrografoch a spektroskopoch.

Čo sa týka hviezd, najväčšia časť ich žiarenia k nám prichádza z fotosféry (najnižšia časť hviezdnej atmosféry). Toto elektromagnetické žiarenie nám potom poskytuje dôležité informácie o samotných hviezdach. Vo fotosfére dochádza k rýchlemu poklesu teploty smerom k jej vonkajším vrstvám². Najspodnejšie časti fotosféry sa teda vyznačujú najväčšou hustotou a teplotou. Z tejto časti k nám prichádza žiarenie v podobe spojitého spektra, ktoré nám tvoria akési pozadie pre prípadne tmavé absorpčné či jasné emisné čiary a pomáhajú určovať efektívne teploty.

Absorpčné čiary odpovedajú vrstvám, ktoré sú redšie a chladnejšie. V rozsiahlych hviezdnych atmosférach alebo pri teplotnom zvrate v atmosfére sme schopní v spektrách hviezd pozorovať aj emisné čiary [15].

Pokrok vo výskume najlepšie preskúmaného spektra, slnečného spektra, začal v 19. storočí, kedy Joseph von Fraunhofer popísal tmavé absorpčné čiary, ktoré dostali meno po svojom objaviteľovi. Neskôr sa Robert Bunsen a Gustav Kirchhoff významne zaslúžili o rozvoj spektroskopie zostrojením prvého spektroskopu a taktiež správnym výkladom vzniku spektier. Na rozklad svetla použili hranol. O 50 rokov neskôr sa im podarilo zistiť, že každý prvok má svoj vlastný spektrálny „otlačok prstu“, vlastné spektrum. Kirchhoff zhrnul poznatky o spektrálnych čiarach v troch zákonoch:

- Horúci (teplota nad 0 K) hustý plyn, alebo horúca pevná látka vytvára spojité spektrum bez tmavých spektrálnych čiar.
- Horúci riedky plyn produkuje svetlé spektrálne čiary (emisné čiary).
- Chladný riedky plyn pred zdrojom spojitého spektra produkuje tmavé spektrálne čiary (absorpčné čiary) v spojitom spektre [5].

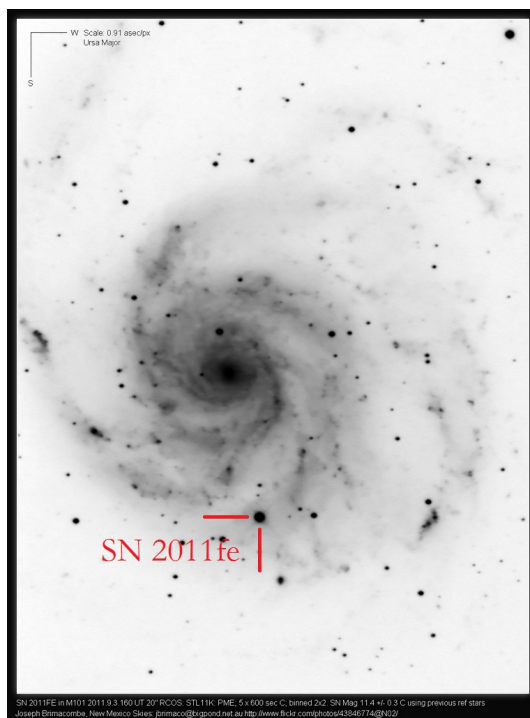
¹z latinského obraz

²za príčinu poklesu teploty sa považuje ochladzovanie týchto vrstiev prostredníctvom vyžiarovania fotónov. Na 200 km poklesne teplota o 270 K.

3.2 Supernova SN 2011fe

SN 2011fe bola prvýkrát detekovaná 24. augusta 2011 asi 12 hodín po výbuchu ako hviezda 17,35 mag na PTF (Palomar Transient Factory) v galaxii Veterník³ (Obr.3.1).

Táto supernova predstavuje najbližšiu supernovu typu Ia za posledných 25 rokov a bola objavená pomerne skoro po výbuchu, čo ju povyšuje na jednu z najlepšie preskúmaných supernov za posledné obdobie. Vďaka výskumom výronu látky a detekcii uhlíku a kyslíku v ranných fázach spektra sa potvrdili predpokladané scenáre pre supernovy tohto typu a teda, že pôvodcom by mal byť uhlíkovo-kyslíkový biely trpaslík v podvojnom systéme s hviezdou hlavnej postupnosti.



Obr. 3.1: Galaxia Veterník (M101) s vyznačenou SN 2011fe. Zdroj [32].

³Messier 101

Hlavnú pozornosť budem ďalej venovať spracovaniu spektier práve tejto supernovy typu Ia vo Veterníku.

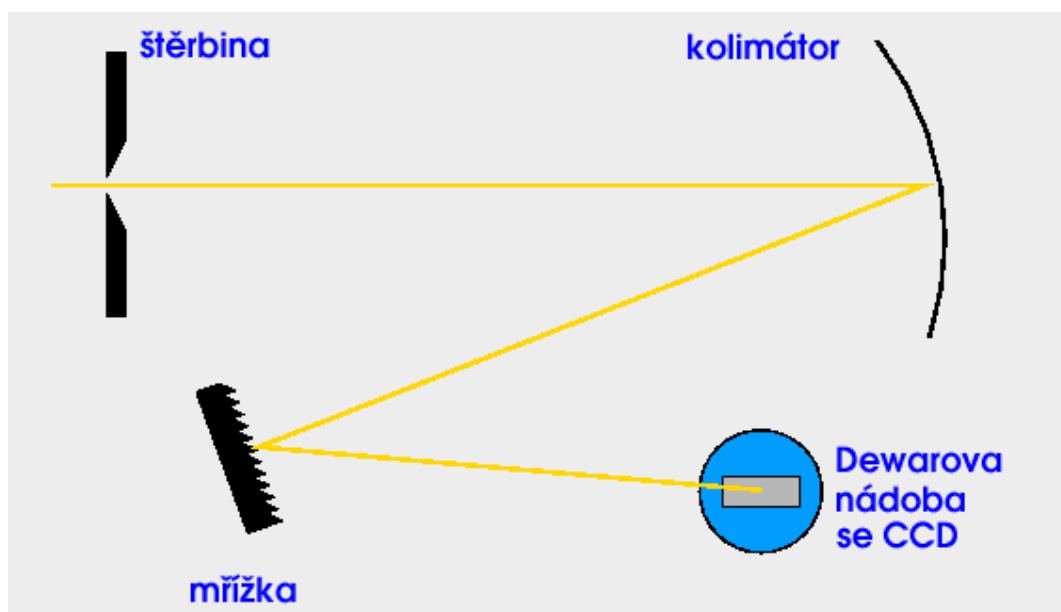
Spektrá SN2011fe boli prvýkrát pozorované Petrom Škodom v Ondřejovskom Astronomickom ústave Akadémie vied Českej Republiky dňa 30. 8. 2011 pomocou ďalekohľadu s priemerom primárneho zrkadla 2 metre (Obr.3.2). Ide o najväčší zrkadlový⁴ ďalekohľad v Českej Republike zostrojený nemeckou firmou Carl Zeiss v Jene a používaný od roku 1967 [28].



Obr. 3.2: Autorka pred 2m ďalekohľad Astronomického ústavu AV ČR v Ondřejove (fotografia Petra Fatku).

⁴30 cm hľadáček tohto ďalekohľadu predstavuje najväčší šošovkový ďalekohľad v ČR

Spektrograf, ktorým boli namerané tieto spektrá, je umiestený v jednom z troch možných optických usporiadaní ďalekohľadu a to v coudé ohnisku⁵. Lúč v coudé spektrografe (Obr.3.3) prechádzajúci cez štrbinu je kolimátorom prevedený na rovnobežný a usmerný na mriežku. Vytvorené spektrum je zaznamenávané elektronickým dekterom (zväčša CCD). V Ondřejovskom coudé spektrografe sa na zobrazenie spektra používajú dva typy Schmidtovských kamier s ohniskovou vzdialenosťou 700 mm a 400 mm [39] (podrobnejšie informácie o funkcii a stavbe spektrogratu nájdeme v bakalárskej práci Šárky Dvořákovéj z roku 2011[9]).



Obr. 3.3: Schéma coudé spektrogratu v Ondřejove [38].

Na nameranie spektra SN 2011fe bola použitá refrakčná kamera pre nízкодисперзную spektroskopiu s ohniskovou vzdialenosťou 400 mm a kvôli opticko-mechanickému usporiadaniu sa odporúča pre výskum červenej oblasti spektra.

Stelárne oddelenie Astronomického ústavu tento spektrograf dlhodobo využíva na štúdium spektier horúcich hviezd.

3.3 Redukcia s IRAFom

Na analýzu a spracovanie pozorovaných spektier som využívala IRAF 2.10.

Inštalácia tejto verzie programu nie je ľahká. Preto mi bolo Petrom Škodom umožnené pracovať na serveri Stelárneho oddelenia Astronomického ústavu v Ondřejove, ktorý obsahuje túto verziu IRAF-u.

V termináli je potrebné vstúpiť do adresára s nainštalovanou verziou (vo väčšine prípadov ide o domovský adresár). Dôležitým krokom je spúšťanie IRAF-u cez `xgterm` terminál. Jedná sa o typ grafického terminálu, ktorý na rozdiel od ostatných (napr. `xterm`) umožňuje bez ťažkostí vykresľovať grafy. Po zadaní príkazu `xgterm` sa otvorí nový terminál. V ňom použijeme príkaz `mkiraf`, ktorý vytvorí prihlasovací súbor pre užívateľa `login.cl`⁶ a podadresár `uparm` (skladisko užívateľských parametrov, ukladanie zmenených parametrov).

⁵ďalej to môže byť primárne a Cassegrainovo ohnisko

⁶z ang. koncovka `cl` „command language“

`Login.cl` obsahuje informácie o verzii IRAF-u, jeho umiestnení v adresári, používaní grafického terminálu, umožňuje vložiť názvy balíčkov atď. Dôležité balíčky, s ktorými budeme pracovať, sú balíčky optickej astronómie: `noao`, `imred`, `ccdred`, `knposlit`, `onedspec` a `rv`. Bez tohto kroku by sme museli ručne zadávať názvy balíčkov, pretože každý z nich obsahuje iné druhy príkazov s rôznymi funkciami.

Veľký význam má definícia predvolených koncoviek súborov. Keďže v AV ČR sú výstupom súbory „*.fit“, narozdiel od používanějších „*.fits“ (Flexible Image Transport System) súborov. Predvolenie prebieha pridaním a uložením riadkov do `login.cl`:

- `set imtype="fit"`
- `set imextn="oif:imh fxf:fit,fits,..."7.`

Pokiaľ sme splnili vyššie uvedené kroky, otvorí sa nám nový terminál, v ktorom jednoducho prevedieme prihlásenie pomocou príkazu `cl`. Používanjšou alternatívou je prihlásenie pomocou `ec1` (Enhanced Command Language⁸), lebo obsahuje funkcie na spracovanie chýb, zobrazenie histórie používaných príkazov pomocou „šípky hore“, vylepšené narábanie s BS/DEL (Backspace/Delete) tlačítkami atď. [42].

Treba si dať záležať na tom, aby sme `xgterm` spúšťali v správnom adresári, a teda v adresári obsahujúcom `login.cl`. V opačnom prípade by sme sa prihlásenia nedočkali.

Následne pomocou príkazu `cd` vstúpime do adresáru s nameranými spektrami a pustíme sa do samotnej redukcie. Súbory so spektrami obsahujú nie len surové spektrá ale aj kalibračné snímky⁹ ako porovnávacie spektrá, zero a flat fieldy (flaty), ktoré je užitočné pred ďalšou akciou zálohovať. V danom adresári sa vytvorí zložka `orig` s originálnymi súbormi.

Popíšeme si jeden vybraný súbor `duh03012.fit` (snímka supernovy SN2011fe z dňa 3. 9. 2011) po vypísaní cez `ccdlist`, ktorý patrí do knižnice `ccdred`:

- `ec1>ccdlist`
- `duh03012.fit [2557,56] [unshort] [object] [4850] ,`

kde `unshort` upozorňuje na skutočnosť, že snímka ešte nie je spracovaná, ďalšia hranatá zátvorka ukazuje o aký `ccdtyp` snímky ide a na záver máme uhol mriežky. Je dôležité rozdeliť si snímky podľa uhlu mriežky a každú zvlášť analyzovať. V mojej korekcii som používala len natočenie mriežky 4850.

Pred ďalšou prácou¹⁰ bude vhodné uložiť si jednotlivé objekty a porovnávacie spektrá do súborov.

- `ec1>ccdlist *.fit ccdtype=star name+ >stars`
- `ec1>ccdlist *.fit ccdtype=comps name+ >comps.`

V adresári, v ktorom sa práve nachádzame (čo zistíme zavolaním externého príkazu `!pwd`), sa nám vytvoria dva textové súbory obsahujúce názov hviezdy a porovnávacích spektier.

- `Comp` označuje porovnávacie spektrum vytvorené v laboratórnych podmienkach pomocou výbojky. V Ondřejove sa používa thórium-argónová výbojka [40].

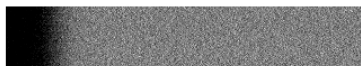
⁷ zabezpečuje nadradenosť `fit` súbor pred `fits`

⁸ v preklade do slovenčiny – vylepšený príkazový jazyk

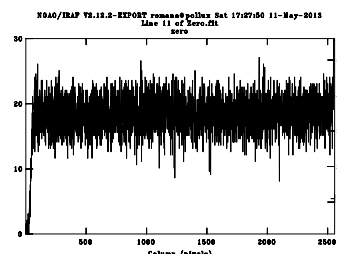
⁹ dôležité opravy spektier od vady detektoru

¹⁰ sekcia `doslit`

- Zero¹¹ patrí ku kalibračným snímkach. Dochádza k vyčítaniu čipu s uzavretým spektrografom (bez prítomnosti svetla) s nulovou expozíciou. Zero snímok sa urobí niekoľko, spriemerujú sa a pred ďalším spracovaním odčítajú od snímky hviezdy. Na spriemerovanie sa v IRAF-e používa príkaz `zerocombine`. No najskôr by bolo najlepšie každý snímok ešte pred ďalšou analýzou skontrolovať. Vykresľovanie snímok nám umožňuje program `ds9` (SAOImage DS9 [41] (Obr.3.4)).



Obr. 3.4: a)



Obr. 3.5: b)

Obrázky znázorňujú: a) výrez zero snímky zobrazenej pomocou `ds9`. Na ľavom okraji zjavná chyba čipu b) skombinované zero snímky.

Obrázok snímku zero (Obr.3.4) vykazujú na začiatku určitý efekt. Najskôr ide o chybu čipu. Po odrezaní tejto vady, by sme prišli o približne 200 px.

Použijeme teda príkaz `epar zerocombine` a definujeme parametre¹²:

- `input=*.fit`
- `output=Zero.`

`Epar` ukončíme `:g`, alebo spustíme `:go`. Vytvorí sa nám súbor `Zero.fit` (Obr.3.5).

- `Flat field` sa prevádza nasmerovaním ďalekohľadu na rovnomerne osvetlenú bielu plochu za účelom zachytiť rôznu citlivosť pixelov na čipe. Expozičná doba sa nemusí byť zhodná s dobou expozície samotnej hviezdy. Od flatov sa odčítajú zero snímky a nakoniec nimi ešte vydělíme spektrum hviezdy.

Podobne ako pri zere skombinujeme flaty (Obr.3.6) pomocou príkazu `flatcombine`:

- `input=*.fit`
- `output=Flat`
- `(rdnoise=9.8`
- `(gain=1.36 (elektrón na ADU13.`

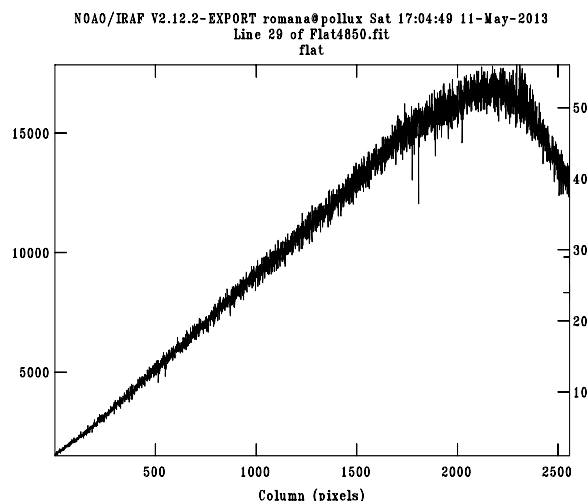
Hodnoty `rdnoise` a `gainu` platia pre štyristovku. Týmto procesom vznikne v danom adresári `Flat485014.fit`.

¹¹`offset= bias= zero`

¹²podrobnejšie vypísané hodnoty ostatných parametrov sa nachádzajú v návode od Petra Škody a Miroslava Šlechty z Astronomického ústavu v Ondřejove [23]

¹³1 ADU je jednotka, najmenší rozdiel signálu, ktorý vie čip rozlíšiť.

¹⁴číslo za `Flat`om vyjadruje natočenie mriežky



Obr. 3.6: Skombinované flat snímky. Intenzita flatu je najväčšia napravo.

- Ccdproc je používaný na záverečné korekcie snímkov a súčasne sa všetky snímky orežú podľa veľkosti flatu.

Príkazom:

```
- ecl>ccdlist ccdtype=object,  
- dui03012.ms.fit [2557,1] [real] [object] [OTZF]
```

Dostávame vypísané údaje pre dané spektrá. Posledná zátvorka obsahuje začiatkové písmenká korekcií prevedených na spektre.

- 0 značí *overscan*. Snímka je opravená o *overscan*¹⁵.
 - T ako *trim*=orezaný, dochádza k orezávaniu súborov, aby neboli zbytočne veľké.
 - Z snímky upravené o *zero*.
 - F upravené o *flaty*.
- *Doslit*. Takto „ošetrené“ snímky sú pripravené na ďalšie spracovanie. Toto spracovanie v sebe zahŕňa príkaz *doslit* z knižnice *knposlit*.

Druhou alternatívou je spracovanie pomocou *apallu*. *Doslit* je v porovnaní s ním z väčšej časti automatizovaný a preto je práca s ním rýchlejšia a jednoduchšia (ak sa jedná o staršiu verziu IRAF-u).

Je potrebné upraviť si určité parametre príkazu *doslit*:

```
- ecl>epar doslit  
- objects= @stars16  
- (arcs = @comps)  
- (readnoi= 9.8)
```

¹⁵overscan region, oblasť v ktorej sa sprimerujú všetky stĺpce a potom sa odčíta od každého stĺpca čipu.

¹⁶obsahujúci označenie supernovy

– (gain = 1.36)

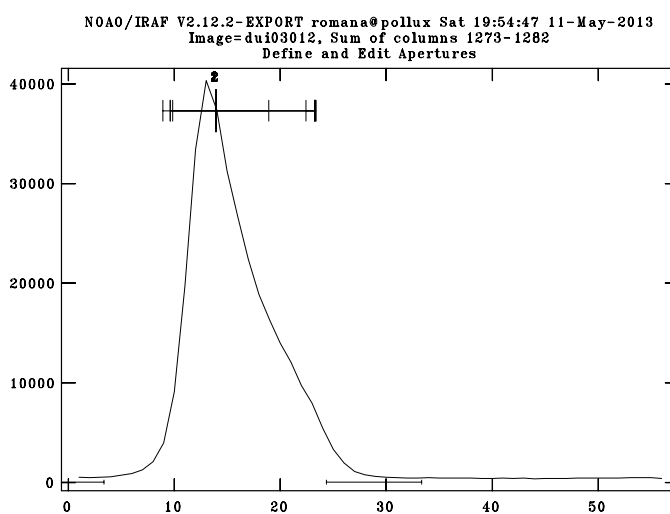
– (sparams=)

Prejdeme na príkaz `sparams` a stlačíme `:e`. Objavia sa nám algoritmické parametre.

Dôležité je definovať `line list`. Predstavuje databázu, z ktorej sa bude čerpať porovnávacie spektrum:

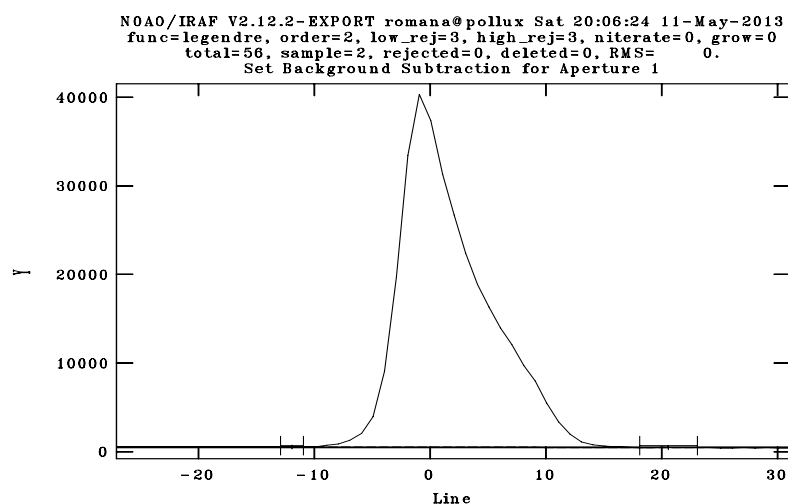
– (coordli= linelists.dat)

Priamo z `eparu` spustíme doslit príkazom `:go`, a tým prejdeme k počiatočnému kroku a to k editovaniu apertúry a pozadia. Pri editovaní využívame `y`, ktorý nám nadstaví šírku clonky podľa kurzoru. Pre presnejšie určenie šírky používame `l` ako lower (nižšia) ľavá hranica apertúry a `u` ako upper (vyššia) pravá hranica (Obr.3.7).



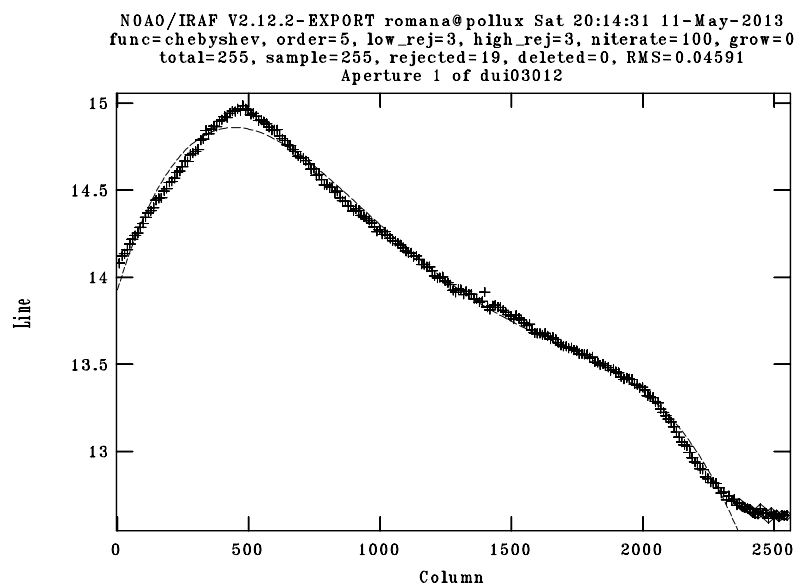
Obr. 3.7: Editácia apertúry.

Pomocou `b` sa prepneme do editovania pozadia. Ak sa nám tam objavia chybné body mimo pozadia, zmažeme ich pomocou `t`, následne určíme správne body (`s-kom`), ktoré nám ho ohraničujú (Obr.3.8) a `f` naftujeme podľa nových hodnôt. Na odchod z editácie pozadia a taktiež potvrdenie editácie apertúry používame `q`.



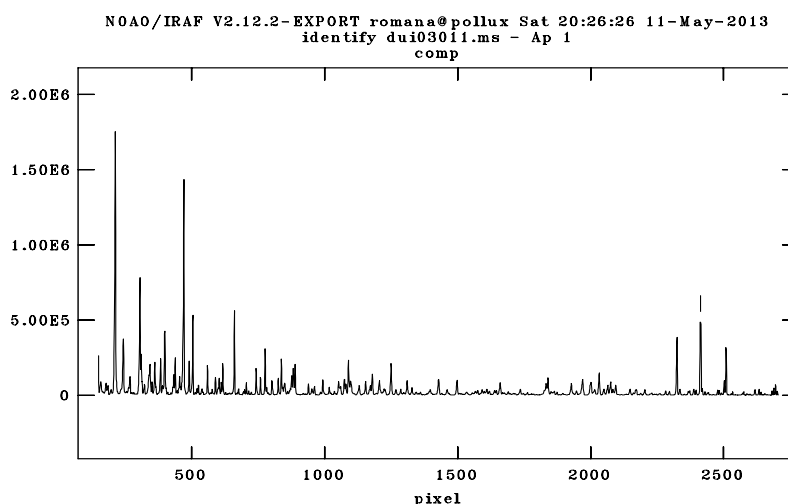
Obr. 3.8: Editácia pozadia, naftovanie podľa určených bodov pozadia.

Po potvrdení sa náš program na editáciu spýta či chceme fitovať krivku apertúry nášho súboru interaktívne. „Áno“ nám zobrazí fitovanú apertúru. Ak budeme s fitom spokojní potvrdíme opäť q (Obr.3.9).



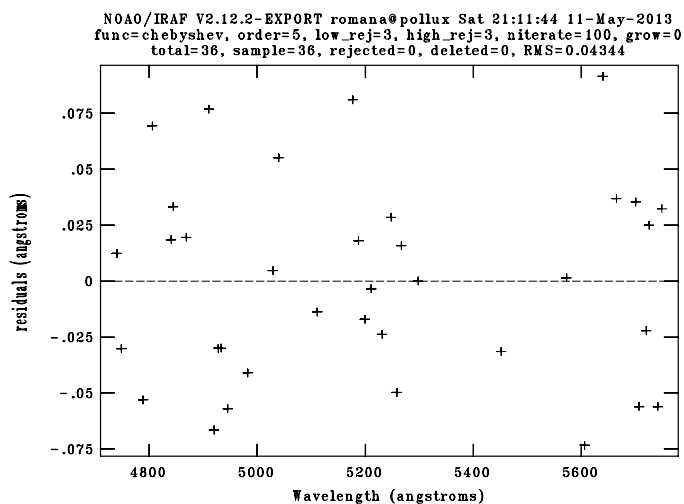
Obr. 3.9: Fitovanie krivky apertúry.

Príkaz `doslit` automaticky vygeneruje databázu porovnávaciemu spektra (Obr.3.14), ktoré sa nám objaví v novom okne. Našou úlohou je ručne označiť (pomocou `m`) 4–5 čiar rovnomerne rozložených po čípe. Fitneme (`f`), vrátíme sa späť pomocou `q` následne skontrolujeme zopár náhodných čiar, či im priradilo správne hodnoty vlnových dĺžok. Príkaz `l` označí všetky čiary z katalógu. Pre navýšenie zobrazenia počtu čiar zadáme v okne spektra `:maxfeatures 100` a teda maximálny počet čiar bude 100, ktoré načítame pomocou `l`.



Obr. 3.10: Porovnávacie spektrum thórium-argónovej výbojky.

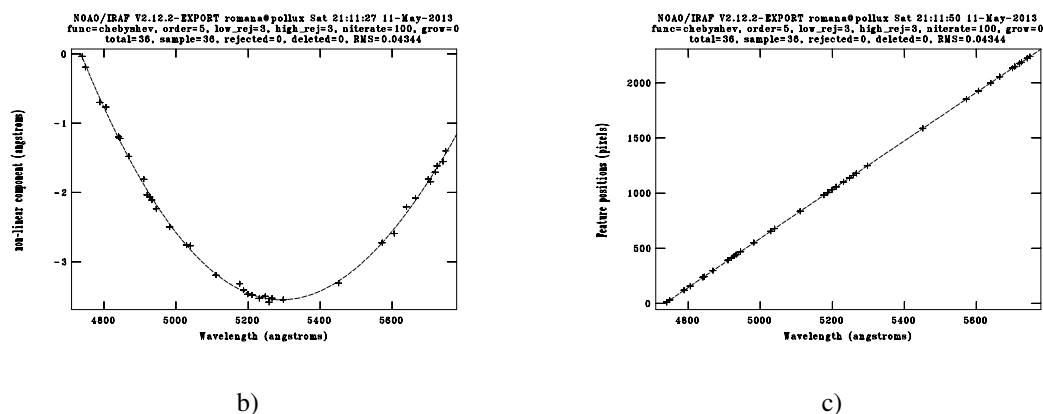
Opäť pomocou f fitneme. Objavia sa nám na čiary, ktoré zjavne nevyhovujú nášmu fitu (Obr.3.11).



Obr. 3.11: Okno na upravovanie fitu komparačného spektra.

Čiary s odchýlkou väčšiou ako 3σ navrhne sám na vymazanie. Preexponovaných alebo blendovaných sa zbavíme nastavením kurzora na tieto chybné hodnoty a stlačením d. Pričom RMS¹⁷ je chyba daného pixelu a udržiavame ju na hodnotách $<0,05$. Pomocou 1, h môžeme prehliadať lineárny (Obr. 9.10b)) a krivočiary (Obr. 9.10a) fit.

¹⁷z ang. root-mean-square = stredná kvadratická odchýlka



Obr. 3.12: Obrázky znázorňujú okná na fitovanie porovnávacieho spektra: a) Krivočiary fit, b) Lineárny fit

Pri fitovaní sa používa Chebyshevova funkcia. Stupeň polynómu zmeníme na 5. pomocou príkazu `:or 5` a aplikujeme pomocou `f`. Vyjdeme z fitu a porovnávacieho spektra ničím iným ako `g`.

Tým pádom sme identifikovali čiary, ktoré bude doslit automaticky porovnávať s našimi spektrami. Zavrhneme zmenu súradníc a potvrdíme interaktívne fitovanie disperznej funkcie. Skontrolujeme či sú fity v poriadku a potvrdíme. Doslit pomocou `REFSPEC1` priradí referenčné spektrum k našej supernove. Nakoniec si vykreslíme pomocou `splotu` spektrum vo vlnových dĺžkach v Angströmoch.

Záverečnou úlohou je úprava spektier o heliocentrickú korekciu (hc). Spočítame hc a zapíšeme do hlavičky fit súboru a prevedieme pomocou `rvcorrect`. Nastavíme parametre:

```
- ecl>epar rvcor
- (images= dui03012.ms.fit)
- (header= yes)
- (observ= Ondřejov)
- (vobs = 0.)
- (hjd = 0.)
- (vhelio= 0.18)
- (vlsr = 0.)
```

Spustíme a dostaneme tabuľku s vypočítanými hodnotami. Aplikovanie hc má za úlohu príkaz `dopcor`:

```
- ecl>epar dopcorn
- input = dui03012.ms.fit
- output = dui03012.mshc.fit
- redshift= -3.4319
```

¹⁸vypočíta hodnotu heliocentrickej radiálnej rýchlosti (km/s)

¹⁹vypočítaná hodnota pomocou `rvcor`

V momentálnom adresári sa nám vytvorí spektrum opravené o heliocentricku korekciu. Keďže táto rýchlosť predstavuje veľmi malú zanedbateľnú časť oproti rýchlosti obálky, nie je táto korekcia veľmi výrazná.

3.4 Výstupné spektrá

Po dôraznom splnení každého kroku by sme mali dostať záverečnú formu okalibrovaného spektra opraveného o heliocentricku korekciu. Popísaným postupom sa postupne spracovali všetky spektrá (Tab.3.1), ktoré mi boli poskytnuté z Ondřejovského Astronomického Ústavu.

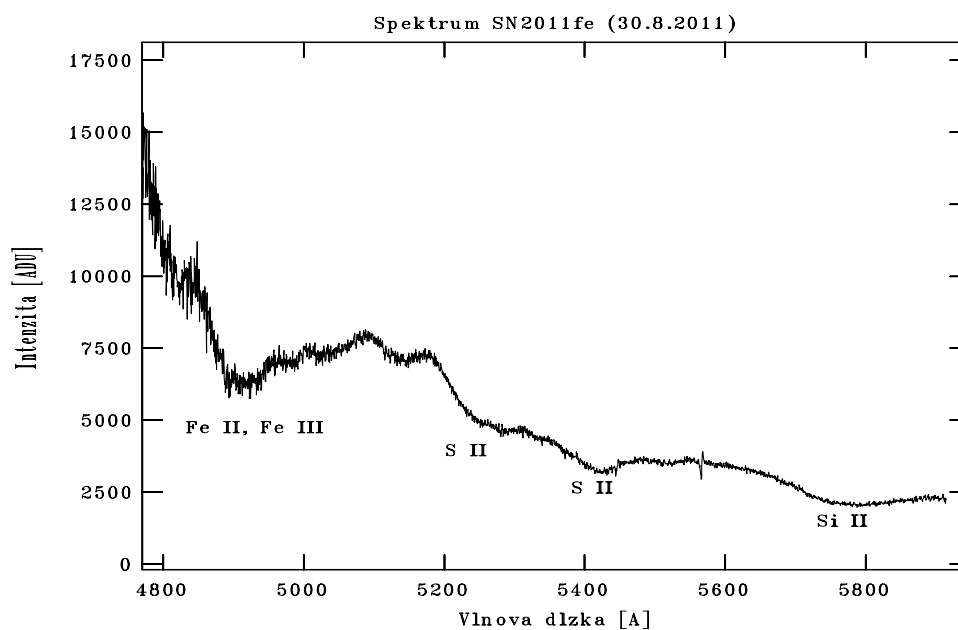
Následne je treba pristúpiť k nejednoduchšej úlohe, a to k identifikácii čiar. Snažila som sa porovnávať výsledky z viacerých zdrojov. Najprínosnejšie sa nakoniec ukázali články od R. Pereira [19] a D. Brancha [3].

Výstupné snímky spektier teda obsahujú aj identifikované absorpčné čiary prvkov síry, železa a kremíku. V prípade železa ide o prekryv ionizovaného a dvakrát ionizovaného železa. Vodík, ako najrozšírenejší prvok vo vesmíre si v našich spektrach nenašiel miesto, čo dokazuje príslušnosť SN 2011fe k typu Ia.

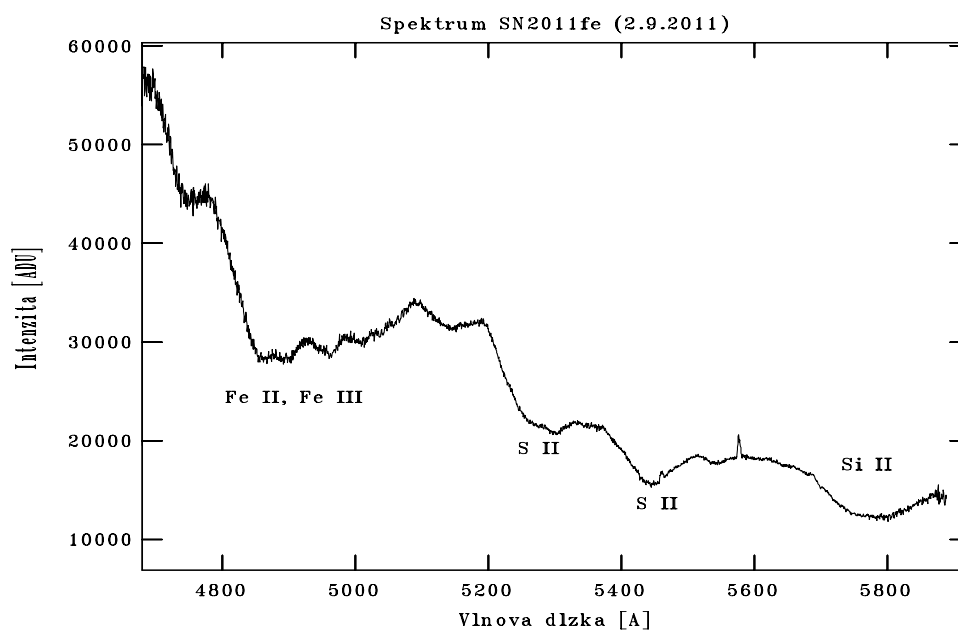
Druhé spektrum v poradí namerané dňa 2. 9. 2011 po samotnom výbuchu supernovy obsahuje na vlnovej dĺžke 5600 Å neidentifikovaný emisný vrchol. Spektrum bolo vďaka doslietu opravené o kozmiky, ktoré majú v spektre štruktúru ostrého vrcholu bez štruktúry. Čo teda neodpovedá odhalenému vrcholu, ktorý po priblížení vykazuje určitú štruktúru, a preto som sa rozhodla ponechať ho v spektre.

Tabuľka 3.1: Spektrá supernovy SN2011fe.

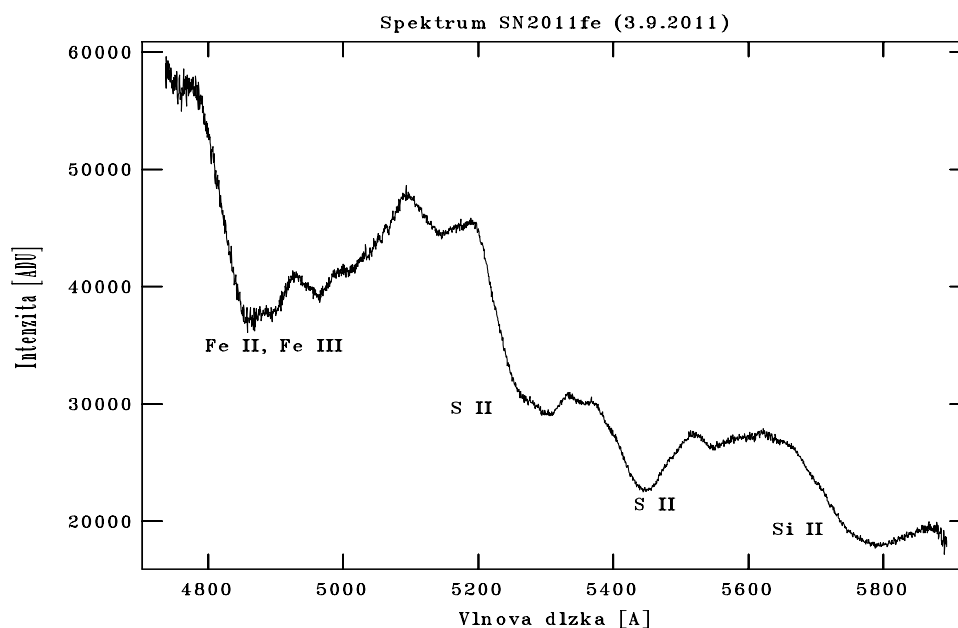
Dátum rok 2011	Názov FIT súboru *.fit
30.08.	duh30012
02.09.	dui02025
03.09.	dui03012
12.09.	dui12005
14.11.	duk14006



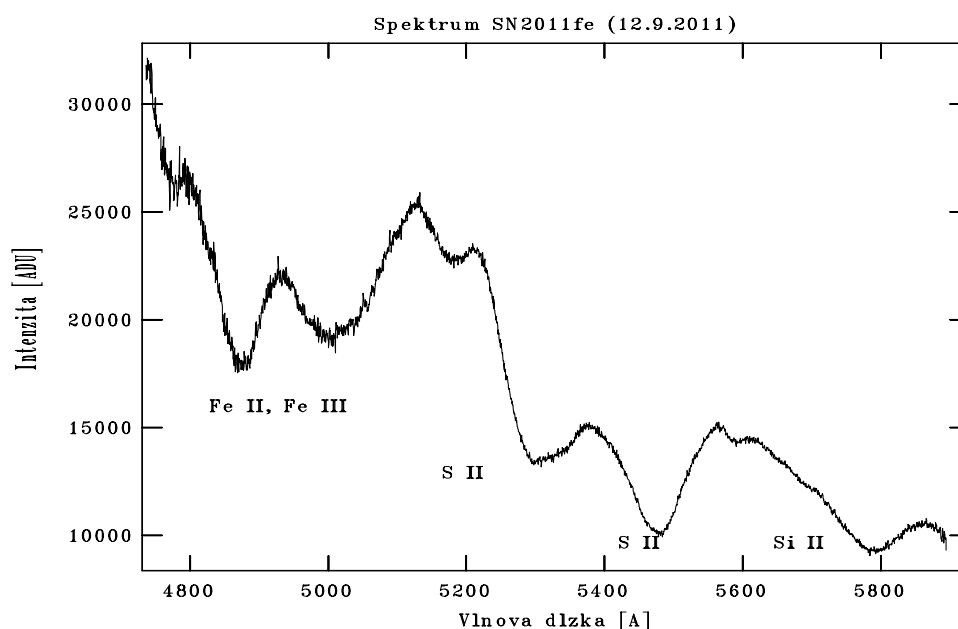
Obr. 3.13: Spektrum supernovy namerané 6 dní po samotnej explózií (dňa 30. 8. 2011 v Ondřejove). Identifikované absorpčné čiary prvkov sú označené na obrázku.



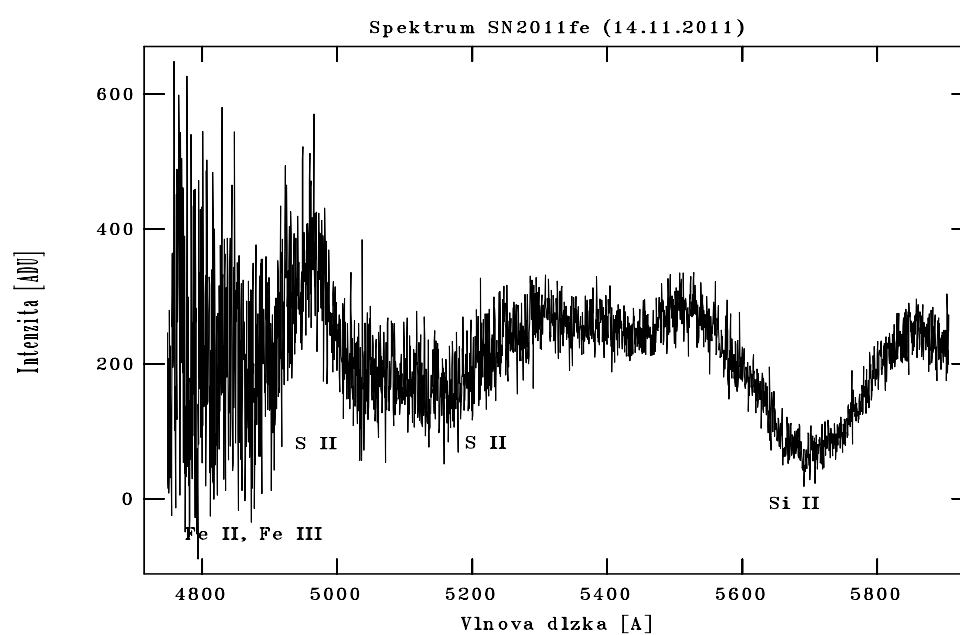
Obr. 3.14: Spektrum supernovy z dňa 2. 9. 2011 v Ondřejove. Identifikované absorpčné čiary prvkov sú označené na obrázku spolu s emisným vrcholom.



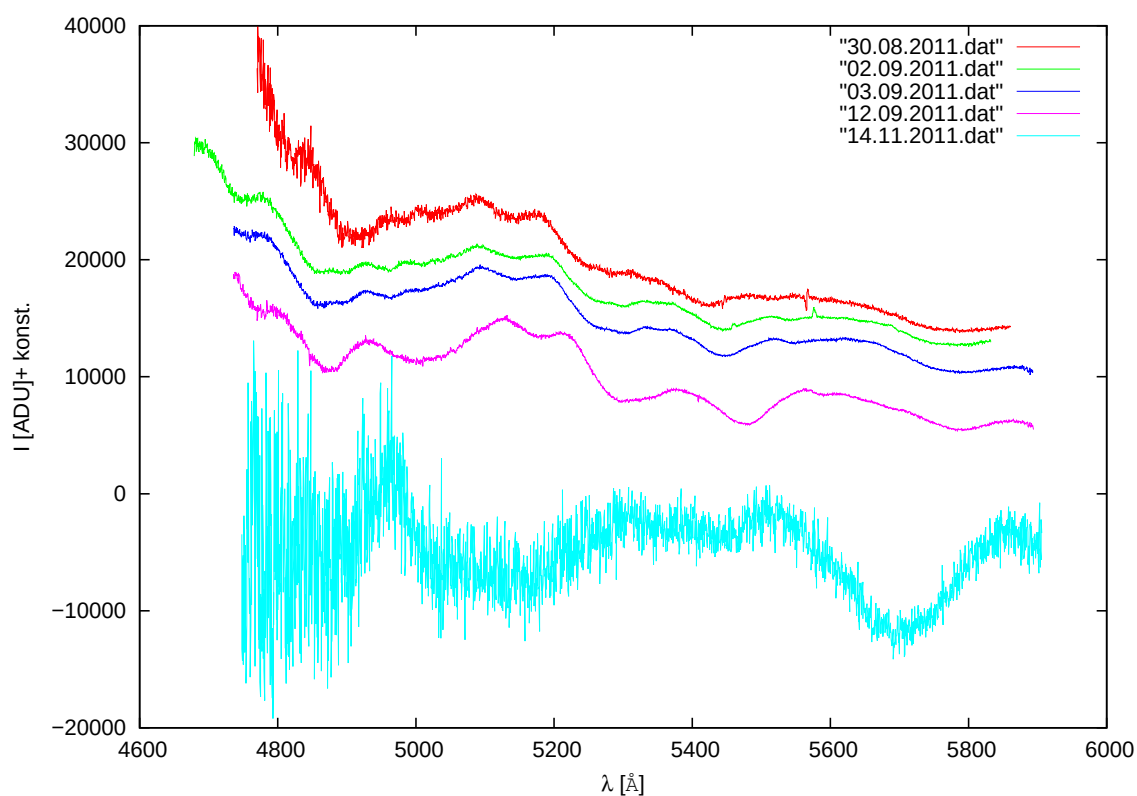
Obr. 3.15: Spektrum supernovy z dňa 3. 9. 2011 v Ondřejove. Identifikované absorpčné čiary prvkov sú označené na obrázku.



Obr. 3.16: Spektrum supernovy z dňa 12. 9. 2011 v Ondřejove. Identifikované absorpčné čiary prvkov sú označené na obrázku.



Obr. 3.17: Spektrum supernovy z dňa 14. 11. 2011 v Ondřejove. Identifikované absorpčné čiary prvkov sú označené na obrázku.

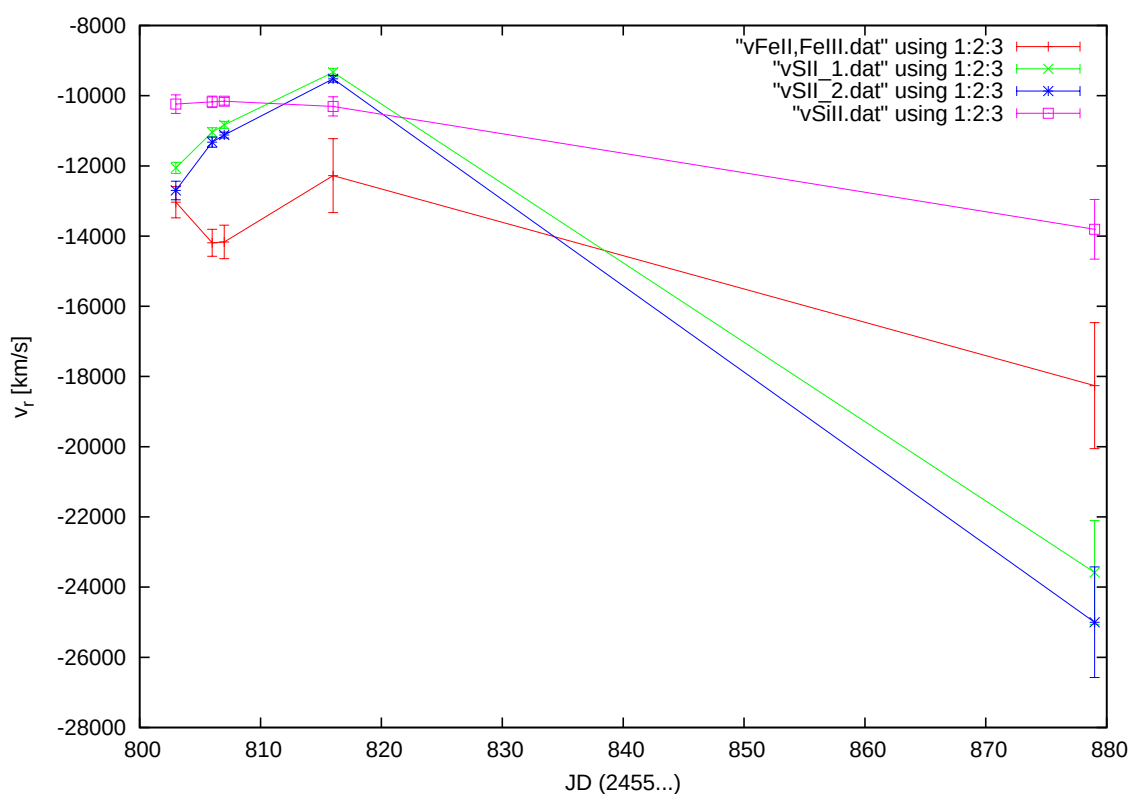


Obr. 3.18: Vykreslené všetky namerané spektra SN 2011fe.

Pomocou GNUPLOT-u sme vytvorili graf (Obr.3.18), ktorý znázorňuje vývoj jednotlivých absorpčných čiar spektra SN 2011fe podľa dátumu pozorovania. Pre lepšie znázornenie vývoja vynecháme posledné spektrum z dňa 14. 11. 2011, takže približne dva a pol mesiaca po výbuchu. Toto spektrum obsahuje veľké množstvo šumu. Supernova značne znížila svoju jasnosť.

V mojom prípade sa ale nejedná o celistvý systém, ako sú vyššie spomínané hviezdy, pre ktorý platí Dopplerov vzťah relatívne presne. Systém obálky supernovy sa ale vyznačuje značnou nestabilitou a nerovnovážnymi stavmi. Preto nie je úplne najvhodnejšie používať vyššie stanovené vzťahy. Pri hlbšej analýze a za účelom dosiahnutia reálnejších výsledkov by sa museli použiť štatistické programy a modely supernov a hviezdnych atmosfér. To by už ale presahovalo rámec úrovne bakalárskej práce. Avšak pre hrubý odhad rýchlostí a ich chýb nám postačí používať základné vzťahy.

Vypočítané radiálne rýchlosti pre rôzne prvky nám vykresľuje graf (3.20) a hodnoty sú zapísané v tabuľke (3.2). Radiálne rýchlosti pre prvky v priebehu času klesajú a záporné znamienko pri jednotlivých rýchlostiach značí pohyb smerom k pozorovateľovi.



Obr. 3.20: Časový vývoj radiálnych rýchlostí v daných identifikovaných čiarach.

Pre ionizovanú síru S II a kremík Si II dosahujú rýchlosti hodnoty približne 10 tisíc kilometrov za sekundu s chybami rádovo stovky kilometrov za sekundu. Prekryv čiar ionizovaného a dvakrát ionizovaného železa nám značne sťažuje ďalšiu analýzu. Pri ňom sa rýchlosť pohybuje okolo 13 tisíc kilometrov za sekundu. V článku P. E. Nugenta [17] udávajú určené rýchlosti vyššie o približne 3 tisíc kilometrov za sekundu.

Kompletné výsledky sú zapísané v tabuľke (3.2). Tabuľka obsahuje okrem vlnových dĺžok každej identifikovanej čiary, aj jej ekvivalentnú šírku, Juliánsky dátum a dopyčítané rýchlosti a teploty spolu s ich chybami.

Hodnoty stredov a šírky čiar spektra sme zisťovali pomocou IRAF-u a v ňom príkazu `splot` ako súčasť balíčku `onedspec`. Naskytujú sa nám dve možnosti:

- Priamou integráciou.

Ekvivalentnú šírku počíta integráciou intenzity v tomto intervale. V okne `splotu` si prejdeme kurzorom na začiatok čiary stlačíme písmeno `e` a na koniec čiary a opäť stlačíme `e`. Medzi týmito bodmi sa preloží krivka, ktorá sa berie za kontinuum. Pod grafom sa nám vypíšu hodnoty stredu čiary, ekvivalentnej šírky, kontinua a toku.

- Preloženie Gaussovou krivkou.

Opäť pracujeme v okne `splotu`. Tentokrát si ale vyznačíme oblasť, ktorú chceme Gaussovou krivkou prekladať, pomocou `d`. Potrebné je písmenom `g` označiť stred tejto krivky. Písmeno `q` nám uloží našu voľbu a posunie nás do časti, kde od nás program zisťuje, čo všetko si želáme nafitovať. Taktiež sa nám pod grafom objavia údaje o fite. Väčšina údajov je zhodná s hodnotami určenými prvou alternatívou, ibaže pri prekladaní, ešte získavame hodnotu pološírky krivky (`gfwhm`) a strednú kvadratickú odchýlku (`rms`) fitu.

Obe možnosti nám dávajú podobné výsledky, a preto nie je až tak podstatné, pre ktorú sa rozhodneme. Ja som si na určovanie stredov čiar a ekvivalentnej šírky vybrala druhú metódu.

Tabuľka 3.2: Tabuľka nameraných a vypočítaných parametrov supernovy. Je zložená zo 4 sekcii 4 identifikovaných čiar, v ktorých riadky postupne označujú dni pozorovania (prvý riadok je čiara železa zo spektra pozorovaného dňa 30. 8. 2011 atď.).

	λ [Å]	šírka čiary [Å]	JD (2455...)	v [km/s]	T (10^9) [K]
Fe II, Fe III	4919,60	46,95	803,821	-13 000 $\pm$ 450	9,99 $\pm$ 0,02
	4900,08	63,97	806,83	-14 200 $\pm$ 390	18,70 $\pm$ 0,01
	4902,97	70,85	807,79	-14 200 $\pm$ 480	22,90 $\pm$ 0,01
	4940,43	64,05	816,82	-12 280 $\pm$ 1050	18,40 $\pm$ 0,03
	4846,19	161,80	879,81	-18 260 $\pm$ 1780	122,30 $\pm$ 0,22
S II	5253,30	23,99	803,82	-12 100 $\pm$ 160	1,30 $\pm$ 0,01
	5268,82	29,80	806,83	-11 000 $\pm$ 130	2,02 $\pm$ 0,01
	5271,53	32,87	807,79	-10 800 $\pm$ 100	2,40 $\pm$ 0,01
	5296,36	38,73	816,82	-9 330 $\pm$ 109	3,44 $\pm$ 0,01
	5040,03	100,90	879,81	-23 580 $\pm$ 1480	25,20 $\pm$ 0,02
S II	5419,02	15,90	803,82	-12 700 $\pm$ 270	0,54 $\pm$ 0,02
	5443,05	15,32	806,83	-11 300 $\pm$ 145	0,50 $\pm$ 0,01
	5444,93	36,29	807,79	-11 000 $\pm$ 90	3,00 $\pm$ 0,01
	5476,75	30,16	816,82	-9 520 $\pm$ 100	1,91 $\pm$ 0,01
	5169,11	11,50	879,81	-25 000 $\pm$ 1580	0,31 $\pm$ 1,21
Si II	5766,43	44,61	803,82	-10 200 $\pm$ 270	3,30 $\pm$ 0,01
	5773,96	44,29	806,83	-10 200 $\pm$ 170	3,25 $\pm$ 0,01
	5768,12	30,51	807,79	-10 200 $\pm$ 110	1,54 $\pm$ 0,01
	5773,13	19,86	816,82	-10 300 $\pm$ 270	0,65 $\pm$ 0,02
	5698,75	148,40	879,81	-13 800 $\pm$ 850	37,40 $\pm$ 0,01

3.5.2 Efektívna teplota

Pri určovaní teploty obálky musíme vziať do úvahy, že ide o systém nestacionárny, v ktorom môže byť narušený predpoklad lokálnej termodynamickej rovnováhy. Prostredie, v ktorom teplotu skúmame, je veľmi riedke, tým pádom nahliadame aj do hlbších častí. Dostávame ale len hrubý odhad žiadanej fyzikálnej veličiny.

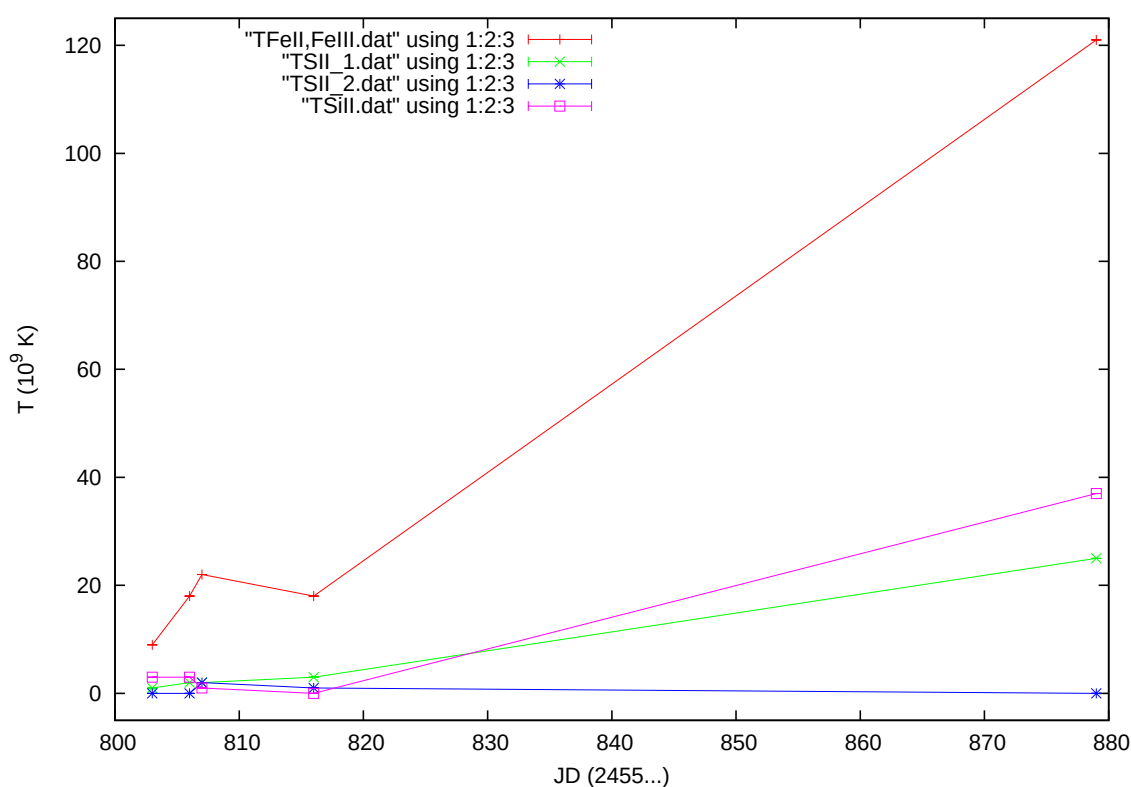
Šírka spektrálnej čiary daného prvku je značne ovplyvnená napríklad tepelným pohybom častíc žiarenia, pričom dochádza k jej rozšíreniu, ktoré nazývame Dopplerovo rozšírenie. V kombinácii s Maxwellovým rozdelením rýchlostí dostávame vzťah, ktorý v sebe skrýva hľadanú teplotu.

$$\Delta \lambda_D = \frac{2\lambda}{c} \left[\ln 2 \left(\frac{2kT}{M} \right) \right]^{\frac{1}{2}},$$

Zo vzťahu jednoducho vyjadríme teplotu:

$$T = M \frac{c^2}{8k \ln 2} \left(\frac{\Delta \lambda}{\lambda} \right)^2.$$

kde $\Delta \lambda$ označuje Dopplerovskú šírku čiary, k predstavuje známu Boltzmannovu konštantu s hodnotou $k = 1,3806 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ a nakoniec M , ako absolútna atómová hmotnosť určená súčinom relatívnej atómovej hmotnosti daného prvku m (Tab.3.3) a atómovej hmotnostnej jednotky²¹ m_u .



Obr. 3.21: Časový vývoj teplôt daných identifikovaných čiar supernovy.

²¹ 1/12 hmotnosti atómu uhlíka ^{12}C , a to je približne $1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

Tabuľka 3.3: Tabuľka hmotností prvkov. Zdroj [34].

Názov prvku	m [g/mol]	M (10^{-26}) [kg]
železo	55,847	9,273
síra	32,066	5,989
kremík	28,086	4,664

Výsledné hodnoty teploty spolu s chybami sú zapísané v tabuľke (Tab.3.2) a časový priebeh vykresľuje graf (Tab.3.21). Závěry sa ale značne odlišujú od predpokladanej reality pri klasických systémoch. Teplota by samozrejme mala v závislosti na čase klesať, no v tomto prípade stúpa. Ako už bolo vyššie spomínané tieto sústavy nemôžeme brať ako klasické hviezdne sústavy, v ktorých sú ustálené rovnovážne stavy.

Kapitola 4

Záver

Záverom by som chcela zhrnúť poznatky a výsledky, ku ktorým som sa dopracovala pri štúdiu supernovy SN 2011fe, ktorej surové spektrá mi boli poskytnuté z Astronomického ústavu v Ondřejově. Supernovy patria k výnimočným hviezdnyh divadlám. Ich vlastnosťami, vývojom, pôvodom a mechanizmami vzniku som sa zaoberala v prvých kapitolách mojej práce. Tento teoretický úvod som doplnila prehľadom historických supernov. Náplňou mojej práce bolo štúdium ich observačných aspektov. Teoretickú rovinu týchto aspektov popisujem pri rozdelení supernov na typy I a II a k nim prislúchajúce podtypy. Ako najužitočnejšie typy z hľadiska výskumu sa ukázali supernovy typu Ia.

SN 2011fe patrí práve k týmto typom, čo som dokázala na základe identifikácie čiar mne poskytnutého spektra, pretože supernovy typu Ia sú charakteristické absorpčnými čiarami kremíka a deficitom čiar vodíka v spektre. Na základe porovnaní s vedeckými článkami a konzultácií s mojim vedúcim a konzultantom, som bola ďalej schopná identifikovať prekryv ionizovaného a dvakrát ionizovaného železa a v neposlednom rade aj čiary ionizovanej síry. Podstatný krok, ktorý predchádzal identifikácii čiar, bola samotná redukcia spektier. K redukcii som používala program IRAF, ktorý vďaka svojim schopnostiam umožnil upravenie surových spektier o zero a flat field snímky. Príslušné balíčky tohto programu som použila na úpravu apertúry, porovnanie s komparačnými spektrami thórium-argónovej lampy, až po skoro záverečný stav výstupných spektier, tie sa totiž ešte opravovali o heliocentrickú korekciu. Mojou snahou bolo tiež vytvoriť akúsi používateľskú príručku, ktorá by slúžila ako návod na spracovávanie spektier v programe IRAF. Jedná sa totiž o často používaný nástroj praktickej astronómie využívaný na spektroskopiu množstva rozličných objektov, nie len supernov.

Pri skúmaní vlastností tejto supernovy je dôležité zdôrazniť, že s ňou nie je možné pracovať ako s klasickými hviezdnyh systémami, a teda ani používať všeobecné zákonitosti a vzťahy kvôli nerovnovážnym stavom v týchto systémoch. Pre ďalšiu analýzu by bolo nutné pracovať so zložitejšími prostriedkami, ako modelovaním apod. Preto som zvolila jednoduchšiu alternatívu, ktorá ale viedla len k hrubým odhadom skúmaných výsledkov. Rýchlosti dosahujú okolo 10 000 km/s a keď zoberieme do úvahy aj obrovské teploty, dostávame dôvod rozmazania a nedokonalostí čiar spektra. V porovnaní s článkami, ktoré boli zamerané na výskum SN 2011fe, sa moje výsledky rýchlostí líšia približne o 3 000 km/s. Hoci ide len o hrubé odhady, naše výsledky odpovedajú realite pomerne dobre.

So stále lepšími a novšími technológiami stúpa možnosť podrobnejšieho preskúmania týchto záverečných fáz vývoja hviezd. Vďaka nim bolo pred pár rokmi preukázané zrýchľovanie rozpínania vesmíru. No stále ostávajú záhadou základné fakty o pôvodcoch týchto procesov. Dokonca výskumy zo začiatku tohto roka preukazujú existenciu (pri silne zmagnetizovaných bielych trpaslíkov) vyššej Chandrasekharovej medze, s akou sme sa stretli predtým.

Sú to práve supernovy, ktoré nám poskytli väčšiu časť prvkov potrebných na vyformovanie našej Zeme do stavu, aby bola vhodná pre život a v neposlednom rade aj (prvkov, z ktorých sme tvorení.)o stvorenie našich vlastných tiel. Túto myšlienku pekne vystihuje výrok Carla Sagana: „We are star stuff!“. Nakoniec máme so supernovami spoločného viac ako si myslíme. Sme vlastne len pozostatkami po obrovských hviezdnych explóziách.

Literatúra

- [1] D. Branch: *Type Ia supernovae and the Hubble constant*, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 1998
- [2] D. Branch: *Type Ia supernovae as standard candles*, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 1992
- [3] D. Branch, L. CH. Dang, N. Hall, et al.: *Comparative Direct Analysis of Type Ia supernova Spectra. II. Maximum Light*, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2006
- [4] A. C. Calder, B. K. Krueger, A. P. Jackson, D. M. Townsley: *The influence of chemical composition on models of Type Ia supernovae*, eprint arXiv:1303.2207, 2013
- [5] B. W. Carroll, D. A. Ostlie: *An Introduction to Modern Astrophysics*, Pearson International Edition, 2007
- [6] N. Dallaporta: *On the Frequency of Type I and Type II supernovae*, Astronomy and Astrophysics, 1973
- [7] U. Das, B. Mukhopadhyay: *New mass limit for white dwarfs: super-Chandrasekhar type Ia supernova as a new standard candle*, Physical Review Letters, 2013
- [8] J.B. Doggett, D. Branch: *A Comparative study of supernova light curves*, Astronomical Journal, 1985
- [9] Š. Dvořáková: *Studium spektroskopických dvojhvězd*, Bakalářská práce PřF, 2011
- [10] Alexei V. Filippenko: *Optical spectra of supernovae*, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 1997
- [11] P.L. Gay: *IRAF: the Power, the Pain, the Zen (paper)*, The Journal of the American Association of Variable Star Observers, 2005
- [12] R. J. Hanisch, A. Farris, W. E. Greisen: *Definition of the Flexible Image Transport System (FITS)*, Astronomy and Astrophysics, 2001
- [13] W. Hillebrandt, M. Kromer, F. K. Röpke, A. J. Ruiter: *Towards an understanding of Type Ia supernovae from a synthesis of theory and observations*, eprint arXiv:1302.6420, 2013
- [14] P. Kurfurst: *Astrofyzika supernov*, Diplomová práce PřF, 2010
- [15] Z. Mikulášek, J. Krtička: *Základy fyziky hvězd*, skriptá, Brno, 2005
- [16] R. Minkowski: *supernovae and supernova remnants*, Annales d'Astrophysique, 1964

- [17] P. E. Nugent, M. Sullivan, S. B. Cenko, et al.: *supernova 2011fe from an exploding carbon-oxygen white dwarf star*, eprint arXiv:1110.6201 2011
- [18] D. E. Osterbrock: *Who Really Coined the Word supernova? Who First Predicted Neutron Stars?*, American Astronomical Society, 12/2001
- [19] R. Pereira, R. C. Thomas, G. Alering, et al.: *Spectrophotometric time series of SN 2011fe from the Nearby supernova Factory*, Astronomy & Astrophysics manuscript no. SN2011fe, 2013
- [20] A. G. Riess, A. V. Filippenko, P. Challis, A. Clocchiatti, et al.: *Observational Evidence from supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant*, Astronomical Journal, Vol.116, num.3, 1998
- [21] Starrfield: *Theoretical Studies of Accretion of Matter onto White Dwarfs and the Single Degenerate Scenario for supernova of Type Ia*, Bulletin of the Astronomical Society of India, 2012
- [22] L. A. L. da Silva: *Type I supernovae*, Astrophysics and Space Science, p. 215-236., 1993
- [23] P. Škoda, M. Šlechta: *Reduction of spektra exposed by the 700 mm CCD camera of the Ondřejov telescope coudé spectrograf*, Astronomical Institute ASCR 99, 22-35, 2002
- [24] V. Vanýsek: *Základy astronómie a astrofyziky*, Academia, Praha, 1980.
- [25] B. Wang, Z. Han *Progenitors of type Ia supernovae* New Astronomy Reviews 56, p. 122-14, 2012
- [26] J. C. Wheeler, R. H. Harkness: *Type I supernovae*, Reports on Progress in physics, 1990
- [27] F. Zwicky, M. L. Humason, A. M. Gomes, H. S. Gates: *Progress Report on supernovae* Publications of the Astronomical Society of the Pacific, p.351-354, 1961

Elektronické zdroje

- [28] <http://www.asu.cas.cz/>
- [29] <http://astronuklfyzika.cz/Gravitace4-2.htm>
- [30] <http://iraf.noao.edu/iraf/web>
- [31] <http://hubblesite.org/gallery>
- [32] <http://flickrhivemind.net>
- [33] <http://daviddarling.info/encyclopedia/N/nucleosynthesis.html>
- [34] <http://www.lennotech.com/calculators/molecular/molecular-weight-calculator>
- [35] <http://chandra.harvard.edu/photo>
- [36] https://en.m.wikipedia.org/wiki/Type_Ic_supernova
- [37] <http://iraf.noao.edu/>
- [38] <http://pleione.asu.cas.cz/slechta/OES/pro-ian/>

[39] <http://stelweb.asu.cas.cz/web/>

[40] <http://old-www.noao.edu/kpno/specatlas/thar/>

[41] <http://hea-www.harvard.edu/RD/ds9/site/Home.html>

[42] http://iraf.noao.edu/iraf/web/new_stuff/ecl_beta.html