

MASARYKOVA UNIVERZITA  
Přírodovědecká fakulta  
Ústav teoretické fyziky a astrofyziky



## BAKALÁRSKÁ PRÁCA

**3D spektroskopie Seyfertových galaxií:  
analýza optických emisních čiar ionizovaného plynu  
v centrálnych kiloparsekoch galaxie M51**

Stanislav Kováč

Vedúci bakalárskej práce RNDr. Bruno Jungwiert, Ph.D.

2010

Za vedenie, rady a pripomienky k tejto práci by som sa týmto rád poďakoval svojmu vedúcemu bakalárskej práce RNDr. Brunovi Jungwiertovi, Ph.D. Ďalej by som sa rád poďakoval Mgr. Tereze Bartákovej za poskytnutie zredukovaných a kalibrovaných spektroskopických dát galaxie M51 a návodu k ich analýze a Bc. Milanovi Prvákovi za jeho ochotu a pomoc pri inštalácii programu E3D na spracovanie spektier.

Moja veľká vďaka patrí aj mojej mame za podporu v štúdiu a priateľke Aničke, ktorá mi bola oporou.

Prehlasujem, že som svoju bakalársku prácu napísal samostatne podľa pokynov svojho vedúceho a výhradne s použitím citovaných prameňov. Súhlasím so zapožičiavaním práce a jej zverejňovaním.

V Brne dňa

Stanislav Kováč

Abstrakt:

Cieľom tejto práce je oboznámenie sa so základmy analýzy a modelovania 3D spektroskopických pozorovaní ionizovaného plynu v aktívnych galaxiách. Konkrétne, sú analyzované optické spektrá z centrálnych časti blízkej špirálovej galaxie M51, získanej 3D spektrografom PMAS-PPAK na 3.5-metrovom ďalekohľade observatória Calar Alto v Španielsku. Práca pozostáva z kompilačnej a praktickej časti. V prvej časti sú zahrnuté základné poznatky o žiarení a spektrách, Seyfertových galaxiách, mezihvezdneho prostredia a rotačnej krivke galaxii. Praktická časť zahŕňa jednak vytvorenie jednoduchých teoretických modelov rýchlostných polí, jednak analýzu observačných dat, ktorej výstupom sú intenzitné a rýchlostné mapy galaxie M51 vo dvoch emisných čiarach ionizovaného plynu: povolenej Balmerovej čiare  $H_\alpha$  a zakázanej čiare [OIII]5007A.

Kľúčové slová: 3D spektroskopia, aktívne galaxie, rýchlostné pole, Seyfertove galaxie.

Abstract:

The aim of this work is the introduction of basic analysis and modeling of 3D spectroscopic observations of ionized gas in active galaxies. Specifically are analyzed optical spectra from the central part of the close spiral galaxy M51, obtained by the 3D-PPAK PMAS spectrograph on the 3.5-meter Telescope at the Calar Alto Observatory in Spain. The work consists of a compilation and a practical part. The first part includes basic knowledge of radiation and spectra, Seyfert galaxies, interstellar environment and galaxy rotation curve. The practical part includes both the creation of simple theoretical models of velocity fields and analysis of observational data, the output of the velocity and intensity maps of the galaxy M51 in the two emission lines of the ionized gas: the permitted Balmer line  $H_\alpha$  and prohibited [OIII], 5007A.

Keywords: 3D spectroscopy, active galaxies, velocity field, Seyfert galaxy.

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Spektrum</b>	<b>5</b>
2.1	Zdroje emisie . . . . .	5
2.2	Vznik spektrálnych čiar . . . . .	7
2.3	Profil spektra a rozšírenie čiar . . . . .	9
2.3.1	Rozšírenie v dôsledku lokálnych efektov . . . . .	10
2.3.2	Rozšírenie v dôsledku vonkajších efektov . . . . .	11
2.4	Optické spektrum galaxie . . . . .	12
2.5	Spektrum galaxie . . . . .	13
2.6	Príchod 3D spektroskopie . . . . .	13
<b>3</b>	<b>Seyfertove galaxie</b>	<b>15</b>
3.1	Historický prehľad . . . . .	15
3.2	Seyfertove galaxie . . . . .	16
3.3	Model zjednotenia aktívnych galaxií . . . . .	17
<b>4</b>	<b>Medzihviezdne prostredie a rotácia galaxii</b>	<b>20</b>
4.1	Medzihviezdne prostredie . . . . .	20
4.2	Rotačná krivka špirálových galaxií . . . . .	21
<b>5</b>	<b>Praktická časť - rýchlostné pole galaxií</b>	<b>22</b>

5.1	Jednoduché modely rýchlostného poľa (rotácia, outflow) . .	22
5.2	3D spektroskopia galaxie M51 . . . . .	26
5.2.1	Spektrograf PMAS-PPAK . . . . .	27
5.2.2	Galaxia M51 (NGC 5194) . . . . .	28
5.3	Analýza spektier pomocou programu E3D . . . . .	29
<b>6</b>	<b>Záver</b>	<b>32</b>
	<b>Literatúra</b>	<b>34</b>

# Kapitola 1

## Úvod

Aktívne galaxie vzbudzujú veľkú pozornosť pre ich mimoriadne veľkú aktivitu pochádzajúcu z veľmi malých oblastí v ich centre. Ešte stále nie sú uspokojivé závery na koexistenciu aktívneho jadra a hostujúcej galaxie. Preto je nutné študovať aktívne galaxie veľmi podrobne s cieľom odhaliť posun hmoty, rotáciu, štruktúru galaxie alebo korelácie medzi hostujúcou galaxiou a aktívnym jadrom.

Neodmysliteľnou súčasťou pre získavanie detailných máp galaxii je stále sa zväčšujúci priemer pozemských aj orbitálnych ďalekohľadov, citlivejšie spektrogrfy a najmä metódy na simultánne získavanie stoviek spektier z plošných útvarov - galaxii. Ide o takzvanú celoplošnú spektroskopiu (Integral Field Spectroscopy), vďaka ktorej máme k dispozícii obrovské množstvo informácií o danej galaxii.

Keď už máme k dispozícii stovky spektier jedného plošného útvaru (galaxia alebo hmlovina) príde na rad úloha ich spracovať. Mnohé observatória či astronomické komunity si programujú vlastné programy a formáty na spracovanie týchto tzv. "data kociek". Práve táto nejednotnosť v používaných formátoch a metódach spracovania data kociek spôsobila pomalý rozvoj 3D spektroskopie.

Ako odpoveď na túto nejednotnosť vznikol projekt E3D, ktorého úlohou bolo zhotovenie pokiaľ možno čo najuniverzálnejšieho prostredia na analýzu a spracovanie data kociek. S. Sanchez naprogramoval program E3D, ktorý sa mal stať širokorozšíreným nástrojom na spracovanie data kociek. Žiaľ nerozšíril sa podľa očakávaní a tvorca programu ostal viac menej sám na vylepšovaní E3D. Pre málo záujemcov na zdokonalovaní programu E3D (ktorý by mali dostatočné programátorské zručnosti) je program nie celkom

stabilný a najmä mimoriadne náročný na inštaláciu. Avšak keď sa prekonajú ťažkosti s inštaláciou poskytuje program pomerne rýchlu cestu k základnej analýze dát.

Ak sa podarí získať výstupy z programu E3D, môžeme ich porovnávať s modelmi a zisťovať odchýlky medzi modelovou galaxiou a skutočnou. Aj veľmi precízne a komplexné modely však nedokážu úplne popísať pozorované javy. V tejto práci sa modelujú jednoduché modely rýchlostných polí galaxií pri jednoduchej rotačnej krivke.

# Kapitola 2

## Spektrum

1

Spektrum elektromagnetického žiarenia pokrýva všetky vlnové dĺžky, od rádiových cez viditeľné až po gama žiarenie. Keďže vieme, že fyzikálne zákony platia ako tu na Zemi tak aj vo vzdialených galaxiách a medzigalaktickom priestore, môžeme z každej oblasti elektromagnetického žiarenia získať množstvo informácií o danom telese. Posledných pár desiatok rokov sa pozorujú galaxie a iné objekty čoraz intenzívnejšie vo všetkých vlnových dĺžkach a dnes sa podľa toho astronómia špecializujú do rôznych oborov, napr. rádiová astronómia, optická, infračervená atď. V tejto práci sa používa optická oblasť vlnových dĺžok. Pred samotnou analýzou spektra galaxie si stručne uvedieme rôzne formy žiarenia, príčiny vzniku spektrálnych čiar, ich charakteristické črty a vplyv prostredia na zmenu tvaru čiar.

### 2.1 Zdroje emisie

Existuje niekoľko základných typov emisie:

#### *Tepelné žiarenie*

Je idealizované žiarením absolútne čierneho telesa. Absolútne čierne teleso je teleso v tepelnej rovnováhe so svojím okolím a je dokonalým pohlcovačom a vyžarovačom žiarenia. Žiarenie absolútne čierneho telesa je izotropické, nepolarizované a má hladké spojité spektrum.

---

<sup>1</sup>Najviac použitá literatúra v tejto kapitole: Active Galactic Nuclei (Robson, 1996), Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei (Osterbrock, 1989), Studium mezihvězdného prostředí směrem k hvězdě HD 36841 (Zychová, 2008) a wikipedia.com



Absolútne čierne teleso je extrémne ťažké zostrojiť v laboratórnych podmienkach, na druhej strane hviezdy sú celkom presne popísané pomocou tohto ideálneho prípadu. Keďže žiadne žiarenie nie je odrazené, je všetko žiarenie, ktoré pozorujeme žiarením toho telesa. Tepelné žiarenie je popísané Planckovým vyžarovacím zákonom pomocou vlnovej dĺžky  $\lambda$ :

$$B(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/(\lambda kT)} - 1}, \quad (2.1)$$

respektíve pomocou frekvencie  $\nu$ :

$$B(\nu, T) = \frac{2h\nu^2}{c^2} \frac{\nu}{e^{h\nu/(kT)} - 1}, \quad (2.2)$$

kde  $c$  je rýchlosť svetla vo vákuu,  $k$  je Boltzmanova konštanta,  $h$  je Planckova konštanta,  $T$  je teplota telesa v kelvinoch. Vzťahy popisujú hustotu žiarenia - energiu vyžiarenú na intervale vlnových dĺžok  $(\lambda, \lambda + d\lambda)$  telesom o teplote  $T$ .

#### *Netepelné žiarenie*

Elektróny pohybujúce sa v magnetickom poli  $B$  sú vystavené pôsobeniu Lorentzovej sily  $F_{Lor} = q(v \times B)$ , ktorá ich núti sa pohybovať po závitnici okolo indukčných čiar. Pri tomto pohybe sa elektróny pohybujú so zrýchlením a preto strácajú energiu vo forme vyžiarených fotónov. Za predpokladu rovnosti dostredivej a Lorentzovej sily dostaneme vzťah pre frekvenciu žiarenia

$$\nu_c = \frac{Be}{2\pi m_e}, \quad (2.3)$$

kde  $m_e$  je hmotnosť elektrónu. Toto žiarenie sa nazýva cyklotrónové. V astrofyzike aktívnych galaxií sa častejšie stretáme s relativistickými rýchlosťami kde vzťah 2.3 prejde do tvaru

$$\nu_s = \gamma^2 \nu_c, \quad (2.4)$$

kde  $\gamma$  je takzvaný relativistický člen a platí  $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$ .

Spektrum je potom dané sumou spektier jednotlivých elektrónov. Synchrotrónové žiarenie je mocninné, vystihuje ho tzv. power-law zákon  $F \sim \nu^\alpha$ , kde  $\alpha$  je spektrálny index s hodnotami medzi -3 a +2,5 v závislosti od typu objektu.

#### *Comptonov jav a inverzný Comptonov jav*

Keď sa zrazí vysokoenergetický fotón s menej energetickou časticou (elektrónom) nastane tzv. Comptonov jav. Energia elektrónu sa zvýši a fotón stratí časť svojej energie. Môže nastať aj proces opačný tzv. inverzný Comptonov jav. Comptonov jav teda nastáva vtedy, keď sa zrazí vysokoenergetický elektrón s fotónom a fotón získa energiu na úkor elektrónu. Inverzný Comptonov jav pôsobí preto ako chladiaci mechanizmus pre vysokoenergetické častice a teplota preto nepresiahne  $10^{12}\text{K}$ .

#### *Párová produkcia*

Vzniká v oblastiach veľmi vysokých energií gama žiarenia, kedy dochádza ku kreácii, resp. anihilácii častíc a fotónov. Pri anihilácii elektrónu s pozitronom vzniká žiarenie  $\gamma + \text{ďalšia } \gamma$  (alebo iná častica) s energiou 511 keV. Tento proces je však zriedkavý.

## 2.2 Vznik spektrálnych čiar

Spektrálne čiary sú výsledkom interakcie medzi kvantovým systémom (zvyčajne atómami, niekedy molekulami alebo jadrom atómu) a fotónom. Keď má fotón presne danú hodnotu energie aby mohol spôsobiť zmenu v energii stavu systému (v prípade atómu je to elektrón, ktorý zmení orbitál), je absorbovaný fotón. Potom bude spontánne znovu vyžiarený, buď v rovnakej frekvencii ako pôvodný, alebo v kaskáde, kde suma energie všetkých vyžiarených fotónov bude ekvivalentná energii jedného absorbovaného fotónu (za predpokladu, že sa systém navráti do pôvodného stavu).

V závislosti od typu plynu, zdroju fotónu a toho čo dorazí do samotného detektoru, buďe vyprodukovaná buď emisná alebo absorpčná čiara. Tieto faktory sú vyjadrené tromi Kirchhoffovými zákonmi o žiarení:

1. *Pevné telesá a husté plyny pri zohriatí vydávajú spojité tepelné spektrum.*

2. *Menej hustý plyn pri zohriatí dáva vzniknúť jasnej emisnej čiary, prítomnosť a sila čiar v spektre je určená chemickým zložením plynu a teplotou na ktorú je ohriaty.*
3. *Keď sa plyn nachádza medzi horúcejším zdrojom spojitého žiarenia a pozorovateľom, spektrum je prerušované absorpčnými čiarami od daného plynu. Prítomnosť a sila jednotlivých čiar je závislá na chemickom zložení a teplote plynu.*

Frekvencia, respektíve vlnová dĺžka spektrálnej čiary nám presne určí o aký prvok ide. Pomocou spektra hviezd boli určené niektoré prvky skôr ako boli objavené na Zemi, ako napríklad hélium. Spektrálne čiary prvkov sú často usporiadané v unikátnej postupnosti, ako napríklad Balmerová séria vodíku, pochádzajúca z preskoku z/do druhej kvantovej hladiny do/z vyššej energetickej hladiny.

V astrofyzike sa označuje neutrálny prvok rímskou I, jedenkrát ionizovaný prvok II a tak ďalej, napríklad Fe IX je osemkrát ionizované železo.

Sú štyri základné typy interakcie fotónu s atómom: viazane-viazané, viazane-voľné, voľne-viazané a voľne-voľné.

#### *Viazane-viazané*

Viazane-viazané prechody sa odohrávajú vo vnútri atómu (alebo molekuly prípadne iónu), kde je atóm buď excitovaný na vyššiu energetickú hladinu, alebo deexcitovaný na nižšiu hladinu. K excitácii atómu môže dôjsť dvoma spôsobmi. Buď ako nepružná zrážka atómu s inou časticou, alebo absorpciou fotónu o vlnovej dĺžke, ktorá zodpovedá rozdielu energii jednotlivých energetických hladín, medzi ktorými k prechodu došlo. Opačný proces je deexcitácia. Deexcitácia môže byť zrážková, kedy dôjde k superpružnej zrážke s inou časticou, alebo žiarivá, kedy je pri deexcitácii vyžiarený fotón o vlnovej dĺžke, ktorá zodpovedá rozdielu energii jednotlivých hladín. Viazane-voľné prechody dávajú vznik absorpčných a emisných čiar.

#### *Viazane-voľné*

Pri viazane-voľnom prechode opúšťa elektrón atóm. Nastáva buď nepružnou zrážkou, alebo absorpciou fotónu o energii rovnakej prípadne vyššej ako je ionizačná energia atómu.

### *Voľne-viazané*

Voľne-viazaný prechod je v podstate opak prechodu viazane-voľného. Nastáva keď je voľný elektrón zachytený ionóm a znovu usadený na niektorú z energetických hladín. Môže k tomu dôjsť dvoma spôsobmi. Ako žiarivá rekombinácia, kedy je emitovaný do priestoru fotón, ktorého vlnová dĺžka zodpovedá pôvodnej kinetickej energii elektrónu a energii stavu do ktorého sa elektrón rekombináciou dostane. A ako trojčasticová rekombinácia, pri ktorej sa do zrážky okrem iónu a elektrónu pripojí i iná častica odnášajúca zvyšok energie.

### *Voľne-voľné*

Voľne-voľné prechody sú dané zákonom zachovania hybnosti. Voľný elektrón emituje (alebo absorbuje) fotón s energiou, o ktorú sa potom zníži (alebo zvýši) kinetická energia elektrónu. Tento proces nastane iba pri blízkom prelete okolo iónu, ktorý na seba prenesie časť energie a hybnosti fotónu. Voľne-voľné prechody poukazujú na prítomnosť horúceho ionizovaného plynu, kde majú častice veľkú kinetickú energiu. Najbežnejším príkladom sú oblasti ionizovaného vodíku obklopujúce horúce hviezdy spektrálnych typov O a B. Tieto oblasti sa nazývajú H II oblasti a vyžarujú interakciou voľného elektrónu s pozitívne ionizovaným vodíkovým iónom, protónom.

## 2.3 Profil spektra a rozšírenie čiar

Spektrálna čiara nikdy nebude mať podobu limitne úzkej čiary, Diracovej delta funkcie, vždy bude mať merateľné rozpätie, ktoré vymedzia takzvané krídla čiary. Rozpätie, alebo takzvané spektrálne rozšírenie, môže byť spôsobené množstvom príčin, vymenovaných nižšie. Stred spektrálnej čiary môže byť navyše posunutý voči vlnovej dĺžke prvku v pokoji pri bežných teplotách a tlakoch tu na Zemi.

Dôvody spektrálneho rozšírenia môžu byť rozdelené do dvoch hlavných kategórii: rozšírenie spôsobené lokálnymi podmienkami a rozšírenie v dôsledku vonkajších podmienok. Rozšírenie v dôsledku lokálnych podmienok nastáva v malom priestore okolo zdroja žiarenia, zvyčajne dostatočne malého aby nastala lokálna termodynamická rovnováha. Rozšírenie v dôsledku vonkajších podmienok je spôsobené v zmene spektrálneho rozloženia ako svetlo prechádza prostredím od zdroja k pozorovateľovi. Taktiež to môže byť dô-

sledok kombinácie žiarenia od niekoľkých iných oblastí, ktoré sú navzájom ďaleko od seba.

### 2.3.1 Rozšírenie v dôsledku lokálnych efektov

#### *Prirodzené rozšírenie*

Heisenbergov princíp neurčitosti dáva do vzťahu dĺžku trvania stavu (kvôli spontánnej emisii alebo Augerovým procesom) s energiou stavu, podľa rovnice:

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}, \quad (2.5)$$

kde  $\hbar$  je redukovaná planckova konštanta,  $E$  je energia stavu a  $t$  je čas. Pomaly trvajúce prechody majú úzke čiary, zatiaľ čo rýchlo trvajúce prechody majú široké spektrálne čiary. Tento efekt vyústí do neposunutej čiary majúcej Lorentzov profil, ktorý sa dá popísať

$$I(\nu) \propto \frac{1}{(\nu - \nu_0)^2 + \left(\frac{\gamma}{4\pi}\right)^2}, \quad (2.6)$$

kde  $I$  je intenzita žiarenia,  $\nu_0$  je frekvencia strednej čiary a  $\gamma$  je šírka profilu čiary.

#### *Rozšírenie tlakom*

Prítomnosť okolitých častíc ovplyvní žiarenie individuálnej častice. Sú dva hlavné prípady, kedy to môže nastať: Rozšírenie nárazmi a Kvázistatické rozšírenie.

Rozšírenie nárazmi: zrážky iných častíc s emitujúcou časticou prerušujú proces emisie. Trvanie zrážok je oveľa kratšie ako trvanie procesu emisie. Tento efekt je závislý ako na hustote tak aj na teplote plynu. Rozšírenie je popísané Lorentzovým profilom a môže nastať aj posun strednej čiary.

Kvázistatické rozšírenie: prítomnosť iných častíc pozmení energetické hladiny vyžiarených častíc a tým aj pozmení frekvenciu vyžiareného žiarenia. Trvanie tohto pôsobenia je oveľa dlhšie ako trvanie procesu emisie. Tento efekt je skôr závislý od hustoty plynu ako od teploty.

### *Teplné dopplerovo rozšírenie*

Atómy v plyne, ktoré sú vyžarované budú mať rozptyl rýchlosti. Každý fotón bude posunutý do modrej alebo červenej oblasti spektra, v závislosti od relatívnej rýchlosti zdroja k pozorovateľovi, nastáva takzvaný Dopplerov jav. Čím vyššia teplota plynu, tým širší rozptyl rýchlostí v plyne. A keďže je spektrálna čiara kombináciou všetkých vyžiarených fotónov, čím vyššia teplota plynu, tým širšie budú spektrálne čiary emitované plynom. Tento efekt rozšírenia je popísaný Gaussovým profilom a nenastáva posun stredu čiary. Závislosť rýchlosti na teplote pre jednu dimenziu vyjadruje vzťah:

$$v = \sqrt{\frac{kT}{m}}, \quad (2.7)$$

kde  $k$  je Boltzmanova konštanta.

### **2.3.2 Rozšírenie v dôsledku vonkajších efektov**

Niektoré efekty rozšírenia spektrálnych čiar sú dané podmienkami skôr vo väčších vzdialenostiach, ako je len blízke okolie zdroja žiarenie, ktoré priamo ovplyvňuje žiarenie. Môžeme to rozdeliť na dve hlavné skupiny:

#### *Rozšírenie opacitou*

Elektromagnetické žiarenie, ktoré putuje od zdroja k pozorovateľovi môže byť absorbované počas svojej cesty priestorom. Táto absorpcia závisí od vlnovej dĺžky. Čiara je rozšírená, pretože fotóny na krídle čiary majú menšiu reabsorpčnú pravdepodobnosť než uprostred čiary.

#### *Makroskopické Dopplerovo rozšírenie*

Žiarenie pohybujúceho sa objektu je vystavené Dopplerovmu posunu, pre jeho vlastný i relatívny pohyb voči pozorovateľovi. Odlišné časti hviezdy, alebo galaxie budú mať rozšírenie do modrej oblasti spektra vyvolané časťou objektu, ktorý sa k nám približuje a rozšírenie do červenej oblasti spektra od miest, ktoré sa od nás vzdalujú. Pre Dopplerov posun nameranej frekvencie  $\Delta\nu$  platí vzťah:

$$\Delta\nu = \nu_0 \frac{v_r}{c}, \quad (2.8)$$

kde  $c$  je rýchlosť svetla,  $\nu_0$  je frekvencia žiarenia zdroja a  $v_r$  je radiálna rýchlosť voči pozorovateľovi.

### *Prístrojové rozšírenie*

Prístrojové rozšírenie je dané konečnou spektrálnou rozlišovacou schopnosťou spektrografu. Nie je gaussovské, ale v prvom priblížení sa aproximuje gaussovskou.

Spektrálne emisné čiary sú popísané tromi parametrami - vlnovou dĺžkou, šírkou čiary a silou čiary. Sila čiary je určená ako celková energia čiary, plocha pod krivkou čiary. Šírka čiary sa často vyjadruje pomocou FWHM (Full Width at Half Maximum). FWHM je šírka čiary v jednej polovici maxima čiary. Šírka čiary sa môže definovať aj na nulovej hladine intenzity čiary, označuje sa ako FWZI (Full Width at Zero Intensity). Profil spektrálnych čiar sa dá často fitnúť jednoduchou Gasovou funkciou:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(x-\mu)^2/(2\sigma^2)}, \quad (2.9)$$

po dosadení FWHM a vyriešení dostaneme vzťah medzi  $\sigma$  a FWHM:  $\text{FWHM} = 2\sqrt{2\ln 2}\sigma \approx 2.3548\sigma$ .

## 2.4 Optické spektrum galaxie

Čiary v spektre mnohých objektov by sa dali rozdeliť na dva typy - povolené a zakázané. Povolené čiary sú najbežnejšie v astrofyzike (ich vznik bol popísaný vyššie) a v našom pozemskom svete. Avšak zakázané čiary boli najprv pozorované v emisných hmlovinách. Najprv si fyzici mysleli, že sa jedná o nový typ prvku, ktorý astrofyzici pozorovali, neskôr začiatkom tridsiatych rokov fyzici pochopili mechanizmus vzniku zakázaných čiar.

Zakázané čiary sú produkované atómom keď deexcituje na nižšiu hladinu energie v špeciálnom prostredí, ktoré má extrémne nízku hustotu, čo je v medzihviezdnom prostredí bežné (preto sa na Zemi nepozoruje a volá sa zakázaná čiara). Prítomnosť zakázaných čiar nám odкрýva informáciu o hustote a tlakoch daného prostredia. Príkladom zakázanej čiary v optickom obore je doublet [O III] s jasnejšou čiarou na 500.7 nm a slabšou na 495.9 nm.

## 2.5 Spektrum galaxie

Galaxia pozostáva  $10^6$  až  $10^{12}$  hviezd, plynu, prachu a temnej hmoty. Jej spektrum je teda sumou, všetkých týchto zložiek, okrem temnej hmoty. Temná hmota sa na spektre galaxie priamo neprejaví, i keď tvorí väčšinu hmoty celej galaxie.

Hviezda má kontinuálne tepelné spektrum s prevažne absorpčnými čiarami. Sila a šírka absorpčných čiar prezrádza chemické zloženie, teplotu povrchu a žiarivosť. Zistením Doplerovho posunu spektrálnych čiar, môžeme určiť radiálnu zložku rýchlosti a ak sú Doplerove posuny časovo periodické, odhalia nám ďalšiu zložku systému. Hviezdy teda prispievajú najmä absorpčnými čiarami k spektru galaxie.

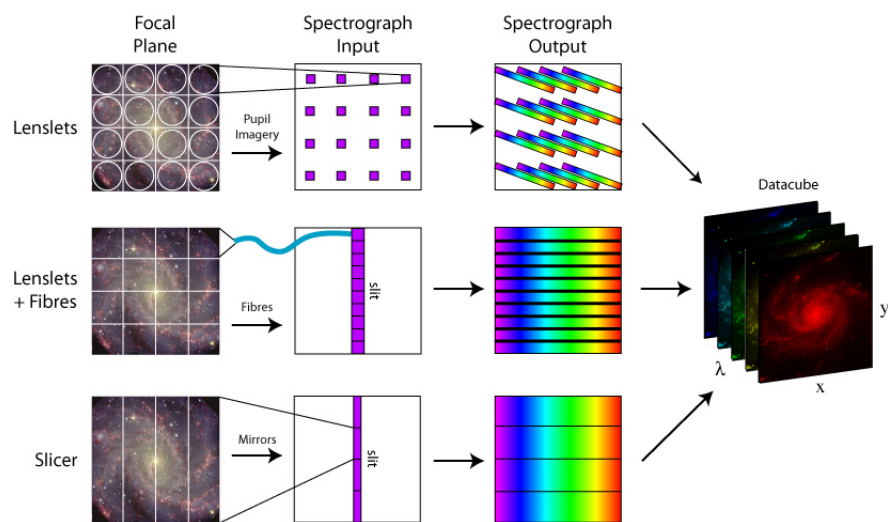
Plyn v galaxii sa dá pozorovať vo forme horúcich, ionizovaných mračnách, takzvané oblasti HII. Tieto oblasti sa dajú pozorovať vďaka horúcim mladým hviezdám, ktoré ožarujú hmlovinu v ultrafialovej oblasti. Preto sa oblasti H II najviac pozorujú v miestach búrlivého zrodu hviezd, v ramenách špirálových galaxii a v nepravidelných galaxiách bohatých na medzihviezdny plyn. Oblasti H II sú veľmi žiarivé a tak, i keď obsahujú iba zopár emisných čiar, k spektru galaxie prispievajú veľkou časťou. Okrem oblastí H II majú emisné čiary aj pozostatky po supernovách a planetárne hmloviny, no tieto sú oveľa menej žiarivé. Ionizovaný plyn teda prispieva najmä emisnými čiarami k spektru galaxie.

Prach predstavuje relatívne chladnú zložku v galaxii a preto nežiari v optickom obore. Skôr spôsobuje absorpciu svetla hviezd a hmlovín.

## 2.6 Príchod 3D spektroskopie

Koncom 80tych rokov 20. stor. sa začala vývíjať metóda plošnej spektroskopie, IFS (z angl. Integral Field Spectroscopy), umožňujúcej získať spektrá z rôznych oblastí plošných útvarov. Používajú sa na to celoplošné spektrografy, vid' obrázok. Pre zistenie kinematiky galaxie je nevyhnutné mať spektrá s rôznych oblastí galaxie. Pri 3D spektroskopii sa spektrá z plošných útvarov získavajú simultánne, teda stovky až tisíce spektier v rámci jednej expozície. Fakt, že je to simultánne získanie je pre 3D spektroskopiu podstatné, existujú totiž i iné techniky, ktoré umožňujú získať spektrá z plošných objektov, ale nie simultánne (napríklad posúvaním štrbiny v klasickej štrbinovej spektroskopii alebo tzv. Fabry-Perotova spektroskopie).





Obrázok 2.1: Základné techniky na získanie celoplošnej spektroskopie. Najpoužívanejšia metóda je prostredná - vlákna, káble s alebo bez šošoviek. V tejto práci sa tiež využívajú iba vlákna. Prevzaté od Allington-Smith a iní 1998.

# Kapitola 3

## Seyfertove galaxie

1

Bežné galaxie, pri pozorovaní ďalekohľadom sa vyznačujú jasnejšou centrálnou výduťou, okolo ktorej je hmlistý fliačik. Existujú však galaxie, ktoré majú extrémne jasnú centrálnu výduť, v niektorých prípadoch tak jasnú, že prežiarí celú ostatnú časť galaxie. V ďalekohľade, je potom vidieť bodovo jasný zdroj svetla, ktorý skôr pripomína hviezdu ako galaxiu. Extrémne veľká žiarivosť poukazuje na obrovské energetické výkony daných typov galaxii, ktoré sa preto nazývajú aktívnymi galaxiami.

Aktívne galaxie sú galaxie, ktoré nežiaria iba svetlom hviezd, ale majú výraznú aktivitu jadra, pochádzajúcu z akrečného disku okolo veľmi hmotného objektu, pravdepodobne čiernej diery. Keďže aktivita pochádza z jadra, preto sa niekedy označujú ako AGN (z angl. Active galactic nucleus), aktívne galaktické jadro. Seyfertove galaxie sú v kategórii aktívnych galaxii.

### 3.1 Historický prehľad

Ako prvý pozoroval aktívnu galaxiu v roku 1908 E. A. Fath. Bola to galaxia NGC 1068, v ktorej si všimol silné emisné čiary. Edwin Hubble potvrdil emisné čiary NGC 1068 a u dvoch iných galaxii. Ďalšie aktívne galaxie pozoroval až Carl Seyfert v roku 1943 a všimol si podobnosť so spektrom galaxie NGC 1068. Carl Seyfert ako prvý jasne poukázal na to, že niekoľko galaxii

---

<sup>1</sup>Najviac použitá literatúra v tejto kapitole: Active Galactic Nuclei(Robson, 1996), Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei(Osterbrock, 1989), Seyfert galaxies(Weedman, 1977) a wikipedia.com

má veľmi jasné jadro, ktoré prejavuje vysokoionizované emisné čiary. Tieto emisné čiary sú silnejšie ako absorpčné čiary u bežných galaxii. Galaxie so širokými emisnými čiarami, malým jasným jadrom pokrývajúcim širokú oblasť ionizácie sa dnes volajú **Seyfertove** galaxie.

V roku 1963, B.E. Markarian publikoval štúdiu so 41 pekulárnymi galaxiami, medzi ktorými boli aj aktívne galaxie pozorované Carlom Seyfertom. Všimol si, že jadrá niektorých galaxii prejavujú netepelné žiarenie čím myslel, že emisia žiarenia, nepochádza priamo z fotosfér hviezd. V tom istom roku, Maartin Schmidt rozpoznal v spektre objektu 3C273 Balmerovú sériu vodíku, ktorá bola silne posunutá do červenej oblasti spektra. Objekt 3C273 bol predtým klasifikovaný ako kvázi-stelárny rádiový zdroj (quasi-stellar radio source, QSO), známejší pod označením **Kvazar**. Spočiatku sa nevedelo ako sú od nás Kvasary ďaleko preto si niektorí astronómovia mysleli, že sa jedná o nový typ hviezdy. Práve veľký červený posuv v spektre kvasarov naznačoval, že sa jedná o vzdialené objekty, najskôr nový typ aktívnej galaxie.

V priebehu sedemdesiatych rokov, so zdokonalením spektroskopických metód, sa objavilo veľké množstvo ďalších Seyfertových galaxii. V roku 1974, Khachikian a Weedman roztriedili Seyfertove galaxie na dve triedy. Nové rozdelenie bolo výhradne založené na spektroskopických vlastnostiach.

Neskôr boli rozdelené aj Kvazary podľa spektra a rádiového žiarenia na niekoľko tried. Objavila sa aj nová trieda aktívnych galaxii, takzvaných Blazarov, v mnohom podobných Kvazarom a takzvaných LINER (Low-Ionization nuclear emission-line region) objektov, s menšou ionizáciou ako Seyfertove galaxie, ale väčšou ako normálne galaxie.

Astrofyzici už skoro tušili, že medzi mnohými typmi aktívnych galaxii, ktoré majú rozdielne spektroskopické prejavy, existuje jednotný, alebo podobný fyzikálny mechanizmus. Avšak až v roku 1993 prácou R. Antonucciho o zjednocujúcom modeli aktívnych galaxii a kvazarov [9], astrofyzici dostali model, ktorý celkom uspokojivo vysvetľuje pozorované skutočnosti a poukazuje na spoločnú podstatu aktívnych galaxii.

## 3.2 Seyfertove galaxie

Seyfertove galaxie sú triedou aktívnych galaxii, ktorých jadro obsahuje spektrálne emisné čiary z vysokoionizovaného plynu. Ich jadro patrí do podtriedy aktívnych galaktických jadier označovaných skratkou AGN (Active Galactic Nuclei). V centre všetkých AGN sa nachádza najpravdepodobnejšie masívna

čierna diera s hmotnosťou v rozmedzí  $10^6 M_{\odot}$  až  $10^9 M_{\odot}$ . Spektrum Seyfertových galaxii obsahuje v optickej oblasti jasné emisné čiary vodíka, hélia, dusíka, kyslíka a síry. Tieto emisné čiary majú široké Dopplerovo rozšírenie s FWHM, ktoré je ekvivalentné rýchlostiam od  $500 \text{ km s}^{-1}$  až  $10000 \text{ km s}^{-1}$ .

Seyfertove galaxie sa podľa spektra delia na dve hlavné triedy: **Seyfert 1** a **Seyfert 2**. Rozdelenie vychádza z faktu, že prvý typ má rozdielnu šírku povolených a zakázaných čiar, zatiaľ čo typ druhý má podobnú šírku povolených a zakázaných čiar.

Galaxie **Seyfert 1** majú veľmi široké emisné čiary, ktoré zahrňujú povolené čiary (H I, He I, H II) aj užšie zakázané čiary (ako napr. [O III]). Šírka čiar je spôsobená Dopplerovým rozšírením, naznačujúcim, že povolené čiary pochádzajú zo zdrojov s rýchlosťami medzi  $1000$  a  $5000 \text{ km s}^{-1}$ , zatiaľ čo zakázané čiary pochádzajú z oblastí s rýchlosťami okolo  $500 \text{ km s}^{-1}$ . V tomto type teda pozorovať oblasti aj širokých aj úzkych čiar.

Galaxie **Seyfert 2** majú iba úzke čiary (povolené aj zakázané) s charakteristickými rýchlosťami približne  $500 \text{ km s}^{-1}$ , oblasť sa označuje ako narrow line region (oblasť úzkych čiar). Každé spektrum taktiež vykazuje hladké spojité kontinuum, ktoré neobsahuje čiary a pochádza z malého centrálného zdroja. Obrovský jas galaxii Seyfert 1, ktorý predčí jas z hviezd, pochádza práve z tohoto kontinua. Kontinuum pozorované u galaxii Seyfert 2 je podstatne slabšie.

Seyfertove galaxie tvoria 10 - 15% všetkých známych galaxii. Väčšina Seyfertových galaxií a LINERov je v skorých Hubbleových typoch E, S0, Sa a Sb (z toho najviacej v Sa), ale s menšou frekvenciou sa vyskytujú aj v neskorých špirálnych typoch Sc-Sm a nepravidelných galaxiách.

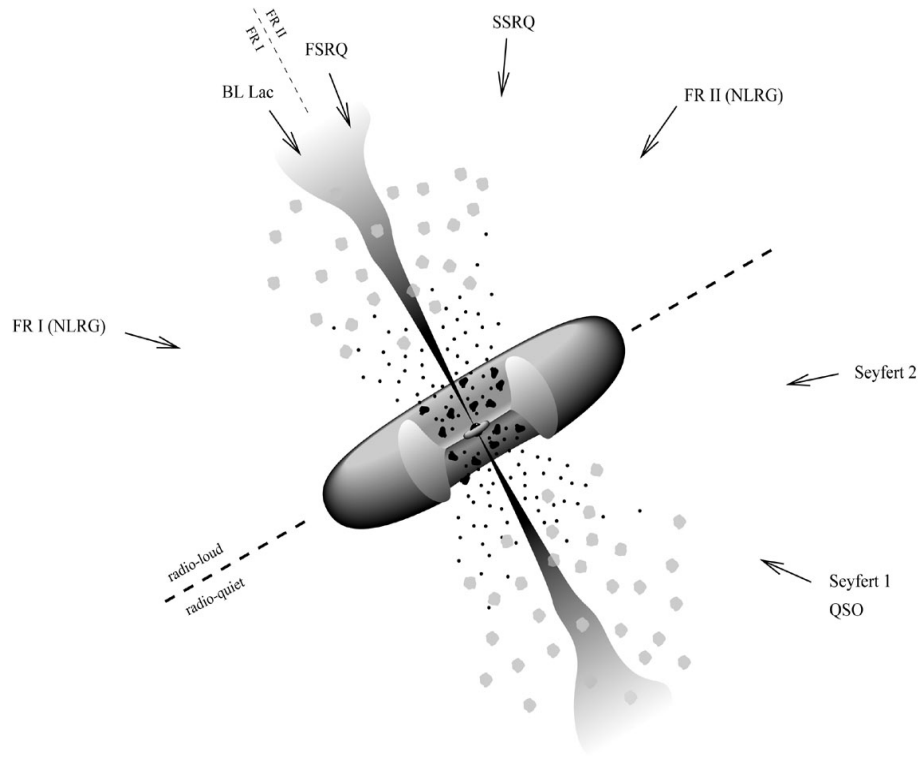
### 3.3 Model zjednotenia aktívnych galaxií

V jadre aktívnych galaxii sa uvoľňujú energie väčšie ako výkon celej ostatnej galaxie, v prípade niektorých kvazarov až tisíckrát, a pritom veľkosť jadra je len zlomok rozmeru celej galaxie. Žiarivosť typickej AGN je rádovo  $10^{12} L_{\odot}$  čo je príliš veľa na to aby jeho zdrojom bola hviezda. Najhmotnejšie hviezdy majú hmotnosť rádovo  $10^2 M_{\odot}$  čo zodpovedá žiarivosti  $10^5 L_{\odot}$ . Hmotnejšie hviezdy, ktoré by uvoľňovali energiu termonukleárnymi reakciami nemôžu existovať. Ako zdroj na uvoľnenie obrovského množstva energie sa ukazuje byť vhodná silná gravitácia. Najpravdepodobnejší kandidát na taký výkon je centrálna supermasívna čierna diera.

Centrálne čierne diery nasávajú materiál z okolia približne 1 pc v podobe hviezd a medzihviezdneho plyu a prachu. Materiál padá po špirálovej dráhe smerom k centru a vytvára tak akrečný disk, ktorého rozmery sú rádovo porovnateľné s rozmermi Slnčnej sústavy. I pre relatívne blízke galaxie vo vzdialenosti 100 Mpc to predstavuje uhlový rozmer rádovo  $10^{-6}$  oblúkovej sekundy. Takú rozlišovaciu schopnosť zatiaľ nemá žiaden teleskop a preto na pozorovanie akrečných diskov v stredoch galaxii si budeme musieť ešte počkať.

Astrofyzici si dlhé roky mysleli, že rôzne typy aktívnych galaxii sú odlišné objekty, dnes sa všeobecne uznáva, že sa jedná o fyzikálne blízke objekty. A ich rozdielnosť je spôsobená najmä týmito tromi faktormi:

1. niektoré objekty sú podstatne žiarivejšie než iné;
2. niektoré objekty produkujú výtrysky, iné nie;
3. daná aktívna galaxia môže mať podstatne odlišné vlastnosti pri rôznom sklone k pozorovateľovi.



Obrázok 3.1: Model zjednotenia aktívnych galaxii. Blazary sú tie objekty, ktoré majú výtrysk (jet) v rovine pohľadu. Galaxie Seyfert 1 pozorujeme vtedy, keď je vidieť priamo do centrálnych oblastí galaxie odkiaľ je pozorovateľná oblasť úzkych i širokých čiar. Pri pozorovaní Seyfertových galaxií z boku je oblasť širokých čiar prekrytá torusom prachu a plynu galaxie, ktorá sa nazýva Seyfert 2. Treba rozlišovať medzi úzkym jetom a oveľa širším ionizačným kuželom. Orientácia ionizačného kužela nemusí byť kolmá na rovinu galaxie, v skutočnosti môže byť ľubovoľná. Prevzaté od Torres a Anchordoqui 2004.

# Kapitola 4

## Medzihviezdne prostredie a rotácia galaxii

1

### 4.1 Medzihviezdne prostredie

Priestor vyplnení prachom a plynom v galaxii medzi hviezdami sa nazýva medzihviezdne prostredie. Medzihviezdne prostredie obsahuje ióny, atómy, molekuly, väčšie prachové častice, kozmické žiarenie a galaktické magnetické pole. Plyn zastupuje 99 % hmoty v medzihviezdnom prostredí a 1% pripadá na prachové častice. Hviezdy vznikajú v hustých medzihviezdných mračnách a počas svojej existencie interagujú s medzihviezdnou hmotou, obohacujú ju o ťažšie prvky prostredníctvom hviezdneho vetra, nov alebo supernov.

Medzihviezdne prostredie sa podľa teploty (v kelvinoch) a hustoty (počet atómov v  $\text{cm}^3$ ) delí na týchto 5 zložiek.

1. molekulárny plyn (10-20 K,  $100\text{-}10^5 \text{ cm}^{-3}$ )
2. chladný neutrálny (atomárny) plyn (cold neutral medium, CNM, 100 K,  $1\text{-}10 \text{ cm}^{-3}$ )

---

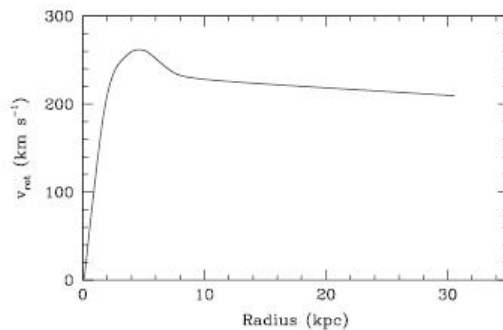
<sup>1</sup>Najviac použitá literatúra v tejto kapitole: Galactic Astronomy (Binney, 1996), Kinematic Measurements of Gas and Stars in Spiral Galaxies (Beckman a iní, 2004) a wikipedia.com

3. teplý neutrálny (atomárny) plyn (warm neutral medium, WNM, 10000 K,  $0.1\text{cm}^{-3}$ )
4. teplý ionizovaný plyn (warm ionized medium, WIM, 10000 K,  $0.1\text{cm}^{-3}$ )
5. horúci ionizovaný plyn (hot ionized medium, HIM,  $10^6\text{K}$ ,  $0.001\text{ cm}^{-3}$ )

## 4.2 Rotačná krivka špirálových galaxií

Skutočnosť, že galaxie rotujú bola objavená v roku 1914 zo spektra galaxii M81 a M104. Až 80 hodín expozičného času bolo potrebných v roku 1918 na zachytenie dostatočne kvalitného spektra galaxie M31 a získanie z neho rotačnej krivky.

Z pozorovaní žiarivej hmoty špirálových galaxii (hviezdy, plyn a prach) vyplíva, že najviac hmotností je sústredeno v centrálnej výduti galaxie a smerom k okrajom klesá. Keď sa však porovná teoretický model rozloženia rýchlosti rotácie na základe Newtonovho potenciálu a skutočných rýchlosti, ukáže sa veľká nezrovnalosť, ktorá poukazuje na ďalšiu chýbajúcu hmotu. Táto chýbajúca hmota sa označuje ako tmavá hmota, pretože ju nemôžeme priamo vidieť.



Obrázok 4.1: Rotačná krivka typickej špirálovej galaxie. Do polomeru  $R_0$  sa dá považovať rýchlosť za lineárnu v závislosti od polomeru. Od  $R_0$  je rýchlosť približne konštantná. Prevzaté od J. E. Beckman a ďalší (2004).



# Kapitola 5

## Praktická časť - rýchlostné pole galaxií

### 5.1 Jednoduché modely rýchlostného poľa (rotácia, outflow)

Hneď od začiatku treba upozorniť na fakt, že modelovanie rýchlostných polí je problematika nesmierna náročná a komplikovaná. Svojím rozsahom ďaleko presahuje obtiažnosť bakalárskych i diplomových prác. Problémom je, že ionizačný kužel v Seyfertových galaxiách, ktorý spôsobuje radiálnu zložku rýchlostí (inflow, outflow), ukazuje náhodnú orientáciu voči rovine galaxie. Vo väčšine prípadov je ionizačný kužel v rozmedzi  $60^\circ - 90^\circ$  voči rovine galaxie, ale sú i prípady kedy je ionizačný kužel v rovine galaxie. Jednoduché modelovanie ukazované v tejto práci predpokladá práve tento prípad.

Pri pozorovaní galaxie pomocou 3D spektroskopie získame ako jeden z výstupov rýchlostné pole galaxie. Toto rýchlostné pole sa potom porovnáva s modelovou mapou rýchlostného poľa galaxie s daným sklonom inklinácie  $i$ . Do určitej vzdialenosti  $R_0$  od centra galaxie sa dá vyjadriť rýchlosť rotácie ako kruhová, splňujúca

$$v_c = v_0 \frac{r}{R_0}, \quad (5.1)$$

kde  $v_c$  je kruhová rýchlosť na kružnici s polomerom  $r$ . Pre  $r > R_0$  platí:  $v_c = v_0$ , inak povedané rýchlosť je konštantná.

Galaktický disk je často modelovaný zoskupením koncentrických kruhových diskov. Majmä ľubovoľný bod B na koncentrickej kruhovej dráhe tenkého disku. Bod B bude mať rýchlosť v ktorej má dve zložky rýchlosti, tangenciálnu  $v_\theta$  a radiálnu  $v_r$  smerujúcu do centra (inflow) alebo od centra (outflow). Keďže je to tenký disk zložka z bude nulová. My pozorujeme priemet skutočných rýchlostí na oblohu, priemet spôsobí, že jedna os galaxie bude zkrátená o cosínus inklinácie a my budeme pozorovať elipsu. Čiže pre pozorovanú rýchlosť  $v_0$  a skutočnou rýchlosťou na galaxii  $v_g$  platí vzťah:

$$v_0 = R_{0g}v_g, \quad (5.2)$$

kde  $R_{0g}$  je matica transformácie podľa y (uhly v astronómii sa merajú od osy y proti smeru hodinových ručičiek):

$$R_{0g} = \begin{pmatrix} -\cos i & 0 & \sin i \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin i & 0 & -\cos i \end{pmatrix}$$

kde  $i$  je inklinácia.

Keď aplikujeme transformáciu v ose y dostaneme pre pozorovanú rýchlosť v ose z čo je  $v_{los}$  (line of sight) vzťah:

$$v_{los} = -\sin i v_{xg} - v_{zg} \cos i. \quad (5.3)$$

Prechod medzi  $(v_r, v_\theta)$  a  $(v_{xg}, v_{yg})$  ukazujú nasledujúce štyri rovnice:

$$v_r = v_x \cos \theta + v_y \sin \theta, \quad (5.4)$$

$$v_\theta = v_x \sin \theta + v_y \cos \theta, \quad (5.5)$$

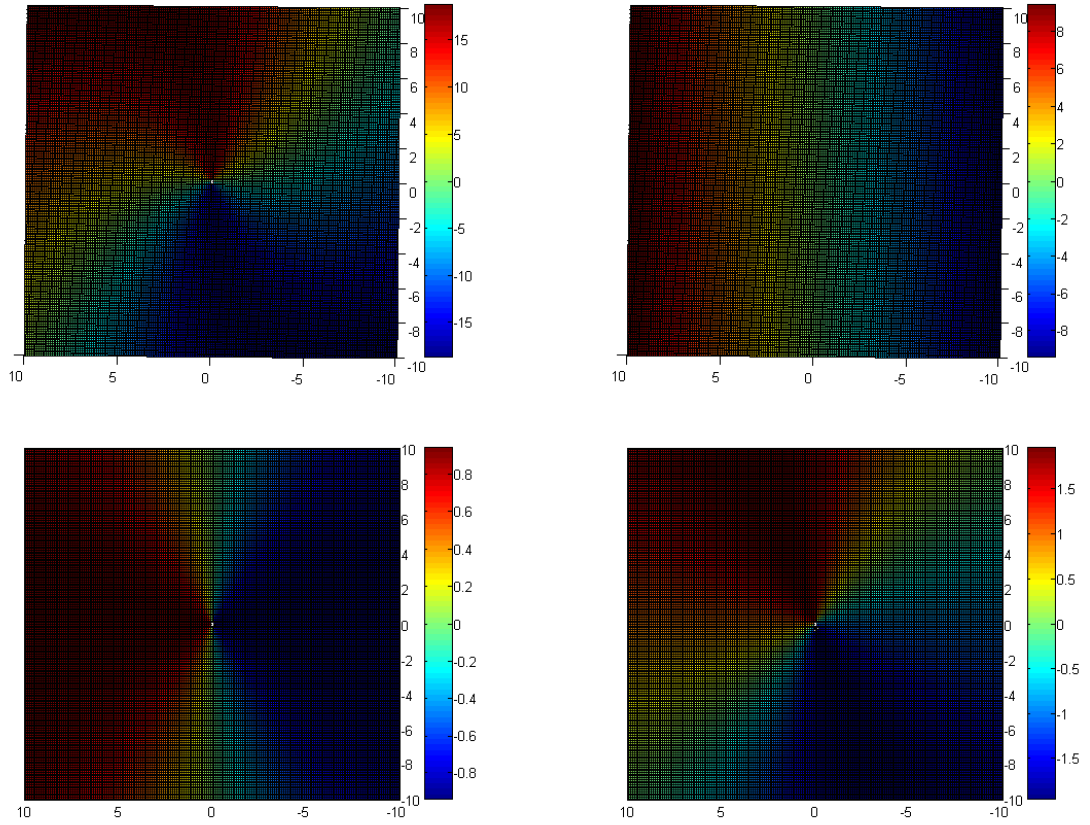
$$v_x = v_r \cos \theta - v_\theta \sin \theta, \quad (5.6)$$

$$v_y = v_r \sin \theta + v_\theta \cos \theta. \quad (5.7)$$

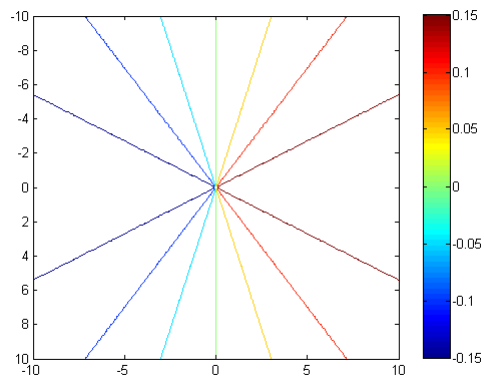
Po úprave s použitím  $\cos \theta = xg/Rg$  a  $\sin \theta = yg/Rg$  dostaneme pre pozorovanú rýchlosť vzťah

$$v_{los} = -\sin i \frac{1}{Rg} (v_{Rxg} - v_{\theta xg}) - v_{zg} \cos i. \quad (5.8)$$

Pre dve rôzne oblasti galaxie  $r < R_0$  a  $r > R_0$  sú ukázané diagramy vypracované v programu Matlab.



Obrázok 5.1: Obrázok v ľavo hore: oblasť  $r < R_0$  so zapnutou rotáciou a pri značne veľkej radiálnej rýchlosti. Obrázok v pravo hore: oblasť  $r < R_0$  pri nulovej radiálnej rýchlosti. Obrázok v ľavo dole: oblasť  $r > R_0$  pri nulovej radiálnej rýchlosti. Keď situáciu vymeníme a vypneme kruhovú rýchlosť dostaneme podobnú závislosť. Obrázok v pravo dole: oblasť  $r > R_0$  pri radialnej rýchlosti porovnateľnej s tangenciálnou.



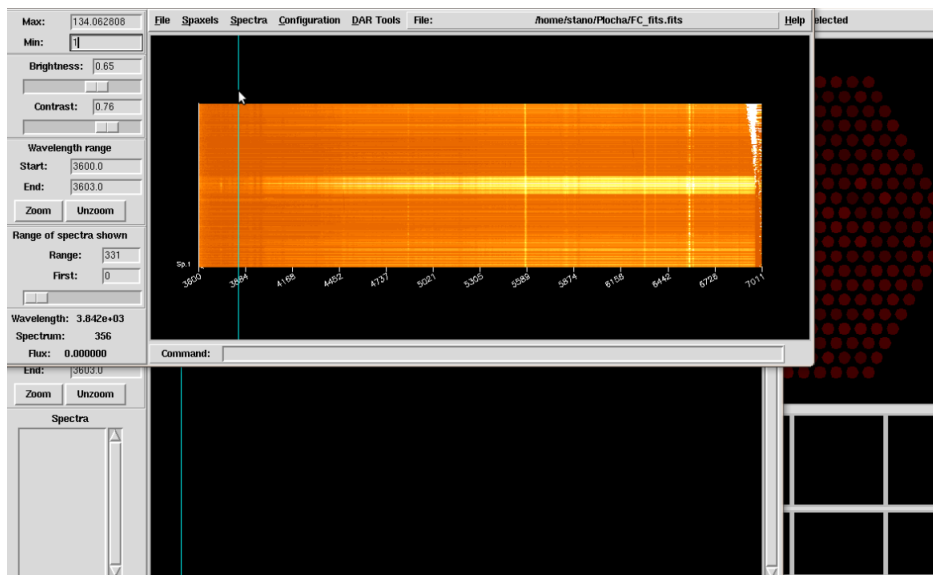
Obrázok 5.2: Často sa obrázky hore kreslia pomocou kontúr. Kontúry predstavujú čiary konštantnej rýchlosti, takzvané izočiare. Tuto je zobrazené rýchlostné pole len pre rotáciu galaxie a  $r > R_0$ . Inklinácia je  $10^\circ$ .

## 5.2 3D spektroskopia galaxie M51

Ako objekt analýzy mám blízku Seyfertovu galaxiu M51. Konkrétne oblasť s polomerom niekoľko kiloparsekov od jadra. Spektrum galaxie bolo urobené v roku 2005 na observatóriu Calar Alto v Španielsku, pomocou jedného z najlepších 3D spektrografov PMAS/PPAK. Ďalekohľadom s primárnym zrkadlom s priemerom 3,5 metra.

Na spracovanie spektier sa používa program E3D. Program naprogramoval Sebastian Sanchez, neskôr zdokonalil P. M. Weilbacher. V tejto práci sa konkrétne používa verzia 1.3.7 z roku 2008. E3D bol vyvinutý na analýzu a spracovanie takzvaných 3D kociek. 3D predstavuje rozmery  $x$ ,  $y$  a  $\lambda$ . V tejto práci sa používa  $\lambda$  v rozpatí 400nm až 720nm, čo predstavuje optickú oblasť. K dispozícii je 331 simultánne získaných spektier v centrálnych kiloparsekov galaxie.

3D spektroskopia zadefinovala pojem spaxel (od spatial a pixel) ako plošný, priestorový element 3D spektroskopie. Program obsahuje tri hlavné grafické rozhrania - hlavné menu, spaxel prehliadač a spektroskopický prehliadač.



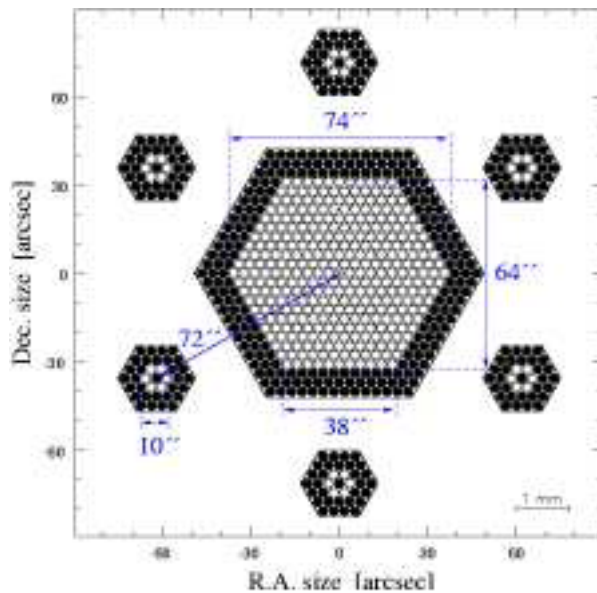
Obrázok 5.3: Ukážka troch hlavných okien v programe E3D. Oranžový obdĺžnik v hlavnom menu predstavuje 331 spektier naukladaných na seba. Na pravej strane vidieť spaxelový preliadač so spaxelmi a dolu je časť so spektrálneho okna. Jeden spaxel predstavuje jedno spektrum.

### 5.2.1 Spektrograf PMAS-PPAK

PPAK je širokoúhla 3D-spekroskopická jednotka (IFU - integral field unit) spektrofotometru PMAS (Potsdam multi-aperture spectrophotometer) umožňujúceho simultánne získať 331 optických spektier z hexagonálneho zorného poľa o rozmeru 72x76".

Spaxel (spatial element) PPAKu, tj. jednotka priestorového vzorkovania (spatial sampling) na oblohe, má kruhový tvar a rozmer 2.7 arcsec. Priestorové vzorkovanie, a tým i priestorové rozlíšenie, je teda relatívne (v porovnaní jednak s obvyklým seeingom, jednak s inými 3D spektrografy) hrubé, výhodou PPAKu je však jeho veľké zorné pole.

PPAK má niekoľko spektrálnych módov s rôznym spektrálnym rozlíšením a spektrálnym rozsahom. Pre pozorovanie M51 bol použitý mód V300 s rozlíšením cca 10 Å (FWHM) a pokrývajúcim prakticky celé optické spektrum.



Obrázok 5.4: Nákres a rozmery PPAK-IFU. Centrálny šesťuholník je vytvorený z 331 vlákien (káblv), obklopených šiestimi oblohovými-IFU jednotkami. Iba biele krúžky reprezentujú aktívne vlákna, zatiaľ čo čierne slúžia ako ochrana bielych vlákien. Zatiaľ čo fyzikálny rozmer centrálného IFU je iba 4 mm, jeho pokrytie na oblohe je viac ako jedna oblúčková minúta. Prevzaté z Kelz a iní (2005).

### 5.2.2 Galaxia M51 (NGC 5194)

M51 (tiež NGC 5194) je jedna z najbližších špirálových galaxií, jej vzdialenosť je cca 8 Mpc, heliocentrická radiálna rýchlosť je 464 km/s, Hubbleov typ SAbc, inklinácia je  $30^\circ$ . Má aktívne jadro klasifikované ako Seyfert 2 alebo LINER.

Na obr. 5.5 je snímok tejto galaxie, cez ktorý je superponované zorné pole spektrografu PPAK. Pri vzdialenosti 8 Mpc predstavuje 1 úhlová sekunda približne 40 pc, čo znamená, že jeden spaxel zodpovedá približne 100 pc a zorné pole pokrýva centrálnu oblasť o polomeru približne 1.4 kpc.

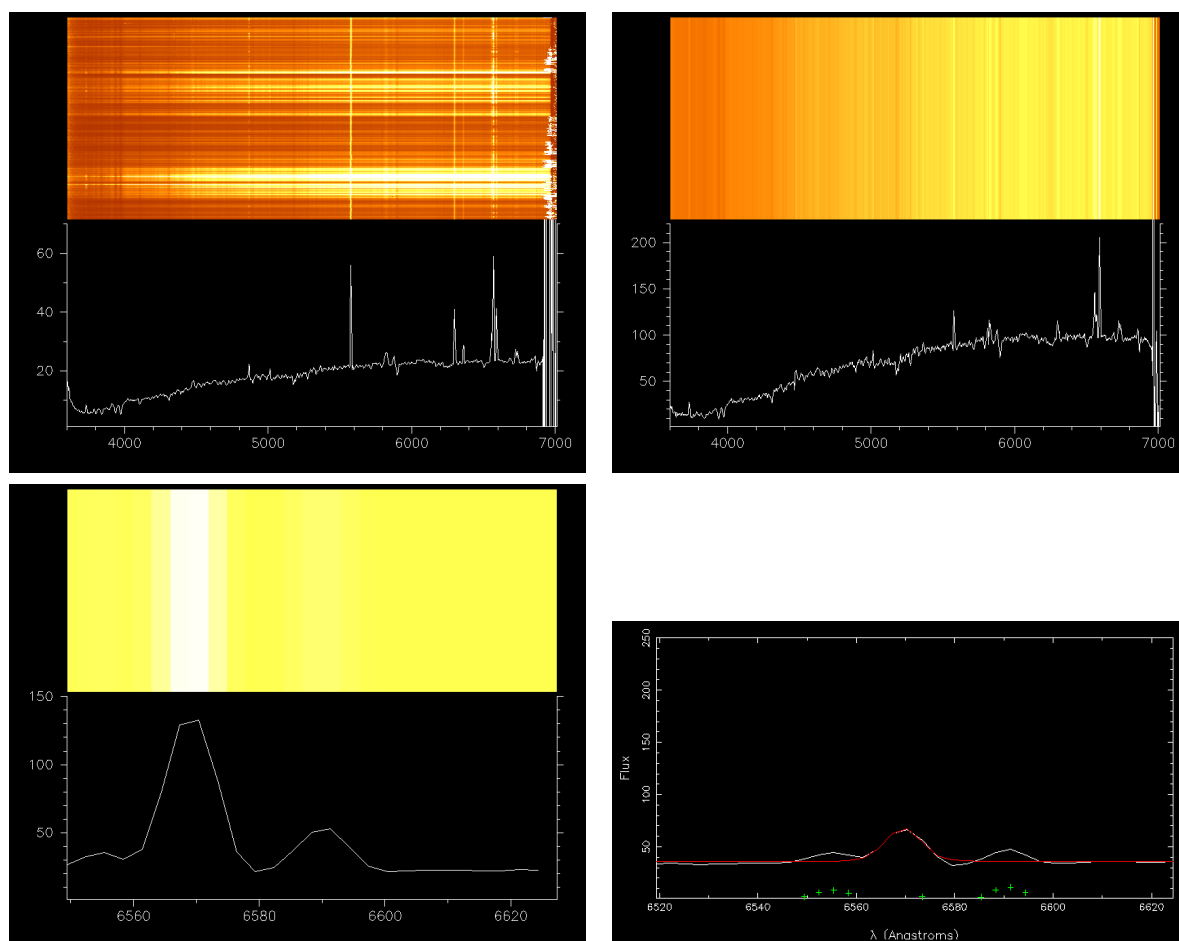


Obrázok 5.5: Galaxia NGC 5194. V centrálnom šesťuholníku je výrez časti galaxie z ktorej mám k dispozícii spektrá. Už v roku 1845 v nej rozpoznal Lord Rosse špirálové ramená. Obrázok prevzatý z prezentácie T. Bartákovej (2008).

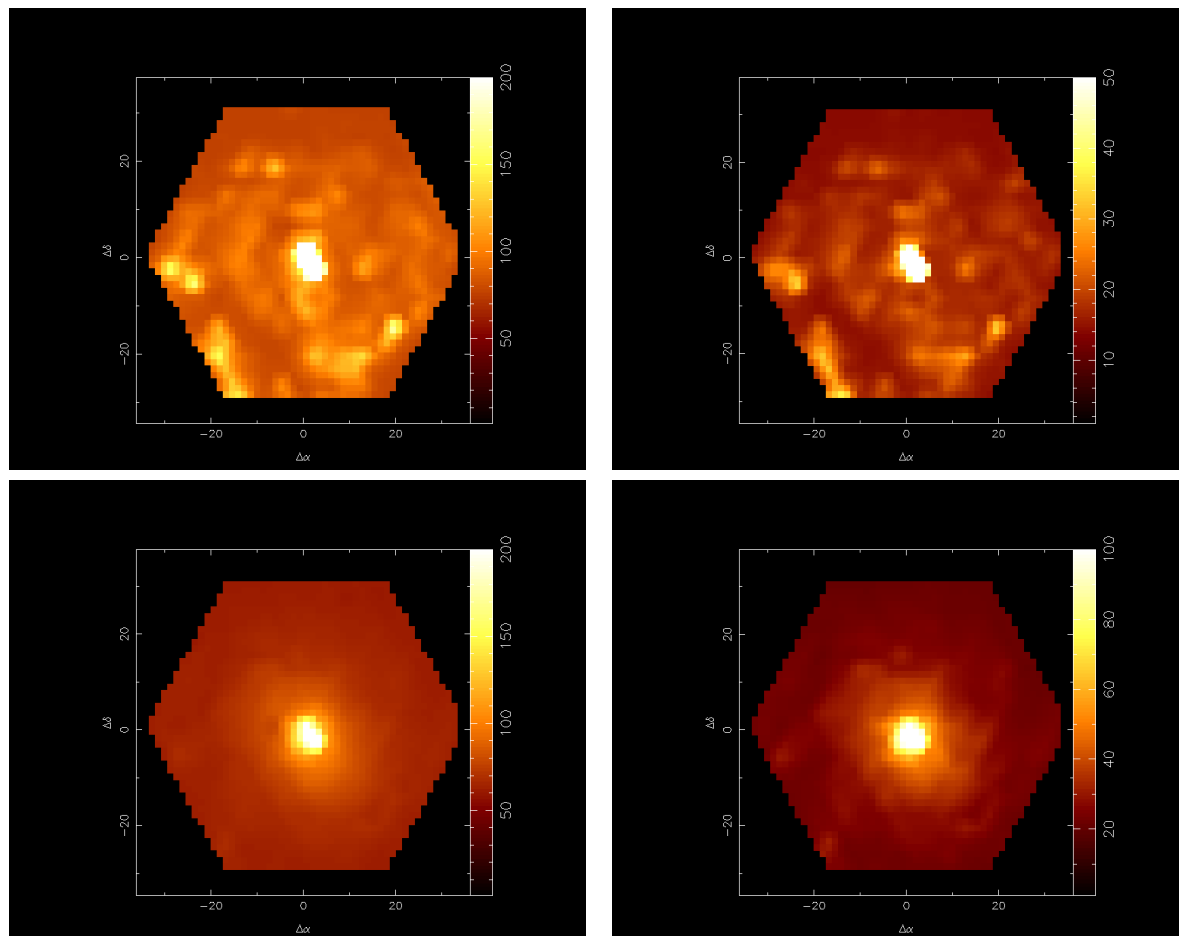
### 5.3 Analýza spektier pomocou programu E3D

Program E3D umožňuje zvoliť si ľubovoľný spaxel a poslať jeho spektrum na analýzu do spektrálneho prehliadača. V spektrálnom prehliadači sa môže zvoliť fit jednoduchou Gaussovskou alebo zvoliť si kinematickú analýzu všetkých 331 spaxelov v rozpetí vlnových dĺžok aké si zvolíme. Po pár minútach fitovania všetkých spaxelov sa v spaxelovom inšpektore zobrazia tieto mapy: distribúcia toku emisnej čiary, pole rýchlosti a disperzie a úroveň kontinua.





Obrázok 5.6: Obrázok v ľavo hore: Spektrum galaxie M51. V pravej časti okolo 6563Å sa dá rozpoznať najjasnejšia emisná čiara  $H_{\alpha}$ , obklopená dubletom  $[NII]6548,6583A$ , ďalej sú vidieť emisné čiary  $[OI]6300A$  a  $[SII]6717,6731A$ , trochu slabšie je vidieť čiara  $[OIII]5007A$ ; jasná čiara okolo 5600Å je zle odčítaná čiara oblohy. Toto spektrum je sumou všetkých 331 spektier centrálnych oblastí galaxie. Obrázok v pravo hore: Spektrum galaxie M 51. Tentokrát je to spektrum jedného konkrétneho spaxelu nachádzajúceho sa v blízkosti samého stredu galaxie. Pri porovnaní s predchádzajúcim obrázkom je vidieť rozdiel v intenzite. Obrázok v ľavo dole: Detail čiar  $H_{\alpha}$  s charakteristickými dvoma zakázanými čiarami  $[NII] \lambda\lambda 6548,6583 A$ . Ide o čiary jedného spaxelu. Obrázok v pravo dole: Ukážka fitu čiar. Program E3D robí iba jeden fit, i keď by bolo žiadúce fitovať aj vedľajšie dva doublety. Spracované v programe E3D.



Obrázok 5.7: Obrázok v ľavo hore: Centrum galaxie v čiare  $H_{\alpha}$ . Obrázok v pravo hore: Centrum galaxie v čiare O III. Obrázok v ľavo dole: Kontinuum blízko čiary  $H_{\alpha}$ . Obrázok v pravo dole: Kontinuum blízko čiary [OIII]. Vidieť značný rozdiel v intenzite čiar. Mapy sú výsledkom po spracovaní kinematickej analýze v programe E3D.

# Kapitola 6

## Záver

Hlavným cieľom tejto práce bolo: zoznámiť sa s problematikou emisných spektier aktívnych galaxií, s princípmi celoplošnej (tzv. 3D) spektroskopie, so softwarom Euro3D slúžiacim k vizualizácii 3D spektroskopických dát a so základnými analýzami emisných spektier (fitovanie spektrálnych čiar). Po niekoľko mesačnej práci na inštalácii programu E3D, (inštalácia nie je vôbec pre slabé nátury) a následnej práci s programom je táto časť úspešne splnená. Program ponúka pomerne jednoduchú prácu s dátami kockami i keď na samotnú detailnú analýzu nie je vždy vhodný a preto sa dáta neskôr spracovávajú v iných programoch (fity čiar, rýchlostné polia..). V prvom priblížení je určite vhodný.

Ďalej bolo treba vytvoriť jednoduché modely rýchlostných polí galaxie za predpokladu kruhovej rotácie, plochej a radiálny outflow v rovine disku. Táto úloha sa riešila pomocou vyjadrenia prechodu medzi sústavou spojenou s galaxiou a nami. Postup je ukázaný v piatej kapitole. Pomocou rovnice sa v programe Matlab 2007 vytvorili mapy takýchto ideálnych diskov pre prípady kruhovej rotácie a plochej a pre zapnutý/vypnutý outflow a zapnutá/vypnutá rotácia. Aj táto časť je úspešne splnená.

V ďalšom bode bolo treba analyzovať emisné spektrá ionizovaného plynu z centrálného kiloparseku galaxie M51. K analýze boli zvolené čiary  $H_\alpha$  a [OIII]5007A. Fitovanie týchto čiar Gaussovými krivkami umožní zkonštruovať 2D mapy intenzity a strednej rýchlosti ionizovaného plynu pozdĺž zorného lúča. Žiaľ táto časť úlohy sa nepodarila celkom splniť, nakoľko program E3D nepracoval celkom tak ako by mal. Do obhajoby budú mapy dodané.

Zmyslom týchto krokov bolo vytvoriť predpoklady k interpretácii 3D štruktúry a kinematiky ionizovaného plynu v centrálnych častiach galaxie

M51. Táto interpretácia však vyžaduje detailnejšie modelovanie a je mimo rámec tejto práce. Porovnanie jednoduchých kinematických modelov rotácie a outflow v 2D disku so skutočnými rýchlostnými poľami ukazuje, že tieto jednoduché modely sú nedostatočné. Predstavujú však nevyhnutný prvý krok pre konštrukciu zložitejších modelov.

Taktiež samotné fitovanie emisných čiar bude v ďalšej fázi vyžadovať vylepšenie. Napr. čiara  $H_\alpha$  bola v rámci bakalárskej práce pre zjednodušenie fitovaná samostatne. V krídlach sa však prekrýva s čiarami dubletu [NII]6548,6583A, a preto bude pre zlepšenie presnosti fitu nutné fitovať všetky tri čiary súčasne.

# Literatúra

- [1] Donald E. Osterbrock.: *Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei*, University Science Books Sausalito, California, 1989.
- [2] James Binney, Michael Merrifield: *Galactic Astronomy*, Princeton University press, Princeton, New Jersey 1996.
- [3] Ian Robson: *Active Galactic Nuclei*, Wiley-Praxis series in astronomy and astrophysics, 1996.
- [4] S.F. Sanchez: *E3D, The Euro3D Visualization Tool : Description of the program and its capabilities*, 2008.
- [5] Bradley W. Carroll, Dale A. Ostlie.: *An introduction to modern astrophysics*, Pearson International Edition, San Francisco, 2007.
- [6] F. Combes, P. Boissé, A. Mazure, A. Blanchard: *Galaxies and Cosmology*, Springer, Germany.
- [7] Diego F. Torres a Luis A. Anchordoqui : *ASTROPHYSICAL ORIGINS OF ULTRAHIGH ENERGY COSMIC RAYS*, astro-ph/0402371, 2004.
- [8] D.W. Weedman: *Seyfert galaxies*, Annu.Rev.Astron.Astrophys, 1977.
- [9] R. Antonucci: *Unified models for active galactic nuclei and quasars* , Annu.Rev.Astron.Astrophys, 1993.
- [10] Dilip G. Banhatti: *Disk galaxy rotation curves and dark matter distribution* , CURRENT SCIENCE, VOL. 94, NO. 8, 25 APRIL 2008.
- [11] John E. Beckman, Almudena Zurita, Juan C. Vega Beltrán: *KINEMATIC MEASUREMENTS OF GAS AND STARS IN SPIRAL GALAXIES* , Lecture Notes and Essays in Astrophysics, vol. 1, str. 43-62, 2004.

- [12] Bryan W. Miller: *3D SPECTROSCOPY AND THE VIRTUAL OBSERVATORY* , arXiv:0708.2111v1 [astro-ph] 15 Aug 2007.
- [13] Andreas Kelz, Marc A.W. Verheijen, Martin M. Roth, Svend M. Bauer, Thomas Becker, Jens Paschke, Emil Popow, Sebastian F. Sanchez, Uwe Laux: *PMAS: THE POTSDAM MULTI APERTURE SPECTROPHOTOMETER. II. THE WIDE INTEGRAL FIELD UNIT PPAK*, arXiv:astro-ph/0512557v1, 22 decembra 2005.
- [14] Lenka Zychová: *Studium mezihvězdného prostředí směrem k hvězdě HD 36841* , Bakalárska práca MU, 2008.
- [15] <http://ifs.wikidot.com/welcome>
- [16] <http://astro.virginia.edu/class/whittle/astr553/Topic05/>
- [17] Prezentácia Mgr. Terezy Bartákovéj: <http://physics.muni.cz/terka/3Dspec.pdf>