

MASARYKOVA UNIVERZITA
Přírodovědecká fakulta
Ústav teoretické fyziky a astrofyziky



DIPLOMOVÁ PRÁCE
Studium kvazarů a blazarů

Jan Rokos

Vedoucí diplomové práce:

Filip Hroch

Brno 2014

Bibliografický záznam:

Autor: Jan Rokos
Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita
Ústav teoretické fyziky a astrofyziky

Název práce Studium kvazarů a blazarů

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: Teoretická fyzika a astrofyzika

Vedoucí práce: Filip Hroch

Akademický rok: 2014

Počet stran: 63

Klíčová slova: Seyfert, AGN, ALMA, ISM, kanálové mapy, NGC 1068, NGC 253, CASA

Bibliographic entry:

Author: Jan Rokos
Faculty of Science, Masaryk University
Department of Physic and Astrophysics

Title of Thesis Study of quasars and blazars

Degree Programme: Physics

Field of Study: Theoretical Physics and Astrophysics

Supervisor: Filip Hroch

Academical Year: 2014

Number of Pages: 63

Keywords: Seyfert, AGN, ALMA, ISM, channel maps, NGC 1068,
NGC 253, CASA

Abstrakt:

V předložené práci jsem se zabýval zejména zpracováním dat z observatoře ALMA a jejich možným využitím pro studium aktivních galaktických jader. Pro to jsem zvolil data z pozorování dvou aktivních galaxií – NGC 1068 a NGC 253. Cílem je v pozorovaných datech identifikovat molekuly zodpovědné za čarovou a následně vytvořit snímky zobrazující jejich rozložení v rámci galaxie a rychlostní mapy. Tyto snímky jsem poté ještě doplnil o snímky z optického a rentgenového oboru.

Abstract:

In the present work I work on the data reduction process of the ALMA observatory and the potential use of these data for active galactic nuclei. For this I chose from the publicly available data project that observed two active galaxies – NGC 1068 and NGC 253. My goal was to identify molecular emission in this data and create images showing the molecular distribution throughout the galaxies and their velocity maps.

Děkuji všem, kteří mi v poslední fázi pomohli – Leja, sousedé ovládající gramatiku (případné zbytkové chyby беру na sebe, jelikož jsem opomněl uzavřít smlouvu s jasně stanovenými pokutami) a Pigi čaj.

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem napsal samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů. Souhlasím se zapůjčováním práce a jejím zveřejněním.

V Brně dne

Jan Rokos

Obsah

I	Teoretická část	8
1	Úvod	9
2	Galaxie	10
2.1	Stavba galaxií	10
2.1.1	Disk	10
2.1.2	Příčka	11
2.1.3	Ramena	11
2.1.4	Mezihvězdná hmota	11
2.1.5	Výduř	13
2.1.6	Halo	13
2.1.7	Temná hmota	13
2.2	Typy galaxií	13
2.2.1	Eliptické galaxie	14
2.2.2	Spirální galaxie	14
2.2.3	Čočkové galaxie	14
2.2.4	Nepřavidelné galaxie	14
3	Aktivní galaxie, aktivní galaktická jádra	15
3.1	Seyfertovy galaxie	15
3.1.1	Seyfertovy galaxie typu 1	15
3.1.2	Seyfertovy galaxie typu 2	16
3.2	Kvazary	16
3.3	Radiové galaxie	16
3.4	Objekty typu BL Lac	17

3.5	Seyfertovy galaxie a kvazary	17
3.6	Jednotný model aktivních galaktických jader	17
3.7	Zdroj energie	19
II	Praktická část	20
4	ALMA	21
4.1	Interferometr	21
4.2	Data	21
4.3	CASA	22
4.3.1	Základní úlohy	22
5	Emise v čarách a kanálové mapy	24
6	NGC 1068	26
6.1	ALMA pozorování	26
6.2	Emise v kontinuu	27
6.2.1	Čára CS	29
6.3	Čára CH ₃ OH	29
6.4	Čára HC ₃ N	29
6.5	Čára CO	29
6.6	Pozorování z družice Chandra	38
7	NGC 253	43
7.1	Emise v kontinuu	43
7.2	Emise v CO	43
7.3	Pozorování z Chandra	45
8	Kompozitní snímky	50
9	Závěr	54
A	CASA	58

Část I

Teoretická část

Kapitola 1

Úvod

Svojí diplomovou práci jsem se již v úvodu rozhodl založit na pozorováních z observatoře ALMA, jelikož byla čerstvě uvedena do provozu a dávala tak příslib dosud neviděného a nevídaného. Jelikož jsem do té doby neměl téměř žádné zkušenosti s radiovou astronomií, pozorováním chladných molekulárních mračen ani celkově s galaktickou chemií, ne všechna moje očekávání byla naplněna, k tomu se ale dostanu v pozdějších částech tohoto textu. Práce stojí na datech získaných na ALMA, ještě v rámci early science, tedy prvního roku po uvedení do provozu. Vzhledem k tomu nedosahují takové kvality, citlivosti ani rozlišení, jako data, která se pozorují dnes. Z, již veřejně přístupných, pozorování jsem vybral ta, která byla relevantní pro oblast aktivních galaxií a vybral projekt, který pozoroval dvě galaxie - NGC 1068 a NGC 253 - a poté pracoval s daty z něho. Jako doplnění jsem k nim zpracoval také snímky z družice Chandra, jelikož emise v milimetrové oblasti často úzce souvisí s tou ve vyšších energiích, ať už jde o rentgenovou, nebo ultrafialovou.

Kapitola 2

Galaxie

Galaxie jsou vesmírné objekty složené z gravitačně vázaných hvězd a mezihvězdné hmoty - plynu a prachu. Původně byly považovány za mlhoviny, které jsou součástí naší galaxie a až spektroskopické studie ve 20. století ukázaly, že se pohybují příliš rychle. Také byly pozorovány novy v M31, tehdejší mlhovině v Andromedě, které byly několikanásobně slabší než ty, které byly pozorovány v Mléčné dráze. Poslední, definitivní, důkaz přinesl Edwin Hubble(3) pozorováním cefeid, z něhož byl schopen odvodit vzdálenost této mlhoviny, která byla příliš vysoká na to, aby byla ještě v naší Galaxii. Alespoň dnes je tedy M31 označována jako galaxie v Andromedě, nachází se ve vzdálenosti přibližně 785 ± 25 kpc (6). Jelikož se pohybuje směrem k Mléčné dráze, v budoucnosti dojde k jejich srážce a, pravděpodobně, splnutí.

2.1 Stavba galaxií

Jelikož jsou galaxie velmi komplexní objekty, složené z mnoha vzájemně interagujících menších objektů různého druhu, vznikají v nich struktury, které můžeme pozorovat a podle jejich přítomnosti a vlastností poté galaxie také klasifikovat. Níže uvádím jednotlivé části, které u galaxií lze pozorovat, tedy bez zohlednění rozdělení galaxií, které uvedu dále v textu.

2.1.1 Disk

Galaktický disk je pojmenovaný podle zploštělého, přibližně osově symetrického tvaru, který má. Většina viditelných hvězd v galaxiích se nachází právě v oblasti galaktického disku. Také se v něm nachází velké množství mezihvězdné hmoty - plynu a prachu; to způsobuje vysokou absorpci záření přicházejícího k nám ze vzdálenějších oblastí, například naší galaxie. Z toho důvodu nelze pozorovat střed Mléčné dráhy v optickém oboru, vzhledem k velikostem prachových zrn ale nepředstavují problém pro pozorování v radiovém

oboru. V galaktickém disku se nachází také naše Slunce. Jeho vzdálenost od středu je $R_0 = (8 \pm 0,4)\text{kpc}$ (2). Jasnost disku se vzdáleností od středu exponenciálně klesá podle vztahu

$$I(R) = I_0 e^{-\frac{R}{R_h}}.$$

Hvězdy v galaktickém disku se pohybují po téměř kruhových drahách a platí, že blíže ke středu pozorujeme hvězdy mladší. Slunce se okolo centra naší galaxie pohybuje rychlostí $v_{\odot} = (220 \pm 15)\text{ km.s}^{-1}$.

Ve středu většiny galaxií se předpokládá černá díra.

2.1.2 Příčka

Galaktické příčky je výsledkem gravitačních nestabilit v galaktickém disku. Jejich prodloužením jsou poté ramena.

2.1.3 Ramena

Spirální ramena jsou oblasti aktivní hvězdotvorby (tzv. starburst regiony se nacházejí právě ve spirálních ramenech). Z toho důvodu jsou spirální ramena dobře pozorovatelná v optické oblasti spíše v modré barvě, typické pro mladé hvězdy. Naproti tomu v červenějších částech spektra nemusí být patrné vůbec. Vzhledem k tomu, že jde o prostředí hustší (je zde vyšší koncentrace plynu a prachu), pohyb hvězd ve spirálních ramenech je pomalejší, než mimo ně. Přesto, že pohyb hvězd je rameny ovlivněný, pohybují se i vůči sobě a hvězdy tedy mohou rameny i procházet. Ramena jsou typická pro spirální galaxie.

2.1.4 Mezihvězdná hmota

Mezihvězdná hmota (ISM z angl. InterStellar Medium/Matter), její složení a pohyb v okolí aktivních jader, je klíčová k pochopení způsobu, jakým je do centrální černé díry dodávána energie - v angličtině označováno doslovně jako krmení (feeding) černé díry. Jelikož většina mezihvězdné látky je tvořena prachem a plynem převážně v molekulární formě, hledají se vhodné molekuly, které lze pozorovat v nejbližších oblastech v okolí černé díry. Na základě modelů mezihvězdné hmoty se předpokládá, že různé zdroje energie (samotné jádro, výbuchy supernov, tvorba hvězd,...) se různě projeví na mezihvězdné látce a je tak možné je od sebe odlišit.

Složení mezihvězdné hmoty

Mezihvězdná hmota je tvořena z velké části vodíkem (cca 70%). Velkou část zbytku tvoří helium a pouze malou část kovy. Velkou část mezihvězdné hmoty nalezneme v mračnách plynu a prachu - rozdělujeme na difúzní mračna, tvořená převážně atomárním vodíkem a obří molekulová mračna (GMC z angl. Giant Molecular Clouds) tvořená molekulami, vznikajících na prachových zrnech. Přestože prach samotný tvoří pouze malou část celkové hmoty těchto mračen, je tedy jednak médiem pro vznik molekul, ale také vytváří vysoce extinkční prostředí, což je důvod, proč centrální části galaxie pozorujeme převážně v radiové oblasti. Za dobu spektroskopických pozorování, zejména v radiové oblasti jelikož většina molekul se vyskytuje v chladných mračnách a vyzařují tedy fotony s nízkými energiemi, byla odhalena celá řada molekul, které se zde vyskytují. Od jednoduchých, jako je například molekulární vodík nebo oxid uhelnatý, přes HCN, až k nedávnému objevu glykolaldehydu.

Vodík

Vodík se v mezihvězdné hmotě vyskytuje jak ve formě neutrálního vodíku HI, tak ionizovaný HII, a také ve formě molekul H_2 . Neutrální vodík tvoří většinu difúzních plynových mračen. Jelikož je v základním stavu, nemůžeme pozorovat žádné emisní čáry vzniklé přechodem elektronu mezi jednotlivými energetickými hladinami. K excitaci je potřeba UV záření, proto běžně nepozorujeme ani žádné absorpční čáry – potřebujeme mít silný UV zdroj v pozadí. V případě neutrálního vodíku máme ale ještě jednu unikátní možnost, jak ho detekovat. Tou je specifická čára 21,1cm. Tato čára vzniká při překlopení spinu elektronu do protilehlé polohy oproti spinu protonu v jádře. V obřích molekulových mračnách vznikají molekuly vodíku H_2 díky přítomnosti prachu. Ten, jelikož velmi dobře absorbuje napříč velkým množstvím vlnových délek, poskytuje vodíku nutnou ochranu před ionizujícím zářením, bez které by molekuly nemohly vzniknout. Kromě toho také molekuly vodíku, podobně jako mnoho dalších, vznikají na povrchu právě těchto prachových zrn. Ionizovaný vodík HII můžeme často pozorovat jako obálku GMC.

Oxid uhelnatý

Oxid uhelnatý (CO) je v mezihvězdné látce poměrně běžně se vyskytující molekula a často se používá pro stopování molekulárního vodíku, který je sám o sobě velmi těžce detekovatelný.

Sulfid uhelnatý

Molekuly sulfidu uhelnatého (CS) jsou typické pro husté a horké oblasti mezihvězdné hmoty, jak je vidět například na obrázku 6.3, kde se většina emise nachází v centrální části a zbytek v starburst regionech. Z pozorování se zdá, že zastoupení této molekuly je nezávislé na centrálním zdroji energie a pozorujeme tedy přibližně stejné množství

(poměrně z celkové hmotnosti ISM) v Mléčné dráze, galaxiích s aktivním jádrem i starburst galaxiích. Díky tomu se používá pro porovnávání zastoupení dalších molekul - udává se tedy v poměru k CS (5).

Složitější molekuly

Jak jsem již zmiňoval výše v ISM se vyskytují i mnohem složitější molekuly, než jsou H_2 a CO. Například v (1) pozorovali v galaxii NGC 1068 celkem 17 různých molekul s využitím dat z 30ti metrového teleskopu IRAM v rozmezí frekvencí od 86,2GHz do 115,6GHz. Mezi nimi byly například molekuly CH_3OH , $HNCO$, CH_3CN .

2.1.5 Výduť

Výduť se nachází ve středu disku a jde o natolik výrazné rozšíření, že se již nepovažuje za jeho součást. Podle pohybu hvězd nacházejících se ve výduti lze odhadnout hmotnost centrální černé díry podle tzv. vztahu $M-\sigma$, tedy například pro spirální galaxie(7)

$$\log_{10}(M_{BH}/M_{\odot}) = 7,97 + 4,58 \log_{10}[\sigma/(200\text{km s}^{-1})].$$

2.1.6 Halo

Galaktické halo se nachází ve větších vzdálenostech od roviny disku. Jsou zde zejména staré hvězdy a kulové hvězdokupy. V Mléčné ráze pozorujeme kulové hvězdokupy ve vzdálenostech 500pc až 120kpc od roviny disku a nejstarší z nich jsou staré $13 \cdot 10^9$ let.

2.1.7 Temná hmota

Temná hmota tvoří významnou část celkové hmoty galaxií. Projevuje se pouze gravitačně a lze ji tedy, naruždí od zářící hmoty, pozorovat pouze nepřímou. Jednou z možností je sledování změny rychlosti pohybu hvězd s rostoucí vzdáleností od středu galaxie. Většina této temné, tmavé, nebo také skryté hmoty je ve větších vzdálenostech od středu galaxie, v oblastech, kde je již velmi málo hvězd.

2.2 Typy galaxií

Prvotní klasifikaci galaxií zavedl Edwin Hubble v roce 1936. Od té doby, spolu s rozšířením našich pozorovacích možností, došlo i k úpravám v tomto rozdělení, i dnes ale vychází z toho Hubbleova.

2.2.1 Eliptické galaxie

Nepozorujeme v nich struktury jako například spirální ramena. Dále je ještě dělíme podle jejich tvaru $E0 - E7$, přičemž $E0$ odpovídá galaxiím, které se jeví jako kruhové. $E7$ naproti tomu jsou výrazně elipsovitého tvaru, tento rozdíl ale může být způsoben pouze projekcí, ve skutečnosti mohou být všechny kruhové. Rozdělení do skupin En je dáno jako nejbližší celé číslo k výsledku vztahu

$$\frac{10(a - b)}{a},$$

kde a je hlavní a b vedlejší poloosa.

2.2.2 Spirální galaxie

Spirální galaxie mohou být bez příčky, značené S, nebo s příčkou, SB. V centrální části mají jasné jádro a z něho vycházejí spirální ramena. Tato ramena mohou být různě navinutá, může jich být různý počet.

2.2.3 Čočkové galaxie

Podobně jako spirální galaxie čočkové pozorujeme s příčkou ($SB0$) i bez příčky ($S0$, tzv. normální čočkové galaxie). Mají jasné jádro, ale nepozorujeme u nich spirální ramena.

2.2.4 Nepravidelné galaxie

Tyto galaxie nejeví symetrii tak, jak pozorujeme předchozí typy. Rozdělujeme je na $IrrI$, u kterých pozorujeme spirální ramena a $IrrII$ bez spirálních ramen.

Kapitola 3

Aktivní galaxie, aktivní galaktická jádra

Aktivní galaxií nazýváme takovou galaxii, která má ve svém středu velmi zářivé, kompaktní jádro. Intenzita záření tohoto jádra je často srovnatelná s intenzitou záření přicházejícího ze zbytku galaxie, v případě kvazarů ho často i mnohonásobně převyšuje. Jak uvedu v dalších částech, v současnosti rozlišujeme několik druhů těchto aktivních jader, nicméně jak se ukazuje, toto rozlišení nemusí být správně pojaté. Velkou část pozorovaných rozdílů mezi jednotlivými typy aktivních galaktických jader lze připsat například geometrii našeho pozorování. Aktivní galaktická jádra se často označují anglickou zkratkou AGN (tedy Active Galactic Nuclei).

3.1 Seyfertovy galaxie

První pozorování, které ukázalo na zajímavé vlastnosti Seyfertových galaxií provedl už v roce 1908 E. A. Fath, který objevil přítomost emisních čar v mlhovině NGC 1068. Teprve Carl Seyfert v roce 1943 pozoroval další podobné objekty a definoval tak třídu Seyfertových galaxií, které mají velmi jasné, hvězdě podobné jádro, a jak se později ukázalo, mají tyto galaxie ve svém spektru, kromě obvyklých absorpčních čar, také velmi silné emisní čáry. Právě přítomnost emisních čar ve spektru je dodnes určující pro jejich identifikaci. V roce 1974 Khachikian a Weedman ukázali, že je možné Seyfertovy galaxie dále rozdělit podle přítomnosti, resp. absence, širokých povolených čar. Většina, ne-li všechny, Seyfertovy galaxie jsou spirální.

3.1.1 Seyfertovy galaxie typu 1

Ve spektru Seyfertových galaxiích 1. typu nalézáme překrývající se úzké a široké čáry. Úzké čáry mají šířku ve stovkách km/s. Široké čáry dosahují šířek v řádu desetitisíců km/s. Mezi širokými čarami ve spektru Seyfert 1 galaxií pozorujeme pouze povolené přechody,

což naznačuje, že k jejich vzniku dochází v oblastech, kde je hustota plynu natolik vysoká, aby došlo k potlačení zakázaných přechodů srážkami.

3.1.2 Seyfertovy galaxie typu 2

Ve spektru galaxií typu Seyfert 2 normálně široké čáry nepozorujeme. Jedna z teorií tento rozdíl oproti Seyfert 1 vysvětluje tím, že torus plynu a prachu, který obklopuje jádro stíní pohled do oblastí, kde tyto čáry vznikají. Široké čáry je možné u Seyfert 2 galaxií detekovat pouze velmi slabě ve spektru polarizovaného záření, toto bude vysvětleno dále.

3.2 Kvazary

Kvazary jsou nejjasnějšími z aktivních galaktických jader. Narozdíl od Seyfertových galaxií u nich nejsme schopni rozlišit galaktický disk, což je způsobeno jejich extrémní vzdáleností - kvazary jsou v současnosti nejvzdálenější pozorované objekty. Termín pochází ze zkratky QSRS značící quasi-stellar radio source, protože první kvazary byly v rámci prvních radiových pozorování v 50. letech 20. století objeveny právě jako velmi silné radiové zdroje, ke kterým se později podařilo nalézt optický, hvězdě podobný, protějšek. To se poprvé podařilo Thomasi Matthewsovi a Allanu Sandagevi v roce 1960, kdy objevili objekt, který v optické oblasti vypadal jako hvězda 16-té magnitudy a sjednotili ho právě s radiovým zdrojem 3C 48. Při tom si všimli zvláštnosti ve spektru, kterou byla přítomnost širokých emisních čar, které neodpovídaly žádným známým prvkům. Další podobný objekt byl objeven v roce 1963 - 3C 273. Později téhož roku se podařilo dánskému astronomovi Maartenu Schmidtovi identifikovat čáry ve spektru 3C 273 jako čáry Ballmerovy série vodíku. Důvodem, proč nebyly poznány dříve, bylo jejich posunutí do zcela nepředpokládaných vlnových délek v důsledku červeného posuvu ($z = 0,158$). Poté byl podobně určen červený posuv i u 3C 48, který byl ještě větší - $z = 0,367$, což odpovídá radiální rychlosti $0,303c$ a vzdálenosti přes $900h^{-1}\text{Mpc}$.

3.3 Radiové galaxie

Některé ze silných radiových zdrojů jsou identifikovány jako kvazary, kromě nich ještě pozorujeme galaxie, které v optické čási mají široké (BLRG - broad line radio galaxies), nebo pouze úzké (NLRG - narrow line radio galaxies) emisní čáry. Ty můžeme považovat za analogii Seyfertových galaxií 1. i 2. typu se silnou radiovou emisí. Rozdílem je, že radiové galaxie pozorujeme eliptické, nikoliv spirální, jako v případě Seyfertových galaxií. Tyto objekty mají dvě komponenty. První je kompaktní jádro, které září pouze do úzkého kuželu v prostoru. Druhou složkou je vzdálenější oblast izotropické radiové emise. U této druhé složky se předpokládá symetrie na obě strany galaxie.

3.4 Objekty typu BL Lac

Tyto objekty jsou pojmenované podle prototypu BL Lac, který byl původně identifikován jako vysoce proměnná hvězda a později se jim začalo říkat blazary. Přestože u všech AGN pozorujeme variabilitu přes celé spektrum, u blazarů pozorujeme velmi výraznou variabilitu v optickém oboru (změny v jasnosti mohou být větší než 0,1mag během jediného dne) a kromě toho ještě nezvykle vysokou a také proměnnou polarizaci. Všechny známé blazary jsou také radiové zdroje, přičemž je pozorujeme podél radiové osy.

3.5 Seyfertovy galaxie a kvazary

Narozdíl od původních zástupců svých kategorií je dnes možné považovat Seyfertovy galaxie a kvazary za jeden typ objektů a společně tvoří plynulou posloupnost jasnosti. Původní rozdělení bylo způsobeno jednak extrémností prvních objevených zástupců těchto tříd — první Seyfertovy galaxie byly poměrně slabé a blízké objekty, naproti tomu první kvazary byly velmi vzdálené a extrémně silné radiové zdroje. Nejsilnější dnes známé Seyfertovy galaxie se od kvazarů nijak neliší. U Seyfertových galaxií také dlouho nebyla známa proměnnost, kterou se vyznačovaly známé kvazary, protože jí nikdo nepředpokládal a tedy ani nehledal. V současnosti nicméně nejsou známy žádné fyzikální rozdíly mezi Seyfertovými galaxiemi a kvazary a je tedy možné předpokládat, že se jedná o jeden typ vesmírných objektů a rozdělení je dáno spíše historicky.

3.6 Jednotný model aktivních galaktických jader

Na základě výše zmíněného vznikají teorie, které se snaží vysvětlit pozorované rozdíly mezi jednotlivými typy aktivních galaxií za předpokladu, že jde o stejné objekty. Osterbrock v roce 1978 přišel s myšlenkou, že rozdíl mezi Seyfertovými galaxiemi 1. a 2. typu, tedy přítomnost širokých čar ve spektru Seyfert 1, lze vysvětlit tím, že nám v případě pozorování Seyfert 2 galaxií cosi brání v přímém pohledu do oblasti vzniku širokých čar. Vzhledem k tomu, že tato překážka musí absorbovat v poměrně široké části spektra, je jasným kandidátem prach. V případě, že tedy budeme mít okolo jádra torus z prachu, může se nám stát, že jednu a tu samou galaxii identifikujeme jako galaxii typu Seyfert 1, když se na ní budeme dívat podél osy toru. Naproti tomu, pokud budeme pozorovat z roviny tohoto toru, dojde k zastínění oblasti širokých čar i ke snížení jasnosti jádra, což koresponduje s pozorováním, kdy v průměru Seyfert 2 dosahují nižších jasností. Statisticky jsou Seyfert 2 přibližně 3x častější; budeme-li tedy předpokládat náhodné natočení galaxií, můžeme z toho odvodit, že prach musí zakrývat přibližně 3/4 veškerého záření přicházejícího z jádra. Tato teorie dále předpokládá, že v ose toru leží látka, která způsobuje rozptyl záření vycházejícího z jádra. To nám umožňuje pozorování, ač velmi slabých, širokých čar ve spektru lineárně polarizovaného záření Seyfert 2 galaxií. K tomuto rozptylu pravděpodobně

dochází na volných elektronech. Toto ukazuje, že minimálně část z Seyfert 2 má vlastnosti, ač skryté, Seyfert 1.

V současnosti tedy pro teorii, že Seyfert 1 a 2 jsou ve skutečnosti jedním typem objektu mluví zejména:

1. v rozptýleném, polarizovaném, záření Seyfert 2 galaxií vidíme stopy typické pro Seyfert 1
2. úzké čáry, které pozorujeme v obou typech jsou prakticky nerozlišitelné

Proti tomu zatím hovoří:

1. nelze obecně říci, že by záření kontinua přicházející z jádra bylo u Seyfert 2 polarizované, to však může značit pouze absenci volných elektronů, které by toto záření rozptýlily
2. nepozorujeme zdroje, které by vykazovaly tak vysokou polarizaci, jakou lze teoreticky předpokládat (až 50%)
3. nepozorujeme zářivější objekty (kvazary například), které by měly spektrum typu 2, tedy bez širokých čar

Jak jsem zmiňoval psal v kapitole o kvazarech, ty se od Seyfertových galaxií liší pouze svou energií a tím, že u kvazarů zpravidla nepozorujeme galaktický disk, jelikož jsou často velmi vzdálené. K celkovému sjednocení tedy chybí ještě tzv. radio-loud zdroje, tedy zdroje s velmi silnou radiovou emisí - radiové galaxie, blazary. U radiových galaxií, které dělíme na skupiny podle stejného kritéria jako galaxie Seyfertovy, můžeme předpokládat i stejné řešení - prachový torus, který nám znemožňuje pohled do oblasti širokých čar. Přičemž extrémním případem, kdy bychom pozorovali radiovou galaxii podél radiové osy, která by splývala s osou prachového toru, by byly právě blazary.

Jak se nyní zdá, v rozporu s tím, co se původně předpokládalo, tedy že určující vlastnost pro posouzení vlastností AGN je jejich jasnost - například rozlišení Seyfertových galaxií od kvazarů - ve skutečnosti by tím faktorem, který má spojitost s fyzickými rozdíly mohla být právě intenzita emise v radiové oblasti. Už na konci 70. let byly pokusy najít spojitost mezi "radio-loud" a "radio-quiet" objekty, ale bez uspokojivých výsledků. V polovině 90. let Wilson a Colbert uvažovali model, který předpokládá vznik záření od röntgenového až k infračervenému, zejména termálně, naproti tomu radiová emise by měla původ v rotaci centrální černé díry. Tato rotace by byla způsobena při srážkách galaxií s tím, že nejvyššího stupně rotace je dosaženo při srážkách podobně velkých černých děr (budeme-li předpokládat přímý vztah mezi velikostí černé díry a její hostitelské galaxie, tak při srážkách podobně velkých galaxií). V případě, že by došlo ke srážce dvou malých černých děr, výsledkem bude malá, rychle rotující černá díra, která bude i poměrně slabě zářit. Při srážce malé a velké

černé díry bude výsledkem velká, pomalu rotující černá díra, jakou můžeme předpokládat v "radio-quiet"aktivních galaxiích, například Seyfertových. Nejvzácnější srážkou by byla srážka dvou velkých černých děr produkující rychle rotující černou díru a tedy základ pro velmi jasné "radio-loud"aktivní galaxie, například některé kvazary.

3.7 Zdroj energie

Poměrně zásadní otázkou ohledně AGN je zdroj jejich energie. Pozorujeme záření, která často mnohonásobně převyšuje záření všech hvězd v galaxii, z velmi malého prostoru v jejím středu. V současnosti obecně přijímaným modelem takového zdroje je supermasivní černá díra, kolem které rotuje látka v akrečním disku. Při pádu hmoty na černou díru dochází k disipaci gravitační potenciální energie a látka se zahřívá, důsledkem čehož září. K tomuto závěru vedou poměrně jednoduché myšlenky. Například odhad minimální hmotnosti tělesa ve středu galaxie známý jako Eddingtonův limit podle nerovnice

$$L \leq \frac{4\pi G c m_p}{\sigma_p} M,$$

kde L svítivost centra galaxie, G gravitační konstanta, m_p hmotnost protonu a σ_e účinný průřez elektronu při Thompsonově rozptylu. Po dosazení dostáváme svítivost přibližně

$$L \approx 1,26 \cdot 10^{38} (M/M_\odot),$$

z čehož můžeme odvodit minimální, tedy Eddingtonovu hmotnost M_e jako

$$M_e = 8 \cdot 10^5 L_{44} M_\odot,$$

kde L_{44} je svítivost centrálního zdroje v $10^{44} \text{erg.s}^{-1}$. Po dosazení hodnoty typické pro kvazary, tedy $L \approx 10^{46} \text{erg.s}^{-1}$ dostáváme jako výslednou hmotnost $\sim 10^8 M_\odot$ (13).

Část II

Praktická část

Kapitola 4

ALMA

Jelikož jsem svou práci založil na pozorováních z ALMA, v této kapitole bych chtěl udělat malý úvod do toho, co to ALMA je.

Atacama Large (sub)Millimeter Array je jeden z nejnákladnějších projektů světové astronomie v historii. Na výstavbě a provozu se podílejí subjekty z Evropy (ESO), Severní Ameriky (USA, Kanada) a Východní Asie (Japonsko, Tajwan) za spolupráce Chile, kde je ALMA umístěna. Plány se začaly pomalu uskutečňovat už v polovině 90. let a ke spuštění early science došlo na konci roku 2011. Na konci roku 2012 se začalo s prvními pozorováními v plném provozu. Všechna data budou po uplynutí roční ochrany lhůty, rezervované pro autory požadavku na pozorování, uvolněna veřejnosti, dnes jsou tedy již k dispozici některá data z cyklu 0 - early science. Pozorování se provádějí v (sub-)milimetrové oblasti — 0,3mm–9,6mm.

4.1 Interferometr

Jak název napovídá, ALMA není jediný teleskop, jak je běžné například při pozorování v optické oblasti, ale jde o interferometr složený celkem z 66 antén — 16 ve středu pevných a dalších padesát variabilně rozmístěných po plošině Chajnantor. Možnost měnit rozložení antén je jednou z jedinečností této observatoře. Je možné si zvolit vysoké rozlišení, kterého je dosaženo v nejotevřenější konfiguraci, při které je celkový průměr 16km, nebo naopak velmi vysokou citlivost v kompaktní konfiguraci s průměrem 150m. V současnosti se jedná o zdaleka nejcitlivější a nejpřehlednější detektor z oblasti (sub-)milimetrové astronomie.

4.2 Data

Jak jsem napsal v úvodu, data jsou po uplynutí roční lhůty, k dispozici veřejně a to skrz ALMA data archive. K jejich získání není potřeba registrace. Data obsahují jak

výsledné snímky ve formátu .fits, tak kalibrační data a původní data korelátorů. Narozdíl od jiných projektů, které poskytují pouze finální snímky, je možné provést celou kalibraci s vlastními úpravami. Jediný problém, na který jsem při práci s datovým archivem ALMA narazil, se netýkal této služby jako takové, ale objemu dat. Z veřejně dostupných dat jsem na základě názvů projektů vytipoval všechny, které pracovaly s daty týkajícími se AGN. Když jsem chtěl stáhnout data z jednoho z nich, ukázalo se, že jde o více než 500GB dat. Práce s daty v takovém objemu je v domácích podmínkách velmi těžká a na strojích dostupných mi na univerzitě zcela nemožná – speciálně pro zpracování těchto dat mi původně zpřístupněn server na ÚTFA, kam byl také doinstalován potřebný software, nicméně jak právě při pokusu o stažení vyšlo najevo, neměl dostatečnou diskovou kapacitu. V tomto směru je tedy potřeba počítat s možnými velkými nároky na úložiště. Práci s těmito daty mi nakonec umožnilo MetaCentrum VO, kde jsem tedy následně s daty pracoval.

4.3 CASA

CASA značí Common Astronomy Software Applications. Jde o softwarový balík vyvíjený za spolupráce vědců z americké National Radio Astronomy Observatory, evropské European Southern Observatory, japonské National Astronomical Observatory of Japan, australské Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation - Australia Telescope National Facility a nizozemské Netherlands Institute for Radio Astronomy. Jde o jediný, v současnosti oficiálně podporovaný, systém pro zpracování dat (jak interferometrických, tak tzv. single-dish, tedy pouze z jedné radiové antény) získaných teleskopy ALMA, nebo například VLA. CASA nahradila starší AIPS++, který začal vznikat na začátku 90. let jako náhrada zastarávajícího AIPS. Základem jsou tedy úlohy (tasks) psané v jazyce C++ a v Pythonu vytvořené rozhraní, které umožňuje jednak spouštět jednotlivé úlohy, jednak využít skriptů.

4.3.1 Základní úlohy

Balík CASA obsahuje velké množství úloh pro interferometrická i single-dish data i úloh specifických pro konkrétní teleskopy. Zde uvedu pouze několik nejzákladnějších.

listobs

Úloha *listobs* slouží k výpisu základních informací o datech. Jsou zde informace o datu a času pozorování, poloze jednotlivých antén, informace o pozorovaných zdrojích, informace o nastavení kalibrátoru a další.

plotms

Úloha *plotms* umožňuje zobrazit samotná (visibility) data. Je možné například vykreslit amplitudu na osu y a antény na osu x a identifikovat případnou poruchu na některé z antén. Nebo závislost amplitudy na kanálu a z toho identifikovat kanály, ve kterých jsou pozorovány čáry, a kanály bez čarové emise, tedy vhodné pro snímek kontinua.

clean

Clean z visibility dat vytvoří snímek. Deconvoluce snímku probíhá iteračně a je možné jí provést interaktivně.

uvcontsub

Úloha *uvcontsub* vytvoří kopii visibility dat s odečtením emise kontinua, je tedy potřeba zadat kanály bez čarové emise, které se použijí pro fitování kontinua.

immath

Immath umožňuje provádět na snímcích matematické operace. Je také možné provádět matematické operace vzájemně mezi snímky - například sčítání dvou (i více) snímků.

Kapitola 5

Emise v čarách a kanálové mapy

Čarová emise je na rozdíl od té v kontinuu uchovávána ve třech rozměrech, kdy máme dvě prostorové a jednu spektrální osu. Toto nám umožňuje získat data o pohybu molekul, který pozorujeme. Ve výsledku máme tedy datovou krychli a můžeme si zobrazit intenzitu pozorované emise pro jednotlivé kanály (odpovídají frekvencím/rychlostem). Podle spektrálního rozlišení konkrétního pozorování můžeme mít tedy k dispozici i několik desítek těchto map pro jedinou spektrální čáru. To s sebou nese také nevýhody spojené se zpracováním a interpretací. Jak jsem již psal, jeden problém je objem dat. Dále je také obtížnější prezentace. Je možné zobrazit samotné kanálové mapy, nebo tzv. momenty (slovo moment je, jak uvádí i manuál CASA v tomto smyslu použito velmi volně nemá žádnou fyzikální podstatu a vyjadřuje kolaps spektrální osy, aby vznikl dvourozměrný snímek). CASA umožňuje pomocí úlohy *immoments* vytvořit momentové snímky různého řádu, například:

- nultý moment — vyjadřuje celkovou emisi získanou sumou

$$M_0 = \Delta v \sum I_i$$

, kde Δ vyjadřuje šířku jednoho pixelu v ose, kterou kolabujeme (tedy nejčastěji spektrální)

- první moment

$$M_1 = \frac{\sum I_i v_i}{M_0}$$

umožňuje vytvořit rychlostní mapu, kdy pro každý pixel spočítá vážený průměr radiálních rychlostí (nemusí se jednat pouze o rychlost, lze použít kteroukoliv osu)

- druhý moment

$$M_2 = \sqrt{\frac{\sum I_i (v_i - M_1)^2}{M_0}}$$

slouží k vytvoření mapy disperze rychlostí tak, že pro každý pixel podél spektrální (případně i jiné, kolabované) osy spočítá váženou hodnotu odchylky rychlostí od jejich průměru (11).

Využitelnost nultého momentu je zřejmá, lze jednoduše získat celkový tok. Lze ho také použít pro vytvoření masky pro úlohu clean a tu pak použít pro zlepšení poměru S/N. Je také vhodný pro prostorovou představu o rozložení molekul zodpovědných za detekovanou emisi, k čemuž se data uložená v datové kostce příliš nehodí, jelikož vždy vidíme pouze malou část celkového toku. První moment, tedy mapa zobrazující radiální rychlosti, je vhodný pro dynamickou představu, je možné na ní například měřit rychlost pohybu látky v určité vzdálenosti od dynamického centra a poté na základě modelu křivky rotačních rychlostí odvodit vlastnosti centra (hmotnost černé díry ve středu galaxie).

Kapitola 6

NGC 1068

NGC 1068, také označovaná jako M 77, je galaxie klasifikovaná jako aktivní galaxie s jádrem typu Seyfert 2. Jako u ostatních Seyfertových galaxií jde o galaxii spirální, nachází se v souhvězdí velryby ve vzdálenosti přibližně 14,4Mpc.

6.1 ALMA pozorování

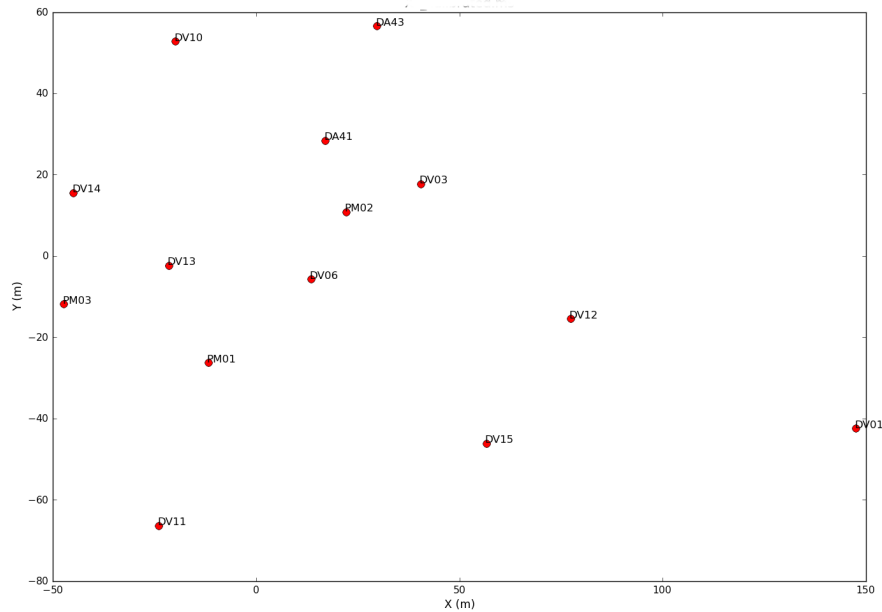
Data z pozorování NGC 1068, která jsem měl k dispozici, pocházela z projektu s kódem 2011.0.00061.S. Tato galaxie byla v rámci něho pozorována dvakrát. Poprvé 28.11.2011 5.32:53,7-6.44:19, podruhé 9.1.2012 22.44:49,6-10.1.2012 1.52:44,5.

V prvním pozorování bylo použito 14 antén a pozorování proběhlo ve čtyřech spektrálních oknech:

1. $ch_0=329173,296\text{MHz}$
2. $ch_0=330499,138\text{MHz}$
3. $ch_0=338666,627\text{MHz}$
4. $ch_0=340547,764\text{MHz}$

kde ch_0 značí střední kanál. Použito bylo ve všech případech 3840 kanálů na každé okno s šířkou 488,281kHz.

Ve druhém pozorování bylo použito již 16 antén (pro zajímavost je možné se podívat na jejich pozice na obrázku 6.1), opět ve čtyřech spektrálních oknech, v každém okně 3840 kanálů šířky 488,281kHz. Centrovány byly následovně:



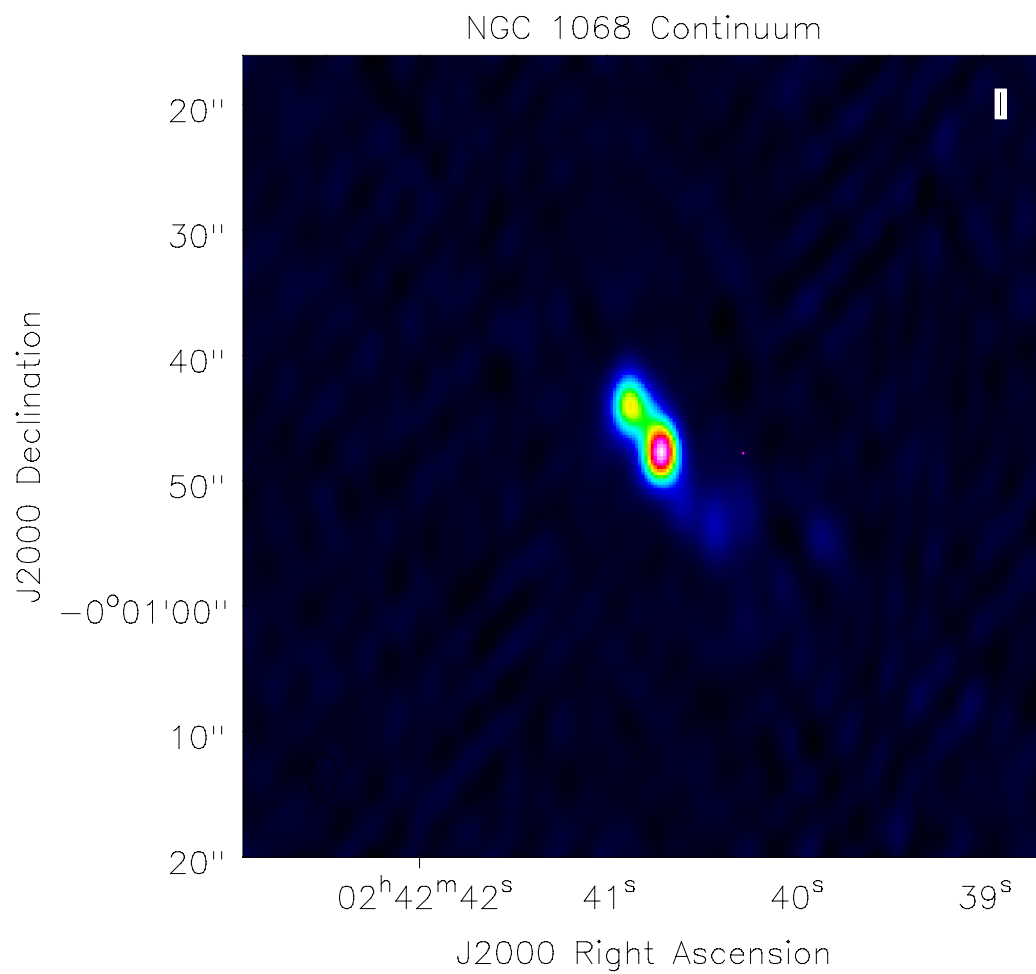
Obrázek 6.1: Pozice antén při pozorování NGC 1068 z ledna 2012.

1. $ch_0=97942,996\text{MHz}$
2. $ch_0=99942,996\text{MHz}$
3. $ch_0=1081110,484\text{MHz}$
4. $ch_0=109068,484\text{MHz}$

Jak již napovídá počet antén, jde o data z pozorování v rámci Cycle 0, tedy early science. Tato pozorování měla posloužit jako ukázka možností ALMA, a tím tedy přilákat další zájemce o pozorování.

6.2 Emise v kontinuu

Emise kontinua je zobrazena na snímku 6.2. Celkový tok je $13\pm 2\text{mJy/beam}$, což je ve shodě s měřením ve stejném oboru z IRAM - 15 ± 5 (4). Maximum emise je na souřadnicích $\alpha = 02 : 42 : 40,715$ a $\delta = -0^\circ 0' 47.688''$, rms 2.10^{-1}Jy/beam . Pozice centra odpovídá jednak zdroji röntgenové emise, jak je vidět na obrázku 6.14, jednak je ve shodě s předchozími měřeními na vlnové délce $\lambda = 3\text{mm}$ a $\lambda = 1\text{mm}$ (4). V tomto oboru je zdrojem emise kontinua zahřátý plyn a prach v okolí galaktického centra. Tuto emisi je možné rozdělit na tři části - centrální a poté dvě slabší prodloužení, která jsou spojená s jetem a counter-jetem.



Obrázek 6.2: Emise v kontinuu galaxie NGC 1068.

6.2.1 Čára CS

Na snímku 6.3 můžeme vidět, že většina emise molekul CS je soustředěna v malé oblasti kolem jádra galaxie. Jde o pozorování přechodu mezi hladinami 3–2. Emise molekul CS je zesílená v prostředí s vyšší teplotou a hustotou. Jak je vidět na snímku 6.3, tuto emisi pozorujeme zejména ve středu NGC 1068 a v menší míře poté ve spirálních ramenech, ve kterých probíhá tvorba nových hvězd. Zdrojem energie pro tuto emisi je tedy jednak röntgenové záření aktivního galaktického jádra a také UV záření masivních mladých hvězd.

Na této čáře můžeme pozorovat také jet. Nejde o jet ve smyslu typickém například pro radiovou emisi, ale lze pozorovat molekulární outflow jak ve směru k nám, tak ve směru od nás. Toto je dobře patrné na P-V diagramu, tedy position-velocity. Jde o řez rychlostmi ve vztahu k vzdálenosti. Tento diagram pro emisi z centrální oblasti (řez dlouhý 10'' podél hlavní osy) lze vidět na obrázku 6.6, kde v těsné blízkosti centra lze pozorovat molekuly pohybující se rychlostmi 1000–1300 km.s⁻¹

6.3 Čára CH₃OH

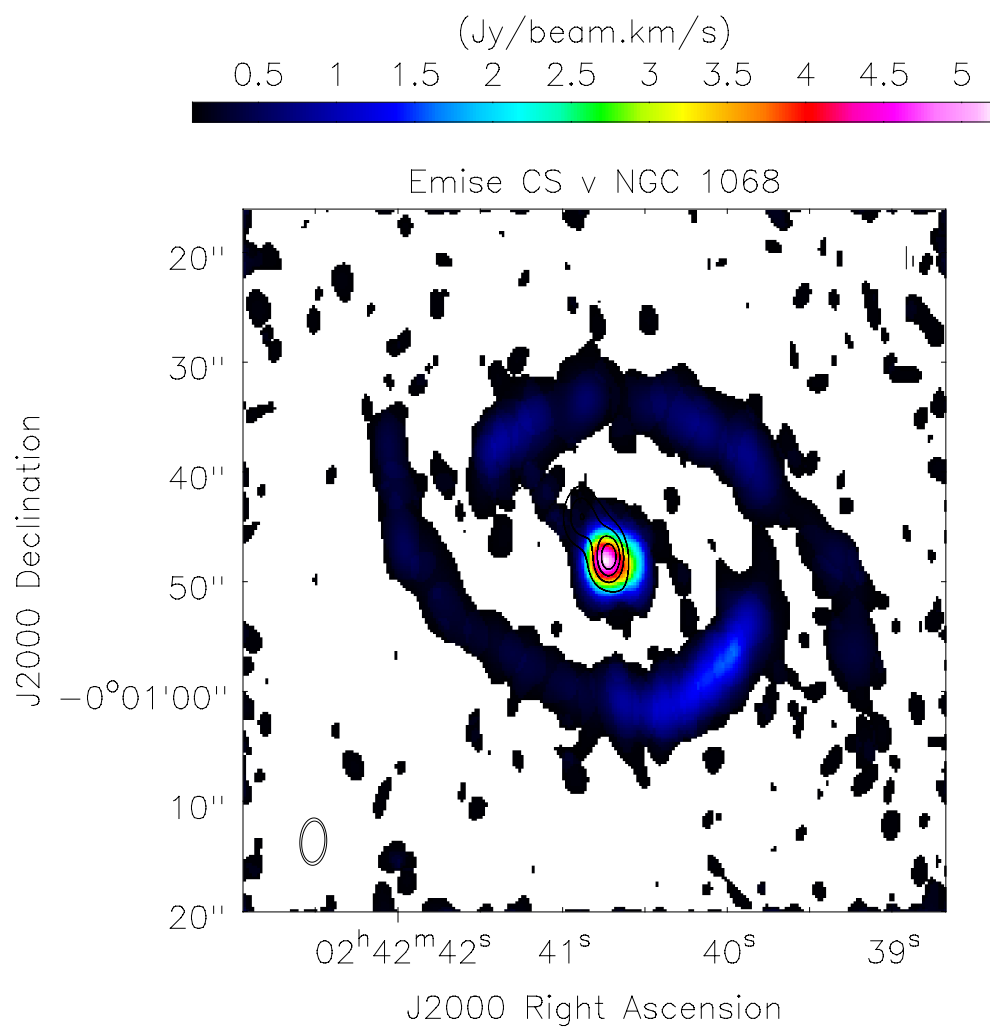
Jak je vidět na obrázku 6.7 CH₃OH pozorujeme jak v centru, tak i ve spirálních ramenech. Tato čára je výsledkem přechodu $J=2-1$.

6.4 Čára HC₃N

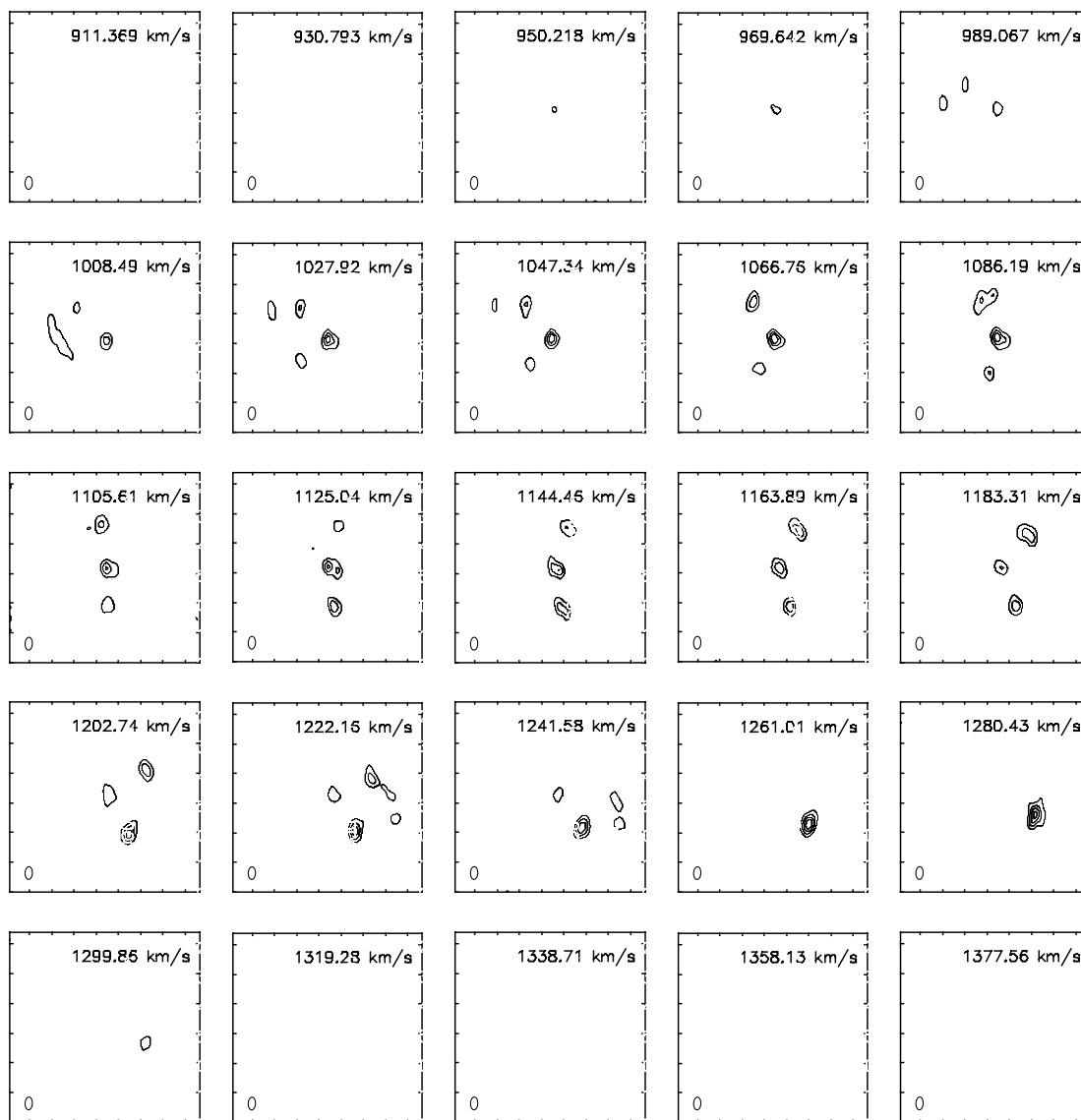
Podobně jako například CS, emisi HC₃N pozorujeme v oblastech s vyšší teplotou a hustotou. Důkazem toho je i to, že tato konkrétní čára je výsledkem přechodu $J=11-10$. Základní frekvence této čáry je 100.07808 GHz. Důvodem, proč nepozorujeme emisi této molekuly ve spirálních ramenech je to, že je náchylná na fotodisociaci důsledkem UV/röntgenového záření. Abychom ji tedy mohli pozorovat je potřeba, aby region ve kterém vznikla čára byl před tímto zářením chráněn. Tuto ochranu může poskytnout například prach, který se vyskytuje v okolí AGN, ve spirálních ramenech ale vhodné prostředí schází.

6.5 Čára CO

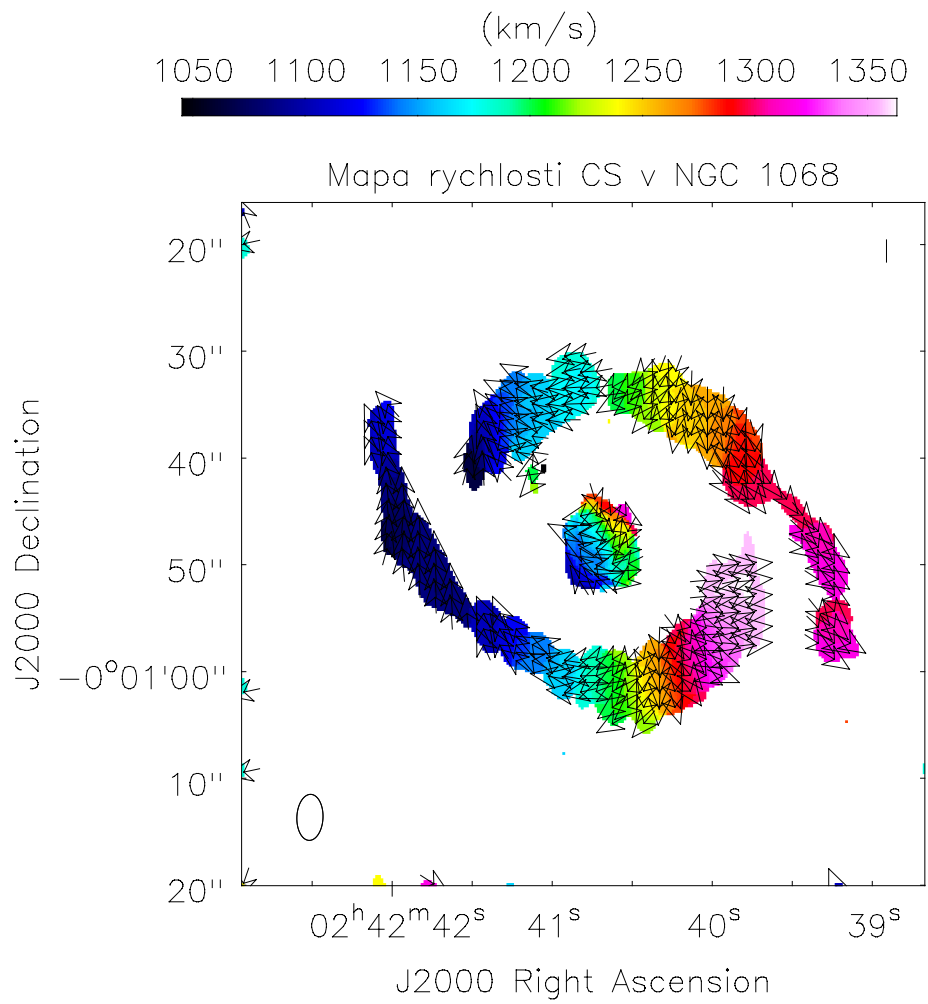
Oxid uhličitý byl v těchto pozorováních detekován ve dvou izotopologiích. Konkrétně jde o ¹³CO a C¹⁸O, tedy molekuly s různými izotopy uhlíku i kyslíku. Na obrázku 6.10 je vidět rozložení molekul ¹³CO, na obrázku 6.11 je C¹⁸O. V obou případech se jedná o přechod $J=1-0$, základní frekvence čáry C¹⁸O je 109.78218 GHz, základní frekvence čáry ¹³CO 110.20135 GHz. Na první pohled je patrný rozdíl v zastoupení těchto izotopologií v centrálních oblastech. Emise ¹³CO se zde vyskytuje velmi slabě, nicméně C¹⁸O chybí úplně.



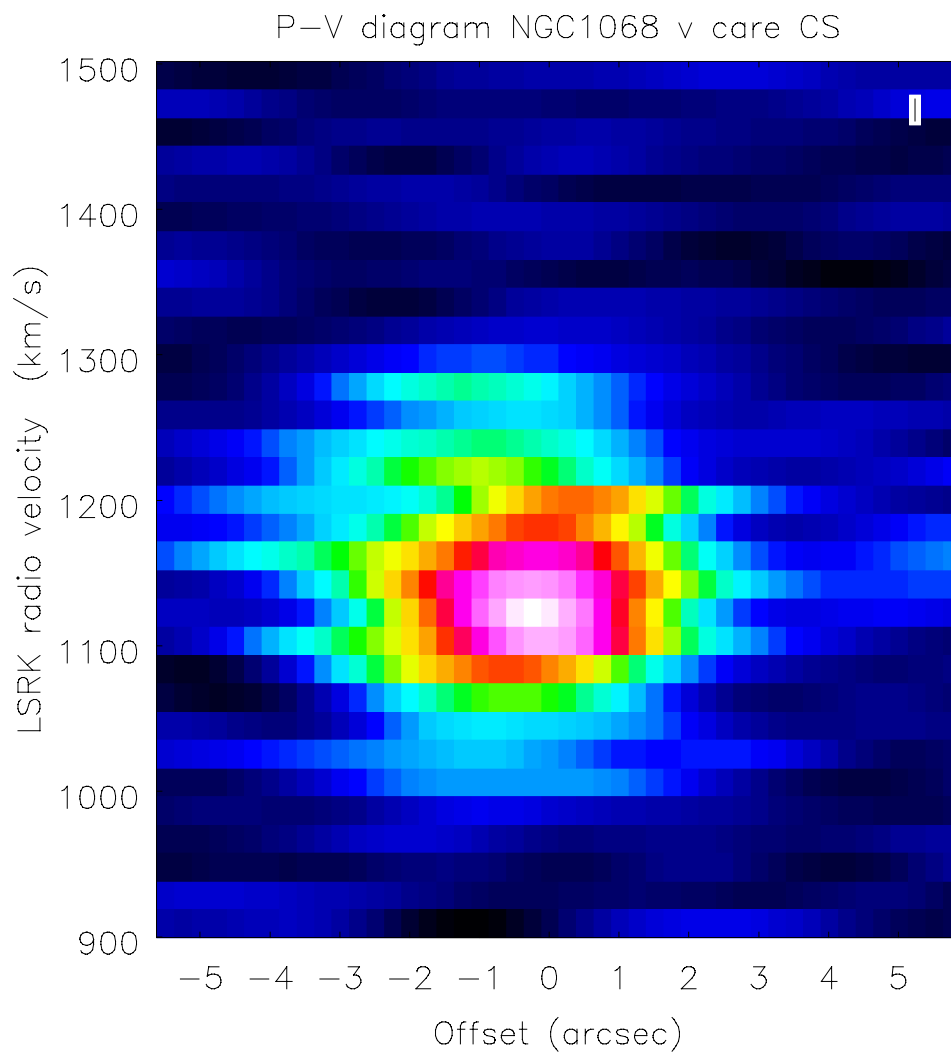
Obrázek 6.3: Na tomto snímku lze vidět celkovou emisi molekul CS v galaxii NGC 1068. Konturami je vyznačena emise v kontinuu.



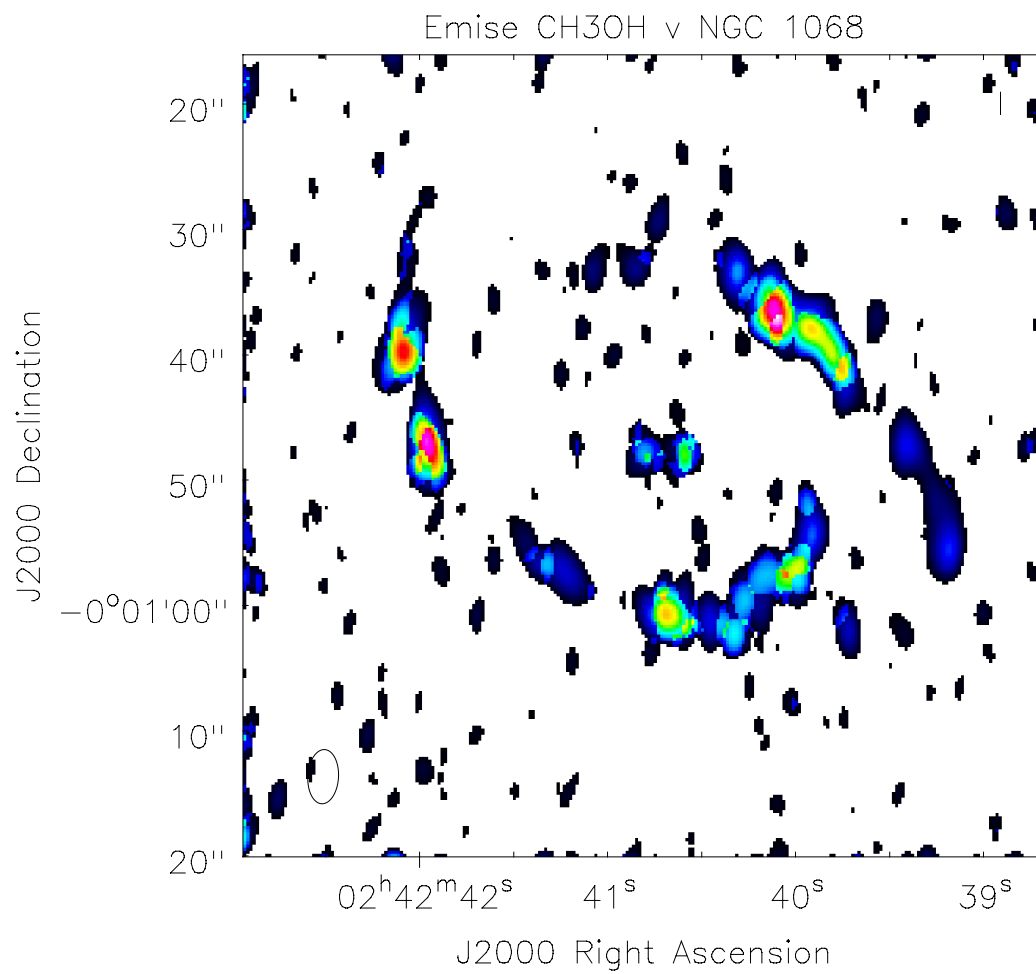
Obrázek 6.4: Kanálové mapy zobrazující intenzitu emise v čáře CS. Centrální rychlost každé mapy je zobrazena v jejím pravém horním rohu.



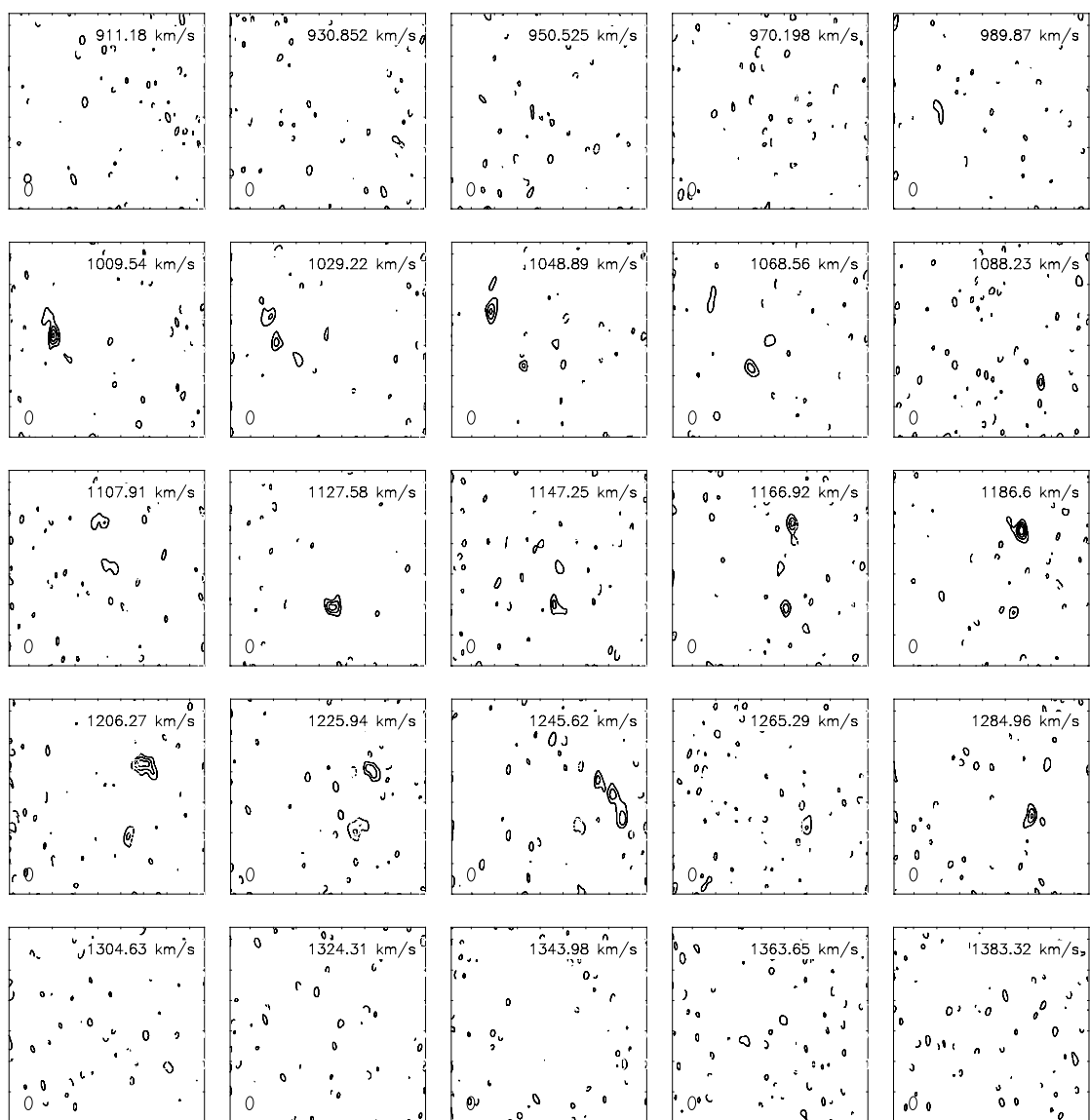
Obrázek 6.5: Mapa rychlostí pohybu molekul CS v galaxii NGC 1068 získaná jako první moment pomocí úlohy *immoments* v CASA.



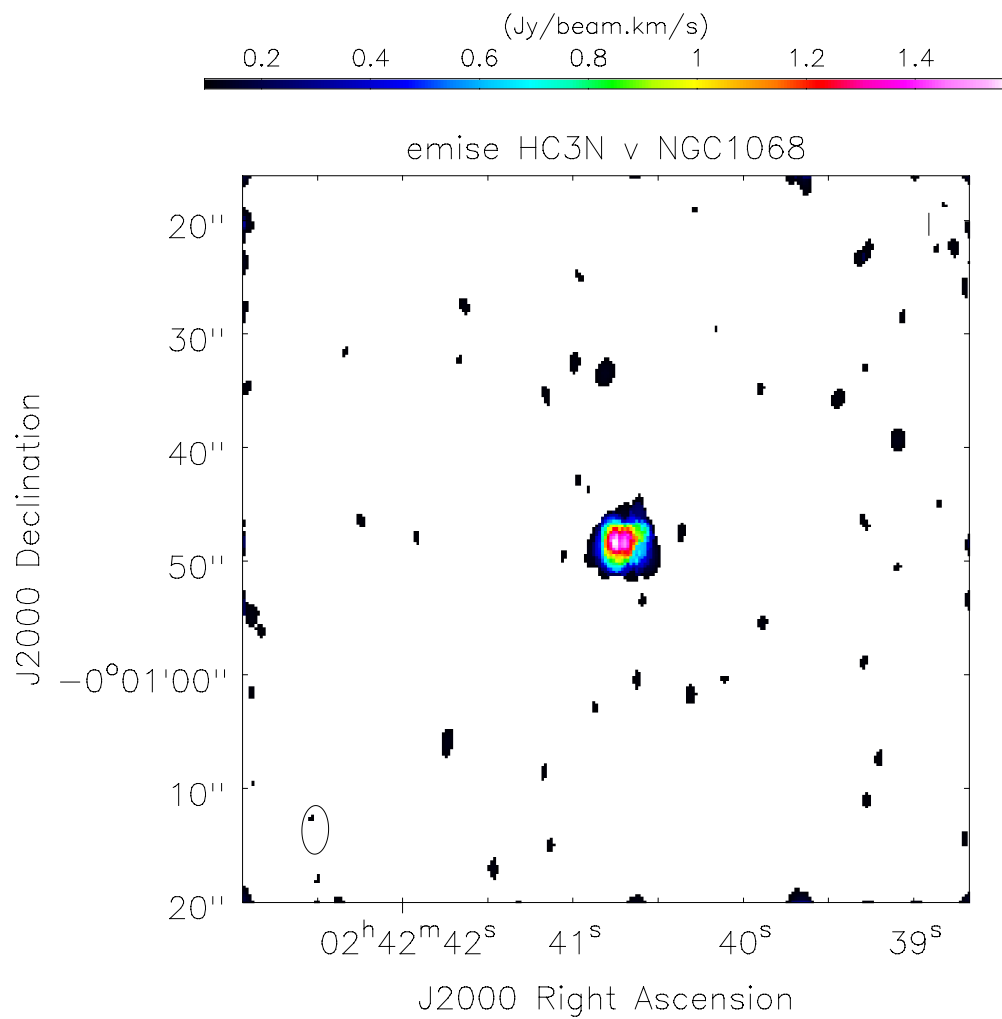
Obrázek 6.6: Mapa rychlostí pohybu molekul CS v galaxii NGC 1068 získaná jako první moment pomocí úlohy *immoments* v CASA.



Obrázek 6.7: Celková emise molekuly CH₃OH.

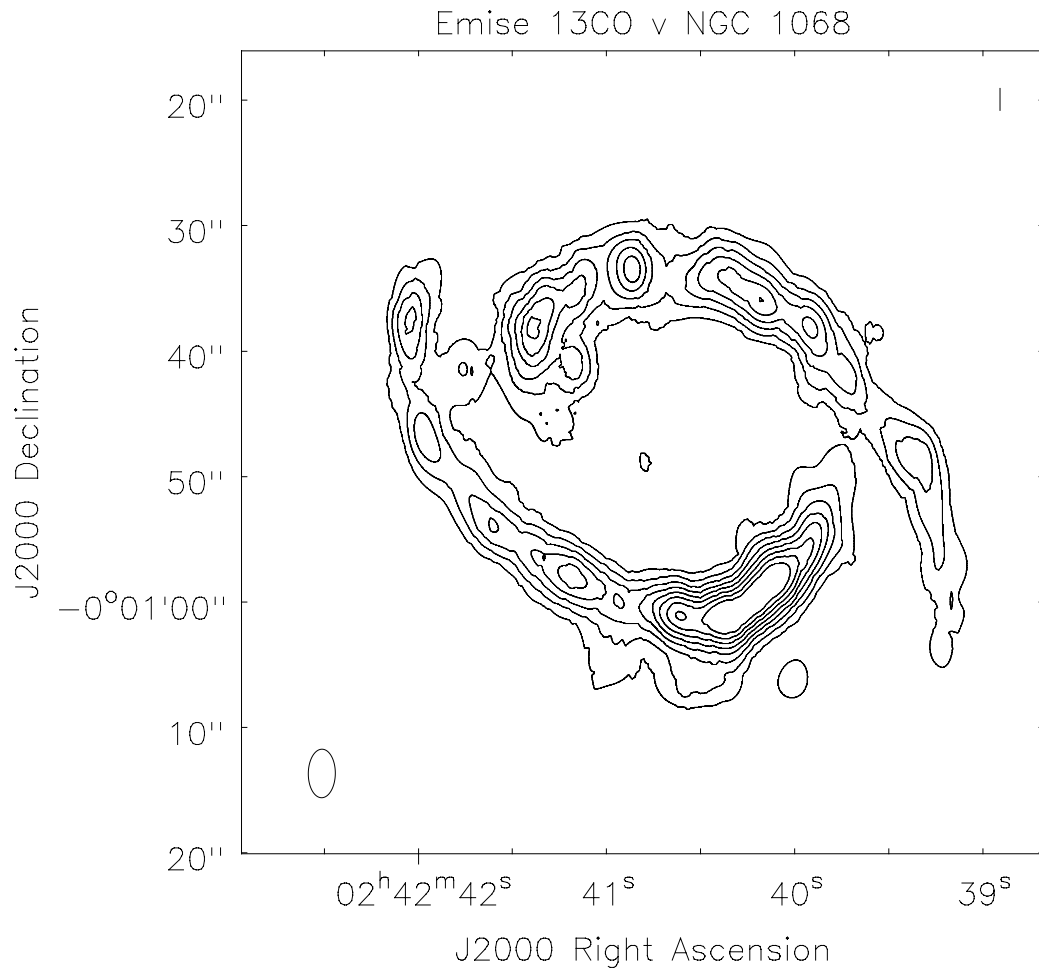


Obrázek 6.8: Kanálové mapy zobrazující intenzitu emise v čáře CH_3OH . Centrální rychlost každé mapy je zobrazena v jejím pravém horním rohu.



Obrázek 6.9: Kanálové mapy zobrazující intenzitu emise v čáře HC₃N. Centrální rychlost každé mapy je zobrazena v jejím pravém horním rohu.

Celkový tok emise ^{13}CO je $132.796\text{Jy.km}^{-1}.\text{beam}^{-1}$, tok z molekuly C^{18}O je $20.965\text{Jy.km}^{-1}.\text{beam}^{-1}$, což dává poměr emise $^{13}\text{CO}/\text{C}^{18}\text{O} = 6.33$.

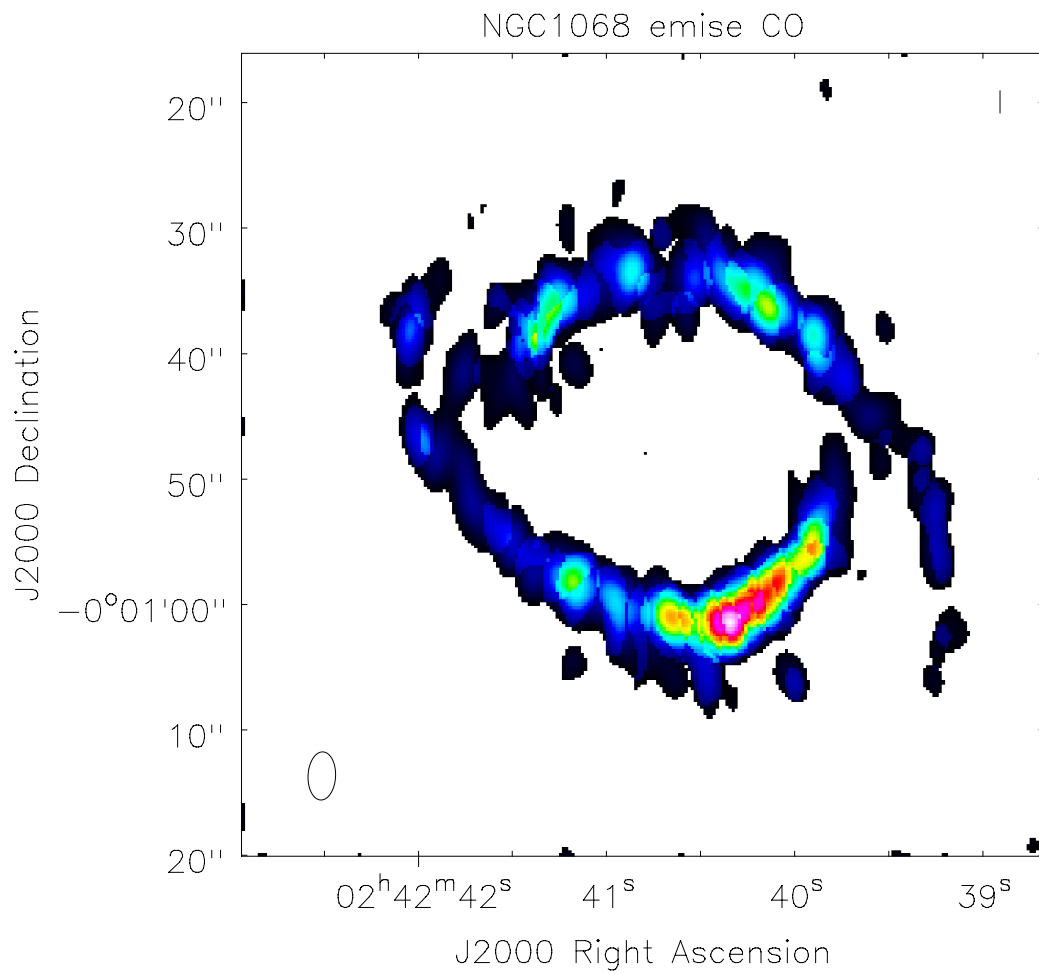


Obrázek 6.10: Zastoupení molekuly ^{13}CO a její rozložení v rámci NGC 1068.

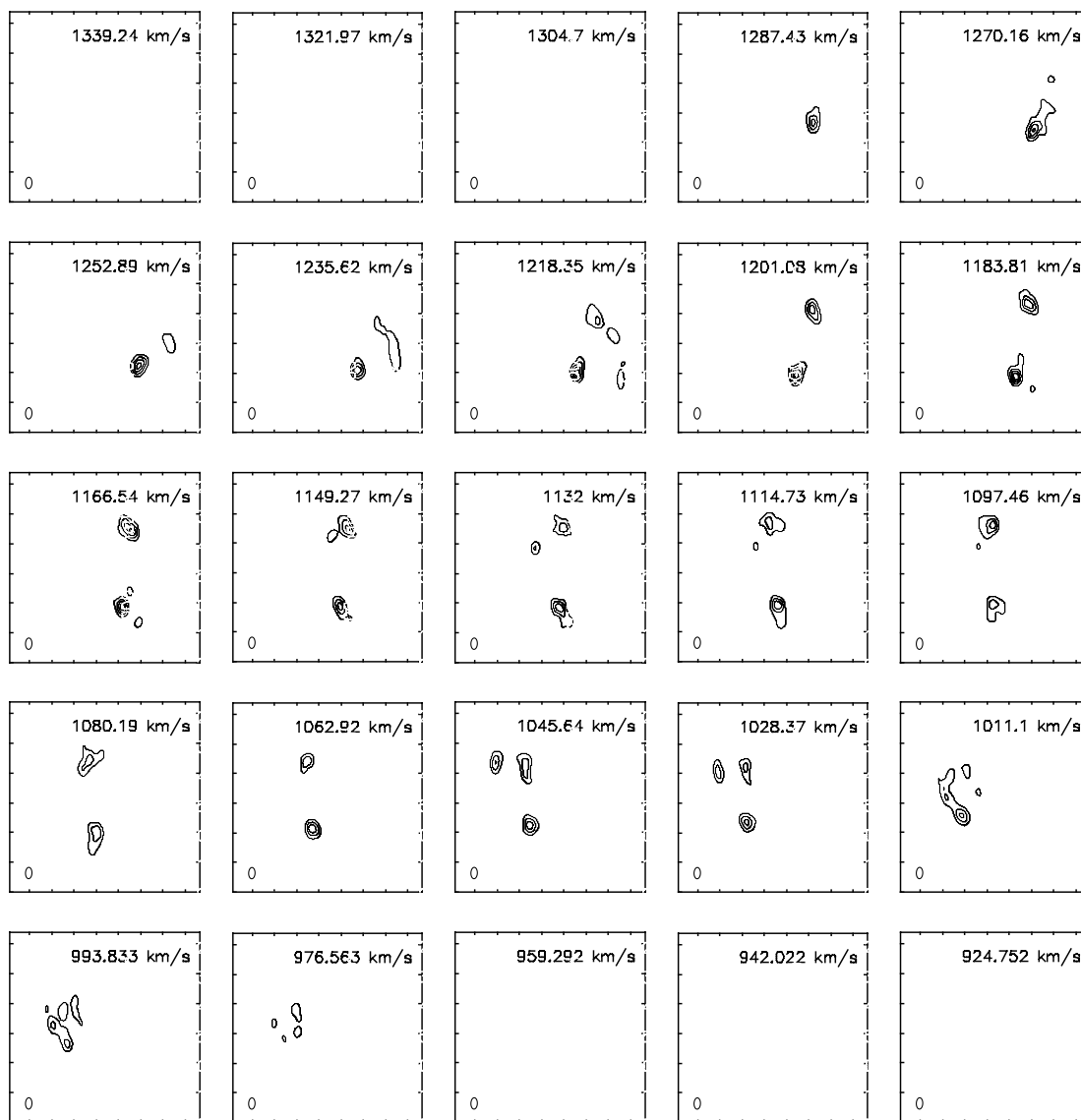
Pokud jde o rozložení v rámci galaxie, není, jak ukazuje obrázek 6.13, žádný viditelný rozdíl mezi oběma variantami této molekuly. Tento snímek vznikl jako podíl nultých momentů.

6.6 Pozorování z družice Chandra

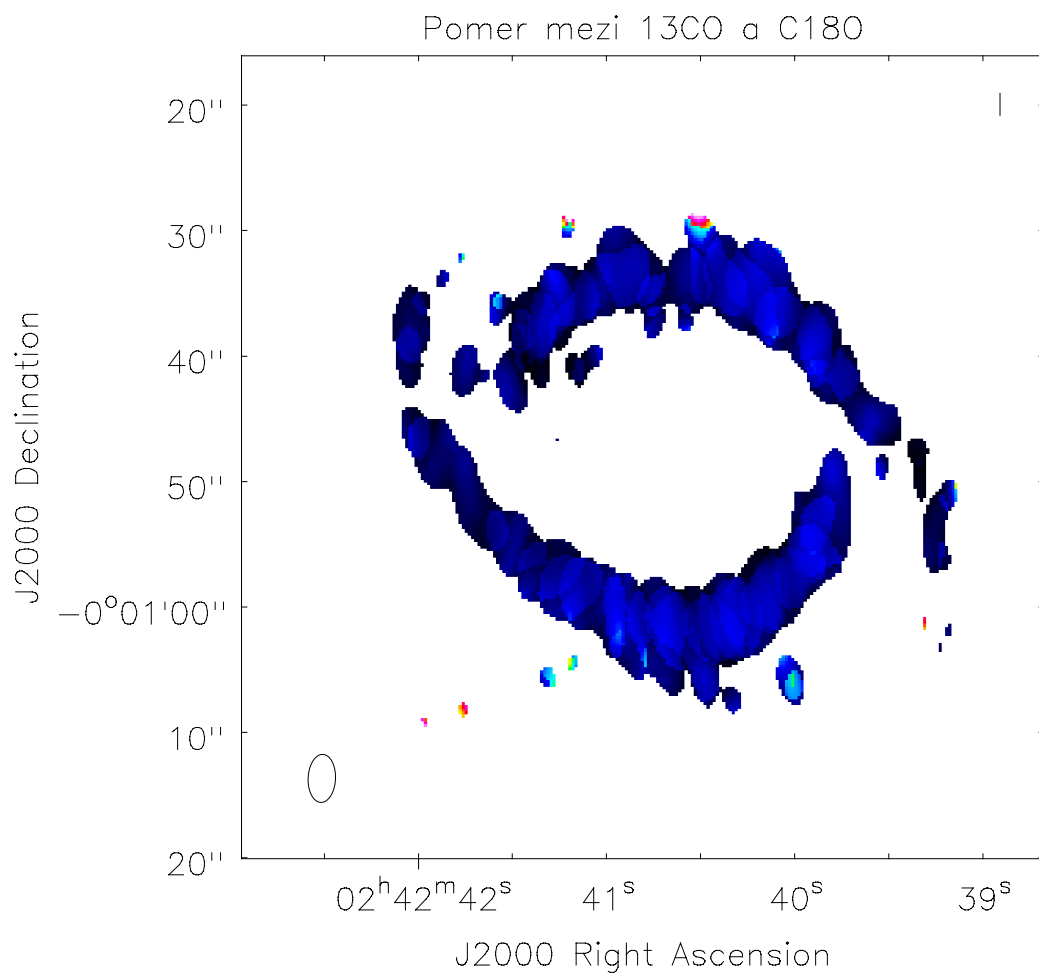
Data z družice Chandra jsem zvolil jako doplnění informací, které poskytuje pozorování v milimetrové oblasti, o informace z röntgenové části spektra, jelikož přítomnost této vysokoenergetické emise zapříčiňuje rozdílné zastoupení jednotlivých molekul a jejich rozložení v rámci galaxie. Obrázek 6.14 vznikl složením všech dostupných pozorování galaxie NGC 1068 z veřejného archivu (8). Šlo tedy o data z přístroje ACIS naměřená v letech 1999, 2000 a 2008. Všechna byla složena do jediného snímku.



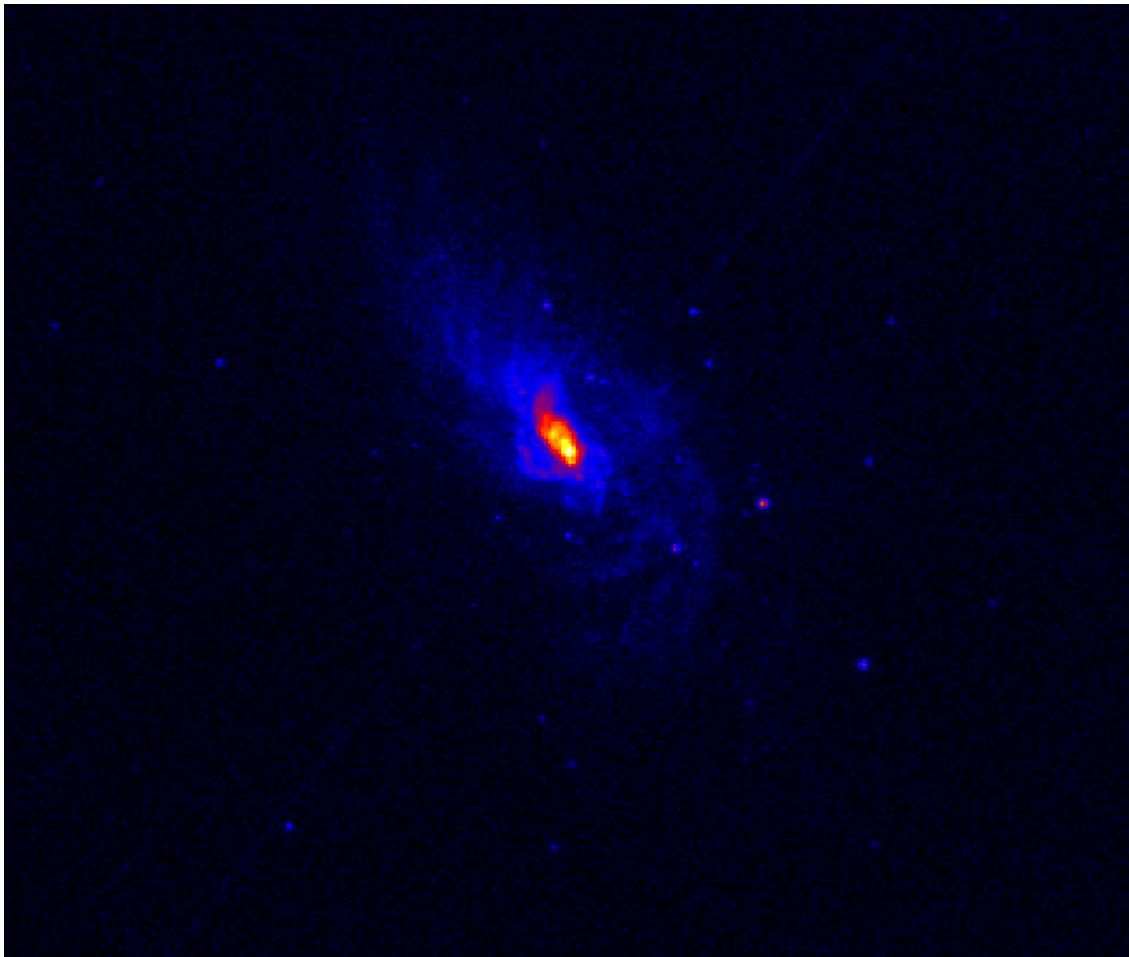
Obrázek 6.11: Zastoupení molekuly $C^{18}O$.



Obrázek 6.12: Kanálové mapy zobrazující intenzitu emise v čáře $C^{18}O$. Centrální rychlost každé mapy je zobrazena v jejím pravém horním rohu.



Obrázek 6.13: Pomer snímků celkové emise $^{13}\text{CO}/\text{C}^{18}\text{O}$. Jak je, vidět rozložení molekul CO v rámci galaxie NGC 1068 lze považovat za jednotné, bez obledu na jejich izotopické složení.



Obrázek 6.14: Chandra pozorování NGC 1068. Na snímku je vidět výrazná emise röntgenového záření ze středu galaxie ve formě jetu.

Kapitola 7

NGC 253

NGC 253 bývá nejčastěji klasifikována jako tzv. starburst galaxie. Jde o aktivní galaxii, ve které aktuálně probíhá intenzivní tvorba nových hvězd. Od nás je vzdálena $(3,5 \pm 0,2)\text{Mpc}$ a vzdaluje se rychlostí $243\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ (9).

Galaxie NGC 253 byla na ALMA pozorována paralelně s NGC 1068 v rámci stejného projektu, tedy 2011.0.00061.S. Pozorování proběhlo v bandu 7 28. listopadu 2011 mezi 01:54:19,2 a 03:05:37,0 ve čtyřech spektrálních oknech:

- $\text{ch}_0 = 330197,291\text{MHz}$
- $\text{ch}_0 = 331530,291\text{MHz}$
- $\text{ch}_0 = 339701,204\text{MHz}$
- $\text{ch}_0 = 341593,279\text{MHz}$

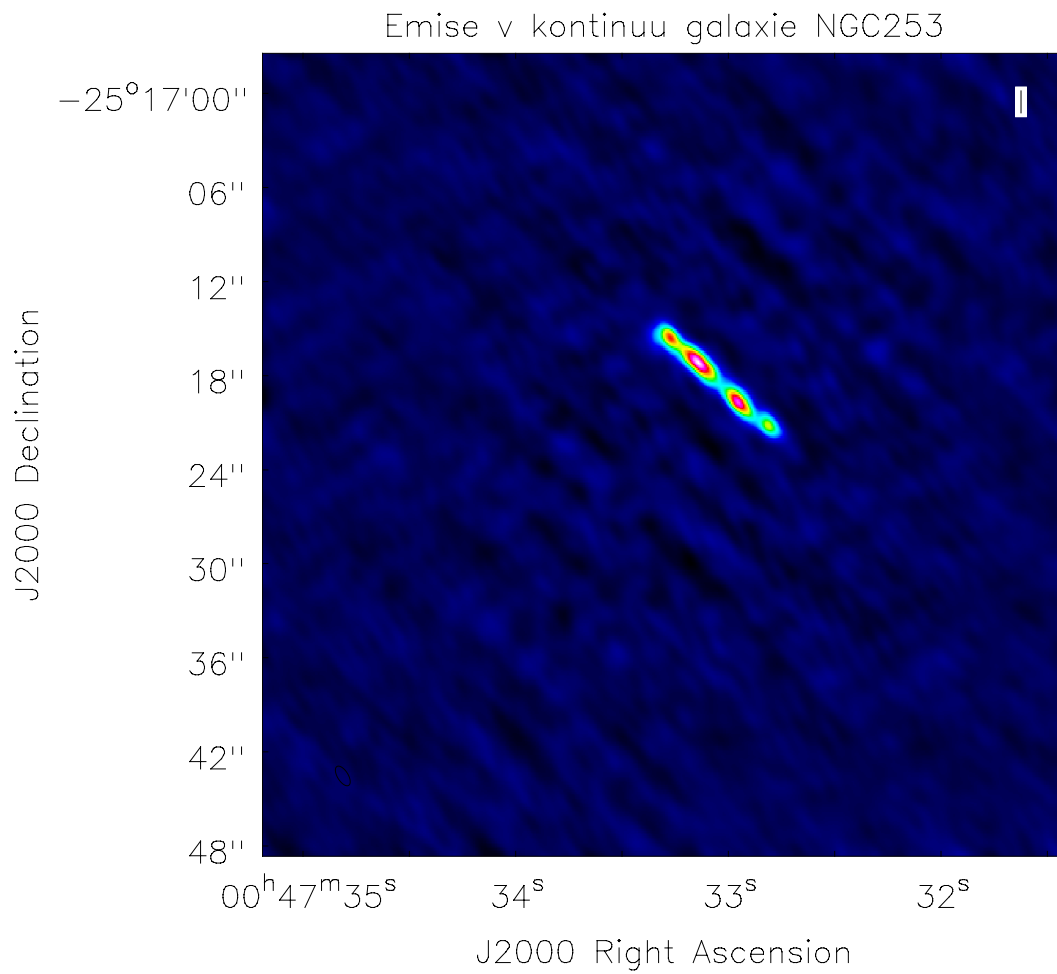
Každé okno bylo rozděleno na 3840 kanálů po 488,281kHz.

7.1 Emise v kontinuu

Emise v kontinuu je vidět na obrázku 7.1. Celkový tok je $0.9\text{Jy}/\text{beam}$, tedy výrazně slabší než v případě NGC 1068.

7.2 Emise v CO

Podobně jako u NGC 1068, i v této galaxii byla molekula oxidu uhelnatého detekována ve variantě C^{18}O i ^{13}CO . Jelikož toto pozorování proběhlo v bandu 7 (tedy v rozsahu

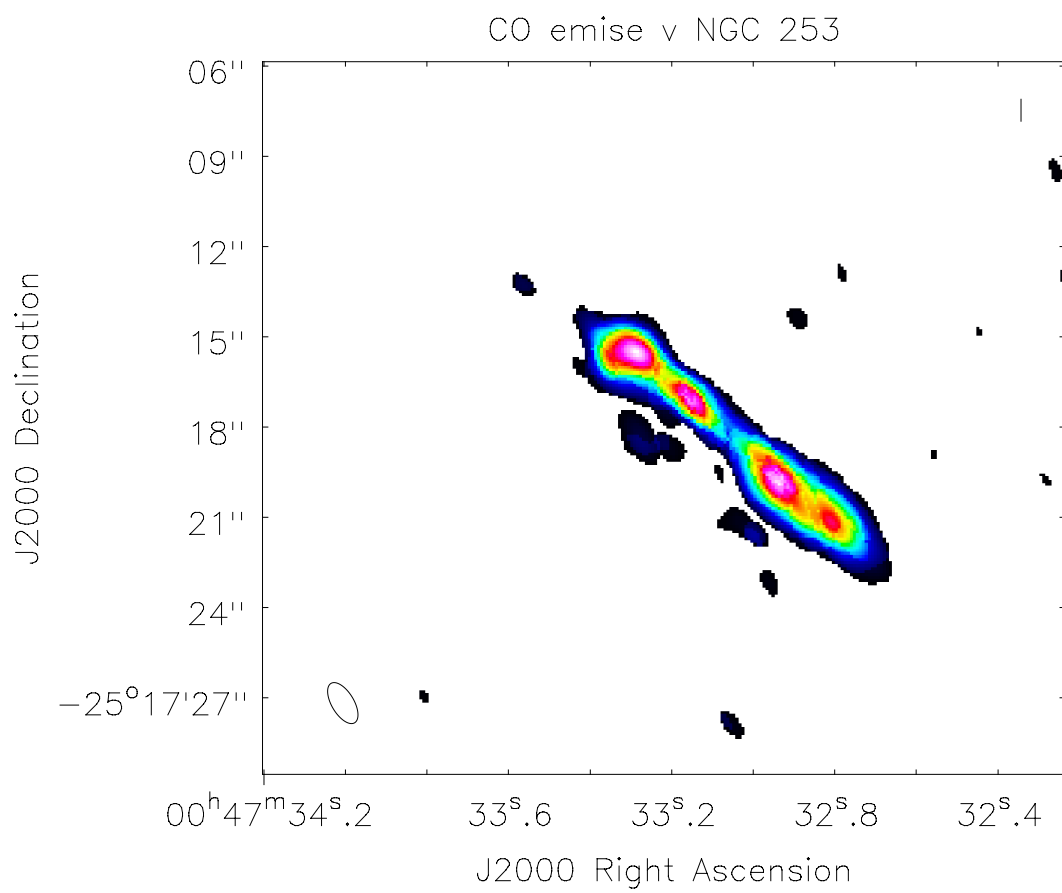


Obrázek 7.1: Emise kontinua v galaxii NGC 253.

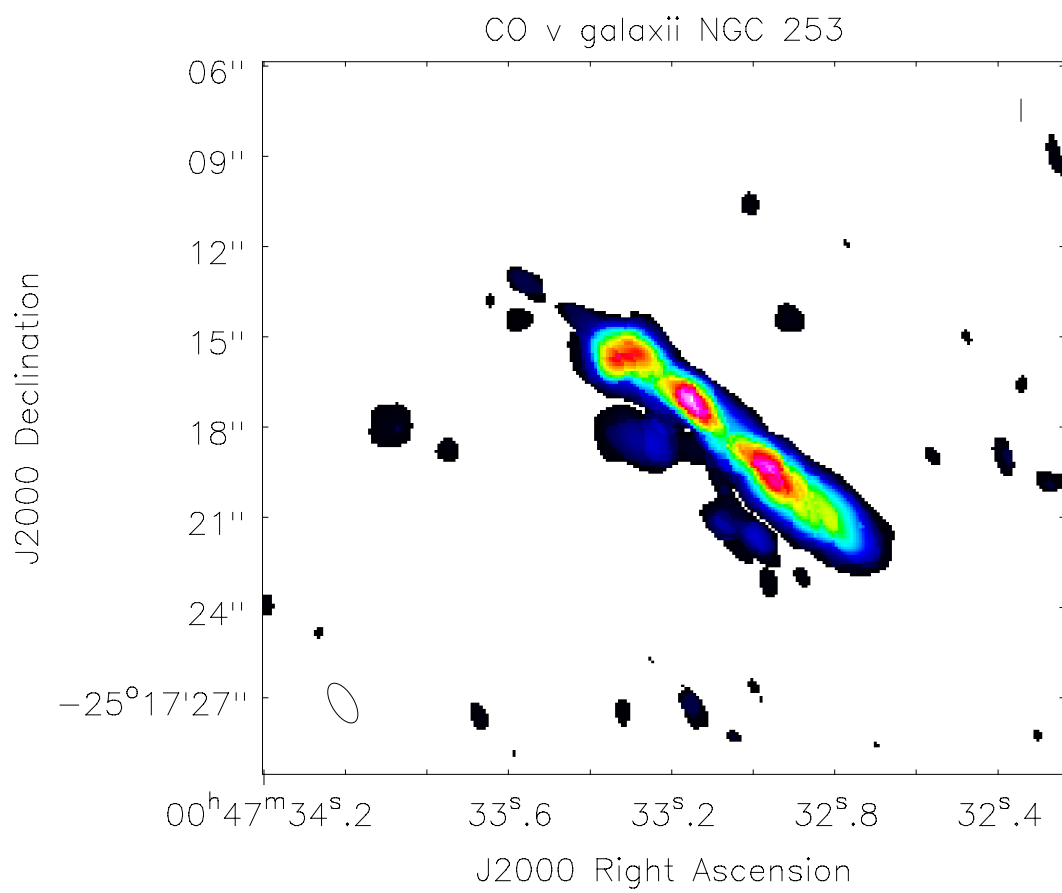
frekvencí 275–373GHz), jsou zde zachyceny vyšší přechody, konkrétně $J=3-2$. Celkový tok $C^{18}O$ je zobrazen na obrázku 7.2 a dosahuje hodnoty $158.92 \text{ Jy.km.s}^{-1}.\text{beam}^{-1}$. Celkový tok ^{13}CO zobrazený na snímku 7.3 činí $631.846 \text{ Jy.km.s}^{-1}.\text{beam}^{-1}$. Poměr mezi ^{13}CO a $C^{18}O$ je tedy 3.97.

7.3 Pozorování z Chandra

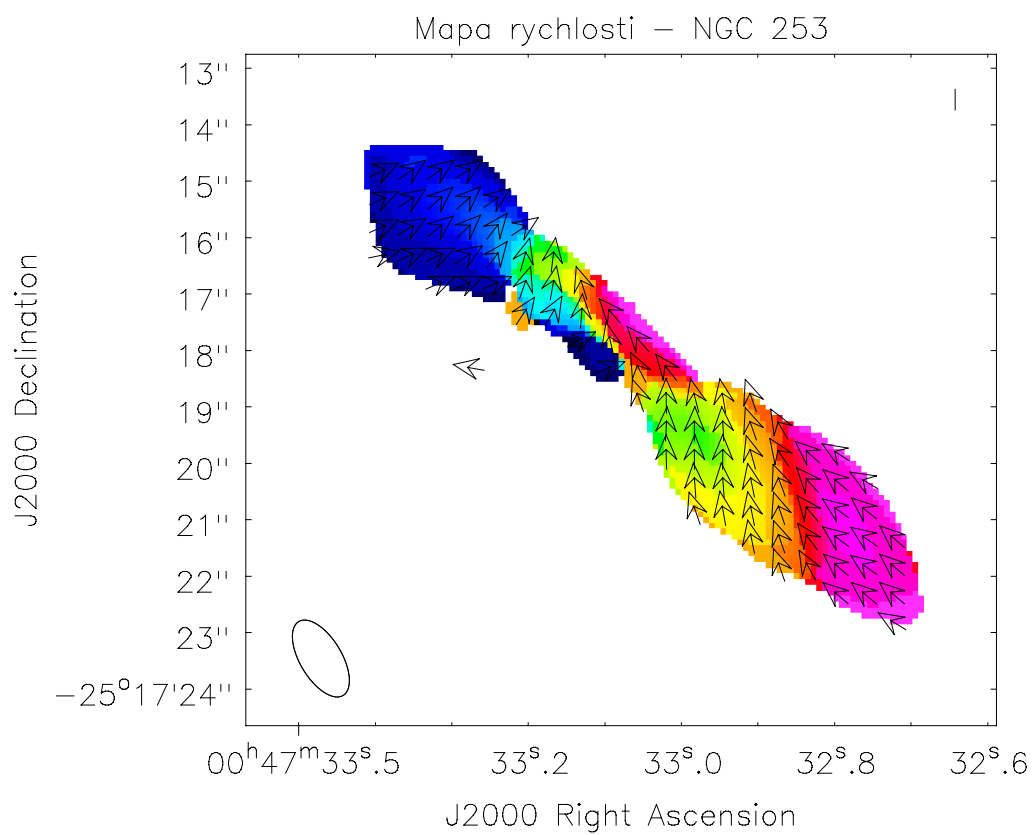
Podobně jako u NGC 1068 jsem se rozhodl data z ALMA doplnit ještě o data z Chandra. Snímek röntgenové emise je vidět na obrázku 7.5. Vzhledem k tomu, že tuto galaxii pozorujeme téměř z roviny disku (tzv. edge on), lze zde dobře pozorovat oba jety - nad i pod rovinu disku.



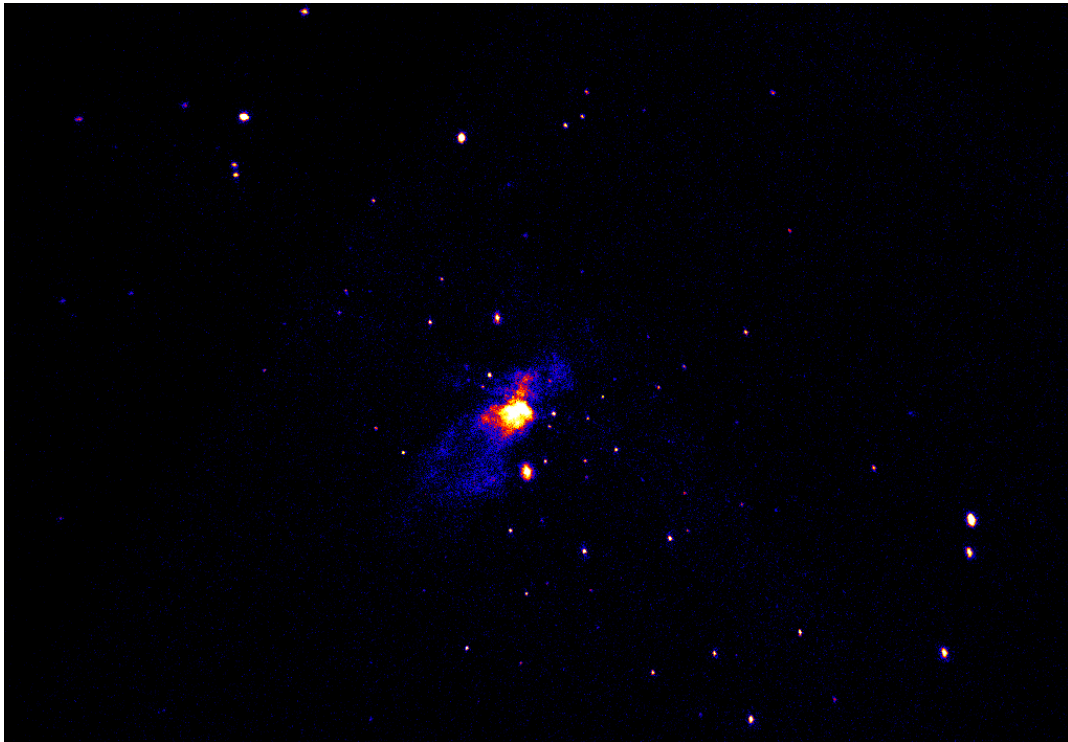
Obrázek 7.2: Emise molekuly $C^{18}O$ v galaxii NGC 253.



Obrázek 7.3: Emise molekuly ^{13}CO v galaxii NGC 253.



Obrázek 7.4: Mapa rychlostí z emise molekuly ^{13}CO .



Obrázek 7.5: Chandra pozorování galaxie NGC 253.

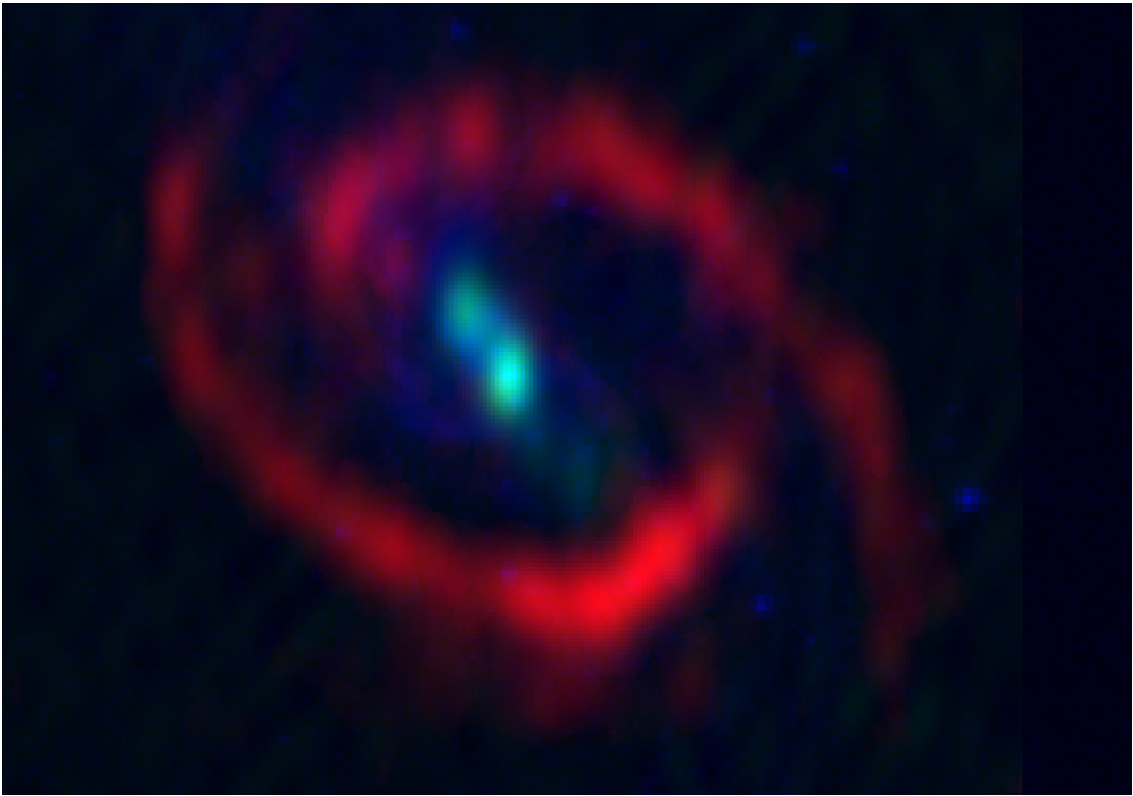
Kapitola 8

Kompozitní snímky

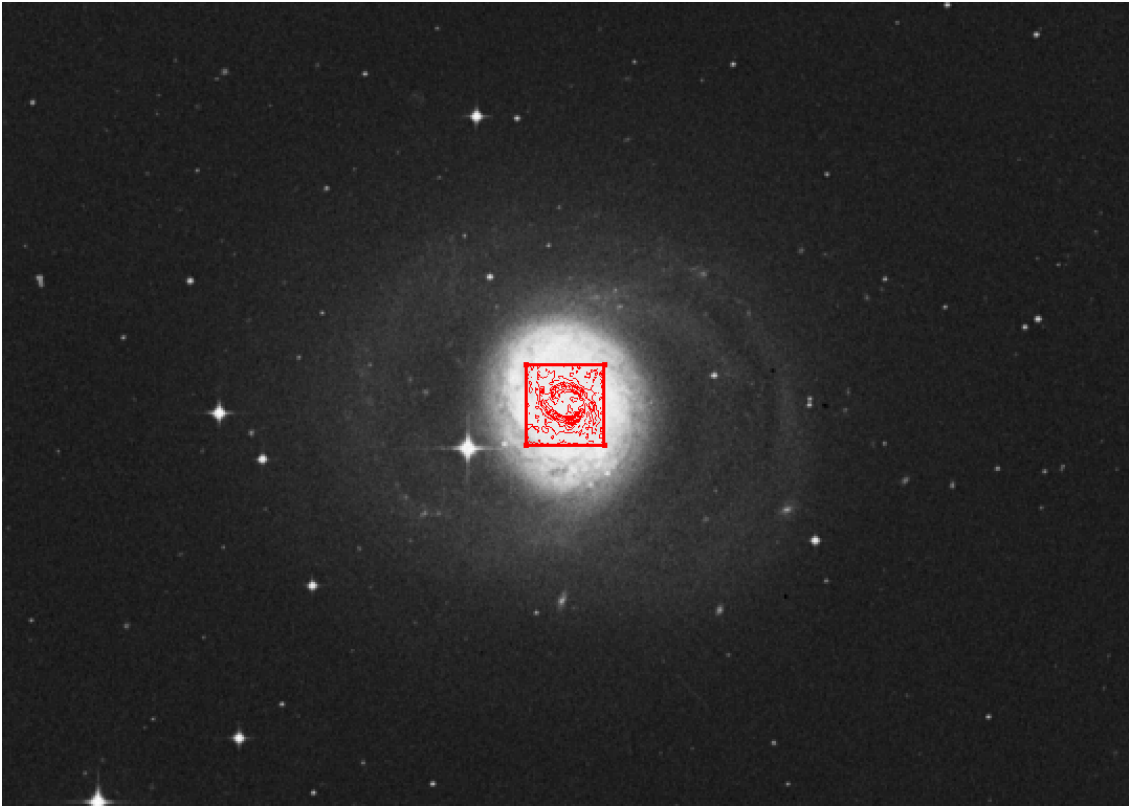
Pro lepší představu jak jsou jednotlivé snímky zasazeny v galaxii jsem vytvořil také několik kompozitních snímků. Prvním je 8.1, který ukazuje rozložení molekul CO (červeně). Ty tvoří jasný prstenec kolem středu, kde se prakticky nevyskytují, protože je zde výrazná emise ionizujícího záření aktivního jádra, která je disociuje. Modrou barvou je vyznačena emise v röntgenové oblasti z družice Chandra a zeleně je zanesena oblast výskytu emise molekul CS, typická pro horké a husté oblasti.

Dalším obrázkem je 8.2, kde je optický snímek získaný ze Sloan Digital Sky Survey a na něm červeně vyznačná oblast s konturami CO emise z ALMA.

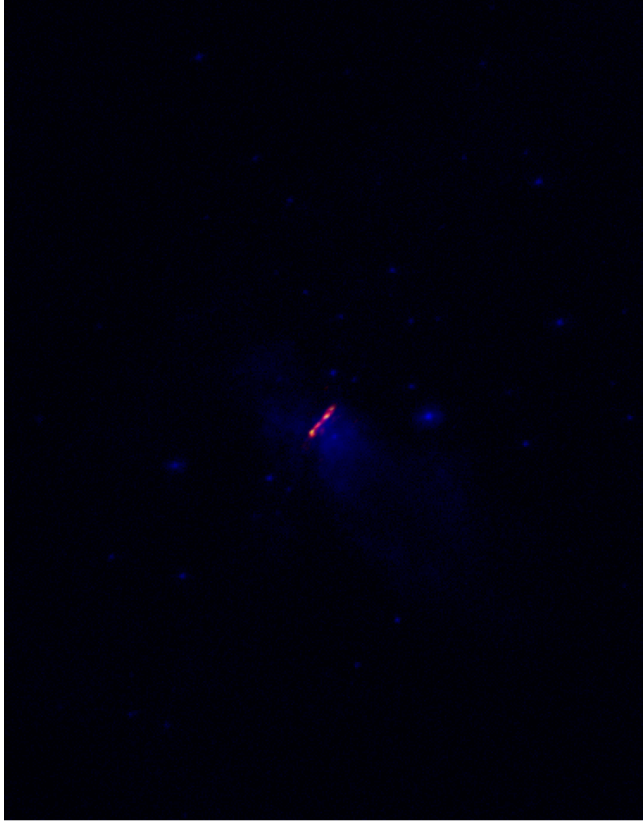
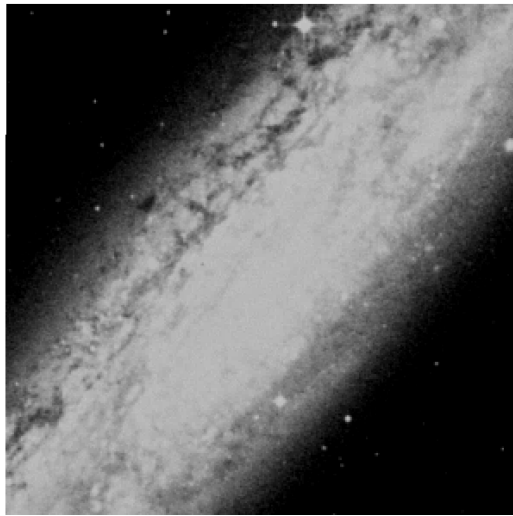
Podobně jako pro galaxii NGC 1068 jsem vytvořil složený snímek pro NGC 253 na obrázku 8.3. Pro lepší orientaci jsem vedle něho umístil snímek v optické oblasti. Na něm lze vidět příčinu, proč nepozorujeme podobnou strukturu jako v případě NGC 1068 – NGC 253 pozorujeme výrazně více skloněnou, inklinace $i = 78,5 \text{ deg}$ (12).



Obrázek 8.1: Kompozitní snímek složený z pozorování z Chandra (modře), kontinua z ALMA pozorování (zeleně) a emise molekuly CO (červeně).



Obrázek 8.2: Optický snímek z Sloan Digital Sky Survey doplněný o kontury emise CO z pozorování v band 3 ALMA, tedy stejného pozorování jako je na obrázku 6.11. Je zde jasně vidět výrazně vyšší rozlišení interferometrického pozorování na vyšších vlnových délkách, které nám tedy umožňuje pozorovat struktury uvnitř centrálních oblastí galaxií.



Obrázek 8.3: Vlevo je snímek z SDSS v optické oblasti, vpravo je snímek složený z pozorování z Chandra (modrá), emise SiO (zelená) a emise ^{13}CO (červená). Oba snímky jsou ve stejném měřítku, je tedy vidět, jak malou část v okolí centra galaxie zabírá emise pozorovaných molekul.

Kapitola 9

Závěr

Na závěr této práce bych chtěl říci že, ač se milimetrové astronomii v nejbližší době pravděpodobně dále věnovat nebudu, mi poskytla jedinečný a nový pohled na extragalaktické objekty. Člověk, zvyklý na optická pozorování z běžných dalekohledů, si jen těžko představí práci s interferometrickými daty. Také termín vysoké rozlišení dostává zcela nový rozměr zvláště po srovnání s optickými snímky, které jsem provedl v úplném závěru. Nutno podotknout, že velkou část času věnovaného této práci, zabrala právě adaptace na novou formu dat a jejich zpracování. I po vytvoření snímku se práce s ním významně liší protože není dvourozměrný, jak je běžné, ale má třetí, spektrální osu. Velkým štěstím v tomto bylo to, že CASA, jakožto podporovaný software pro zpracování interferometrických dat (nejen) z ALMA, je velmi dobře napsaný a umožňuje velkou část práce automatizovat pomocí velmi jednoduchých skriptů, také má kvalitně napsaný manuál. Po zkušenostech s IRAF jsem se obával dlouhé historie, která vedla k dnešní podobě CASA, ukázalo se však, že jde o skutečně moderní program. V samotné práci se mi podařilo s pomocí Splatalogu(10) identifikovat čáry několika významných molekul a některých jejich izotopických variací, vytvořit mapy jejich výskytu a určit jejich toky a rozložení rychlostí v rámci galaxie. Jako nejzajímavější považuji výskyt molekul HC_3N v NGC 1068, jelikož její přítomnost v okolí jádra podporuje myšlenku sjednocho modelu aktivních galaktických jader o prachovém tělese, které stíní emisi z BLR, což způsobuje, že rozlišujeme typ jádra Seyfert 1 a Seyfert 2. Tento prach by mohl poskytnout potřebné stínění také pro molekuly HC_3N před vysokoenergetickou emisí jádra, která by zapříčinila jejich rozpad. Za povšimnutí stojí jistě také P–V diagram na obrázku 6.6. Ten vznikl právě díky tomu, že snímání probíhá v širokém pásmu frekvencí/rychlostí najednou a to se poté uchová s pomocí spektrální osy. Na tomto konkrétním diagramu je patrné něco, co na snímku zaznamenávajícím pouze celkový tok 6.3 vidět není – to, co by bylo možné interpretovat jako pouhou anomálii v rozložení molekul, je možné identifikovat jako molekulární outflow díky dostupným informacím o rychlostech.

Jako největší nevýhodu práce s daty s ALMA zatím vidím to, že je k dispozici málo dat a zatím nebyla zpřístupněna žádná po uvedení do plného provozu. Nedosahují tak všech možností, které přinesou v budoucnosti a také, jelikož v rámci early science pozorování bylo potřeba vyzkoušet více možností využití, pouze malá část pozorování se věnovala aktivním galaxiím, což zatím neumožňuje srovnávat zastoupení a rozložení jednotlivých molekul v různých typech galaxií, což by mohlo dále podpořit teorii o sjednoceném modelu AGN, nebo naopak pomoci odhalit určující fyzikální rozdíly mezi nimi. Situace v tomto ohledu se lepší s každým uvolněným projektem a s každým dalším pozorováním.

Literatura

- [1] Aladro, R.; Viti, S.; Bayet, E.; aj.: A $\lambda = 3$ mm molecular line survey of NGC 1068. Chemical signatures of an AGN environment. , ročník 549, Leden 2013: A39, doi: 10.1051/0004-6361/201220131, 1210.4571.
- [2] Eisenhauer, F.; Schödel, R.; Genzel, R.; aj.: A Geometric Determination of the Distance to the Galactic Center. , ročník 597, Listopad 2003: s. L121–L124, doi: 10.1086/380188, astro-ph/0306220.
- [3] Hubble, E. P.: A spiral nebula as a stellar system, Messier 31. , ročník 69, Březen 1929: s. 103–158, doi:10.1086/143167.
- [4] Krips, M.; Eckart, A.; Neri, R.; aj.: Continuum emission in NGC 1068 and NGC 3147: indications for a turnover in the core spectra. , ročník 446, Leden 2006: s. 113–120, doi:10.1051/0004-6361:20053729, astro-ph/0509825.
- [5] Martín, S.; Martín-Pintado, J.; Mauersberger, R.: HNC0 Abundances in Galaxies: Tracing the Evolutionary State of Starbursts. , ročník 694, Březen 2009: s. 610–617, doi:10.1088/0004-637X/694/1/610, 0812.3688.
- [6] McConnachie, A. W.; Irwin, M. J.; Ferguson, A. M. N.; aj.: Distances and metallicities for 17 Local Group galaxies. , ročník 356, Leden 2005: s. 979–997, doi: 10.1111/j.1365-2966.2004.08514.x, astro-ph/0410489.
- [7] McConnell, N. J.; Ma, C.-P.; Gebhardt, K.; aj.: Two ten-billion-solar-mass black holes at the centres of giant elliptical galaxies. , ročník 480, Prosinec 2011: s. 215–218, doi:10.1038/nature10636, 1112.1078.
- [8] NASA: Chandra Data Archive. <http://cda.harvard.edu/chaser/>.
- [9] NASA: NED. <http://ned.ipac.caltech.edu/>.
- [10] NASA: NED. <http://www.cv.nrao.edu/php/splat/>.
- [11] NRAO: CASA Reference manual. <http://casa.nrao.edu/docs/casaref/CasaRef.html>.

- [12] Pence, W. D.: A photometric and kinematic study of the barred spiral galaxy NGC 253. I - Detailed surface photometry. , ročník 239, červenec 1980: s. 54–64, doi:10.1086/158088.
- [13] Peterson, B. M.: *An Introduction to Active Galactic Nuclei*. Cambridge University Press, 1997, 254 s.
URL <http://www.isbns.net/isbn/9780521479110>

Příloha A

CASA

Jak jsem psal v kapitole věnované CASA, má rozhraní psané v jazyce Python, což umožňuje velké množství věcí provádět automatizovaně, pomocí skriptů. Když jsem vytvářel snímky pro tuto práci využil jsem (po mnoha manuálních pokusech) vlastní, upravenou verzi, skriptu poskytnutého spolu s daty autory původního zpracování:

```
#CH3OH;
clean (vis='calibrated.ms.contsub',#soubor s visibility daty po odečtení emise kontinua
  imagename='NGC1068_CH3OH',#kořenový název pro výstup - bude ve formě adresářů s koncov
  field='0',
  spw='0:3050~3400',#rozsah kanálů - 3050-3400 ze spektrálního okna 0
  mode='channel',#vytvoří datovou kostku
  nchan=27,#počet kanálů ve výsledném snímku
  start=3050,#první kanál
  width=13,#průměrování přes 13 kanálů
  outframe='lsrk',#referenční rámec pro výpočet rychlostí
  threshold='0.6mJy',
  niter=1000,
  psfmode='hogbom',#metoda pro výpočet PSF
  weighting = 'briggs',
  cell = '0.25arcsec',
  interactive=False,#probehne bez dalsich zásahů
  imsize=256,
  restfreq='96.74455GHz') #základní frekvence pozorované molekuly

#CS;
clean (vis='calibrated.ms.contsub',
  imagename='NGC1068_CS',
```

```
field='0',
spw='0:500~900',
mode='channel',
nchan=31,
start=500,
width=13,
outframe='lsrk',
threshold='0.6mJy',
niter=1000,
weighting = 'briggs',
cell = '0.25arcsec',
interactive=False,
imsize=256,
restfreq='97.98095GHz')
```

```
#S0;
```

```
clean (vis='calibrated.ms.contsub',
        imagename='NGC1068_S0',
        field='0',
        spw='1:1800~2300',
        mode='channel',
        nchan=39,
        start=1800,
        width=13,
        outframe='lsrk',
        threshold='0.6mJy',
        niter=1000,
        psfmode='hogbom',
        weighting = 'briggs',
        cell = '0.25arcsec',
        interactive=False,
        imsize=256,
        restfreq='97.71532GHz')
```

```
#HC3N;
```

```
clean (vis='calibrated.ms.contsub',
        imagename='NGC1068_HC3N',
        field='0',
        spw='1:250~650',
        mode='channel',
        nchan=31,
        start=250,
        width=13,
```

```
outframe='lsrk',
threshold='0.6mJy',
niter=1000,
weighting = 'briggs',
cell = '0.25arcsec',
psfmode='hogbom',
interactive=False,
imsize=256,
restfreq='100.07808GHz')
```

```
#C180
```

```
clean (vis='calibrated.ms.contsub',
        imagename='NGC1068_C180',
        field='0',
        spw='2:2300~2800',
        mode='channel',
        nchan=39,
        start=2300,
        width=13,
        outframe='lsrk',
        threshold='0.6mJy',
        niter=1000,
        weighting = 'briggs',
        psfmode='hogbom',
        interactive=False,
        cell = '0.25arcsec',
        imsize=256,
        restfreq='109.78218GHz')
```

```
#13C0
```

```
clean (vis='calibrated.ms.contsub',
        imagename='NGC1068_13C0',
        field='0',
        spw='2:3200~3700',
        mode='channel',
        nchan=39,
        start=3200,
        width=13,
        outframe='lsrk',
        threshold='0.6mJy',
        niter=1000,
```

```
weighting = 'briggs',  
psfmode='hogbom',  
interactive=False,  
cell = '0.25arcsec',  
imsize=256,  
restfreq='110.20135GHz')
```

Ukázkový výstup úlohy listobs:

```

#### Begin Task: listobs
listobs(vis="calibrated.ms", selectdata=True, spw="", field="",
antenna="", uvrange="", timerange="", correlation="", scan="",
intent="", feed="", array="", observations="", verbose=True,
listfile="", listunfl=False, cacheize=50)

MeasurementSet Name: /auto/brno2/home/roky/MGCI068/2011.0.00061./$sg_ous_id/$group_ous_id/member_ous_id2/calibrated.ms
====
Observer: Unknown
Project: T.B.D.

Telescope Observation Date Observer Project
ALMA [ 4.83287e+09, 4.83287e+09] Unknown T.B.D.
ALMA [ 4.83287e+09, 4.83289e+09] Unknown T.B.D.
Data records: 297600 Total integration time = 11274.9 seconds
Observed from 09-Jan-2012/22:44:49.6 to 10-Jan-2012/01:52:44.5 (UTC)

ObservationID = 0 ArrayID = 0
Date Timerange (UTC) Scan FieldID FieldName nRows SpwIDs Average Interval(s) ScanIntent
09-Jan-2012/22:44:46.6 - 22:46:31.5 4 0 J0423-013 7200 [0, 1, 2, 3] [6.05, 6.05, 6.05, 6.05] [CALIBRATE_BANDPASS#ON_SOURCE, CALIBRATE_PHASE#ON_SOURCE, CALIBRATE_WVR#ON_SOURCE]
22:50:48.8 - 22:53:11.0 7 2 Callisto 9600 [0, 1, 2, 3] [6.05, 6.05, 6.05, 6.05] [CALIBRATE_AMPLI#ON_SOURCE, CALIBRATE_PHASE#ON_SOURCE, CALIBRATE_WVR#ON_SOURCE]
22:57:04.5 - 22:57:31.8 10 3 J0339-017 2400 [0, 1, 2, 3] [6.05, 6.05, 6.05, 6.05] [CALIBRATE_PHASE#ON_SOURCE, CALIBRATE_WVR#ON_SOURCE]
22:59:28.5 - 23:09:18.9 12 4 NGC 1068 3840 [0, 1, 2, 3] [6.05, 6.05, 6.05, 6.05] [CALIBRATE_WVR#ON_SOURCE, OBSERVE_TARGET#ON_SOURCE]
23:09:53.3 - 23:10:23.6 13 3 J0339-017 2400 [0, 1, 2, 3] [6.05, 6.05, 6.05, 6.05] [CALIBRATE_PHASE#ON_SOURCE, CALIBRATE_WVR#ON_SOURCE]
23:11:03.1 - 23:20:53.5 14 4 NGC 1068 3840 [0, 1, 2, 3] [6.05, 6.05, 6.05, 6.05] [CALIBRATE_WVR#ON_SOURCE, OBSERVE_TARGET#ON_SOURCE]
23:22:32.8 - 23:23:03.0 16 3 J0339-017 2400 [0, 1, 2, 3] [6.05, 6.05, 6.05, 6.05] [CALIBRATE_PHASE#ON_SOURCE, CALIBRATE_WVR#ON_SOURCE]
23:24:48.0 - 23:34:36.4 18 4 NGC 1068 3840 [0, 1, 2, 3] [6.05, 6.05, 6.05, 6.05] [CALIBRATE_WVR#ON_SOURCE, OBSERVE_TARGET#ON_SOURCE]
23:35:24.0 - 23:35:51.3 19 4 NGC 1068 4800 [0, 1, 2, 3] [6.05, 6.05, 6.05, 6.05] [CALIBRATE_WVR#ON_SOURCE, OBSERVE_TARGET#ON_SOURCE]
23:36:34.9 - 23:37:42.5 20 4 NGC 1068 4800 [0, 1, 2, 3] [6.05, 6.05, 6.05, 6.05] [CALIBRATE_WVR#ON_SOURCE, OBSERVE_TARGET#ON_SOURCE]
23:39:28.0 - 23:39:58.2 22 3 J0339-017 2400 [0, 1, 2, 3] [6.05, 6.05, 6.05, 6.05] [CALIBRATE_PHASE#ON_SOURCE, CALIBRATE_WVR#ON_SOURCE]

ObservationID = 1 ArrayID = 0
Date Timerange (UTC) Scan FieldID FieldName nRows SpwIDs Average Interval(s) ScanIntent
10-Jan-2012/00:57:40.0 - 00:59:25.0 23 0 J0423-013 7200 [0, 1, 2, 3] [6.05, 6.05, 6.05, 6.05] [CALIBRATE_BANDPASS#ON_SOURCE, CALIBRATE_PHASE#ON_SOURCE, CALIBRATE_WVR#ON_SOURCE]
01:03:41.6 - 01:06:03.9 26 5 Callisto 9600 [0, 1, 2, 3] [6.05, 6.05, 6.05, 6.05] [CALIBRATE_AMPLI#ON_SOURCE, CALIBRATE_PHASE#ON_SOURCE, CALIBRATE_WVR#ON_SOURCE]
01:09:55.5 - 01:10:25.7 29 3 J0339-017 2400 [0, 1, 2, 3] [6.05, 6.05, 6.05, 6.05] [CALIBRATE_PHASE#ON_SOURCE, CALIBRATE_WVR#ON_SOURCE]
01:12:22.3 - 01:22:12.7 31 4 NGC 1068 3840 [0, 1, 2, 3] [6.05, 6.05, 6.05, 6.05] [CALIBRATE_WVR#ON_SOURCE, OBSERVE_TARGET#ON_SOURCE]
01:22:47.0 - 01:23:17.2 32 3 J0339-017 2400 [0, 1, 2, 3] [6.05, 6.05, 6.05, 6.05] [CALIBRATE_PHASE#ON_SOURCE, CALIBRATE_WVR#ON_SOURCE]
01:23:57.0 - 01:33:47.4 33 4 NGC 1068 3840 [0, 1, 2, 3] [6.05, 6.05, 6.05, 6.05] [CALIBRATE_WVR#ON_SOURCE, OBSERVE_TARGET#ON_SOURCE]
01:35:27.4 - 01:35:57.6 35 3 J0339-017 2400 [0, 1, 2, 3] [6.05, 6.05, 6.05, 6.05] [CALIBRATE_PHASE#ON_SOURCE, CALIBRATE_WVR#ON_SOURCE]
01:37:42.4 - 01:47:32.8 37 4 NGC 1068 3840 [0, 1, 2, 3] [6.05, 6.05, 6.05, 6.05] [CALIBRATE_WVR#ON_SOURCE, OBSERVE_TARGET#ON_SOURCE]
01:48:13.7 - 01:48:44.0 38 3 J0339-017 2400 [0, 1, 2, 3] [6.05, 6.05, 6.05, 6.05] [CALIBRATE_PHASE#ON_SOURCE, CALIBRATE_WVR#ON_SOURCE]
01:49:26.1 - 01:50:33.6 39 4 NGC 1068 4800 [0, 1, 2, 3] [6.05, 6.05, 6.05, 6.05] [CALIBRATE_WVR#ON_SOURCE, OBSERVE_TARGET#ON_SOURCE]
01:52:17.3 - 01:52:47.5 41 3 J0339-017 2400 [0, 1, 2, 3] [6.05, 6.05, 6.05, 6.05] [CALIBRATE_PHASE#ON_SOURCE, CALIBRATE_WVR#ON_SOURCE]

(nRows = Total number of rows per scan)
Fields: 5
ID Code Name RA Decl Epoch SrcID nRows
0 none J0423-013 04:23:15.800000 -01:20:33.07000 J2000 0 14400
2 none Callisto 01:56:07.695166 +10:36:51.95736 J2000 2 9600
3 none J0339-017 03:39:30.937776 -01:46:35.80428 J2000 3 24000
4 none NGC 1068 02:42:40.798000 -00:00:47.93800 J2000 4 240000
5 none Callisto 01:56:10.347659 +10:36:54.93326 J2000 5 9600
Spectral Windows: (4 unique spectral windows and 1 unique polarization setup)
SpwID Name #Chans Frame Ch0(MHz) ChanMid(kHz) TotBw(kHz) BEC Num Corrs
0 3840 TDP0 97942.996 488.281 1875000.0 1 XX YY
1 3840 TDP0 99942.996 488.281 1875000.0 2 XX YY
2 3840 TDP0 108110.484 488.281 1875000.0 3 XX YY
3 3840 TDP0 109068.484 488.281 1875000.0 4 XX YY
Sources: 23
ID Name SpwID RestFreq(MHz) SysVel(km/s)
0 J0423-013 0 - -
1 J0423-013 1 - -

```

ID	Name	Station	Diam.	Elevation	Long.	Lat.	Offset from center (m) ITRF coordinates (m)					
	North	East			x	y	z	x	y	z		
0	J0423-013		2		-067.45.16.2	-22.53.29.3	24.4556	-43.9204	-2.2269	2225077.264236	-5440034.982484	-2481721.680961
0	J0423-013		3		-067.45.16.1	-22.53.26.1	29.6733	56.5885	-2.3791	2225096.841245	-5440069.069439	-2481629.028398
1	J0237+288		0		-067.45.11.9	-22.53.29.3	147.5971	-62.4404	-4.0177	2225100.832825	-5439987.368887	-2481719.620964
1	J0237+288		1		-067.45.15.7	-22.53.27.3	40.4406	17.7687	-2.0689	2225101.235882	-5440051.260402	-2481664.911681
1	J0237+288		2		-067.45.15.9	-22.53.28.0	94.0830	-3.3650	-2.1264	2225092.182300	-5440046.024683	-2481684.358620
2	Callisto		0		-067.45.17.2	-22.53.27.0	4.2583	28.2429	-2.0501	2225061.375793	-5440071.984522	-2481655.269639
2	Callisto		1		-067.45.16.6	-22.53.28.1	13.4593	-5.7534	-2.1357	2225072.738636	-5440052.964474	-2481686.555309
2	Callisto		2		-067.45.18.5	-22.53.29.4	-41.0051	-44.7098	-1.8392	2225016.696078	-5440059.813519	-2481722.550793
2	Callisto		3		-067.45.17.8	-22.53.26.2	-19.8932	52.8392	-1.7993	2225050.613876	-5440086.972556	-2481632.707913
4	NGC 1068		0		-067.45.14.4	-22.53.28.4	77.3508	-15.4479	-2.3062	2225130.368961	-5440025.148453	-2481685.420046
4	NGC 1068		1		-067.45.17.8	-22.53.28.0	-21.5426	-2.3875	-1.7351	2225040.977209	-5440067.768692	-2481683.610360
4	NGC 1068		2		-067.45.18.7	-22.53.27.4	-45.0048	15.5294	-1.6899	2225021.915397	-5440083.139810	-2481667.122037
4	NGC 1068		3		-067.45.15.1	-22.53.29.4	56.6103	-46.1132	-2.7345	2225106.525517	-5440021.587137	-2481723.503675
5	Callisto		1		-067.45.21.3	-22.53.30.2	-120.0530	-69.0536	-0.0991	2224940.552199	-5440082.459498	-2481745.662419
5	Callisto		2		-067.45.17.5	-22.53.28.8	-11.8383	-26.2495	-2.1865	2225046.287975	-5440055.118880	-2481705.417488
5	Callisto		3		-067.45.16.3	-22.53.27.6	22.0859	10.8013	-2.0971	2225083.146647	-5440055.703110	-2481671.319351

Antennas: 16: ##### End Task: listobs