

Semleges hidrogén rádióspektrális vizsgálata a DDO 43 közeli törpegalaxisban

TDK DOLGOZAT



Szerző:

Pichler Enikő

Földtudomány BSc III. évfolyam

Témavezetők:

Dr. Tóth L. Viktor

ELTE TTK Csillagászati Tanszék

Dr. Gabányi Krisztina

ELTE TTK Csillagászati Tanszék

Budapest, 2023

Tartalomjegyzék

Absztrakt	2
1. Bevezetés	3
1.1. Elméleti háttér és korábbi kutatások	3
1.2. Mérési technika	6
1.3. A DDO 43 törpegalaxis	8
2. Mérési adatok és feldolgozásuk	10
2.1. Mérések	10
2.2. Adatfeldolgozás az AIPS-ben	11
3. Eredmények és analízis	14
3.1. A színekpivonal-elemzéshez felhasznált adatok	14
3.2. Az elemzés	14
3.2.1. A spektrumok felvétele	15
3.2.2. A kontinuum levonása	16
3.2.3. Terület megállapítása és spektrumok átlagolása	16
3.2.4. Gauss-görbe illesztése	17
3.2.5. Maradványspektrum képzése és a vonalszárnyak vonal alatti területeinek összehasonlítása	18
3.3. Eredmények	20
4. Diskusszió	23
5. Összefoglalás és kitekintés	26
Köszönetnyilvánítás	28
Irodalomjegyzék	28

Absztrakt

A csillagok születésük, főszorozati fejlődésük és az üzemanyaguk elégetése után lejátszódó folyamatok által hatást gyakorolnak az őket körülvevő csillagközi anyagra: a protocsillagok által keltett szél, a csillagszél és a szupernóvák lökeshullámai turbulens áramlásokat okoznak a helyi csillagközi gázban, amely túlnyomó része semleges hidrogénatomokból áll. Ez a folyamat segítheti vagy akadályozhatja a további csillagkeletkezést azáltal, hogy helyenként összesűríti a csillagközi gázt, ahol beindulhat a csillagkeletkezés, máshol pedig megritkítja azt.

Mivel a semleges hidrogén (továbbiakban HI) a leggyakoribb elemtípus az Univerzumban, nagy valószínűséggel a csillagfejlődés által a helyi gázba vitt energia nyomát felfedezhetjük a hidrogéngáz mozgásában. Ennek ellenére két kutatás [1, 2] azt találta, hogy a nagytömegű csillagkeletkezési régiók környékén várt turbulens mozgás nem jelenik meg a hidrogéngázban. Ezek a kutatások a semleges hidrogén rádióinterferométeres technikával végzett mérésein alapulnak. A dolgozatomban arra keresem a választ, hogy az elemzést leszűkítve a hidrogén színeképvonalának vonalszárnyaira, amelyek a lokális jelenségekről adnak információt, felfedezhetünk-e turbulenciatöbbletet, feltűnnek-e a vonalszárnyakon a várt gyorsabb mozgások. Ehhez a DDO 43 törpegalaxisban megfigyelhető semleges hidrogéngáz tulajdonságait vizsgáltam finom szögfelbontással. Elérhető, kalibrált méréseket használtam fel, és a CLASS rádiocsillagászati adatok feldolgozására és elemzésére alkalmas szoftver segítségével a színeképvonalak vonalszárnyait és a vonal alatti területben esetlegesen megfigyelhető eltéréseket tanulmányoztam.

Az eredményül kapott vonalszárny alatti terület értékeit elhelyeztem a törpegalaxis látható tartományú képén, így látható, hogy hol helyezkednek el azok a régiók, ahol a színeképvonalak kiszélesedése az alacsonyabb, illetve nagyobb sebességű tartományban jelentős. A két eset jól elkülönül egymástól, kiugrásokat nem látni.

Ahhoz, hogy a magas értékeket mutató területeket csillagkeletkezési szempontból is jellemezni lehessen, a projekt következő részeként szükség lesz összevetni az eredményeket $H\alpha$ illetve távoli ultraibolya tartományú mérésekkel, amelyekkel a csillagkeletkezési területekről kaphatunk információt.

1. fejezet

Bevezetés

1.1. Elméleti háttér és korábbi kutatások

A csillagok folyamatos hatást fejtenek ki az őket körülvevő csillagközi anyagra. Ezeket a folyamatokat Cserepes László és Petrovay Kristóf Kozmikus fizika című egyetemi jegyzete [3] alapján mutatom be röviden.

A HI régió egy csillagközi felhőt jelent, amely semleges atomos hidrogénből áll. Mellette megtalálhatók hélium és nehezebb elemek, akár ionizált formában, azonban a hidrogénhez képest jóval kisebb mennyiségben. Az ilyen felhők (50 – 100) K hőmérsékletűek, sűrűségük tipikusan $(1 - 10) \text{ cm}^{-3}$. A csillagközi felhők a csillagközi turbulencia következtében folyamatosan keletkeznek és feloszlanak.

Ha a felhő sűrűsége ennél nagyobb, molekulafelhővé alakulhat, amelyben a domináns anyag a hidrogénmolekula. Az óriás molekulafelhők elég sűrűvé válhatnak ahhoz, hogy a gravitációs vonzásuk következtében még jobban összetömörüljenek, és kialakulhasson bennük a csillagmag. Az úgynevezett protocsillagokra továbbra is beáramló anyag a forgás miatt akkréciós korongot alkot, erre merőlegesen pedig két irányban semleges, illetve ionizált anyag áramlik ki, amelyek sebessége 100 km s^{-1} körüli. Az akkréciós szakaszt követően ezek a nyalábok is eltűnnek, azonban addig hozzájárulnak a csillagközi turbulenciához. Miután a csillag már fősorozati csillagnak tekinthető, a csillagszél által gyakorolt hatást a környezetére, amely során a korona anyaga, amely részecskéinek sebessége meghaladja a szökési sebességet, folyamatosan kerül át a csillagszélbe. A csillagok környezetükre gyakorolt hatása „öregkorukban” jelentősen függ a tömegüktől. A kistömegű csillagok az aszimptotikus óriáság fázis végén levetik a külső burkukat, körülbelül néhány évszázad vagy évezred alatt. A csillagszél felerősödik ebben a fázisban. Ezzel szemben

a nagy tömegű csillagok ($> 8 M_{\odot}$) egyrészt sokkal rövidebb ideig élnek, másrészt tömegük miatt képesek magösszeomlásos szupernóvát létrehozni, amely nagyon rövid idő alatt lezajlik, és robbanásszerűen szétveti a csillag anyagát.

Ezek a folyamatok mind lökéshullámokat keltenek, a szétterjedő anyag pedig beleütközik más csillagközi anyagba, a terjedési sebessége, iránya megváltozik, így egy véletlenszerű, turbulens áramlást hoz létre. A fentiek alapján mindehhez kiemelt jelentőségűek a nagy tömegű csillagkeletkezést mutató területek: itt rövid idő (körülbelül tízmillió év) alatt játszódik le a teljes csillagfejlődés, és a csillagközi turbulencia fenntartásához a szupernóvák tudnak a legnagyobb mértékben hozzájárulni.

Ha a turbulenciát szeretnénk vizsgálni, az Univerzum leggyakoribb elemtípusának, a semleges hidrogén feltérképezésének segítségével kaphatjuk a legtöbb információt a galaxisokat alkotó anyag mozgásáról. A hidrogénvonal észlelését Barbara Ryden és Richard W. Pogge *Interstellar and Intergalactic Medium* című könyve [4] alapján foglalom össze.

A csillagközi anyag első bizonyítékai az optikai tartományban megfigyelhető abszorpciós vonalak voltak. A rádió tartományban sugárzó elemek megfigyelése, mint amilyen a hidrogén is, csak az 1950-es éveket követően vált lehetővé. A HI régiók nem bocsátanak ki optikai tartományú elektromágneses sugárzást (a hidrogéntől eltérő elemek esetleges spektrális vonalait leszámítva), a 21 cm-es (1420 MHz-es) spektrális vonallal lehet megfigyelni őket, azonban ez a vonal is csak akkor látható, ha nagy mennyiségű hidrogén van jelen.

A hidrogén 21 cm-es hullámhosszú sugárzását az atom elektronjának a két ellentétes spinű beállása közti energiakülönbség okozza. Ez többféleképpen jöhet létre: ha egy elektron elhalad egy hidrogénatom mellett, a mágneses tere megfordíthatja a kötött elektron spinjét, vagy ha az elhaladó elektron és a kötött elektron spinje eleve ellentétes, és a proton befogja az elhaladó elektront, az eredetileg kötött elektron pedig kilökődik. Hidrogénatomok ütközése is okozhatja azt, hogy a kötött elektronjaik spinjei felcserélődjenek.

Az észlelt színekpvonalakon kiszélesedést vehetünk észre a következő okokból: termális hatások, a megfigyelőhöz képest közeledő vagy távolodó mozgás (Doppler-eltolódás), illetve a lokális mozgások. Utóbbi esetben a gyorsabb mozgások (tehát a turbulencia, amire utaló jeleket ebben a dolgozatban keresek) fogják kiszélesíteni a színekpvonalat, és az is információt ad a helyi hidrogéngáz mozgásáról, hogy melyik oldalon szélesedik ki a vonal.

A csillagfejlődés turbulenciakeltő hatását és a további csillagkeletkezést szabályozó mértékét több kutatás is vizsgálta a semleges hidrogén mérése alapján (többek között: [5], [6]). A dolgozatomban két kutatás [1, 2] által felvázolt elméleti háttérrel és felhasznált adatokat vettem alapul,

így ezek alapján ismertetem a tudományos előzményeket.

Elmegreen és munkatársai [1] a The HI Nearby Galaxy Survey (magyarul HI közeli galaxisok felmérés) tizenegy galaxisában vizsgálta a csillagfejlődés és csillagközi turbulencia kapcsolatát. A The HI Nearby Galaxy Survey, rövidítve THINGS, egy magas spektrális ($\leq 5.2 \text{ km s}^{-1}$) és térfelbontású ($\sim 6''$) felmérés 34 közeli, a Földtől 2 és 15 Mpc közötti távolságra elhelyezkedő galaxisban mérte a semleges hidrogén sugárzását [7]. Emellett az is fontos szempont volt, hogy a vizsgált galaxisok korongjának normálisa kis szöget zárjon be a látóiránnyal, tehát lássuk a korong síkjában a részleteket, de a struktúrák mozgásának látóirányú komponenseit is észlelhessük. A magas tér- és spektrális felbontásnak köszönhetően felfedhetők voltak a galaxisbeli struktúrák és a turbulencia, így vizsgálhatók az esetleges nagysűrűségű csillagkeletkező területek. A felmérés alapvető célja a csillagközi anyag tulajdonságainak vizsgálata volt.

Hunter és munkatársai [2] a Local Irregulars That Trace Luminosity Extremes, The HI Nearby Galaxy Survey, röviden LITTLE THINGS felmérésből válogatott galaxisokat. A LITTLE THINGS a THINGS felmérésre építkezett [8]. Ennek során kifejezetten törpegalaxisokban mérték a semleges hidrogént, azzal a céllal, hogy a nyert adatok alapján pontosabb képet kapjanak arról, hogyan zajlik a csillagkeletkezés a törpegalaxisokban. A törpegalaxisoknak nincs elég gravitációs potenciálja a sűrűség hullámok kialakításához, amelyek jellemzően szabályozzák a csillagkeletkezést a spirálgalaxisokban, így más folyamatnak kell ezt a szerepet betöltenie: valószínű, hogy ez a csillagközi anyagba táplált energia, amelyet nagy tömegű csillagkeletkezés hajt. A galaxisok kiválasztásakor ugyanazokat a szempontokat tartották szem előtt, közeli és a látóiránnyal kis szöget bezáró törpegalaxisokat válogattak. A következő kérdésekre szerettek volna választ kapni: mi szabályozza a csillagkeletkezést a kicsi, gázban gazdag galaxisokban? Mennyire jelentős a jelenlegi csillagok által kiváltott csillagkeletkezés illetve a véletlenszerű turbulens összenyomódás okozta felhőképződés a törpegalaxisokban? Hogyan zajlik a csillagkeletkezés a galaxis széle felé haladva? Maga a felmérés 37 szabálytalan törpegalaxist és 4 kék kompakt törpét foglal magába. Csak nem kölcsönható galaxisok szerepelnek benne, hogy a belső folyamatokat könnyebben vizsgálni lehessen, és kifejezetten olyanokat választottak ki, amelyekben jelentős mennyiségű semleges hidrogén található a csillagkeletkezéshez.

A minél jobb szögfelbontás elérése érdekében a megfigyelt galaxisok átlagos távolsága 3,7 Mpc, a minta legtávolabbi galaxisa 10,3 Mpc-re található, illetve olyanokat válogattak, amelyeknek az inklinációja legfeljebb 70° , így könnyebben felbonthatók a galaxisok korongjainak struktúrái. A megfigyelés frekvenciafelbontása lehetővé teszi, hogy a látóirányú sebességkomponenseket $2,6 \text{ km s}^{-1}$ vagy bizonyos esetekben $1,3 \text{ km s}^{-1}$ felbontással lehessen lekülöníteni

egymástól.

Mindkét kutatás során a semleges hidrogén emissziós térképei alapján állapították meg a gáz kinetikus energiasűrűségét és sebességeloszlását, így képet kapva a csillagközi turbulenciáról, ezt vetették aztán össze a távoli ultraibolya tartományban kibocsátott sugárzás alapján számolt csillagkeletkezési-ráta sűrűséggel. Azt állapították meg, hogy ezek nem, vagy csak alig korrelálnak, tehát a csillagfejlődésből származó visszacsatolási energia nem jelenik meg a helyi atomos gázban.

A csillagközi turbulenciának több forrása is lehet, például maga a gravitációs hatás is okozhatja. Az is sok mindentől függ, a csillagfejlődés hatása mennyire tud érvényesülni ehhez képest, feltehető, hogy a kettő együttes hatása felel a csillagközi turbulenciáért. A két kutatás konklúziója az, hogy önmagában a csillagfejlődés hatása nem felelhet a csillagközi turbulenciáért.

E kutatások alapján tehát úgy tűnik, a csillagfejlődés hatása nem befolyásolja a turbulens belső energia eloszlását a hideg csillagközi gázban. A dolgozatomban azt szeretném bemutatni, hogy hogyan lehetne ezt még vizsgálni. A turbulenciatöbbslet, amelyet a kutatások kerestek, feltűnik-e a hidrogénvonalak vonalszárnyaiban. A spektrumvonalak jellemzően kiszélesednek gyors mozgások esetén, ezért ha a csillagfejlődés hatása jelentősen megzavarja a semleges hidrogéngázt, akkor ez a mozgás megjelenhet a vonalszárnyakban.

Amíg a teljes vonalat nézzük, a szárnyak járuléka kicsi, az eredményben nem látszanak jelentősen, így felmerül a lehetőség, hogy itt felfedezhetünk akár csak egy kisebb mértékű többsletet.

1.2. Mérési technika

A THINGS és a LITTLE THINGS hidrogénméréseket a National Radio Astronomy Observatory (NRAO) Very Large Array (VLA) [9] rádióinterferométerrel végezték. A VLA Új-Mexikóban található, egy hegyekkel körbevett síkságon. Az elhelyezése azért fontos, mert a környező hegyek megakadályozzák, hogy a közeli városokból érkező rádióinterferencia megzavarja a méréseket, illetve a levegőben található vízmolekulák elnyelik az űrből érkező rádiósugárzás nagy részét, így szükség van száraz levegőjű elhelyezésre. 28 antennából áll, amelyből 27 aktív és egy pótantenna. Az antennák átmérője 25 méter. 1 és 50 GHz közötti frekvenciában mér.

A felbontóképesség, ahogy minden távcsőnél, az észlelt hullámhossz (λ) és a műszer átmérőjének (D) hányadosa.

$$\theta = \frac{\lambda}{D} \quad (1.1)$$

Így mivel a felbontóképesség egyenesen arányos a hullámhosszal, hosszú hullámhosszok esetében adott méretű műszer felbontóképessége csökken. Ennek megoldása az interferométer, azaz több összekötött rádióantenna, amelyek jeleit kombináljuk. Az interferométerben már nem az egyes antennák átmérője fogja meghatározni a felbontóképességet, hanem az egymástól való távolságuk (b , bázisvonalhossz):

$$\theta = \frac{\lambda}{b} \quad (1.2)$$

Ha kettőnél több rádióantennából áll az interferométer, akkor a két legtávolabbi antenna távolsága fogja meghatározni a hálózattal elérhető legfinomabb szögfelbontást.

Amit az interferométer valójában mér, azt vizibilitás függvénynek nevezzük, ez a mért objektum fényességeloszlásának Fourier-transzformáltja. Elméletileg egy függvény és Fourier tanszformáltja között egyértelmű megfeleltetés van, azonban a vizibilitás függvényt nem ismerjük minden pontban. A mintavételezés azonban több antenna hálózatba kötésével javítható.

Minél nagyobb az interferométer antennái közötti távolság, annál nagyobb szögfelbontást érhetünk el. A hosszú bázisvonalú rádióinterferométerek így érzékenyek a legrészletesebb elemekre, azonban a kiterjedt struktúrákat már nem fogják látni. Ezért szükség van rövidebb bázisvonalak használatára is, hogy például a HI-felhő teljes kiterjedését láthassuk egy galaxis körül.

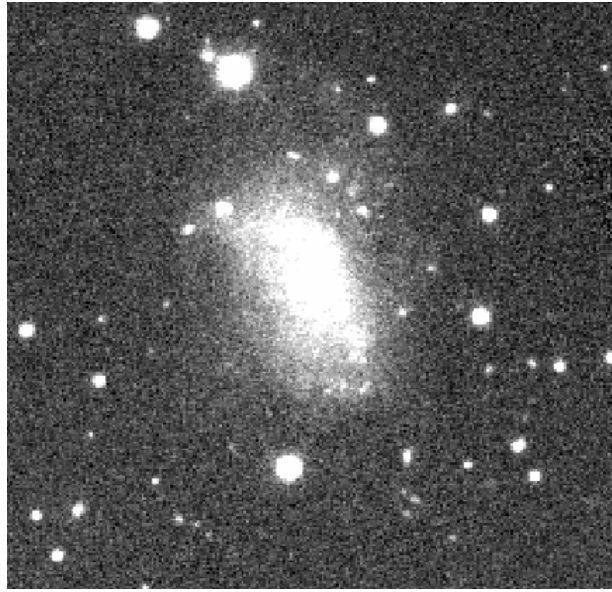
Egy több antennából álló hálózat tagjai, mint amilyen a VLA is, épp ezért mozgathatóak, különböző bázisvonalhosszúságú konfigurációkat is létre lehet velük hozni. A VLA antennái Y alakban vannak elhelyezve. Az egyes antennák egymástól való távolságától függően négy konfigurációt használ a hálózat, amelyeket A, B, C és D konfigurációknak neveznek. A négy közül az A konfiguráció jelenti az antennák egymástól való legtávolabbi elhelyezését, ezzel vizsgálhatók például a THINGS felmérésben a galaxis korongjának részletei, kisebb régiói. Az A konfiguráció maximális bázisvonalhossza 36,4 km, minimális bázisvonalhossza 0,68 km. A B konfiguráció maximális bázisvonalhossza 11,1 km, minimális bázisvonalhossza pedig 0,21 km. A C és D konfiguráció ehhez képest a kiterjedt struktúrákra érzékeny, így ezekkel láthatjuk, meddig terjed ki a galaxisban található hidrogéngáz nagy térbeli skálákon. A C konfiguráció maximális bázisvonalhossza 3,4 km, minimális bázisvonalhossza 0,035 km. A D konfigurációra ugyanezek az értékek 1,03 és 0,035 km [10]. A különböző mérések kombinációjával minderről egyben kaphatunk információt.

A rádiótartományú sugárzások fluxussűrűségét Jansky mértékegységben mérik. 1 Jy megfelel $10^{-26} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$ -nek.

1.3. A DDO 43 törpegalaxis

A dolgozatomban a vonalszárnyak vizsgálatát a LITTLE THINGS felmérés egyik vizsgált galaxisa, a DDO 43 törpegalaxis [11] adatai alapján végeztem el. A DDO 43 egy szabálytalan törpegalaxis, tőlünk 7,8 Mpc távolságban. A csillagkeletkezési rátája $0,0037 \text{ M}_{\odot} \text{ yr}^{-1}$, ez átlagosnak számít egy szabálytalan törpegalaxis esetén. Kiterjedt HI-burokkal rendelkezik.

A DDO 43 izolált galaxis, a legközelebbi objektum, szintén egy másik törpegalaxis, 270 kpc-re található tőle.



1.1. ábra. A DDO 43 optikai tartományú képe. A kép a Sloan Digital Sky Surveyből [12] származik.

A galaxist a VLA rádióinterferométer teleszkóp mérte B, C és D konfigurációban. Ebből egyedül a B konfiguráció volt a LITTLE THINGS felmérés része, a C és D konfigurációs adatok a NRAO archívumában [13] már rendelkezésre álltak. A megfelelő projektkódok: AH927 (B konfiguráció), AS506 és AH695 (C konfiguráció), AS591 és AH753 (D konfiguráció). Ezek a kódok több galaxis méréseit is magába foglalják, így kereséskor a DDO 43 nevét is szükséges megadni.

A B konfigurációs adatokra ehhez a galaxishoz, mivel a felmérés publikálása idején újak számítottak (a mérés éve 2008), jellemző a nagy szög- és spektrális felbontás. Ennek eléréséhez minden galaxisra 12, 6 és 2 óra integrációs idővel használtak fel B, C és D konfigurációs méréseket, amelyek kombinálva $6''$ -os felbontást adnak: ebben látszanak a felhők, és a turbulens struktúrák. A B a legkiterjedtebb konfiguráció, ugyan csökken a felületi fényesség érzékenysé-

ge, de a finom szögfelbontása nagyon fontos. Ugyanakkor a C és D konfigurációkra azért van szükség, mert felfedik a felhők és csillagkeletkező területek körüli kis sűrűségű gázt.

A nyers adatok feldolgozása az Astronomical Image Processing System [14] szoftverrel történt.

A B konfigurációs mérések kalibrációját és kombinációját én is elvégeztem, hogy megértsem a rádió tartományban végzett mérések feldolgozását. Ezt mutatom be részletesen a 2.2 alfejezetben.

2. fejezet

Mérési adatok és feldolgozásuk

2.1. Mérések

A LITTLE THINGS felmérés az AH927 projektkódon futott. B konfigurációban 2007. december 19-től 2008. február 10-ig tartottak a megfigyelések, minden galaxisra kétszer hat óra jutott. Ezt követték a C és D konfigurációs mérések 2008 hátralévő részében, az év augusztusáig.

A LITTLE THINGS galaxisait a VLA összesen 376 órán keresztül mérte B, C és D konfigurációban. Minden galaxist két 6 órás szakaszban figyeltek meg.

A mérések sávszélessége 0.8 vagy 1.6 MHz volt galaxistól függően (ez 150 és 300 km s^{-1} -ot jelent). 256 csatornát használtak egy mérésben.

A teljes felmérésben új megfigyeléseket és archívumi adatokat is feldolgoztak, a DDO 43 esetében a B konfiguráció az új mérés, a C és D konfiguráció archívumi adat. Az új adatokra, így erre sem nem alkalmaztak Hanning-smoothing módszert a mérés készültekor, ezért nem érték el a tervezett $2,6 \text{ km s}^{-1}$ -os ($12,21 \text{ kHz}$ -es) spektrális felbontást. Így $1,3 \text{ km s}^{-1}$ -os csatornafelbontással mérték (a spektrális felbontás ennek $1,4$ -szerese).

A megfigyelések ideje alatt elkezdődött a VLA több éven át tartó felújítása. Emiatt a hálózat egyes elemei eltérő érzékenységgel és zajkarakterisztikával rendelkezettek, mivel az antennák elemeit (elektronikáját) folyamatosan cserélték. Az együtt működő régi (VLA) és új (EVLA) antennák gondos kalibrációt igényeltek.

A mérési adatok a galaxisok mellett a kalibrátorokat is tartalmazzák. Az úgynevezett elsődleges kalibrátorral állapították meg a célforrás fluxusát és a sáváteresztő függvény alakját. Ezekkel kezdődtek a mérések, majd váltásban mérték galaxist és a másodlagos kalibrátort, egyenként körülbelül 12-25 percen keresztül. A másodlagos kalibrátort a vizibilitás függvény fázisának és

amplitudójának, azaz a célforrás helyzetének és fényességének meghatározásához használták.

2.2. Adatfeldolgozás az AIPS-ben

A DDO 43 három B konfigurációs mérését a data.nrao.edu honlapról [13] töltöttem le, az AH927 projektkód alatt és a DDO 43 célforrás nevét megjelölve.

Az adatfeldolgozás menetét [8] is részletesen leírja, illetve a pontos lépések elérhetőek a LITTLE THINGS honlapján (kalibráció: [15] és kombináció: [16]). Az ő módszerüket követve a `fillm` paranccsal olvastam be a letöltött fájlokat, amely két, AIPS-en belül használható fájlt hoz létre, CH0 és LINE jelöléssel. Előbbi a csatornák középső 75%-ának átlaga, míg utóbbi az összes csatornát tartalmazza. Erre azért van szükség, mert a CH0 fájl lesz első körben felhasználva a hibás mérési pontok törléséhez.

Az AIPS fájlokon belül „mellékfájlokban” tárolja az adatokat, amelyek a kalibrációs lépések során rögzítik az adatsor változásait.

A csatornák eredeti számától függően le kell vágni az első és utolsó, adott számú csatornát, ugyanis a későbbiekben rosszul befolyásolják a sáváteresztő függvény alakját, illetve a zaj karakterisztikája eléggé eltérő ezeknél a csatornáknál a többihez képest. Az én esetemben, ahol 256 csatorna volt, az első és utolsó 20 csatornát vágtam le az `uvcop` paranccsal.

Innen a következő lépés az antennakorrekció. Az adott méréshez tartozó antennakorrekciókat már meghatározták a mérés idején, és a `vlant` parancs alkalmazza azokat a fájlra. Ehhez tartozik az AN jelzésű mellékfájl, ahol ezek az adatok megjelennek.

A DDO 43 kalibrátorainak azonosítói 0137+331 és 0542+498 (az elsődleges kalibrátorok), illetve 0702+445 (másodlagos kalibrátor) [17]. A `setjy` paranccsal megállapíthatók ezeknek a kalibrátoroknak a fluxussűrűségei, amikre szükség lesz a továbbiakban. A fluxuskalibrátorokhoz tartoznak modellek, amiket beolvastam a `calrd` paranccsal. Ezt nem kell külön letölteni, ugyanis a modellek az AIPS részei.

A fent említett EVLA-EVLA bázisvonalak hibái miatt az útmutató javaslatára ezeket mind megjelöltem az `uvflg` paranccsal, hogy a kalibráció során később ne legyenek figyelembe véve.

Következő lépésként töröltem minden a fájlban szereplő időszáv első 10 másodpercét, ugyanis ekkor még nem történik mérés, csak az antennák forrás felé irányítása. Ezek a módosítások eddig mind a CH0 fájlban történtek, ezután pedig átkerültek a LINE fájlra, hogy minden csatornára alkalmazva legyenek. Innentől a LINE fájlal haladtam tovább.

A következő lépés a sáváteresztő függvény alakjának meghatározása. Ez első körben egy egyszerű, `bpass` parancs lefuttatásából áll a sáváteresztés-kalibrátorokat megadva. Ezt követően azonban ellenőrizni kell, hogy nincsenek-e valahol hibás bázisvonalak: a `possm` parancs kirajzolja minden bázisvonalra a sáváteresztő függvényt. Ha az átlagostól nagyon eltérő alakokat látunk, azt hibás mérési pont okozza. Ennek törlésével (a bázisvonalak eldobásához hasonlóan az `uvflg` leszűkíthető adott időtartományra, és így mérési pontra) megszűnik a hiba.

Ezután az `avspc` parancssal létrehoztam egy `NEWCH0` jelzésű fájlt, amelyen a további hibás pontok megállapítása történik majd. Az `avspc` szintén átlagolja a csatornákat, ahogy a `CH0` esetében is. A `NEWCH0` fájlra készül el a kalibráció a `calib` parancs kiadásával, és a korrekciókat az AIPS úgynevezett SN („solution”)-táblákba írja át. Majd a `getjy` parancssal a fáziskalibrátor fluxussűrűségét is meghatároztam. Az SN-táblákban található korrekciókat a `clcal` parancs alkalmazza ténylegesen a forrásokra, a kalibrált adatok pedig úgynevezett CL-táblákban jelennek meg.

Ezután ellenőriztem a kalibrációt a következő módokon: a `tvflg` és `uvplt` parancsok megmutatják az esetleges kiugró pontokat, amelyek hibásak, és így túl magas az intenzitásuk. Ez esetben ezeket vagy a `tvflg`-en belül, vagy `uvflg`-gel lehet törölni. Ha törlésre kerültek ilyen pontok, akkor a `calib` parancsot újra le kell futtatni.

Az AIPS `imagr` parancsa alkot képet a kalibrátorokról és a célforrásról, ez a program a `cleaning` eljárást alkalmazza.

Ezután a galaxisra is elvégeztem ezeket az eljárásokat, és itt is ellenőriztem a kalibráció eredményét. Az `imagr`-rel kép is alkotható: azonban mivel a B konfiguráció a kiterjedt struktúrákra nem érzékeny, itt egyelőre nem tűnt fel semmi.

Ha ettől eltekintve az eredmény megfelelőnek tűnt, tehát nem maradtak magas amplitúdójú pontok például az `uvplt` ábráin, akkor a `NEWCH0` fájlban megállapított kalibrációt átmásoltam a teljes spektrumot tartalmazó, `LINE` fájlra. Ezután az eredmény ellenőrizhető ugyanúgy, mint korábban, tehát először a kalibrátorokra, majd a galaxisra. Ha találtam kiugró pontot, akkor meg kellett ismételniem mindezt a `calib` lépéstől kezdve.

Ha mindez elkészült a három B konfigurációs fájlra, akkor ezek kombinálása következett. Nem csak különböző konfigurációjú, hanem különböző időpontban történő mérésekkel is javul a képalkotás. A kapott útmutató szerint a kombináció két részre oszlik aszerint, hogy a kombinandó mérés új vagy pedig archívumból származik. Az útmutatót 2008-ban készítették, a DDO 43 B-konfigurációs mérésének évében, így én az új mérésekre vonatkozó lépéseken haladtam végig.

Eszerint a `split` paranccsal felosztottam a kalibráció eredményeképp kapott fájlt egy forrású fájlokra, azaz külön véve a kalibrátorokat és a galaxist, de ebből is csak a galaxisra volt a továbbiakban szükségem.

A három kombinálandó fájl közös sebességtartományokra hoztam a `cvel` paranccsal. Viszont mivel ez a parancs eltolja a spektrumot, az első vagy az utolsó néhány csatorna „üressé” válhat. Ezt a `possm`-mel tudjuk megállapítani, ahol látni fogunk olyan csatornákat, amelyeknek nagyon alacsonyak az értékei a többihez képest. Ezeket a csatornákat töröltem az `uvcop` paranccsal.

Az archívumi fájlok feldolgozását nem végeztem el, azonban az eredeti fájlban a C- és D-konfigurációs mérésekre ugyanezt kellett lefuttatniuk.

Következőnek összeolvastottam a különböző fájlokat a `dbcon` paranccsal. Itt egyenként kell „hozzáragasztani” a fájlokat egymáshoz. Ezt követően `imagr`-rel megnézhetjük a kombinált adatfájlt. Míg a `tv1od` parancs mindig csak az első csatornát mutatja, a `tvmovie` egymás után mindet, és ezen már felfedezhetjük azokat a csatornákat, ahol megjelennek a hidrogénvonalak. Ezt nevezzük vonalas csatornáknak. Ezeknek a csatornáknak a számára szükség lesz, ugyanis következőnek levontam a kontinuumot, amelyből ezeket a csatornákat ki kell hagyni.

Így végül elkészült magát a galaxis képét mutató fájl, és ezekből az úgynevezett moment mapek az `xmom` paranccsal, amelyek egyenként valamely tengelyen integrált értékeket jelentik, ebben az esetben a HI oszlópsűrűség, közepes sebesség és sebességeloszlás térképeit adják.

3. fejezet

Eredmények és analízis

3.1. A színeképvonal-elemzéshez felhasznált adatok

A DDO 43 törpegalaxis adatainak feldolgozását követően tehát a következők voltak a kész, elemezhető fájlok: a galaxis cleaning eljárással megalkotott képe, illetve a 0., 1. és 2. moment map, amelyek sorban az oszlopsűrűség, közepes sebesség és sebességeloszlás térképe.

A LITTLE THINGS csoport által feldolgozott fájlok interneten elérhetők letöltésre a NRAO LITTLE THINGS felmérés oldalán [18]. A kalibrációt és a kombinációt én tanulásként egyedül a három B konfigurációs mérésre végeztem el, így a sajátom helyett az elérhető teljes változatot használtam fel, illetve annak „natural weighted” változatát.

3.2. Az elemzés

A célom az, hogy megállapítsam, felfedezhető-e a hidrogén spektrumvonalak vonalszárnyain jelentős kiszélesedés, tehát gyorsabb mozgás.

Arra, hogy az észlelt vonalkiszélesedéshez milyen mértékben járulnak hozzá termális hatások, Doppler-eltolódás és turbulencia külön-külön, ebben a dolgozatban nem vettem figyelembe. Az alább részletezett vizsgálatban minden kiszélesedést a turbulenciának tulajdonítok.

A vonalszárnyak vizsgálatakor a lépéseim a következők voltak:

1. A galaxis területén minden egyes mérési pont spektrumának felvétele
2. Kontinuum levonása minden spektrumról
3. Spektrumok átlagolása

4. Gauss-görbe illesztése a színeképvonalakra
5. Maradványspektrum képzése
6. A vonalszárnyak maradványspektrumának vonal alatti területeinek összehasonlítása

Az AIPS-ben is lehetséges spektrumokat elemezni, rájuk Gauss-görbét illeszteni és maradványspektrumot képezni, azonban a nagy mennyiségű spektrum kezelését egyszerűbbnek bizonyult a Continuum and Line Analysis Single-Dish Software (CLASS) segítségével elvégezni. A CLASS a Grenoble Image and Line Data Analysis Software (GILDAS) [19] csomag része, amely szintén rádiócsillagászati mérések feldolgozására és elemzésére alkalmas rendszer.

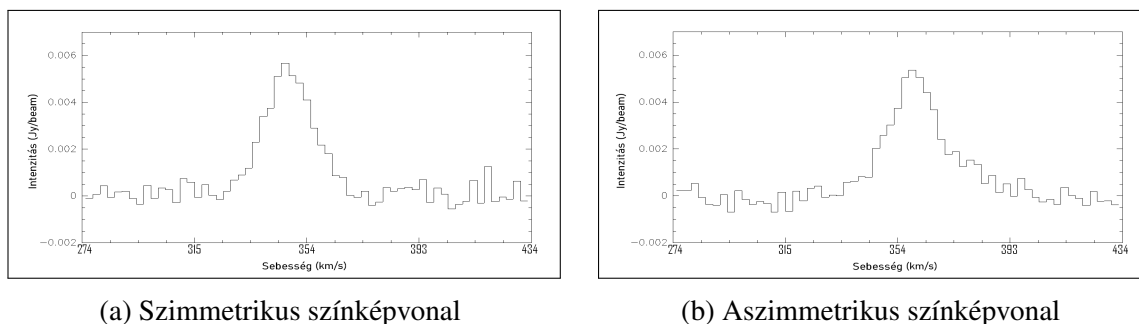
A CLASS alapvetően egy antennával végzett (tehát nem interferométer) rádiótartományú méréseinek feldolgozására alkalmas, azonban mivel elemzéshez való programokat is magába foglal, a már előre kalibrált adatokhoz megfelelő volt.

3.2.1. A spektrumok felvétele

A feldolgozott DDO 43 fájl FITS formátumban érhető el. Ezt át kellett alakítanom GILDAS olvasható formátumra, amit a `v\fits` paranccsal végeztem el. Ezt követően létrejött egy `.gdf` formátumú fájl, amelyet már a CLASS be tud olvasni.

Ahhoz, hogy spektrumok megjeleníthetők legyenek, az azokat tartalmazó fájl dimenzióinak sebesség-pozíció-pozíció formátumban kell lennie, tehát a sebességnek (vagy a frekvenciának) kell lennie az első dimenzióknak. A FITS fájlok többnyire pozíció-pozíció-sebesség formátumban vannak, amelynek az első két dimenziója a pozíció, és csak harmadik a sebesség vagy frekvencia. Ennek megoldásához a fájlt transzponálni kell, elforgatni a megfelelő tengelysorrendhez. A CLASS `transpose` parancsa ezt is elvégzi, így már beolvasható és megnyitható a fájl.

Adott mérési pont kiválasztásával, és a `plot` paranccsal megjeleníthető maga a spektrum. A következő ábrán két spektrum látható, az egyik szimmetrikus, ezen nem látunk kiszélesedést, a másik pedig aszimmetrikus – ilyen spektrumokat keresek. A spektrumok egy kimeneti fájl és a `write` parancsot tartalmazó ciklussal kimenthetők egy külön fájlba.



3.1. ábra. A CLASS-ban jelenítettem meg színeképvonalakat a 138. (szimmetrikus) illetve 90. (aszimmetrikus) mérési pontban.

3.2.2. A kontinuum levonása

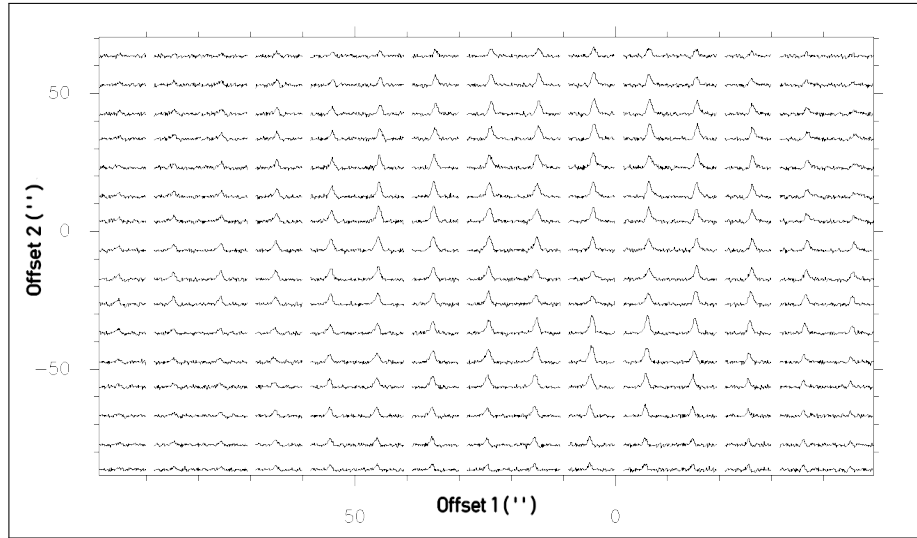
Ahhoz, hogy később Gauss-görbét illeszthessek a spektrumokra, szükség van a kontinuum levonására, azaz a hidrogéntől eltérő eredetű, sugárzást kibocsátó tényezők eltávolítására. Ki kell jelölni azt a területet a `set window` paranccsal, amelyet a szoftver ne használjon fel a kontinuum meghatározásához, azaz magát a színeképvonalat: ezután a `base` parancs illeszt egy modellt (amelyet gyakran bázisvonalnak neveznek, amely nem összekeverendő a rádióinterferometriában használt bázisvonal kifejezéssel) a színeképvonaltól eltérő területekre, és levonja azt. Így egyedül a hidrogén vonala és a zaj marad a spektrumokban.

A kontinuum levonása ciklussal szintén könnyen elvégezhető minden fájlra. Mivel ez már az adatfeldolgozás része is volt, a `base` parancsot követően alig észrevehető változás történik a spektrumokon.

3.2.3. Terület megállapítása és spektrumok átlagolása

A teljes fájl egy 1024×1024 pixelből, azaz mérési pontból álló képet tartalmaz. Ennek azonban a galaxis csak egy kis részét, egy 280×280 pixeles területet tesz ki.

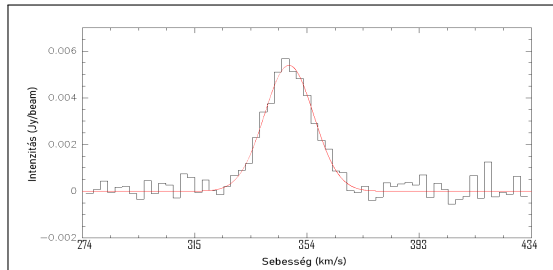
A 280×280 pixeles terület tehát összesen 78400 spektrumot adna, ezt azonban átlagoltam, hogy javuljon a jel-zaj arány. Körülbelül 6 pixel jelent 9 ívmásodpercet, így én 5 ívmásodperces sugárban végeztem el az átlagolást, szintén egy ciklussal. Így végül 240 db spektrumot kaptam, amelyet felhasználtam a további elemzés során. Ezek elhelyezkedéséről a spektrumtérképet a következő ábrán mutatom meg.



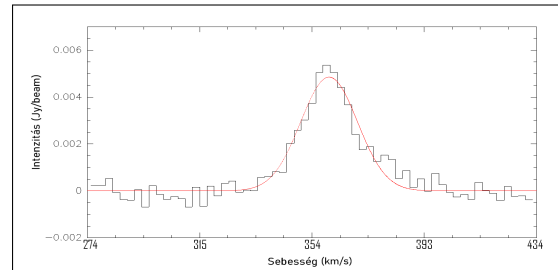
3.2. ábra. A felhasznált terület spektrumtérképe. A tengelyek az offset koordinátákat jelölik, ívmásodpercben.

3.2.4. Gauss-görbe illesztése

Ezt követően mind a 240 spektrumra elvégezhető a Gauss-görbe illesztése, amelyet a minimize parancs végez el. Előtte szükség van ismét a bázisvonal levonására, majd egy ciklussal elvégezhető az illesztés minden spektrumra, és az eredmények kiírathatók egy új fájlba.



(a) Szimmetrikus színeképvonal



(b) Aszimmetrikus színeképvonal

3.3. ábra. Gauss-görbe illesztés a 3.1 ábrában is mutatott színeképvonalakra. A CLASSban az illesztés automatikusan történik.

Az illesztett spektrumokat behívva, és kiadva a `print fit` parancsot, megjelennek az illesztésből kapott adatok. Az alábbi táblázatban mutatom három, véletlenszerűen választott spektrum adatait, szemléltetésképp, hogy milyen adatokat kaphatunk a CLASS-ból. Ebben szerepel a vonal alatti terület, azonban nem erre az értékre lesz szükség a vonalszárnyak elemzéséhez, hanem a maradványspektrum hasonló értékeire.

Mérési pont sorszáma	24	73	123
Offset 1 ["]	−36.0	−6.00	24.0
Offset 2 ["]	−4.50	6.00	25.5
Vonal alatti terület [Jy km s ^{−1} beam ^{−1}]	3.9331×10^{-2}	5.3868×10^{-2}	5.9963×10^{-2}
Vonal alatti terület bizonytalansága	2.105×10^{-3}	1.846×10^{-3}	2.487×10^{-3}
Vonalszélesség [km s ^{−1}]	10.54	9.994	12.05
Vonalszélesség bizonytalansága	0.719	0.434	0.604
Intenzitás [Jy beam ^{−1}]	3.506×10^{-3}	5.064×10^{-3}	4.675×10^{-3}
Kontinuum rms	3.582×10^{-4}	4.199×10^{-4}	4.058×10^{-4}
Vonal rms	3.440×10^{-4}	4.453×10^{-4}	4.441×10^{-4}

3.1. táblázat. A `print fit` által adott értékek, az illesztés paraméterei.

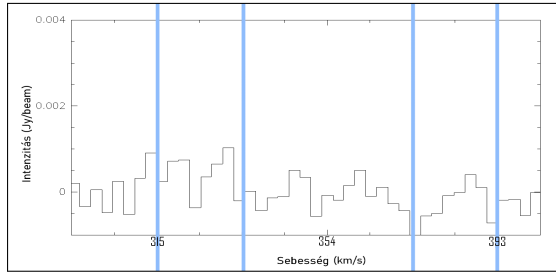
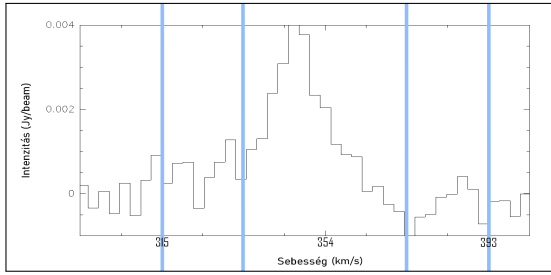
3.2.5. Maradványspektrum képzése és a vonalszárnyak vonal alatti területeinek összehasonlítása

A maradványspektrum az eredeti színekpvonal és a rá illesztett Gauss-görbe különbsége. Behívva a fájlt az illesztett adatokkal, és kiadva a `residual` parancsot egy ciklusban az összes spektrumra, megkaphatók a maradványspektrumok.

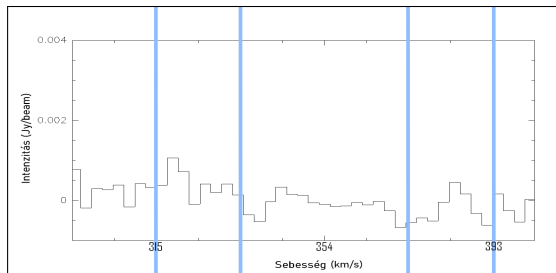
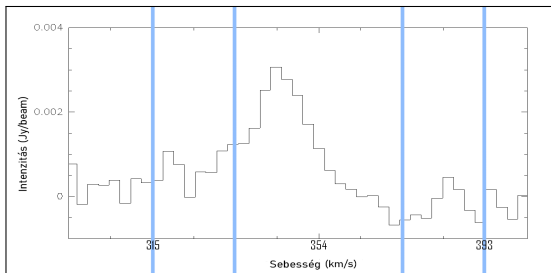
Mivel az illesztett Gauss-görbe a színekpvonal csúcsértékétől és félértékszélességétől függ, a vonalszárnyak már jórészt kívül esnek majd az illesztésen, így a levonást követően hátramaradt magasabb értékeket lehetséges majd vizsgálni.

A vonal alatti terület a `print area` paranccsal kapható meg, és tartományok is megadhatók az x-tengelyen, ahonnan kiírja a megfelelő értéket. Itt fontos megemlíteni, hogy az általam felhasznált típusú FITS fájl megjelenített sebességértékei nem voltak helyesen átkonvertálhatók a CLASS-ba, annak ellenére, hogy a csatornafelbontás megfelelően szerepel. A dolgozatomban szereplő spektrumábrákon ezeket javítottam, azonban a programban a tartományok megadásakor a hibás értékeket kellett használnom. Ennek megfelelően a 353975 – 353990 tartomány az ábrákon a 315 – 336 km s^{−1} közötti értékeket, a 354010 – 354020 tartomány pedig a 372 – 393 km s^{−1} közötti értékeket jelöli. Végignézve a spektrumokat, ezek voltak azok a tartományok, ahová mind belefértek.

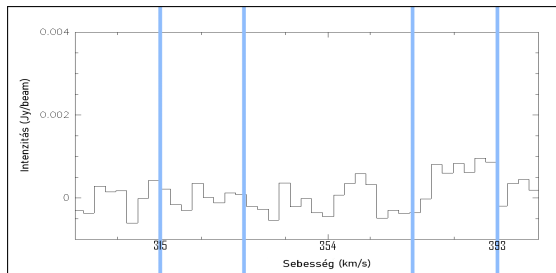
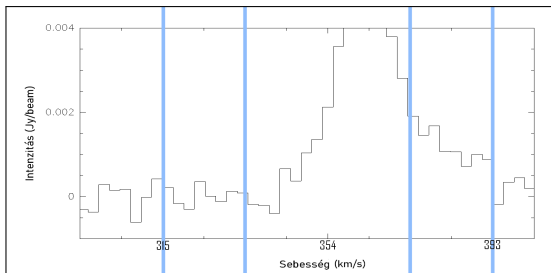
A következő ábrán mutatom be a vonalszárnyak helyeinek választott sebességtartományokat, és az ezekből a spektrumokból képzett maradványspektrumokat. Az első két spektrumon a "bal oldali", a második két spektrumon pedig a "jobb oldali" vonalszárnykiszélesedés jelentős.



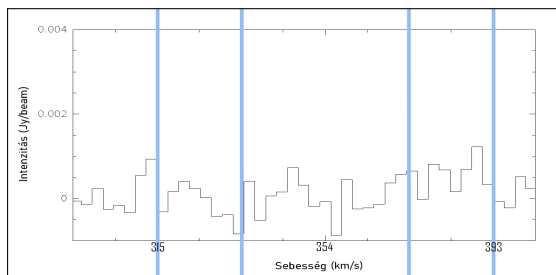
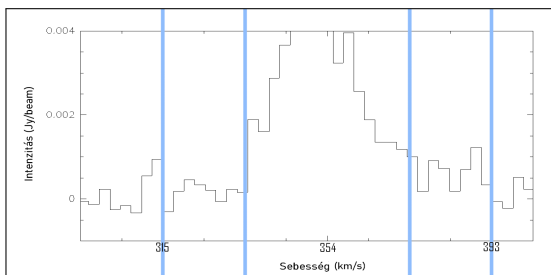
3.4. ábra. Bal oldali vonalszárnykiszélesedés és maradványspektruma.



3.5. ábra. Bal oldali vonalszárnykiszélesedés és maradványspektruma.



3.6. ábra. Jobb oldali vonalszárnykiszélesedés és maradványspektruma.



3.7. ábra. Jobb oldali vonalszárnykiszélesedés és maradványspektruma.

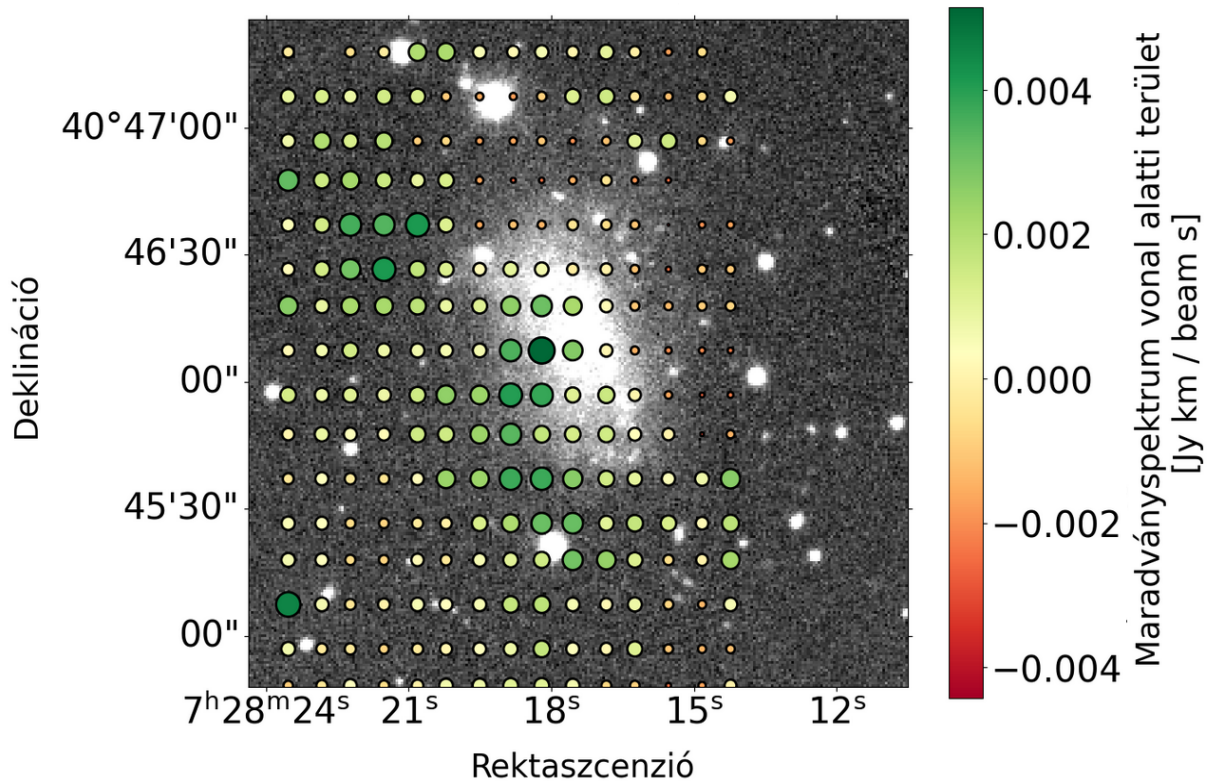
A 3.2 táblázatban pedig ezeknek a maradványspektrumoknak a vonal alatti területeit mutatom a jelölt sebességtartományokban.

Ábra száma	3.4	3.5	3.6	3.7
Offset 1 ["]	54.000	64.500	-6.000	24.000
Offset 2 ["]	25.500	15.000	6.000	25.500
$315 - 336 \text{ km s}^{-1}$	4.16189×10^{-3}	4.13207×10^{-3}	2.28105×10^{-4}	-1.17265×10^{-3}
$372 - 393 \text{ m s}^{-1}$	-2.72499×10^{-3}	-2.21264×10^{-3}	5.63168×10^{-3}	5.62701×10^{-3}

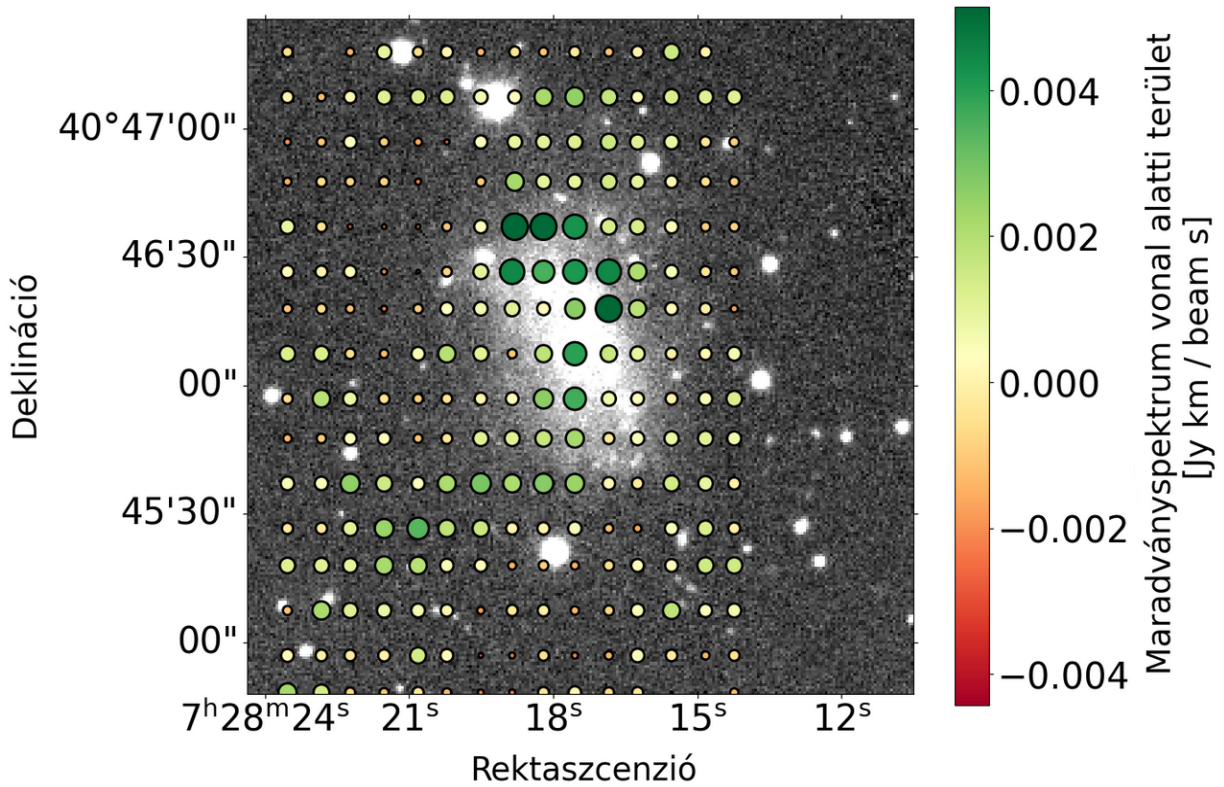
3.2. táblázat. A print area 353980 393990 ($315 - 336 \text{ km s}^{-1}$), illetve print area 354010 354020 ($372 - 393 \text{ km s}^{-1}$) által adott értékek a maradványspektrumokon.

3.3. Eredmények

A két kiválasztott sebességtartományban kapott vonal alatti terület értékeket pozíciójuk szerint elhelyeztem a törpegalaxis térképén a 3.8 és a 3.9 ábrákon.



3.8. ábra. A $315 - 336 \text{ km s}^{-1}$ tartomány maradványspektrumainak vonal alatti területei. A minél zöldebb és minél nagyobb körök a legnagyobb értékek.



3.9. ábra. A $372 - 393 \text{ km s}^{-1}$ tartomány maradvánspektrumainak vonal alatti területei. A minél zöldebb és minél nagyobb körök a legnagyobb értékek.

Jól látszik a 3.8 és 3.9 ábrákon, hogy jól elkülönülnek egymástól a különböző sebességtartományú vonalszárnyakhoz tartozó területek. Váratlan kiugrások nincsenek, sem régióként, sem az integrál értéke szerint, egy kivételtől eltekintve 3.8 ábrán, baloldalon alulról a harmadik spektrum esetében. Ezt azonban illesztési hiba okozza, a CLASS automatikus illesztése nem a színekpvonatra helyezte a Gauss-görbét. Az eloszlástérképekről hiányzik továbbá két pont, a legfelső sorban jobbról a második és az utolsó. Itt a program nem talált illeszthető színekpvonat.

A $315 - 336 \text{ km s}^{-1}$ sebességű területek, amelyeknek a pozícióját a zöld körök jelölik a 3.8 ábrán, a galaxis közepén és délnyugati felén helyezkednek el, illetve kiterjednek még északnyugatra és délre, amely területeknek nincs optikai megfelelője.

Ezzel szemben a $372 - 393 \text{ km s}^{-1}$ sebességű területek, amelyek pedig a zöld körök a 3.9 ábrán, a galaxis északi területén és a közepétől dél felé tartó részen helyezkednek el, illetve kinyúlnak délnyugatra.

Érdekesség, hogy északkelet és kelet felé nincs jele ezeknek a mozgásoknak, vagy nullához közeli értékeket látni.

Az ábrákon a negatív értékeknek valójában nincsen fizikai értelme, az okozza, hogy az illesztett Gauss-görbe értékétől függően túl sokat vont le a CLASS a spektrumból.

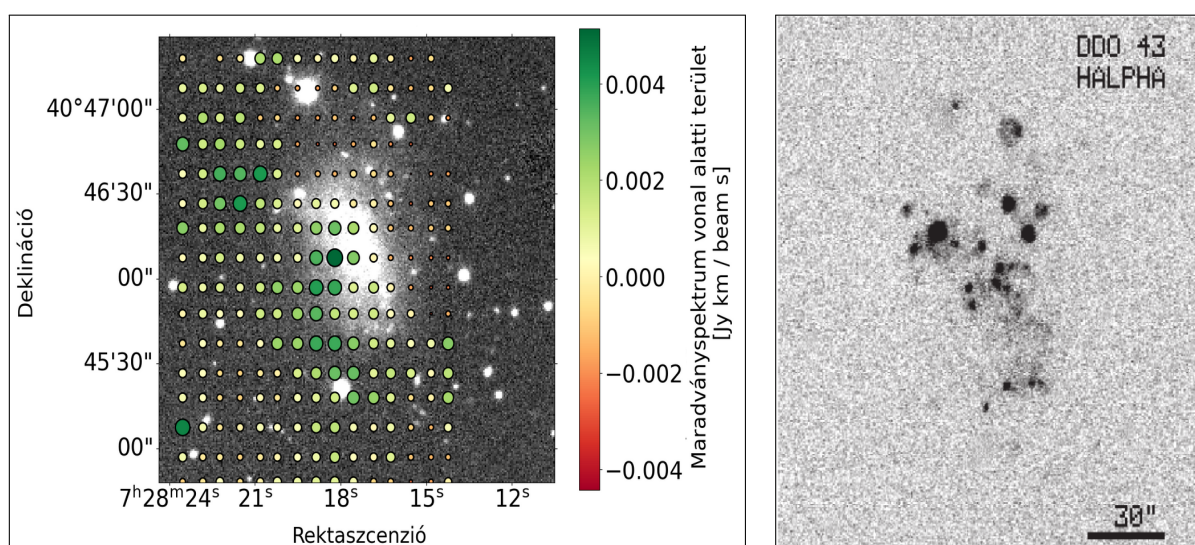
Ez alapján tehát nem látni esetleges erőteljesebb, kavargó mozgásra utaló jeleket, amelyek vonalkiszéledést okoznának.

4. fejezet

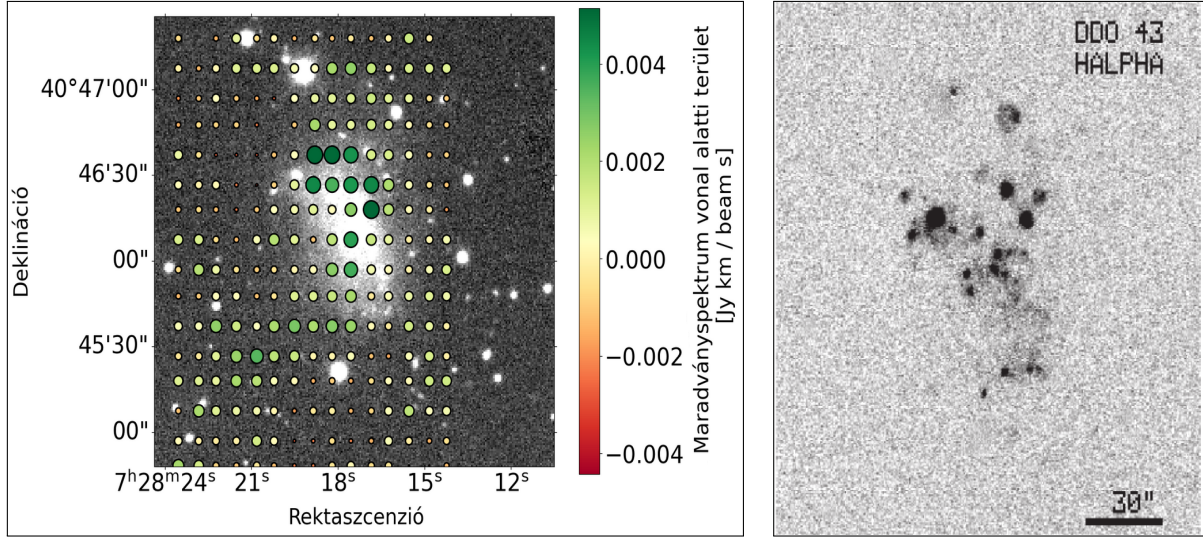
Diszkusszió

Elmegreen és munkatársai [1], valamint Hunter és munkatársai [2] eredményei azt erősítik meg, hogy a csillagkeletkezésből származó turbulencia szerepe a molekulafelhők szétszaggatása [20], és ezáltal a további csillagkeletkezés szabályozása lehet, ez a hatás pedig a semleges hidrogén mérésében nem fog feltűnni. Egy másik felvetésük, hogy a csillagkeletkezésből származó energia gyorsan szétterjed, és így nem jelenik meg lokálisan. Az ő javaslatuk volt továbbá, hogy külön vonalszárnyakban is meg lehetne vizsgálni az esetlegesen feltűnő gyorsabb mozgásokat. A CLASS-ban elvégzett Gauss-görbe illesztéses módszer alapján erre a 3.3 fejezetben részletezett eredményeket kaptam.

Az alábbi ábrán egymás mellett helyeztem el a két vonalszárny-területeket mutató képet, illetve a törpegalaxis H α térképét.



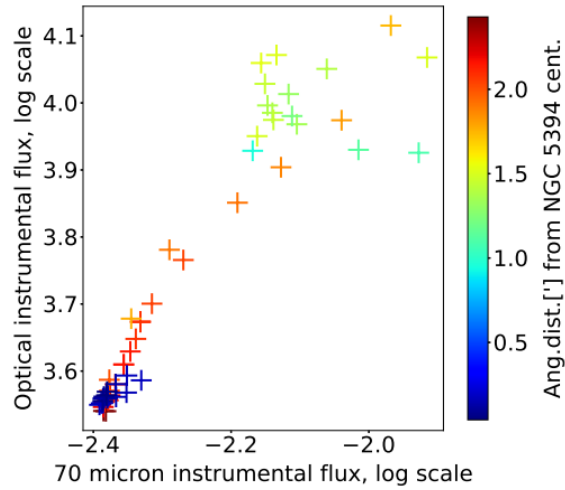
4.1. ábra. A $315 - 336 \text{ km s}^{-1}$ tartomány maradványspektrumainak vonal alatti területei, illetve a DDO 43 törpegalaxis H α térképe [8].



4.2. ábra. A $372 - 393 \text{ km s}^{-1}$ tartomány maradványspektrumainak vonal alatti területei, illetve a DDO 43 törpegalaxis H α térképe [8].

Szemmel láthatóan van átfedés a magas értékek és a H α térkép által jelzett területek között, azonban ezt csak az utóbbi felületi fényessége alapján lehet majd pontosan megállapítani. Ez lesz a projektem következő része.

Fontos továbbá, hogy a THINGS és a LITTLE THINGS kifejezetten elszigetelt galaxisokat vizsgált azért, hogy a belső folyamatokat külső hatásoktól mentesen tudják leírni. Mivel a galaxisok közti kölcsönhatások, összeolvadások jelentősen befolyásolhatják a csillagkeletkezést, és gyakran épp nagytömegű csillagkeletkezést indíthatanak be, az is vizsgálható, hogy az ilyen régiókban milyen a hidrogéngáz mozgása. Társszerzőként részt vettem egy a kölcsönhatások által indukált csillagkeletkezésről írt cikkben [21], amelyben két kölcsönható galaxispárt vizsgáltunk, ahol az egyik résztvevő jelentősen kisebb tömegű. A kölcsönhatások során átáramolhat elegendő gáz akár a törpegalaxisokba is ahhoz, hogy nagytömegű csillagkeletkezés indulhasson be bennük, erre utaló jeleket kerestünk. Az én feladatom a két galaxispár, az M51 (Örvény-galaxis) illetve az Arp 84 fémességére vonatkozó szakirodalom keresése és az Arp 84 esetében az optikai tartományú és az infravörös fluxus közötti korreláció megállapítása volt. Az eredmény az alábbi, a cikkből kiemelt ábra volt [21, Fig. 8].



4.3. ábra. [21, Fig. 8.] Az Arp 84 infravörös képén kiválasztott régiók. Logaritmikus skálán látható a 70 mikronos infravörös sugárzás és az optikai tartományú sugárzás kapcsolata. A korreláció jól látható, néhány ponttól eltekintve, amelyek a kisebb résztvevő középpontjától való elhelyezkedés szerint - amit a színskála is mutat - a kölcsönható régióban találhatók. Ezek por által árnyékolt csillagkeletkezésre utalhatnak.

Az eredmény arra utalt, hogy a kölcsönható régióban vannak olyan területek, ahol csillagkeletkezés indulhatott be. Szükség lesz majd a továbbiakban ezen galaxisok semleges hidrogén méréseire, és hasonló módon elemezve az adatokat, összehasonlíthatjuk a csillagkeletkező területek elhelyezkedésével és intenzitásával, és így a projekt kiegészülhet egy kölcsönható galaxispár jellemzésével is.

5. fejezet

Összefoglalás és kitekintés

A dolgozatomban a DDO 43 törpegalaxisban mért semleges hidrogén színképvonalában ke-
restem vonalkiszélesedéseket.

A LITTLE THINGS felmérés előre kalibrált adatait használtam fel. A nyers mérések egy
részét én is feldolgoztam az AIPS programban, hogy jobban átlássam a hidrogénmérések kalib-
rációjának módját.

A CLASS szoftverben választottam ki a galaxis területén található spektrumokat. A spekt-
rumokra Gauss-görbét illesztettem, majd az illesztést levontam a színképvonalból, így képezve
maradványspektrumot. A vonalszárnyak sebességtartományaiban összehasonlítottam az értéke-
ket, így képet kaptam arról, hogy hol helyezkednek el alacsonyabb, illetve magasabb sebesség-
tartományú régiók a galaxisban.

A következő célom ezen régiók elhelyezkedésének összehasonlítása a csillagkeletkezési te-
rületekkel. Ehhez $H\alpha$ illetve távoli ultraibolya méréseket fogok felhasználni. Emellett megállapí-
tást fogok tenni arra vonatkozólag is, hogy az ebben a dolgozatban bemutatott vonalkiszélesedés
milyen mértékben függ valóban a turbulens mozgásoktól.

A hidrogéngáz mozgását ugyanígy tervezem a [21]-ben vizsgált galaxispár esetén is meg-
vizsgálni, és így összekötni a kölcsönható galaxisokbeli csillagkeletkezés témáját a dolgozatom
témájával.

Amennyiben az itt felsoroltak is azt adnák vissza, amit a korábbi kutatások, azaz hogy a várt
turbulencia nem jelenik meg az atomos hidrogéngázban, szeretném ugyanezt molekuláris gázban
is vizsgálni. A hidrogénmolekula-felhőket a legkönnyebben szén-monoxid (CO) mérése alapján
tudjuk vizsgálni, ugyanis ez hasonlóan észlelhető interferométerekkel rádiótartományban, mint
az atomos hidrogén. A CO-nak is készült az itt felsoroltakhoz hasonló felmérése, ez a Physics at
High Angular resolutions in Nearby Galaxies (röviden PHANGS) [22], amely adatai az Atacama

Large Millimeter Array, ismert nevén ALMA rádióinterferométerrel készültek. A következő lépés így az lenne, hogy a CO adatokat is megvizsgálom a dolgozatomban leírt módon.

Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozom Dr. Deidre Hunternek, amiért megosztotta velem a LITTLE THINGS adatfeldolgozási útmutatóját és amiért fordulhattam hozzá az AIPS használatával kapcsolatos kérdésekkel. Szeretném megköszönni Kovács Gábornak és Kovács-Stermeczky Zsófiának, amiért segítettek az AIPS telepítésében, Eric Greisennek, aki segítséget nyújtott az adatfeldolgozás közben felmerült technikai problémákban, illetve Sébastien Bardeau-nak, akihez a CLASS szoftverrel kapcsolatos kérdésekben fordulhattam. Köszönettel tartozom továbbá Joó Andrásnak, amiért segítséget nyújtott a 3.8 és 3.9 ábrák megtervezésében, amiért használhattam az általa írt python kódot az ábra megalkotásához, és amiért segített a kódot az ábráimhoz igazítani.

Irodalomjegyzék

- [1] Bruce G. Elmegreen, Zorayda Martinez és Deidre A. Hunter. „A Search for Correlations between Turbulence and Star Formation in THINGS Galaxies”. *The Astrophysical Journal* 928.2 (2022), 143. old. DOI: 10.3847/1538-4357/ac559c. URL: <https://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/ac559c>.
- [2] Deidre A. Hunter és tsai. „A Search for Correlations between Turbulence and Star Formation in LITTLE THINGS Dwarf Irregular Galaxies”. *The Astronomical Journal* 161.4 (2021), 175. old. DOI: 10.3847/1538-3881/abe1c0. URL: <https://dx.doi.org/10.3847/1538-3881/abe1c0>.
- [3] Cserepes László és Petrovay Kristóf. *Kozmikus fizika*. Egyetemi jegyzet. Második, átdolgozott kiadás. Budapest: Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar, 2001.
- [4] Barbara Ryden és Richard W. Pogge. *Interstellar and Intergalactic Medium*. Egyetemi jegyzet. Ohio State University, 2021.
- [5] *Large VLA study of the kinematics and structure of the interstellar medium (and its relation to star formation) in a sample of nearby galaxies*. <https://iopscience.iop.org/journal/1538-3881/page/THINGS>. [Utolsó megtekintés: 2024. 05. 21.]
- [6] *Little Things publications*. <https://science.nrao.edu/science/surveys/littlethings/publications>. [Utolsó megtekintés: 2024. 05. 21.]
- [7] Fabian Walter és tsai. „THINGS: THE HI NEARBY GALAXY SURVEY”. *The Astronomical Journal* 136.6 (2008), 2563. old. DOI: 10.1088/0004-6256/136/6/2563. URL: <https://dx.doi.org/10.1088/0004-6256/136/6/2563>.
- [8] Deidre A. Hunter és tsai. „LITTLE THINGS”. *The Astronomical Journal* 144.5 (2012. okt.), 134. old. ISSN: 1538-3881. DOI: 10.1088/0004-6256/144/5/134. URL: <http://dx.doi.org/10.1088/0004-6256/144/5/134>.

- [9] *Very Large Array Telescope*. <https://public.nrao.edu/telescopes/VLA/>. [Utolsó megtekintés: 2024. 05. 21.]
- [10] *Very Large Array resolution*. <https://science.nrao.edu/facilities/vla/docs/manuals/oss/performance/resolution>. [Utolsó megtekintés: 2024. 05. 21.]
- [11] Caroline E. Simpson, Deidre A. Hunter és Tyler E. Nordgren. „DDO 43: A Prototypical Dwarf Irregular Galaxy?": *The Astronomical Journal* 130.3 (2005), 1049. old. DOI: 10.1086/432537. URL: <https://dx.doi.org/10.1086/432537>.
- [12] A. Baillard és tsai. „The FIGI catalogue of 4458 nearby galaxies with detailed morphology". *Astronomy and Astrophysics* 532 (2011. júl.), A74. ISSN: 1432-0746. DOI: 10.1051/0004-6361/201016423. URL: <http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201016423>.
- [13] *National Radio Astronomy Observatory Archive*. <https://data.nrao.edu/portal/>. [Utolsó megtekintés: 2024. 05. 21.]
- [14] E. W. Greisen. „The Astronomical Image Processing System". *Seminar on Acquisition, Processing and Archiving of Astronomical Images*, p. 125 - 142 (1990).
- [15] *LITTLE THINGS AIPS CALIBRATION Recipe*. https://science.nrao.edu/science/surveys/littlethings/data/recipe_calibration_public.txt. [Utolsó megtekintés: 2024. 05. 21.]
- [16] *LITTLE THINGS AIPS MAPPING Recipe*. https://science.nrao.edu/science/surveys/littlethings/data/recipe_mapping_public.txt. [Utolsó megtekintés: 2024. 05. 21.]
- [17] *List of VLA Calibrators*. <https://science.nrao.edu/facilities/vla/observing/callist>. [Utolsó megtekintés: 2024. 05. 21.]
- [18] *DDO 43 metadata*. <https://science.nrao.edu/science/surveys/littlethings/data/d43.html>. Az adatok elérhetők a VLA HI: Observations hivatkozásban. [Utolsó megtekintés: 2024. 05. 21.]
- [19] *GILDAS Home Page*. <http://www.iram.fr/IRAMFR/GILDAS>. [Utolsó megtekintés: 2024. 05. 21.]

- [20] Samantha M Benincasa és tsai. „Live fast, die young: GMC lifetimes in the FIRE cosmological simulations of Milky Way mass galaxies”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 497.3 (2020. júl.), 3993–3999. ISSN: 1365-2966. DOI: 10.1093/mnras/staa2116. URL: <http://dx.doi.org/10.1093/mnras/staa2116>.
- [21] Joó A. P., Koncz B. és Pichler E. „Investigating star formation in nearby interacting galaxies”. *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso (CAOSP)* 53.4 (2023), 164–174. old. DOI: 10.31577/caosp.2023.53.4.164. URL: <https://doi.org/10.31577/caosp.2023.53.4.164>.
- [22] Philipp Lang és tsai. „PHANGS CO Kinematics: Disk Orientations and Rotation Curves at 150 pc Resolution”. *The Astrophysical Journal* 897.2 (2020. júl.), 122. old. ISSN: 1538-4357. DOI: 10.3847/1538-4357/ab9953. URL: <http://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/ab9953>.