

Csillagkeletkezés és atomos hidrogén kinematikája: a DDO 43 törpegalaxis esete

TDK DOLGOZAT



Szerző:

Pichler Enikő

Csillagász MSc I. évfolyam

Témavezetők:

Dr. Tóth L. Viktor

ELTE TTK Csillagászati Tanszék

Dr. Gabányi Krisztina

ELTE TTK Csillagászati Tanszék

Budapest, 2024

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	7
2. Mérési adatok és feldolgozásuk	10
2.1. Mérések	10
2.2. Adatfeldolgozás az AIPS-ben	11
3. Elemzés és eredmények	15
3.1. A színeképvonal-elemzéshez felhasznált adatok	15
3.2. Az elemzés	15
3.2.1. A spektrumok felvétele	16
3.2.2. A kontinuum levonása	16
3.2.3. Terület megállapítása és spektrumok átlagolása	17
3.2.4. Gauss-görbék illesztése	18
4. Diskusszió	23
5. Összefoglalás és kitekintés	26
Köszönetnyilvánítás	28
A. függelék: Saját eredmények	29
Irodalomjegyzék	30

Absztrakt

A csillagok születésük, fősorozati fejlődésük és az üzemanyaguk elégetése után lejátszódó folyamatok által hatást gyakorolnak környezetükre: a protocsillagok által keltett szél, a csillagszél és a szupernóvák lökéshullámai turbulens áramlásokat okoznak a helyi csillagközi anyagban. 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 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 többlet turbulens mozgás ebben a forrásban nem fedezhető fel. Ezek a kutatások a HI rádióinterferométeres technikával végzett mérésein alapultak. A dolgozatomban arra keresem a választ, hogy az elemzést leszűkítve a semleges hidrogén színeképvonalának vonalszárnyaira, amelyek a lokális jelenségekről adnak információt, felfedezhetünk-e turbulenciátöbbletet. Ehhez a DDO 43 törpegalaxisban megfigyelhető HI tulajdonságait vizsgáltam: elérhető, kalibrált méréseket használtam fel, és a CLASS rádiócsillagászati adatok feldolgozására és elemzésére alkalmas szoftver segítségével a színeképvonalak paramétereit tanulmányoztam.

A színeképvonalak vonal alatti területének, vonalszélességének és intenzitásának eloszlását összevetettem nagytömegű csillagkeletkezési területeket jelző távoli ultraibolya mérésekkel, az eredményem alapján pedig gyenge korreláció található köztük.

1. fejezet

Bevezetés

1.1. Elméleti háttér és korábbi kutatások

A csillagok folyamatos hatást fejtenek ki az őket körülvevő csillagközi anyagra, amely túlnyomórészt semleges hidrogént (továbbiakban HI) tartalmaz. 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 főszorozati csillagnak tekinthető, a csillagszél által gyakorol hatást a környezetre, 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 színekp vonalakon 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 színekp vonalat, 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 mérté-

két több kutatás is vizsgálta¹ a semleges hidrogén mérése alapján. 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 [2] a „The HI Nearby Galaxy Survey” (magyarul HI közeli galaxisok felmérés) [5] 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 HI sugárzását. 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 [1] a „Local Irregulars That Trace Luminosity Extremes, The HI Nearby Galaxy Survey”, röviden LITTLE THINGS felmérésből [6] válogatott galaxisokat. A LITTLE THINGS a THINGS felmérésre építkezett. 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. Maga a felmérés 37 szabálytalan törpegalaxist és 4 kék kompakt törpét foglal magába. 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 HI 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 okoz-

¹<https://iopscience.iop.org/journal/1538-3881/page/THINGS>
<https://science.nrao.edu/science/surveys/littlethings/publications>

hatja. 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. Így továbbra is megválaszolatlan a kérdés, hogy mi szabályozhatja a csillagkeletkezést a galaxisokban. A dolgozatomban azt szeretném bemutatni, hogy hogyan lehetne ezt még vizsgálni: a turbulenciatöbbslet, amelyet a kutatások kerestek, feltűnik-e a hidrogénvonalak vonalszányaiban. A spektrumvonalak jellemzően kiszélesednek gyors mozgások esetén, ezért ha a csillagfejlődés hatása jelentősen megzavarja a semleges hidrogéngázt, akkor ez a mozgás megjelenhet a vonalszányokban. 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) [7] 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 transzformáltja között egyértelmű megfeleltetés van, azonban a vizibilitást 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 [8]. 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.

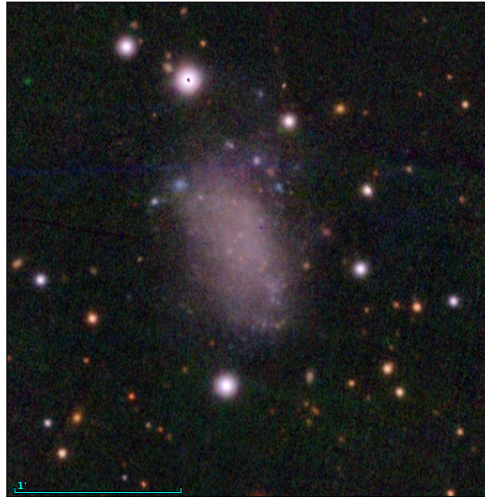
1.3. A DDO 43 törpegalaxis

A dolgozatomban a vonalszárnyak vizsgálatát a LITTLE THINGS felmérés egyik vizsgált galaxisa, a DDO 43 törpegalaxis adatai alapján végeztem el. Azért esett egy kisebb galaxisra a választásom, hogy méretéből adódóan könnyebb legyen a HI kiterjedésének elemzése, emellett

pedig a törpegalaxisokban az alacsonyabb gravitációs potenciál miatt más csillagkeletkezést szabályozó folyamatokat várunk, mint nagy spirálgalaxisokban, ami egy szintén kutatott terület.

A DDO 43 (más nevein UGC 3860 vagy PGC 21073) egy szabálytalan törpegalaxis, tőlünk 7,8 Mpc távolságban [9]. A csillagkeletkezési rátája hidrogén-alfa sugárzás alapján számolva (amely a nagytömegű csillagok körüli ionizált gáz nyomjelzője) $3.7 \times 10^{-3} \text{ M}_{\odot} \text{ yr}^{-1}$, ez átlagosnak számít egy szabálytalan törpegalaxis esetén [10, 11]. Egy újabb kutatás távoli ultraibolya luminozitás alapján már $17.72 \pm 0.03 \times 10^{-4} \text{ M}_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ -nek számolta ezt az értéket [12], e különbségnek oka az eltérő sugárzástartomány mellett a két vizsgálat között eltelt idő és így a mérések pontosságának javulása is lehet. 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 Pan-STARRS felmérésből [13, 14].

A törpegalaxisok a leggyakoribb galaxisok, meghatározás szerint abszolút fényességük alapján különítik el őket, a törpék és az óriás galaxisok közti határ rendszerint -16^m vagy -18^m [3]. 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 [6]. A LITTLE THINGS felmérés által 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?

A DDO 43 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 [15] 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 LITTLE THINGS felmérés során 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 érzékenysége, 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 (AIPS, [16]) szoftverrel történt.

A 2. fejezetben a felhasznált mérési adatokat és annak kalibrációját ismertetem. A 3. fejezetben részletezem az általam elvégzett elemzést, az eredményeket pedig a 3.2.4 alfejezetben mutatom be. Végül a 4. fejezetben foglalom össze az eredményeimből levont következtetéseket.

2. fejezet

Mérési adatok és feldolgozásuk

2.1. Mérések

A LITTLE THINGS felmérés az AH927 projektkódon futott. [6] részletesen leírja a megfigyeléseket és az adatfeldolgozás menetét, ez alapján ismertetem a folyamatot ebben a fejezetben. B konfigurációban 2007. december 19-től 2008. február 10-ig tartottak a megfigyelések, minden galaxist két 6 órás szakaszban figyeltek meg. 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.

A mérések sávszélessége 0.8 vagy 1.6 MHz volt galaxistól függően (azaz 150 és 300 km s^{-1}). 256 csatornát, azaz frekvenciatartományt használtak minden 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 készültkor, ezt szükséges volt pótolni az adatfeldolgozás során azokban az esetekben, ahol az új mérésekkel összefésülni kívánt archívumi adatokra alkalmazták ezt a módszert. Emiatt a DDO 43 esetében, ahol $2,6 \text{ km s}^{-1}$ ($12,21 \text{ kHz}$) volt az elérni kívánt spektrális felbontás, a mérést $1,3 \text{ km s}^{-1}$ -os csatornafelbontással végezték el, majd az adatfeldolgozás során a Hanning-smoothing alkalmazásakor módosították ezt $2,6 \text{ km s}^{-1}$ -ra. A spektrális felbontás a csatornafelbontás 1,4-szerese.

A megfigyelések ideje alatt kezdődött el a VLA több éven át tartó felújítása, emiatt a hálózat egyes elemei eltérő érzékenységgel és zajkarakterisztikával rendelkezhettek, 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 és végződtek a mérések (szintén az antennák felújítása miatti elővigyázatosság miatt), majd váltásban mérték galaxist és a másodlagos kalibrátort, egyenként körülbelül 12-25 percen keresztül. A másodlagos kalibrátort a vizibilitás függvény fázisának és amplitúdójának, azaz a célforrás helyzetének és fényességének meghatározásához használták.

2.2. Adatfeldolgozás az AIPS-ben

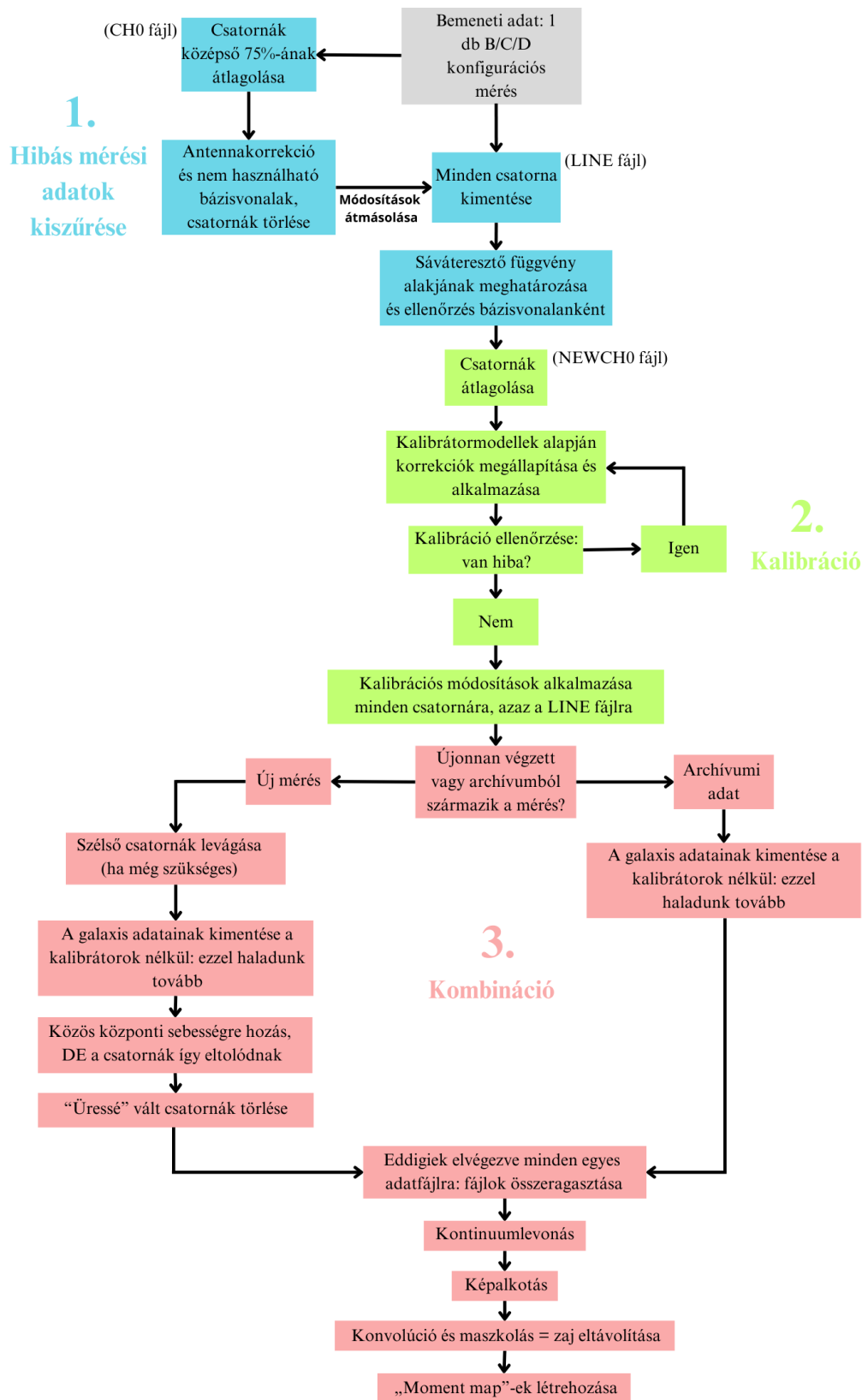
Az adatfeldolgozás pontos lépései elérhetőek a LITTLE THINGS honlapján (kalibráció [17] és kombináció [18]), illetve tömörítve a 2.1. ábra mutatja. A rádióinterferometriával végzett mérések feldolgozásának megértéséhez tanulásként elvégeztem a B konfigurációs mérések kalibrációját és kombinációját az AIPS szoftverrel, így ez alapján röviden írásban is bemutatom a folyamat lépéseit.

A DDO 43 három B konfigurációs mérését a data.nrao.edu honlapról [15] töltöttem le, az AH927 projektkód alatt és a DDO 43 célforrás nevét megjelölve. A nyers adatfájlokból két, AIPS-en belül használható fájlt hoztam létre, amelyekre az útmutatót követve CH0-ként és LINE-ként hivatkozom a továbbiakban. Előbbi a csatornák középső 75%-ának átlaga, míg utóbbi az összes csatornát tartalmazza. Első körben a CH0 fájlt kellett használnom a hibás bázisvonalak, csatornák törléséhez, illetve az antennakorrekcióhoz.

A csatornák eredeti számától függően levágtam az első és utolsó, adott számú csatornát, ugyanis a későbbiekben ezek 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. Innen a következő lépés az antennakorrekció. Az adott méréshez tartozó antennakorrekciókat már meghatározták a mérés idején, és ezek egyszerűen alkalmazhatók a fájlra. Az AIPS fájlkon belül „táblákban” tárolja az adatokat, amelyek a kalibrációs lépések során rögzítik az adatsor változásait: ennek megfelelően az antennakorrekcióhoz tartozik az AN jelzésű tábla.

Az antennák felújítása miatti esetleges mérési hibák kiküszöbölése érdekében a következő lépések között többszörös ellenőrzésre volt szükség, hogy a kalibráció valóban a várt eredményt hozza-e.

A DDO 43 kalibrátorainak azonosítói 0137+331 és 0542+498 (az elsődleges kalibrátorok), illetve 0702+445 (másodlagos kalibrátor) [19]. Az AIPS megállapítja ezeknek a kalibrátorok-



2.1. ábra. A VLA mérések feldolgozásának folyamata összefoglalva, saját készítésű ábrán. Egyes lépések több AIPS-parancsot is magukba foglalnak.

nak a fluxussűrűségeit; a fluxuskalibrátorokhoz tartoznak modellek, amelyek az AIPS részei, így egyszerűen beolvashatók. A fent említett EVLA-EVLA bázisvonalak hibái miatt az útmutató javaslatára ezeket mind megjelöltem nem használatosként, 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 átmásoltam őket a LINE fájlra, hogy minden csatornára alkalmazva legyenek. Innentől a LINE fájljal haladtam tovább.

A következő lépés a sáváteresztő függvény alakjának meghatározása volt. Ezt az antennakorrekcióhoz hasonlóan egy egyszerű parancs lefuttatása végzi el. Ezt követően azonban ellenőrizni kell, hogy nincsenek-e valahol hibás bázisvonalak: így minden bázisvonalra kirajzoltam a sáváteresztő függvényt. Ha az átlagostól nagyon eltérő alakokat látunk, azt hibás mérési pont okozza. Ennek törlésével megszűnik a hiba.

Ezután a csatornák ismételt átlagolásával létrehoztam egy egy NEWCH0 jelzésű fájlt a LINE adataiból, amelyen a további hibás pontok megállapítása történik majd. A NEWCH0 fájlra készül el a kalibráció, és a korrekciókat az AIPS úgynevezett SN („solution”)-táblákba írja át. Az SN-táblákban található korrekciókat alkalmaztam a forrásokra, ezt követően a kalibrált adatok pedig úgynevezett CL-táblákban jelennek meg.

Ezután ellenőriztem a kalibrációt a következő módokon: a mérési pontok bázisvonalak és bázisvonalhosszak szerint kirajzolhatóak, megmutatva az esetleges kiugrásokat, amelyek hibásak, és így túl magas az intenzitásuk. Ha törlésre kerültek ilyen pontok, akkor a kalibrációt újra le kellett futtatni.

Az AIPS képkalkáló programja a cleaning eljárást alkalmazza: a kalibrátorok és a célforrás képe is elkészíthető; azonban mivel a B konfiguráció a kiterjedt struktúrákra nem érzékeny, itt egyelőre nem látunk forrást. Ha ettől eltekintve az eredmény megfelelőnek tűnt, tehát nem maradtak magas amplitúdójú pontok az adatok között, akkor a NEWCH0 fájlban megállapított kalibrációt átmásoltam a teljes spektrumot tartalmazó, LINE fájlra. Ezután az eredmény ellenőrizhető ugyanúgy, mint korábban: ha találtam kiugró pontot, akkor a fentieket a kalibrációtól kezdve meg kellett ismételni.

Ha mindez elkészült a három B konfigurációs fájlra, akkor ezek kombinálása volt a következő lépés. Nem csak különböző konfigurációjú, hanem különböző időpontban történő mérésekkel is javul a képkalkálás. A kapott útmutató szerint a kombináció két részre oszlik aszerint, hogy a kombinálandó 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 javasolt további szélső csatornák kivágása, ám a kalibráció 20-20 csatorna kivágása ebben az esetben már elegendő volt. Felosztottam a kalibráció eredményeképp kapott fájlt egy forrású fájlokra, azaz külön véve a kalibrátorokat és a galaxist, ugyanis ebből csak a galaxisra volt a továbbiakban szükségem. A három kombinálandó fájlt közös sebességtartományokra hoztam; ez a lépés alkalmazza a korábban említett Hanning-smoothing módszert, ezzel elérve a tervezett $2,6 \text{ km s}^{-1}$ -os spektrális felbontást. Viszont mivel ez az eljárás eltolja a spektrumot, az első vagy az utolsó néhány csatorna „üressé” válhat. Az olyan csatornákat, amelyeknek nagyon alacsonyok lettek az értékei a többihez képest, így töröltem.

Következőnek összeolvastottam a különböző fájlokat. Itt egyenként kellett „hozzáragasztani” a fájlokat egymáshoz. Ha egy képalkotó paranccsal külön megjelenítettem a csatornákat, már felfedezhetők voltak azok, amelyeken megjelennek a hidrogénvonalak. Következőnek levontam a kontinuumot, amelyből ezeket a csatornákat ki kellett hagynom.

Végül elkészült a galaxis cleanin eljárással megalkotott képe. Minden csatornáról eltávolítottam a zajt, hogy aztán az úgynevezett moment mapeket hozzam létre, amelyek egyenként valamely tengelyen integrált értékeket jelentik. A 0. moment map a HI oszlopsűrűségének, az 1. moment map a közepes sebességnek, a 2. moment map pedig a sebességeloszlásnak térképeit adják.

Az eljárás a C és D konfigurációs mérések esetében is megegyezik a fent leírtakkal, ezek a B konfigurációs mérésekkel kombinálva együtt alkotják a LITTLE THINGS felmérésben elemzett, teljes adatfájlokat.

3. fejezet

Elemzés és eredmények

3.1. A színeképvonal-elemzéshez felhasznált adatok

A LITTLE THINGS csoport által kalibrált és kombinált adatfájlok interneten elérhetők letöltésre a NRAO LITTLE THINGS felmérés oldalán [20]. Az alább részletezett elemzésemben az itt elérhető, DD043_NA_ICL001.FITS címen szereplő fájlt használtam fel.

3.2. Az elemzés

A célom az, hogy megállapítsam, felfedezhető-e a hidrogén spektrumvonalak vonalszárnya-in jelentős kiszélesedés, tehát a gáz lokális gyorsabb mozgása. 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.

Az AIPS-ben is lehetséges spektrumokat elemezni, 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) [21] csomag része, amely szintén rádiócsillagászati mérések feldolgozására és elemzésére alkalmas rendszer. A CLASS alapvetően egy antennával végzett (tehát nem interferométer) rádiótartományú méréseknek feldolgozására alkalmas, azonban mivel elemzéshez való programokat is magába foglal, a már előre kalibrált adatokhoz megfelelő volt.

A vonalszárnnyak 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. 1, 2 vagy 3 Gauss-görbe illesztése a színképvonalakra
5. Az illesztésből kapott paraméterek (vonal alatti terület, vonalszélesség, intenzitás) eloszlásának vizsgálata

3.2.1. A spektrumok felvétele

A DDO 43 fájlja FITS formátumban érhető el. Ahhoz, hogy a CLASS számára beolvasható legyen, szükséges átalakítani a GILDAS olvasható formátumra, amelyet a `v\fits` parancs végez el. Ez az átalakítás azonban nem tartalmazza a sebességre illetve frekvenciára vonatkozó adatokat, amelyeket egyenként meg kell adni a programnak, ezzel kiegészítve a fájl adatait.

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 - ahogy az általam felhasznált fájl esetében is. Ennek megoldásához a fájlt transzponálni kell, elforgatni a megfelelő tengelysorrendhez. A CLASS `transpose` parancsa ezt elvégzi, így ezt követően megnyitható a fájl és előhívható minden mérési pont spektruma, annak sorszámnak megadásával.

3.2.2. A kontinuum levonása

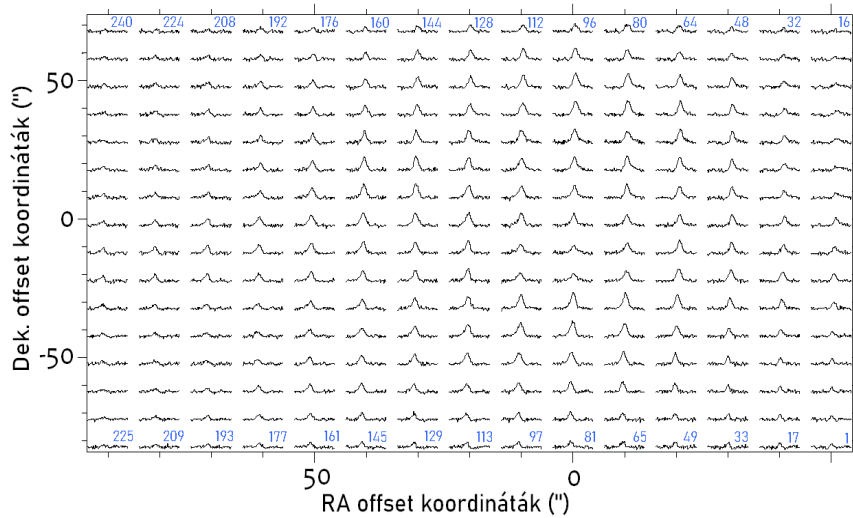
A spektrumok átlagolásához és a későbbi Gauss-görbe illesztéshez is szükség van a kontinuum levonására, azaz a hidrogéntől eltérő eredetű, sugárzást kibocsátó tényezők eltávolítására. Kijelöltem azt a területet a `set window` parancssal, amelyet a szoftver ne használjon fel a kontinuum meghatározásához, azaz magát a színképvonalat: ezután a `base` parancs egyéb paraméter megadása nélkül illeszt egy lineáris kontinuum-modellt (amelyet gyakran bázisvonalnak neveznek, amely nem azonos a rádióinterferometriában használt bázisvonal kifejezéssel) a színképvonaltól eltérő területekre, és levonja azt. Így egyedül a hidrogén vonala és a zaj marad a spektrumokban.

A kontinuum meghatározásakor kijelölt terület (ahol a spektrumvonal jellemzően feltűnt) esetében az 1420,275-1420,525 MHz tartomány volt.

3.2.3. Terület megállapítása és spektrumok átlagolása

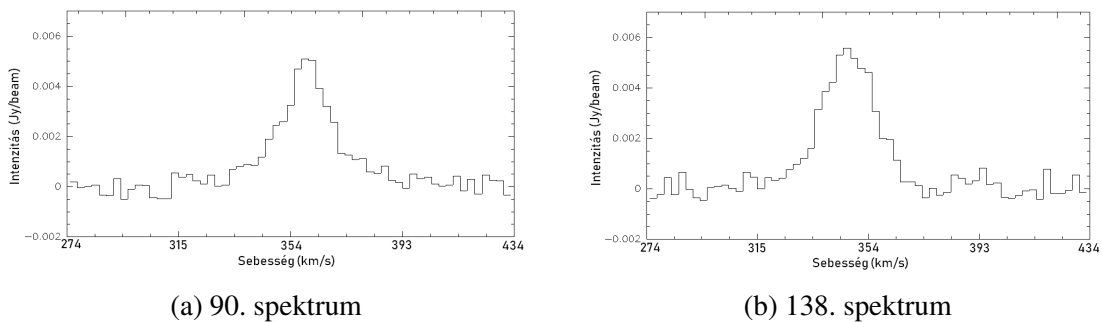
A teljes fájl egy 1024×1024 pixelből, azaz mérési pontból álló képet tartalmaz. Ennek azonban a galaxis rádiótartományban látható része csak egy 280×280 pixeles területet tesz ki.

A 280×280 pixeles terület tehát összesen 78 400 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. Így végül 240 db spektrumot kaptam, amelyet felhasználtam a további elemzés során. A CLASS a galaxis középpontjaként megadott koordinátától (amelyet maga a FITS fájl is már tartalmaz) számított offset koordináta szerint ad „sorszámot” a spektrumoknak. A 240 átlagolt spektrum offset koordináta szerinti elhelyezkedését a 3.1 ábra mutatja.



3.1. ábra. A felhasznált terület spektrumtérképe. A tengelyek az offset koordinátákat jelölik, ívmásodpercben, az offset 0 0 pont a galaxis középpontjának koordinátáit jelenti: $RA = 07^h 28^m 17.724^s$, és $Dek. = +40^\circ 46' 11.36''$. A spektrumok sorszáma kékkel szerepel.

Adott mérési pont kiválasztásával (get), és a plot paranccsal megjeleníthetők a kiválasztott spektrumok.



3.2. ábra. Színképvonalak a CLASS-ban.

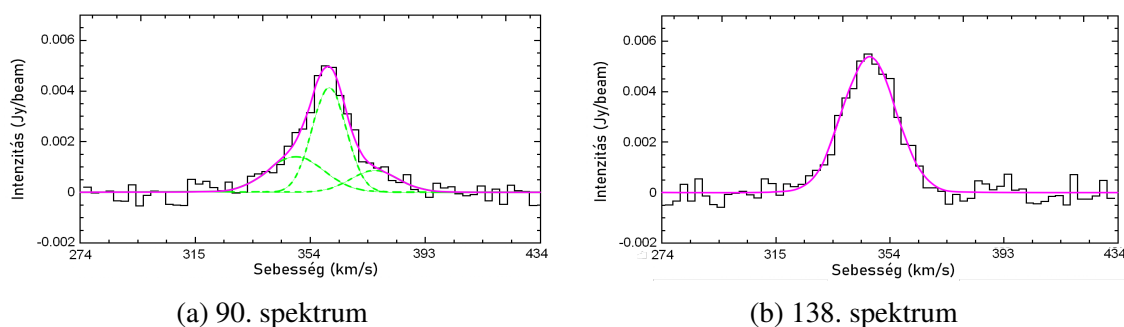
3.2.4. Gauss-görbék illesztése

Egyenként illesztettem a 240 spektrumot, egy megismételt kontinuum-levonást követően. Ezúttal azonban nem a lineáris modellt használtam, hanem a legmagasabb rendűt, amelyet a CLASS szoftver javasolt. A kontinuum-levonás rendje ezen spektrumokra a 3.1. táblázatban található.

Levonás rendje	Spektrumok száma (lásd 3.1. ábra)
base 2	12, 14, 28, 31, 32, 42, 44, 45, 46, 58, 59, 60, 72, 76, 78, 79, 80, 84, 85, 91, 92, 101, 102, 103, 106, 113, 114, 115, 117, 118, 119, 120, 130, 131, 134, 145, 146, 147, 151, 152, 153, 157, 158, 167, 170, 171, 172, 182, 183, 184, 185, 187, 188, 189, 190, 191, 196, 197, 198, 199, 200, 201, 202, 203, 204, 205, 206, 236
base 3	175, 186
base 4	83, 98, 99
base 5	17, 18

3.1. táblázat. A Gauss-illesztést megelőző kontinuum-levonás rendje spektrumok szerint. A táblázatban nem szereplő számú spektrumokra mind elsőrendű kontinuum-levonást végeztem el.

Ahol jobb illesztést igényelt, ott kettő, vagy három Gauss-görbét is illesztettem. Az illesztéseket úgy végeztem el, hogy ahol lehetséges volt, a kettő vagy három Gauss-komponens megkülönböztessen fő komponens, illetve vörös és/vagy kék oldali komponens (amely nem tévesztendő össze a vonal vörös- vagy kékeltolódásával; egyedül a komponens sebesség szerinti pozíciójára utal).



3.3. ábra. A 3.2 ábrán mutatott spektrumokra illesztett Gauss-görbék. A 90. spektrum esetében jobb illesztést kaptam három Gauss-komponenssel, míg a 138. spektrum esetében megfelelő volt az egy komponenses illesztés.

A `print fit` parancs kiírja az illesztés paramétereit. A 3.3 ábrán mutatott Gauss-görbék paramétereit a 3.2 táblázatban találhatók.

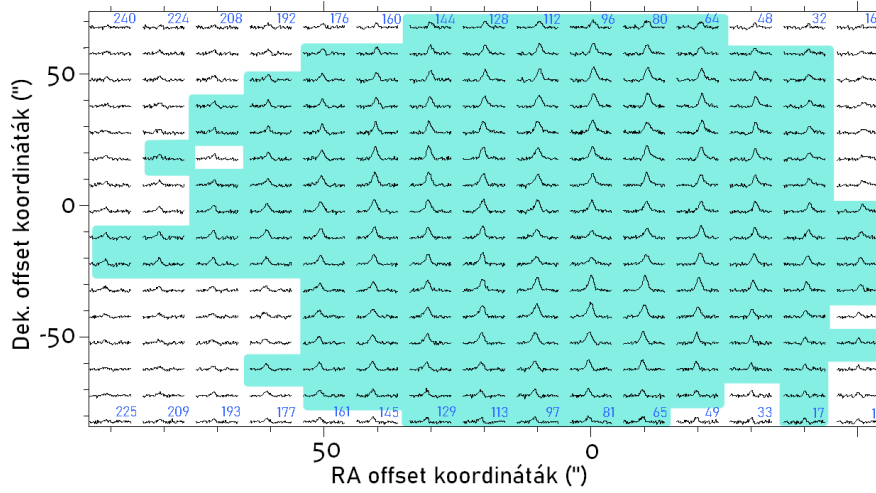
Spektrum sorszáma	90 (fő profil)	90 (kék oldal)	90 (vörös oldal)	138
RA offsetben ["]	0	0	0	30
Dek. offsetben ["]	10	10	10	10
Vonal alatti terület [Jy km beam ⁻¹ s ⁻¹]	3.0934 × 10 ⁻²	1.7320 × 10 ⁻²	8.9261 × 10 ⁻³	6.3078 × 10 ⁻²
Bizonytalanság [Jy km beam ⁻¹ s ⁻¹]	1.112 × 10 ⁻⁰³	1.450 × 10 ⁻⁰³	1.308 × 10 ⁻⁰³	2.002 × 10 ⁻⁰³
Vonalszélesség [km s ⁻¹]	7.045	11.59	9.904	10.98
Bizonytalanság [km s ⁻¹]	0.299	1.13	1.68	0.402
Intenzitás [Jy beam ⁻¹]	4.125 × 10 ⁻⁰³	1.404 × 10 ⁻⁰³	8.467 × 10 ⁻⁰⁴	5.397 × 10 ⁻⁰³
Kontinuum rms	3.041 × 10 ⁻⁰⁴	3.041 × 10 ⁻⁰⁴	3.041 × 10 ⁻⁰⁴	3.547 × 10 ⁻⁰⁴
Vonal rms	2.122 × 10 ⁻⁰⁴	2.122 × 10 ⁻⁰⁴	2.122 × 10 ⁻⁰⁴	2.517 × 10 ⁻⁰⁴

3.2. táblázat. A 3.3 ábrán bemutatott Gauss-illesztések paramétereit, a 90. spektrum mindhárom komponensére, és a 138. spektrum egyetlen komponensére.

A CLASS szoftver akkor ítél egy illesztést megfelelőnek, ha a kontinuum négyzetes közepe („root mean square”, röviden rms) 1,5-szer nagyobb, mint az illesztett vonal négyzetes közepe. Ezek az értékek is megtalálhatók a 3.2. táblázatban. Ha ez a feltétel teljesült, és az illesztések is megfeleltek (több komponens szükségessége esetén) az egy fő és egy vagy két oldalsó komponens elvnek, akkor fogadtam el az adott Gauss-görbéket.

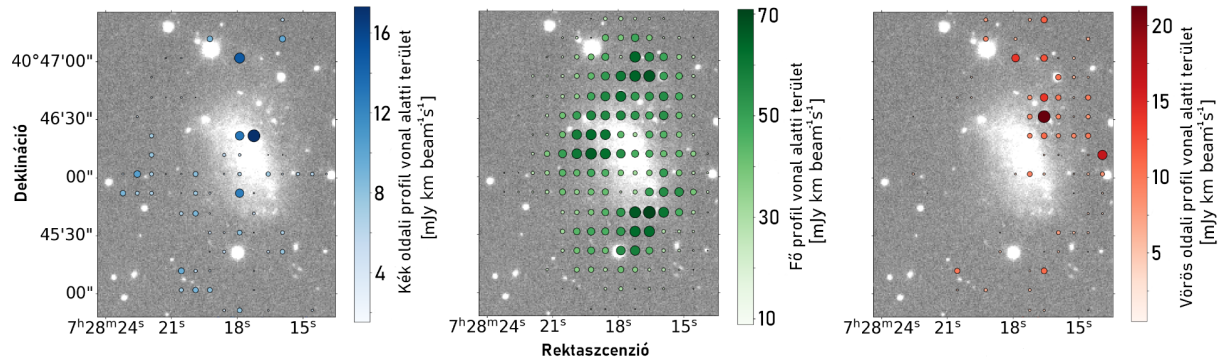
Az illesztések paramétereinek eloszlása

A 3.5., 3.6., 3.7. ábrák az illesztések paramétereinek eloszlását mutatják, külön-külön a komponensekre. Az olyan spektrumokat, amelyek fő komponensének intenzitása 2 mJy/beam alatt volt, kihagytam az eloszlásábrákból, mert ezekben az esetekben az illesztés sokkal kevésbé volt megbízható. A 3.4 ábrán a türkizre színezett spektrumok jelölik azokat, amelyek megjelennek az eloszlásábrákon.



3.4. ábra. Türkiz jelöli a 3.5., 3.6. és 3.7. eloszlásábrákon megjelenő spektrumokat, amelyek fő komponensének intenzitása magasabb 2 mJy/beam-nél. A spektrumok sorszáma kékkel szerepel.

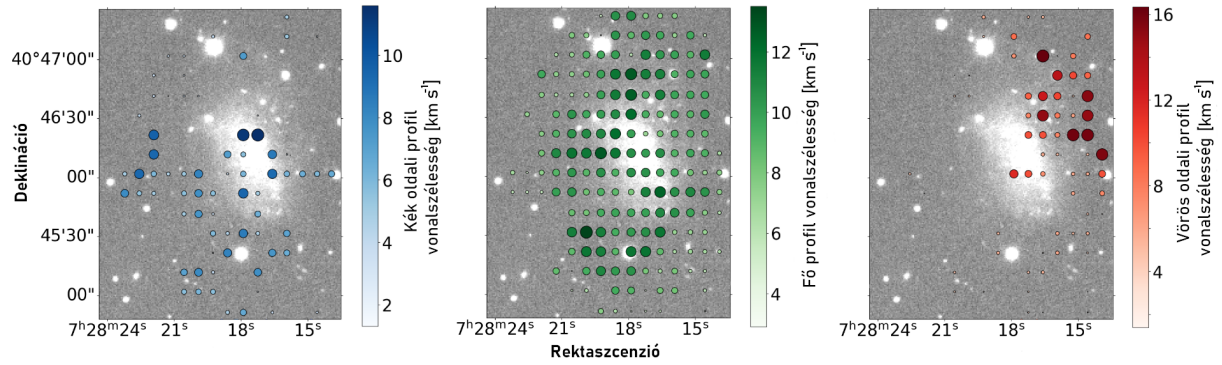
A vonal alatti terület eloszlása



3.5. ábra. Sorban balról: kék oldali komponens, fő komponens és vörös oldali komponens integrálértékeinek eloszlása a galaxis optikai képére helyezve. Az értékek rádiótartományú mérésből származnak, így a háttér a spektrumok pozíciójának érzékelését szolgálja a galaxis látható részéhez képest (Sloan Digital Sky Survey, [22]). A DDO 43-tól független objektumok, így a tőle északra és délre található csillagokat bár lefedi egy integrálérték, az kizárólag a galaxis HI-jéből származik.

A fő komponens esetén jól látható a három maximumérték a DDO 43 északi, északnyugati és déli részein. Viszonylag magas értékű kék oldali profilok láthatók a galaxis délnyugati részén, és több helyen elszórtan. A középpont közeli maximumértékeket leszámítva, a galaxis kék oldali része a galaxis déli fele, a vörös oldali profilok pedig a galaxis északi, északkeleti részén helyezkednek el.

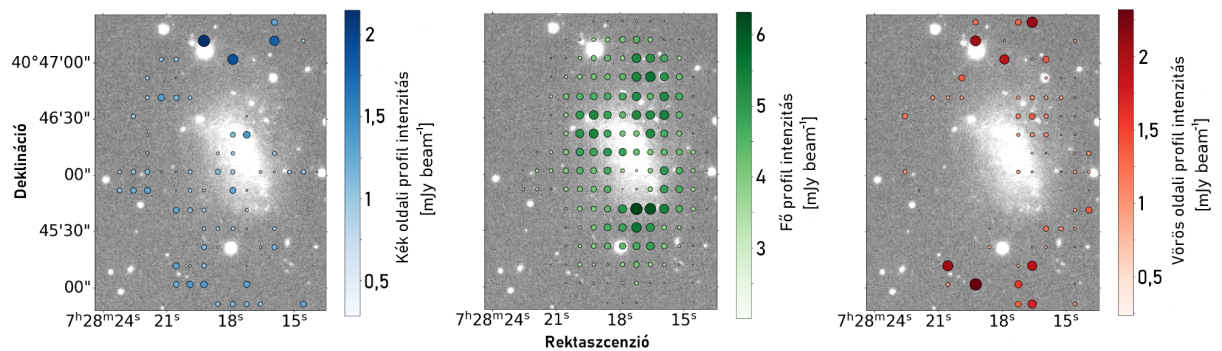
Vonalszélességek eloszlása



3.6. ábra. Sorban balról: kék oldali komponens, fő komponens és vörös oldali komponens vonalszélességeinek eloszlása a galaxis optikai képére helyezve. Az értékek rádiótartományú mérésből származnak, így a háttér a spektrumok pozíciójának érzékeltesét szolgálja a galaxis látható részéhez képest (Sloan Digital Sky Survey, [22]). A DDO 43-tól független objektumok, így a tőle északra és délre található csillagokat bár lefedi egy szélességérték, az kizárólag a galaxis HI-jéből származik.

A vonalszélességeket tekintve a fő komponens értékeiben szintén látható a vonal alatti területhez hasonló három maximum, azonban a galaxis látható tartományú területétől délnyugatra is látni magas értékeket. A kék oldali és vörös oldali profilok legmagasabb értékei szintén tükrözik a vonal alatti terület esetén is látható eloszlást.

Intenzitások eloszlása



3.7. ábra. Sorban balról: kék oldali komponens, fő komponens és vörös oldali komponens intenzitásértékeinek eloszlása a galaxis optikai képére helyezve. Az értékek rádiótartományú mérésből származnak, így a háttér a spektrumok pozíciójának érzékeltesét szolgálja a galaxis látható részéhez képest (Sloan Digital Sky Survey, [22]). A DDO 43-tól független objektumok, így a tőle északra és délre található csillagokat bár lefedi egy intenzitásérték, az kizárólag a galaxis HI-jéből származik.

Az intenzitás eloszlása a fő komponens esetén kirajzolja ugyanazt a három maximumot, amit a vonal alatti terület és a vonalszélesség eloszlása is, azonban az intenzitás a déli maximumnál nagyobb értéket vesz fel. A kék oldali és vörös oldali komponensek érdekessége, hogy a galaxis látható tartományú területétől távol vesznek fel nagyobb értékeket, a kék oldali komponens épp az északi oldalon annak ellenére, hogy ez alapvetően a déli oldalon dominál.

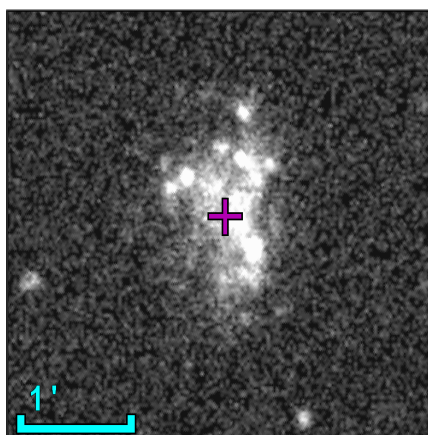
4. fejezet

Diszkusszió

Elmegreen és munkatársai [2], valamint Hunter és munkatársai [1] eredményei azt erősítik meg, hogy a csillagkeletkezésből származó turbulencia szerepe a molekulafelhők szétszaggatása [23], 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 3.2.4 alfejezetben részletezett eredményeket kaptam.

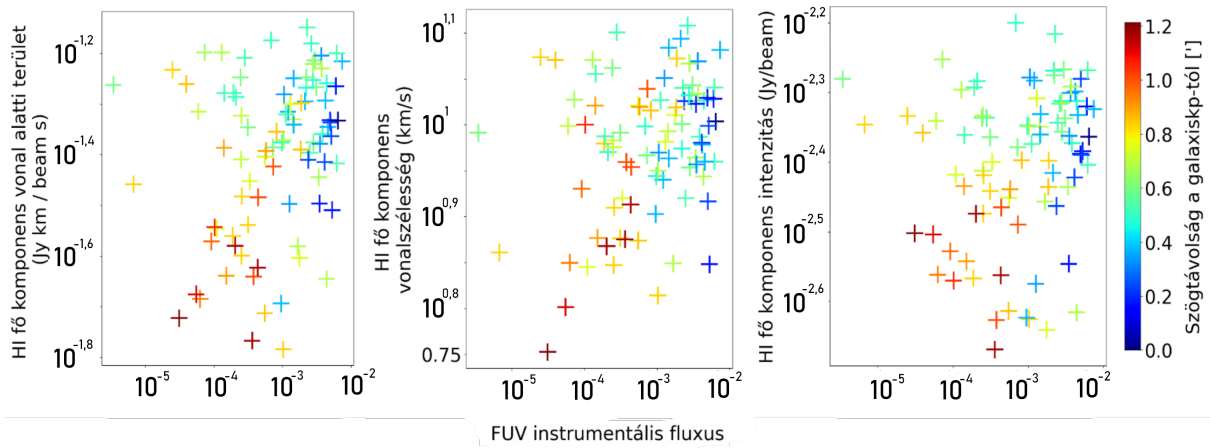
A három komponenses Gauss-illesztésből kapott paramétereket végül összehasonlítottam távoli-ultraibolya mérésekkel, amelyek a nagy tömegű csillagkeletkezési régiókat fedik fel.

A DDO 43 törpegalaxist a „Galaxy Evolution Explorer” (rövidítve GALEX, [24]) űrtávcső mérte távoli ultraibolya (továbbiakban FUV) tartományban [25].



4.1. ábra. A DDO 43 GALEX FUV felvétele [24]. A lila kereszt a galaxis középpontját jelöli (amely a spektrumok vizsgálatakor az offset 0 0 volt).

Az `astropy`¹ csomagot [26, 27, 28] használtam a spektrumok pozícióinak megfelelő koordináták beazonosításához a FUV képen. 5 pixeles sugárban átlagoltam a FUV intenzitást ezen koordináták körül: az 5 pixeles sugár adta terület felel meg annak a területnek, amelyben a spektrumok is átlagolva lettek, megfigyelve a felbontásbeli különbségnek a HI és a FUV kép között. Az átlagolt ultraibolya intenzitást összevettem a fő komponens három vonalprofil-paraméterével. Ez alapján a 4.2. ábrán látható kapcsolat található az ultraibolya sugárzás és a HI paraméterei között.



4.2. ábra. Sorban a HI fő komponensének vonal alatti területének, vonalszélességének és intenzitásának korrelációja a FUV fluxussal. A keresztek egy-egy spektrum pozícióját jelentik, színük jelzi a távolságukat a 4.1 ábrán lévő lila kereszttől. A Pearson-korrelációs együtthatók balról sorban: 0,39, 0,29, 0,38.

A vonal alatti terület, a félértékszélesség és az intenzitás gyenge korrelációt mutat a FUV fluxussal: a korrelációs együtthatójuk sorban 0,39, 0,29 és 0,38. A középponttól legalább egy ívpercre azonban látható erősebb lineáris korreláció. A középponthoz legközelebbi spektrumok mind a legmagasabb FUV fluxus értékeknél találhatók: a csillagkeletkezés valóban a galaxis hidrogénben leggazdagabb részén a legaktívabb, azonban a magas HI-értékek kaotikus eloszlása miatt a turbulens visszacsatolásra ebből nem tehető megállapítás. A kék és vörös oldali vonalszárnyak (külön ábrán nem szerepelnek) hasonló, vagy alacsonyabb együttható-értékeket mutatnak. A kék oldali komponensek sorrendben: 0,19 (von alatti terület), 0,37 (vonalszélesség), -0,19 (intenzitás); a vörös oldali komponensé pedig: 0,12 (von alatti terület), 0,37 (vonalszélesség), -0,29 (intenzitás). A vonalszélességek tehát úgyszintén gyenge korrelációt mutatnak, ellenben az intenzitások esetében már gyenge negatív korrelációt látunk.

¹<https://www.astropy.org>

Összességében egyformán gyenge korrelációt látunk a HI paraméterek és FUV fluxus között, ami új eredménynek számít: a korábbi kutatások [2, 1] által vizsgált adatok többségében nem korreláltak.

Megjegyzendő, hogy a csillagközi por általi elnyelés miatt nem biztos, hogy adott régióban teljes képet kapunk a csillagkeletkezésről. Emiatt következő lépésként érdemes lesz a HI paramétereket infravörös mérések adataival is összevetni - infravörös tartományban átlátunk ugyanis a poron. Ennek megfelelően a korreláció mértéke még tovább nőhet.

5. fejezet

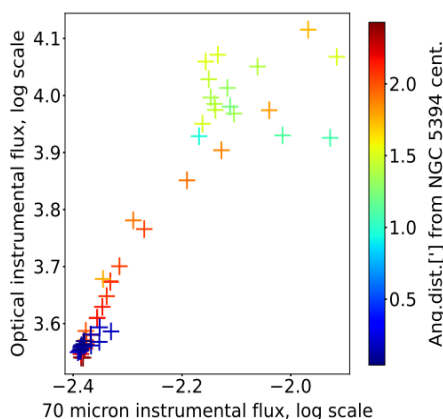
Összefoglalás és kitekintés

A dolgozatomban a DDO 43 törpegalaxisban mért semleges hidrogén színképvonalában kerestem vonalkiszélesedéseket. A LITTLE THINGS felmérés előre kalibrált adatait használtam fel. A nyers mérések egy részét tanulásképp én is feldolgoztam az AIPS programban.

A CLASS szoftverben választottam ki a galaxis területén található spektrumokat. Egy, kettő vagy három Gauss-görbe illesztésével a lehető legjobb illesztésre törekedtem, és az így elkülönített fő, illetve kék és vörös oldali komponensek eloszlását vizsgáltam meg.

Végül a GALEX távoli ultraibolya adatait összehasonlítottam az általam megállapított paraméterekkel, hogy megmutassam, látható-e korreláció a nagytömegű csillagkeletkező területek és a hidrogéngáz mozgása között. Az eredményem szerint gyenge korreláció fedezhető fel a HI vonal alatti terület, vonalszélesség és intenzitás FUV-adatokkal való kapcsolatában, ellentétben korábbi kutatásokkal, ahol az adatok nem korreláltak, vagy antikorreláltak.

Kitekintésként fontos megemlíteni, 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 [29], 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 [29, Fig. 8.].



5.1. ábra. [29, Fig. 8.] Az Arp 84 infravörös képen kiválasztott régiók kapcsolata a látható tartományú fluxussal. A korreláció jól látható, néhány ponttól eltekintve, amelyek a kisebb résztvevő középpontjától való elhelyezkedés szerint (amit a színskála is mutat) a kölcsönható régióban találhatóak. Ezek por által árnyékolt csillagkeletkezésre utalhatnak.

Az eredmény arra utalt, hogy a kölcsönható régióban vannak olyan területek, ahol csillagkeletkezés indulhatott be. A továbbiakban ezen galaxisok HI-mérései alapján, a dolgozatban leírt elemzést elvégezve képet kaphatunk arról is, hogy a kölcsönhatások vajon befolyásolják-e a csillagközi anyagot lokálisan olyan mértékben, hogy feltűnjön az adatokban a várt turbulenciátöbblet.

A dolgozatomban vizsgált téma eredményeiből két első szerzős publikációm is készült, amelyek jelenleg elbírálás alatt vannak. Az egyik a csehországi Integral/Bart Workshop¹ konferencián szerepelt poszterként, és a tavalyi dolgozatom témáját, illetve a kutatásom első lépését mutatja be, Gauss-komponensek helyett még csak a maradványspektrumok vizsgálatát, amelyek esetében szintén gyenge korrelációt látunk a FUV fluxussal. Az idei dolgozatomban bemutatott HI paraméterek eloszlásait pedig a 2024-es International Astronomical Union² konferencián is bemutathattam poszterrel, és az ebből készülő konferenciacikk is elbírálás alatt van jelenleg.

A kutatásom következő lépése a csillagkeletkezés infravörös tartományú mérések alapján történő vizsgálata lesz, a 4. fejezetben leírt módon. Ezt követően a DDO 43 forgását fogom megvizsgálni: a CLASS-ból kinyerhető sebességértékekből kirajzolható a rotációs görbét, a HI paramétereket pedig össze fogom vetni a 4. fejezetben bemutatott középponttól való távolság helyett a forgástengelytől való távolsággal is.

¹<https://ibws.cz/>

²<https://astronomy2024.org/>

Köszönetnyilvánítás

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

A. függelék: Saját eredmények

A tudományos kérdés, amelyet vizsgáltam:

- A csillagok által az őket körülvevő gázba táplált energia felelhet a csillagkeletkezés szabályozásáért a galaxisokban?

Alkalmazott módszerek:

- CLASS-szoftver: semleges hidrogén színképvonalak átlagolása a törpegalaxis területén és 1, 2 vagy 3 Gauss-görbe illesztése a színképvonalakra egy fő profil és a vonalszárnyak (amennyiben jelen voltak) elkülönítésére
- Az astropy csomag: a színképvonalak pozícióinak megfelelő koordináták meghatározása a galaxis FUV képén és az illesztésből nyert paraméterek (görbék vonal alatti területe, vonalszélessége és intenzitása) és a FUV fluxus Pearson-korrelációs együtthatójának kiszámítása

A kapott és bemutatott eredményeim:

- A semleges hidrogén spektrumvonalaiban fő profil és vonalszárnyak (külön kék és vörös oldali komponensek) megállapítása és ezek ábrákon való szemléltetése
- A fő profil és a vonalszárnyak paraméterei: vonal alatti területük, vonalszélességük és intenzitásuk értékei
- A paraméterek pozíció szerinti eloszlása a törpegalaxis területén, ezzel kirajzolva a vonalszárnyak jelenlétét és jelentőségüket
- A paraméterek értékeinek összehasonlítása nagy tömegű csillagkeletkezés nyomjelzőivel: gyenge korreláció fedezhető fel a HI vonal alatti terület, vonalszélesség és intenzitás FUV adatokkal való kapcsolatában, ellentétben korábbi kutatásokkal, ahol az adatok nem korreláltak, vagy antikorreláltak

Irodalomjegyzék

- [1] 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>.
- [2] 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>.
- [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] 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>.
- [6] 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>.
- [7] *Very Large Array Telescope*. <https://public.nrao.edu/telescopes/VLA/>. [Utolsó megtekintés: 2024. 05. 21.]
- [8] *Very Large Array resolution*. <https://science.nrao.edu/facilities/vla/docs/manuals/oss/performance/resolution>. [Utolsó megtekintés: 2024. 05. 21.]

- [9] Igor D. Karachentsev és tsai. „A Catalog of Neighboring Galaxies”. *The Astronomical Journal* 127.4 (2004), 2031. old. DOI: 10.1086/382905. URL: <https://dx.doi.org/10.1086/382905>.
- [10] 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>.
- [11] Deidre A. Hunter és Bruce G. Elmegreen. „Star Formation Properties of a Large Sample of Irregular Galaxies”. *The Astronomical Journal* 128.5 (2004), 2170. old. DOI: 10.1086/424615. URL: <https://dx.doi.org/10.1086/424615>.
- [12] Subramanian, Smitha, Mondal, Chayan és Kalari, Venu. „Effect of low-mass galaxy interactions on their star formation”. *AA* 681 (2024), A8. DOI: 10.1051/0004-6361/202346536. URL: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202346536>.
- [13] K. C. Chambers és tsai. *The Pan-STARRS1 Surveys*. 2019. arXiv: 1612.05560 [astro-ph.IM]. URL: <https://arxiv.org/abs/1612.05560>.
- [14] H. A. Flewelling és tsai. „The Pan-STARRS1 Database and Data Products”. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 251.1 (2020. okt.), 7. old. ISSN: 1538-4365. DOI: 10.3847/1538-4365/abb82d. URL: <http://dx.doi.org/10.3847/1538-4365/abb82d>.
- [15] *National Radio Astronomy Observatory Archive*. <https://data.nrao.edu/portal/>. [Utolsó megtekintés: 2024. 05. 21.]
- [16] E. W. Greisen. „The Astronomical Image Processing System”. *Seminar on Acquisition, Processing and Archiving of Astronomical Images*, p. 125 - 142 (1990).
- [17] *LITTLE THINGS AIPS CALIBRATION Recipe*. https://science.nrao.edu/science/surveys/littlethings/data/recipe_calibration_public.txt. [Utolsó megtekintés: 2024. 05. 21.]
- [18] *LITTLE THINGS AIPS MAPPING Recipe*. https://science.nrao.edu/science/surveys/littlethings/data/recipe_mapping_public.txt. [Utolsó megtekintés: 2024. 05. 21.]
- [19] *List of VLA Calibrators*. <https://science.nrao.edu/facilities/vla/observing/callist>. [Utolsó megtekintés: 2024. 05. 21.]

- [20] *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.]
- [21] *GILDAS Home Page*. <http://www.iram.fr/IRAMFR/GILDAS>. [Utolsó megtekintés: 2024. 05. 21.]
- [22] A. Baillard és tsai. „The FIGI catalogue of 4458 nearby galaxies with detailed morphology”. *Astronomy & Astrophysics* 532 (2011. júl.), A74. ISSN: 1432-0746. DOI: 10.1051/0004-6361/201016423. URL: <http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201016423>.
- [23] 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>.
- [24] D. Christopher Martin és tsai. „The Galaxy Evolution Explorer: A Space Ultraviolet Survey Mission”. *The Astrophysical Journal* 619.1 (2005), L1. old. DOI: 10.1086/426387. URL: <https://dx.doi.org/10.1086/426387>.
- [25] Deidre A. Hunter, Bruce G. Elmegreen és Bonnie C. Ludka. „GALEX ULTRAVIOLET IMAGING OF DWARF GALAXIES AND STAR FORMATION RATES*”. *The Astronomical Journal* 139.2 (2010), 447. old. DOI: 10.1088/0004-6256/139/2/447. URL: <https://dx.doi.org/10.1088/0004-6256/139/2/447>.
- [26] Astropy Collaboration és tsai. „Astropy: A community Python package for astronomy”. 558, A33 (2013. okt.), A33. DOI: 10.1051/0004-6361/201322068. arXiv: 1307.6212 [astro-ph.IM].
- [27] Astropy Collaboration és tsai. „The Astropy Project: Building an Open-science Project and Status of the v2.0 Core Package”. 156.3, 123 (2018. szept.), 123. old. DOI: 10.3847/1538-3881/aabc4f. arXiv: 1801.02634 [astro-ph.IM].
- [28] Astropy Collaboration és tsai. „The Astropy Project: Sustaining and Growing a Community-oriented Open-source Project and the Latest Major Release (v5.0) of the Core Package”. 935.2, 167 (2022. aug.), 167. old. DOI: 10.3847/1538-4357/ac7c74. arXiv: 2206.14220 [astro-ph.IM].

- [29] 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>.