



Csillagközi felhők szerkezetének és polarizációs mintázatának összehasonlító elemzése

Készítette:

Varga Nóra – ELTE TTK III. Földtudományi szak

Témavezetők:

Dr. Tóth L. Viktor, Joó András Péter

Tartalomjegyzék:

Összefoglalás.....	3
1. Bevezetés.....	4
2. Molekulafelhők és a polarizáció fizikai háttere	4
2.1 Csillagközi molekulafelhők.....	4
2.2 Polarizációs jelenségek és azok fizikai alapjai	5
2.3 Vizsgált molekulafelhők	7
3. Felhasznált adatok, mérések.....	8
3.1 Planck mérések.....	8
3.2 Herschel mérések.....	9
4. Mérések feldolgozása, módszerek.....	9
4.1 Használt módszer - Histogram of Relative Orientation (HRO)	9
4.2 Adatok feldolgozása	10
4.2.1 Gradiens vektorok kiszámítása és ábrázolása	10
4.2.2 Mágneses térvektorok kiszámítása polarizációs adatokból	13
4.2.3 Histogram of Relative Orientations (HRO)	17
4.3 Korrigálások	18
5. Eredmények.....	18
5.1 Sűrűséggradiens vektorok.....	18
5.2 Mágneses tér vektorok.....	19
5.3 Histogram of Relative Orientations eredmények	21
5.4 Mágneses vektorok irányultsága a felhőkön belül - kívül.....	25
6. Diskusszió.....	26
7. Jövőbeli munkák	27
Köszönetnyilvánítás	28
Referenciák.....	29
Függelék	31

Összefoglalás

A mágneses mezők meghatározó szerepet játszanak a csillagkeletkezési folyamatok minden léptékében. Tulajdonságaik - ideértve az erősséget és térbeli orientációt - pontos, részletes meghatározása elengedhetetlen ahhoz, hogy a molekulafelhők, csillagmagok és protoplanetáris korongok fizikai jellemzőit részletesen megérthessük.

Soler és Hennebelle ([2017](#)) általános képet nyújtottak arról, hogyan alakul a sűrűséggradiens és a mágneses tér relatív orientációja turbulens molekulafelhőkben. Vizsgálataik szerint a két mennyiség közötti kapcsolat előnyösen párhuzamos vagy merőleges, attól függően, hogy milyen oszlopsűrűségű tartományban történik a megfigyelés.

Munkám célja a mágneses tér és a molekulafelhők szerkezete közötti kapcsolat feltárása volt, két jól ismert molekulafelhő, a Heiles Cloud 1 (LDN 1251) és a Heiles Cloud 2 (HCL 2) molekulafelhő példáján keresztül. A vizsgálat során arra kerestem a választ, hogy milyen módon határozza meg a mágneses tér a felhők szerkezetét és dinamizmusát, illetve hogyan befolyásolja a mágneses tér orientációja a gáz- és porstruktúrák kialakulását, különösen a sűrűbb régiókban.

A kutatás központi módszere a Relatív Orientáció Hisztogram (Histogram of Relative Orientations - HRO) elemzés volt, amely a polarizációs vektorok és az oszlopsűrűség gradiensének relatív szögeit vizsgálja. Ez a módszer lehetővé teszi a mágneses tér és a gázszerkezetek irányultságának összehasonlítását. Az orientációk statisztikai vizsgálata kulcsfontosságú annak megértésében, hogy a mágneses tér irányítja-e a gázt az alacsony sűrűségű régiókban, és hogy hogyan áll ellen a mágneses tér a gravitációs összeomlásnak a nagyobb sűrűségű régiókban. Az ilyen vizsgálatok segítenek feltárni a molekulafelhők dinamikáját és morfológiáját, beleértve a felhőszálak és csillagmagok kialakulását.

Az elemzés során összehasonlítottam a két vizsgálat eredményeit mindkét megfigyelt terület esetén.

1. Bevezetés

A mágneses hatásokat tekintik az molekulafelhők csillagkeletkezési folyamatának dinamikáját befolyásoló egyik kulcsfontosságú tényezőnek, a turbulenciával és a gázgravitációval kombinálva, minden fizikai léptékben és a különböző evolúciós szakaszokban (McKee és Ostriker [2007](#)). Ezért a mágneses mezők különböző léptékű sajátos szerepeinek megértése kulcsfontosságú és erősen vitatott téma a csillagkeletkezés tanulmányozásában.

A csillagkeletkezés a hosszúkás felhőszálakban zajlik, melyek a molekulafelhők sűrű, elnyúlt struktúráiként jellemezhetők, jellemző méretarányuk pedig nagyobb, mint $\sim 5-10$ (André és mtsai. [2014](#)), vagyis a struktúra legalább 5-10-szer hosszabb, mint amilyen széles. Ezen struktúrák kialakulását a mágneses tér is befolyásolhatja, ezért fontos a mágneses tér irányultságának a vizsgálata molekulafelhőkben a csillagkeletkezési folyamatok kapcsán, mivel jelenleg sem egyértelmű a mágneses mezők szerepe a csillagközi anyag fejlődésében, a felhőszálak és a hozzájuk kapcsolódó fiatal csillagok kialakulási folyamatában (Hennebelle és Falgarone [2012](#); Gómez és mtsai. [2018](#)).

Számos kutatás irányult annak megértésére, hogy a mágneses mezők milyen szerepet töltenek be a csillagkeletkezés különböző léptékein. Az ilyen kutatások célja a mágneses mezők hatásának feltárása a csillagok kialakulásában, a gáztömegek összeroskadásától kezdve a protostelláris korongok fejlődéséig. E célból átfogó megfigyelési programokat indítottak. Ilyen például a Planck műhold teljes égboltra kiterjedő felmérése (Planck Collaboration XXXV, [2016](#)) lehetővé tette a csillagközi porpolarizáció globális vizsgálatát, míg a Balloon-borne Large Aperture Submillimeter Telescope for Polarimetry (Fissel és mtsai. [2016](#)) közepes skálájú, szubmilliméteres felméréseket végzett, amelyek révén részletesebb képet kaphatunk a csillagképződés magnetikus folyamatairól.

Továbbá az olyan nagy teljesítményű obszervatóriumok, mint az Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array (ALMA), a Submillimeter Array (SMA), és a James Clerk Maxwell Telescope (JCMT), sikeresen térképezték fel a csillagképződés kisebb léptékű régióit nagy felbontással. Ezek a megfigyelések betekintést nyújtanak a sűrű felhőszálak szerkezetébe, csillagkeletkezési csomók dinamikájába, valamint a protostelláris burkok és korongok fejlődésébe. Számos tanulmány támasztja alá ezeket az eredményeket (pl. Crutcher és mtsai [2004](#), Chapman és mtsai [2013](#)).

Mindezek ellenére továbbra is kihívást jelent annak meghatározása, hogy a mágneses mezők dinamikai jelentősége hogyan változik a különböző fizikai léptékeken. Az egyik fő akadály az, hogy a polarizációs mérések önmagukban nem nyújtanak közvetlen információt a mágneses mezők tényleges térerősségéről. Ezért további elméleti modellezésre és új, innovatív megfigyelési technikák kidolgozására van szükség ahhoz, hogy pontosabb képet kapjunk a mágneses mezők szerepéről a csillagkeletkezés összetett folyamatában.

2. Molekulafelhők és a polarizáció fizikai háttere

2.1 Csillagközi molekulafelhők

A „felhő” kifejezést a csillagközi anyagban található olyan szerkezetekre használjuk, amelyeket valamilyen fizikai vagy kémiai tulajdonságban bekövetkező éles változás különít el a környezetüktől. Ezek a tulajdonságok lehetnek például a nyomás, a sűrűség és/vagy az ionizáltság. Az ilyen felhők összetett és hierarchikus szerkezettel bírnak, amelyeken belül az

anyag eloszlása és mozgása jelentős változatosságot mutat. A molekulafelhők a csillagközi anyag hideg (csillagkeletkezési folyamatok hiányában ~ 10 K kinetikus hőmérsékletű), sűrű ($n(\text{H}_2) > 100 \text{ cm}^{-3}$) részét képviselik (lásd például R. C. Kennicutt & N. J. Evans [2012](#)).

A hosszú és jól körülhatárolható felhőszálak jelenléte már több mint egy évszázaddal ezelőtt felkeltette a kutatók figyelmét, amelyet Barnard ([1907](#)) is kiemelt. Számos molekulafelhőben megfigyelhető, hogy bizonyos felhőszálak hossza összemérhető a felhő teljes kiterjedésével. A felhőszálak térbeli kiterjedésének és koherens sebességszerkezetének vizsgálatára irányuló megfigyelésekből arra lehet következtetni, hogy ezek a struktúrák alapvetően a felhő keletkezési folyamatának eredményei, nem pedig későbbi, például csillagkeletkezés által indukált dinamikai hatások következményei. Ezek alapján valószínűsíthető, hogy a sötét felhők már keletkezésükkor filamentáris anyageloszlással rendelkeznek, amely több parszekes távolságokat ölelhet fel. A felhők fejlődése és a bennük zajló csillagkeletkezés során a keletkező csillagok és csillagközi anyagörvények öröklik a felhőszálak kezdeti, strukturált elrendeződését (Hartmann [2002](#)).

Az elméleti kutatók a felhők belső szerkezetének vizsgálata során két alapvető építőelemet azonosítottak. Az egyik a „csomók” (clumps), amelyek a csillaghalmazok, azaz a csillagok csoportjainak születési helyei. Ezek a struktúrák nagyobb méretűek és több anyagot tartalmaznak, amely lehetővé teszi, hogy egyszerre több csillag keletkezzen bennük. A másik szerkezeti egység a „magok” (cores), amelyek kisebb méretűek és kompaktabbak, és általában egy-egy egyedi vagy kettős csillag keletkezésének helyszínei.

Ez a szerkezet jól illusztrálja a csillagképződés folyamatának komplexitását. A „csomók” a nagyobb méretarányú folyamatokat tükrözik, mint például a gáz összehúzódása és fragmentációja, míg a „magok” a lokális, finomabb dinamikai folyamatokat, például a protocsillagok kialakulását képviselik. Ezek a fogalmak számos megfigyelési és elméleti tanulmány középpontjában állnak (pl. McKee & Ostriker [2007](#); Bergin & Tafalla [2007](#); Ward-Thompson és mtsai. [2007a](#)), és alapvető jelentőségűek az intersztelláris közeg és a csillagképződés mélyebb megértésében.

Azokon a hullámhosszokon, ahol az erős, diffúz galaktikus háttérsugárzás dominál, például a közép-infravörös tartományban, a por abszorpcióját a kontinuum sugárzással szemben felhasználhatjuk a felhők szerkezetének vizsgálatára. Ez a módszer hasonló az elnyelési térképek készítéséhez, és alkalmas a sűrűbb, kompakt régiók tanulmányozására. A por által elnyelt sugárzás a háttérsugárzástól való kontrasztként jelenik meg, ezáltal segít azonosítani ezeket a struktúrákat. Példák erre a módszertanra Bacmann és munkatársai ([2000](#)) és Stutz és munkatársai ([2007](#)) munkái, amelyek kimutatták, hogy a közép-infravörös abszorpciós technikák segítségével részletes képet lehet alkotni a felhők és magok belső szerkezetéről.

A por által rövid hullámhosszokon elnyelt energia a hosszabb hullámhosszokon, az infravöröstől egészen a milliméteres tartományig sugárzódik ki. Így ez a hullámhosszú kontinuum sugárzás által tanulmányozott régiók sugárzás intenzitása és eloszlása információt nyújt az oszlopsűrűségről és a teljes tömegről, feltéve, hogy ismerjük a por opacitását ezen a hullámhosszon és lehetővé teszi többek között a szálas szerkezetek tanulmányozását.

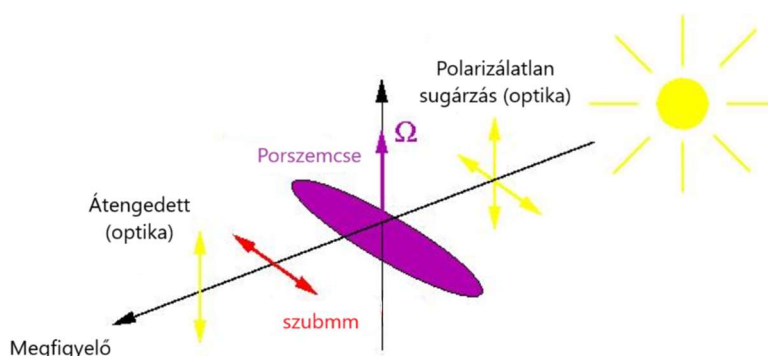
2.2 Polarizációs jelenségek és azok fizikai alapjai

A mágneses tér jelenléte az asztrofizikai léptékek széles skáláján megfigyelhető. Ez kiterjed az egész galaxisra, az óriás molekulafelhőkre (Beck és mtsai. [1996](#); Beck [2001](#)), kisebb méretű molekulafelhőkre, ahol kis tömegű csillagok keletkeznek, valamint protocsillag korongokra

(Wolf és mtsai. [2004](#)). Ezen túlmenően a csillagkörüli korongokban is meghatározó szerepük van, ahol irányítják a kiáramlásokat, a jeteket és az anyag behullását a központi csillagba (Banerjee és mtsai. [2007](#); Suzuki & Inutsuka [2009](#)). A mágneses mezők kiemelkedően fontos szerepet játszanak a csillagkeletkezés folyamatában (Galli [2009](#)). Befolyásolhatják az összehúzódás időskáláját, a gáz és a por közötti kölcsönhatásokat, és a fragmentálódás következtében kialakult szerkezetet.

A mágneses tér vezérli-e az anyag áramlását, ahogy az erős mágneses tér és magasabb ionizáltság esetén várható, vagy inkább a mágneses tér sodródik az áramlással, mint ahogy az gyenge mágneses tér esetén történne (Li és mtsai. [2014](#))? A válaszadáshoz többek közt részletesen meg kell vizsgálni a mágneses tér orientációját a sűrű struktúrákhoz, felhőszálakhoz viszonyítva.

A molekulafelhők mágneses terének vizsgálatára az egyik legalkalmasabb módszer a polarizált emisszió vizsgálata távoli infravörös és milliméteres hullámhossz tartományon (Hildebrand és mtsai. [2000](#)). Ezek a megfigyelések lehetővé teszik a mágneses tér mentén orientálódott porszemcsék hősugárzásának detektálását, ezzel információt adva a mágneses tér eloszlásáról és irányáról. A molekulafelhők nagyléptékű, diffúz régióiban a lineáris polarizáció legfőbb forrása a sugárzási nyomaték igazodás (radiative torque alignment). Ez a mechanizmus azon alapul, hogy a csillagközi térben található porszemcsék nem gömb alakúak, hanem enyhén elnyúltak, forognak, felületükön elektromos töltésekkel és forgástengelyeik részben igazodnak a környező mágneses tér irányához. A relaxációs folyamatok a szemcséket a legalacsonyabb energiájú forgási állapot felé irányítja. Ebben az állapotban a forgó, elnyúlt porszemcse leghosszabb tengelyére merőleges fő forgástengelye a mágneses tér irányába áll be (Lazarian & Hoang, [2008](#)). Ez a szub-mm-es tartományban lineáris polarizációt eredményez.



1. ábra: Forgó elnyúlt porszemcse polarizációs hatása. A látható fény a forgástengellyel párhuzamos lineáris polarizációjú lesz (sárga), míg a porszemcsék szub-mm-es sugárzásának lineáris polarizációja arra merőleges (piros). (Forrás: *A Tejútrendszer szerkezete* egyetemi jegyzet - Tóth L. Viktor)

A portól származó részleges lineáris polarizáció nem ad közvetlen becslést a B-térerősségről, mivel ez számos további ismeretlentől függ (pl. a szemcseigazítás hatékonysága, a szemcse alakja és összetétele). A térerősség mértéke azonban származtatható különböző módszerekből. A polarizáció jelenségét már az 1950-es években leírták (Davis & Greenstein [1951](#)), és azóta is az egyik legfontosabb módszer a mágneses tér szerkezetének vizsgálatára. Ez az eljárás különösen azért jelentős, mert nem csak a mágneses tér relatív irányultságának vizsgálatában nyújt segítséget, hanem lehetőséget ad arra is, hogy statisztikai elemzésekkel a tér nagyléptékű

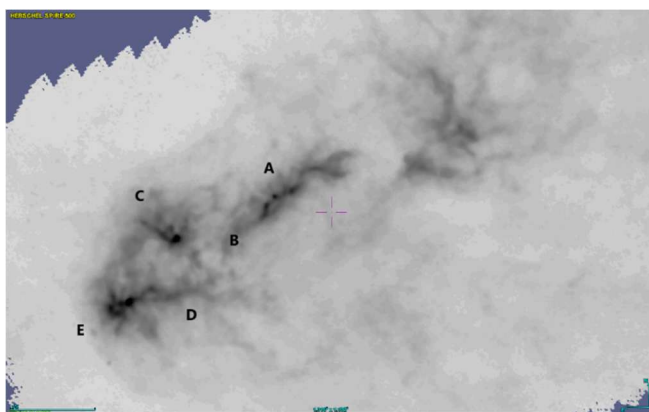
szerkezetére következtethessünk. Így a polarizációs mérések nemcsak a sűrű magok, hanem a teljes molekulafelhők mágneses morfológiáját is feltárják, hozzájárulva a felhő fejlődésének és dinamikájának jobb megértéséhez.

A polarizált emissziót kihasználva számos statisztikai elemzési módszert fejlesztettek ki, hogy a mágneses tér tulajdonságairól részletes információkat nyerjenek a csillagkeletkezési régiókban. A mágneses térerősség és egyéb paraméterek meghatározására szolgáló technikák közé tartozik például a Davis–Chandrasekhar–Fermi (DCF) módszer (Davis [1951](#); Chandrasekhar & Fermi [1953](#)). Ez a technika a polarizációs szögeltérések statisztikai elemzésén alapul, amelyekből a mágneses tér erőssége és turbulenciája is becsülhető. Ezen kívül elterjedt módszer továbbá a Soler és munkatársai ([2013](#)) által kidolgozott módszer, a relatív orientációk elemzése hisztogram segítségével (Histogram of Relative Orientations - HRO), amelyek segítségével az egyes felhőszálak és a mágneses tér irányainak relatív eloszlása vizsgálható.

2.3 Vizsgált molekulafelhők

A két általam vizsgált felhő a Heiles Cloud 1 és Heiles Cloud 2 (Heiles és mtsai [1968](#)).

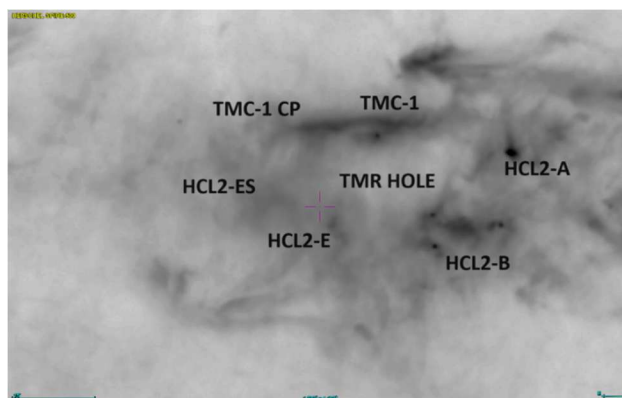
A Heiles Cloud 1, vagy ismertebb néven LDN 1251 (Lynds [1962](#)) egy megnyúlt, hosszúkás felhő, figyelemre méltó üstökös morfológiával, amelyről úgy gondolják, hogy egy szupernóva-buborékkal való kölcsönhatás következtében jött létre (Grenier és mtsai [1989](#)). A kelet-nyugati megnyúlási irányú molekulafelhő a Cepheus Flare óriás molekulafelhő határán (Kiss és mtsai [2006](#), Szilagyi és mtsai [2021](#)) található. A felhőben több sűrű csomó (Toth és mtsai [1996](#)) és számos fiatal csillag található (Pasztor és mtsai [1993](#), Kun és mtsai [1993](#)). Ezek különösen az L1251E régióba ágyazott fiatal csillagok egy kis csoportja, az L1251B (Sato és mtsai. [1994](#), Lee és mtsai. [2007](#)). L1251-ban három fényesebb régió található; a keleti L1251A, a középső az L1251C és a nyugati L1251E (Sato és mtsai. [1994](#)), amelyeket felhőszálak hálózata vesz körül.



2. ábra: Az LDN 1251 felhő struktúrája Herschel 500 μm -es infravörös intenzitás térképén, elnevezések Sato és mtsai. [1994](#) alapján. (Aladin Sky Atlas felhasználásával)

A Heiles Cloud 2 (HCL 2) a Taurus molekulafelhő-komplexum nagy felhője. Néha TMC-1 néven is említik, bár a TMC-1 csak egy része az egész felhőnek. Ez a régió négy fő felhőre osztható: (1) TMC-1, (2) HCL2-A, (3) HCL2-B, és (4) HCL2-E, valamint HCL2-ES. (Toth és mtsai [2004](#)). A Taurus molekulafelhő körülbelül 140 pc távolságban helyezkedik el (Elias, 1978), vagy még közelebb, 126 pc-re (lásd: Hartigan & Kenyon, [2003](#)).

A HCL 2 egy felhőkomplexumba ágyazódik, ahol a mágneses tér mintázata valószínűleg ütköző HI áramlások eredménye lehet (Ballesteros-Paredes és mtsai. [1999](#)).



3. ábra: A HCL 2 és fő részei a Herschel 500 µm-es infravörös intenzitás térképén. Elnevezések Toth és mtsai [2004](#) alapján. (Aladin Sky Atlas felhasználásával)

A Taurus molekulafelhő-komplexum már régóta kiemelt célpontja a csillagközi mágneses tér és annak a molekuláris gázdinamikában játszott szerepének vizsgálataiban (Moneti és mtsai. [1984](#); Heyer és mtsai. [1987](#); Troland és mtsai. [1996](#)).

Ezek közül számos tanulmány összehasonlította a gáz és por eloszlását a mágneses tér geometriájával, amelyet a háttércsillagok optikai polarizációs mérései alapján határoztak meg. A felhő geometriai elrendezése és a mágneses tér morfológiája közötti kapcsolat kulcsfontosságú azokban a modellekben, amelyek a Taurus molekulafelhő kialakulását próbálják magyarázni (Gomez de Castro & Pudritz [1992](#); Ballesteros-Paredes és mtsai. [1999](#)).

3. Felhasznált adatok, mérések

3.1 Planck mérések

A Planck űrtávcső feltérképezte az egész égboltot mikrohullámú tartományban 9 frekvenciasávban: 30 GHz-től 857 GHz-ig, így 353 GHz-es frekvenciatartományon is végzett méréseket. Ez a teljeskörűség különösen fontos a mágneses tér nagyléptékű szerkezetének feltárásához a Tejútrendszerben, és lehetővé teszi a polarizációs jelenségek kozmikus kontextusban történő értelmezését. Ez a frekvencia érzékeny a szubmilliméteres hullámhosszon sugárzó porrészecskékre, mivel pontosan ott helyezkedik el, ahol a molekulafelhőkben található hideg (10-40 K) csillagközi por által kibocsátott termikus sugárzás maximuma található, ezért alkalmas porpolarizációs megfigyelésekre is. Így a 353 GHz-en készült, nagyjából 5' térbeli felbontású teljes égbolttérkép nem csak a porpolarizáció által hordozott információkat, hanem a mágneses tér részleteit is feltárták (Planck Collaboration XIX [2015](#)).

A 353 GHz-en mért porkibocsátási opacitás növekedését észlelték a diffúz csillagközi anyag és a sűrűbb csillagközi közegek között. Ez a növekedés összefüggésbe hozható a megfigyelt porkibocsátási hőmérséklet csökkenésével, amely részben a megnövekedett porkibocsátási opacitás következménye lehet (Planck Collaboration XI [2013](#)). Ebben az esetben a megfigyelt polarizációs mintázat a látóvonal mentén integrált mágneses tér irányának sűrűség súlyozott átlagát tükrözi. Ez az orientáció tehát a mágneses tér háromdimenziós szerkezetének egy

kivetített, átlagolt képe, amely az adott vonal mentén található por eloszlásától és fizikai tulajdonságaitól is függ. Ez a megfigyelés a csillagközi tér mágneses terének tanulmányozásában játszik kulcsszerepet. A termikus porkibocsátás polarizációja ugyanis közvetlen kapcsolatban áll a poralakzatok és a mágneses tér irányával.

A későbbiekben részletezett általam felhasznált adatokat az [IRSA Planck](#) adatbázisból töltöttem le. Majd az újra feldolgozott, zajtalanított fájlokból - amit a Galactic Cold Cores csoport biztosított - vágtam ki az általam vizsgált területeket tartalmazó részeket.

3.2 Herschel mérések

A Herschel űrtávcső két képalkotó kamerával van felszerelve: a PACS (Photodetector Array Camera and Spectrometer, Poglitsch és mtsai. [2010](#)) és a SPIRE (Spectral and Photometric Imaging Receiver, Griffin és mtsai. [2010](#)). A Herschel-t úgy tervezték, hogy távoli infravörös (PACS) és szubmilliméteres (SPIRE) tartományban végezzen megfigyeléseket.

A PACS és a SPIRE is bolométerekkel van felszerelve, amelyek rendkívül érzékeny hőmérséklet-érzékelők, és a hőmérséklet kis változásaiból eredő ellenállásváltozásokat mérik, amelyeket a beeső sugárzás vált ki (Rohlfs & Wilson [2004](#)). A PACS képalkotó egyszerre képes megfigyelni 70 μm -es vagy 100 μm -es, illetve 160 μm -es hullámhosszon. Ezzel szemben a SPIRE képalkotó egyszerre tud megfigyelni 250 μm -es, 350 μm -es és 500 μm -es hullámhosszon. A Föld légkörében található vízgőz miatt ezek a hullámhosszak csak korlátozottan érhetők el a felszínen a légkör hatásai miatt. Ezért a PACS és SPIRE sávok által lefedett 70–500 μm -es hullámhossztartomány csak az űrben tanulmányozható megfelelően.

A Herschel megfigyelései 8'' (70 μm -en) és 36'' (500 μm -en) közötti szögfelbontást érnek el. Ezek az értékek összehasonlíthatók a SCUBA $\sim 14''$ szögfelbontásával 850 μm -en, és messze felülmúlják a legtöbb 120'' szögfelbontású elnyelési térképét. A viszonylag nagy tükörrel a SPIRE és PACS műszerek kiváló érzékenységgel és szögfelbontással rendelkeznek.

A felhő szerkezetét bemutató Herschel 500 μm -es intenzitástérképeket az Aladin Sky Atlas adatvizualizációs és -elemző szoftver szolgáltatott a vizsgált területekre.

4. Mérések feldolgozása, módszerek

4.1 Használt módszer - Histogram of Relative Orientation (HRO)

A mágneses tér és a sűrűségeloszlás kölcsönhatása fontos információt ad arról, hogy a mágneses mezők milyen mértékben irányítják vagy gátolják a gravitációs összeomlást. Az elforgatott gradiens vektorok elemzése lehetővé teszi annak meghatározását, hogy a mágneses térvonalak párhuzamosak vagy merőlegesek a felhő szerkezetére, ami segíthet megkülönböztetni a gyenge és erős mágneses mező által dominált dinamikai rendszereket. Ennek vizsgálatára tanulmányozhatjuk a mágneses tér és a sűrűség szerkezetek relatív orientációját.

Ennek elemzésére Soler és munkatársai ([2013](#)) által kidolgozott relatív orientáció (HRO) módszere eredetileg háromdimenziós magnetohidrodinamikai (MHD) szimulációk szintetikus megfigyeléseinek elemzésére volt kifejlesztve, amellyel a gáz szerkezetét lehet jellemezni a mágneses tér morfológiájának viszonylatában. A módszer a polarizációs vektorok lokális irányának és az oszlopsűrűség gradiensének szögeit számítja ki, lehetővé téve a mágneses tér orientációjának és a gáz szerkezetek irányultságának összehasonlítását a kétdimenziós megfigyelések során.

Ez az elemzési technika különösen hatékonynak bizonyult, amikor 10 közeli ($d < 450$ pc) molekulafelhő Planck-adatainak egy részhalmazát vizsgálták.

Ez a megfigyelés fontos betekintést nyújtott a mágneses tér és a molekuláris felhők szerkezetének kölcsönhatásaiba, valamint abba, hogy hogyan változik ezek kapcsolata a különböző sűrűségű gázfázisokban. Feltérképezhető, hogy a mágneses tér hogyan alakítja a filamentáris szerkezeteket, és hogyan irányítja a gázáramlást a csillagkeletkezési régiókban. Az eredmények nemcsak a felhők belső dinamikájának megértéséhez járulhatnak hozzá, hanem a csillagkeletkezés hatékonyságának és a turbulencia csillapításának mechanizmusait is pontosabban feltárhatják.

A vizsgálatok során én is az előbb említett módszert alkalmaztam az általam tanulmányozott molekulafelhők mágneses terének elemzésében. Ezt követően összehasonlító vizsgálatot végeztem a molekulafelhők morfológiájának és résztulajdonságainak (pl. magok és felhőszálak geometriája) jobb megértése érdekében. Mivel a morfológiát befolyásolja a mágneses tér erőssége és relatív orientációja is (Crutcher [2012](#)), megvizsgáltam a mágneses tér vektorok és az intenzitás gradiensek vektorai közötti összefüggéseket két molekulafelhő esetében.

4.2 Adatok feldolgozása

4.2.1 Gradiens vektorok kiszámítása és ábrázolása

A gradiens segít azon területek azonosításában a molekulafelhőkben, ahol az intenzitás gyorsan változik, ami élekre, határookra, például felhőszálakra utalhat a térképen.

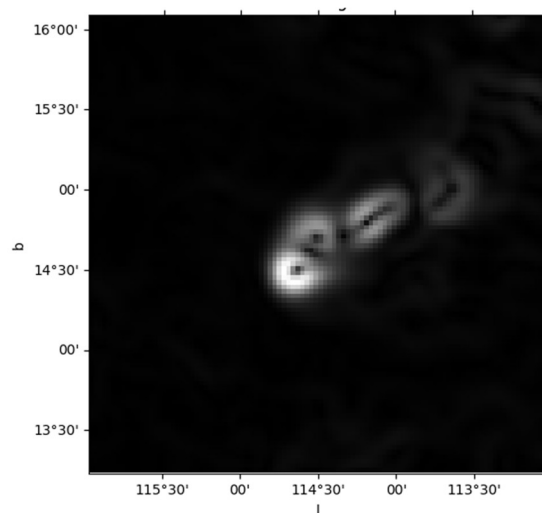
Az intenzitás változása vizsgálatának érdekében, az általam írt kódot a sűrűség (n) adott helyen helyen történő változásának számításával kezdtem, az alábbi egyenletek segítségével:

$$\frac{\partial n}{\partial x} = \frac{n(x+1, y) - n(x-1, y)}{2} \quad (1)$$

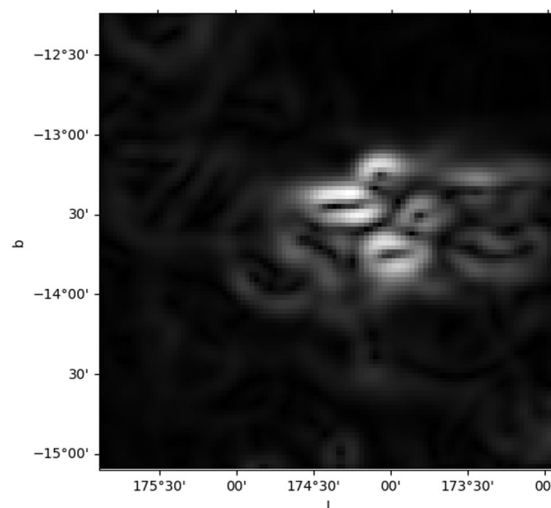
$$\frac{\partial n}{\partial y} = \frac{n(x, y+1) - n(x, y-1)}{2} \quad (2)$$

Ez a módszer a központi különbségek módszerét alkalmazza a gradiens közelítésére, amely azt jelenti, hogy a sűrűség változását egy adott irányban úgy határoztam meg, hogy kiszámítottam a sűrűség értékei közötti különbséget egy adott pont két szomszédos helyén (egyik oldalon és a másik oldalon), majd ezt a különbséget elosztottam kettővel, hogy az érték átlagát kapjam. Ez a módszer diszkrét rácsokon használható, és a változás mértékét a közvetlen szomszédok alapján közelíti. A kapott eredmény a gradiens adott irányú komponensét adja meg, amely másik irányban is hasonló módon meghatározható a teljes gradiensvektor kiszámításához. Ebben a munkában a gradiens kiszámítására a Sobel operátort használtam, amely egy diszkrét differencia operátor, és az adott kép intenzitásainak változását méri a szomszédos pixelek között.

Az így kapott intenzitástérképeken a világos területek azok a helyek, ahol a gradiens intenzitása gyorsan változik. Ezek a helyek jellemzően élek, átmenetek vagy struktúrák, például sűrűbb anyageloszlások határai. A sötétebb régiók egyenletesebb intenzitású területek, ahol a sűrűség vagy fényesség változása minimális. Ezek a nyugodtabb, kevésbé strukturált részek.



4. ábra: Az LDN 1251 gradiens intenzitástérképe.



5. ábra: A HCL 2 gradiens intenzitástérképe.

Miután meghatároztam, mennyire változik az intenzitás a különböző irányokban a Sobel-operátor segítségével – amely két szűrőt alkalmaz – kiszámítottam az x-irányú és az y-irányú gradiens komponenseket. Ezek a szűrők konvolúciós mátrixok, amelyek úgy működnek, hogy megvizsgálják a szomszédos pixeleket, majd megbecsülik, milyen gyorsan változik az intenzitás az adott irányban.

Az x-irányú mátrix a következő:

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Az y-irányú mátrix a következő:

$$\begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

Ezeknek a szűrőknek az alkalmazásával az eredmény két különböző gradienskomponens lesz.

A Sobel-operátor egy széles körben használt módszer a képfeldolgozásban a gradiens vagy élek detektálására egy képen. Használatának több előnye van:

1. egyszerű differenciák segítségével ad közelítést a gradiensre, ami megfelel a diszkrét képadatoknak
2. szűrőt használ, amely simítja a zajos adatokat, miközben kiszámítja a gradiens irányát és nagyságát, ezáltal kevésbé érzékeny a zajra, mint más differenciáló operátorok

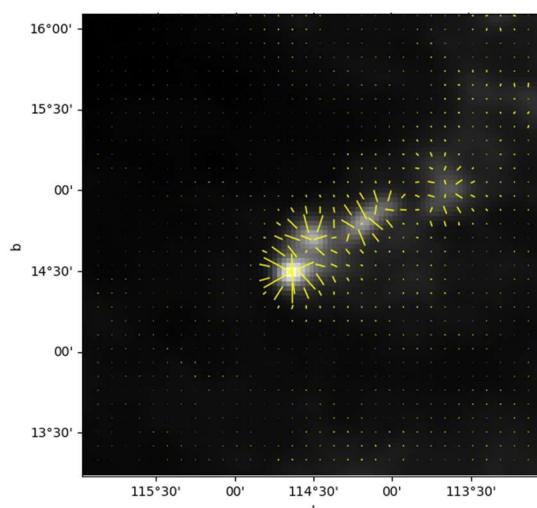
Amikor a függőleges gradiens kerül kiszámításra, a függőleges irányú intenzitásváltozások vizsgálata történik, amely vízszintes élek vagy jellemzők azonosítását eredményezi a térképen. A vízszintes gradiens esetében a vízszintes irányú intenzitásváltozások detektálása zajlik, ami függőleges élek vagy jellemzők azonosításához vezet a térképen.

Ennek a két gradiensnek a kombinálásával kiszámítható a teljes gradiens nagysága és iránya, ami segít a térbeli struktúrák (például élek vagy határok) észlelésében és értelmezésében a két tengely irányában.

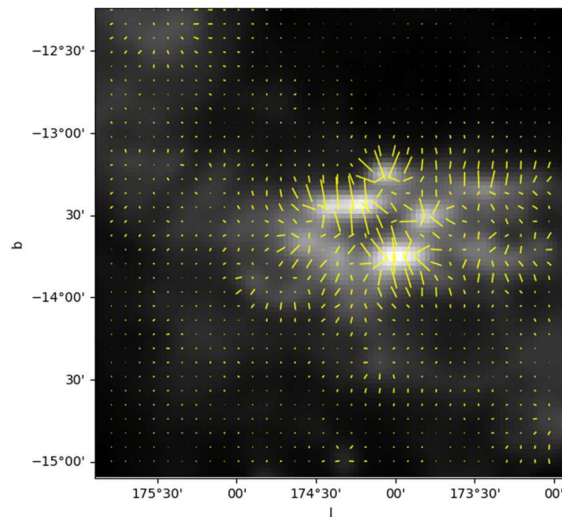
A gradiens nagysága kiszámítható a következőképpen:

$$\text{gradiens nagysága} = \sqrt{\text{grad}_x^2 + \text{grad}_y^2} \quad (3)$$

A gradiens nagyságot egy szürkeárnyaltos képként vizualizáltam, ahol minden pixel intenzitása a gradiens nagyságát jelenti azon a ponton. A gradiens intenzitását ábrázoló térképek segítenek vizualizálni és elemezni az eredeti képen az intenzitás térbeli változásait, ami kulcsfontosságú a kép szerkezetének és jellemzőinek megértéséhez. A gradiens nagyságú kép magasabb értékei azokra a területekre vonatkoznak, ahol az intenzitás gyorsan változik, ami gyakran élekre vagy határookra utal a képen. Az alacsonyabb értékek a lassú intenzitásváltozásokkal rendelkező területeket jelzik, amelyek simább régiókat mutatnak. Így rajzolódhatnak ki a felhők struktúrái.



6. ábra: A gradiens vektorok az LDN 1251 felhőben az intenzitástérképen.



7. ábra: A gradiens vektorok az HCL 2 felhőben az intenzitástérképen.

Ahhoz, hogy a gradiens értékét minél pontosabban meg tudjam határozni, a Gauss-szűrőt alkalmaztam az általam írt program során. A Gauss-szűrő mérete határozza meg azt a területet, amelyen belül a gradiens számítása történik. A Gauss-kernel méretének változtatása lehetővé teszi különböző skálák mintázását és csökkenti a zajt a képeken, ez segít abban, hogy a gradiens számítása ne torzuljon a véletlenszerű pixelértékek miatt, amelyek befolyásolhatják az éleket és a részleteket a képen.

A gradiens orientációja az intenzitás leggyorsabb változásának irányát adja meg, ami tipikusan merőleges a felhő széleire. Ez az irányítás különösen hasznos a molekulafelhők határainak pontos meghatározásában, mivel segít azonosítani az éles átmeneteket a felhő sűrűbb régiói és a környező ritkább területek között. A gradiens vektorokra merőleges vektor orientációja megmutatja, hogy hol lesz az intenzitás változása minimális, ezek az élekkel párhuzamosak lesznek, ez az irány közel egybeesik a felhő fő tengelyének irányával.

Ezek a merőleges vektorok fontos információkat nyújtanak a felhő belső szerkezetéről. Amikor ezek a vektorok szabályosan követik a felhő alakját, az jelezheti, hogy a felhő gravitációsan kötött és rendezett szerkezettel rendelkezik. Ezek az elforgatott vektorok a felhő tengelyének meghatározása mellett hozzájárulhatnak a csillagkeletkezési folyamatok jobb megértéséhez is. Az irányultságuk megmutatja, hogyan szerveződik a por és a gáz a felhő belsejében.

4.2.2 Mágneses térvektorok kiszámítása polarizációs adatokból

A csillagközi térben a fény polarizációja gyakran a mágneses mező irányával merőleges, így a polarizációs vektor alapján következtetni lehet a mágneses mező irányára.

Az általam készített programot úgy írtam meg, hogy az elektromágneses sugárzás polarizációs jellemzőinek elemzésével mérje a csillagközi mágneses mezők térbeli szerkezetét. Ennek részeként az első lépés a polarizációs szög kiszámítása a Q és U polarizációs paraméterekből. Ezek a komponensek fontos információkat szolgáltatnak arról, hogy a sugárzás hogyan érkezik hozzánk, illetve hogyan befolyásolják azt a mágneses mezők, és meghatározzák az elektromágneses hullámok polarizációjának irányát és mértékét.

Az elektromágneses sugárzás intenzitásának és polarizációjának meghatározását négy Stokes-paraméter teszi lehetővé:

I: Az összintenzitás, amely magában foglalja a teljes elektromágneses sugárzást, függetlenül annak polarizációjától.

Q: A lineáris polarizáció intenzitása egy meghatározott irányban (általában észak–dél vagy kelet–nyugat tengelyen).

U: A lineáris polarizáció intenzitása 45 fokkal elforgatott tengely mentén.

V: A cirkuláris polarizáció mértéke.

A programomban csak a *Q* és az *U* komponenseket használtam, mert ezek a lineáris polarizációs tulajdonságokat írják le két merőleges irányban. Ezekből a komponensekből számolható ki a sugárzás polarizációs szöge és polarizációs foka, amelyek kulcsfontosságúak a mágneses mezők irányának és szerkezetének meghatározásában.

A *Q* és *U* komponenseket a Planck műhold 353 GHz-en végzett mérései szolgáltatják. A műhold polariméterei az elektromágneses sugárzás polarizációs tulajdonságait határozzák meg, amelyek a *Q* és *U* értékek formájában kerülnek kifejezésre.

Ezekből a paraméterekből származtatható a polarizációs szög (θ), amelyet a programom a mágneses mezők szerkezetének meghatározására használ. A polarizációs szöget a *Q* és *U* komponensek segítségével az alábbi képlettel számoltam ki a kódban:

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan 2(U, Q) \quad (4)$$

Ez a képlet a sugárzás lineáris polarizációjának pontos irányát adja meg, amely közvetlenül kapcsolódik a csillagközi por által orientált mágneses mezők irányához.

A θ polarizációs szög kiszámítása után ez az információ felhasználható a mágneses mező kétdimenziós komponenseinek meghatározására. A mágneses mező vektorosan kerül ábrázolásra, így a tér minden egyes pontjához egy vektor rendelhető, amely a mező irányát és nagyságát írja le.

A szubmm-es tartományon a lineáris polarizáció iránya 90° -kal eltér a mágneses tér irányától. Erre tekintettel a mágneses tér irányát úgy kapjuk meg, hogy a polarizációs szöghöz hozzáadunk $\pi/2$ -t:

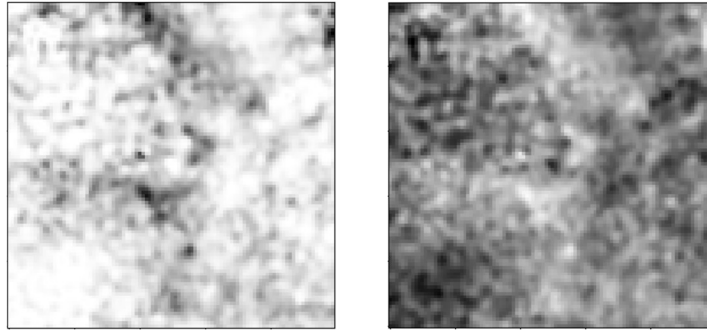
$$B = \theta + \frac{\pi}{2} \quad (5)$$

A mágneses tér *x*- és *y*-irányú komponenseit pedig az alábbi képletek segítségével lehet meghatározni:

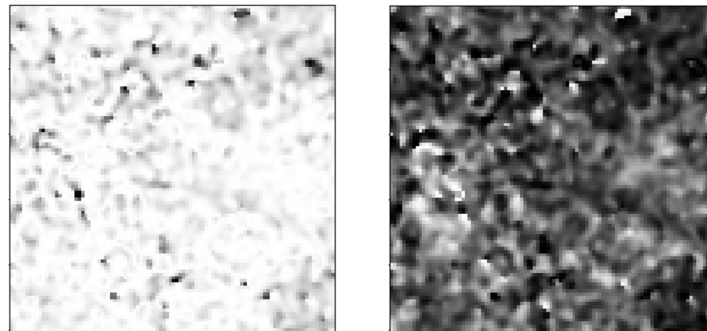
$$B_x = \cos \theta \quad (6)$$

$$B_y = \sin \theta \quad (7)$$

A mágneses térvektorok irányának meghatározásához egy Dr. Dana Alinától kapott programrészletet is használtam. A kapott kódot átdolgoztam és kibővítettem, hogy az összhangban legyen az általam fejlesztett programmal, valamint biztosítsa a szükséges funkcionalitásokat. Az így kapott komponensek minden egyes pixelen információt nyújtanak arról, hogy a mágneses mező milyen irányba mutat a térképen. Például, ha a polarizációs szög egy adott pontban 0° , akkor a mágneses mező teljesen az *x* tengely mentén mutat, vagyis a B_x komponens maximális lesz, míg $B_y = 0$. Hasonlóan, ha a szög 90° , akkor a mező teljesen az *y*-irányba mutat, és a B_y komponens maximális lesz, míg $B_x = 0$.



8. ábra: A mágneses tér x (Q) irányú (bal) és y (U) irányú (jobb) komponenseinek kétdimenziós eloszlása az LDN 1251-ben.



9. ábra: A mágneses tér x (Q) irányú (bal) és y (U) irányú (jobb) komponenseinek kétdimenziós eloszlása az HCL 2-ben.

A szürkeárnyalatos képek a mágneses tér komponenseinek intenzitását ábrázolják -1 (fekete) és +1 (fehér) közötti skálán. Az értékek nullától való eltérései az adott ponton érvényes mágneses tér helyi irányultságát és nagyságát jellemzik. Azokon a helyeken, ahol az érték közel +1 vagy -1, az adott irányú mágneses tér komponens maximális erősségű. Ahol az érték 0, ott az adott komponens nem járul hozzá a teljes mágneses térhez, ami azt is jelentheti, hogy a mágneses tér az adott ponton merőleges az adott irányra. A világos színű (fehér) pixelek a mágneses tér pozitív értékű komponenseit jelzik, azaz az adott komponens az iránytengely pozitív irányába mutat. Ezzel szemben a sötét színű (fekete) pixelek azt jelzik, hogy a mágneses tér adott komponensének értéke negatív, vagyis a mágneses tér az iránytengely ellentétes irányába mutat, miközben nagysága továbbra is jelentős lehet.

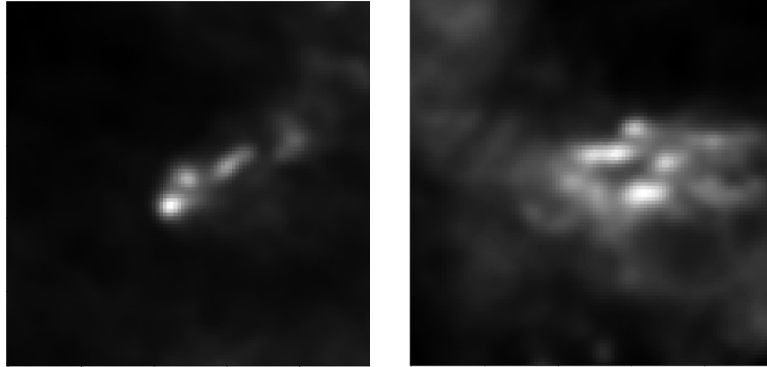
Az így kiszámított B_x és B_y komponensek vizuálisan megmutatják, hogyan változik a mágneses mező iránya a tér különböző részein. Fontos kiemelni, hogy a programom az θ polarizációs szögeket két dimenzióban számolja ki, így a mágneses mező is egy kétdimenziós síkban van ábrázolva. A valóságban a mágneses mező egy háromdimenziós struktúra, de ebben a vizualizációban a vetített síkra eső komponenseket használjuk, tehát a mágneses mezőnek csak azokat a komponenseit látjuk, amelyek ebben a látórányra merőleges síkban hatnak.

A mágneses tér ábrázolásához figyelembe vesszük a polarizációs frakciót is, amely azt írja le, hogy az adott csillagászati objektumból vagy régióból származó megfigyelt fény hány százaléka lineárisan polarizált, majd ezt normalizálja a teljes intenzitással (King, Patick K. és mtsai, [2019](#)):

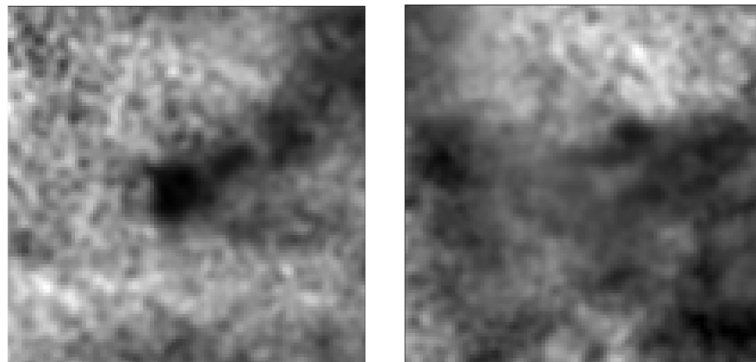
(8)

$$p_{mas} = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I}$$

A számláló a teljes polarizált intenzitást jelenti, amit elosztva a teljes intenzitással (10. ábra), a p_{mas} dimenzió nélküli polarizációs hányadot (polarisation fraction) kapjuk, amelynek értéke 0 és 1 között van. A 11. ábra mutatja polarizációs hányad értékét az általam vizsgált két felhő esetén. Az így kapott térképeken a világosabb területek magasabb polarizációs hányadot, míg a sötétebb területek alacsonyabb polarizációs hányadot jelentenek.



10. ábra: Intenzitás térkép az LDN 1251 (bal) és a HCL 2 (jobb) felhőről.



11. ábra: Polarizációs frakció térkép az LDN 1251 (bal) és a HCL 2 (jobb) felhő esetén.

A magas p_{mas} értékek arra utalnak, hogy a porszemcsék erősebben igazodnak a környező mágneses térhez, hatékonyan polarizálva a fényt. Az alacsony p_{mas} értékek viszont a gyenge igazodásra vagy depolarizációs hatásokra (pl. turbulencia, többszörös szórás) utalhatnak. A közelítésére megalkotott mutató: Modified ASymptotic estimator, ami a polarizációs mérési zaj torzító hatásainak korrigálására szolgál (Plaszczynski, S. [2014](#)). Ezen mutató alkalmazása egy összetett és időigényes folyamat, mely adatokat a teljes Planck polarizációs térképre megkaptam Dr. Dana Alinától, és ezeket használtam az elemzés során.

4.2.3 Histogram of Relative Orientations (HRO)

A HRO egy olyan a detektálási algoritmus, melynek alapja a Histogram of Oriented Gradients (HOG) (Soler és mtsai. [2019](#)). A HOG-okat mintafelismerésre használják, a színátmenetek segítségével írják le a kép éleinek orientációját. A HRO-ban a sűrűség gradiense (oszlopsűrűség) jellemzi a struktúrák irányultságát egy vektormezőben, amelyet a vektorok skaláris szorzatával közvetlenül hasonlítanak össze az egyes pixeleken lévő mágneses térrel. Ennek a műveletnek az eredménye egy relatív orientációs szög a két vektor között minden egyes pixelben, amelyet hisztogram jellemez. A vektoroknak mivel nem az irányát, hanem az orientációját vizsgáljuk, így az egymással párhuzamos vektorokat ugyanúgy kezeljük, irányuktól függetlenül.

A gradiens vektor és a mágneses tér vektor közötti szög kiszámítása az alábbi képlettel történik:

$$\phi = \arctan \left(\frac{|\mathbf{B} \times \nabla n|}{\mathbf{B} \cdot \nabla n} \right) \quad (9)$$

ahol $\mathbf{B}$ a mágneses tér vektor, ∇n a sűrűséggradiens, ϕ a két vektor közötti szög. A vektorok közötti szögek meghatározásában a használt képlet a mágneses tér és a sűrűséggradiens kétdimenziós reprezentációjára épül, mivel az elérhető adatok dimenziói ezt indokolják. A képlet mind a skaláris szorzatot (nevező), mind a keresztszorzat abszolút értékét (számláló) felhasználja, hogy meghatározza az irányok közötti ϕ szöget.

A skaláris szorzat információt ad arról, hogy a két vektor mennyire párhuzamos vagy ellentétes irányú, hiszen annak értéke a szög koszinuszával arányos. Ezzel szemben a keresztszorzat nagysága a két vektor által bezárt szög szinuszával arányos, és információt ad a síkon belüli orientációs kapcsolatukról.

Mivel ebben az esetben csak kétdimenziós vektorokat vizsgálunk, a keresztszorzat skalárként kezelhető, és nem eredményez új dimenziót (mint a háromdimenziós vektoranalízisben). Ez a kombinált módszer lehetővé teszi a szög pontos meghatározását a síkbeli elemzésekben, miközben figyelembe veszi mind az irányok párhuzamosságát, mind az orientációt.

A számított szöget a skaláris szorzat alapján korrigálni kell annak érdekében, hogy helyes értéket kapjunk, és elkerülhetők legyenek azok a numerikus hibák, amelyek a $[-1,1]$ tartományon kívüli eredményeket okozhatnak.

A kapott hisztogram az egész intenzitás térképre megmutatja, hogy milyen gyakran fordulnak elő konkrét szögek a gradiens és a mágneses térvektorok között. Az összes pixelre kiszámolja a két vektor közötti relatív orientációt. A hisztogram x tengelyén a gradiens vektorok és a mágneses tér vektorok közötti szögek találhatók. Az y tengely a frekvencia, ez a tengely azt mutatja, hogy az adott relatív orientációval rendelkező vektorok milyen gyakorisággal fordulnak elő a képen. A hisztogram csúcsai a gradiens és a mágneses tér közötti leggyakoribb elrendezéseket jelzik.

A szögek 0° -tól 180° -ig terjednek, mivel a két vektor közötti elrendezés szimmetrikus (a 0° és 180° szögek párhuzamos vektorokat írnak le). A 0° vagy ahhoz közeli érték azt jelzi, hogy a gradiens vektorok és a mágneses tér vektorok egy irányba mutatnak. Ha a hisztogram csúcsa 90° környékén található, a vektorok merőlegesek egymásra (a gradiens és a mágneses tér ortogonális).

A HRO alakja fontos információkat nyújthat a mágneses tér irányáról a gázszerkezethez viszonyítva. Egy homorú HRO azt jelzi, hogy a mágneses tér párhuzamos a sűrűséggradienssel, ami arra utalhat, hogy a mágneses tér igazodik a gázszerkezethez. Ezzel szemben egy domború

HRO arra utal, hogy a mágneses tér merőleges a sűrűséggradiensre, ami a mágneses tér domináns szerepére utalhat a felhő szerkezetének kialakításában. Az okok feltárása – amelyek a HRO alakjának változását okozzák – segíthet megérteni azokat a fizikai folyamatokat, amelyek a molekuláris felhők evolúciójában szerepet játszanak.

Tekintettel arra, hogy a porpolarimetria csak a mágneses tér látóirányú komponensét érzékeli, a látószög iránya hatással van a megfigyelt HRO eredményekre. Továbbá, ha a mágneses tér elég erős ahhoz, hogy szabályozza a gázáramlásokat, akkor a megfigyelt gázstruktúra is ennek megfelelően módosulhat. Ezért a mágneses tér erősségének és irányának jobb megértése érdekében szükséges lehet a polarimetriai megfigyelések numerikus szimulációkkal és más technikákkal történő kombinálása.

A globális HRO alakját nagymértékben az határozza meg, hogy a megfigyelt terület mekkora hányadát foglalják el az alacsony sűrűségű szálak a magasabb sűrűségű felhőszálakhoz képest. Vagyis a mágneses tér és a sűrűségstruktúrák relatív orientációja különböző sűrűségű régiókban eltérő módon nyilvánul meg. Az alacsony sűrűségű szálak általában párhuzamosak lehetnek a mágneses tér irányával, mivel az ilyen területeken a mágneses tér dominálhat az anyag dinamikájában, akadályozva a gravitációs összehúzódást. Ezzel szemben a magasabb sűrűségű felhőszálak gyakran merőlegesek a mágneses térre, mivel ezekben a régiókban a gravitációs összehúzódás dominál, ami a mágneses térvonalak hajlását eredményezheti.

4.3 Korrigálások

Az eddig leírt számításokat a Planck égboltfelmérésből kivágott terület egészére végeztem el, ami a molekulafelhők mellett magában foglalja az égi háttérrel is. Ennek következtében az így kapott adatok nem nyújtanak hiteles információt a vizsgált felhők tulajdonságairól. Annak érdekében, hogy a hisztogram alakját ne befolyásolják azok a relatív szögek, amelyek nem a vizsgált területen – tehát nem magában a felhőben találhatók – különböző intenzitásküszöbértékek határoztam meg. Ezáltal csak azokra a pixelekre lettek meghatározva a szükséges vektorok, amelyek intenzitása meghaladja a küszöbértéket. Vagyis a magasabb küszöbértékek beállításával a kevésbé fontos vektorok eltűnnek, így a képen csak a felhők területén lesznek láthatók a vektorok, a számunkra fontos struktúrákat mutatva.

A küszöbértékek meghatározásához az intenzitás térképének legkisebb és legnagyobb értékeit vettem figyelembe. Az így kapott intervallumot egyenlő részekre osztottam fel, a kapott lineáris skála pedig az intenzitásértékek skáláját is egyenletesen reprezentálja. Végül kiválasztottam azt a küszöbértéket, amely esetén a megfelelő vektorok jelennek meg. Az LDN 1251 esetén ezt a küszöböt 3,95-nek választottam, a HCL 2 felhő esetén pedig 6,00-nak választottam.

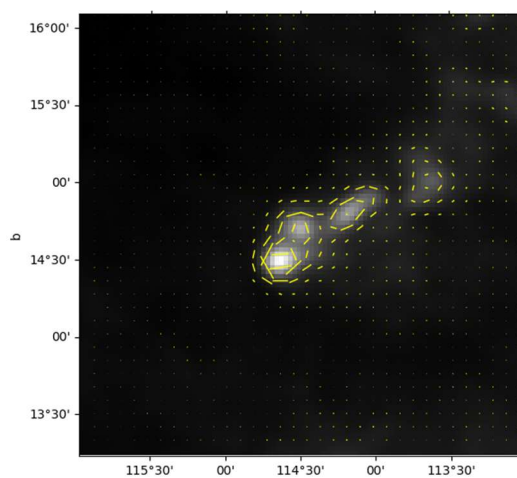
5. Eredmények

5.1 Sűrűséggradiens vektorok

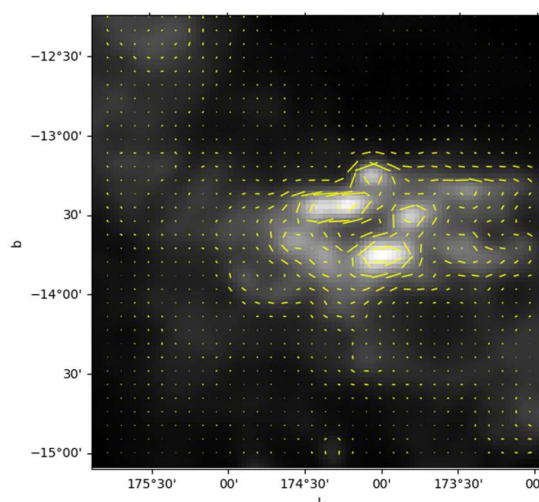
Az intenzitástérkép sötét háttér előtt mutatja a különböző sűrűségű területeket. A legvilágosabb zónák a sűrűbb régiókat jelzik, ahol a molekulák nagyobb koncentrációban fordulnak elő. Az intenzitás növekedése a sűrűségi maximumok területein figyelhető meg.

A sárga színnel ábrázolt vonalak mutatják az elforgatott gradiens vektorokat, így ezek a minimális intenzitásváltozást mutatják. Ez az irány a felhőben tipikusan a főbb szerkezeti

elemek, például a felhőszálak mentén található, amelyek a felhő általános orientációjához is közel esnek. A vektorok orientációja és hossza segít a felhő szerkezetének megértésében.



12. ábra: Az LDN 1251 felhő struktúráját mutató sűrűséggradiensek az intenzitástérképen.



13. ábra: A HCL 2 felhő struktúráját mutató sűrűséggradiensek az intenzitástérképen.

5.2 Mágneses tér vektorok

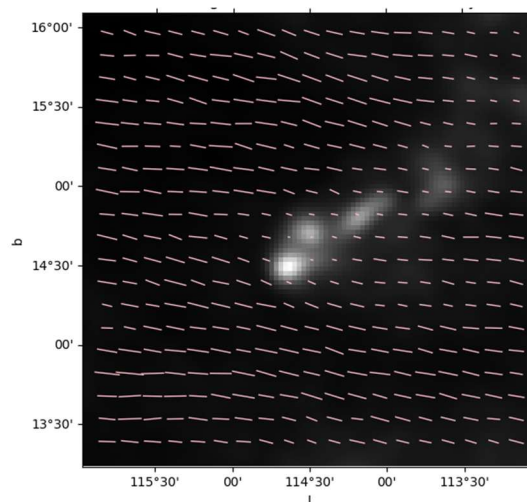
Megvizsgáltam a mágneses térvektorok irányát és ábrázoltam ezeket mindkét általam vizsgált területen.

Az LDN 1251 mágneses térvektorainak ábrája alapján megállapítható, hogy a mágneses tér irányultsága nagyban követi a felhő hosszanti tengelyét, ami arra utalhat, hogy a mágneses tér fontos szerepet játszhatott a felhő szerkezetének kialakításában. A vektorok globálisan rendezett mintázata azt jelezheti, hogy a mágneses tér jelenléte jelentősen befolyásolta a felhő dinamikáját, valószínűleg meghatározva az anyagáramlás irányát és korlátozva a gravitációs összehúzódást a térvonalak mentén.

A vektorok hosszának vizsgálata azt mutatja, hogy a sűrűbb területeken, különösen a felhő központi régióiban, a vektorok hossza látványosan csökken. Ez ellentétben van azzal az általános megfigyeléssel, hogy a felhő sűrűbb régióiban a mágneses tér vektorainak nagyobb a

hossza, míg a ritkább, alacsonyabb sűrűségű területeken ezek a vektorok lerövidülnek. Ez az ellentét több tényezővel magyarázható. Az ábrázolt vektorok a mágneses tér látóirányra merőleges komponensét mutatják, így elképzelhető, hogy a látóirányú (radialis) mágneses térkomponens erősebb, de ezt a kétdimenziós ábrázolás nem érzékeli. A rövidebb vektorhosszak tehát jelezhetik, hogy a mágneses tér domináns iránya a látóirány felé tolódik, vagyis a mágneses tér ezekben a régiókban jellemzően a látóiránnyal párhuzamos lehet. Ezen túlmenően a gravitációs összehúzódnás és a turbulens mozgások hatása is szerepet játszhat a vektorok hosszbeli különbségeiben. A sűrűbb régiókban a gravitációs erők dominanciája miatt az anyagáramlás és az összehúzódnás hatására a mágneses térvonalak összetorlódhatnak vagy rendezetlenebbé válhatnak. Ez csökkentheti a polarizációs jelet, és így a vektorok rövidebbnek tűnhetnek az ábrán. Hasonlóképpen a turbulens mozgások is rendezetlenséget idézhetnek elő a mágneses térben, különösen a sűrű magok közelében, ahol a gravitációs és dinamikus hatások intenzívebbek.

A mágneses tér általános irányultsága ugyanakkor rendezett marad a kevésbé sűrű régiókban, ahol a térvonalak párhuzamossága egyértelműen megfigyelhető. Ez arra utalhat, hogy a mágneses tér a felhő külső területein kevésbé torzul, és első ránézésre meghatározó szerepet játszhat a felhő globális szerkezetének fenntartásában. Ugyanakkor a csillagközi anyag áramlása is alakíthatja a mágneses térvonalakat párhuzamosra. Ebben az esetben a párhuzamos térvonalak inkább a gáz dinamikájának hatását tükrözik, mintsem egy tisztán mágneses tér által dominált szerkezetet. A mágneses tér és a csillagközi anyag kölcsönhatása ezért összetett, és mindkét tényező hozzájárulhat a felhő globális szerkezetének kialakításához és fenntartásához. Az ilyen régiók részletesebb elemzése szükséges ahhoz, hogy pontosabban meghatározzuk a mágneses tér és a gázáramlások relatív hozzájárulását a felhő dinamikájához.



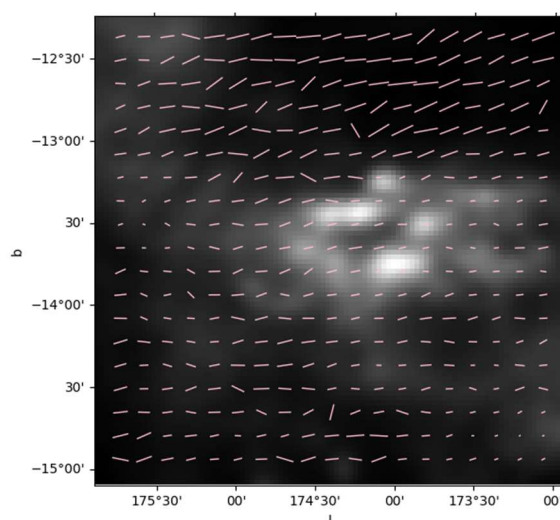
14. ábra: Az LDN 1251 felhőben és a környezetében található mágneses térvektorok iránya intenzitástérképen.

A HCL 2 molekulafelhő esetében megfigyelhető, hogy a mágneses térvektorok irányultsága nem teljesen egységes, és helyenként jelentős eltérések mutatkoznak az irányukban. Az ilyen iránybeli eltérések több tényező együttes hatásának eredményei lehetnek, amelyek a tér komplexitását és különböző környezeti hatásokat tükrözik.

Az eltérő irányú vektorok megjelenése gyakran lokális jelenségekkel hozható összefüggésbe. A molekulafelhőkben a mágneses tér nemcsak globális szinten hat, hanem a felhő belső szerkezeti jellemzőitől függően helyi perturbációk is jelen lehetnek. Például, az egyes regionális turbulens mozgások, gázáramlások, vagy akár az egyes felhőrégiók különböző fizikai környezetei is hozzájárulhatnak a mágneses tér irányának lokális változásaihoz.

A ritkább, alacsonyabb sűrűségű területekben az eltérő irányú mágneses térvektorok gyakran a molekulafelhők szálas szerkezeteinek jelenlétével hozhatók összefüggésbe. A molekulafelhők egyes részein vékonyabb szálak alakultak ki, amelyek saját mágneses térrel rendelkeznek. Ezek a szálas struktúrák gyakran nem párhuzamosak a felhő nagyobb léptékű struktúrájával, így ezen területek mágneses térvektorainak iránya eltérhet a környező, nagyobb léptékű mágneses tér orientációjától, így a mágneses vektorok irányában is látványos változások jelentkezhetnek.

A vektorok hosszát vizsgálva hasonló megfigyeléseket tettünk. A vektorok hosszának változása a mérések geometriai hatásainak is köszönhető. A mágneses térvektorok hossza csak a látóirányra merőleges komponenst tükrözi, és mivel a látóirány mentén lévő komponens nem látható, azokat az információkat nem tartalmazza a mérés. Elképzelhető, hogy a látóirány mentén erősebb mágneses tér komponensek is léteznek, amelyek a valóságban növelhetik a mágneses tér erősségét, de az ábrázolt képen ezt nem látjuk. Ezen kívül a látóirányú szögéből adódó eltorzulások is csökkenthetik a vektorok hosszát, különösen a felhő periférikus, ritkább részein, ahol a mágneses tér összetettsége és irányultsága bonyolultabbá válhat.



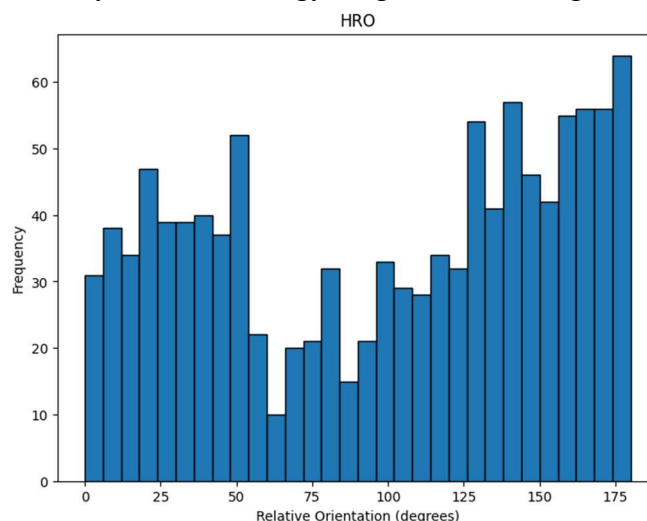
15. ábra: A HCL 2 felhőben és a környezetében található mágneses térvektorok iránya intenzitástérképen.

5.3 Histogram of Relative Orientations eredmények

A HCL 2 felhő esetén az eredményül kapott HRO-t 16. ábra mutatja. A felhőben megfigyelt hisztogram U-alakú eloszlása azt mutatja, hogy a mágneses térvektorok és a sűrűséggradiensek közötti orientációk közül a közel párhuzamos irányok (kb. 180° körül) dominálnak. A hisztogram csúcspontja a $175\text{-}180^\circ$ -os tartományban található, ami arra utal, hogy a mágneses tér és a sűrűségstruktúrák között erős kapcsolat van, az orientációk többsége főként párhuzamos. Ez arra enged következtetni, hogy a mágneses térvonalak és a sűrűséggradiens között az elsődleges orientáció párhuzamos. A merőleges orientációk (kb. 90° körül) alacsony

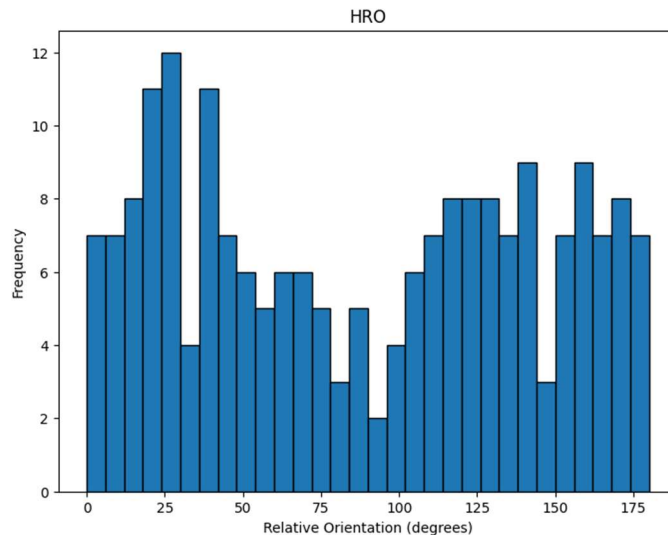
gyakoriságot mutatnak, ami arra utal, hogy a mágneses tér és a sűrűséggradiens közötti merőleges kapcsolat instabil lehet, vagy az ilyen konfigurációk dinamikailag kedvezőtlenek a struktúrák kialakulása szempontjából.

A hisztogramon megfigyelhető kisebb csúcsok a 30-50°-os tartományban arra utalnak, hogy létezik egy másodlagos, ferde (nem teljesen párhuzamos) preferált orientáció is. Ez a másodlagos maximum a mágneses tér és a sűrűséggradiens közötti ferde kölcsönhatásokra vagy köztes dinamikai állapotokra utalhat. Az ilyen orientációk lokális instabilitásokkal vagy az anyagáramlás irányának változásaival lehetnek kapcsolatban, ahol az anyag nem tökéletesen igazodik a mágneses tér irányához, hanem egy meghatározott szöget zár be vele.



16. ábra: A HCL 2 felhőben található sűrűséggradiensek és mágneses térvektorok relatív orientációja.

Az LDN 1251 felhő hisztogramjában (17. ábra) is látható egy kisebb U-alakot, azonban nem 0°-nál és 180°-nál vannak az intenzívebb csúcsok. A csúcsok egy szűk szögintervallumban koncentrálnak, 20-25° között, ez azt jelenti, hogy a mágneses tér és az intenzitásgradiens relatív orientációja továbbra is közel párhuzamos, de valamilyen hatás miatt az optimális párhuzamos orientáció egy kicsit el van tolódva. Ez azt sugallhatja, hogy a közeg nem teljesen rendezett, az elsődleges, domináns orientáció 20° körüli. A mélyebb középső pont (90° körül) arra utal, hogy a merőleges orientáció nem dominál a felhőben. A 100° és 175° közötti szögintervallumban tapasztalható lapos, konkáv félkör alakú eloszlás arra utal, hogy a mágneses tér és az intenzitásgradiens iránya között rendezetlen vagy laza kapcsolat áll fenn. Ez a jelenség azt sugallja, hogy ezen a szögintervallumon belül a mágneses tér nem követi szorosan az intenzitásgradiens irányát, ami a rendszer instabil vagy szórt jellegére utal. Ez a viselkedés tipikusan a csillagközi közeg turbulens régióira jellemző, ahol a mágneses tér szerkezete jelentős változásokat mutat, és komplex, nemlineáris kölcsönhatások figyelhetők meg az intenzitásgradienssel. Az ilyen eloszlások arra utalnak, hogy a mágneses tér dinamikus viselkedése eltér az egyszerű, rendezett struktúráktól, és összetett fizikai folyamatok eredménye, amelyek a csillagközi közegben dominánsak lehetnek.



17. ábra: Az LDN 1251 felhőben található sűrűséggradiensek és mágneses térvektorok relatív orientációja.

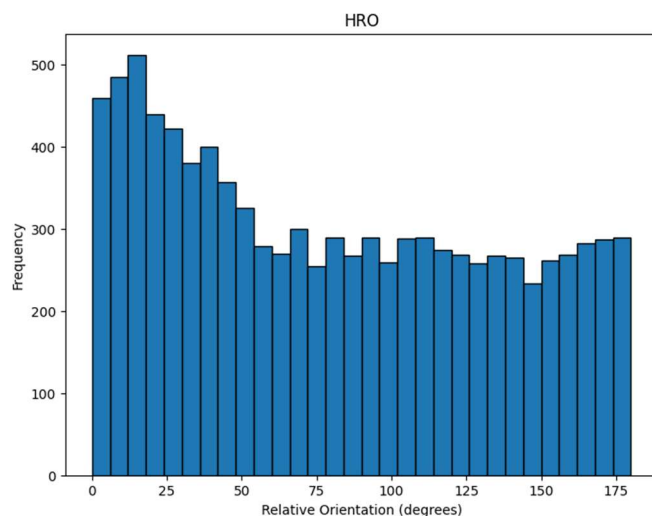
A felhőn kívül, annak környezetében is megvizsgáltam a sűrűséggradiens vektorok és a mágneses térvektorok relatív orientációját. Ennek vizsgálata betekintést nyújt abba, hogy a felhőt körülvevő anyag hogyan kapcsolódik a mágneses térhez.

A felhőn kívüli vektorok relatív orientációjának eloszlását az LDN 1251 esetén a 18. ábra mutatja. A hisztogram a 0–25° közötti szögintervallumban mutat jelentős csúcsot, ami arra utal, hogy a mágneses térvektorok és a sűrűséggradiens által bezárt szögek ezen a tartományon belül jelentősebbek, vagyis a vektorok inkább párhuzamosak. Ez a preferált orientáció arra enged következtetni, hogy a mágneses tér fontos szerepet játszik a sűrűségstruktúrák kialakulásában és fejlődésében, különösen a felhő sűrűbb, belső régióiban. A párhuzamos igazodás azt mutathatja, hogy az anyagáramlás a mágneses térvonalak mentén történik, amely szerepet játszhat a struktúrák stabilizálásában, és hozzájárulhat a sűrűségkontraszt növekedéséhez. Ugyanakkor az olyan rendszerek esetében, ahol számos fizikai tényező egyszerre hat, a mágneses térvonalak mentén történő anyagáramlás és a struktúrák stabilitása közötti kapcsolat például csak korreláció lehet, és nem feltétlenül ok-okozati összefüggés. Más mechanizmusok, mint a gravitációs instabilitások, turbulencia, vagy sugárzási nyomás, szintén hozzájárulhatnak a megfigyelt jelenségekhez.

A hisztogramon látható, hogy a szögeloszlás a 25°-tól nagyobb értékek felé haladva fokozatosan csökken, majd körülbelül 50° után viszonylag egyenletes eloszlást mutat. Ez arra utal, hogy a párhuzamos orientáció dominanciája csökken a felhő peremvidékén vagy a ritkább régiókban, ahol a mágneses tér és a sűrűséggradiens közötti kapcsolat gyengébbé válik. Az egyenletes eloszlás jelenléte a 75° és 175° közötti tartományban arra utal, hogy ezen a területen az orientációk véletlenszerűbbek, ami a mágneses tér gyengébb dinamizmusát vagy kevésbé domináns szerepét jelzi a sűrűségstruktúrák kialakításában. Ez a rendezetlenebb viselkedés különösen jellemző lehet a felhő külső régióira, ahol a mágneses tér nem uralja egyértelműen a dinamikát, és a sűrűséggradiens iránya kevésbé korrelál a mágneses tér irányával.

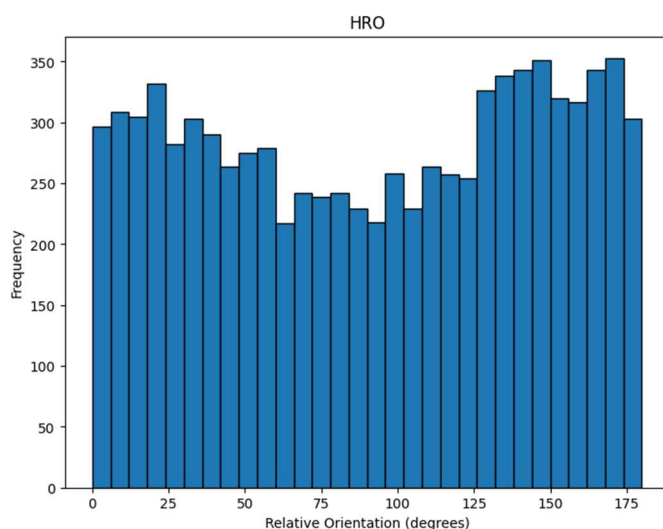
Ez az eloszlás arra utalhat, hogy a felhőn belül a mágneses tér még fontos szerepet játszik az anyag szerveződésében, míg a felhőtől távolabb, a ritkább csillagközi anyagban az orientációs korreláció csökken. Ez a megfigyelés alátámasztja, hogy a mágneses tér hatása a

sűrűségstruktúrákra lokálisan változó, és a felhő gravitációs és mágneses dinamikájának kölcsönhatása függ az adott régió fizikai körülményeitől.



18. ábra: Az LDN 1251 felhőn kívüli, annak környezetében található sűrűséggradiensek és mágneses térvektorok relatív orientációja.

A 19. ábrán látható a HCL 2 felhőn kívüli környezetében található vektorok relatív orientációjának hisztogramja, melyen két csúcs figyelhető meg: az egyik 0–25° között, a másik pedig 125–175° között helyezkedik el. Ez a két csúcs arra utal, hogy a mágneses térvektorok és a sűrűséggradiens irányai jellemzően párhuzamos, vagy azzal kis szöget bezáró orientációt mutatnak. A két csúcs között, 25° és 125° közötti szögtartományban a hisztogram viszonylag laposabb, ami arra utal, hogy ebben a szögtartományban nincs preferált orientáció. A lapos eloszlás utalhat arra, hogy a bezárt szögek eloszlása véletlenszerű. Ez azt sugallja, hogy a mágneses tér dominanciája ebben a köztes szögtartományban csökken, és az anyag sűrűséggradiensének orientációja kevésbé korrelál a mágneses tér irányával.



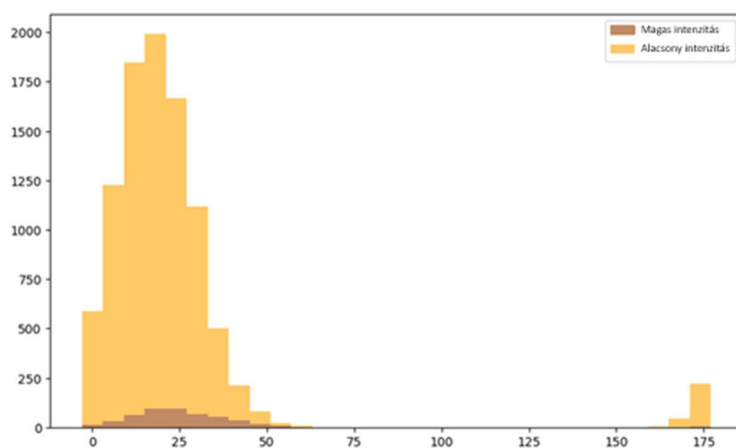
19. ábra: A HCL 2 felhőn kívüli, annak környezetében található sűrűséggradiensek és mágneses térvektorok relatív orientációja.

5.4 Mágneses vektorok irányultsága a felhőkön belül - kívül

Összehasonlítottam a belső, nagyobb intenzitású területen és a külső, alacsonyabb intenzitású területen található mágneses tér vektorai által bezárt szöget a vízszintes tengellyel, annak érdekében, hogy a hisztogramok alakja alapján meg tudjam figyelni, hogyan oszlanak el az orientációs szögek a felhőn belül és azon kívül.

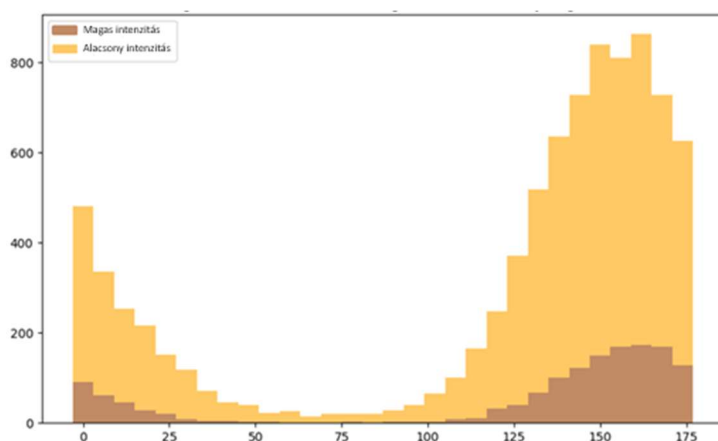
Ekkor a relatív orientációra azt kaptam, hogy a vektorok vízszintessel bezárt szögének eloszlása hasonló a felhőn belül és kívül, mindkét vizsgált felhő esetében. Ha a molekulafelhőn belüli mágneses vektorok nagyjából párhuzamosak az azon kívüliekkel, vagyis a mágneses tér a felhőn belül és kívül hasonló irányba orientálódik, azt jelenti, hogy a mágneses térvektorok a felhő határain keresztül nem mutatnak jelentős irányváltozást. Ez utalhat arra, hogy a belső mágneses tér a környezeti mágneses térből származik, és a felhő kialakulása nem módosította jelentősen a mágneses tér szerkezetét. A mágneses tér által közvetített felhőképződés esetében a mágneses térvektorok irányítják az anyagot (Ballesteros-Paredes és mtsai. [1999](#); Van Loo és mtsai. [2014](#); Dib és mtsai. [2010](#)).

Az LDN 1251 felhő esetén a mágneses térvektorok irányának a vízszintes tengelyhez való orientációjának eloszlását a 20. ábra mutatja. A barna színű hisztogram a magas intenzitású területek mágneses térorientációit mutatja. Melyből látható, hogy a legnagyobb frekvencia az alacsonyabb szögeknél (0° környékén) van, tehát a mágneses vektorok gyakran az x tengelyhez közel orientálódnak. A narancssárga színű hisztogramból, ami az alacsony intenzitású területek mágneses térorientációit mutatja, arra lehet következtetni, hogy ez a régió is az alacsonyabb szögeknél koncentrálódik, vagyis a mágneses vektorok ezen a területen is inkább az x tengelyhez közel orientálódnak. Mivel mindkét hisztogram maximuma 30° körül van, mindkét területen a vektorok inkább az x tengellyel 30° -os szöget bezáró irányban orientálódnak.



20. ábra: Az LDN 1251 felhőn belüli (barna), annak környezetében (sárga) található mágneses térvektorok relatív orientációja a vízszintes iránnyal.

A 21. ábrán látható, a HCL 2 felhőben és azon kívüli mágneses vektorok vízszinteshez viszonyított irányultságából készített hisztogramon azt lehet megfigyelni, hogy a magas intenzitású területek mágneses térorientációja esetén a legnagyobb gyakoriságok a magasabb szögeknél fordulnak elő. Illetve az alacsonyabb szögeknél is látható egy csúcs. Ez az eloszlás hasonló az alacsony intenzitású területek mágneses térorientációihoz. Tehát a mágneses vektorok inkább az x tengelyhez közel orientálódnak, vagyis a párhuzamos irány dominál.



21. ábra: A HCL 2 felhőn belüli (barna), annak környezetében (sárga) található mágneses térvektorok relatív orientációja a vízszintes iránnyal.

Mindkét felső esetében a két különböző intenzitású területen található vektorok gyakoriságának eloszlása hasonló alakú, vagyis hasonló irányokban állnak a vízszintes tengelyhez képest. Ebből arra lehet következtetni, hogy egymással viszonylag párhuzamosak a mágneses térvektorok a felhőn belül és a felhőn kívül. Ekkor a belső mágneses mezők a környezeti mezőkből öröklődnek, a felhők kialakulása nem befolyásolta jelentősen a felhők geometriáját. (Sharma és mtsai. [2021](#))

6. Diszkusszió

Soler és mtsai. ([2013](#)) elsőként alkalmaztak statisztikai módszereket a molekulafelhők szerkezetei és a mágneses mezők egymáshoz való igazításának kvantitatív elemzésére. Az általuk használt statisztikai eszközök lehetővé tették annak kimutatását, hogy a sűrűségi szerkezetek és a mágneses tér között kialakuló preferált orientáció miként változik az oszlopsűrűség függvényében. Egy későbbi munkában, ugyanazon szimulációs készlet felhasználásával, Soler és Hennebelle ([2017](#)) egy általános leírást adtak a sűrűséggradiens és a mágneses tér közötti szög időbeli változására turbulens molekulafelhőkben. Megállapították, hogy ezek a mennyiségek optimálisan párhuzamosak vagy merőlegesek egymással, attól függően, hogy milyen oszlopsűrűség esetén végezzük a megfigyelést.

Az oszlopsűrűség és a mágneses tér relatív orientációjának megfigyelt változása azt mutatja, hogy az alacsony oszlopsűrűségű régiókban a sűrűségi szerkezetek és a mágneses tér általában párhuzamosak, míg a magas oszlopsűrűségű régiókban a kapcsolat jellemzően merőlegessé válik. Ez az átmenet a gravitáció, a turbulencia és a mágneses tér közötti versengés eredményeként alakul ki. Az alacsony sűrűségű régiókban a mágneses tér irányítja a gázáramlást, így a sűrűségi szerkezetek orientációja a mágneses térrel párhuzamosan rendeződik. Ezzel szemben a nagyobb sűrűségű felhőszálakban a gravitáció dominanciája és a csillagkeletkezéshez vezető összehúzódás a mágneses térrel merőleges szerkezetek kialakulásához vezet.

Nemrégiben Tóth és munkatársai (2020) összehasonlító tanulmányt végeztek, amelyben a Planck polarizációs adatokból származó polarizációs térképeket vetették össze a hideg csillagközi anyag eloszlásával az ebben a munkában is vizsgált HCL 2 felhőben. Tanulmányuk során a polarizációs frakció, a mágneses tér orientációja, valamint a sűrűségeloszlás közötti kapcsolatot vizsgálták. Megfigyeléseik szerint a Taurus régióban a felhőszálak általában merőlegesek a mágneses tér irányára, míg a felhőszálakon kívüli szálak párhuzamosak a mágneses térrel. Ezen struktúrák a szén-monoxid megfigyelések, optikai polarizációs adatok (Goldsmith és mtsai., 2008), valamint a Planck távoli infravörös (FIR) és szubmilliméteres polarizációs adatok alapján egyértelműen összefüggnek a mágneses mező irányával. Továbbá, a HCL 2 környezetében a mágneses tér mintázata valószínűleg a semleges hidrogén (HI) áramlások ütközésének következményeként alakult ki, amit Ballesteros-Paredes és munkatársai (1999) is felvetettek.

Sharma és munkatársai (2021) négy molekulafelhőt vizsgáltak meg munkájukban, köztük az LDN 1251-et is. A megfigyeléseik szerint a felhő belső és külső mágneses mezőinek vetített orientációja $79 \pm 6^\circ$ és $81 \pm 6^\circ$, azaz szinte párhuzamosak egymással, mindössze 2° -os szögeltéréssel. Ez azt jelzi, hogy a mágneses mezők a felhő különböző régióiban koherens irányultságot mutatnak, ami globálisan meghatározó szerepüket sugallja.

A mágneses mezők és a felhő mozgásának iránya között a belső mező esetében 28° , a külső mező esetében 26° szögeltérés figyelhető meg. Ez a viszonylag kismértékű eltérés arra utal, hogy a felhő mozgása nem teljesen párhuzamos a mágneses térrel, de szoros kapcsolatban áll vele. A mágneses mezők részben irányítják az anyag áramlását, hozzájárulva a felhő szerkezetének és mozgásának kialakításához.

Az általam írt programkódokkal végzett, ezen dolgozatban bemutatott vizsgálatok eredménye ezzel részben ellentétes. A kapott HRO eredményeim az LDN 1251 esetén megegyezik a korábbi megfigyelésekkel, ezzel szemben a HCL 2 esetén az általam kapott eredmény ellentétes a korábbi eredményekkel, melyek szerint inkább merőlegesek a felhő struktúrájával a mágneses térvektorok. Ez a különbség abból adódhat, hogy az általam végzett vizsgálatok során én csak a látóirányra merőleges vetületet vettem figyelembe a mágneses térvektorok esetén, míg más vizsgálatok teljes háromdimenziós térben értékelték a mágneses tér és a gradiens orientációját, beleértve a látóirányú komponens is. Így az összvektor vetítése a vizsgálati síkra torzítást eredményezhet. Ha a látóirányú komponens jelentős, a mágneses tér háromdimenziós vektora erősen "hajlik" a megfigyelő látóvonalára felé. A síkra vetített komponens kevésbé lesz érzékeny az eredeti vektor háromdimenziós orientációjára. Ennek következtében különböző, a térben eltérő irányú mágneses vektorok síkbeli vetületei azonosnak vagy hasonlóknak tűnhetnek. Így míg az általam végzett kétdimenziós elemzés eredménye helyes lehet a látóirányra merőleges síkban, ez nem feltétlenül tükrözi a háromdimenziós térben lévő valós mágneses térorientációt.

7. Jövőbeli munkák

Az általam és a mások által kapott korábbi eredmények eltérését további módszerek segítségével szeretném majd vizsgálni, ezáltal az eredményeimet pontosítani.

A HRO módszer mellett a vetített Rayleigh-statisztikát (PRS) szeretném majd alkalmazni, amely a klasszikus Rayleigh-teszt módosított változata. A Rayleigh-teszt alkalmas annak a vizsgálatára, hogy a szögek egyenletesen oszlanak-e el vagy sem, és a relatív orientációs számítás által szolgáltatott információt egyetlen paraméterrel írja le, amely jellemzi a globális

irányultságot a megfigyelt területen. Az így kapott eredményt pedig majd össze tudom hasonlítani a HRO-k alakjából leolvasott információkkal. A szimulált adatok relatív szögeinek véletlenszerű eloszlásának tesztelésekor a PRS nagyobb statisztikai erővel bír, mint a HRO, vagyis érzékenyebben képes az eltéréseket kimutatni az egyenletes eloszlástól.

A mágneses tér háromdimenziós szerkezete nem ismert pontosan a közeli csillagkeletkezési régiókban. A numerikus szimulációk szintetikus megfigyelései lehetőséget kínálnak arra, hogy statisztikailag értékes információt nyerjünk a polarizációs adatokból, ezáltal pontosabban meghatározva a molekulafelhők nagy léptékű mágneses térstruktúrájának irányát. Ezekkel a szimulációkkal kiegészítve az áltam vizsgált molekulafelhőkről készült megfigyelési adatokat, jobb betekintést kaphatok majd a mágneses tér és a molekulafelhők közötti kölcsönhatásokba.

A Chandrasekhar–Fermi (CF) módszer (Chandrasekhar & Fermi [1953](#); Davis [1951](#)) az egyik legszélesebb körben alkalmazott technika a mágneses térerősség becslésére a csillagközi közegben, különösen a mágneses tér és az intenzitásgradiens relatív orientációjának megértésére. A módszer elméleti modellezése szerint a mágneses térerősség becsléseit javítja a mágneses tér turbulens és egyenletes komponenseinek szétválasztása (Falceta-Gonçalves és mtsai. [2008](#); Hildebrand és mtsai. [2009](#)). A CF módszer alapja az Alfvén-hullámok terjedése, melyek egy eredetileg egyenletes mágneses tér mentén mozognak vezetőképes közegben. Az MHD segítségével pedig modellezhetjük a csillagközi gázok és a mágneses tér kölcsönhatásait, és meghatározhatjuk, hogyan alakul a mágneses tér turbulens viselkedése különböző mértékű gázmozgások mellett. Ezek segítségével modellezni tudom majd vezetőképes környezetben a mágneses térvonalak torzulását, amely közvetlenül korrelál a gázmozgással, ezáltal információt nyújtva a mágneses térerősségről. Ezzel pedig pontosabb és több információt kaphatok, mert ez a módszer egy konkrét fizikai kapcsolatot kínál a mágneses tér geometriája és az anyag mozgása között, miközben figyelembe veszi a mágneses térvektorok irányát és szóródását.

A James Clerk Maxwell Telescope (JCMT) egy földi, szubmilliméteres teleszkóp, amely jóval nagyobb, 14.4'-es felbontással dolgozik a Planck 5 ívpercéhez képest (Eden, D. J. [2019](#)). Ez különösen hasznos kisebb léptékű struktúrák, például csillagkeletkezési régiók, felhőszálak, protosztelláris magok részletes tanulmányozására. A JCMT-n alkalmazott polarimetriai mérőeszköz, a SCUBA-2 kamerán alkalmazott POL-2, kifejezetten arra lettek fejlesztve, hogy a szubmilliméteres tartományban nagy érzékenységgel mérjenek polarizációt (Coppin és mtsai [2006](#)). A Planck műhold mérései lehetővé teszik a nagy léptékű mágneses mező nyomon követését a teljes égbolton. Azonban túl alacsony felbontású (~4 ívperc 857 GHz-en; Planck HFI Core Team [2011](#)) ahhoz, hogy a csillagkeletkezési régiók részletes felhőgeometriáját tanulmányozzák. Erre a célra alkalmassabb a nagyobb felbontású, POL-2 és SCUBA-2 adatokat használó BISTRO (B-fields in STar-forming Region Observations) Survey, ami szubmilliméteres hullámhosszakon térképezi fel a porpolarizációt. Ezek az adatok a mágneses tér irányának meghatározására szolgálnak a molekulafelhőkön belül.

Köszönetnyilvánítás

Jelen munkám korábbi változatát előadásban mutattam be a „Cold Cores 2024” nemzetközi konferencián 2024. májusában, ahol és ami után több támogató javaslatot kaptam, kiemelten köszönöm ezeket Dr. Dana Alina és Job Vorster kollégáknak.

A kutatás során felhasználtam az Aladin égbolttérképet, CDS, Strasbourg Astronomical Observatory, Franciaország.

Ez a munka az Astropy (<http://www.astropy.org>) közösség által fejlesztett, csillagászati célokra készült Python-alapú alapprogramcsomagot használta.

Köszönet a Centre d'Analyse de Données Etendues (CADE) által biztosított elemző szoftverek használatáért, melyet az IRAP-UPS/CNRS szolgáltat (<http://cade.irap.omp.eu>, Paradis és mtsai., 2012, *A&A*, 543, 103).

Referenciák

- André, P., Men'shchikov, A., Bontemps, S., és mtsai. 2010, *A&A*, 518, L102
- André P., Di Francesco J., Ward-Thompson D. és mtsai. 2014 *Protostars and Planets VI* ed H. Beuther (Tucson, AZ: Univ. Arizona Press) 27
- Bacmann, A. és mtsai. 2000 *A&A* 361 555B
- Ballesteros-Paredes, J. és mtsai. 1999, *ApJ*, 527, 285
- Barnard EE. 1907. *ApJ*. 25 218
- Beck, R. 2001 *Space Science Reviews* 99, 243–260
- Beck, R., Brandenburg, A., Moss, D., Shukurov, A., Sokoloff, D.: 1996, *A&A* 34, 155–206
- Bergin, E. A. & Tafalla, M. 2007, *ARA&A*, 45, 339
- Burda H., S. Begall, J. Červený, J. Neef, P. Němec, Extremely low-frequency electromagnetic fields disrupt magnetic alignment of ruminants, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2009
- Durand D., Greenwood J. A. 1958 *JG* 66 229D
- Chandrasekhar, S., & Fermi, E. 1953, *ApJ*, 118, 113
- Coppin K., E.L. Chapin 2006 *MNRAS* 372 1621C
- Crutcher, R.M. 2004, *Ap&SS* 292 225
- Crutcher R. M. 2012 *ARA&A* 50 29C
- Davis, L. 1951, *Phys. Rev.*, 81, 890
- Davis, Leverett, Jr. ; Greenstein, Jesse L. 1951 *ApJ* 14 206D
- Dib, S., Hennebelle, P., Pineda, J. E., és mtsai. 2010, *ApJ*, 723, 425
- Dib, S., Bontemps, S., Schneider, N., és mtsai. 2020, *A&A*, 642, A177
- Eden, D. J. és mtsai. 2019 *MNRAS* 485 2895E
- Falceta-Gonçalves D., Lazarian A. és Kowal G. 2008 *ApJ* 679 537
- Galli, D. 2009 *MmSAI* 80 54G
- Gomez de Castro, Ana ; Pudritz, Ralph E. 1992 *ApJ* 395 501G
- Gómez GC, Vázquez-Semadeni E., Zamora-Avilés M., 2018 *MNRAS* 480 2939
- Grenier, I. A. és mtsai. 1989 *ApJ* 347 231
- Griffin M. J., Abergel A., Abreu A. és mtsai. 2010 *A&A* 518 L3
- Hartmann L. 2002. *ApJ*. 578 914
- Heiles, Carl E. 1968 *ApJ* 151 919H
- Hennebelle, P. és Falgarone, E. 2012, *A&ARv*, 20, 55
- Heyer, M. ; Soler, J. D. ; Burkhart, B. 2020 *MNRAS* 496 4546H
- Heyer, M. H. és mtsai. 1987 *ApJ* 321 370H
- Hildebrand R. H. és mtsai 2000 *PASP* 112 1215
- Hildebrand RH, Kirby L., Dotson JL, Houde M. és Vaillancourt JE 2009 *ApJ* 696 567
- Jones, T. W., Ryu, D., & Tregillis I. L. 1996, *ApJ*, 473, 365
- Jow D. L. és mtsai. 2018 *MNRAS* 474 1018
- Kiss és mtsai. 2006 *A&A* 453 923

Könyves, V., André, P., Men'shchikov, A., és mtsai. 2015, [A&A, 584, A91](#)

Kun M, Prusti T. 1993 [A&A 272 235K](#)

Kirk, J. M., Ward-Thompson, D., Palmeirim, P., és mtsai. 2013, [MNRAS, 432, 1424](#)

Laura M. Fissel és mtsai 2016 [ApJ 824 134](#)

Laura M. Fissel és mtsai 2019 [ApJ 878 110](#)

Lazarian A. and Thiem Hoang 2007 [ApJ 669 L77](#)

Lazarian A. és Hoang T. 2008 [ApJL 676 L25](#)

Lee J.-E., Di Francesco J., Bourke TL, Evans NJII, Wu J., 2007, [ApJ, 671, 1748](#)

Li H.-b., Goodman A., Sridharan T. K. és mtsai. 2014 [Protostars and Planets VI](#) (Tucson, AZ: Univ. Arizona Press)

Lynds, B. T. 1962 [ApJS 7 1](#)

Mac Low és mtsai. 1994 [ApJ 433 757](#)

Mardia K. V., Jupp P. E., 1999, [Directional Statistics](#). Wiley, New York, p. 93

McKee, Christopher F., Ostriker, Eve C., 2007 [ARA&A 45 565M](#)

Moneti, A. és mtsai. 1984 [ApJ 282 508M](#)

Nicholas L. Chapman és mtsai 2013 [ApJ 770 151](#)

Pasztor és mtsai. 1993 [A&A 268 108P](#)

Patrick Hartigan and Scott J. Kenyon 2003 [ApJ 583 334](#)

Patrick K King, Che-Yu Chen, L M Fissel, Zhi-Yun Li 2019 [MNRAS 490 2760](#)

Paul F. Goldsmith és mtsai 2008 [ApJ 680 428](#)

Planck Collaboration 2013 XI 2014 [A&A 571A 11P](#)

Planck Collaboration 2015 [A&A, 576 A104](#)

Planck Collaboration Int. XIII. 2016 [A&A 594A 13P](#)

Planck Collaboration Int. XXXV. 2016, [A&A, 586, A138](#)

Plaszczynski, S. és mtsai. 2014 [MNRAS 439 4048P](#)

Poglitsch A., Waelkens C., Geis N. és mtsai. 2010 [A&A 518 L2](#)

Polychroni, D., Schisano, E., Elia, D., és mtsai. 2013, [ApJ, 777, L33ü](#)

Robert C. Kennicutt Jr, Neal J. Evans II 2012 [ARA&A 50 531K](#)

Robi Banerjee and Ralph E. Pudritz 2007 [ApJ 660 479](#)

Rohlf, K.; Wilson, Thomas L. 2004 [tra book R](#)

Sato F., Mizuno A., Nagahama T., Onishi T., Yonekura Y., Fukui Y., 1994, [ApJ, 435, 27](#)

Sharma E. és mtsai. 2021, [A&A, 658 \(2022\) A55](#)

Soler J. D., P. Hennebelle [A&A 607, A2](#) (2017)

Soler, J. D. 2019 [A&A 629, A96](#)

Soler, J. D. és mtsai. 2019 [A&A 622 A166](#)

Soler, J. D., Hennebelle, P., Martin, P. G., és mtsai. 2013, [ApJ, 774, 128](#)

Stutz, A. M., Bieging, J. H., Rieke, G. H., és mtsai. 2007, [ApJ, 665, 466](#)

Sven Van Loo és mtsai 2014 [ApJ 789 37](#)

Szilagyi és mtsai. 2021 [MNRAS 505 5164](#)

Takeru K. Suzuki and Shu-ichiro Inutsuka 2009 [ApJ 691 L49](#)

Thiem Hoang and A. Lazarian 2009 [ApJ 697 1316](#)

Toth, L. V. ; Walmsley, C. M. 1996 [A&A 311 981T](#)

Toth L. V. és mtsai. 2004 [A&A 420 533T](#)

Toth L. V. és mtsai. 2020 [IAUS 345 333T](#)

Troland, T. H. és mtsai. 1996 [ApJ 471 302T](#)

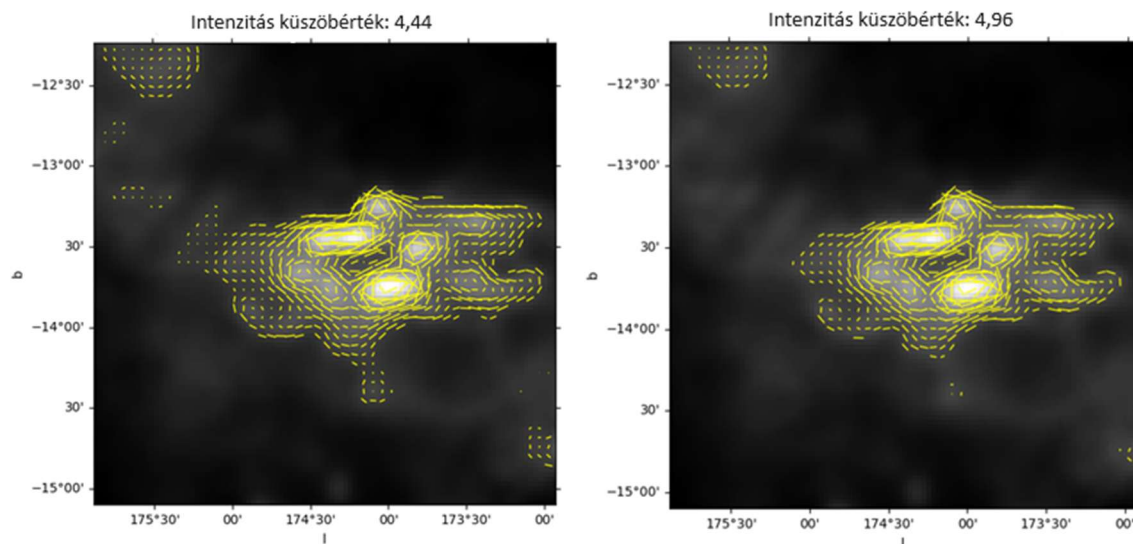
Ward-Thompson, D., André, P., Crutcher, R., és mtsai. 2007a, [Protostars and Planets V, 33](#)

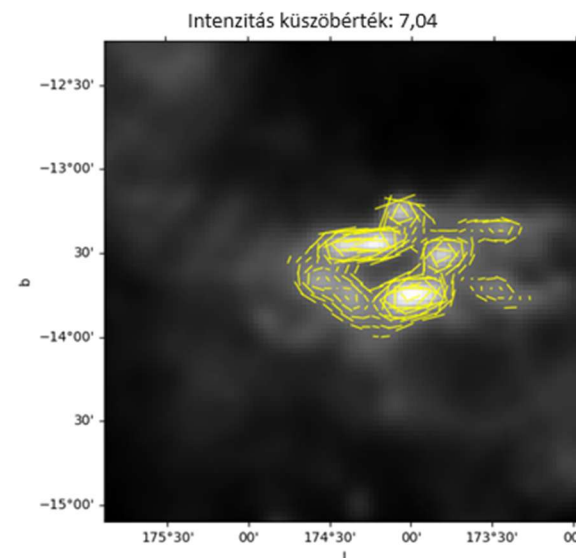
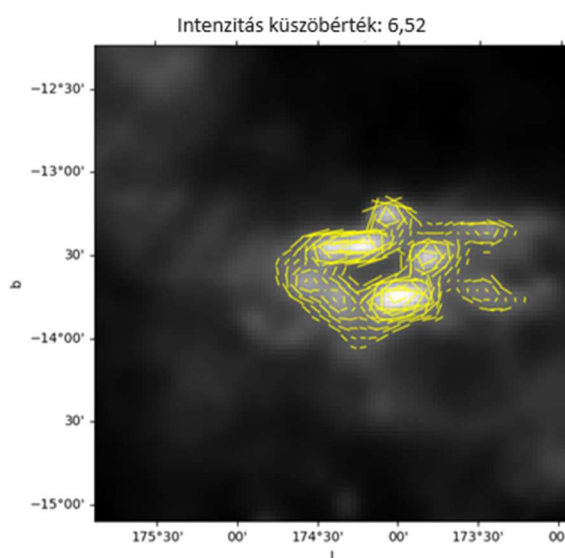
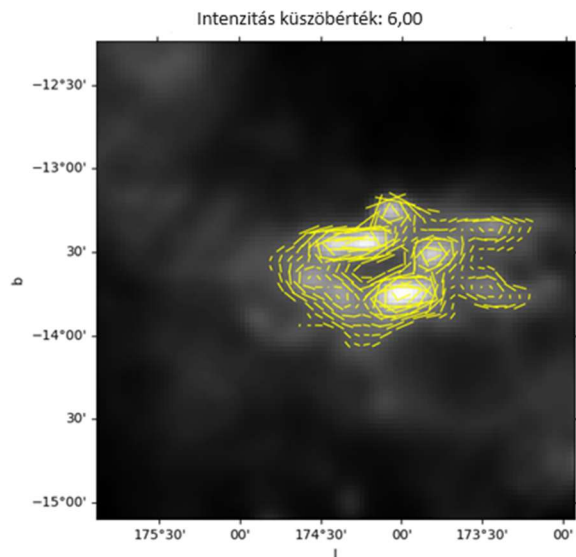
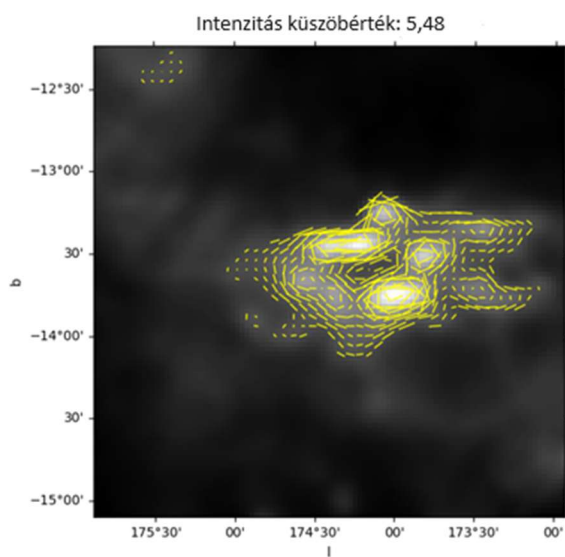
Wolf C. és mtsai. 2004 [A&A 421 913W](#)

Függelék

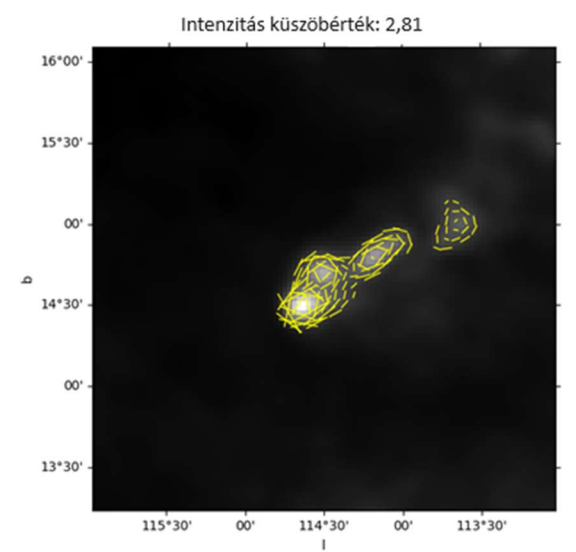
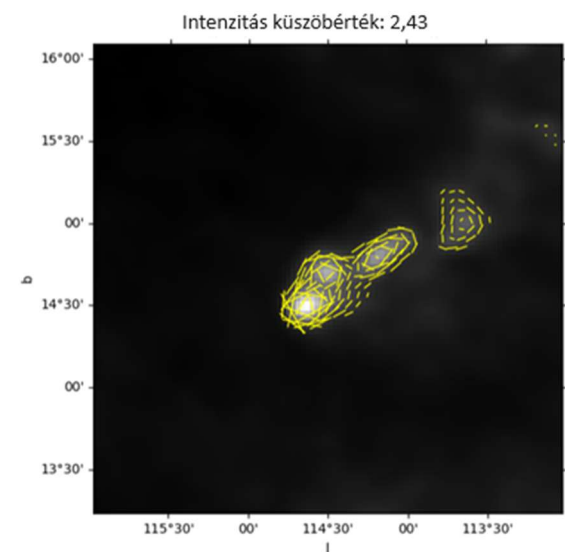
A megfelelő küszöbintenzitás kiválasztása elengedhetetlen ahhoz, hogy a kívánt területeken pontosan ábrázolhassuk az adatokat, és megbízható eredményeket kapjunk a további elemzések során. A folyamat során a programkódokat úgy készítettem el, hogy különböző küszöbértékek alkalmazásával több lehetséges változatot jelenítsen meg. Ezeket a vizualizációkat egymással összehasonlítva értékeltem, és kiválasztottam azt a küszöbértéket, amely leginkább megfelelt az adott kutatási célkitűzéseknek és a vizsgált terület jellemzőinek. A kiválasztott érték biztosította, hogy az adatok a kívánt régióban legyenek reprezentatívak, miközben minimalizáltam a nem releváns vagy zajos területek hatását. Itt mutatom be mindkét felhő esetén a többi küszöbértékkel kapott ábrázolást, amely nem került kiválasztásra, de az általam választott érték körül találhatók.

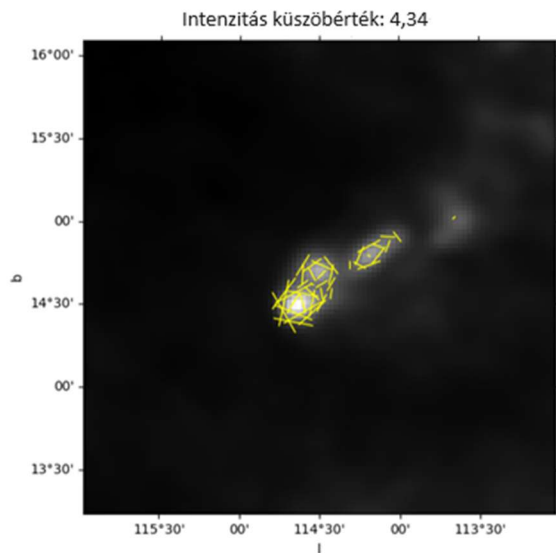
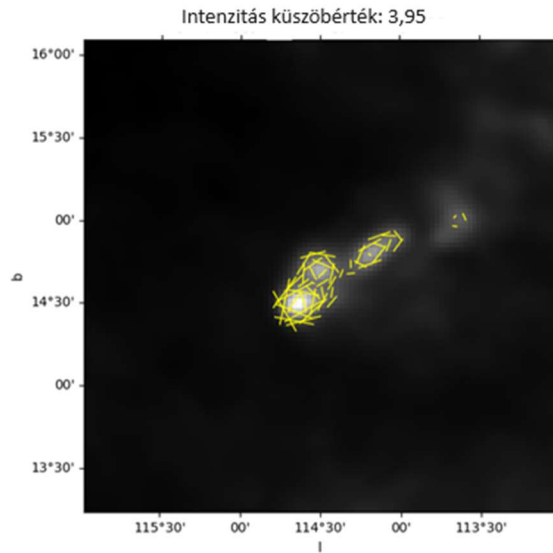
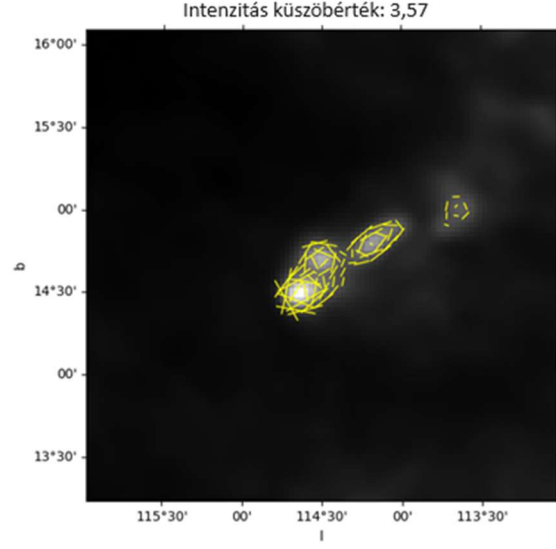
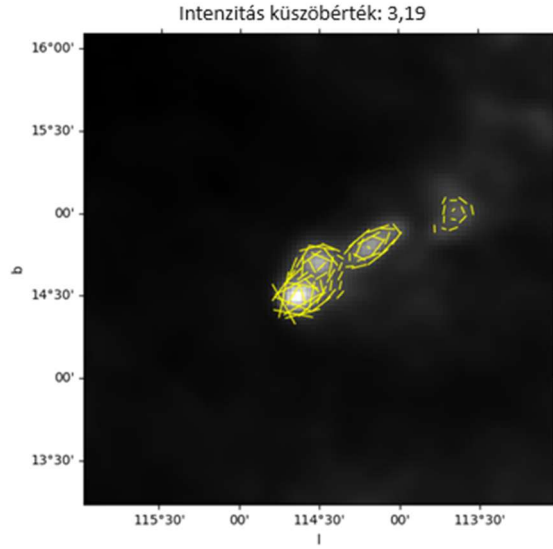
HCL 2 sűrűséggradiens vektorai:



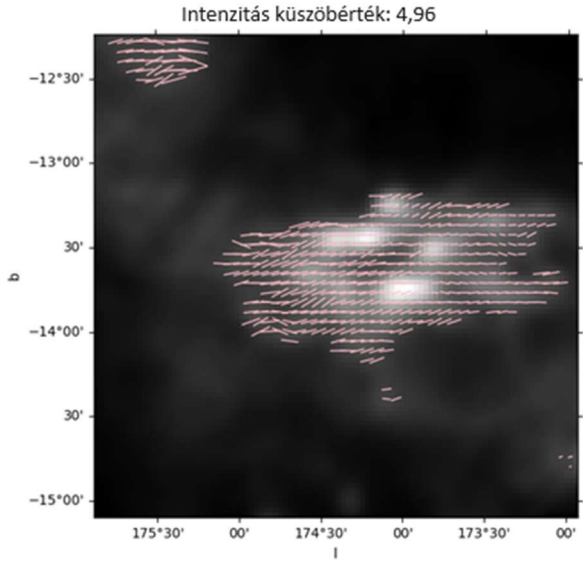
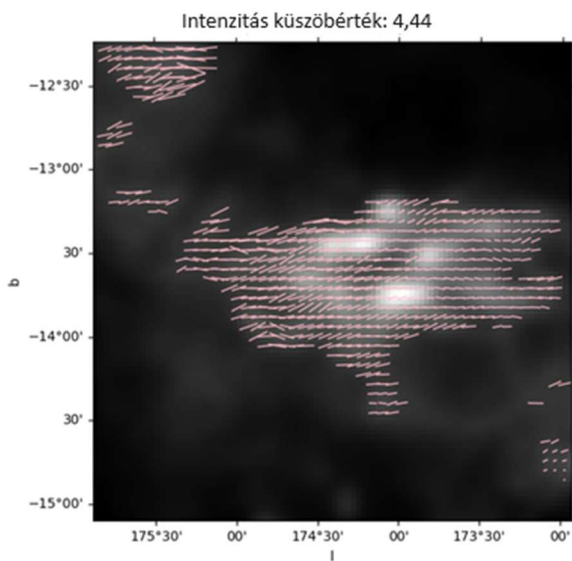


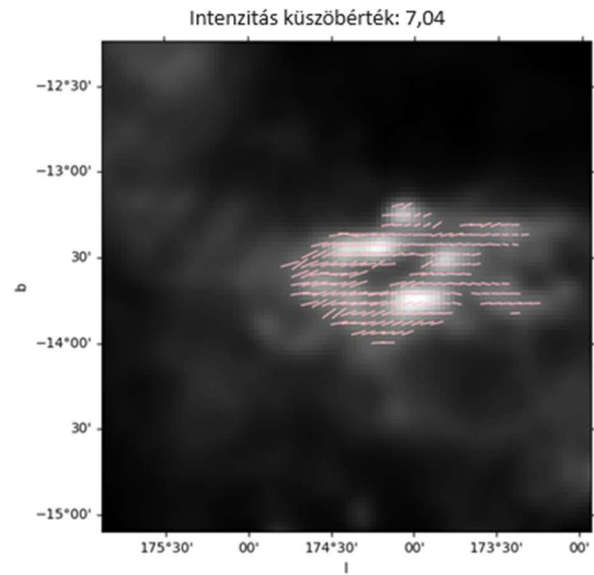
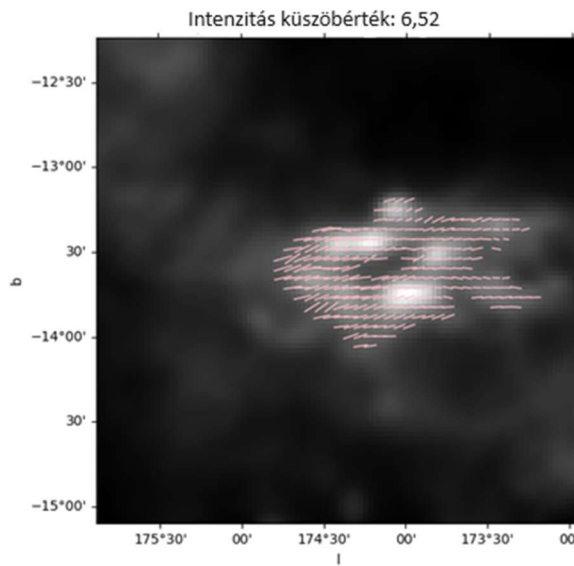
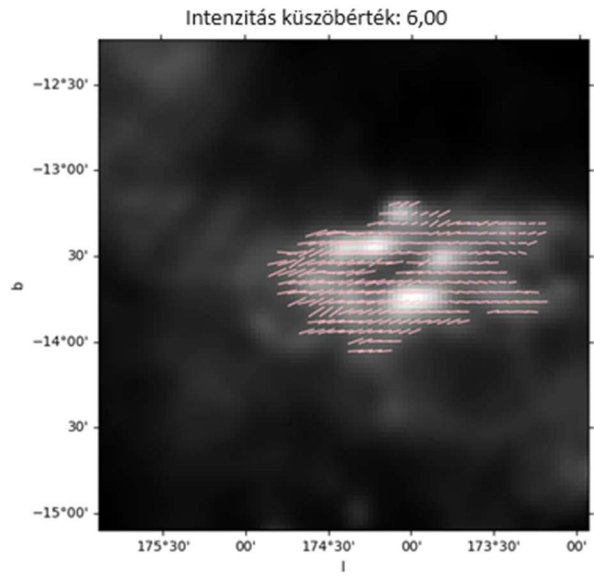
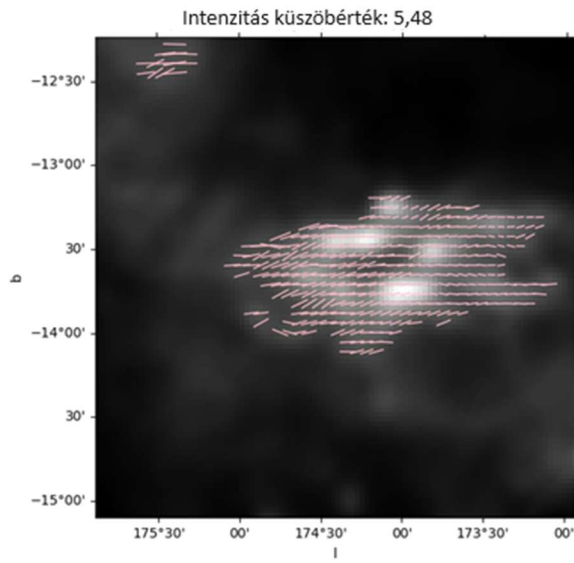
LDN 1251 sűrűséggradiens vektorai:





HCL 2 mágneses tér vektorai:





LDN 1251 mágneses tér vektorai:

