

Eötvös Loránd Tudományegyetem

Csillagközi por-és gázfelhők:

Hol alakulnak ki a közeli csillagok?

Tudományos Diákköri Dolgozat

Molnár Dániel Csaba, csillagász MSc I. évfolyam

Rácz István, csillagász MSc I. évfolyam

Témavezető:

Tóth L. Viktor, adjunktus, ELTE Csillagász Tanszék

Fehér Orsolya, doktorandusz, ELTE Csillagász Tanszék

Budapest, 2013

Kivonat

A Planck űrobszervatórium[23] mérései alapján a nemzetközi Galactic Cold Cores kutatócsoport 108 hideg felhőmagot jelölt ki a csillagkeletkezés és korai csillagfejlődés Herschel űrtávcsővel[26] való tanulmányozására[8]. Ezen együttműködés részeként a célterületek fiatal csillag tartalmát kezdtük el felmérni a WISE[20] és az AKARI[15] űrszondák adatait felhasználva és kiegészítve más archív katalógusok[10][12][11][14][13] adataival. Célunk új források megtalálása és Lada-féle klasszifikálása[3] volt. A magyar résztvevők által vizsgált 66 felhőmagból 29 adatgyűjtését végeztük el. A klasszifikáció szerinti eloszláshoz és egyéb statisztikák felállításához azonban mind a 66 clump eredményeit felhasználtuk. Itt meghatároztuk, hogy 873 objektum ténylegesen fiatal csillag. Az egyik gazdagabb csillag tartalmú területről (G10.20+2.39) a Herschel intenzitástérképeit felhasználva hőmérséklet- és hidrogén oszlopsűrűség eloszlás térképeket készítettünk. Ezeken ábrázoltuk az általunk azonosított fiatal csillagszerű objektumokat. 15 itt látható forrás spektrális energiaeoszlás diagramjait a Robitaille és munkatársai által kifejlesztett online SED fitting tool[6] segítségével modelleztük. Ez 9 esetben volt eredményes, így meghatároztuk ezen források fizikai paramétereit (tömeg, kor, hőmérséklet, sugár, korong tömege és akkréciós rátája). 2 forrás korábban is ismert volt, de mi most megadtuk például a csillag tömegét, korát és sugarát is.

Tartalomjegyzék

1. Áttekintés	1
2. Bevezető	3
2.1. A csillagközi anyag	3
2.2. Csillagkeletkezés	4
2.3. Korai csillagfejlődés, Lada-osztályok	5
2.4. SED modellezés	7
2.5. Vizsgált területek	8
2.6. Statisztikus válogatás	10
2.7. Magyar eredmények a témában	10
3. Adatok	12
3.1. Égboltfelmérések látható és infravörös tartományban	12
3.2. Az AKARI és WISE űrobszervatóriumok	12
3.3. Planck és Herschel űrobszervatóriumok	14
4. Adatfeldolgozás	15
4.1. Előkészületek	15
4.2. Adatgyűjtés	16
4.3. Spektrális energiaszlás diagramok	18
4.4. Klasszifikáció és modellezés	19
4.5. Oszlopsűrűség eloszlás	20
5. Eredmények	23
5.1. Fiatal csillagok	23
5.2. A G10.20+2.39-es felhő vizsgálata	27

6. Diskusszió	36
6.1. Fiatal csillag tartalom	36
6.2. A G10.20+2.39-es mező adatainak elemzése	37
7. Összefoglalás	38
8. Kitekintés	40
8.1. A kutatáshoz kapcsolódó információk	40
8.2. Felhasznált szoftverek	45
9. Köszönetnyilvánítás	46
10. Melléklet	53
10.1. Modellezett fiatal csillagok	53
10.2. Az általunk készített SED-ek:	55

1. Áttekintés

A Tejútrendszer alkotó csillagok csillagközi anyagból állnak össze főként óriás molekulafelhőkben. A felhők anyageloszlása inhomogén, belsejükben a környezetükhöz képest sűrűbb és hidegebb magok és csomók vannak. A felhőn belül ezekben zajlik a csillagkeletkezés. Ezen objektumok fizikai paraméterei és a bennük lejátszódó fizikai folyamatok alapvetően meghatározzák a bennük keletkező fiatal csillagpopuláció tulajdonságait, ezért ezek megértése és tanulmányozása nagyon fontos tudományos probléma. A fiatal források és a körülöttük található por megfigyelésére sugárzásuk és szórásuk miatt főként az infravörös és szubmilliméteres, részben pedig az optikai tartomány alkalmas. Az elmúlt évtizedek, de főleg a közelmúlt nagy lefedettségű infravörös és szubmilliméteres űrcsillagászati mérései (például az IRAS[12], AKARI[15], Planck[23], WISE[20] és Herschel[26] missziók) által szolgáltatott adatok lehetővé teszik a Tejútrendszerbeli csillagkeletkezési régiók széleskörű tanulmányozását. Munkánkat a nemzetközi Galactic Cold Cores kutatási program keretein belül végeztük. A csoport alapvető célkitűzései között szerepel a csillagkeletkezés pontosabb megértése és ezzel kapcsolatosan a kezdeti tömegfüggvény (Initial Mass Function, IMF) pontosítása. Kutatásunk során 66 darab, a csoport által vizsgált csillagkeletkezési terület fiatal csillagpopulációját térképeztük fel elsősorban a WISE és az AKARI űrobszervatórium adatai segítségével. Az így felfedezett 1020 darab fiatal forrást klasszifikáltuk, majd egy forrásokban gazdag, eddig részletesen nem vizsgált felhőben néhányat modelleztünk a spektrális energiaszórásuk (Spectral Energy Distribution, SED) alapján. így megbecsülhettük azok fizikai paramétereit (pl. tömeg, hőmérséklet, korong méret, stb.).

Dolgozatunk következő fejezetében áttekintjük a kutatásunkhoz szerve-

sen kapcsolódó tudományos előismereteket, a vizsgált területeket, a munka során alkalmazott válogatási módszert és modellt, ezután részletesen ismertetjük a felhasznált adatok gyűjtésének és feldolgozásának módszerét, majd bemutatjuk a kapott eredményeinket és végül kiértékeljük ezeket.

2. Bevezető

2.1. A csillagközi anyag

A csillagközi anyag tömegének 1%-a por, a maradék gáz. Galaxisunkon belül főleg a korongban, azon belül is a spirálkarok mentén található, a korong tömegének 10-15%-át adja. Kémiai összetétele a kozmikus elemgyakorisághoz hasonló, ezért közel 70%-ban hidrogénből áll. Két fázisra bontható. Híg és meleg felhőközi anyag ($n \leq 0,2\text{cm}^{-3}$ és $T \geq 7000\text{K}$) valamint sűrű, hideg felhők ($n \geq 0,2\text{cm}^{-3}$ és $T \leq 7000\text{K}$) alkotják. A csillagközi anyag tömegének 80%-a a felhőkbe koncentrálódik, ezek azonban az intersztelláris anyag teljes térfogatának csak az 1%-át adják. A felhők tovább csoportosíthatók, így fő összetevőik szerint beszélhetünk úgynevezett HI, HII és molekulafelhőkről. A HI felhők atomos, semleges hidrogénből állnak, nem annyira sűrűek ($n < 10^2\text{cm}^{-3}$), hőmérsékletük 50 és 100 K között van, jellemző méretük 10 pc nagyságrendileg. A molekulafelhőkben a hidrogén főleg molekuláris állapotban van jelen, mivel itt elég nagy a por oszlopsűrűsége ahhoz, hogy leárnyékolja a felhő belsejét a környező csillagok UV sugárzásától, ami disszociálná a hidrogénmolekulákat. A molekulafelhők nagy mérettartományban fordulnak elő, a csillagkeletkezés szempontjából a legfontosabbak a legnagyobbak, az óriás molekulafelhők. Ezek tömege $\geq 10^4 M_\odot$, sűrűségük $10^2 - 10^3\text{cm}^{-3}$, méretük 50-100 pc és több sűrűbb magot és csomót tartalmazhatnak, ezáltal jelentős járulékot adva a galaktikus csillagkeletkezési rátához. A gravitációsan kötött magokban zajlik a magányos vagy asszociált csillagok keletkezése. A csomók nagyobb összefüggő, sűrűbb régiók a felhőn belül. Ezekben keletkezhetnek csillaghalmazok. Látszik, hogy ezen struktúrákban zajló folyamatok pontos megértése elengedhetetlen a csillagkeletkezés és korai csillagfejlődés részletes megértéséhez, ezek pedig szoro-

san kapcsolódnak például a galaxisok felépítéséhez, fejlődéséhez valamint a bolygórendszerek kialakulásához. További információkért hivatkozunk Fehér Orsolya diplomamunkájára.[1]

2.2. Csillagkeletkezés

A csillagkeletkezés egy felhőbeli lokális sűrűségmaximum gravitációs összehúzódásával kezdődik. Ezt a mágneses tér, a felhő turbulenciája és a részecskék hőmozgása akadályozza. Ha azonban a mag átlép egy kritikus sűrűséget (spontán vagy külső tényező hatására), akkor a szabadesési időskálán gravitációs kollapszus következik be. Ekkor a gáz még optikailag vékony, így a gravitációs összehúzódásból felszabaduló energiát elsugározza teljesen, ezért izotermális kollapszusról beszélünk. Nagyjából $10^4 - 10^5$ év után a mag közepe annyira besűrűsödik, hogy a saját hőmérsékleti sugárzására infravörös tartományban átlátszatlan lesz, ezért elkezd melegedni, és emiatt nő a nyomása is, majd hidrosztatikai egyensúlyba kerül. A mag összehúzódása leállt, a továbbiakban kívülről akkretál anyagot. Ekkor nevezzük protocsillagnak. Kezdetben a protocsillagot optikailag átlátszatlan, behulló por és gáz veszi körül. Mivel azonban a rendszer forog, tehát az impulzusmomentuma nem zérus, az akkretált anyag korongba rendeződik a protocsillag körül.

Mikor a belső tartomány tömege eléri a kb. $0,2M_{\odot}$ tömeget, a hőmérséklete pedig a néhány millió Kelvint, beindul a deutérium fúzió. Innentől hívjuk csillagnak. A további fejlődése erősen függ a tömegétől. Mivel a fiatal csillagszerű objektumok (Young Stellar Object, YSO) tömege általában nem nagyobb $2M_{\odot}$ -nél, ezért a továbbiakban főleg ezek fejlődését tárgyaljuk.

2.3. Korai csillagfejlődés, Lada-osztályok

Az időbeli változás tanulmányozásához célszerű fejlődési stádiumok szerint csoportosítani a megfigyelt objektumokat. Természetesen ezek a felosztások nem lesznek tökéletesen pontosak, de a nagyszámú minták leírásában és így az elméletek alakításában fontos szerepük van. Fiatal csillagoknál gyakran használt klasszifikációs séma az ún. Lada-féle osztályokba való sorolás. Ezt C. Lada vezette be 1987-es cikkében[3]. A fiatal objektumok SED-jében a környező por miatt látható feketetest sugárzáshoz képest mutatott többletet vette alapul az osztályok felállításakor. Kvantitatíven az alábbi képlet szerint sorolhatóak be az infravörös források 2,2 és 25 mikron közötti sugárzásuk alapján:

$$\alpha = \frac{d\log(\lambda F_\lambda)}{d\log(\lambda)} \quad (1)$$

, ahol λ a hullámhossz, F_λ pedig az adott hullámhosszon mért fluxus, α pedig a színindex.

A színindex szerint 3 osztályt különböztettek meg:

ClassI, ha $0 < \alpha \lesssim +3$,

ClassII, ha $-2 \lesssim \alpha \lesssim 0$, és

ClassIII, ha $-3 < \alpha \lesssim -2$.

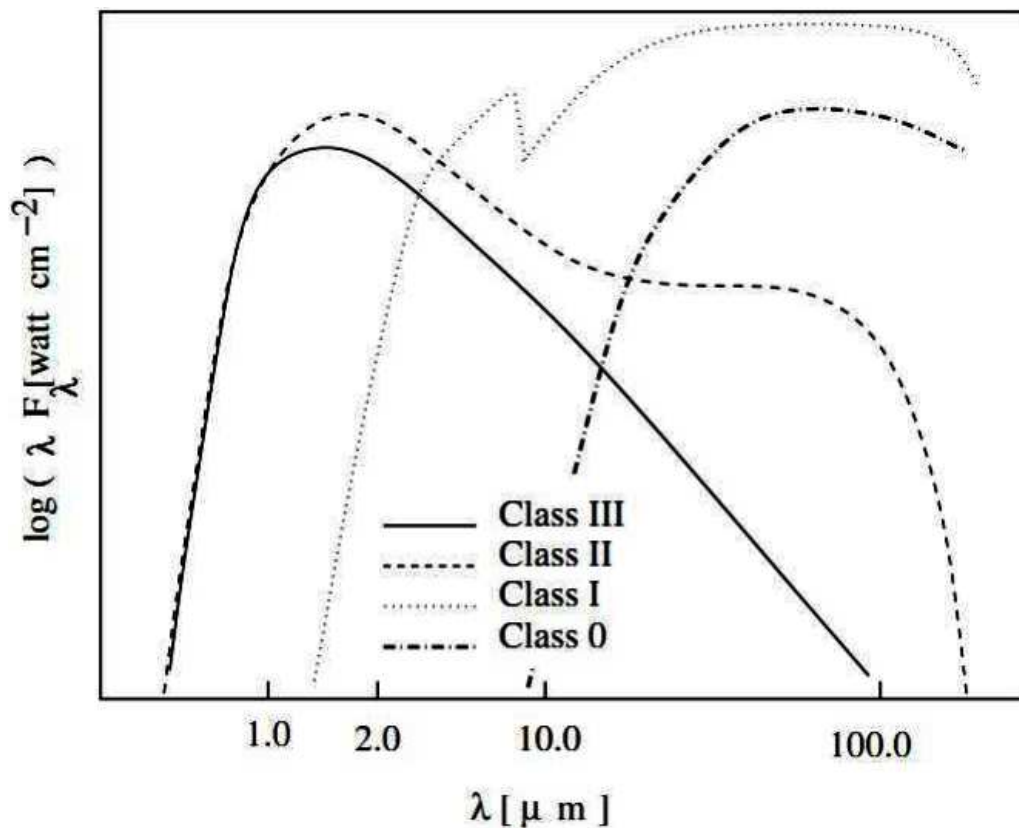
Azonban 1993-ban[4] találtak olyan forrásokat, amelyek nem látszanak közeli és közép infravörösben. Ezek lettek a Class 0 osztály tagjai. Fizikailag az előző szakasz végén tárgyalt mélyen beágyazott protocsillagok tartoznak ide. Mivel munkánk során mi is a Lada-féle klasszifikáció szerint osztályoztuk a forrásokat, az alábbiakban röviden ismertetjük az egyes Class-okkal megfeleltethető fejlődési szakaszokat.

A Class I-be sorolt objektumok jelentős sugárzási többletet mutatnak a közép és távoli infravörös tartományban a körülöttük lévő nagy mennyiségű

por miatt, emellett $10\mu m$ körül megfigyelhető a többletkehépe abszorpció, melyet a szilikátok jelenléte magyaráz. Nem tisztázott okok miatt erős bipoláris kiáramlások figyelhetők meg a forgástengelyük irányában. Statisztikai vizsgálatok szerint ez a fejlődési szakasz nagyságrendileg 10^5 -en évig tart.

A Class II csillagainál a csillagszél annyira felerősödik, hogy az optikailag vastag akkréciós korongon kívül minden anyagot kisöpörnek a csillag körül, ezért láthatóak már optikai tartományban is. A diszkben (amit itt már proplidnak is hívnak) valószínűleg ekkor indul meg a bolygóképződés. Ebben a fázisban klasszikus T Tauri csillagokról beszélünk. Szokás két alosztályra is bontani ezt a csoportot, mi ezt nem tettük meg a klasszifikációnknál. Néhányszor 10^6 évet tölt itt egy csillag, így a mintánkban több Class II-es, mint Class I-es fiatal forrást várunk.

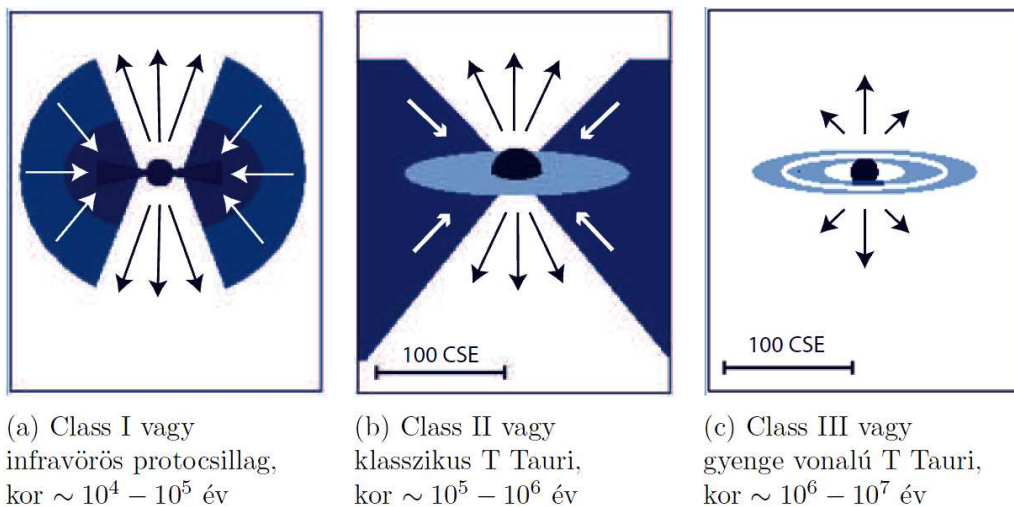
A Class III-ba soroltakat szokás poszt-T Tauri, vagy gyenge vonalú T Tauri csillagoknak nevezni. Ekkorra már a csillag akkretálta vagy elfújta a környező anyag nagy részét, így csak csekély infravörös többletet mutat. A folyamatos melegedés miatt a SED-je optikai vagy közeli infravörösben tetőzik. Ez a fázis maximum 5×10^6 évig tart. Mikor a belseje eléri a 10 millió Kelvint, beindul a magjában hidrogénfúzió, és felkerül a fősorozatra. Az 1. ábrán látható mind a négy osztály tipikus SED-je 1 és $100\mu m$ között, alatta pedig a 2. ábrán az egyes fejlődési szakaszok sematikus rajzai.



1. ábra. A 4 Lada osztály tipikus spektrális energiaszórás diagramja. Vízszintes tengelyen a hullámhossz, a függőlegesen az adott hullámhosszhoz tartozó fluxus található logaritmikus skálán.[19]

2.4. SED modellezés

Egy újabb osztályozási módszert állított elő 2006-ban Robitaille és munkatársai[5] fizikai tulajdonságok szerint. Ennek az az előnye, hogy a fiatal források SED-jéből tényleges fizikai paraméterekre vonatkozó becslést lehet tenni. A gyakorlati alkalmazáshoz 20071 darab radiatív transzfer kóddal előállított modell SED-et készítettek 10 látószögre kiszámolva. A modell 14 fizikai vagy geometriai paramétert tartalmazott, melyek három csoportba sorolhatók: a központi mag paraméterei, a közvetlenül ráhulló buroké, il-

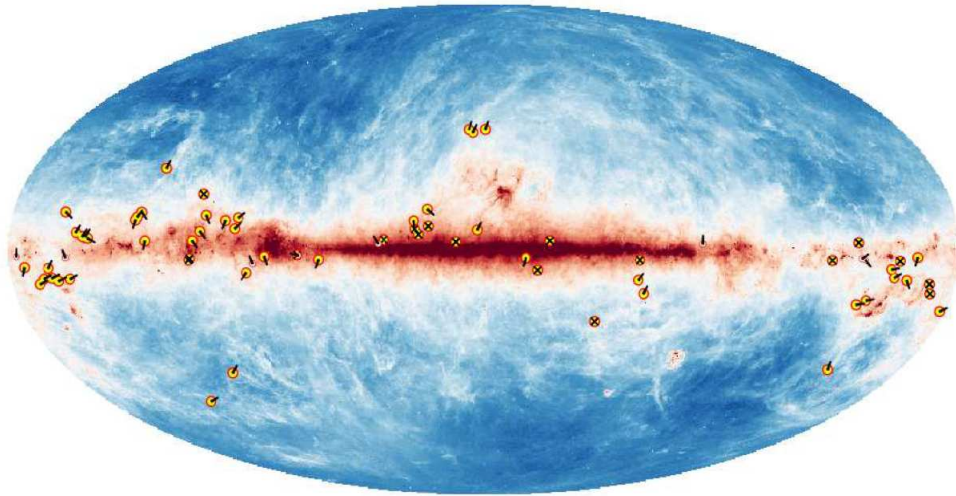


2. ábra. A Class I-II-III-as osztályokhoz tartozó tipikus fejlődési szakaszok sematikus rajzai.[19]

letve a korongé. Az elméletileg számolt spektrális energiaeloszlások fejlődési fázisokat követnek, így illeszkedve a klasszifikációhoz. Munkánk során a Robitaille-féle Online SED Fitting Toollal[6] modelleztünk 15 DB forrást, melyeknek elegendő számú jó minőségű fluxusa állt rendelkezésünkre, és ebből 9 esetben sikerült ez az elvárásainknak megfelelően. A modellezés során a program az előre kiszámolt SED-ek közül kikereste a legjobban illeszkedőket, és ezek fizikai paramétereiből adott becslést a mért spektrális eloszlást mutató objektum paramétereire.

2.5. Vizsgált területek

A Galactic Cold Core[8] program célja a Planck[23] műhold által feltárt felhőmag populáció részletes vizsgálata a Herschel[26] űrteleszkóppal (az eszközökről lásd bővebben a 3.3-as szakaszt). A megmérendő területek kiválasztásánál az volt a cél, hogy minél elfogulatlanabb mintát állítsanak elő. Ezért az IRAS[12] műhold adataival kombinált Planck-képek segítségével színhő-



3. ábra. A képen az IRAS $100\mu m$ -s felvétele látható, és rajta be van jelölve a kutatócsoport által vizsgált 108 terület. A körökben a nyilak jelölik a távolságukat. 12 óra állás jelöli a $0pc$ -t, míg egy teljes körbefordulás $2kpc$ -nek felel meg. Az ismeretlen távolságokat kereszttel jelölik. 6 darab $1,5 kpc$ -nél messzebb van, ezek kisebb körrel vannak jelölve.[8]

mérsékletet becslések minden forrásra. Távolságbecslésre több különböző módszert használtak, például ismert molekulafelhőkkel asszociáltatták a magokat részletesebben lásd Planck Collaboration et al., 2011[7]). Így hőmérséklet, tömeg, távolság és galaktocentrikus koordináták szerint önkényes határokkal felírt intervallumok szerint szétválogatták a mintegy 10000 forrást, összesen 108 csoportba. A csoportok így a paramétertérben elég nagy halmozatnak felelnek meg. Minden csoportból kiválasztottak egy-egy területet a Herschel mérések célpontjául. Munkánk során ennek a 108 régióknak a fiatal csillag tartalmát kezdtük feltárni első lépésben statisztikus válogatást alapul véve, aztán pedig AKARI[15] források vizsgálatával (lásd részletesebben 3. fejezet).

2.6. Statisztikus válogatás

Az egyes területekről kezdetben rendelkezésre állt egy lista a lehetséges fiatal csillagszerű objektumokról (lásd részletesebben az Adatok fejezet). Ez Marton Gábor (ELTE, csillagász doktorandusz) statisztikai válogatásával készült[9]. A galaxisok és fiatal csillagok spektrálindexei infravörös tartományban nehezen megkülönböztethetőek, azonban a válogatás először az AKARI, majd a WISE[20] adatait felhasználva az ún. kvadratikus diszkriminancia-analízis módszerével statisztikus alapon, ismert mintával kalibrálva előállított egy listát a valószínű fiatal csillag jelöltekkel (részletesebben lásd Marton Gábor doktori értekezését[9]). Mi ezt kiegészítettük az AKARI mérések legalább két jó minőségű fluxust tartalmazó forrásaival (részletesebben lásd Adatok fejezet).

2.7. Magyar eredmények a témában

A teljesség igénye nélkül felsorolunk néhány fontos magyar eredményt dolgozatunkhoz kapcsolódó területeken.

A csillagkeletkezés és fiatal csillagok kutatásának egyik legkorábbi magyar eredménye a T Tauri csillagok színekélelemzéséből született. Jankovics István és munkatársai T Taurik spektrumában akkréciós koronggal magyarázható kékeltolődást mutattak ki[37].

Kun Mária közeli molekulafelhőkben talált fiatal csillag jelöltek[38].

A Konkoly Obszervatórium munkatársai már az IRAS adatfeldolgozásában is részt vettek. Azóta a Konkoly Infrared Space Astronomy Group (KISAG) infravörös műholdak (ISO, Herschel) adataival is dolgozva vizsgálja például az infravörös háttér (állatövi fény, cirrus)[39], a csillagkeletkezést (T Tauri és FU Orionis csillagok)[40] továbbá a bolygók illetve porkorongok

közi kapcsolatot[41].

Könyves Vera és munkatársai szintén Herschel mérésekkel presztelláris magok kezdeti tömegfüggényét határozták meg, hogy kapcsolatot találjanak a csillagok kezdeti tömegfüggvényével[42]

Könyves Vera, Kiss Csaba, Moór Attila, Kiss Zoltán és Tóth L. Viktor távoli infravörösben hurkos, íves struktúrák teljes égbolt katalógusát elkészítve és vizsgálva megállapította, hogy alacsony galaktikus szélességeken elsősorban szupernóvák és csillagszelek alakítják a csillagközi anyag struktúráját, a galaxis síkja felett pedig szuperszónikus turbulenciák[43].

Balog Zoltán munkatársaival többek közt az Early Phases of Star Formation Key Programme részeként Herschel mérésekből előállított térképekkel vizsgálta izolált csillagkeletkezési felhők szerkezetét és tulajdonságait[46].

Zahorecz Sarolta és Fehér Orsolya diplomamunkáikban az AKARI FIS katalógus segítségével fiatal csillagok fizikai paramétereit modellezte[1][2].

Marton Gábor doktori dolgozatában színindexeik és fényességük alapján statisztikai válogatással keres fiatal csillagszerű objektumokat az AKARI és WISE űrszondák adatai közt[9]

Tóth L. Viktor és munkatársai a Taurus Molekuláris Gyűrű csillagkeletkezésével is foglalkozott[44], illetve az ISOPHOT felmérés során detektált hideg felhőket és magokat[45]. Ezeknek is köszönhetően kapott meghívást a Galactic Cold Core csoport munkájába, melynek így a mi kutatásunk is része.

3. Adatok

Fiatal csillagok és a környezetükben látható gáz és por megfigyelése főleg optikai, infravörös, szubmilliméteres és rádiótartományban lehetséges. Munkánk során több ilyen projekt adatait is használtuk, az alábbiakban ezek rövid bemutatása következik.

3.1. Égboltfelmérések látható és infravörös tartományban

Az elmúlt évtizedekben több infravörös égboltfelmérés is zajlott. Adatgyűjtésünköz felhasználtuk az IRAS[12] műhold adatait, mely az első infravörös tartományú teljes égbolt megfigyelést szolgáltatta 1983-ban. Valamint felhasználtuk a Spitzer[11] űrteleszkóp (2003-2009) méréseit és a 2MASS[10] (1997-2001) képeit. Mind közül a 2MASS mérés fedte le legjobban a látható égboltot. Az IRAS[12] $12\ \mu m$ -tól $100\ \mu m$ -ig, a Spitzer[11] ami $3,6\ \mu m$ -tól $160\ \mu m$ -ig, A 2MASS[10] a közeli infravörösben J,H és K szűrőkkel mért. A munkánk kiindulását jelentő válogatás alapjait (lásd 2.6 Statisztikus válogatás fejezet) az AKARI[15] és WISE[20] űrobszervatóriumok mérései adták, a továbbiakban majd ezekkel foglalkozunk részletesebben.

Ezenfelül szükségünk volt még a látható tartományokban készült mérési adatokra is. Ilyen adatok katalógusa az USNO-B1[13] és a NOMAD[14] katalógusok.

3.2. Az AKARI és WISE űrobszervatóriumok

Az AKARI műholdat 2006-ban a JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) bocsátotta fel. A műholdon megtalálható egy közép (IRC, Infrared Camera)[17] és egy távoli infravörösben (FIS, Far-Infrared Surveyor)[16] ér-

zékeny kamera is. Az előbbi $9\mu m$ és $18\mu m$ -en, utóbbi $65\mu m$, $90\mu m$, $140\mu m$, és $160\mu m$ -en mér. Minden AKARI mérésnek van egy úgynevezett quality flag-je, ami azt jelzi, milyen minőségű volt a mérés. Ha az érték 0, akkor azon a hullámhosszon nem észleltek forrást, 1-es flag jelzi, hogy csak felső korlátos az adat, 2-es, hogy megerősített forrás, 3-as pedig hogy nagyon jó minőségű. Bővebb információért hivatkozunk Fehér Orsolya és Lisztes Mónika „Fiatal csillagok modellezése az Orion-ködben az AKARI/FIS katalógus és archív katalógusok alapján” című TDK dolgozatára [18].

A WISE (Wide-field Infrared Survey Explorer)[20][21] műholdat 2009 december 14.-én lőtte fel a NASA. 4 hullámhosszon mért az eszköz, $3,4\mu m$ (W1), $4,6\mu m$ (W2), $12\mu m$ (W3) és $22\mu m$ -en (W4). A 40cm-es kriogén hűtésű távcső, a 413 napos működése alatt 6240-szer került meg a Földet, és több, mint 500 millió objektumról készített felvételt, amely 18240 képen található. A felmérésből 2 katalógust publikáltak. Az elsőt 2011-ben [22] (több, mint 2,5 millió objektumot tartalmazott), a másodikat 2012-ben [21], mely a végleges 563 921 584 darab objektumot tartalmazta.

3.3. Planck és Herschel űrobservatóriumok

Az Európai Űrügynökség (ESA, European Space Agency) 2009 május 14.-én felbocsátotta a Planck műholdat[23], a Herschel űrtávcsővel együtt a Földtől 1,5 millió km-es távolságba, az L2 Lagrange-pontba. A Planck műhold rádiótartományban észlel, és fő feladata a kozmikus háttérsugárzás irány szerinti tanulmányozása. Emiatt a műhold képes a csillagközi gáz és porfelhők hideg magjait is mérni, amik szintén sugároznak a rádiótartományban. Az eszközt kriogenikus hűtéssel látták el, ami 20 K-re hűti a távcsövet. A műhold mérési tartománya $350\mu m$ -tól egészen 10 mm-ig terjed (frekvenciában 30–857 GHz). Ezen mérési tartományban 2 eszköz mér, a egyik az LFI (Low Frequency Instrument)[24] 30-70GHz-ig 3 sávban észlel (30, 44 és 70GHz), a másik a HFI (High Frequency Instrument) 100–857GHz-ig 6 sávban észlel (100, 143, 217, 353, 545 és 857GHz)[25].

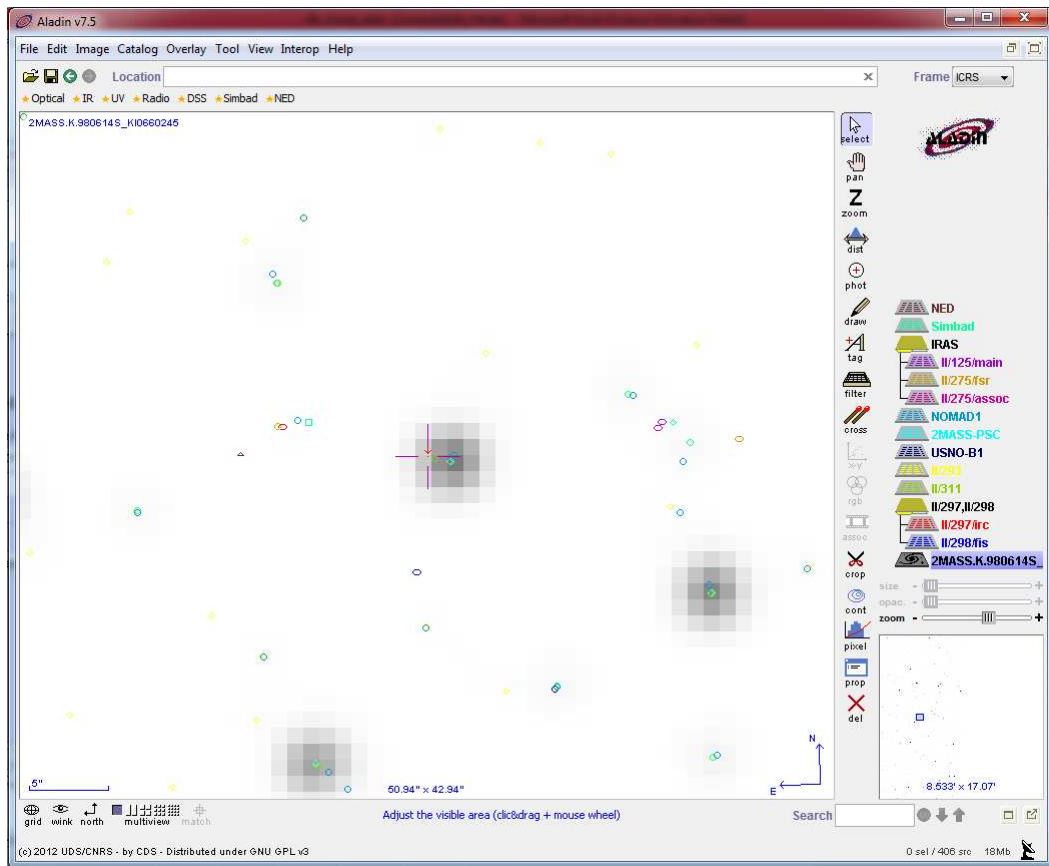
A Herschel űrobservatóriumot [26] a Planck-kal együtt lőtték fel. A Herschel infravörös távcső egy 3,5 méteres főtükörű Cassegrain távcső, mely $55\text{--}671\mu m$ közötti tartományban észlel. A távcső 3 eszközt is tartalmaz. A PACS (Photodetector Array Camera and Spectrometer)[27] fotódetektor és alacsony és közepes felbontású spektrométert, a SPIRE (Spectral and Photometric Imaging REceiver)[28] alacsony és közepes felbontású spektrofotómetert, és a HIFI (Heterodyne Instrument for the Far Infrared)[29] nagy felbontású spektrométert. A mérési tartományában 6 sávban tud így észlelni, rendre 70, 100, 160, 250, 350, és $500\mu m$ -en. A PACS és SPIRE egymást kiegészítve észlel, míg a HIFI külön észleléseket végez.

4. Adatfeldolgozás

4.1. Előkészületek

A kutatásunk során olyan pontforrásokkal dolgoztunk, melyeket a Marton Gábor által írt válogató algoritmus kiválasztott (lásd 2.6-os fejezet), mint lehetséges YSO (Young Stellar Object, azaz fiatal csillagszerű objektum), valamint ezt kiegészítve vizsgáltunk minden olyan pontforrást, melyek a vizsgált mezőkön belül 2 db minimum 2-es minőségű AKARI-FIS fluxussal rendelkeztek (lásd. 3.2-es fejezet).

A kutatás során az összes vizsgált mezőre megkaptuk Marton Gábortól az általa potenciálisan fiatal csillagnak kiválogatott objektumok listáját (továbbiakban statisztikai válogatás lista). Ezt mi kiegészítettük az adott területen található elegendő jó fluxusminőséggel rendelkező AKARI forrásokkal, amiket a válogatás nem jelölt meg YSO-nak. A kiegészítés során az Aladin[30] nevű szoftvert használtunk. A programba betöltöttük a vizsgált felhő 2MASS K sávban készült képét, majd erre a területre lekértük az összes AKARI-FIS forrást. Ezek után létrejött egy táblázat mely tartalmazta a terület összes olyan forrását amit az AKARI műhold távoli infravörösben észlelt. Mi ebből a listából kiválogattuk a megfelelően jó fluxusminőséggel rendelkező pontforrásokat, majd ezt a táblázatot elmentettük (továbbiakban AKARI-FIS lista).



4. ábra. Az Aladin programba betöltött 2MASS katalógusbeli K sávban készült kép az adatkereséshez lekérdezett katalógusokkal az IRAS 17571-1834 jelű környezetében. A kezelőfelületen jobbra látszanak a katalógusok nevei. A terület kb. $50'' \times 50''$ nagyságú, ezen kerestünk asszociáltatható adatokat.

4.2. Adatgyűjtés

A potenciális fiatal csillag listákon lévő minden egyes forrásunkhoz kellett keresni más hullámhosszakon mért értékeket, a spektrális energaeloszlás diagramjuk (SED) elkészítéséhez. A Vizier[31] adatbáziskezelő program segítségével kértük le ezen adatokat. Mivel több különböző mérésről van szó, ezért valószínűsíthető, hogy a koordinátákban pontatlanságok lesznek, például az AKARI

műhold beam mérete 40", az IRAS műholdé pedig nagyobb, mint 60". Tehát minden keresésnél a meglévő AKARI illetve WISE koordináták körül egyezés alapján 40"-es területben vizsgáltunk. A feladat az volt, hogy a lehető legközelebbi, jónak tűnő adatot asszociáltassuk a forrásunkkal. A jónak tűnő azt jelenti, hogy több mérésnél is volt, hogy 1-2 hullámhosszon átfedtek az adatok, így volt olyan fluxus vagy magnitúdó adatunk, amiknek meg kellett egyeznie, mind a kettő mérésben.

A forrásaink asszociált adatait egy táblázatban tároltuk. A táblázat tartalmaz olyan adatokat, amikre még nem volt szükség, de a közeljövőben lezajló kutatáshoz már azok is szükségesek. Erről a kitekintés részben írtunk kicsit részletesebben. A különböző mérések nem egységesen kezelik az objektumok fényességét, így hol magnitúdó hol fluxusmértékegység (mJy) értékek szerepeltek. A magnitúdót a következő képlet segítségével váltottuk át Jy-re:

$$F_\nu = F_0 \cdot 10^{-\frac{mag}{2,5}} \quad (2)$$

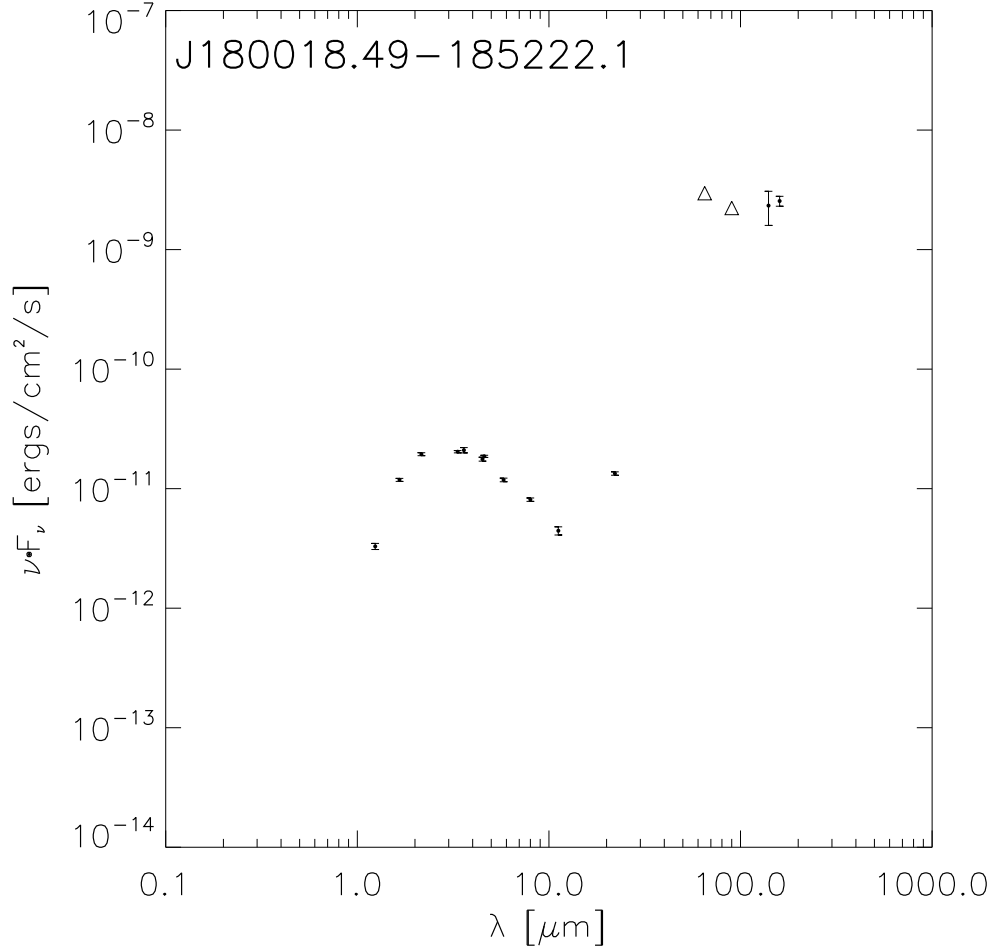
, ahol F_0 az adott hullámhosszú 0 magnitúdóhoz tartozó fluxus[32], mag pedig az adott hullámhosszon mért magnitúdóérték.

A forrásainkat nem csak Vizier adatbázisban kerestük meg, hanem az Aladin szoftverben is megnéztük. Itt háttérnek a 2MASS K sávú közeli infravörös képét betöltve kizárhatjuk a kiterjedt forrásokat, valamint a kettős és többes rendszereket. Ezen felül minden forrást megpróbáltunk megkeresni a Simbad[33] nevű adatbázisban, mely tartalmazza azon azonosított források listáját, amiről valamilyen referencia adatunk, nevünk van. A mi kutatásunk során a forrásaink elenyésző része volt megtalálható itt, mint azonosított fiatal objektum, ami azt jelenti, hogy az általunk vizsgált pontforrások 90-95%-a egy újabb azonosított fiatal csillag. Amennyiben rendelkezünk Simbad-beli adattal, feljegyeztük a nevét (mivel akkor az objektumnak ez a hivatalos neve), valamint a típusát. Ilyen típus lehetett például, hogy „IR” azaz inf-

ravörös forrás, vagy „Radio source”, azaz rádió forrás.

4.3. Spektrális energiaszlás diagramok

Most, hogy elkészült az adattáblánk a következő feladat az adatainkból spektrális energiaszlás diagramokat (továbbiakban SED), készíteni. Erre az IDL szoftvert használtuk. Készítettünk egy vezérlőprogramot, aminek megadtunk 2 bemeneti fájlt (egy névlistát, és egy adattáblát) melyből az IDL elkészítette az adott területen levő forrásaink SED-jeit. A program a névlistából vette ki a forrás nevét (a már korábban ismert forrásnál a referencia nevet, vagy ha ez nem volt a WISE illetve AKARI azonosítót). Az 5. ábrán látható egy ilyen SED.



5. ábra. A J180018.49-185222.1 WISE objektum IDL által készített SED-je. A vízszintes tengelyen a hullámhossz szerepel, a függőleges tengelyen pedig a fluxus. Jelölés: a teli körök függőleges vonallal jelentik a megbízható fluxust hibával, a háromszögek a felső korlátos adatokat.

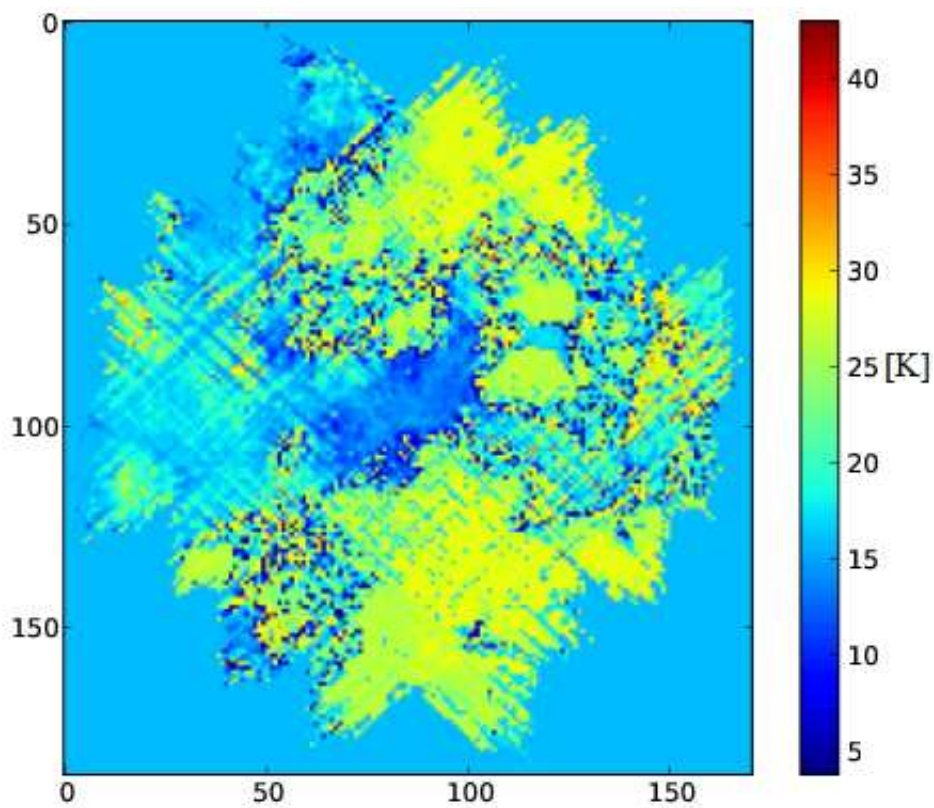
4.4. Klasszifikáció és modellezés

Az elkészült SED képek alapján megadható az objektumok Lada-féle klasszifikációs osztálya[3]. A klasszifikációt kézzel végeztük el, az egzakt algoritmus szerinti osztályozás a közeljövőben fog megtörténni. Egy érdekesnek

vélt mezőből (G10.20+2.39-s nevű) kiválasztottunk 15 objektumot, melyekre elég sok jó minőségű adatunk volt. Ezekre elvégeztük a Robitaille-féle modellezést, hogy megbecsülhessük a fiatal csillagok fizikai paramétereit.

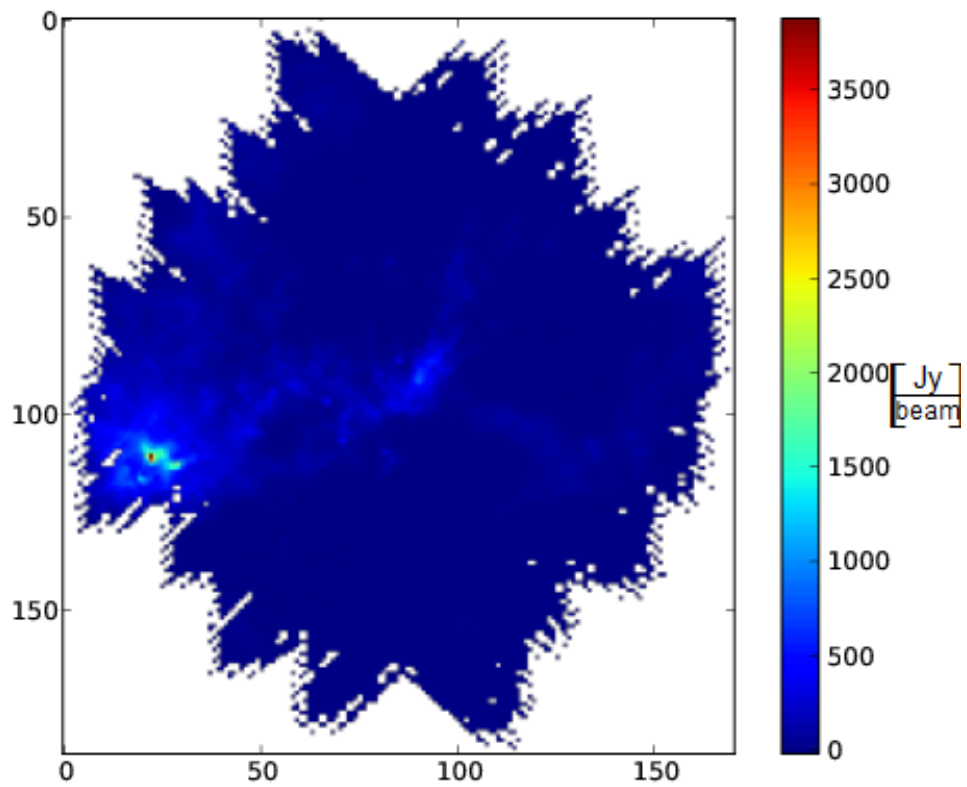
4.5. Oszlopsűrűség eloszlás

A Mika J. Juvela által készített python program segítségével előállítható a Herschel-SPIRE 160-500 μm -es képek 200 μm -en mérhető emissziós illetve hőmérséklet térképe. Ennek a programnak a rövid magyar nyelvű használati leírása megtalálható a kitekintés fejezetben. Erre példa a 6. és 7. ábra, ami a G10.20+2.39-es terület képe:



6. ábra. A G10.20+2.39-es terület hőmérséklet térképe. A jobb szélén levő színskódtáblázat a Kelvinben mért hőmérsékletet mutatja. A tengelyeken a program által kreált lokális koordináták vannak.

Jól megfigyelhető a felhő fonalas szerkezete. Látható, hogy a fonalak hidegebbek és sűrűbbek a környező részeknél.



7. ábra. A G10.20+2.39-es terület $200\mu m$ -es emissziós térképe. Jobb szélén a színskódtáblázat az intenzitást mutatja. A tengelyeken a program által kreált lokális koordináták vannak.

5. Eredmények

5.1. Fiatal csillagok

Munkánk során a Galactic Cold Core csoport által kiválasztott 108 darab felhő közül 66 darab adatait használtuk fel a statisztikák elkészítéséhez (összesen 1020 darab forrás). Ezek közül 29 darab clump fiatal forrásairól mi gyűjtöttünk adatokat a 4.2 fejezetben leírtak szerint. Az alábbi három táblázat foglalja össze a vizsgált területeken a források eloszlását. Félkövér betűk jelölik az általunk feldolgozott területeket. Köztes osztályokba abban az esetben soroltunk egy csillagot, mikor nem volt elég rendelkezésre álló adatpont az egyértelmű klasszifikációhoz (pl. hiányoztak távoli infravörösben mért fluxusok). Ezek nem alkotnak önálló típust, csak bizonytalan, hogy melyikhez tartoznak.

Feldolgozott területek	
Viszsgált területek száma	66
YSO-t nem tartalmazó terület	7
Összes forrás száma	1020
Fiatalnak azonosítottak száma	873
Class0 objektum	2
Class0/I objektum	4
ClassI objektum	3
ClassI/II objektum	265
ClassII objektum	532
ClassII/III objektum	38
ClassIII objektum	29

1. táblázat.

Clump ID	Elemzett	Fiatal	Clump ID	Elemzett	Fiatal
G227.95-2.98-1	1	1	G150.47+3.93-1	3	2
G210.90-36.55-1	5	2	G149.67+3.56-1	7	3
G219.36-9.71-1	50	30	G93.21+9.55	0	0
G219.29-9.25-1	101	71	G95.76+8.17-1	3	3
V31 8439	1	1	G116.08-2.40-1	24	23
G4.18+35.79	0	0	G98.00+8.75-1	66	66
G21.26+12.11	2	0	V31 2953	12	12
V31 0037	1	1	G105.57+10.39-1	222	207
G205.06-6.04-1	1	1	G132.12+8.95-1	10	7
G203.42-8.29-1	0	0	V31 1119	1	1
G198.58-9.10	19	10	G115.93+9.47	1	1
G159.23-34.51-1	12	5	G130.37+11.26	65	53
V31 5735	10	10	G110.80+14.16-1	2	2
G173.43-5.44-1	1	0	V31 0097	0	0
G70.10-1.69-1	123	123	G202.23-3.38	6	5
v31 7420 shift	35	27	G215.37-3.04	5	4
G155.80-14.24-1	9	4	G216.76-2.58	6	6
V31 7583	0	0	G2.83+21.91	0	0
G164.71-5.64-1	3	2	G10.20+2.39	54	54
V31 7488	5	4	G37.49+3.03	6	6
G89.65-7.02-1	10	6	G37.91+2.18	15	15
G159.34+11.21-1	1	1	G110.62-12.49-1	5	5
G92.04+3.93	45	44	G344.77+7.58	1	1
G154.08+5.23	0	0	G0.49+11-38-1	5	0
V31 2453	3	2	G3.72+21.02-1	3	3

2. táblázat.

Clump ID	Elemzett	Fiatal
G25.86+6.22	4	2
G62.16-2.92	5	5
G92.63-10.43-1	3	1
G94.15+6.50-1	4	4
G108.28+16.68	3	2
G255.33-4.88	5	5
G265.04+6.08-1	2	2
G271.06+4.84-1	4	4
G298.31-13.05	1	1
G315.88-21.44	2	2
G320.84+5.09	13	9
G332.70+6.77-1	5	5
G341.18+6.51	2	2
G188.24-12.97-1	1	0
G189.51-10.41-1	2	1
G212.07-15.21-1	4	4

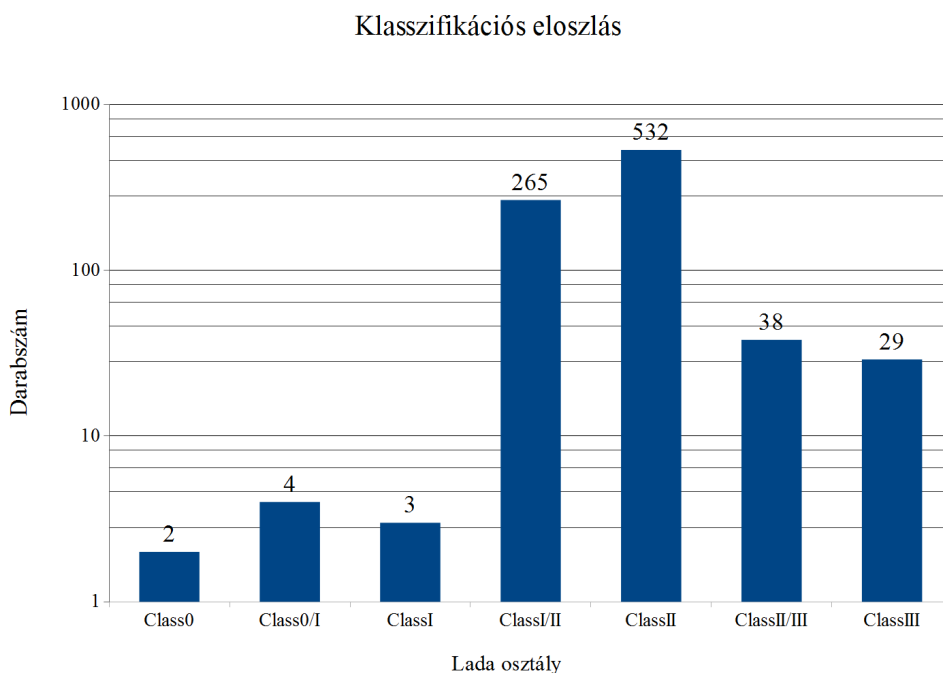
3. táblázat.

Az adatsor teljességét mutatja, hogy különböző hullámhosszakon mi volt a legkisebb mért fluxus vagy magnitúdó, amit felhasználtunk. Értelemszerűen az ennél halványabb források kimaradhattak a vizsgálatból. A hullámhosszankénti minimális fluxusokat az alábbi táblázat mutatja.

Hullámhossz	Min. flux./mag	Hullámhossz	Min. flux./mag
B ($0,4372\mu m$)	9,618mag	2MASS J ($1,235\mu m$)	3,815mag
V ($0,5493\mu m$)	9,477mag	2MASS H ($1,662\mu m$)	2,662mag
R ($0,6527\mu m$)	9,4mag	2MASS K ($2,159\mu m$)	2,022mag
I ($0,7891\mu m$)	9,34mag	WISE W1 ($3,35\mu m$)	2,401mag
Spitzer $3,6\mu m$	7,076mag	WISE W2 ($4,60\mu m$)	1,734mag
Spitzer $4,8\mu m$	6,716mag	WISE W3 ($11,56\mu m$)	0,724mag
Spitzer $5,6\mu m$	6,35mag	WISE W4 ($22,1\mu m$)	-0,079mag
Spitzer $8\mu m$	5,606mag	AKARI $9\mu m$	0,1374Jy
Spitzer $24\mu m$	3,24mag	AKARI $18\mu m$	0,1016Jy
IRAS $12\mu m$	0,03576Jy	AKARI $65\mu m$	0,08445Jy
IRAS $25\mu m$	0,07095Jy	AKARI $90\mu m$	0,5343Jy
IRAS $60\mu m$	0,2399Jy	AKARI $140\mu m$	0,159Jy
IRAS $100\mu m$	1,31Jy	AKARI $160\mu m$	0,2886Jy

4. táblázat. Kutatásunk határmagnitúdói illetve határfluxusai.[32][20][15][11]

Az összes fiatal forrást klasszifikáltuk Lada et al. (1987) módszere szerint (bővebben lásd 2.3. fejezet). A spektráltípus szerinti eloszlást az alábbi hisztogram mutatja.



8. ábra. A YSO-k Lada-osztályok szerinti eloszlása a teljes mintán. A jobb láthatóság érdekében logaritmikus skálán, mivel így jobban látszódnak a kisebb elemszámú osztályok, mert kettő és fél nagyságrend a különbség a legnépesebb és a legszegényebb osztályok között.

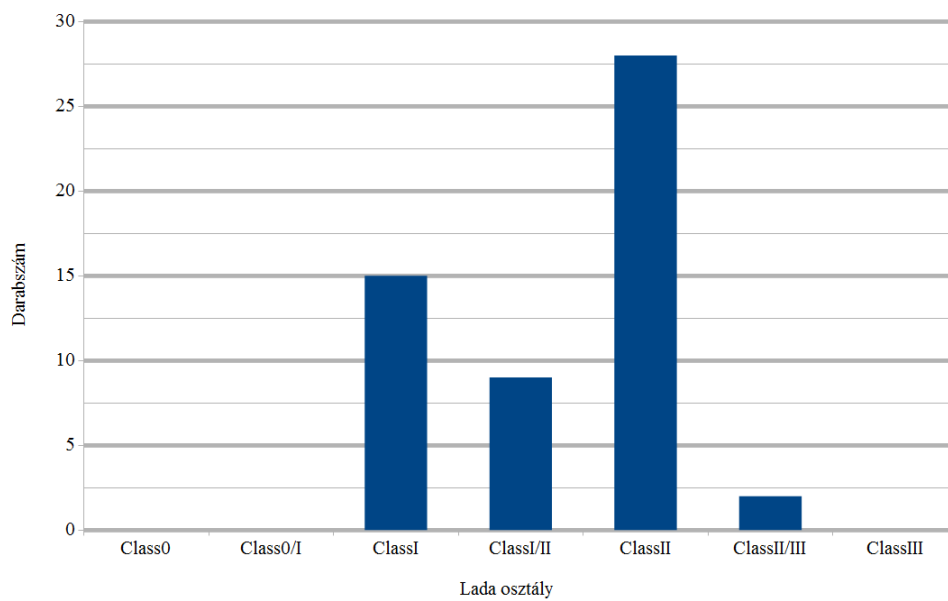
5.2. A G10.20+2.39-es felhő vizsgálata

Munkánk szemléletesebb bemutatása céljából az összes feldolgozott terület közül kiválasztottuk a G10.20+2.39-es clumpot, melynek oszlopsűrűség és hőmérséklet térképein ábrázoltuk a detektált fiatal források eloszlását. Ebben a csomósodásban kellően sok forrást találtunk demonstráló ábrák készítéséhez, illetve bizonyos források spektrális energiaeoszlását a Robitaille-féle modellekkel illeszteni is tudtuk, mert elég sok adatponttal rendelkezünk róluk.

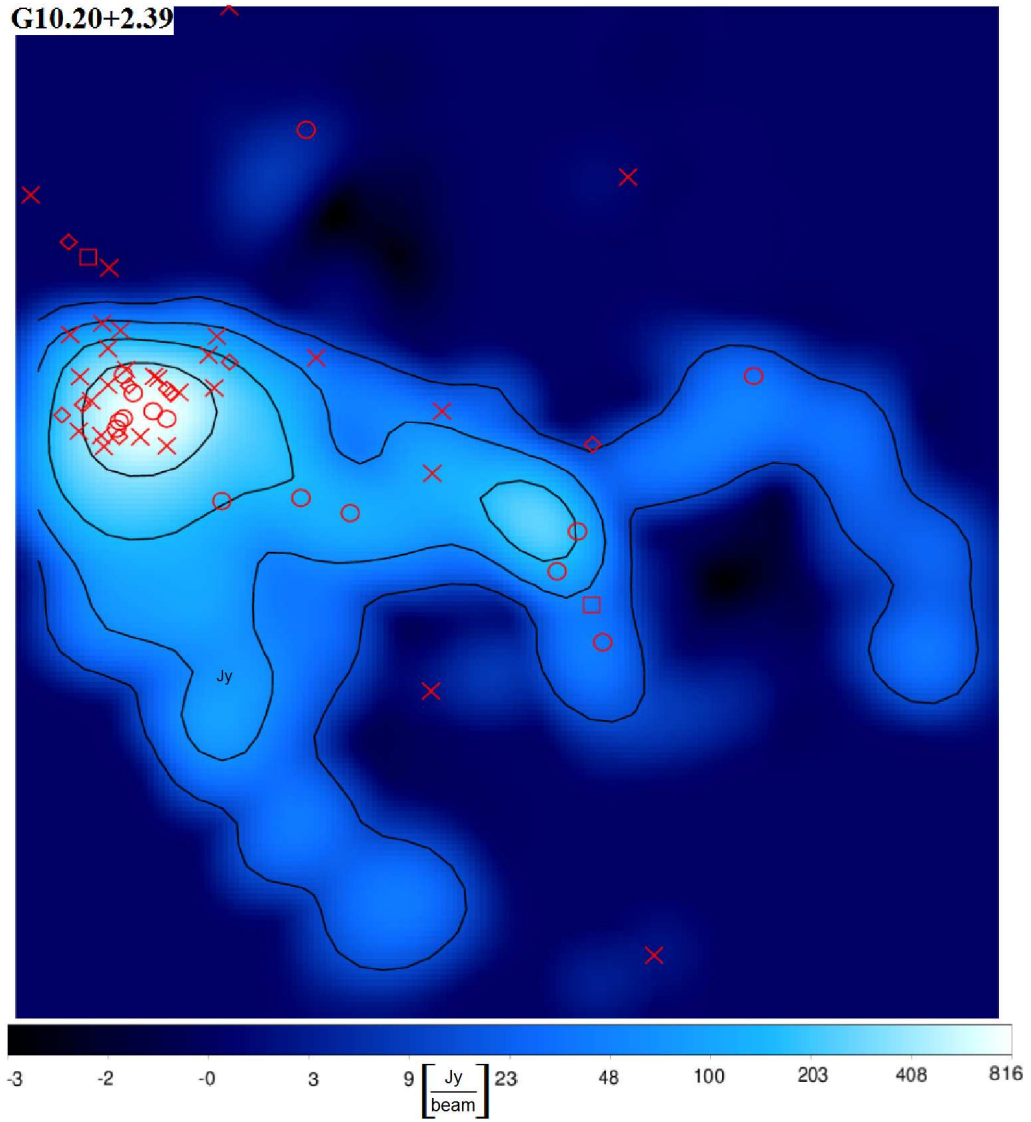
G10.20+2.39-s mező klasszifikálása	
Lada osztály	Darabszám
Class I	15
Class I/II	9
Class II	28
Class II/III	2

5. táblázat.

A G10.20+2.36-s terület csillageloszlása

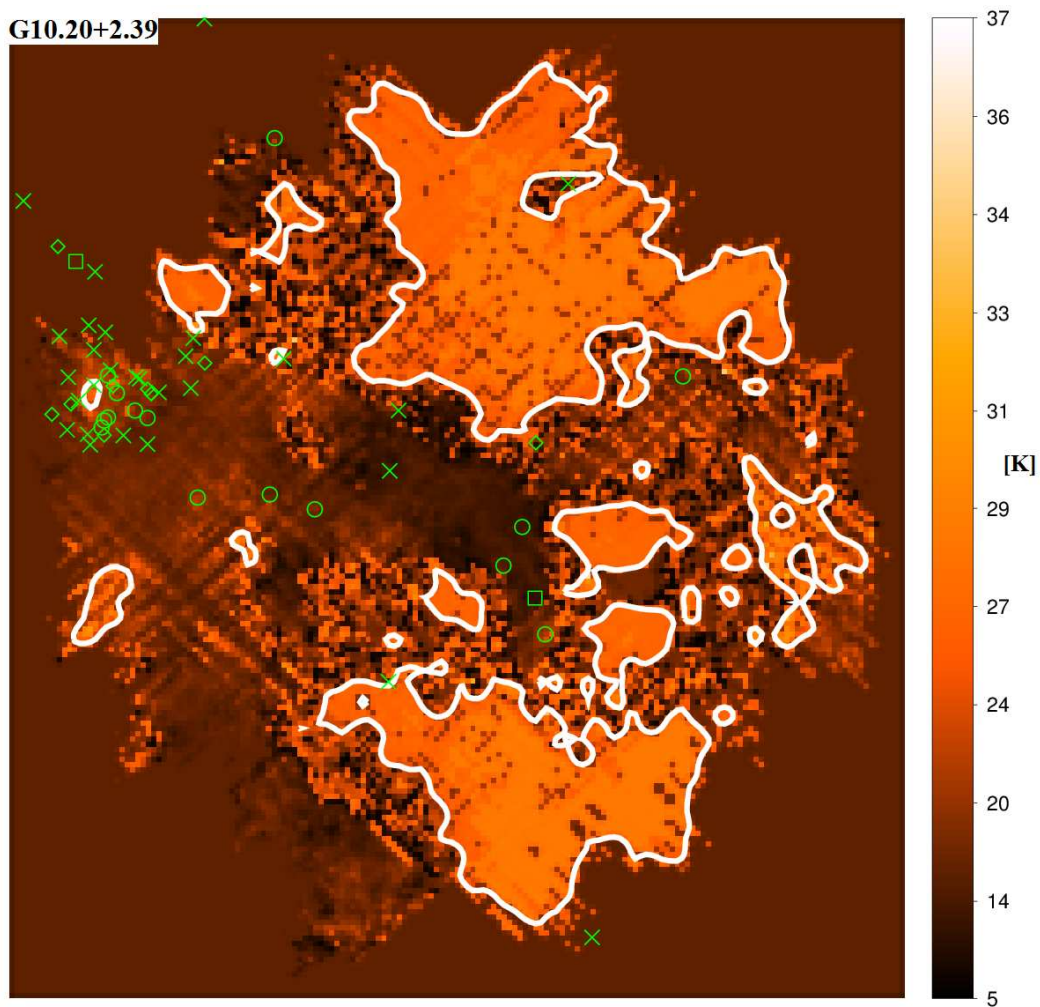


9. ábra. A G10.20+2.39-s mező Lada-osztályok szerinti eloszlása



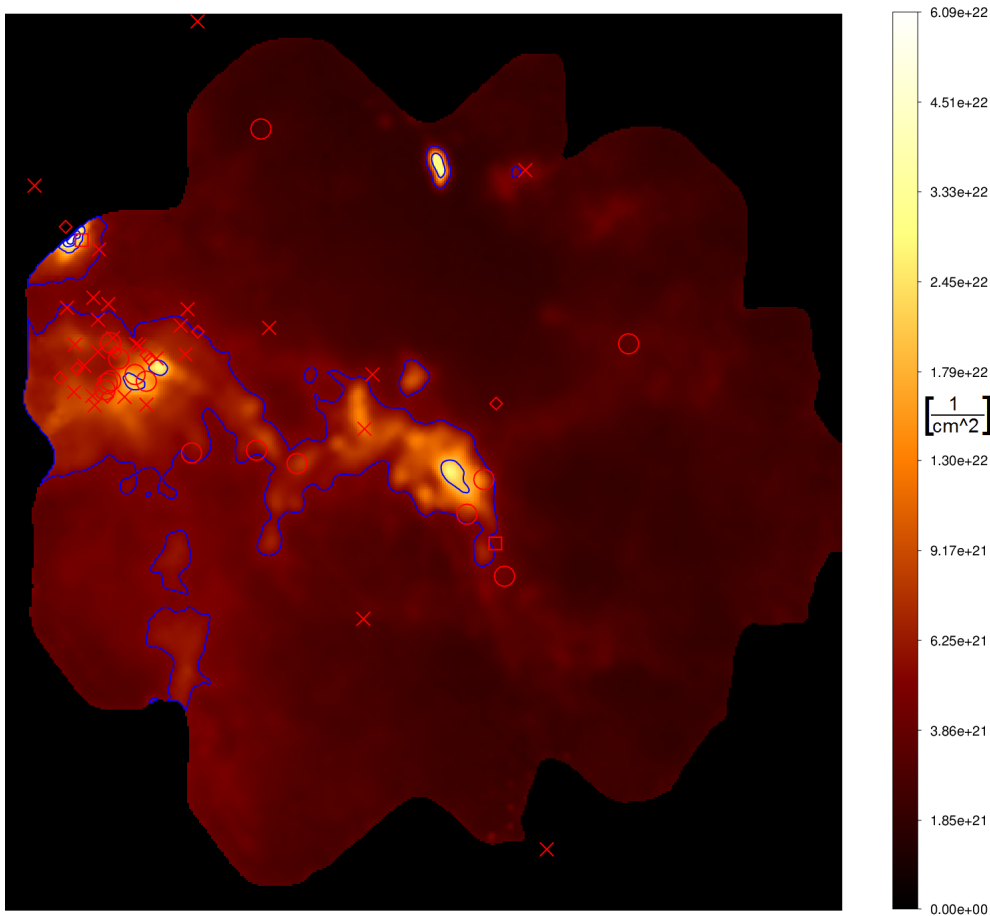
10. ábra. A G10.20+2.39-es mező $200\mu m$ -en mért emissziós ábrája a klasszifikált objektumokkal. A kör ClassI, a rombusz ClassI/II, kereszt ClassII, és a négyszög CassII/III osztályokat jelenti. Az ábra a SAOImage DS9 v.7.0.2 programmal készült.[36]

Megfigyelhető, hogy a források a környezetükhöz képest sűrűbb és hidegebb régiókban jelennek meg (részletesebben lásd 2.1 és 2.2 fejezet), és



11. ábra. A G10.20+2.39-es mező hőmérsékleti ábrája a klasszifikált objektumokkal. A kör ClassI, a rombusz ClassI/II, kereszt ClassII, és a négyszög CassII/III osztályokat jelenti. Az ábra a SAOImage DS9 v.7.0.2 programmal készült.[36]

az is látszik, hogy a keleti régióban található sok forrásos területen magasabb a hőmérséklet a környezethez képest, ami valószínűleg a fiatal csillagok sugárzása miatt van.



12. ábra. A G10.20+2.39-es mező oszlopsűrűség ábrája a klasszifikált objektumokkal. A kör ClassI, a rombusz ClassI/II, kereszt ClassII, és a négyszög CassII/III osztályokat jelenti. Az ábra a SAOImage DS9 v.7.0.2 programmal készült.[36]

Az is látszik, hogy ennek a keleti nagy csillagsűrűségű területnek belsőjében a legsűrűbb részen vannak a legfiatalabb források (Class I), kifele haladva pedig a későbbi fázisokban lévők (Class II). A középső régióban a YSO-k sorban, valószínűleg egy filamentum mentén helyezkednek el.

Az ezen a területen található forrásokról gyűjtött adataink egy részét szintén szemléltető jelleggel az alábbi, 6. táblázat tartalmazza. Ilyen adattáblát készítettünk minden általunk feldolgozott területről.

No	Ra	Dec	Obj. Név	J	H	K
1	269,7977	-18,9825	1759115-185857	14,775	13,999	13,887
2	269,9458	-18,9407	1759470-185627	16,589	14,103	12,074
3	270,0377	-18,9319	1800091-185555	16,109	14,648	13,836
4	269,9811	-18,9297	1759555-185547	15,077	13,436	12,637
5	269,7723	-18,8914	PN G010.2+02.4	11,287	9,88	9,364

W1	W2	W3	W4	A65	A90	A140	A160
				1,37E+000	1,63E+000	10,81	14,67
9,88	9,147	7,410	4,552	1,01E-002	2,60E+000	8,849	18,98
					4,48E+000	23,16	15,44
				2,48E+000	2,05E+000	13,00	
9,039	9,138	8,110	6,233	3,12E+000	1,42E+000	6,395	2,206

6. táblázat. A G10.20+2.39-es mező adattáblájának részlete. A J,H,K a 2MASS különböző infravörös színei, a W1-W4-ig a WISE 4 hullámhosszának adatai, míg az A65-A160-ig az AKARI-FIS 4 hullámhosszú adatai vannak a táblázatban. Ezenfelül persze más hullámhosszakat is használtunk (például: látható színek), feltéve, ha voltak ilyenek.

A területen található 54 forrás közül 15 db-nál volt várható, hogy jól modellezhető, így ennyit modelleztünk a Robitaille-féle Online SED Fitting Toollal (bővebben lásd 2. fejezet), ám csak 9 esetben volt elfogadható az illesztés. A melléklet tartalmazza az illesztésekkel kapott ábrákat.

A 7. táblázat tartalmazza az illesztésekből nyert fizikai paramétereket alsó és felső korláttal.

Azonosító	Kor[év]	Tömeg[$M_{\odot}$]	Hőmérséklet[K]
J175933.23-190406.9	$345300^{4781300}_{345300}$	$0,5285^{1,803}_{0,3711}$	$3808,5^{4974,1}_{3535,6}$
J175931.25-185202.5	$8665600^{8665600}_{1082500}$	$1,1944^{2,5333}_{1,1944}$	$4508,1^{5599,9}_{4508,1}$
PN G010.2+02.4	107680^{296030}_{47735}	$0,3661^{1,7557}_{0,1206}$	$3527,7^{4445,7}_{2893,2}$
1759470-185627	347280^{347280}_{347280}	$0,319^{0,319}_{0,319}$	$3414,5^{3414,5}_{3414,5}$
J175859.26-184157.5	$2458300^{6104200}_{1832600}$	$2,9619^{3,1698}_{1,803}$	$7902,2^{8821,2}_{4827,7}$
IRAS 17571-1834	$1672000^{1672000}_{832270}$	$1,1734^{1,1734}_{0,5408}$	$4383,8^{4383,8}_{3832,8}$
J180018.49-185222.1	523190^{523190}_{35081}	$1,0579^{1,8246}_{0,1241}$	$4289,2^{4337,4}_{2838,9}$
1800208-185202	$81107^{98085}_{2619,6}$	$6,4529^{7,382}_{1,1251}$	$4615,3^{4615,3}_{4086,9}$
1758378-185032	200000^{200000}_{86588}	$0,4589^{0,5573}_{0,3153}$	$3701,6^{3830,2}_{3406,2}$

Azonosító	Sugár[$R_{\odot}$]	$M_{disk}[M_{\odot}]$	Akkrecíós ráta[$M_{\odot}\backslash\text{év}$]
J175933.23-190406.9	$3,769^{4,1714}_{2,1047}$	$196,86^{1645,2}_{29,904}$	$3,9472 \cdot 10^{-8} \begin{smallmatrix} 3,9472 \cdot 10^{-8} \\ 4,5027 \cdot 10^{-10} \end{smallmatrix}$
J175931.25-185202.5	$1,3776^{4,0717}_{1,3776}$	$232,5^{1645,2}_{0,86844}$	$2,6281 \cdot 10^{-9} \begin{smallmatrix} 2,6281 \cdot 10^{-9} \\ 7,6537 \cdot 10^{-12} \end{smallmatrix}$
PN G010.2+02.4	$3,3187^{7,4402}_{2,0033}$	$10,703^{4432,6}_{10,703}$	$6,5146 \cdot 10^{-10} \begin{smallmatrix} 1,1501 \cdot 10^{-7} \\ 6,5146 \cdot 10^{-10} \end{smallmatrix}$
1759470-185627	$2,6908^{2,6908}_{2,6908}$	$0,450819^{0,45081}_{0,45081}$	$5,4897 \cdot 10^{-12} \begin{smallmatrix} 5,4897 \cdot 10^{-12} \\ 5,4897 \cdot 10^{-12} \end{smallmatrix}$
J175859.26-184157.5	$4,38770^{5,7251}_{2,0268}$	$15,4119^{373,12}_{2,3981}$	$1,8155 \cdot 10^{-9} \begin{smallmatrix} 1,0977 \cdot 10^{-8} \\ 1,3627 \cdot 10^{-11} \end{smallmatrix}$
IRAS 17571-1834	$2,2848^{2,4173}_{2,2848}$	$12,754^{21,506}_{12,754}$	$3,1752 \cdot 10^{-10} \begin{smallmatrix} 2,4566 \cdot 10^{-9} \\ 3,1752 \cdot 10^{-10} \end{smallmatrix}$
J180018.49-185222.1	$3,6058^{9,6041}_{2,6658}$	$1022,9^{1022,9}_{0,62211}$	$7,2879 \cdot 10^{-9} \begin{smallmatrix} 1,8621 \cdot 10^{-8} \\ 1,1634 \cdot 10^{-11} \end{smallmatrix}$
1800208-185202	$24,819^{41,143}_{9,1373}$	$186,83^{55038}_{186,83}$	$1,8056 \cdot 10^{-9} \begin{smallmatrix} 3,4465 \cdot 10^{-5} \\ 1,8056 \cdot 10^{-9} \end{smallmatrix}$
1758378-185032	$3,556^{4,2913}_{2,7783}$	$120,31^{303,17}_{15,254}$	$1,7136 \cdot 10^{-8} \begin{smallmatrix} 1,7136 \cdot 10^{-8} \\ 1,3053 \cdot 10^{-10} \end{smallmatrix}$

Azonosító	Diszk belső sugara[AU]	Diszk külső sugara[AU]
J175933.23-190406.9	$0,46978^{0,76394}_{0,27862}$	$155,37^{4922,1}_{107,35}$
J175931.25-185202.5	$0,24543^{0,45277}_{0,14926}$	$2388,2^{3200,8}_{308,56}$
PN G010.2+02.4	$0,081061^{0,26547}_{0,033815}$	$71,371^{378,65}_{44,854}$
1759470-185627	$5,6383^{5,6383}_{5,6383}$	$965,16^{965,16}_{965,16}$
J175859.26-184157.5	$1,2535^{1,2535}_{0,32679}$	$99,357^{817,69}_{99,357}$
IRAS 17571-1834	$53,604^{53,604}_{38,911}$	$92,181^{93,145}_{92,181}$
J180018.49-185222.1	$0,13357^{0,35884}_{0,044105}$	$2771,7^{2771,7}_{32,779}$
1800208-185202	$1,0653^{34,674}_{0,35148}$	$53,698^{544,02}_{9,4062}$
1758378-185032	$82,002^{99,972}_{47,665}$	$104,92^{1047,7}_{104,92}$

7. táblázat. A táblázatban láthatók a modellezett 9 YSO becsült fizikai paraméterei: A koruk, tömegük, felszíni hőmérsékletük, sugaruk, a diszkük tömege, és az diszk akkréciós rátája a csillagba. A fő szám a legjobb modell eredménye, de fel van tüntetve a következő 9 modellben kapott maximális és minimális érték is.

A modellezett források közül 2 db már korábbról ismert volt.

PN G010.2+02.4:

Két cikk foglalkozott ezzel a forrással. Az első cikk 2011-ből egy átfogó rádió-felmérés volt, melyben ezt az objektumot észlelték, és lehetséges galaktikus nebulának sorolták be.[35] A másik cikk 2012-ből összevetette az IRAS és AKARI felvételeket és az objektum körül filamentumokat fedeztek fel.[34]

Mi most ezt a forrást fiatal csillagnak azonosítottuk, és megállapítottuk, hogy közel Naptömegű és körülbelül százezer éves.

IRAS 17571-1834:

Erről a forrásról eddig csak azt tudtuk, hogy észlelt infravörös forrás.

Mi most ezt a forrást fiatal csillagnak azonosítottuk, és megállapítottuk, hogy tömege nagyjából a Napéval egyezik meg, és kora 1,5 millió év körül lehet.

6. Diszkusszió

6.1. Fiatal csillag tartalom

A táblázatokból jól látható, hogy a felhők fiatal csillag tartalma nagyon különböző lehet. Van olyan clump, ahol nem találtunk fiatal objektumot az adott válogatási módszer szerint, de van olyan is, ahol több száz YSO volt (pl. 207 db a G105.57+10.39-s mezőn). Átlagosan 13,22 db YSO jut egy területre. Ha kizárjuk azt a 7 felhőt, ahol nem találtunk fiatal forrást, akkor 14,8 db-ra módosul az átlag. Az adatok szórása 32,05, ami az átlagos csillag tartalom több, mint kétszerese. A nagy szórás azt támasztja alá, hogy a felhőmagok és csomók saját fizikai paraméterei nagyban befolyásolják a csillagképződést.

A vizsgált fiatal csillagok közül a legtöbb Class II-es osztályba esik. Ez azt igazolja, hogy az ehhez a csoporthoz tartozó fejlődési fázisban több időt töltenek a YSO-k, mint a többiben. Azonban fontos megemlíteni, hogy a statisztikus válogatáshoz használt katalógusok eleve megnehezítették a korai, Class 0-s objektumok megtalálását, mert a közép infravörösben mérő WISE műhold adataiból nagyságrendekkel több van, mint a távoli infravörösben mért AKARI adatokból, a Class 0 pedig definíció szerint csak $10\mu m$ fölött látszik, és a SED-je távoli infravörösben tetőzik. Mindenesetre elmondható, hogy Class II-es objektumból 8-12-szer több volt, mint Class III-asból, így a mintán igazolható a 2.3-as szakaszban vázolt elmélet.

A válogató eljárás kis szennyezettségét mutatja, hogy a vizsgált 1020 objektum közül, 893 forrás származott az algoritmusból, és ezek közül 831 csillag bizonyult ténylegesen fiatalnak, azaz a Marton Gábor által használt mechanizmusnak 7% alatt maradt a hibája.

6.2. A G10.20+2.39-es mező adatainak elemzése

Ebben a mezőben az átlagosnál nagyobb számban találtunk fiatalabb (Class I-es) csillagot, így arra lehet következtetni, hogy ebben a felhőben csak a közelmúltban indulhatott be a csillagképződés. Az oszlopsűrűség és hőmérséklet térképek alapján igazolható az, hogy a felhőkben a sűrűbb, hidegebb területeken keletkeznek a csillagok. A nagy sűrűség oka, hogy a gravitációs kollapszus, csak egy kritikus sűrűség fölött indítja be a csillagok képződését. A hideg oka pedig az, hogy a sűrűbb részekre kevésbé tud a külső sugárzás bejutni, és így felmelegíteni azt, valamint a hűlés annál hatékonyabb, minél sűrűbb a közeg (lásd hűlési függvény[1]). Kutatásunk egyik célja a jövőben a többi jelenleg felmért terület oszlopsűrűség térképeinek segítségével megbecsülni a csillagképződéshez szükséges kritikus oszlopsűrűséget.

A jól modellezett 9 objektum fizikai paramétereiből kiderül, hogy a Lada-féle I. osztályból a II. osztályba történő átmenet valahol 1 millió éves kor körül történik. A modellezett csillagaink átlagos tömege $1,6126 M_{\odot}$, de mivel vagy egy kiugróan nagy objektum ($6,4529 M_{\odot}$), ezért a szórás $1,375 M_{\odot}$. Ezen objektum nélkül az átlagos tömeg $1,008 M_{\odot}$. Azaz a Nappal megegyező kezdeti tömegűek az ezen felhőben most megtalált csillagok. Eszerint a 9 forrás közül csak 1 nagytömegű csillag keletkezett. A felszíni hőmérsékletek átlaga is erről a tényről tanúskodik, amely 4461 Kelvin, és az átlagos eltérés ettől csak 809 Kelvin. A csillagok sugarára is közel azonos értékek jöttek ki ($1-4 R_{\odot}$), kivétel az óriás csillag, melynek sugara $24,819 R_{\odot}$, de ha őt kivesszük, akkor az átlagos csillagsugár $3,12 R_{\odot}$, melynek szórása $0,96 R_{\odot}$. Érdekes, hogy miként lehet egy naptömegű csillag 3-szor nagyobb a mi Napunknál.

A diszkek fizikai paraméterekben több nagyságrendi különbségek vannak. Ez magyarázható egyrészt a különböző életkorokkal, másrészt a diszk paramétereinek sokkal érzékenyebbek a központi objektum tulajdonságaira.

7. Összefoglalás

Munkánk több részre volt osztható. Először szükségünk volt az adott területeken található YSO jelöltek fotometriai adataira. Ezen adatokat különböző adatbázisokból gyűjtöttük össze. Munkánk során a 29 clump-ból 319 objektumra végeztük el az adatgyűjtést, és 25 féle hullámhosszról ($0,437\mu m$ -től $160\mu m$ -ig) próbáltunk adatokhoz jutni. A kapott adatsorból ezután elkészítettük az objektumok spektrális energiaszlás diagramjait, ami alapján eldöntöttük az eddig besorolatlan forrásokról, hogy fiatal csillagok vagy más égitestek. Ha fiatal csillagnak bizonyultak a spektrális energiaszlásuk alapján ún. Lada-féle osztályokba soroltuk őket. A saját felhőinket kiegészítve a statisztikákat 66 darabra készítettük el. A 66 clump 1020 YSO jelöltjéből 873 bizonyult ténylegesen fiatalnak. Legnagyobb számban ClassII-es típusút találtunk, viszont Class 0-s csak 2-6 db volt. Ennek oka a válogatásban keresendő, általában megköveteltük, hogy mért WISE adatuk legyen az objektumainknak, ami kizárja a Class 0 YSO-kat. Ennek a megkötésnek az oka, hogy nagyságrendekkel több WISE forrásunk van, mint AKARI.

A következő fázisban egy nagy számú és változatos fiatal csillagpopulációval rendelkező területre (G10.20+2.39) elkészítettük az oszlopsűrűség és hőmérséklet térképeket. Majd ezen térképeken megvizsgálva az általunk klasszifikált objektumok elhelyezkedését, igazolni tudtuk, hogy a felhőben a hidegebb és sűrűbb helyeken van aktív csillagképződés.

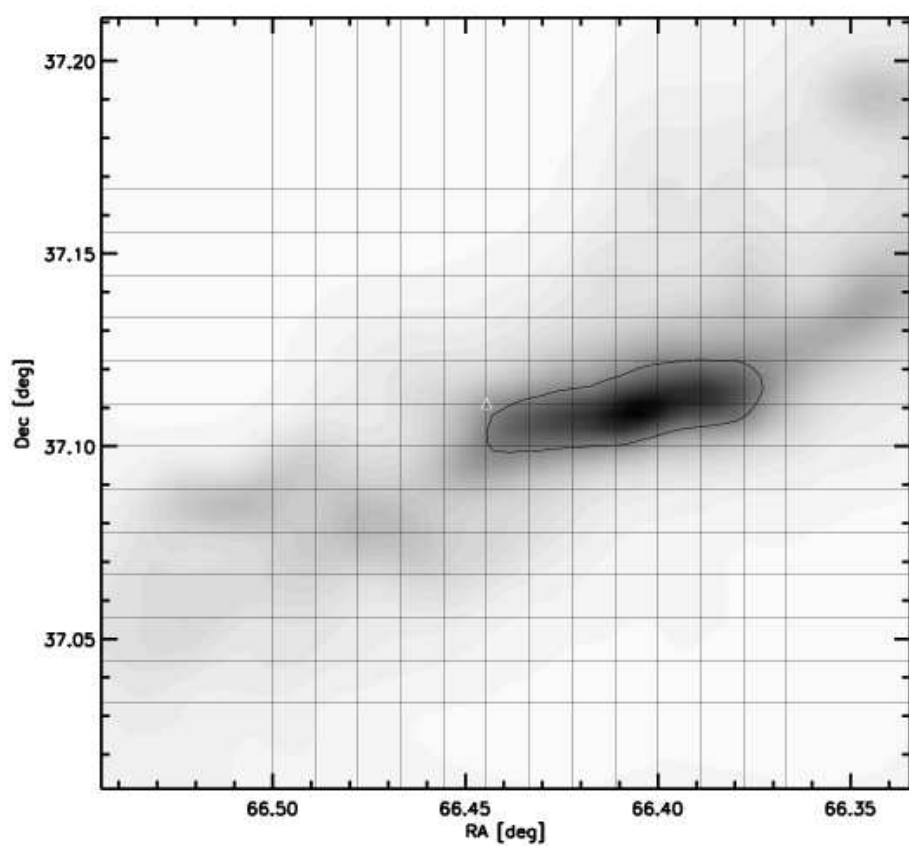
A kiválasztott területen becslést adtunk az elég sok hullámhosszon megmért fiatal csillagok fizikai paramétereire a Robitaille-féle modellezési eljárással. A területen található 54 fiatal forrás közül 9-re jól illeszkedő modellt találtunk. Ezekből megbecsültük az objektumok releváns fizikai paramétereit, például a tömegüket, életkorukat, akkréciós rátájukat.

A két korábban már ismert objektum adatait összevetettük a mostani eredményekkel, mely révén pontosítani tudtuk az eddigi ismereteket. Fontos még megemlíteni, hogy nem találtunk a mostani adatainknak ellentmondó állítást a 2 objektum eddig ismert tulajdonságaiban, így valószínűsíthető, hogy helyesek a mostani eredmények.

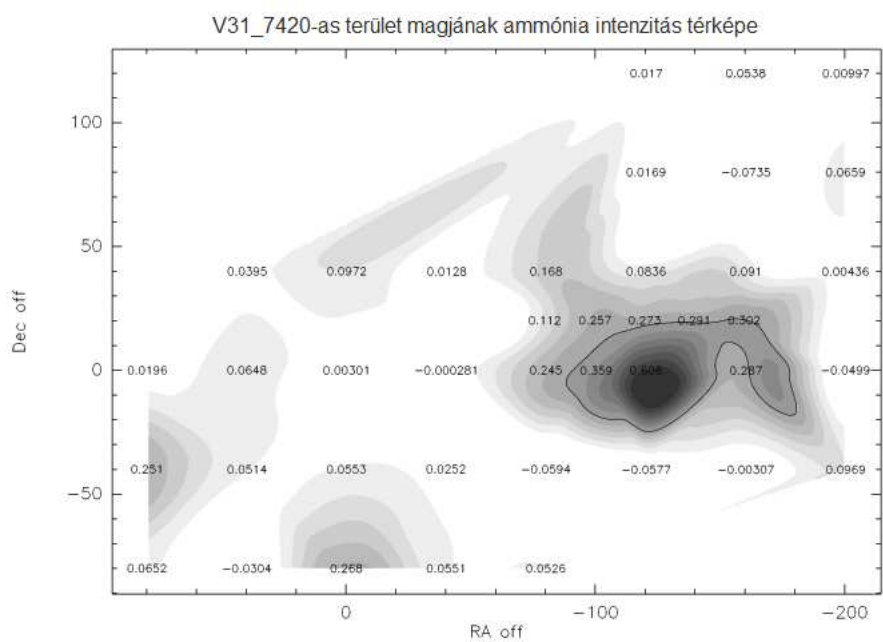
8. Kitekintés

8.1. A kutatáshoz kapcsolódó információk

2012.12.12-től 10 napon keresztül az effelsbergi 100 méteres mozgatható rádió-távcsővel mértük az ammónia (1,1)-es és (2,2)-es átmeneteinek vonalait 2,7 GHz körül 100 MHz-es sávzélességgel. Közel 20 felhő magjait illetve részstruktúráit feltérképeztük és a maximum helyeken hosszabb integrációval megmértük a keresett átmenetek spektrumait 5 szigmás jel/zaj aránnyal. A vizsgált területek közül 13 darab fiatal csillagait vizsgáltuk a dolgozatban. A következő hónapokban az adatok részletes kalibrációját követően modellszámításokkal megbecsüljük a felhőmagok hőmérsékletét és térfogati sűrűségét. Szemléltető céllal csatoljuk a v31_7420-es terület (1,1)-es vonal alatti területeiből készített térképét, melyből a maximum intenzitású terület helyét határoztuk meg, illetve az itt 12 perc integrációs idővel megmért (1,1)-es és (2,2)-es vonalak körüli spektrumokat. Az ammónia molekula a csillagközi anyag egyik legpontosabb hőmérője, sőt sűrűbb felhőkben is optikailag vékony marad.

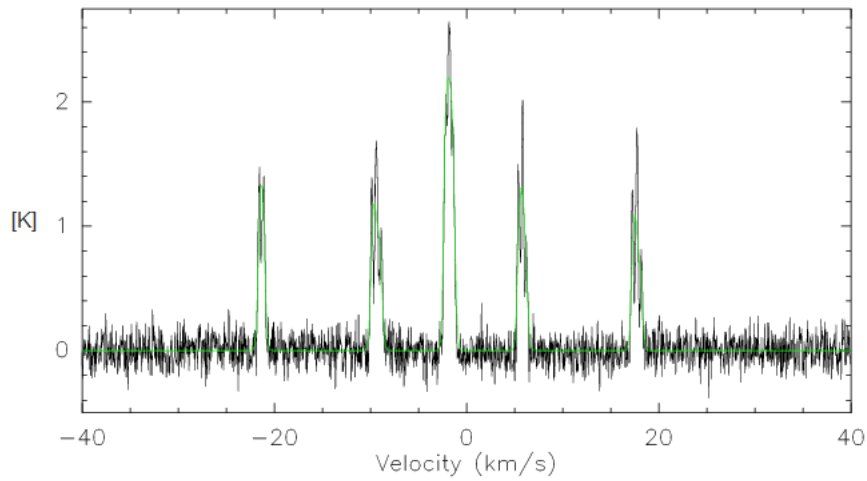


13. ábra. A v31_7420-es mező oszlopsűrűség térképnek részlete, rajta a mért maggal. A kontúr vonal a 10^{22} 1/cm^2 -es oszlopsűrűségű tartományt határolja.

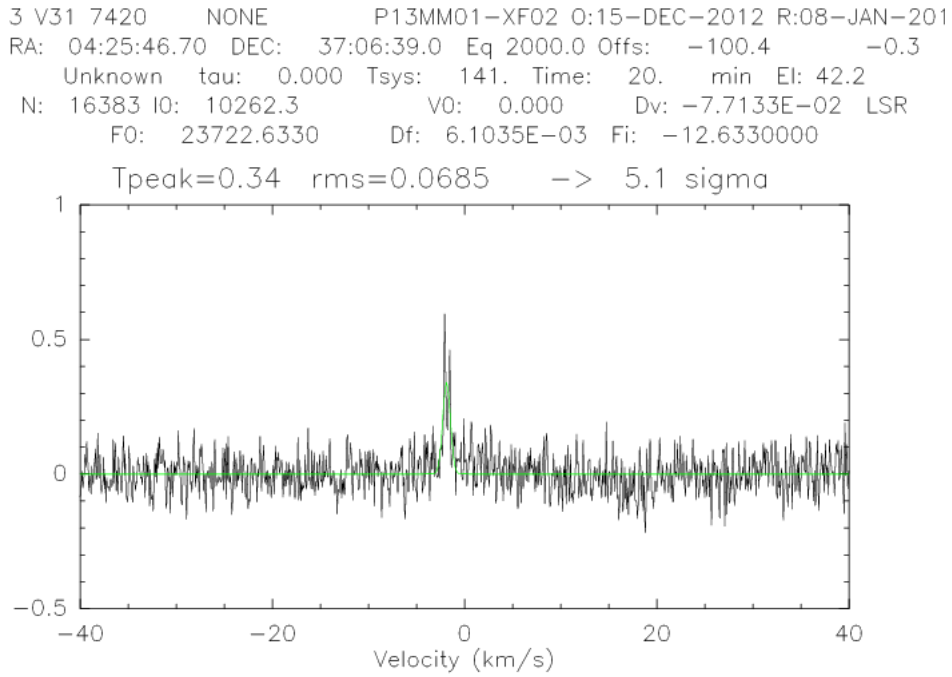


14. ábra. A v31_7420-es mező magjának ammónia térképe. Az egységek az ammónia vonalak vonal alatti területi fényességi hőmérsékletben [K].

3 V31 7420 NONE P13MM01-XF02 0:15-DEC-2012 R:08-JAN-201
RA: 04:25:46.70 DEC: 37:06:39.0 Eq 2000.0 Offs: -100.4 -0.3
Unknown tau: 0.000 Tsys: 141. Time: 20. min El: 42.2
N: 32768 l0: 11304.3 V0: 0.000 Dv: -3.8612E-02 LSR
F0: 23694.4950 Df: 3.0518E-03 Fi: 15.5050000
Tau=4.19 Tpeak=2.51 rms=0.28 -> 9 sigma



15. ábra. A v31_7420-es mező magjában az NH₃ (1,1)-es vonal spektruma fényességi hőmérsékletben [K].



16. ábra. A v31_7420-es mező magjában az NH3 (2,2)-es vonal spektruma fényességi hőmérsékletben [K].

Rövidesen elkészíti a Galactic Cold Core kutatási csoport a felhők Herschel fotometriáját is pontforrásokat keresve, így ezekkel is ki fogjuk egészíteni az adattábláinkat. Ezáltal újabb forrásokra, főleg Class 0-s források azonosítására számítunk.

Egy kínai kutatócsoport is csillagközi felhőket tanulmányoz, és 39 olyan mező van amit mindkettő csoport (a kínai, és a GCC) is felmért. A közös 39 clump szerepel azon 66 felhő között amire elkészült a fiatal csillagok elemzése, melyet a rendelkezésükre bocsátottunk, így most a kínai kutatók a mi adataink segítségével végezhetik további munkájukat.

8.2. Felhasznált szoftverek

**Mika Juvela python programjának rövid, magyar nyelvű
használati útmutatója:**

1. Első lépésben szükségünk van terület SPIRE PLW, PMW és PSW képére (fits formátumban).
2. A programhoz csatolt IDL forrásfájlt kell futtatni (a forrásfájlban be kell állítani az aktuális fájlneveket), hogy létrejöjjenek az egységes felbontásra normált képek a területről.
3. A python programban át kell írni az aktuális mező fájlneveit, majd futtatni a programot. (Ehhez viszont rendelkezni kell a fent említett 3 képtípushoz tartozó filter fájlokkal is.) A program létrehozza a hőmérséklet illetve a $200\mu m$ -en mérhető emissziós térképeket fits formátumban.
4. A python forrásfájl végén beállítható, hogy melyik ábra jelenjen meg a képernyőn, ami itt színes lesz: T, a hőmérséklet, S200, az emissziós. Ezen képeket a megjelenő ablak alján látható mentés gomb segítségével akár bitkép (pl. *.bmp), vagy vonalábra (pl. *.ps) formátumban menthetők.

9. Köszönetnyilvánítás

Szeretnénk megköszönni témavezetőinknek, Tóth L. Viktornak és Fehér Orsolyának a rengetek segítséget, időt és tanácsot amivel hozzájárultak munkánk elkészüléséhez.

Szeretnénk megköszönni Zahorecz Saroltának a munkánkhoz való érdemi hozzájárulást, mind az adatelemzés, mind az ábrák elkészítésében.

Hálásak vagyunk Marton Gábornak az adatok előkészítésében tett rengetek segítségért.

Köszönettel tartozunk Lisztes Mónikának az adatfeldolgozásban és adatelemzésben való segítségért.

Ezúton szeretnénk megköszönni Mika Juvelanak a felhők elemzéséhez szükséges program átadását, illetve a program működésének leírását.

Köszönet illeti a teljes Galactic Cold Core csoportot is, hogy a felmerülő kérdéseinkre válaszoltak.

Szeretnénk megköszönni mindazoknak, akik lehetővé tették, hogy felhasználhassuk és ábrázolhassuk a fotometriai adatokat:

This research is based on observations with AKARI, a JAXA project with the participation of ESA.

This publication makes use of data products from the Wide-field Infrared Survey Explorer, which is a joint project of the University of California, Los Angeles, and the Jet Propulsion Laboratory/California Institute of Technology, funded by the National Aeronautics and Space Administration.

This work is based on observations made with the Spitzer Space Telescope, which is operated by the Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology under a contract with NASA.

This work is based [in part] on observations made with the Spitzer Space Telescope, which is operated by the Jet Propulsion Laboratory, California

Institute of Technology under a contract with NASA.

This research has made use of the SIMBAD and VizieR database operated at CDS, Strasbourg, France.

This research has made use of Aladin.

This publication makes use of data products from the Two Micron All Sky Survey, which is a joint project of the University of Massachusetts and the Infrared Processing and Analysis Center/California Institute of Technology, funded by the National Aeronautics and Space Administration and the National Science Foundation.

This research has made use of the NASA/ IPAC Infrared Science Archive, which is operated by the Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, under contract with the National Aeronautics and Space Administration.

This research has made use of SAOImage DS9, developed by Smithsonian Astrophysical Observatory.

We used the GILDAS programs. <http://www.iram.fr/IRAMFR/GILDAS>

Based on observations with the 100-m telescope of the MPIfR (Max-Planck-Institut für Radioastronomie) at Effelsberg.

Hivatkozások

- [1] Fehér Orsolya, *Csillagkeletkezés a Planck-űrtávcső által felfedezett hideg felhőmagokban*, 2012, <http://sirius88.web.elte.hu/orsidip.pdf>
- [2] Zahorecz Sarolta, *Korai csillagfejlődés vizsgálata űrcsillagászati mérésekkel*, 2010, <http://sirius88.web.elte.hu/sacidip.pdf>
- [3] Lada, Charles J., *Star formation - From OB associations to protostars* 1987, IAUS..115....1L
- [4] Philippe Andre és társai, *Submillimeter continuum observations of Rho Ophiuchi A - The candidate protostar VLA 1623 and prestellar clumps*, 1993, ApJ...406..122A
- [5] T. P. Robitaille és társai, *Interpreting Spectral Energy Distributions from Young Stellar Objects. I. A Grid of 200,000 YSO Model SEDs*, 2006, ApJS, 167, 256
- [6] T. P. Robitaille és társai, *Interpreting Spectral Energy Distributions from Young Stellar Objects. II. Fitting Observed SEDs Using a Large Grid of Precomputed Models*, 2007, ApJS, 169, 328
- [7] Planck Collaboration, *Planck early results. I. The Planck mission*, 2011 A&A...536A...1P
- [8] M. Juvela és társai, *Galactic cold cores III. General cloud properties*, 2012, A&A...541A..12J
- [9] Marton Gábor, *Csillagkeletkezés a galaktikus határfelületeken*, Doktori értekezés, Készülőben

- [10] M. F. Skrutskie és társai, *The Two Micron All Sky Survey (2MASS)*, 2006, AJ....131.1163S
- [11] M. W. Werner és társai, *The Spitzer Space Telescope Mission*, 2004, ApJS..154....1W
- [12] G. Neugebauer és társai, *The Infrared Astronomical Satellite (IRAS) mission*, 1984, ApJ...278L...1N
- [13] Monet D.G. és társai, *The USNO-B Catalog*, 2003, AJ....125..984M
- [14] Zacharias N. és társai, *The Naval Observatory Merged Astrometric Dataset (NOMAD)*, 2004, AAS...205.4815Z
- [15] Murakami, H. és társai, *The Infrared Astronomical Mission AKARI*, 2007, PASJ...59S.369M
- [16] Kawada, M. és társai, *The Far-Infrared Surveyor (FIS) for AKARI*, 2007, PASJ...59S.389K
- [17] D. Ishihara és társai, *The AKARI/IRC mid-infrared all sky-survey*, 2010, A&A...514A...1I
- [18] Fehér Orsolya és Lisztes Mónika *Fiatal csillagok modellezése az Orion-ködben az AKARI/FIS katalógus és archív katalógusok alapján*, TDK Dolgozat, 2010, <http://sirius88.web.elte.hu/orsitdk.pdf>
- [19] Lisztes Mónika Éva, *Fiatal csillagok fizikai paramétereinek meghatározása*, Bsc szakdolgozat, 2012 <http://sirius88.web.elte.hu/szakdolg.pdf>

- [20] Edward L. Wright és társai, *THE WIDE-FIELD INFRARED SURVEY EXPLORER (WISE): MISSION DESCRIPTION AND INITIAL ON-ORBIT PERFORMANCE*, 2010, AJ....140.1868W
- [21] Cutri R.M. és társai, *WISE All-Sky Data Release*, 2012, 2012yCat.2311....0C,
<http://wise2.ipac.caltech.edu/docs/release/allsky/expsup/index.html>
- [22] Cutri R.M. és társai, *WISE Preliminary Data Release*, 2011, 2011yCat.2307....0C
- [23] The Planck Collaboration, *The Scientific Programme of Planck*, 2006, astro-ph/0604069
- [24] M. Sandri és társai, *Planck pre-launch status: Low Frequency Instrument optics*, 2010, A&A 520, A7
- [25] J.-M. Lamarre és társai, *Planck pre-launch status: The HFI instrument, from specification to actual performance*, 2010, A&A 520, A9
- [26] G. L. Pilbratt és társai, *Herschel Space Observatory*, 2010, A&A 518,L1
- [27] Poglitsch, A. és társai, *The Photodetector Array Camera and Spectrometer (PACS) on the Herschel Space Observatory*, 2010, A&A...518L...2P
- [28] Griffin, M. J. és társai, *The Herschel-SPIRE instrument and its in-flight performance*, 2010, A&A...518L...3G
- [29] de Graauw, Th. és társai, *The Herschel-Heterodyne Instrument for the Far-Infrared (HIFI)*, 2010, A&A...518L...6D
- [30] Bonnarel, F., és társai, *The ALADIN interactive sky atlas. A reference tool for identification of astronomical sources*, 2000, A&AS..143...33B

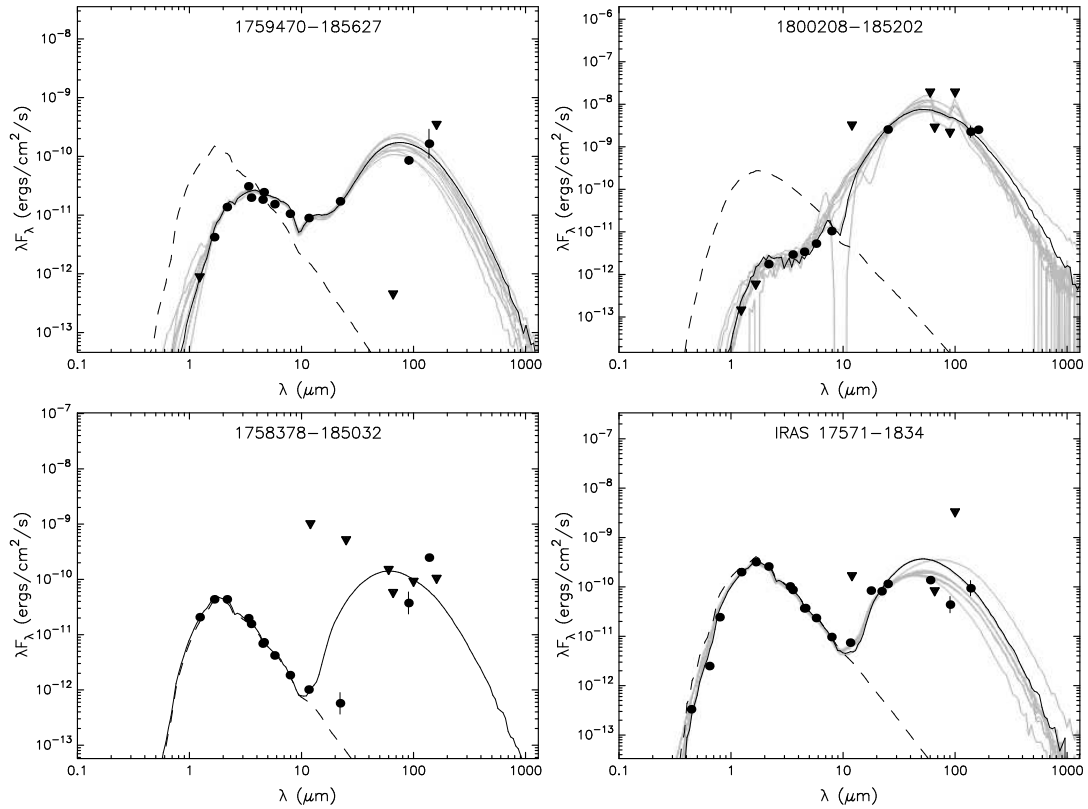
- [31] Ochsenbein, F.; Bauer, P.; Marcout, J., *The VizieR database of astronomical catalogues*, 2000, A&AS..143...23O
- [32] Andrew Pickles *UBVRI-ZY and ugriz zeropoints from 20 calspec standards*, 2010, HST Calibration Workshop
- [33] Egret, D. *SIMBAD Story - a Description of the Database of the Strasbourg Stellar Data Center*, 1983, BICDS..24..109E
- [34] Zhang, Yong és társai, *Planetary Nebulae Detected in the Spitzer Space Telescope GLIMPSE 3D Legacy Survey*, 2012, ApJ...745...59Z
- [35] Bojičić, I. S. és társai, *Radio-continuum detections of Galactic Planetary Nebulae I. MASH PNe detected in large-scale radio surveys.*, 2011, MNRAS.412..223B
- [36] Joye, W. A. és Mandel, E., *New Features of SAOImage DS9*, 2003, ASPC..295..489J
- [37] Appenzeller, I.; Oestreicher, R.; Jankovics, I., *Forbidden-line profiles of T Tauri stars*, 1984, A&A...141..108A
- [38] Kun Mária, *FIATAL CSILLAGOK ÉS KÖRNYEZETÜK KÖLCSÖNHATÁSAI*, 2005, Fizikai Szemle 2005/9. 309.o.
- [39] Juvela, M. és társai, *Determination of the cosmic far-infrared background level with the ISOPHOT instrument*, 2009, Astronomy and Astrophysics, Volume 500, Issue 2, 2009, pp.763-768
- [40] Ratzka, Th. és társai, *Spatially resolved mid-infrared observations of the triple system T Tauri*, 2009, A&A...502..623R

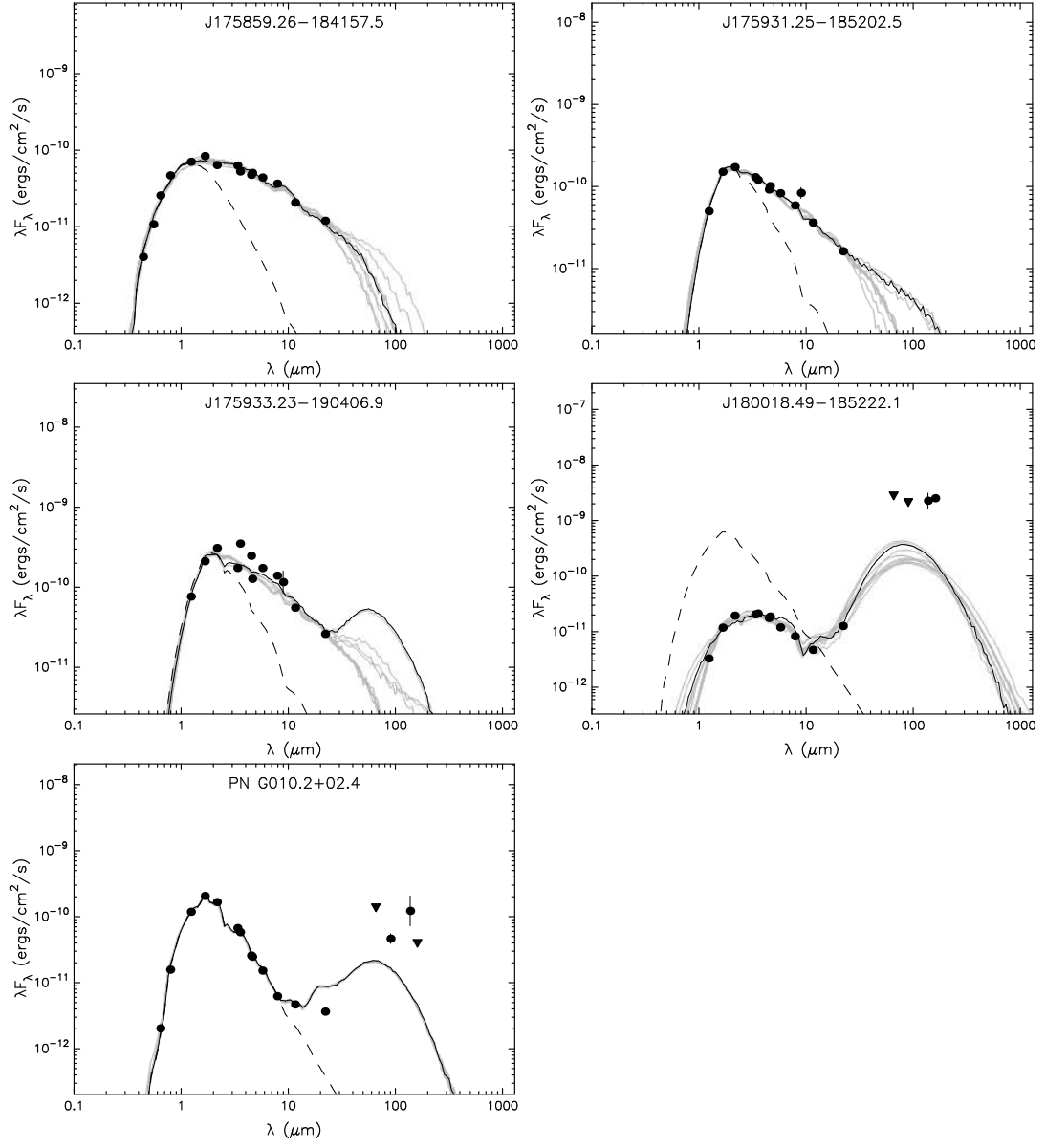
- [41] Kóspál, Ágnes és társai, *On the Relationship Between Debris Disks and Planets*, 2009, *Astrophys.J.*700:L73-L77,2009
- [42] Könyves, V. és társai, *The Aquila prestellar core population revealed by Herschel*, 2010, *A&A*, Volume 518, id.L106, 7 pp.
- [43] Kiss, Cs.; Moór, A.; Tóth, L. V., *Catalogue of far-infrared loops in the Galaxy*, 2004, *A&A*...418..131K
- [44] Tóth, L. V. és társai, *Very cold cores in the Taurus Molecular Ring as seen by ISO*, 2004, *A&A*, 420, 533-546
- [45] Tóth, L. V. és társai, *Extending the limits of globule detection. ISOPHOT Serendipity Survey observations of interstellar clouds II*, 2002, *A&A*, 395, 663-667
- [46] Stutz, Amelia Marie és társai, *Herschel Observations Of Isolated Star-forming Clouds: Dust-temperature Maps, Dust Properties And Molecular Freezeout*, 2011, *AAS*...21720203S

10. Melléklet

10.1. Modellezett fiatal csillagok

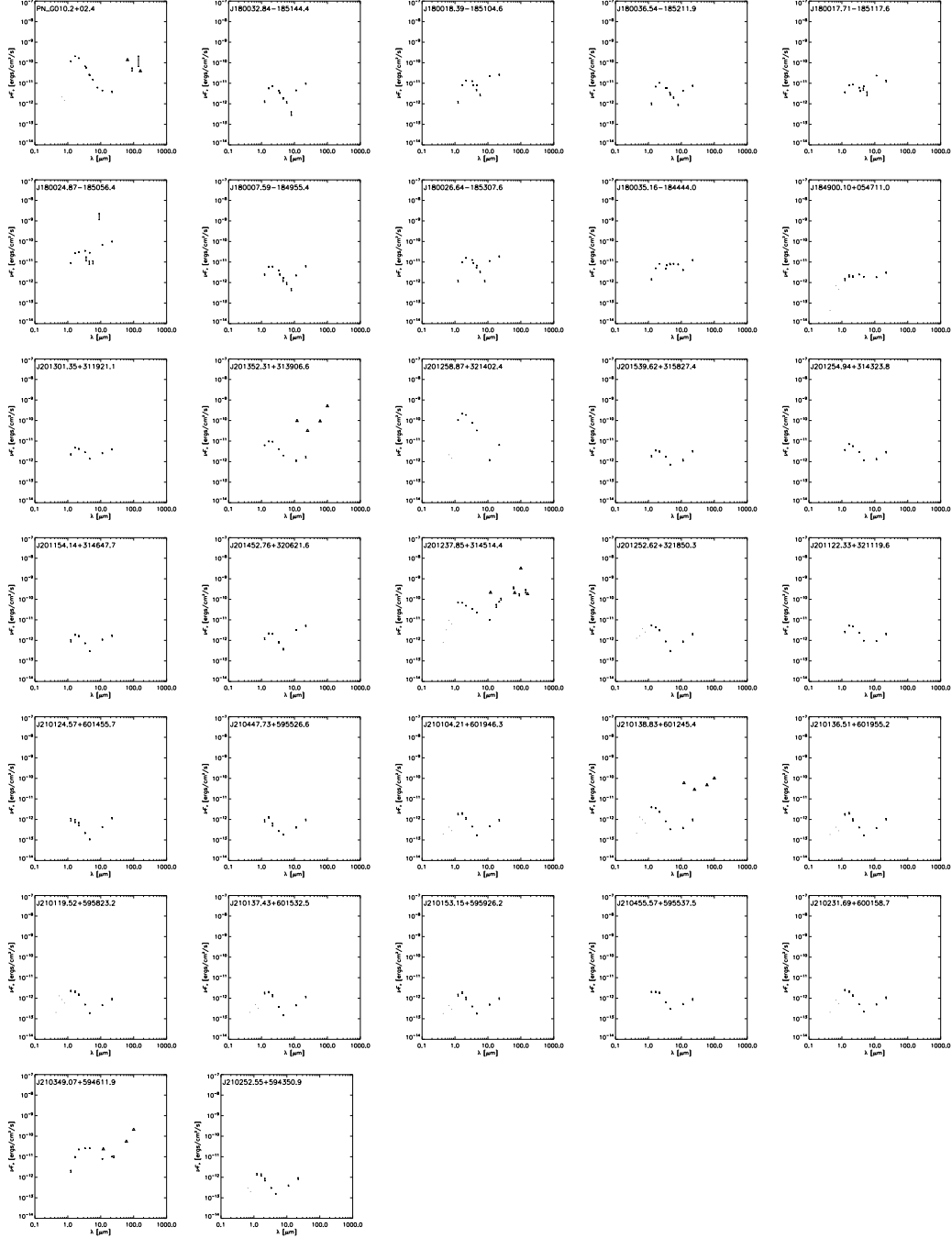
Az ábrákon a modellezett fiatal csillagok spektrális energiaeloszlás diagramjai láthatóak. A teli körök függőleges vonallal jelölik a jó minőségű fluxusokat hibával, a háromszögek pedig a felső korlátos adatokat (hasonlóan az általunk készített SED-ekhez). A fekete görbe a legjobban illeszkedő modell SED, a szürke görbesereg pedig a további 9 jó modell SED-je. A szaggatott vonal a korong nélküli központi forrás modellezett sugárzása.



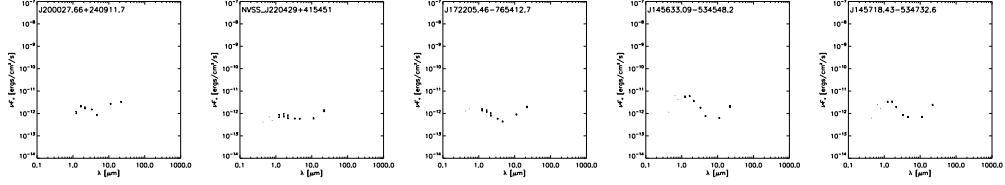


10.2. Az általunk készített SED-ek:

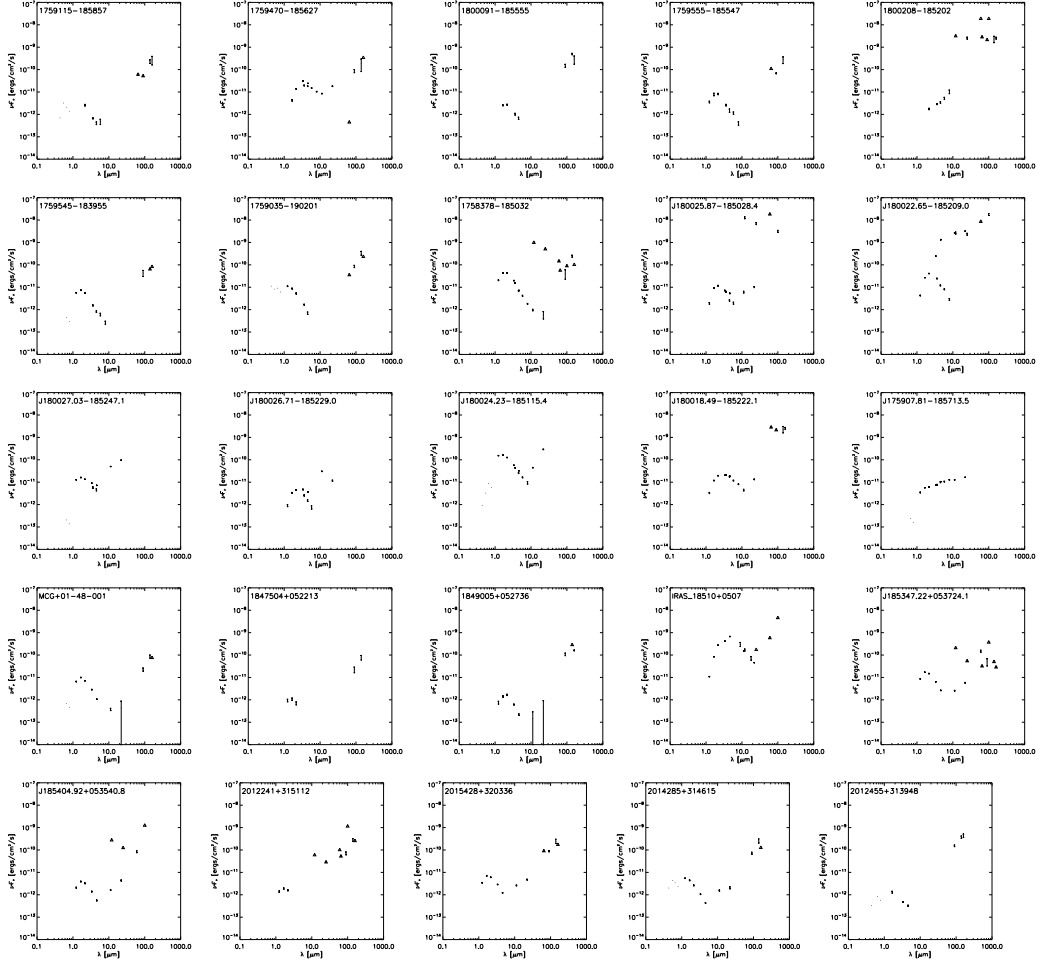
17. ábra. Class0/I



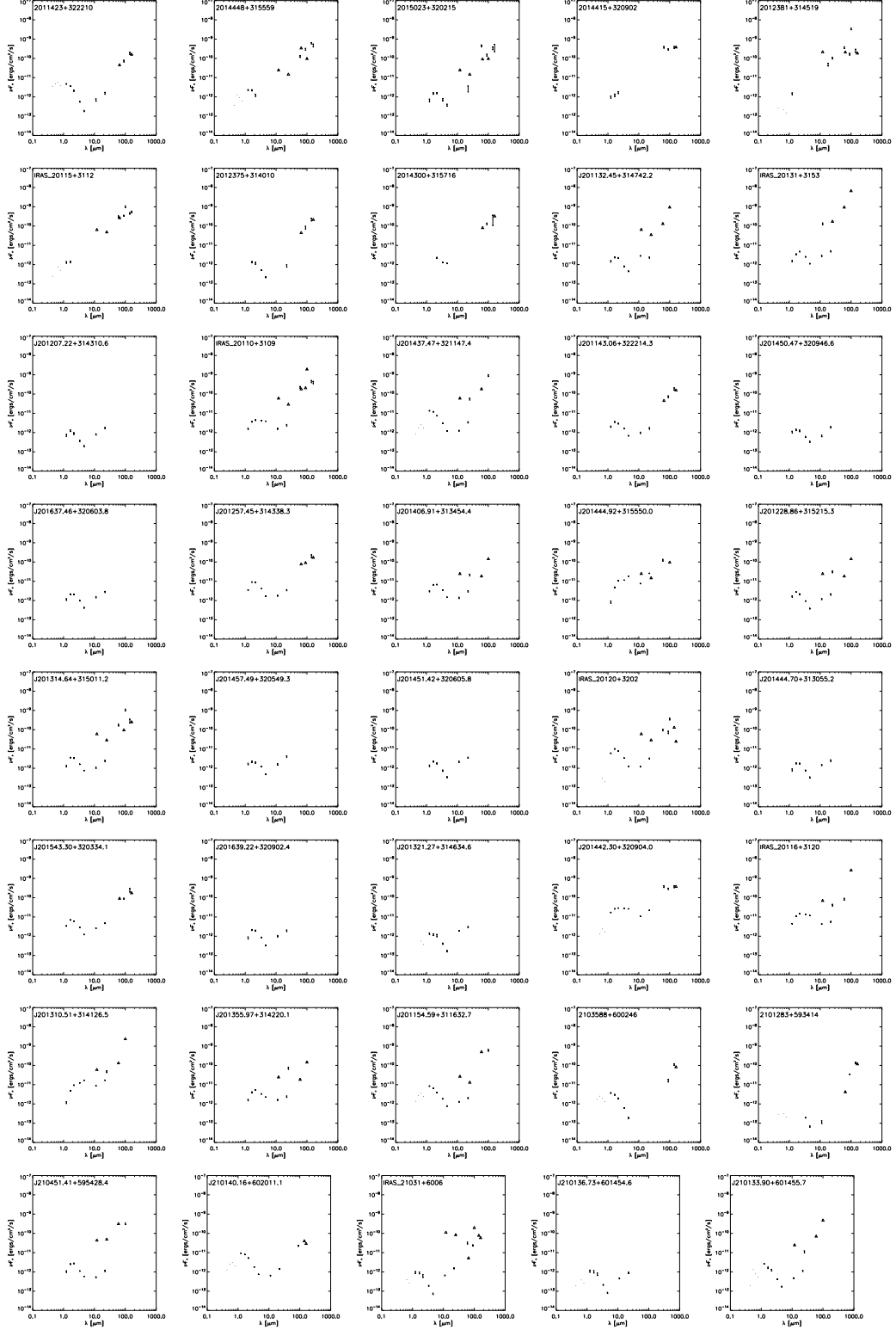
18. ábra. Class0/I



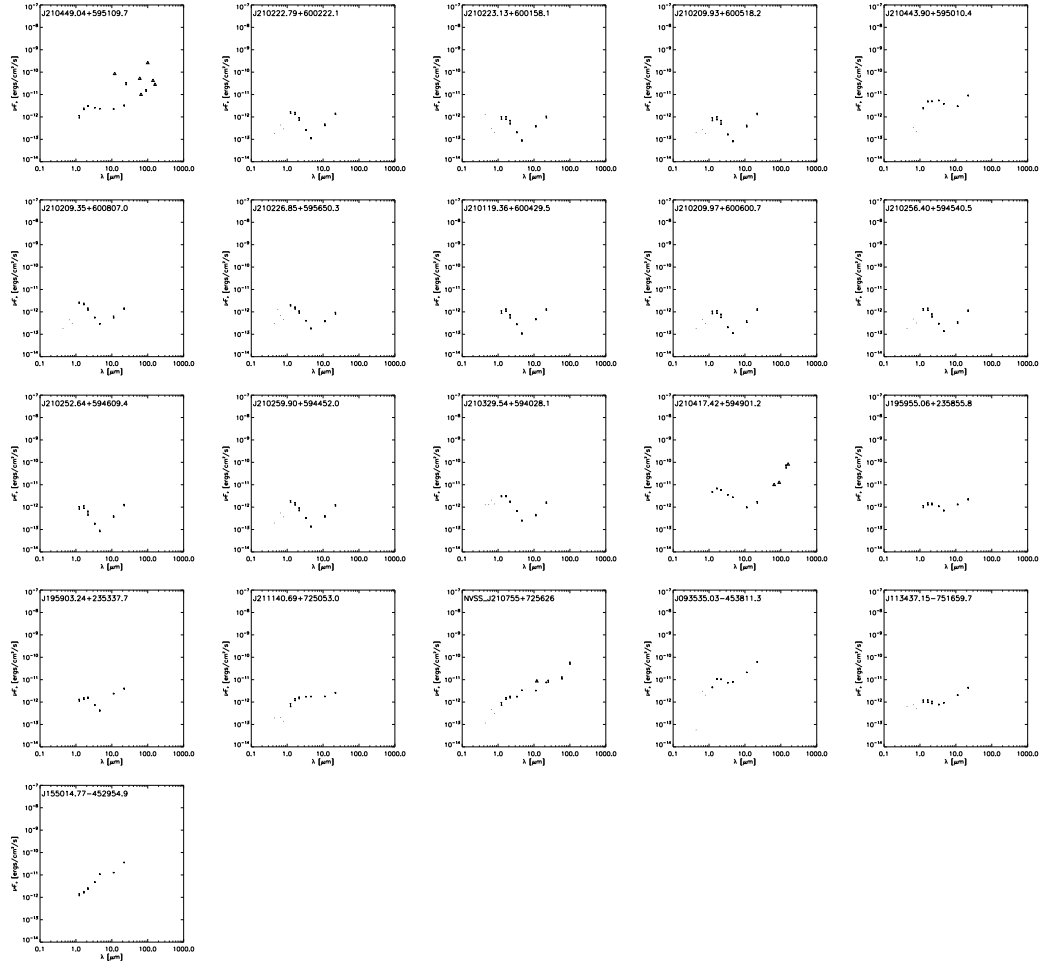
19. ábra. ClassI



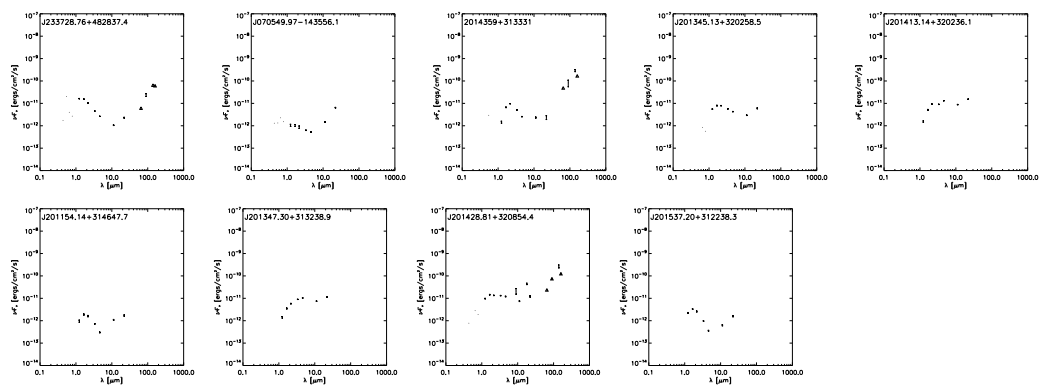
20. ábra. ClassI



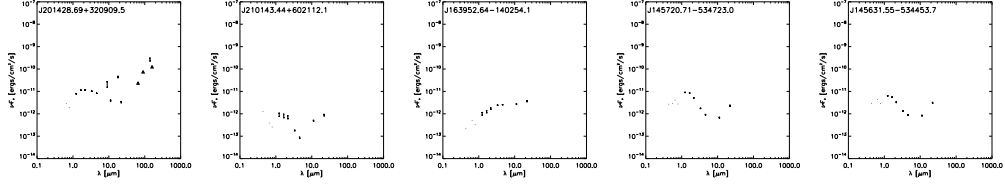
21. ábra. ClassI



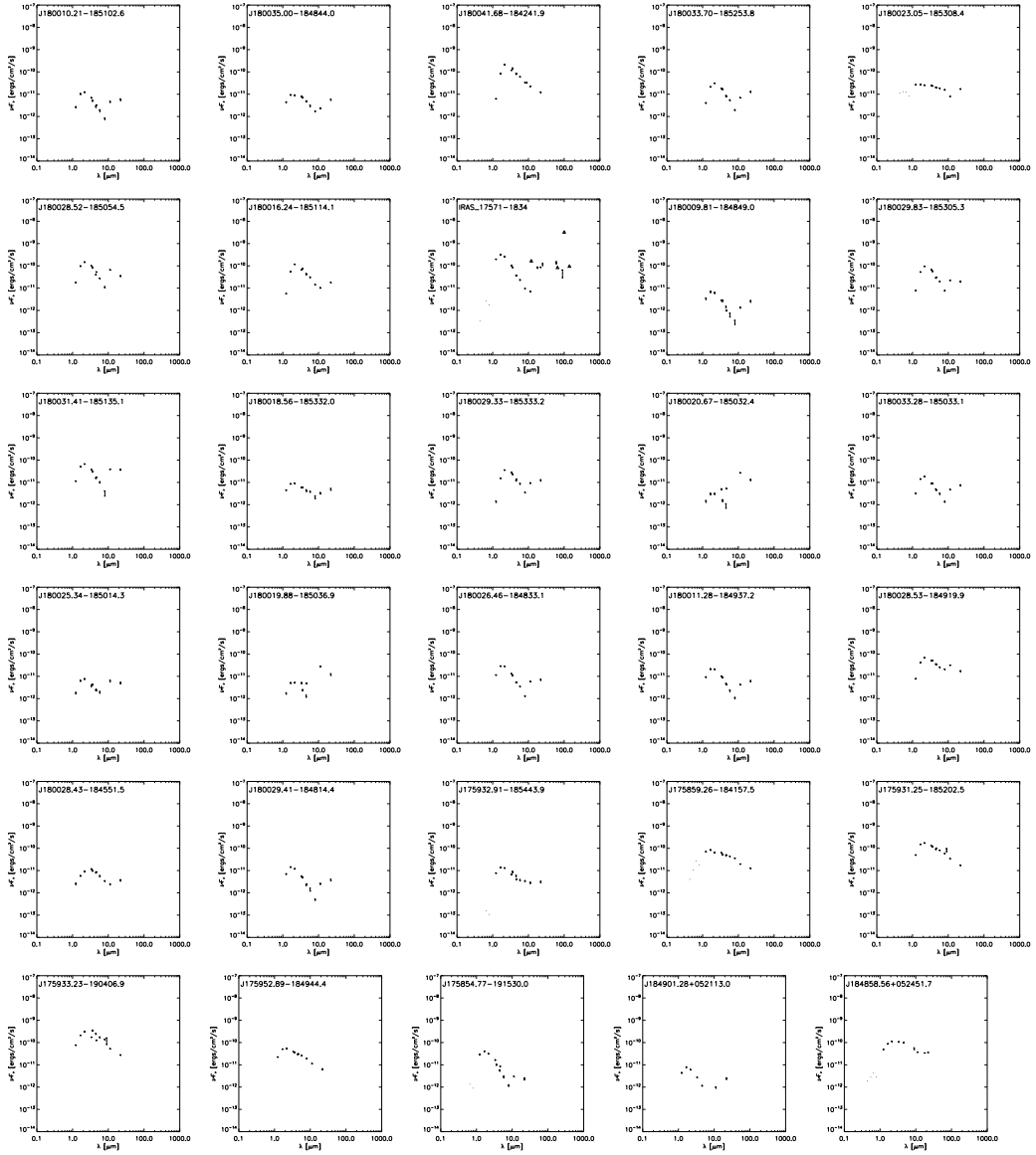
22. ábra. ClassI/II



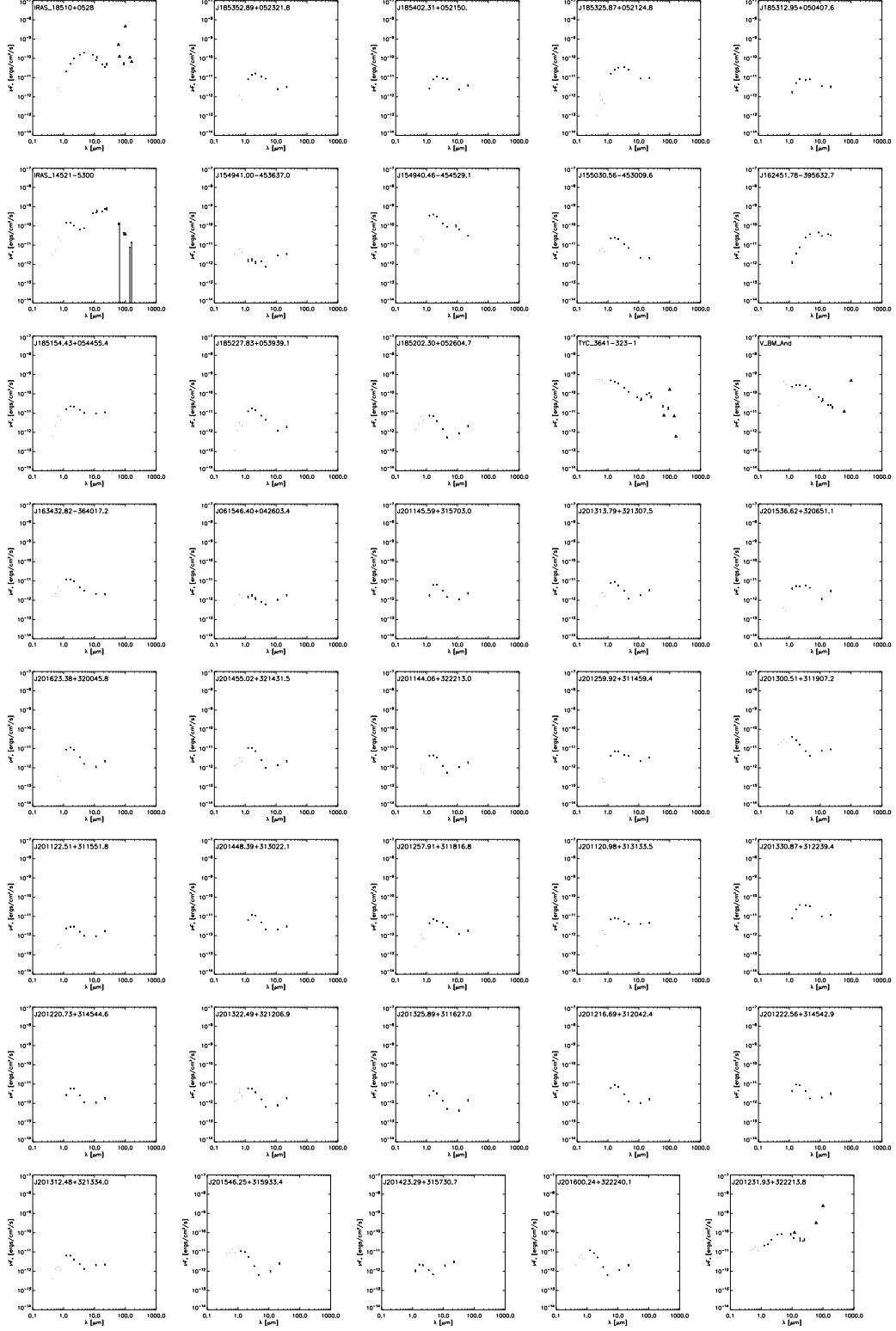
23. ábra. ClassI/II



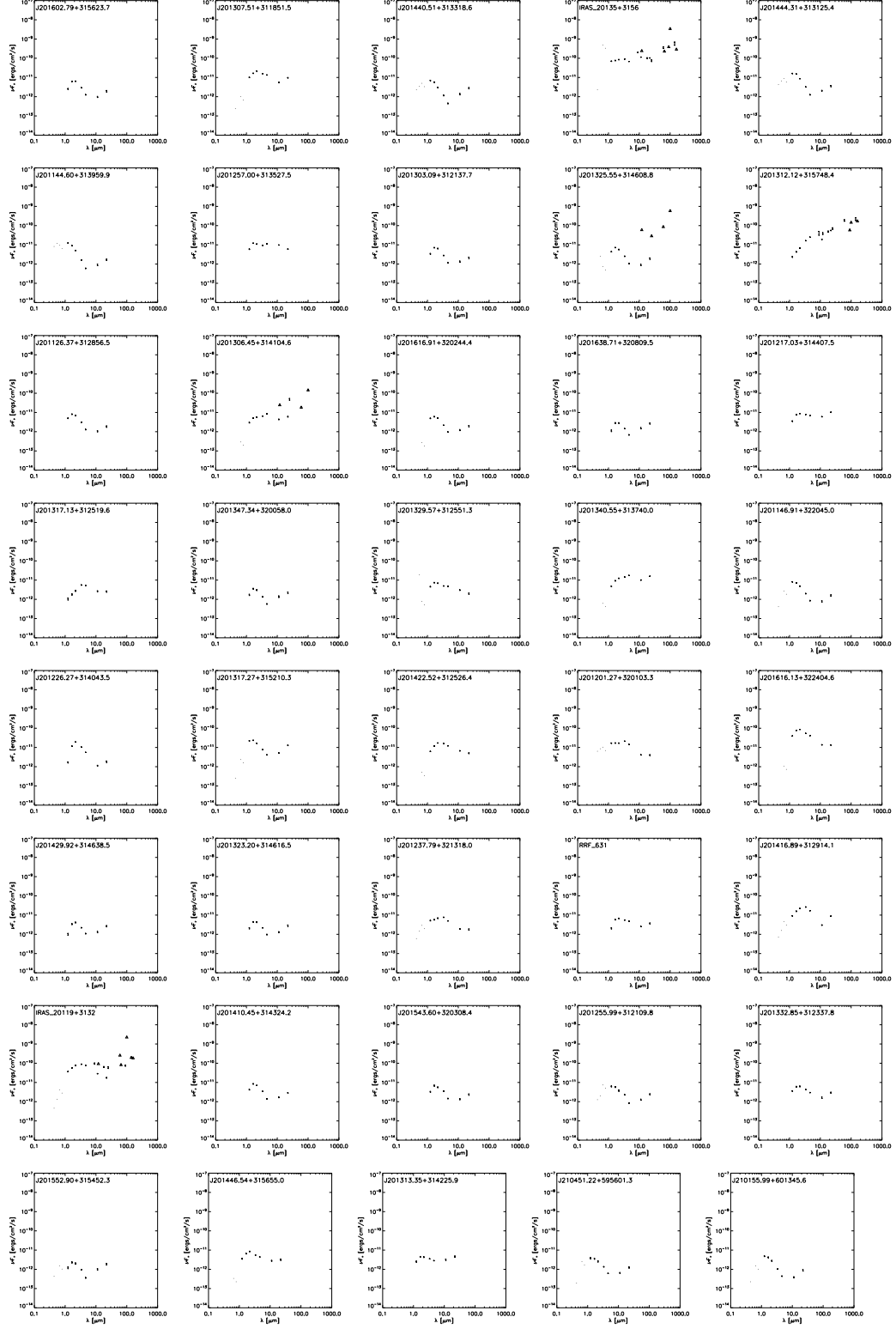
24. ábra. ClassII



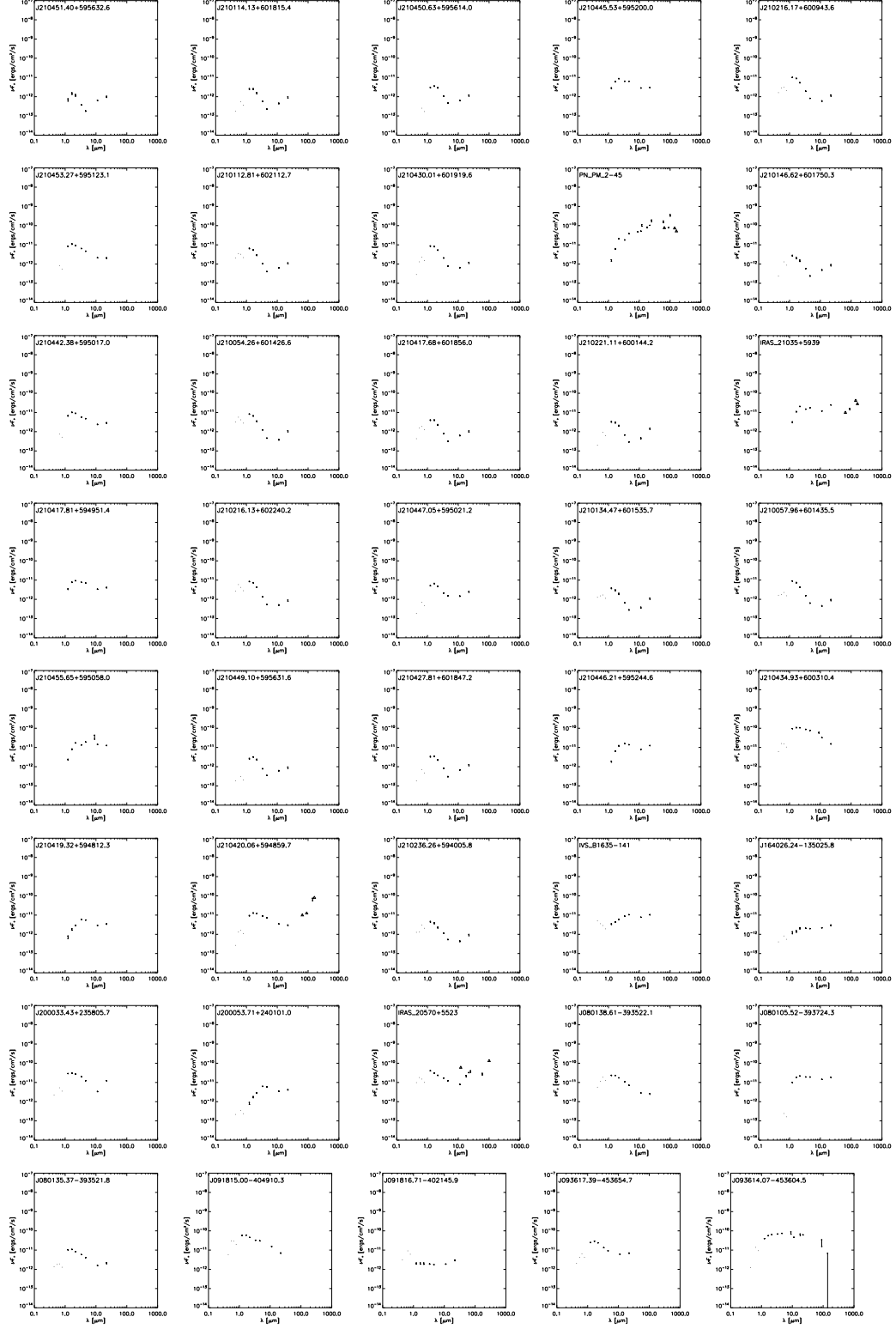
25. ábra. ClassII



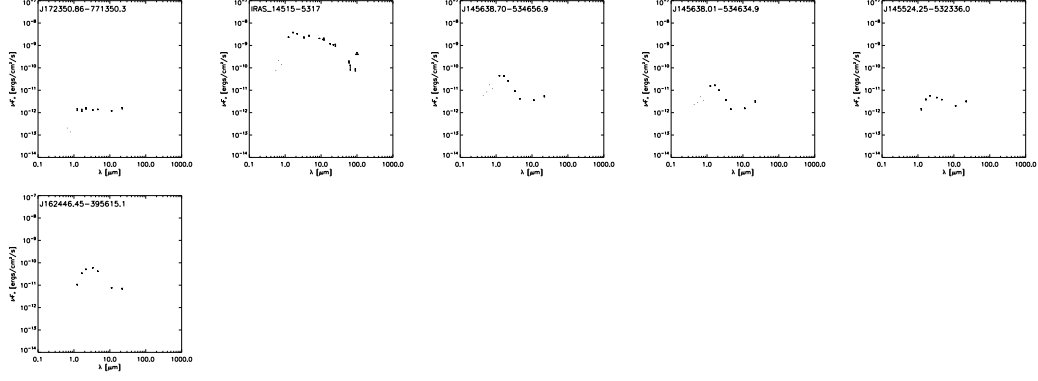
26. ábra. ClassII



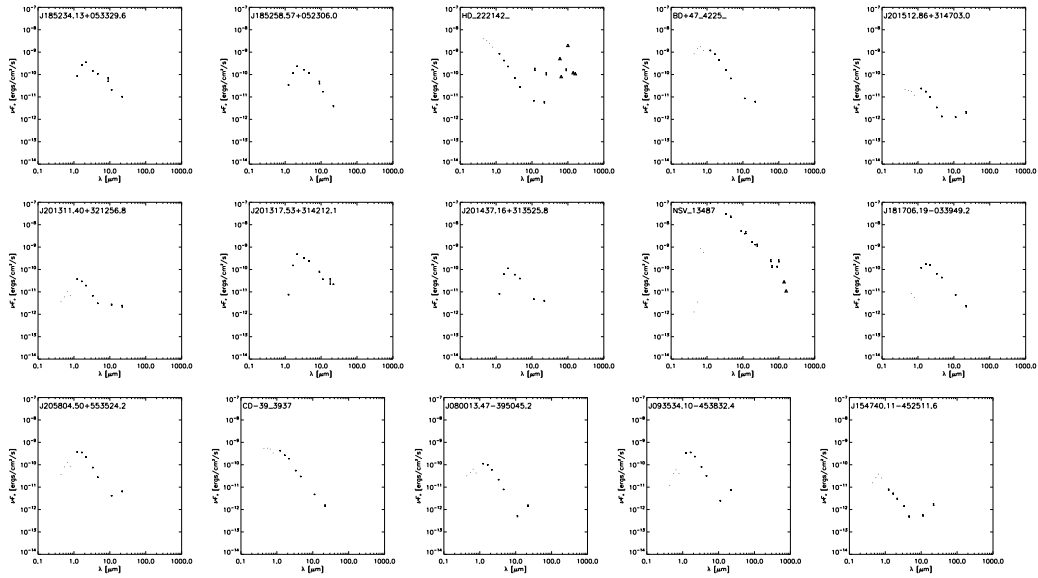
27. ábra. ClassII



28. ábra. ClassII



29. ábra. ClassII/III



30. ábra. ClassIII

