



**Софийски университет
„Св. Климент Охридски“
Физически факултет**

*Анализ на вероятностното разпределение
на плътността в звездообразуващи облаци*

АВТОРЕФЕРАТ НА ДИСЕРТАЦИЯ

на Любов Любославова Маринкова

за присъждане
на образователната и научна степен “доктор”

Научен ръководител: доц. д-р Тодор Велчев

София 2023 г.

Публикации по темата на дисертацията

Публикации в списание с импакт-фактор

1. Veltchev, T., Girichidis, Ph., Donkov, S., Schneider, N., Stanchev, O., Marinkova, L., Seifried, D., Klessen, R. S., “*On the extraction of the power-law parts of probability density functions in star-forming clouds*”, 2019, MNRAS, 489, 788; [**V19**]
2. Marinkova, L., Veltchev, T., Stanchev, O., Donkov, S., “*On the extraction of power-law tails of the probability density functions in star-forming clouds*”, 2020, BlgAJ, 33, 64; [**M20**]
3. Marinkova, L., Veltchev, T., Girichidis, Ph., Donkov, S., “*Extraction of a second power-law tail of the density distribution in simulated clouds*”, 2021, AN, 342, 898; [**M21**]

Публикации на конференции

- A. Marinkova, L., Veltchev, T., Stanchev, O., Donkov, S., “*Analysis of the density distribution in star-forming clouds: extraction of a second power-law tail*”, 2020, Publications of the astronomical society “Rudjer Boskovic”, Proceedings of the 12th SBAC, eds. L. Popovic, V. Sreckovic, M. Dimitrijevic, A. Kovacevic, pp. 51-60, ISBN 978-86-89035-15-5;

Други публикации

- Veltchev, T., Stanchev, O., Marinkova, L., Bogdanova, M., “*Modelling the general structure and physical description of clumps in star-forming molecular clouds*”, 2019, Годишник на СУ “Св. Кл. Охридски” (юбилейно издание) [**ГР19**]

Използвани съкращения и означения

В скоби са посочени англоезичните съкращения, използвани широко в литературата.

AM VPLFIT	Адаптиран метод VPLFIT
ФВР- ρ	Функция на вероятностно разпределение на плътността (ρ -PDF)
ФВР- N	Функция на вероятностно разпределение на колонковата плътност (N -PDF)
ГМО	Гигантски Молекулярен Облак/Облаци (GMCs)
МС	Междוזвездна Среда
МО	Молекулярен Облак / Облаци
ОЗ	Области на звездообразуване (SFR)
ОСВ	Опашка от степенен вид; степенна опашка (PLT)
ТОО	Точка на отклонение (DP) на опашката

Означения

H I	Атомен (нейонизиран) водород
H II	Йонизиран водород

Съдържание

1	Увод	5
1.1	Морфология и структура на МО	5
1.1.1	Турбулентност в МО	5
1.1.2	Гравитация в МО	6
1.1.3	Енергиен баланс и еволюцията на звездообразуващите МО	6
1.2	Звездообразуване в МО	6
1.2.1	Функция на вероятностното разпределение (ФВР) на плътността	6
1.2.2	Опашка от степенен вид (ОСВ) на ВР.	7
1.3	Структура и съдържание	7
2	Отделяне на степенна опашка от ФВР чрез адаптиран метод VPLFIT	8
2.1	Възможни подходи за отделяне на ОСВ	8
2.2	Адаптиран метод VPLFIT (AM VPLFIT)	8
2.2.1	Усредняване на параметрите на ОСВ	9
2.3	Прилагане на AM VPLFIT върху симулационни данни	10
2.3.1	Проследяване на еволюцията на ОСВ от данни на галактичен мащаб	10
2.3.2	Проследяване на еволюцията на ОСВ от данни на мащаби на съгъстяванията в МО	11
2.4	Чувствителност на AM VPLFIT към избраната картова рамка	12
3	Отделяне на втора степенна опашка от ФВР	16
3.1	Усъвършенстване на AM VPLFIT за отделяне на втора опашка	17
3.1.1	По симулационни данни (HRIGT)	19
3.1.2	Прилагане към наблюдателни данни от <i>Herschel</i>	21
4	Обобщение на основните резултати	23

Списък на фигурите

2.1	Еволюция на ФВР- ρ с поява ОСВ по данни от SILCC	10
2.2	Еволюция на параметрите на ОСВ (ФВР- ρ и ФВР- N) по HRIGT данни	12
2.3	Изследвани области от симулационния куб на SILCC (GMC 1-2)	13
2.4	Параметри на ОСВ от избраните рамки в GMC 1	14
2.5	Еволюция на ОСВ в зони от GMC 1 с висока резолюция	15
3.1	Илюстрация на предложения метод за отделяне на две ОСВ	17
3.2	Зависимост на параметрите на ОСВ от долната граница на ВР	18
3.3	Същото като Фиг. 3.2, но за два пуска на HRIGT симулации.	20
3.4	Извлечени двойни ОСВ от HRIGT данни, съпоставени с ФВР	21
3.5	ФВР- N с две ОСВ от Herschel	22

Глава 1

Увод

Звездите се раждат в студената, плътна, молекулярна фаза на междузвездната среда (МС), която е структурирана в кохерентни (тясно свързани), локализиращи региони или облаци, наречени молекулярни облаци (МО).

Междузвездна среда наричаме веществото и лъчението, изпълващи пространството между звездите и звездните системи в Галактиката. МС се състои главно от газ (99% от общата ѝ маса) в йонизирана, атомна или молекулярна форма, прах (1% от общата ѝ маса), магнитни полета и космични лъчи, като всички тези компоненти са в тясна взаимовръзка. Газовата компонента е тази, която осигурява материала за звездообразуване, като тя е подложена на едновременно нагряване и охлаждане и ако при дадено газово налягане е възможно неустойчиво състояние, тя се разделя на две устойчиви среди - топла и студена неутрална среда. При тези условия възникват МО, които са потопени в топлата дифузна среда.

1.1 Морфология и структура на МО

Най-големите образувания от H_2 се наричат гигантски молекулярни облаци (ГМО). Типичните маси и размери на ГМО са съответно: $\sim 10^5 - 10^6 M_\odot$, $L \sim 20 - 50$ pc. МО имат сложна морфология и строеж: размери $L \sim 2 - 20$ pc, маси $M \sim 10^2 - 10^6 M_\odot$, средна плътност $n \sim 100 \text{ cm}^{-3}$ и температури $\sim 10 - 30$ K. Посредством гравитационни сили и турбулентни движения, в режима на по-големите плътности в МО се образуват влакнести структури и съгъстявания с типични размери $l \sim 0.1 - 2$ pc и плътности $n \sim 10^3 \text{ cm}^{-3}$. Плътността в тези съгъстявания нараства до $10^5 - 10^7 \text{ cm}^{-3}$ и тези образувания се наричат *ядра* (cores) – предшественици на младите звезди.

1.1.1 Турбулентност в МО

Турбулентността играе съществена роля за динамичното и енергийно равновесие на МО, а физиката и се определя от основните уравнения на динамиката на флуидите, изразяващи законите за запазване на масата и на енергията (Уравнение на Навие-Стокс).

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho = -\nabla \cdot (\rho\mathbf{v}) \quad , \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\mathbf{v}) = -\nabla \cdot (\rho\mathbf{v}\mathbf{v}) - \nabla P + \rho\nu\nabla^2\mathbf{v} \quad (1.2)$$

Безразмерни величини, които контролират уравнението на Навие-Стокс са Маховото число $\mathcal{M} = v/c_s$ и числото на Рейнолдс $\text{Re} = Lv/\nu$, които при МО са от порядъка на $\mathcal{M} \sim 10$ и $\text{Re} = 10^9$ и съответно потоците в МО са свръхзвукови и турбулентни. При такъв вид турбулентност дисипацията на енергия се съществува чрез ударни вълни, които свързват и нелокални скали, т.е. всички скали са повлияни от процеса, за разлика от опростения модел на Колмогоров за субзвукова турбулентност, където енергията се внася ан много голяма скала, но се предава само между съседни такива докато накрая дисипира.

1.1.2 Гравитация в МО

Гравитацията е отговорна за възникването на локални сгъстявания в МО, което за пръв път е изследвано от Дж. Джинс (Jeans, 1902), който извежда и съответна формула:

$$M_J = \frac{4}{3}\pi\rho_0 \left(\frac{\lambda_J}{2}\right)^3 = \frac{\pi^{5/2}}{6} \frac{c_s^3}{G^{3/2}\rho_0^{1/2}} \propto \frac{T^{3/2}}{\rho_0^{1/2}} \quad (1.3)$$

Облаци с маса над M_J , са гравитационно неустойчиви – ще започнат да се свиват и впоследствие ще колапсират.

1.1.3 Енергиен баланс и еволюцията на звездообразуващите МО

Вириалният параметър отчита енергийния баланс между кинетичната енергия E_{kin} на облака и неговата гравитационна потенциална енергия E_{pot} (Bertoldi & McKee, 1992).

$$\alpha_{\text{vir}} = a \frac{2E_{\text{kin}}}{|E_{\text{pot}}|} = \frac{5\sigma_{\text{ID}}^2 L}{GM} \approx 1 \quad (1.4)$$

При $\alpha_{\text{vir}} < 1$ облакът ще претърпи гравитационен колапс. Съответно при $\alpha_{\text{vir}} > 1$ облакът ще започне да се разширява.

1.2 Звездообразуване в МО

1.2.1 Функция на вероятностното разпределение (ФВР) на плътността

Важна статистическа характеристика на МО, отразяваща тяхната физика и чрез която можем да опишем еволюцията им, е функцията на вероятностното разпреде-

ление (ФВР) на плътността ФВР- ρ (изследвана от числени данни) и на *колонковата* плътност (ФВР- N) (от наблюдателни данни). Двете ФВР са морфологично аналогични. В изотермична среда със свръхзвукова турбулентност, ФВР- ρ е с логнормална форма (Vázquez-Semadeni, 1994; Kritsuk et al., 2007; Federrath et al., 2010):

$$p(s) ds = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{s - s_{\text{mean}}}{\sigma} \right)^2 \right] ds, \quad (1.5)$$

където $s = \ln(\rho/\rho_0)$, а ρ_0 е средната плътност. Дисперсията на разпределението σ е свързана със средната стойност посредством $s_{\text{mean}} = \sigma^2/2$

1.2.2 Опашка от степенен вид (ОСВ) на ВР.

На еволюционен етап, когато самогравитацията в МО започва да преобладава, в облака протичат локални колапси и логнормалната ФВР- ρ търпи плавна промяна. Образува се опашка от степенен вид (ОСВ) с отрицателен наклон в режима на най-високите плътности (Klessen, 2000; Kritsuk, Norman & Wagner, 2011; Collins et al., 2012; Federrath & Klessen, 2012, 2013; Burkhart, Stalpes & Collins, 2017). Подобна форма имат и наблюдаемите ФВР- N в области на активно и умерено активно звездообразуване (Kainulainen et al., 2009).

Функционалните изрази за ОСВ на ФВР- ρ и ФВР- N са следните:

$$p(s) = A_s \exp(qs) = A_s (\rho/\rho_0)^q \quad (1.6)$$

$$p(z) = A_z \exp(nz) = A_z (N/N_0)^n, \quad (1.7)$$

1.3 Структура и съдържание

Дисертационният труд се състои от увод и същинско изложение. В Глава 2 разглеждаме отделянето на ОСВ чрез АМ VPLFIT като този подход е приложен върху симулационни данни на галактичен мащаб и върху такива на мащаб на съгъстяванията в МО. Проверява се и чувствителността на метода към избрана картова рамка. В Глава 3 обръщаме внимание на отделянето на втора ОСВ, като усъвършенстваме АМ VPLFIT и го прилагаме върху симулационни данни на HRIGT и наблюдателни от Herschel. Завършваме с Глава 4, където обобщаваме основните получени резултати.

Глава 2

Отделяне на степенна опашка от ФВР чрез адаптиран метод VPLFIT

2.1 Възможни подходи за отделяне на ОСВ

Един от въпросите, които стоят пред съвременната астрофизика, е по-доброто разбиране на еволюцията и морфологията на звездообразуващите облаци. Инструмент, чрез който можем да изучаваме глобалната структура на МО е вероятностните разпределения на плътността (ФВР- ρ) и на колонковата плътност (ФВР- N). В среда, където действат само свръхзвукова турбулентност, формата на ФВР е логнормална (Vázquez-Semadeni, 1994) и едва на по-късен етап, когато гравитацията започва да играе съществена роля, ФВР образува ОСВ при големите плътности (Klessen, 2000; Kritsuk, Norman & Wagner, 2011; Collins et al., 2012; Federrath & Klessen, 2013), като точката на отклонение на опашката (точката на отклонение от логнормалното разпределение, което се явява долната граница на степенния закон) се отмества към по-ниски плътности, а наклонът на опашката постепенно става по-малък и клони към постоянна стойност (Girichidis et al., 2014).

Обичайната процедура за отделянето на ОСВ се извършва като първо се намира най-добрата логнормална апроксимация на основната част на ФВР- ρ /ФВР- N , при ниски или средно големи (колонкови) плътности и въз основа на така полученото логнормалното разпределение се оценява ТОО. Остатъкът от разпределението вдясно от ТОО се апроксимира със степенна функция. Използваните досега методи почиват на предположението, че основната част от ФВР- ρ /ФВР- N има логнормална форма, а също, че ТОО, както и наклонът на ОСВ могат да бъдат извлечени надеждно. Ето защо е необходим максимално обективен метод за отделяне на ОСВ.

2.2 Адаптиран метод VPLFIT (АМ VPLFIT)

Избраният от нас метод за детектиране на ОСВ се основава на статистическа техника за оценка на евентуално степенно разпределение на *небинирани* данни, предложена първоначално от Clauaset, Shalizi & Newman (2009) – PLFIT. Такъв вид “тактика” за анализ на данните изключва субективния фактор при степенна апроксимация на

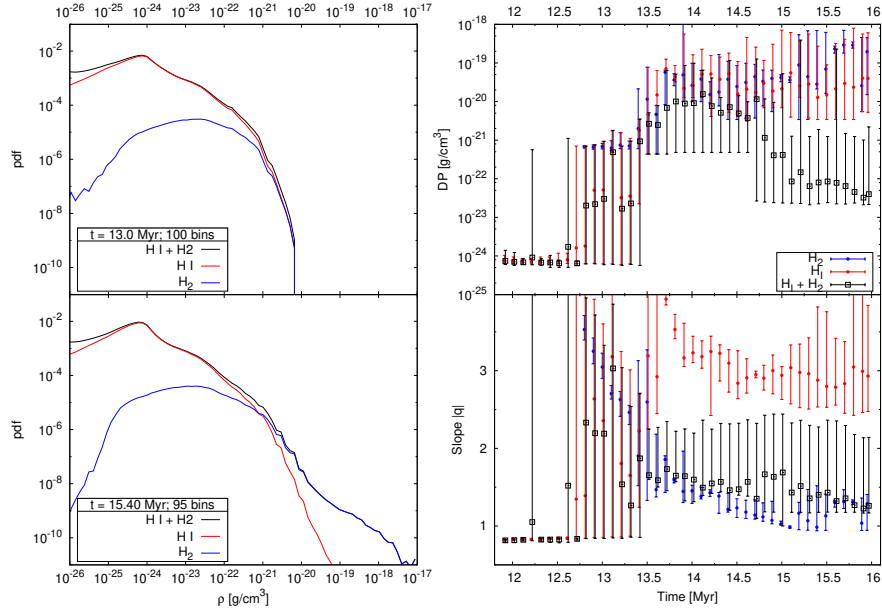
(част от) разпределението, който произхожда от избора на схема на биниране. Ако се приеме предположението, че данните над избрана долна граница x_{\min} , следват разпределение по степенен закон $p(x) \propto x^{-\alpha}$, методът прави оценка на тази граница \hat{x}_{\min} посредством статистиката за най-добра апроксимация на Колмогоров-Смирнов (КС). При този подход не се изключва възможността друга (нестепенна) функция да бъде по-подходяща апроксимация на разпределението, а се определя ТОО и наклона на най-добрата апроксимация на *възможния* степенен закон. Този метод обаче има технически недостатък - обемът на данните да не надвишава няколко десетки хиляди записа.

За работа с големи масиви от данни с размери $\gtrsim 10^5$ записа, характерни за числени симулации или пък за изображения на МО с висока резолюция, ни е необходима версия на подхода, която е пригодена за бинирани разпределения (Virkar & Clauset, 2014). Оттук нататък ще наричаме този метод VPLFIT. Той също използва числени критерии за максимално правдоподобие за извличане на ОСВ. От критично значение в случая е как да се намали в максимална степен възможната субективност, произтичаща от избора на конкретен пълен брой бинове k .

2.2.1 Усредняване на параметрите на ОСВ

След предварителното изследване на надеждността на AM VPLFIT, можем да изготвим единна процедура за извличане на ОСВ с усреднени параметри. Последователността на стъпките е следната:

1. Избира се интервал, в който да се варира пълният брой бинове k . (Обикновено k пробягва стойности от няколко десетки до около двеста, в зависимост от данните, с които разполагаме.)
2. Построява се ФВР за всеки избор на k .
3. AM VPLFIT се прилага към всяка ФВР и така се получават параметрите на ОСВ (наклон и ТОО).
4. Задава се максимален обхват на лъжливите ФВР FALSE в бинове и се изключват от извадката за анализ лъжливите ОСВ. (Препоръчителен консервативен избор: FALSE = 5 бина.)
5. Задава се долна граница на правдоподобност $(b_{k+1}/b_{\min})_{\lim}$ в бинове за обхвата на ОСВ, в зависимост от статистиката в предполагаемия диапазон по плътност, съответстващ на ОСВ.
6. Избира се представителна извадка от реални ОСВ с обхват $(b_{k+1}/b_{\min}) \geq (b_{k+1}/b_{\min})_{\lim}$.
7. Изчисляват се средните наклон и ТОО по ОСВ от тази представителна извадка.



Фигура 2.1: Еволюция на ФВР- ρ с поява на ОСВ по данни от SILCC. *Вляво*: ФВР- ρ на еволюционен етап с появяваща се (горен панел) и добре развита (долен панел) ОСВ. *Вдясно*: Еволюция на усреднените параметри на ОСВ. Несигурността на пресмятанията е оценена чрез минималната и максималната стойност на съответния параметър в използваната извадка.

2.3 Прилагане на АМ VPLFIT върху симулационни данни

2.3.1 Проследяване на еволюцията на ОСВ от данни на галактичен мащаб

За да изследваме еволюцията на ОСВ и нейните параметри, ще приложим АМ VPLFIT върху данни от целия обем на симулацията SILCC (Simulating the Life-Cycle of molecular Cloud) (Walch et al., 2015; Girichidis et al., 2016). Тези симулации са магнитно-хидродинамични, включващи ефекти на обратно въздействие от ново-възникнали звезди и проследяване на ГМО в галактическа среда. Интервалът на изследваните пространствени мащаби е от 500 pc (около порядък повече от размерите на ГМО) до 0.12 pc (типични размери на сгъстени ядра). Пусковете са проведени за еволюционно време от 12 до 16 Myr, от етапа на възникване на самогравитиращи облаци до образуването на първите звезди в тях.

Можем да проследим отделно еволюцията на газа в неговата атомна и молекулярна фаза, чрез съответните ФВР- ρ . На Фиг. 2.1 (вдясно) са представени получените параметри на ОСВ, при вариране на пълния брой бинове в диапазона $15 \leq k \leq 150$.

В много ранен еволюционен етап ($t \lesssim 12.8$ Myr) преобладава атомният газ, а ФВР- ρ се характеризира с плоска ОСВ с ТОО в режима на малки плътности (\sim

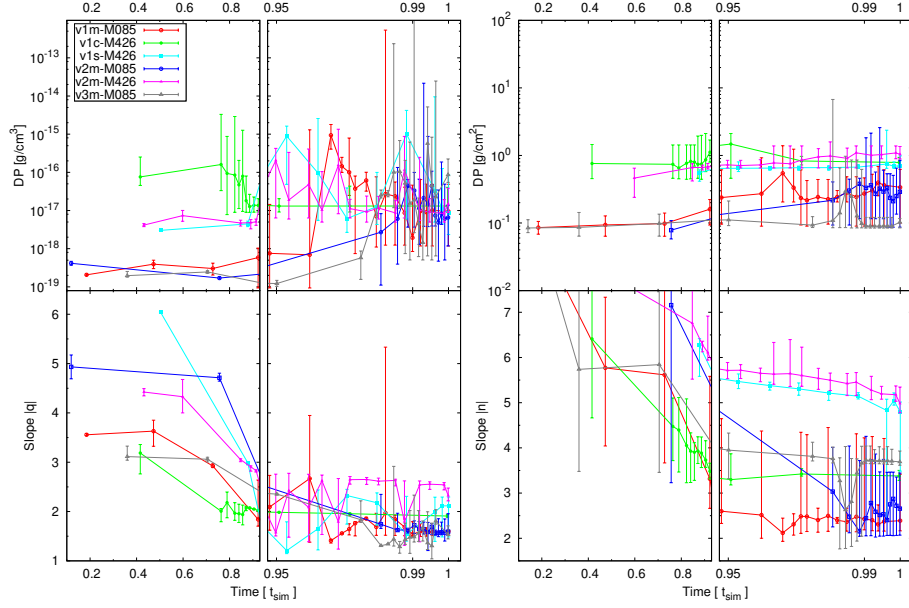
10^{-24} cm^{-3}). От друга страна, ФВР- ρ на H_2 има форма, близка до логнормална функция, а методът не детектира ОСВ. Примери за ФВР на два по-късни еволюционни етапа са показани на Фиг. 2.1 (вляво). При $t \sim 13 \text{ Myr}$ (горния панел) са детектирани ОСВ в разпределението на молекулния газ, които са добре различни от логнормалните части и имат наклони $-3 \gtrsim q \gtrsim -4$. От друга страна, и двете газови фази (H I и H_2) допринасят към ОСВ на целия газ (2.1, дясно), както личи от съответните параметри на опашката.

В хода на еволюцията, молекулният газ започва постепенно да преобладава в режима на плътности $\rho \gtrsim 10^{-20} \text{ g.cm}^{-3}$ (Фиг. 2.1, долу ляво). Наклонът на ФВР- ρ , както на H_2 , така и на целия газ, става все по-плосък и се стабилизира при стойности около $q \gtrsim -1.5$ (долу вдясно). Колебанията около тази стойност вероятно са резултат от сложната връзка между гравитацията, турбулентността и външното налягане в по-късните етапи на еволюция на облаците и образуването на протозвездни ядра в тях.

Проследихме и еволюцията на ФВР- N , извлечени от картите на колонковата плътност по проекционна ос, перпендикулярна на галактичната равнина. За разлика от резултатите за ФВР- ρ , при ФВР- N молекулният газ преобладава в режима, съответстващ на възникващата ОСВ. Формата на ФВР- N при атомния газ остава логнормална през цялото време на пуск, докато ОСВ при H_2 ФВР- N се появява още на ранен етап $t \lesssim 13 \text{ Myr}$, като в хода на еволюцията наклонът ѝ става все по-плосък (около -2 за H_2 и незначително по-малък за целия газ), а обхватът ѝ достига до два порядъка. При ФВР- N на H_2 ТОО се отмества към по-големи плътности и също варира около определена постоянна стойност. От друга страна, ТОО при ФВР- N за целия газ остава еднаква за целия изследван период.

2.3.2 Проследяване на еволюцията на ОСВ от данни на мащаби на сгъстяванията в МО

Целта на симулациите HRIGT (High-Resolution Isothermal Gravo-Turbulent) е да се изследват областите на звездообразуване в МО на по-малки мащаби. Те са хидродинамични (HD) симулации на изотермични самогравитиращи облаци със свръхзвукова турбулентност при пространствени мащаби на типични големи сгъстявания (0.5 pc) в МО, с опростено физическо моделиране с цел да се постигне по-висока разделителна способност (достига до $\sim 3 \text{ au}$ в зоните с най-висока плътност), което позволява да се постигне добра апроксимация на съответната част от ОСВ. Общата маса на отделните пускове е от 85 и $426 M_\odot$, а в Джинсови маси съответно 32 или 354 . Еволюционната продължителност на отделните пусковете варира от 0.4 до 2.5 времена на свободно падане. Задават се три типа поле на скоростите, които се варират при различните пускове: чисто компресивно (c), чисто соленоидално (s) и смесено (m) (Federrath, Klessen & Schmidt, 2008). Компресивното задвижване кара газа да образува влакнести структури със силен контраст на плътността, докато соленоидалният режим води до изолирани колапсиращи сгъстявания, които са вплетени в разредени газови структури (вж. Girichidis et al. (2011)). Въпреки разликите в пространственото разпределение на газа, еволюцията на параметрите на ОСВ при всички пускове се оказва доста еднотипно (Фиг. 2.2). Първоначалното поле на ско-



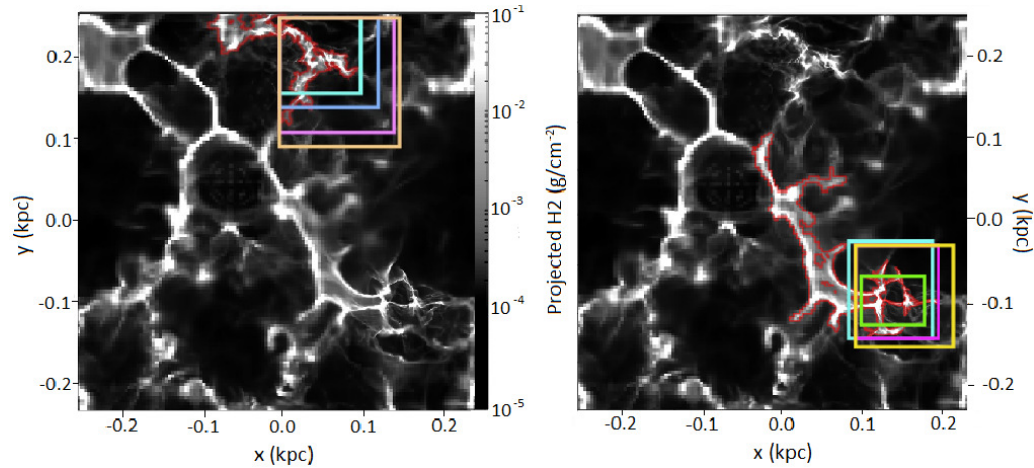
Фигура 2.2: Еволюцията на параметрите на ОСВ извлечени от ФВР- ρ (ляво) и от ФВР- N (дясно) от пусковете на HRIGT. Времето на $t \geq 0.9\langle t \rangle_{\text{ff}}$ е експоненциално.

ростта в обема данни, обуславя почти изцяло логнормална ФВР- ρ (не е показана). Едва по-късно, с напредване на еволюцията, можем да различим доста стръмна ОСВ с наклон $q \gtrsim -4$. На финалния етап, когато се образуват първите звезди или синк частици, q видимо се колебае около определена константна величина: ~ -2 в пусковете на v1c-M426 и v1s-M426, а при останалите имаме ~ -1.5 (Фиг. 2.2, долен ляв панел). От друга страна виждаме, че ТОО също варират около някаква постоянна стойност, с разлика в рамките на един порядък (горе вляво).

Еволюцията на параметрите на ОСВ на ФВР- N е доста подобна на тази, която получихме за ФВР- ρ (Фиг. 2.2, десните панели). Все пак относителната продължителност на етапа, характеризиращ се с различни ОСВ ($n \gtrsim -4$) – ако такъв изобщо има – е много по-кратка. При пусковете v1m-M085 и v2m-M085 наклонът рязко става по-плосък, със забележима тенденция към константна стойност ($n \sim -2.5$). Обхватът на вариациите на ТОО в края на еволюционния цикъл е по-тесен, в сравнение с този при ФВР- ρ : около половин порядък при всеки избран пуск.

2.4 Чувствителност на АМ VPLFIT към избраната картотова рамка

Възниква въпросът доколко чувствителни са видът и свойствата на ФВР- N , ако решим да приложим метода към определена избрана рамка, изрязана от общата карта на колонкова плътност. Тази именно рамка, обикновено правоъгълна, се избира така, че да обхваща всички зони с видимо значително по-голяма колонкова



Фигура 2.3: Изследвани области от симулационния куб на SILCC. Начертани са 4 правоъгълни рамки и изоконтури, обхващащи GMC 1 (вляво) and GMC 2 (вдясно)

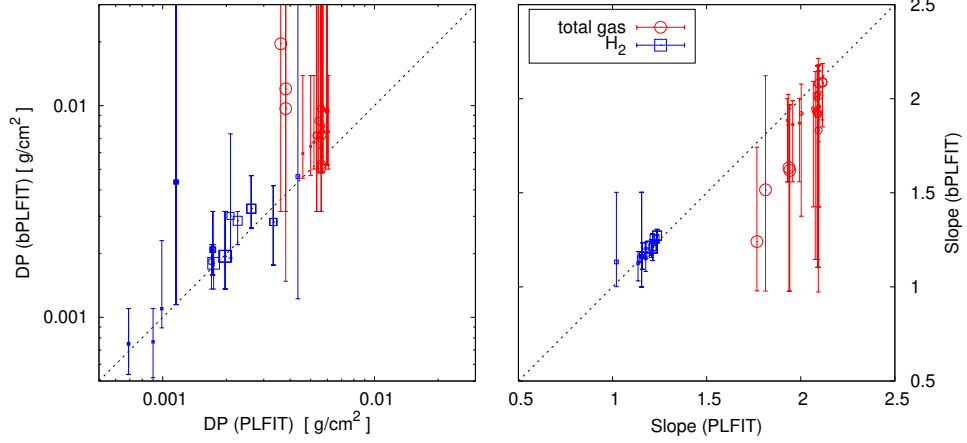
плътност от тази на фона. Такъв вид изразяване обаче води до изключване на някои области от висока плътност, тъй като ГМО са със силно влакнеста структура и някои влакна, свързани със съседни облаци, няма да бъдат включени. Тук отново ще използваме данни от SILCC като проследяваме еволюцията на ФВР- N в две зони с типични размери на ГМО (~ 100 pc). Допълнителното подобрене на резолюцията е приложено към зони с центрове (40 pc, 180 pc) и (140 pc, 120 pc) (Фиг. 2.3). Тези области ще означим с GMC 1 и GMC 2 и ще изследваме еволюцията на ФВР- N в тях, получени по два индикатора: целия газ и (само) молекулярния газ (H_2). Във всяка от тях очертаваме четири правоъгълни рамки с последователно нарастващ размер, които използваме за изучаване на ефекта върху параметрите на ОСВ от подобна селекция. Избраният времеви диапазон от симулациите SILCC отговаря на периода на еволюция на МО от 13.4 до 16 Myr, със стъпка 0.5 Myr.

При анализ на резултатите за тези две области на звездообразуване се оказва, че те не се различават съществено, ето защо, от тук насетне, ще представяме само тези за GMC 1.

Подходящ начин за изследване на надеждността на AM VPLFIT е да сравним резултатите от този метод с тези от PLFIT, който е първообраза на използвания от нас метод и използва небинирани данни. Фиг. 2.4 съпоставя извлечените параметри на ОСВ за целия газ и за H_2 . Вижда се, че в рамките на грешката на VPLFIT резултатите от двата метода се съгласуват добре, особено за H_2 . Ако се спрем на ФВР- N от картата на целия газ, AM VPLFIT води до систематично по-малък наклон на СО (обикновено с 0.1 – 0.3 dex) съответно до по-високи стойности за ТОО. Това несъответствие може да се дължи на ефекти, свързани с резолюцията, които се усилват при биниране на високите плътности от картата на ФВР- N .

За настоящата ни задача - анализ на зависимостта на определените параметри на ОСВ на ФВР- N по картата на колонковата плътност на молекулярния газ от избраната рамка - ще използваме два различни подхода на селектиране (Фиг. 2.3):

- Последователност от четири правоъгълни рамки, обхващащи разглеждания



Фигура 2.4: Сравнение между параметрите на ОСВ от избраните рамки в GMC 1, получени чрез PLFIT and bPLFIT. Големината на символите е пропорционална на еволюционния момент – по-големи символи обозначават по-късен еволюционен етап. Показана е линията на съвпадение (прекъснатата).

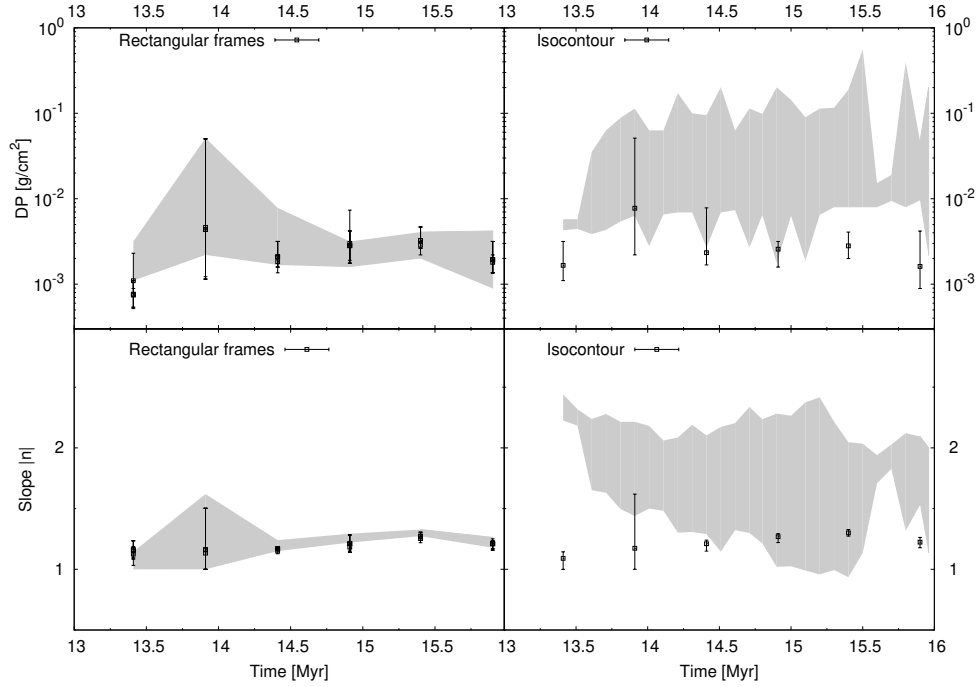
ГМО и дифузното вещество в неговата околност.

- Изоконтур, съответстващ на ниска колонкова плътност N_{cut} . Последната е под средната стойност за ТОО, пресметната по анализа на ОСВ на ФВР- N в избраните рамки.

Всички избрани рамки обхващат GMC 1, но пресичат части от главните му влакнести структури със средна колонкова плътност $N(\text{H}_2) \lesssim 10^{-3} \text{gcm}^{-2}$, сравнима със средната стойност за целия облак. Оттук можем да предположим, че ФВР- N и съответно неговата ОСВ ще варират съгласно избраната рамка. Въпреки това, както може да се види на Фиг. 2.5 (ляво), параметрите на ОСВ в даден еволюционен етап са подобни във всички рамки. Това означава, че газът с ниска колонкова плътност, който се намира извън влакнестите структури на облака GMC 1, не допринася за обхвата на ОСВ. За да сведем до минимум възможните отклонения, внесени от прилагания метод на обрязване, очертаваме регион с изоконтур с $N_{\text{cut}} = 4 \times 10^{-4} \text{g.cm}^{-2}$. Избраната стойност е: а) значително под тази на намерените ТОО, така че bPLFIT е в състояние да различи ОСВ от нестепенно разпределение на ФВР- N ; и б) на под един порядък по-малка от получените ТОО.

Оказва се, че получените параметри на ОСВ на ФВР- N на облака, ограничен от избрания изоконтур, са много близки по стойност до тези от правоъгълните рамки, въпреки че разглежданият облак е по-голям от GMC 1. С други думи, може да се каже, че въвеждането на обрязване по колонкова плътност $N_{\text{cut}} < \langle \text{DP} \rangle$, съответстващо на изоконтур, който не е изцяло включен в разглежданата карта на облака, не допринася за обхвата на ОСВ на ФВР- N .

На десния панел на Фиг. 2.5 еволюцията на параметрите на ОСВ, определени при очертаване на облака с изоконтур е сравнена с тази на параметрите от ФВР- N от целия куб на SILCC, взети от V19. Вижда се, че вариациите на параметрите на



Фигура 2.5: Еволюция на параметрите на ОСВ, извлечени чрез метода VPLFIT от ФВР- N от H_2 в избраните области на зоната с висока резолюция GMC 1 от симулационните куб на SILCC. *Ляво:* в правоъгълните рамки, сравнени с изоконтур (сива зона; съответстващ на диапазона на несигурност на данните в десния панел). *Дясно:* изоконтур с долна граница на обрязване в ниските плътности $N_{\text{cut}} = 2 \times 10^{-3} \text{ g.cm}^{-3}$, сравнен с еволюцията на параметрите на ОСВ в целия куб (**взет от V19**; сива зона).

ОСВ на ФВР- N от целия SILCC куб са по-големи, защото в този случай принос към данните имат различни области от картата, като също е възможно тези области да обхващат облаци, намиращи се в различни еволюционни стадии. Общата тенденция е, че ОСВ става все по-плоска, докато ТОО не се мени особено и остава приблизително константна, с леко изменението в рамките на до един порядък (вж. още Фиг. 6 в V19).

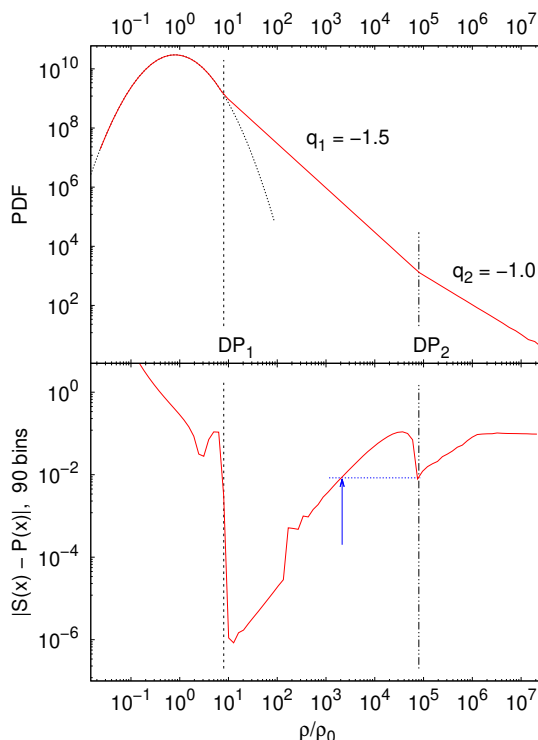
В хода на еволюцията на облака, наклонът на ОСВ на ФВР- N , определен по изоконтур, не се мени. Оказва се много по-малък от очаквания от теоретични пресмятания за подобен еволюционен етап. По-стръмни опашки са извлечени от ФВР- N по целия SILCC куб (V19; 2.5, вдясно), но това отново може да се интерпретира като ефект от ниската резолюция при големи колонкови плътности – за разлика от изследваните GMC 1 и GMC 2, чиито най-плътни зони са с висока резолюция. Нашето обяснение за получените резултати е, че не бива да се очаква, че ФВР- N на молекулярния газ задължително трябва да следва еволюцията на целия газ.

Глава 3

Отделяне на втора степенна опашка от ФВР

Втора степенна опашка за пръв се детектира при анализ на числени симулации с висока резолюция. Kritsuk, Norman & Wagner (2011) (оттук нататък KNW 11) забелязват такава в десния край на ФВР- ρ на МО в късния етап на тяхната еволюция, при достигане на скали от няколко AU. Те установяват, че степенна опашка с наклон $q \sim -1.7$ е добре развита при еволюционно време от около 40% от времето за свободно падане, отделяйки се от първоначалното логнормално разпределение при $s_{\text{PLT}} \sim 1$ и с обхват по плътности повече от 6 порядъка (вж. Фиг. 1 в KNW 11). При най-големите плътности ($s \gtrsim 7$) се вижда дори още по-плоска опашка, с наклон $q \simeq -1$. KNW 11 интерпретират този феномен като индикация за натрупване на маса, дължащо се на допълнителна поддръжка срещу гравитационния колапс, осигурена от запазването на момента на импулса.

Втора степенна опашка е открита и по наблюдателни данни, ФВР- N са снети от дузина Галактични области на звездообразуване (Schneider et al., 2015, 2022). Проблемът с възможна втора ОСВ се разглежда напоследък и в някои теоретични изследвания. При моделиране на самогравитиращ, изотермичен и турбулентен облак с постоянен темп на акреция и малко хомогенно ядро, Donkov & Stefanov (2019) получават два различни наклона за ОСВ: 1) $q = -3/2$, далеч от ядрото; и 2) $q = -2$, което съответства на решение за свободно падане в близка околност на ядрото. За разлика от работата на KNW11, тук втората ОСВ е по-стръмна. Този модел впоследствие е доусъвършенстван, с усложняване на термодинамичната картина в облака — газът остава изотермичен далеч от ядрото, но близо до него, където енергийният баланс се определя най-вече от гравитационния потенциал, се подчинява на уравнението на състоянието на “твърда политропа” (Donkov et al., 2021). Едно от възможните решения за профила на плътността в този случай е това с наклон $q = -1$. Това е случай с политропен показател $\gamma = 4/3$, при който се осигурява енергиен баланс между топлинното налягане и гравитацията на ядрото, както и спрямо ударното налягане (ram pressure) на падащите външни слоеве. По този начин е възпроизведен резултатът на KNW11, но в различна физическа рамка.



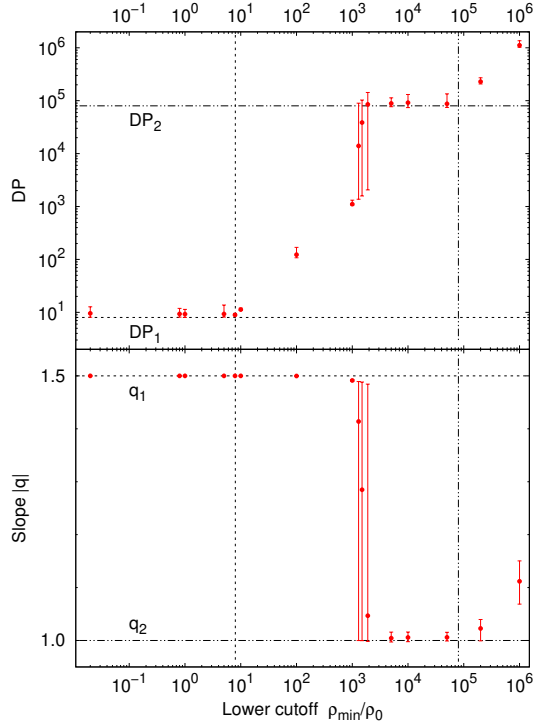
Фигура 3.1: Илюстрация на предложения метод за извличане на две ОСВ, приложен към данни на аналитична, бинирана ФБР (горен панел; в червено), състояща се от главна логнормална част (точковата линия) и две ОСВ (показани са наклоните и ТОО). Разликата между аналитичната КФР и КФР на фитата е представена на долния панел (с червено). Минималната граница на обрязване на по-ниската плътност, която позволява откриване на втората ОСВ (вижте текста), е обозначена със синя стрелка

3.1 Усъвършенстване на АМ VPLFIT за отделяне на втора опашка

Адаптираният метод VPLFIT може да бъде доусъвършенстван, с цел отделянето на втора ОСВ (ако такава съществува) от вероятно разпределение на плътността или колонковата плътност. Процедурата PLFIT търси ОСВ при дадено VP, като за целта използва статистика на Колмогоров-Смирнов (КС) при определена долна граница на обрязване на данните x_{\min} :

$$D = \max_{x_i \geq x_{\min}} |S(x_i) - P(x_i)| \quad (3.1)$$

където $S(x_i)$ е кумулативна функция на разпределение (КФР) на данните, а $P(x)$ е КФР на степенен закон, който представлява най-добра апроксимация в диапазона $x_i \geq x_{\min}$ (Clauset, Shalizi & Newman, 2009). Колкото по-дълбок е минимумът във функцията $|S(x_i) - P(x_i)|$, толкова по вероятно е да се засече преход към ОСВ при $\sim x_i$. Стойността $x_i \geq x_{\min}$, която минимизира D и отговарящият на това показател на степенния закон се избират съответно за ТОО и наклон на ОСВ.



Фигура 3.2: Зависимостта на извлечените параметри на ОСВ (червените символи) от избраното долно обрязване на тестваната аналитична ФВР показана на Фиг. 3.1 със същите означение на параметрите на ОСВ.

Постепенното увеличаване на x_{\min} ограничава разглеждания набор от данни и следователно набора от стойности $|S(x_i) - P(x_i)|$, използвани за получаване на КС статистиката. Този подход може да доведе до намирането на друга оптимална единична ОСВ или пък до откриването на втора ОСВ, съответстваща на по-висока логаритмична плътност, за някое x_{\min} , надвишаващо ТОО на първата ОСВ. Ще илюстрираме казаното дотук с един прост експеримент.

Построяваме аналитично ФВР- ρ , с форма и параметри, които са много подобни на получените при числените изследвания на KW11 (Фиг. 3.1, горен панел). Основната част на разпределението е логнормална, докато при големите плътности то се състои от две ОСВ, с точки на отклонение DP_1 и DP_2 и с наклони $q_1 = -1.5$ (типичен за еволюирали самогравитиращи облаци, Girichidis et al. 2014) и $q_2 = -1$ (установен от KW11). Пример за такава функция $|S(x) - P(x)|$ за голям брой бинове (т.е. малки по размер бинове) е показана на долния панел на Фиг. 3.1. Както може да се очаква, големите стойности на $|S(x) - P(x)|$ могат да бъдат достигнати в диапазона $x < DP_1$, който дефинира логнормалната част на ФВР. ТОО на ОСВ съответстват на изразени локални минимума на тази функция, с локален максимум между тях. Докато $x_{\min} \equiv \rho_{\min}/\rho_0 < DP_1$, AM VPLFIT ще извлича единична ОСВ с ТОО DP_1 и наклон q_1 . Ако изберем по-ниска граница на обрязване $x_{\min} \gtrsim DP_1$ все още извличаме единична ОСВ, но с постепенно променящи се параметри. Втората ОСВ с ТОО DP_2 е детектирана при обрязване с $|S(x_{\min}) - P(x_{\min})| \gtrsim |S(DP_2) - P(DP_2)|$ (синята стрел-

ка и пунктирната линия на Фиг. 3.1, долен панел) – след това процедурата избира $x_i = DP_2$, тъй като това съответства на абсолютния минимум в дадената база данни с $x \geq x_{\min}$.

Да разгледаме Фиг. 3.2, която илюстрира как избора на долна граница на обрязване на аналитичната ФВР от Фиг. 3.1 повлиява на параметрите на извлечената ОСВ (наклон и ТОО). За $x_{\min} \leq DP_1$, с много голяма точност, методът извежда единична (т.е. първа) ОСВ. Получените наклони практически съвпадат с q_1 , а ТОО са малко по-високи от DP_1 , което обаче е ефект на бинирането. Долното обрязване в диапазона $DP_1 \leq x_{\min} \lesssim 10^3$ все още продуцира единична ОСВ с наклони $\approx q_1$, докато стойностите на ТОО постепенно се повишават и са пропорционални на избраното x_{\min} . С избор на x_{\min} близко до 2×10^3 (показано е със стрелка на Фиг. 3.1, долен панел) методът започва да “усеща” втора ОСВ, при някои определени размери на бина – това води до големи несигурности на получения наклон, който в диапазона $[q_1, q_2]$. И все пак, преходът за детектиране на втора и сега единствена ОСВ е почти мигновен (Фиг. 3.2). Веднага щом x_{\min} стане по-голямо от критичната стойност 2×10^3 за всички размери на бина.

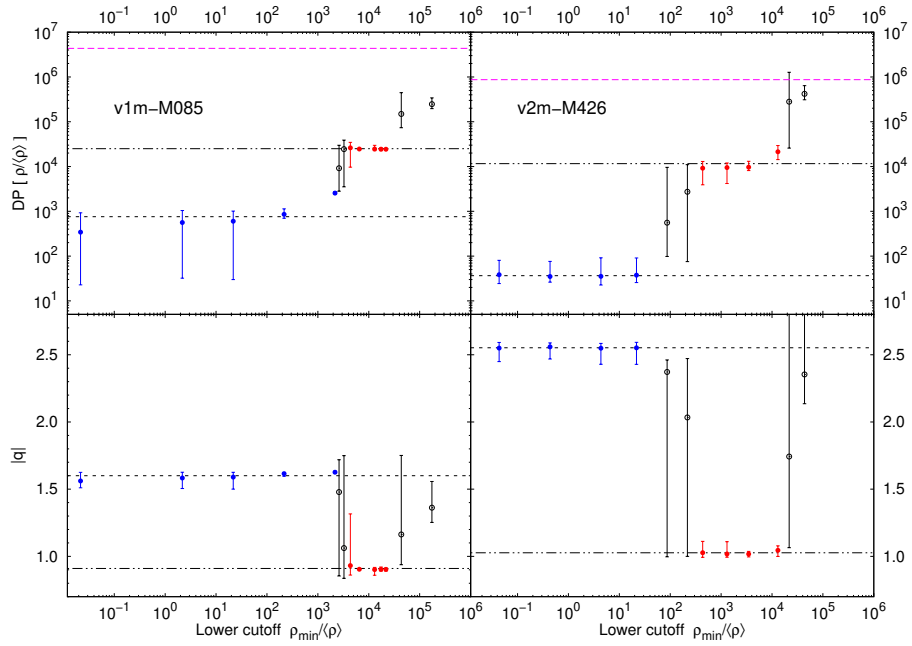
3.1.1 По симулационни данни (HRIGT)

Данните, които използваме за търсене на втора ОСВ, са от шесте пуска от използваните преди това HRIGT симулации, тъй като те са много подходящи за практическа проверка на предложения метод за извличане на втори ОСВ. Построяваме ФВР- ρ по данни от кубовете почти в края на съответните пускове на симулацията

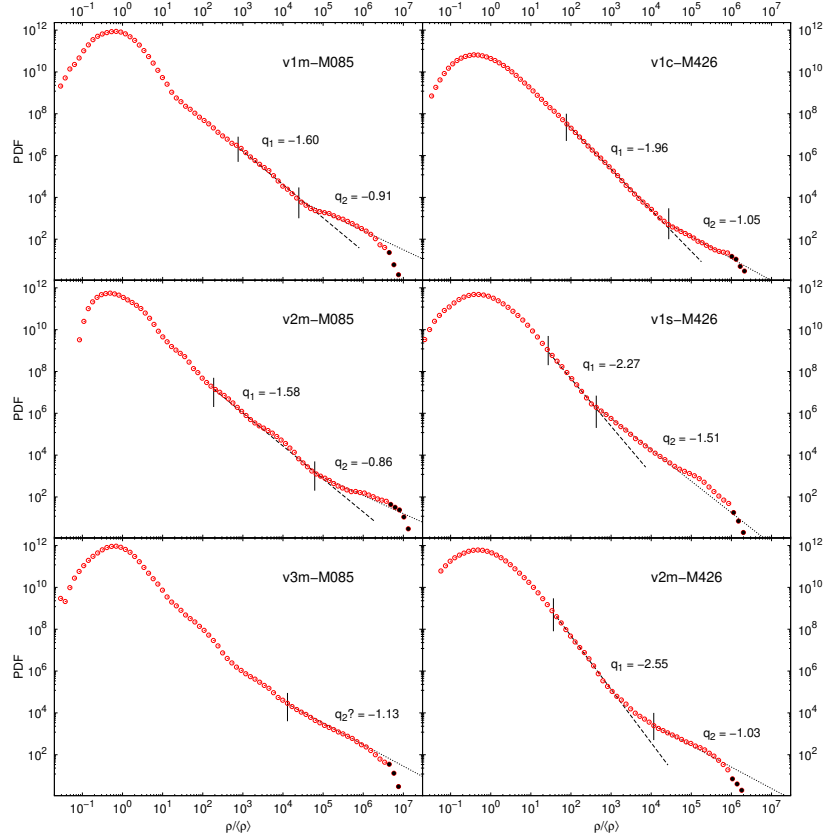
На Фиг. 3.3 е показано чрез две илюстрации как определените от АМ VPLFIT параметри на ОСВ зависят от избраната долна граница на обрязване $\rho_{\min}/\langle\rho\rangle$. Тяхното поведение наподобява това на параметрите на ОСВ, извлечени от аналитичната ФВР (Фиг. 3.2). Първо, съвсем ясно се различават две групи с много близки, в рамките на грешката, оценени стойности за ТОО и наклоните. Тези две групи на отделните параметри могат да се асоциират с две различни ОСВ. Второ, двете групи са разделени от тесен диапазон $\rho_{\min}/\langle\rho\rangle$. Тук извлечените параметри на ОСВ се характеризират с диапазони на несигурност, сравними с разликата между средните параметри на ОСВ на двете групи. Трето, изборът на $\rho_{\min}/\langle\rho\rangle$ в рамките на обхвата на втората ОСВ дава по същество различни оценки на средните параметри на ОСВ в сравнение с тези на втората група. Отклонението расте, когато избраното обрязване да данните приближава границата на плътността при, която възникват sink частиците.

Този морфологичен анализ на характеристиките на ФВР предполага, че лесно можем да получим средните параметри на предполагаемите две ОСВ, налагайки някои определени изисквания за изключване на точките, които съответстват на $\rho_{\min}/\langle\rho\rangle$ от преходния диапазон между двете опашки или от десния край на ФВР, съответстващ на най-високите плътности.

Във всички без един от случаите, нашият метод извлича две ОСВ, като всяка от тях обхваща поне един порядък по плътности (Фиг.3.4). Първите ОСВ се отклоняват от основната част на ФВР при $\rho/\langle\rho\rangle \sim 10^1 - 10^2$, като техните наклони варират в сравнително голям диапазон $-2.6 \lesssim q_1 \lesssim -1.6$. Извлечените втори ОСВ са поеднотипни по отношение на техните параметри, с ТОО от порядъка на 10^4 и наклони



Фигура 3.3: Зависимостта на извлечените параметри на ОСВ от двата HRIGT пуска, при определено долно обрязване на плътностното разпределение. Нанесени са точките описващи първата ОСВ (сини) и ОСВ 2 (червени), както и (черните, отворени) тези, които не отговарят на определените критерии (вж. в текста). Средните параметри на ОСВ са отбелязани с черни пунктирни линии (за първата ОСВ – тирета, за ОСВ 2 – тире, два пъти точка). За сравнение е показана и границата за sink частиците (магента, пунктирана).



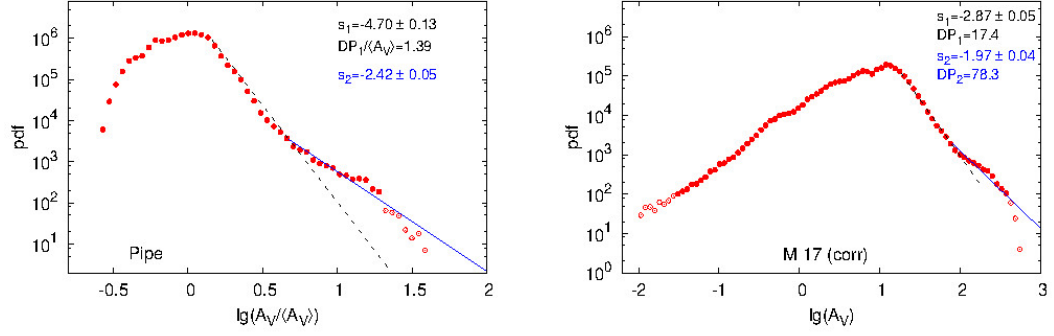
Фигура 3.4: Извлечените ОСВ и ФВР (за фиксиран брой бинове) от избраните HRIGT пускове. Черните точки са пренебрегнатите данни в края на разпределението, при високите плътности, над праговата плътност за sink частиците.

близки до -1 . Очевидно изключение виждаме при пуска на симулацията *v1s-M426* – в този случай втората ОСВ е по-стръмна и също така обхваща много по-голям диапазон по плътности от първата ОСВ. Единичната ОСВ, установена при *v3m-M085* е най-вероятно всъщност *втората* ОСВ, съдейки по пресметнатите параметри, докато първата опашка не е била засечена от метода поради твърде вълнистата ФВР- ρ в диапазона $10^1 \lesssim \rho/\langle\rho\rangle \lesssim 10^4$.

Като обобщение можем да кажем, че при всички случаи с детектирани две ОСВ, първата е по-стръмна от ~ -1.5 : гранична стойност, която може да се очаква от теоретични съображения (Girichidis et al., 2014). Тези открития пресполагат, че нашият метод извлича коректно и успешно две ОСВ от гладки ФВР.

3.1.2 Прилагане към наблюдателни данни от *Herschel*

За извличане на ФВР- N от наблюдения, използвахме данни от *Herschel*, разглеждайки няколко звездообразуващи области. Резултатите за две от тях са показани на фиг.3.5 (?Schneider et al., 2012). Параметрите на ОСВ на първия наклон са в съгласие с тези, извлечени от числени симулации. От друга страна, ФВР- N от наблюдателни данни на области с активно звездообразуване, показват ясно изразени ОСВ с нак-



Фигура 3.5: ФВР- N с две ОСВ от карти на Herschel на две звездообразуващи области в Галактиката: област с малка маса (Pipe, вляво) и голяма маса (M17, вдясно).

лони $-2 \geq n \geq -4$ (Schneider et al., 2013, 2015), които също са в съответствие с резултатите получени при изследването на еволюцията на ОСВ от данните HRIGT. Наклонът n от ФВР- N е свързан с q чрез формулата:

$$n = \frac{2q}{3 + q} \quad (3.2)$$

Използвайки $q \sim -1.5$ (Girichidis et al., 2014) в горепосочената формула, получаваме наклоните на ОСВ 2 в добро приближение с извлечените от картите на Herschel (фиг. 3.5). В заключение можем да кажем, че чрез адаптираният VPLFIT метод, извличаме ОСВ от ФВР- ρ и ФВР- N с наклони, които са взаимно съгласувани.

Глава 4

Обобщение на основните резултати

В изследванията, включени в настоящия дисертационен труд, постигнахме следните резултати:

- Разработихме процедура за извличане на ОСВ на ФВР- ρ и ФВР- N по числени и наблюдателни данни за МО и зони на звездообразуване в тях, наречена *адаптиран VPLFIT метод* (Veltchev et al., 2019, V19).
- Адаптираният VPLFIT метод беше приложен към симулационни данни: а) от проекта SILCC, отчитащи обратното въздействие на новообразуваните звезди към средата и позволяващи адаптивно увеличаване на разделителната способност (на няколко нива) в сгъстените зони на МО; и б) от симулацията HRIGT, при по-опростена физична картина, но за сметка това с много висока разделителна способност, позволяваща изследване на звездообразуването на мащаби на сгъстявания и предзвездни ядра в МО. Данните от SILCC осигуряват възможност за проследяване на еволюцията на ФВР- ρ и ФВР- N в зони на звездообразуване на галактичен мащаб. Изучена беше *еволюцията на параметрите на опашката от степенен вид* (ОСВ). Наклоните на ОСВ на ФВР- ρ в късните етапи на еволюция на МО клонят към $q \sim -1.5$ – както при данните от SILCC, така при тези от HRIGT. От друга страна, ОСВ на ФВР- N , получена по наблюдателни (*Herschel*) данни, показва наклони $-2 \leq n \leq -4$.
- В следващата работа Marinkova et al. 2020a (M20a) изследвахме ОСВ, извлечена от ФВР- N на два гигантски МО (ГМО) в напреднал стадий на тяхната еволюция, симулирана от SILCC. Тези облаци се намират в зони с повишена разделителна способност, което позволява да се установят евентуални гранични ефекти върху параметрите на ОСВ от избраното очертаване на избраната област. За целта еволюцията на ОСВ на ФВР- N бе проследена чрез два различни подхода: 1) с налагане на четири правоъгълни рамки с нарастващ размер, обхващащи избраните ГМО и разреждения газ в близката им околност; и 2) в рамките на изоконтур, дефиниран чрез долна гранична стойност на колонковата плътност, която е по-малка от средната ТОО, установена от анализа на ОСВ в рамките от точка 1).

- Най-важните резултати от M20a са два. Първо, параметрите на ОСВ, извлечени чрез АМ VPLFIT са в много добро съответствие с тези, получени чрез прилагането на метода PLFIT върху небинирани данни. Това е потвърждение, че АМ VPLFIT е надеждна техника за извличане на ОСВ. Второ, параметрите на ОСВ във всички правоъгълни рамки, при даден еволюционен етап на МО, са с много подобни стойности. Това означава, че H_2 с ниска плътност, разположен извън главните влакнести структури на ГМО, не допринася за обхвата на ОСВ. Средната ТОО грубо съвпада с колонковата плътност, при която големите сгъстявания стават свръхкритични – което загатва за гравитационната свързаност на облачните структури, очертани от изоконтури, съответстващи на нейната стойност. Наклонът на ОСВ на ФВР- N в изоконтурата остава почти постоянен във времето ($n \geq -1.2$), като стойността му е много по-малка както от тази, получена при теоретични изследвания на самогравитиращи облаци ($n \sim -2$), така и от тази от наблюдения на области на звездообразуване или разреждени облаци. Обяснението би могло да бъде, че *ОСВ на ФВР- N на молекулярния газ не следва задължително очакваната еволюция на ФВР- N , получено от карти на целия (молекулен и атомен) газ, само въз основа предположението за гравитационно свиване (Vázquez-Semadeni, 2010).*
- Впоследствие усъвършенствахме АМ VPLFIT с цел извличане на втора ОСВ (ОСВ 2) на ФВР- ρ или ФВР- N (Marinkova et al. 2021; M21). Идеята се основава на зависимостта на параметрите на ОСВ от избраната долна граница на обрязване на разпределението; *варирането на тази граница ни позволява да детектираме две различни ОСВ.* Разработеният подход най-напред е изпробван върху аналитичен ФВР- ρ с основна логнормална част и две ОСВ, а след това – върху данни от числени симулации на самогравитиращи изотермични звездообразуващи облаци (HRIGT). Изискването за достоверност на ОСВ 2 е обхватът ѝ да бъде поне един порядък, а наклонът да се различава с поне 0.4 от наклона на първата ОСВ. *Във всички случаи, с изключение на един, са установени две ОСВ.* Първата от тях е по-стръмна, а наклонът на ОСВ 2 е по-плосък от -1.5 и клони към ~ -1 . Тези резултати са в добро съгласие с очакванията от числени (Kritsuk, Norman & Wagner, 2011) и теоретични (Girichidis et al., 2014) изследвания. Това показва, че разработеното разширение на АМ VPLFIT може успешно да се използва за откриване на втора ОСВ. Прилагането на метода към ФВР- ρ или ФВР- N на данни от наблюдения с висока разделителна способност и/или числени симулации на звездообразуващи региони може да изясни физическите условия в най-гъстите подструктури на МО.
- За пълнота приложихме усъвършенствания АМ VPLFIT и към наблюдателни данни за няколко области с активно звездообразуване, получени от космическия телескоп *Herschel* (Marinkova et al. 2020b; M20b). Резултатите за някои от тях показват *наличието на двойни ОСВ, като втората е по-плоска от първата.* Впоследствие мащабното изследване на Schneider et al. (2022), обхващащо трийсетина области на звездообразуване с различна маса, недвусмислено потвърди, че втората ОСВ 2 е типичен случай. Това дава добра перспектива за използването на разработения от нас АМ VPLFIT.

Библиография

- Bertoldi, F. and McKee, C. F., *ApJ*, 395, 140, 1992
- Burkhart, B., Stalpes, K., Collins, D. C., 2017, *ApJ*, 834, 1
- Clauset, A., Shalizi, C. R., Newman, M. E. J., 2009, *SIAM Rev.*, 51, No. 4, 661
- Collins, D., Kritsuk, A., Padoan, P., Li, H., Xu, H., Ustyugov, S., Norman, M., 2012, *ApJ*, 750, 13
- Donkov, S., Stefanov, I., 2019, *MNRAS*, 485, 3224
- Donkov, S., Stefanov, I., Veltchev, T., Klessen, R. S., 2021, *MNRAS*, 505, 3655
- Donkov, S., Veltchev, T., Klessen, R. S., 2017, *MNRAS*, 466, 914
- Donkov, S., Veltchev, T., Klessen, R. S., 2011, *MNRAS*, 418, 916 (Paper I)
- Federrath, C., Klessen, R., Schmidt, W., 2008, *ApJ*, 688, L79
- Federrath, C., Roman-Duval, J., Klessen, R., Schmidt, W., Mac Low, M.-M., 2010, *A&A*, 512, 81
- Federrath, C., Klessen, R. S., 2012, *ApJ*, 761, 156
- Federrath, C., Klessen, R. S., 2013, *ApJ*, 763, 51
- Girichidis, P., et al., 2016, *MNRAS*, 456, 3432
- Girichidis P., Federrath C., Banerjee R., Klessen R. S., 2011, *MNRAS*, 413, 2741
- Girichidis P., Konstandin L., Whitworth A. P., Klessen, R. S., 2014, *ApJ*, 781, 91
- Girichidis, P., Seifried, D., Naab, T., Peters, T., Walch, S., Wünsch, R., Glover, S. C. O., Klessen R. S., 2018, *MNRAS*, 480, 3511
- Jeans, J. H., 1902, *Phil. Tr. RAS*, 199, 1
- Kainulainen, J., Beuther, H., Henning, T., Plume, R., 2009, *A&A*, 508, L35
- Klessen R., 2000 *ApJ*, 535, 869,
- Kolmogorov, A., 1941, *Akademiia Nauk SSSR Dokl.*, 30, 301

- Kritsuk, A., Norman, M., Padoan, P., & Wagner, R., 2007, *ApJ*, 665, 416
- Kritsuk, A., Norman, M., & Wagner, R., 2011, *ApJ*, 727, L20 (KNW 11)
- Larson, R., 1981, *MNRAS*, 194, 809
- Marinkova, L., Veltchev, T., Girichidis, Ph., Donkov, S., 2021, *AN*, 342, 898; [**M21**]
- Marinkova, L., Veltchev, T., Stanchev, O., Donkov, S., 2020, *BlgAJ*, 33, 64; [**M20a**]
- Marinkova, L., Veltchev, T., Stanchev, O., Donkov, S., 2020, *Pub. of Astr. Soc. "Rudjer Boskovic"*, Proceedings of the 12th SBAC, eds. L. Popovic, V. Sreckovic, M. Dimitrijevic, A. Kovacevic, pp. 51-60, ISBN 978-86-89035-15-5; [**M20b**]
- Schneider, N., Motte, F., Bontemps, S., Hennemann, M., di Francesco, J., Andre, Ph., Zavagno, A., et al., 2010, *A&A*, 518, 83
- Schneider, N., Bontemps, S., Simon, R., Ossenkopf, V., Federrath, C., Klessen, R. S., Motte, F., André, Ph., 2011, *A&A*, 529, 1
- Schneider, N., Csengeri, T., Hennemann, M., Motte, F., Didelon, P., Federrath, C., Bontemps, S., Di Francesco, J., et al., 2012, *A&A*, 540, 11
- Schneider, N., Andre, Ph., Konyves, V., Bontemps, S., Motte, F., Federrath, C., Ward-Thompson, D., 2013, *ApJ*, 766, 17
- Schneider, N., Bontemps, S., Girichidis, P., et al. 2015, *MNRAS*, 453, L41
- Schneider, N., Ossenkopf-Okada, V., et al. 2022, *A&A* (submitted)
- Stanchev O., Veltchev T., Kauffmann J., Donkov S., Shetty R., Körtgen B., Klessen R. S., 2015, *MNRAS*, 451, 5575
- Tielens, A. G. G. M., 2010, book, *The Physics and Chemistry of the Interstellar Medium*
- Vázquez-Semadeni, E., 1994, *ApJ*, 423, 681
- Vázquez-Semadeni, E., 2009, *ArXiv e-prints*. 0902.0820
- Vázquez-Semadeni, E., 2010, in Kothes, R., Landecker, T., Willis, A., *ASP Conf. Ser. Vol. 438, The Dynamic Interstellar Medium: A Celebration of the Canadian Galactic Plane Survey*. *Astron. Soc. Pac.*, San Francisco, p. 83; arXiv 1009.3962
- Veltchev, T., Girichidis, Ph., Donkov, S., Schneider, N., Stanchev, O., Marinkova, L., Seifried, D., Klessen, R. S., 2019, *MNRAS*, 489, 788; [**V19**]
- Virkar Y., Clauset A., 2014, *Annals of Appl. Stat.*, vol. 8, No. 1, 89 (arXiv:1208.3524)
- Walch, S., et al., 2015, *MNRAS*, 454, 238