



Суперкомпьютерные дни в России 2025

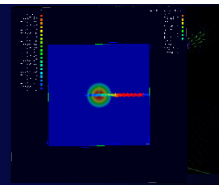
международная научная конференция

29 - 30 сентября

**III D моделирование образования и эволюции сверхплотных ядер,
возникающих в филаментах при сверхзвуковом соударении молекулярных
облаков**

**Б. Рыбакин
МГУ им. М.В. Ломоносова
НИЦ "Курчатовский институт"**

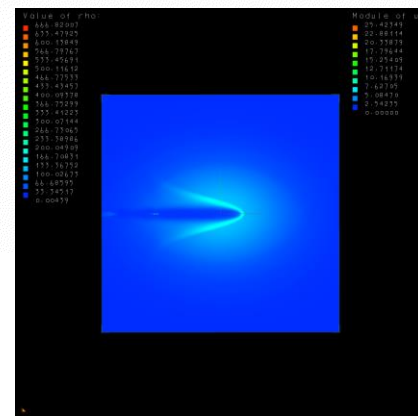
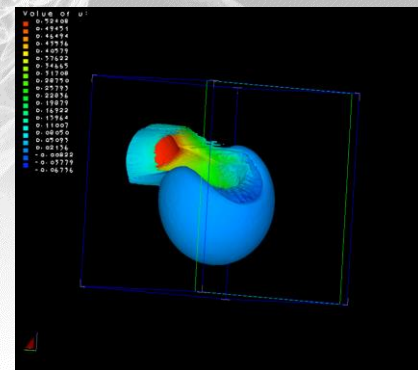
30 сентября 2025



В работе приводится исследование процесса образования сверхплотных сгустков с учетом стратифицированного фона, образующегося в результате столкновений молекулярных облаков (МО) друг с другом, при падении на МО ударной волны и других динамических эффектов в межзвездной среде.

Наблюдения показывают, что интенсивные столкновения молекулярных облаков могут инициировать образование массивных звезд/скоплений. Одним из важнейших физических процессов при столкновении является ударное сжатие. В данной работе исследуется образование плотной, линзообразной структуры, в которую втекает вещество МО. Установлено, что ударное сжатие турбулентных, неоднородных молекулярных облаков создает массивные нитевидные структуры. Целью работы является исследование начальных стадий образования протозвездных сгустков, которые образуются при таком ударном сжатии. Определение физических критериев неустойчивости и анализ критических свойств ядер имеют принципиальное значение для теории звездообразования. В данной работе исследуются процессы образования сверхплотных сгустков, их взаимные столкновения, приводящие либо к увеличению плотности ядер, либо к их разрушению.

В случае столкновения двух МО, начиная с момента ~ 1 млн лет, начинаются процессы столкновения ядер друг с другом и их разрушения или слияния [1]. Этот процесс достигает максимальных значений при достижении ядрами максимальной плотности. В этой работе приведен анализ процессов соударения, роста и/или распада clumps для шестнадцати самых плотных ядер.



Звезды образуются в результате сложного взаимодействия между гравитацией и противодействующими факторами, такими как сверхзвуковая турбулентность, магнитные поля, тепловое давление и неустойчивостями типа Кельвина-Гельмгольца.

В работе представлены результаты численного моделирования взаимодействия сформировавшихся сверхплотных ядер с учетом стратифицированного фона, которое возникает в результате сверхзвукового соударения молекулярных облаков (МО) и соударения МО с ударными волнами [2]. Существовавшее ранее мнение о том, что столкновения плотных ядер происходят крайне редко и не играют значительную роль в формировании протозвездных структур и протозвездных оболочек оказалось неверным. Недавние наблюдения показывают, что ядра подвергаются множественным взаимодействиям с другими ядрами на протяжении всего времени своего существования. В работе процессы формирования плотных ядер и процессы столкновения их между собой моделируются с помощью схем высокого разрешения. Возникающее движение описывается системой уравнений идеальной магнитной гидродинамики, которая описывает движение сжимаемой проводящей жидкости под действием сил гравитации и магнитных полей.

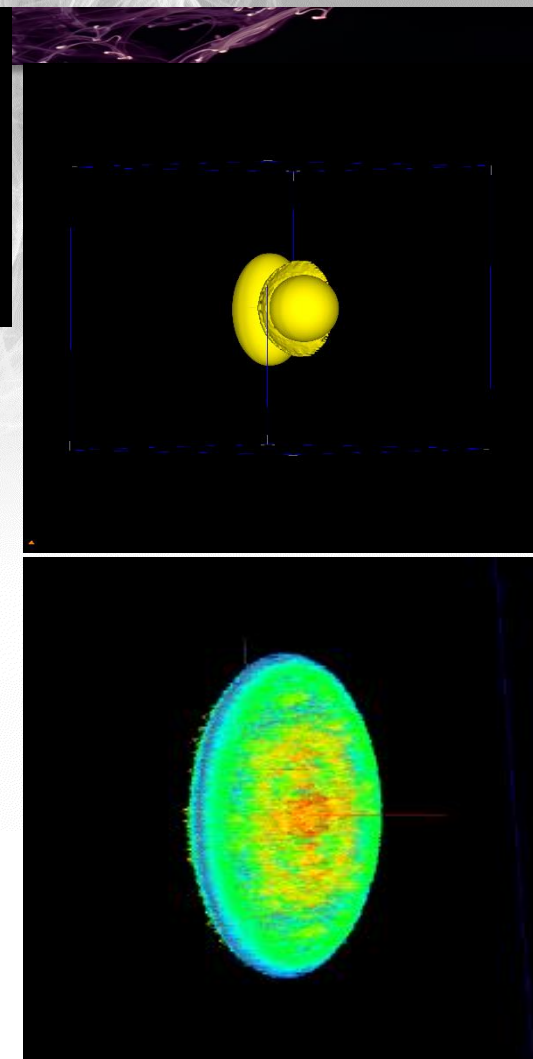
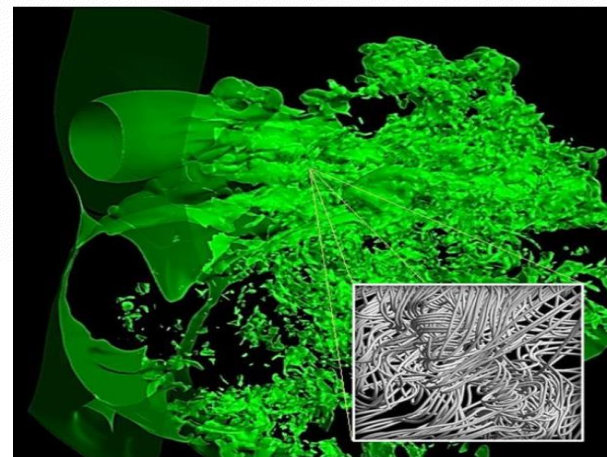
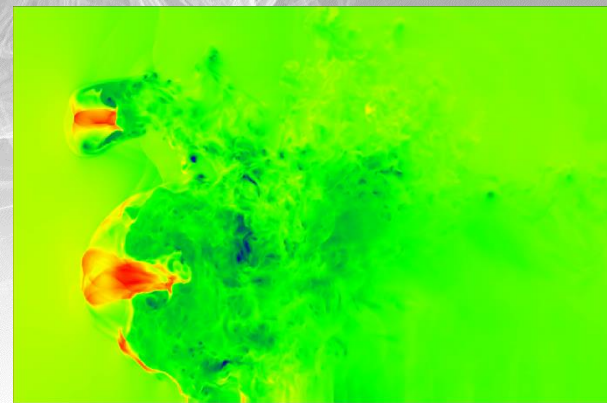


Рис. 1. Лобовое соударение эллиптического и сферического МО

Формирование сверхплотных областей при соударениях МО

Звезды формируются преимущественно внутри молекулярных облаков в силу разных причин. Часто причиной увеличения плотности вещества являются гидродинамические процессы взаимодействия МО между собой, столкновения с ударными волнами, со спиральными рукавами галактик. В результате таких процессов, плотность повышается на много порядков и эти области становятся предзвездными ядрами. За первичной сильной ударной волной в газовом следе возникает неустойчивость Рихтмайера-Мешкова (РМ), на внешних слоях начинает развиваться неустойчивость Кельвина-Гельмгольца. Неустойчивость КГ становится основным инициатором и триггером резкого увеличения завихренности и соответствующей вихревой турбулентности вещества МО. Иллюстрацию влияния неустойчивости КГ на изменение формы МО и на формирования сверхплотных областей можно увидеть на рисунке справа [3].



Основные уравнения

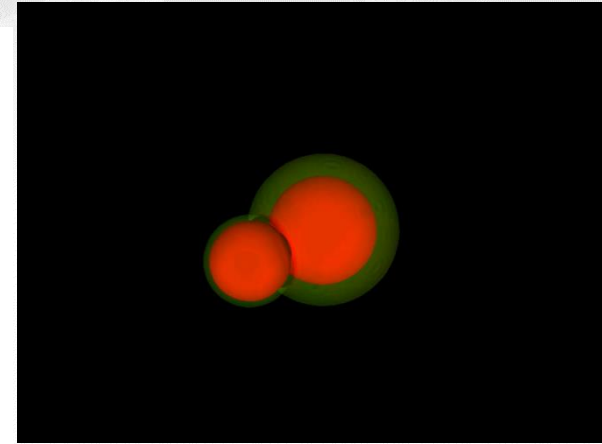
Возникающее движение описывается системой уравнений идеальной магнитной гидродинамики, которая описывает движение сжимаемой проводящей жидкости под действием сил гравитации и магнитных полей. В данной системе уравнений не учитываются диссипативные процессы, то есть принимается, что жидкость не обладает вязкостью.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

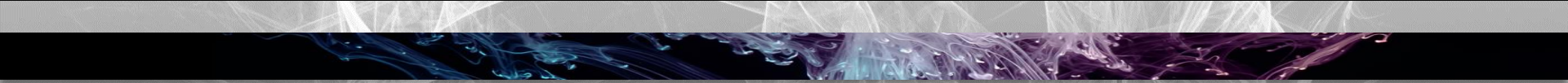
$$\frac{\partial(\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v} \rho \mathbf{v} - \mathbf{b} \mathbf{b} + \nabla P_{\text{tot}}) = -\rho \nabla \Phi$$

$$\frac{\partial(E)}{\partial t} + \nabla \cdot [\mathbf{v}(E + P_{\text{tot}}) - \mathbf{b}(\mathbf{v} \cdot \mathbf{b})] = -\rho \mathbf{v} \cdot \nabla \Phi$$

$$\frac{\partial \mathbf{b}}{\partial t} - \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{b}) = 0$$



Уравнения представляют собой законы сохранения массы, количества движения, энергии и магнитного поля соответственно. Здесь ρ – плотность, $\mathbf{v}$ – вектор скорости, $E = \rho e + \rho v^2/2 + b^2/2$ – полная энергия, которая представляет собой сумму внутренней, кинетической и магнитной энергии. Давление $P_{\text{tot}} = p + b^2/2$ – сумма давлений газа и магнитного поля.



Наблюдения показывают, что слияние протозвездных ядер часто приводят к из значительному росту. Качестве примера можно привести звезду Barnard 68. Частоту столкновений можно определить, как отношение времени жизни ядра ко времени столкновения. Для оценки частоты столкновений использовались исследования ядер Ориона, проведенного в [5]. Сделано предположение, что в областях формирования скоплений сверхзвуковая турбулентность поддерживается за счет импульсов, возникающих при соударениях и воздействиях ударных волн. Ядра чаще всего образуются в результате гравитационной фрагментации. В этом случае расстояния между двумя соседними ядрами порядка тепловой длины Джинса $L_J = c_s (\pi / (G \rho_c))^{1/2}$. Здесь c_s – скорость звука, G – гравитационная постоянная, ρ_c – плотность ядра. Длина Jeans связывает размеры ядра с его массой $M_J = 4/3 \pi \rho r^3$. Сила гравитации в ядре уравнивается тепловым давлением, но, если радиус ядра становится меньше длины Джинса, то сила гравитации возобладает.

Обозначим через $N_c = \rho_c / m$ числовую плотность ядер, которая имеет размерность длина в минус третьей степени [L^{-3}]. Здесь ρ_c обычная плотность, m – масса протона. Принимается, что масса протона равна 2.3 и имеет размерность массы. Таким образом, числовая плотность $N_c = 10^3$ равна обычной плотности $\rho_c = 4.008 \times 10^{-21}$ г/см³. В этом случае время столкновения оценивается как: $\tau_{col} = 1 / (4\pi R_c^2 N_c \langle V_c \rangle)$. Время жизни предзвездного ядра до его коллапса определяется как: $t_{ff} = (3\pi / 32 G \rho_c)^{1/2}$. Для протоядер массой в несколько масс Солнца, это время равно $\sim 0.5 - 1.0$ млн. лет. Статистические исследования времени жизни предзвезд показывают, что их типичное время жизни колеблется от 1 до $10 t_{ff}$. Таким образом можно оценить количество соударений, которые происходят в областях звездообразования. Оно сильно зависит от начальной массы молекулярных облаков, скорости соударения, влияния магнитных полей и целого ряда других факторов. Таким образом, при числовой плотности ядра от 10^4 до 10^5 см⁻³ время жизни ядра составляет около 1 млн лет. Частота столкновений определяется как отношение времени жизни ядра к времени столкновения. Проведенное моделирование показало, что частота соударений ядер за время их жизни, колеблется (в зависимости от начальных условий) в диапазоне от 2.1 до 5.7 раз.

Параллельный алгоритм

Численные решения многомерных нестационарных задач астрофизики существенно зависят от применяемой разностной схемы. Расчетная сетка, применяемая для расчетов, представляет собой трехмерную прямоугольную сетку с размерами от $512 \times 512 \times 512$ до $2048 \times 1024 \times 1024$ ячеек по осям X, Y и Z соответственно. На боковых и выходных границах расчетной области задаются открытые или периодические граничные условия для примитивных переменных. Для решения этой задачи применяется разностная схема типа TVD с высоким разрешением. Общим условием ограничения колебаний является условие нелинейной устойчивости. Разностная схема использует на границах ячеек течения второго порядка точности. Они получаются из течений первого порядка точности для противоточной схемы с использованием поправки второго порядка точности.

Поправка второго порядка точности вводится для ограничения ложных колебаний в решении. Алгоритмы распараллеливания были разработаны для CPU и GPU процессоров. Распараллеливание выполнялось с использованием технологий OpenMP, OpenACC и Coarray. Вычисления проводились на процессорах AMD и графическом процессоре NVIDIA GeForce RTX 4070 Ti Super. Параллельный алгоритм был модифицирован для применения на процессорах AMD Ryzen 9 7950X3D. Процессор AMD Ryzen 9 7950X3D имеет 16 ядер и 32 потока. Отличительной особенностью процессоров AMD с индексом X3D от других процессоров AMD и Intel является очень большой дополнительный кэш L3 третьего уровня.

CPU-Z

CPU

Mainboard

Memory

SPD

Graphics

Bench

About

Processor

Name

AMD Ryzen 9 7950X3D

Code Name

Raphael

Max TDP

120.0 W

Package

Socket AM5 (LGA1718)

Technology

5 nm

Core Voltage

1.032 V

Specification

AMD Ryzen 9 7950X3D 16-Core Processor

Family

F

Model

1

Stepping

2

Ext. Family

19

Ext. Model

61

Revision

RPL-B2

Instructions

MMX(+), SSE, SSE2, SSE3, SSSE3, SSE4.1, SSE4.2, SSE4A, x86-64, AES, AVX, AVX2, AVX512, FMA3, SHA

Clocks (Core #0)

Core Speed

3592.83 MHz

Multiplier

x36.0 (4.0 - 57.5)

Bus Speed

99.80 MHz

Rated FSB

Cache

L1 Data

16 x 32 KBytes

8-way

L1 Inst.

16 x 32 KBytes

8-way

Level 2

16 x 1 MBytes

8-way

Level 3

96 MB + 32 MB

16-way

Selection

Socket #1

Cores

16

Threads

32

CPU-Z

Ver. 2.13.0.x64

Tools

Validate

Close

TechPowerUp GPU-Z 2.68.0

Graphics Card

Sensors

Advanced

Validation

Name

NVIDIA GeForce RTX 4070 Ti SUPER

Lookup

GPU

AD103

Revision

A1

Technology

5 nm

Die Size

379 mm²

Release Date

Jan 8, 2024

Transistors

45000M

BIOS Version

95.03.45.C0.61

UEFI

Subvendor

Palit

Device ID

10DE 2705 - 1569 F317

ROPs/TMUs

96 / 264

Bus Interface

PCIe x16 4.0 @ x16 1.1 ?

Shaders

8448 Unified

DirectX Support

12 (12_2)

Pixel Fillrate

253.4 GPixel/s

Texture Fillrate

697.0 GTexel/s

Memory Type

GDDR6X (Micron)

Bus Width

256 bit

Memory Size

16384 MB

Bandwidth

672.3 GB/s

Driver Version

32.0.15.7261 (NVIDIA 572.61) DCH / Win11 64

Driver Date

Feb 25, 2025

Digital Signature

Beta

GPU Clock

2340 MHz

Memory

1313 MHz

Boost

2640 MHz

Default Clock

2340 MHz

Memory

1313 MHz

Boost

2640 MHz

NVIDIA SLI

Disabled

Resizable BAR

Enabled

Computing

OpenCL

CUDA

DirectCompute

DirectML

Technologies

Vulkan

Ray Tracing

PhysX

OpenGL 4.6

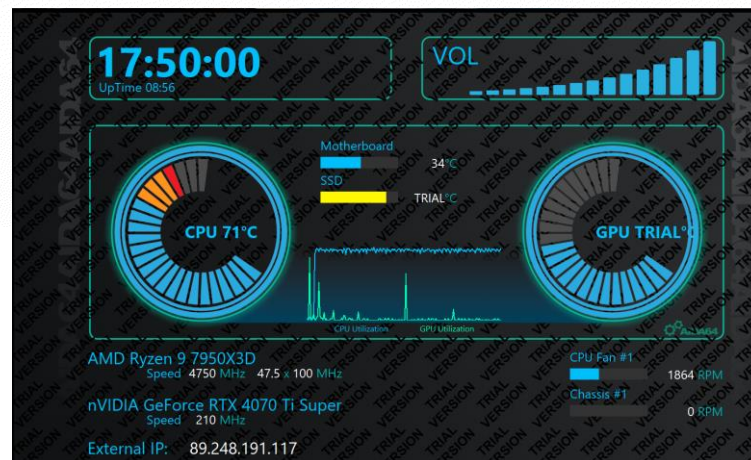
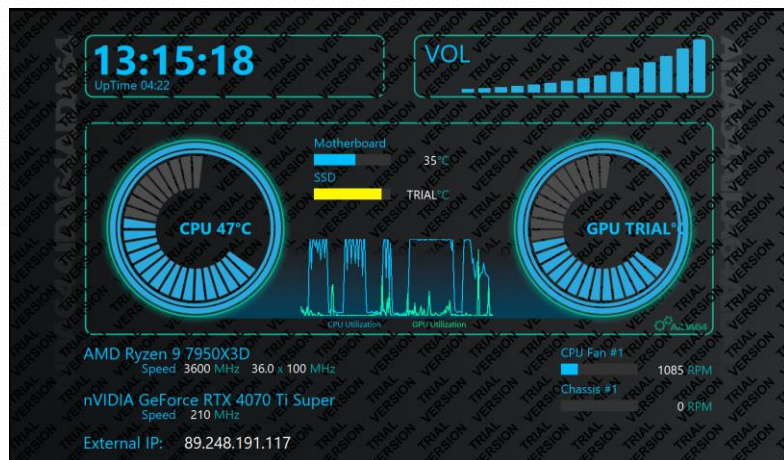
NVIDIA GeForce RTX 4070 Ti SUPER

Close

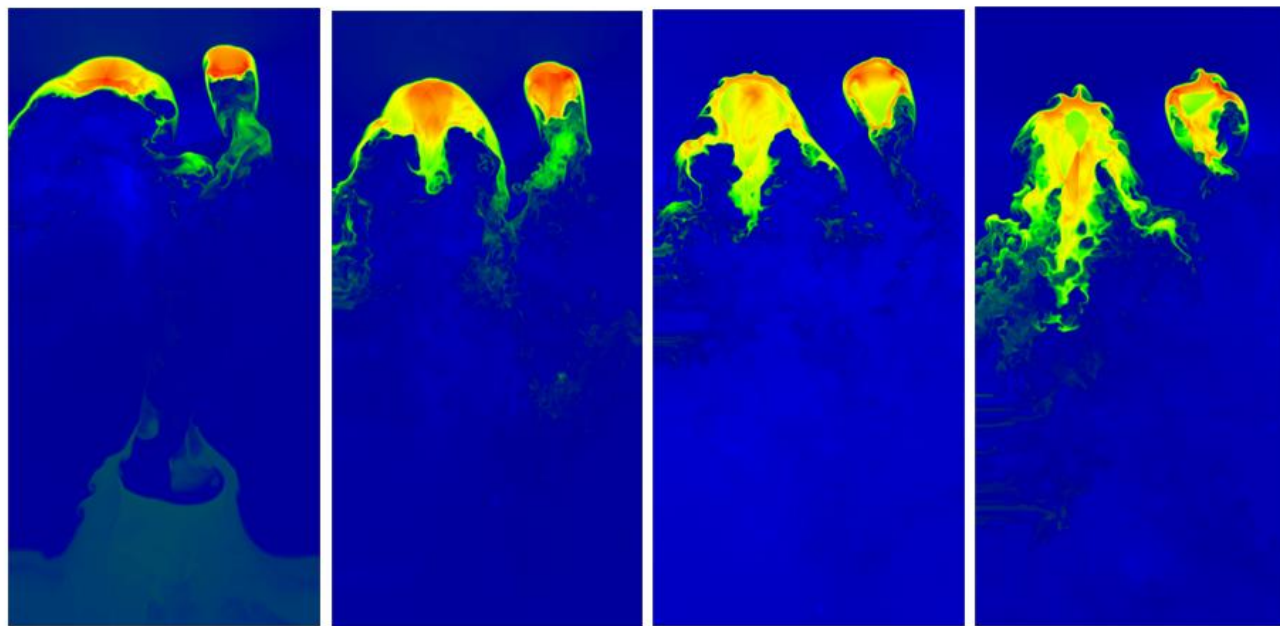
Acceleration

X	Y
1	1.0
2	1.8
3	2.5
4	3.2
5	3.8
6	4.2
7	4.5
8	4.8
9	5.0
10	5.2
11	5.5
12	5.8
13	6.2
14	6.0
15	6.0
16	6.0
17	5.8
18	5.0
19	3.8
20	4.5
21	3.2
22	3.2
23	3.5
24	3.0

Для данного процессора его размер составляет 128 мегабайт (рис. 2). Такой большой размер кэша (обычный размер кэша L3 для других процессоров составляет ~ 32 МБ) позволяет обрабатывать вычисления значительно быстрее за счет меньшего количества обращений к основной памяти. Для использования такого размера кэша L3 требуется модернизация программного обеспечения. На рисунке 3 представлен скриншот программы AIDA 64 до обновления (слева) и после обновления (справа). Можно отметить, что эффективное использование кэш-памяти L3 процессора AMD Ryzen 9 7950X3D позволяет значительно увеличить нагрузку на процессор, сделать её максимально высокой и, таким образом, ускорить процесс вычислений. Температура процессора увеличилась незначительно – с 47 до 71 градуса.



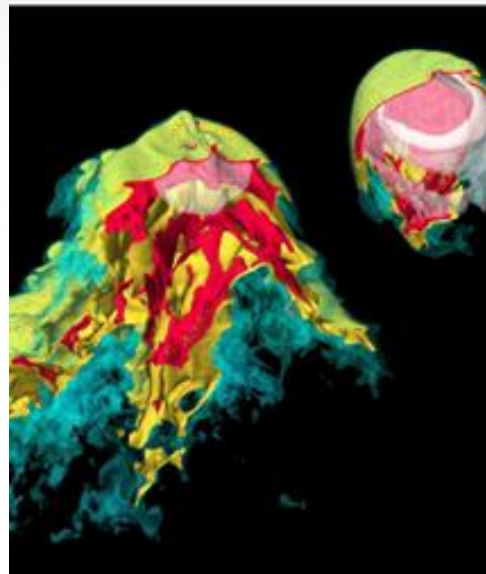
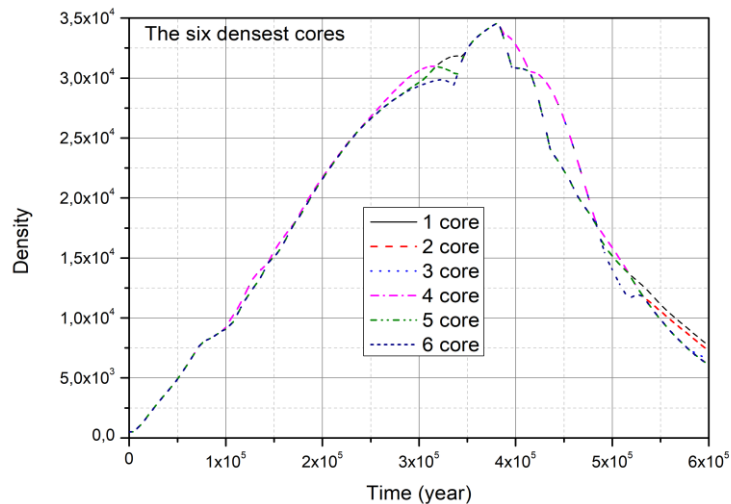
Такие высокоплотные области становятся протоядрами – зародышами будущих звёзд. Проводится анализ фрагментация плотности ударно-сжатого вещества, исследуется процесс образования филаментов и стратификации плотности газа (комковатой структуры) в результате такого соударения.



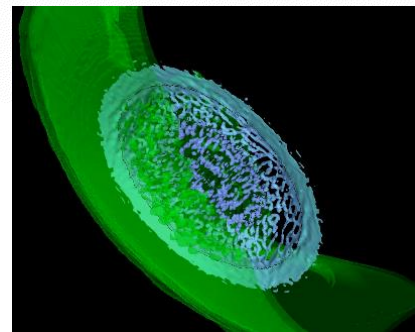
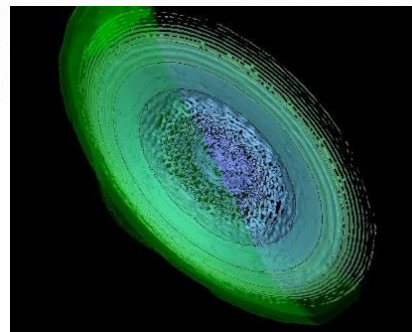
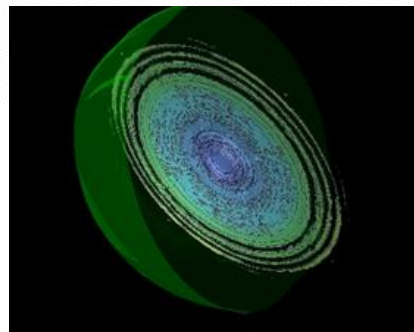
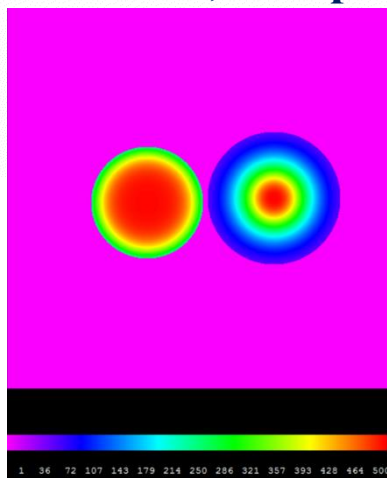
Распределение плотности на моменты времени $t=242000$, $t=334000$, $t=442000$ и $t=600000$ лет (слева направо). Приведен логарифм безразмерной плотности. Ударная волна движется сверху вниз.

Результаты расчетов

Ударная волна с плотностью $\rho_{sh}=8.6 \times 10^{-25}$ г/см³, температурой $T_{sh}=1.5 \times 10^5$ начинает взаимодействовать с облаками. Неустойчивость Кельвина–Гельмгольца продолжает работать, производя абляцию вещества с краев облаков в период времени 0.4 – 0.6 млн лет. Этот газ распространяется через облака, где он объединяется и конденсируется. На рисунке приведен процесс абляции, неустойчивости Кельвина–Гельмгольца, и разрушения плотных ядер.

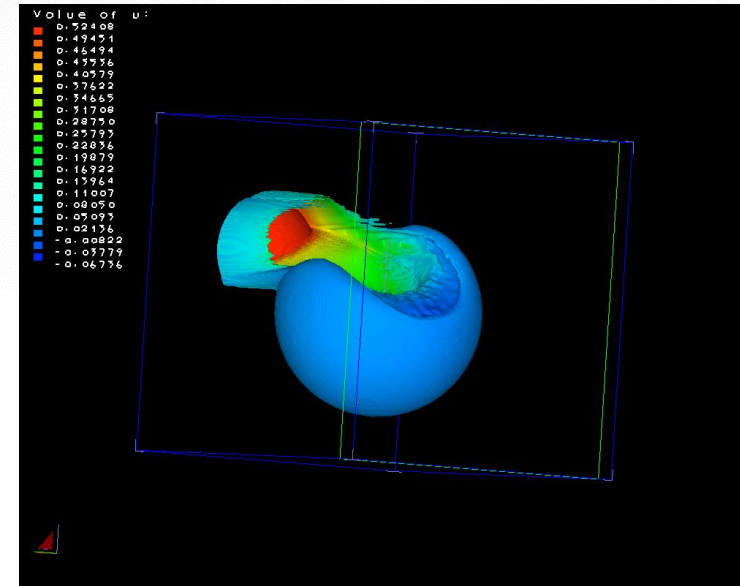


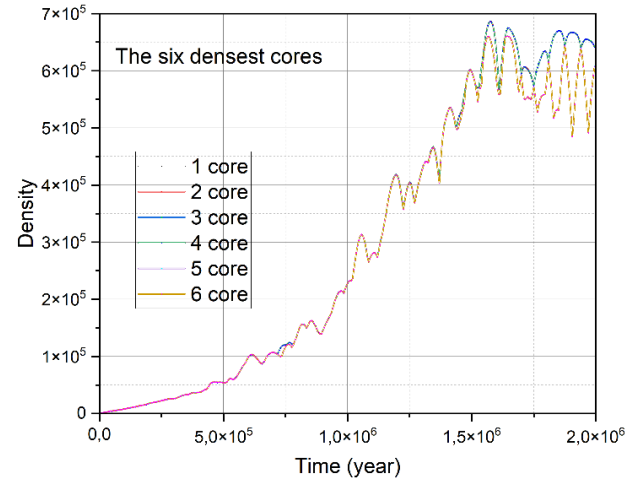
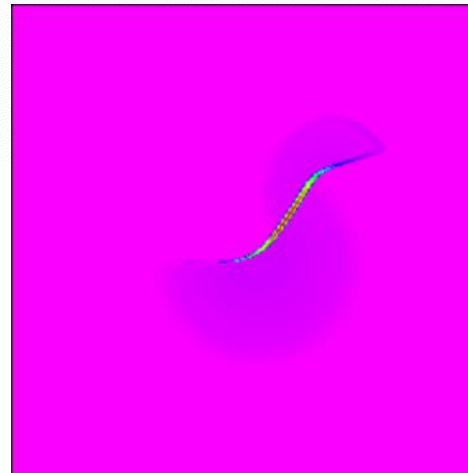
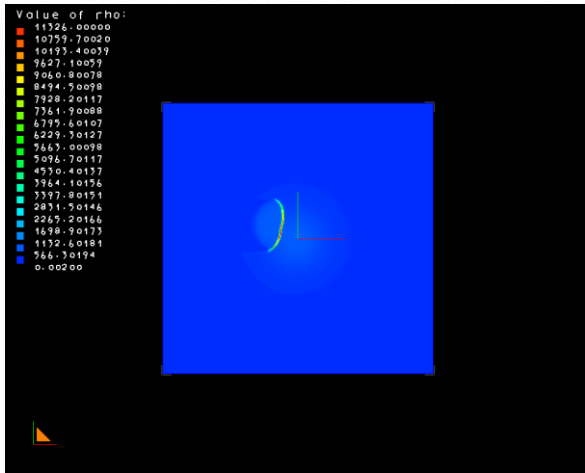
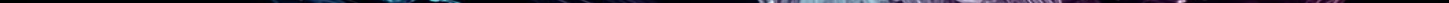
Процесс соударения двух молекулярных облаков является еще одним вариантом формирования сверхплотных ядер. Будем предполагать, что в начальный момент времени облака располагались в центре расчетной области касаются друг друга. На рисунке приведено начальное расположение двух молекулярных облаков и приведено распределение безразмерной плотности. При математическом моделировании столкновений МО различных размеров и форм предполагалось, что они находятся в термодинамическом равновесии с межзвездной средой (МС). Потери на излучения и влияние магнитных полей в расчетах не учитывались. После начала соударения, в области контакта начинают формироваться плотные области, которые динамически меняют свою плотность и структуру.



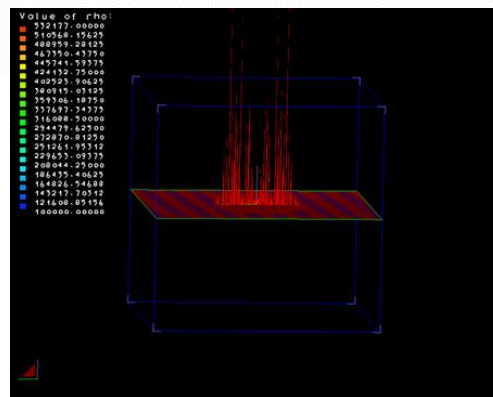
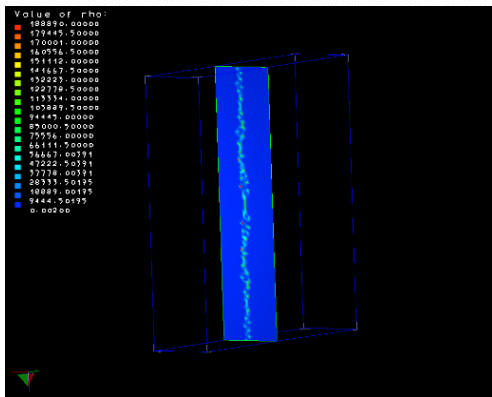
Численное моделирование формирования сверхплотных, гравитационно связанных ядер, которое может привести к гравитационному коллапсу и формированием новых звезд приводит к очень большому изменению как плотности, так и масштабов. Моделирование соударения молекулярных облаков проводилось на кубической сетке со сторонами $L_x=L_y=L_z=10.0$ парсек, состоящую из 1024^3 ячеек. Такая сетка обеспечивает физическое разрешение ячейки примерно $dx=9.7656 \times 10^{-3}$ парсек или 221.4768 а.е. В процессе расчета, образующиеся ядра значительно уменьшаются в размерах и при этом их плотность возрастает на 6 – 7 порядков.

На рисунке справа приведен вариант столкновения двух протоядер, которые сформировались в результате соударения молекулярных облаков. Такие взаимные столкновения приводят к значительным колебаниям максимальной плотности протоядер. Это хорошо видно на следующем слайде. Колебания становятся особенно большими к моменту появления гравитационно связанных объектов.





Протозвездная стадия ядер характеризуется чрезвычайно малыми размерами объектов. Моделирование соударения молекулярных облаков проводилось на кубической сетке со сторонами $L_x=L_y=L_z=10.0$ парсек, состоящую из 1024^3 ячеек. Такая сетка обеспечивает физическое разрешение ячейки примерно $dx=9.7656 \times 10^{-3}$ парсек, или 221.4768 астрономических величин (а.е.). К моменту времени порядка 1.9 млн. лет максимальная плотность достигает $\rho \sim 6.75 \times 10^{-19}$ г/см³. Начальная плотность межзвездной среды равна $\rho \sim 2.15 \times 10^{-25}$ г/см³. Размеры протозвездного ядра, вместе с околозвездным диском, не превышает 4 – 5 а.е. На рисунке слева тонкий слой, который остался на месте соударения от двух молекулярных облаков и в котором сосредоточена практически вся его масса. Справа отдельные, гравитационно связанные протоядра, зародыши будущих звезд.



Выводы

- Как показывает проведенное моделирование, дополнительным механизмом, способствующим росту ядер, является их соударение. В этом случае расстояния между двумя соседними ядрами порядка тепловой длины Джинса $L_J = c_s(\pi/(G\rho_c))^{1/2}$. Здесь c_s – скорость звука, G – гравитационная постоянная, ρ_c – плотность ядра. В качестве примера такого роста ядер в результате столкновений можно привести звезду Barnard 68.
- Сделано предположение, что в областях формирования плотных скоплений сверхзвуковая турбулентность поддерживается за счет импульсов, возникающих при соударениях и воздействиях ударных волн. Частоту столкновений можно определить, как отношение времени жизни ядра ко времени столкновения.
- Можно сделать вывод о том, что звездообразование формируется в результате сложного взаимодействия между собственной гравитацией и противодействующими факторами, такими как сверхзвуковая турбулентность, магнитные поля, и тепловое давление газа.

Спасибо за внимание!



