#### О ВОЗМОЖНОМ ПРОИСХОЖДЕНИИ СУБСТРУКТУР, НАБЛЮДАЕМЫХ В ОФД БАРЬЕР ОРИОНА

И. А. Помельников<sup>1,2</sup>, Д. С. Рящиков<sup>1,2</sup>, Н. Е. Молевич<sup>1,2</sup> <sup>1</sup>Физический институт им. П. Н. Лебедева, <sup>2</sup>Самарский университет им. С. П. Королева

В данной работе произведено численное моделирование эволюции ударно-волнового импульса, распространяющегося в среде с параметрами области фотодиссоциации Барьер Ориона. Моделируемые периодические структуры согласуются по характерному размеру и периоду следования с наблюдаемыми субструктурами.

### ON THE POSSIBLE ORIGIN OF SUBSTRUCTURES OBSERVED IN THE ORION BAR PDR

I. A. Pomelnikov<sup>1,2</sup>, D. S. Riashchikov<sup>1,2</sup>, N. E. Molevich<sup>1,2</sup> <sup>1</sup>P. N. Lebedev Physical Institute, <sup>2</sup>Samara University

In this paper, the numerical simulation of shockwave pulse evolution, which propagates in the medium with the Orion Bar photodissociation region parameters, is performed. Modelled periodical structures fit with observed substructures by the characteristic size and frequency rate.

# Введение

В образовании структур во вселенной огромную роль играет тепловая неустойчивость, связанная с зависимостью обобщенной функции нагрева и охлаждения от температуры и плотности среды. Она бывает трех типов, а именно изохорической, изобарической и изоэнтропической, из которых наиболее изученной и распространенной является изобарическая неустойчивость. Изобарическая неустойчивость интересна тем, что приводит к разделению однородной среды на две фракции — разреженный горячий газ и холодные плотные облака. Изохорическая неустойчивость связана с крупномасштабным ростом температуры и давления среды при постоянстве плотности с образованием конвективных потоков. На сегодня она довольно плохо изучена. В данной работе нас интересует неустойчивость изоэнтропическая, также называемая акустической, так как именно она приводит к нарастанию и распространению акустических волн.

План сообщения предполагает следующее. В разделе о наблюдаемых субструктурах мы приведем краткую сводку наблюдений нетеплового движения и структурообразования областей повышенного давления-плотности в областях фотодиссоциации (ОФД). Затем с помощью численного моделирования одномерной системы уравнений газодинамики с обобщенной функцией нагрева и охлаждения определим структуры, формируемые в ОФД Барьер Ориона в условиях изоэнтропической неустойчивости. В последнем разделе обсудим результаты и наметим пути дальнейшего исследования структурообразования в ОФД.

<sup>©</sup> Помельников И. А., Рящиков Д. С., Молевич Н. Е., 2024

# Наблюдения субструктур

В работах [1, 2] было показано, что в ОФД могут реализовываться условия изоэнтропической неустойчивости и соответственно появляться мелкомасштабные мультифронтовые распространяющиеся структуры с повышенным давлением, плотностью и температурой. Косвенным подтверждением присутствия в среде таких структур служили фиксируемые нетепловые большие уширения спектральных линий, которые в [2] были гипотетически связаны с возмущениями скорости в этих структурах.

С увеличением разрешающей способности наземных и космических телескопов появилась возможность изучать эти мелкомасштабные структуры напрямую и с достаточной детализацией. Приведем последние результаты при изучении Барьера Ориона, полученные с помощью наземных телескопов высокого разрешения ALMA и KECK, а также запущенного 25 декабря 2021 г. космического телескопа Джеймса Уэбба (JWST).

Согласно изображениям ALMA в Барьере Ориона вблизи диссоциационного фронта (ДФ) наблюдаются двигающиеся в молекулярную область периодические субструктуры (филаменты, глобулы, гребни) повышенной плотности и давления (со сжатиями, превышающими фактор 5) [3]. Характерные размеры субструктур порядка  $4 \cdot 10^{-3}$  пк с периодами между ними не более 0.01 пк.

Согласно изображениям КЕСК область вокруг ДФ является высокоструктурированной. Наблюдаются субструктуры повышенного давления и плотности (филаменты и гребни) пириной (0.2...4)·10<sup>-3</sup> пк и с расстоянием между ними (0.5...1)·10<sup>-2</sup> пк. Они протянулись как вдоль фронта, так и в молекулярное облако [4].

Первые снимки туманности Ориона, полученные с использованием JWST, подтверждают выводы о многочисленных плотных субструктурах в ОФД Барьер Ориона с размерами порядка  $(0.1...0.2) \cdot 10^{-2}$  пк и острых гребнях. Плотность в атомарной области оценена как  $(0.5...1) \cdot 10^{-4}$  см<sup>-3</sup>, температура — выше 1 000 К [5].

Отметим, что аналогичные субструктуры были зарегистрированы с помощью телескопов ALMA и Gemini в ОФД туманности Киля (Carina's WesternWall) [6, 7].

## Структуры, получаемые в ОФД Барьер Ориона

Для анализа химического состава и структуры молекулярного облака Ориона и Барьера Ориона как его составляющей используются стационарные изобарические модели [5, 8–10], предполагающие равновесие горячих разреженных и холодных плотных областей [11]. Однако такой подход не позволяет исследовать турбулентные движения, наблюдаемые не только на фронте диссоциации, но и в других областях облака Ориона [3, 12–14]. Причинами появления турбулентных течений в ОФД Барьер Ориона и регистрируемых субструктур могут являться нелинейные акустические структуры, образующиеся вследствие выполнения в среде условий изоэнтропической неустойчивости [1, 2]. Данный тип неустойчивости может возникнуть в среде при наличии положительной обратной связи между акустическими волнами и неравновесным тепловыделением [1, 11, 15]. В изоэнтропически неустойчивых средах термодинамическое возмущение на поздних этапах эволюции может принять вид последовательности самоподдерживающихся ударных волн, автоволновых импульсов, максимальная амплитуда которых зависит только от параметров среды распространения, прежде всего от вида обобщенной функции нагрева и охлаждения [11]:

$$W(\rho, T) = \Lambda(\rho, T) - \Gamma(\rho, T).$$
(1)

Зная функцию  $W(\rho, T)$ , мы можем изучить процесс формирования наблюдаемых плотных субструктур ОФД Барьер Ориона.

Процесс эволюции газодинамического возмущения в ударноволновой импульс был исследован при помощи численного решения одномерной системы уравнений газодинамики в среде Athena MHD [16]. Для моделирования среды ОФД Барьер Ориона использовались функция нагрева и охлаждения из [2] и параметры среды из [8]. Для дополнительного контроля правильности счета проводилось сравнение с аналитическим значением амплитуды импульса, определяемого методом адиабат [15].

Результаты показывают, что любое малое начальное возмущение, заданное в виде кривой Гаусса, разделяется на две волны, которые распространяются в разные стороны. По мере роста амплитуды волны распространяющееся возмущение формирует ударно-волновой импульс, за фронтом которого следуют импульсы меньшей амплитуды (см. рисунок).

Амплитуда первого импульса, полученная в ходе моделирования, практически совпадает с аналитическим значением. Небольшое отличие связано с использованием при численном решении уравнений достаточно большой вязкости для предотвращения численных неустойчивостей [17]. В методе адиабат вязкость не учитывается.



Профиль плотности в ударно-волновой структуре в сравнении со значением, найденным при помощи метода адиабат:  $\lambda$  — период следования импульсов; l — характерный размер импульса, определяемый уменьшением значения плотности в e раз

## Обсуждение результатов

Результаты моделирования показывают корреляцию полученных структур и наблюдаемых субструктур. Характерный размер получаемых структур составляет  $(2.57...5.13) \cdot 10^{-4}$  пк, а периоды их следования находятся в диапазоне  $(0.02...1.7) \cdot 10^{-2}$  пк, что удовлетворительно согласуется с результатами наблюдения. Однако амплитуда плотности, рассчитанная по модели атомарной зоны ОФД [2], значительно отличается от значений, известных из наблюдений. Такое различие в значениях амплитуд вызвано тем, что известные значения сжатия наблюдались вблизи ДФ, т. е. ближе к молекулярной области и в самой молекулярной области, где обобщенная функция теплопотерь имеет другой вид. Мы планируем провести учет функции нового вида, удовлетворяющей области вблизи ДФ, в следующей работе.

Работа выполнена при частичной поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственные задания № FSSS-2023-0009 и № 0023-2019-0003).

#### Библиографические ссылки

- Molevich N. E., Zavershinsky D. I., Galimov R. N., Makaryan V. G. Traveling self-sustained structures in interstellar clouds with the isentropic instability // Astrophys. Space. Sci. - 2011. --Vol. 334. - P. 35-44.
- [2] Krasnobaev K. V., Tagirova R. R. Isentropic thermal instability in atomic surface layers of photodissociation regions // Mon. Not. R. Astron. Soc. - 2017. - Vol. 469. - P. 1403-1413.
- [3] Goicoechea J. R., Pety J., Cuadrado S. et al. Compression and ablation of the photo-irradiated molecular cloud the Orion Bar // Nature. - 2016. - Vol. 537, iss. 7619. - P. 207-209.
- [4] Habart E., Le Gal R., Alvarez C. et al. High-angular-resolution NIR view of the Orion Bar revealed by Keck/NIRC2 // Astron. Astrophys. - 2023. - Vol. 673. - P. A149.
- [5] Habart E., Peeters E., Berné O. et al. PDRs4All II: JWST's NIR and MIR imaging view of the Orion Nebula // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. - 2023. 2308.16732.
- [6] Hartigan P., Downes T., Isella A. A JWST Preview: Adaptive-optics Images of H2, Br-, and K-continuum in Carina's Western Wall // Astrophys. J. Lett. - 2020. - Vol. 902. - P. L1.
- [7] Downes T. P., Hartigan P., Isella A. Length-scales and dynamics of Carina's Western wall // Mon. Not. R. Astron. Soc. – 2023. – Vol. 519, iss. 4. – P. 5427–5438.
- [8] Joblin C., Bron E., Pinto C. et al. Structure of photodissociation fronts in star-forming regions revealed by Herschel? observations of high-J CO emission lines // Astron. Astrophys. - 2018. --Vol. 615. - P. A129.
- [9] Bron E., Agúndez M., Goicoechea J. R., Cernicharo J. Photoevaporating PDR models with the Hydra PDR Code // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. – 2018. 1801.01547.
- [10] Röllig M., Ossenkopf-Okada V. The KOSMA-tau PDR model. I. Recent updates to the numerical model of photo-dissociated regions // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. - 2022. - Vol. 664. -P. A67.
- [11] Field G. B. Thermal Instability // Astrophys. J. 1965. Vol. 142. P. 531-567.
- [12] Kaplan K. F., Dinerstein H. L., Oh H. et al. Excitation of Molecular Hydrogen in the Orion Bar Photodissociation Region from a Deep Near-infrared IGRINS Spectrum // Astrophys. J. – 2017. – Vol. 838. – P. 152–166.
- [13] Kavak Ü., van der Tak F. F. S., Tielens A. G. G. M., Shipman R. F. Origin of hydrogen fluoride emission in the Orion Bar. An excellent tracer for CO-dark H2 gas clouds // Astron. Astrophys. – 2019. – Vol. 631. – P. A117.
- [14] Kavak Ü., Bally J., Goicoechea J. R. et al. Dents in the Veil: protostellar feedback in Orion // Astron. Astrophys. - 2022. - Vol. 663. - P. A117.
- [15] Molevich N., Riashchikov D. Shock wave structures in an isentropically unstable heat-releasing gas // Phys. Fluids. – 2021. – Vol. 33, iss. 7. – P. 076110.
- [16] Stone J. M., Gardiner T. A., Teuben P. et al. Athena: a new code for astrophysical MHD // Astrophys. J. Suppl. Ser. – 2008. – Vol. 178, iss. 1. – P. 137.
- [17] Рящиков Д. С., Помельников И. А., Молевич Н. Е. Возмущения сжатия в атомарной зоне фотодиссоциативных областей межзвездного газа // Краткие сообщения по физике ФИАН. — 2022. — Vol. 10. — Р. 3—9.