

УДК: 524.5

## О ВОЗМОЖНОМ МЕХАНИЗМЕ ФОРМИРОВАНИЯ МЕЖЗВЕЗДНЫХ ОБЛАКОВ

П.А. ТАРАКАНОВ

Поступила 17 декабря 1999

Принята к печати 10 января 2000

Рассматривается возможный механизм образования межзвездных облаков Галактики посредством агрегации из "облачков" газа, выброшенных красными гигантами. Строится численная модель движения "облачка" в МЗС Галактики. Получаемые таким образом облака являются фракталами с фрактальной размерностью, совпадающей с наблюдаемой. Характерное время образования облака согласуется с наблюдениями.

1. *Введение.* По мере совершенствования методов исследования межзвездной среды (МЗС) Галактики, в частности, наблюдений в радиодиапазоне, выявилось, что простая двухкомпонентная модель недостаточна для объяснения наблюдаемых особенностей структуры МЗС. В соответствии с этой моделью сравнительно холодные объекты с повышенной концентрацией частиц ( $T \approx 5 + 50\text{K}$ ,  $n \approx 10^2 + 10^5 \text{ см}^{-3}$ ), называемые облаками, находятся в разреженной "теплой" среде ( $T \approx 3000 + 5000\text{K}$ ,  $n \approx 10^{-2} + 10^{-1} \text{ см}^{-3}$ ). При этом предполагается, что квазистационарность облаков поддерживается давлением "теплого" газа. В качестве причины разделения МЗС на две фазы и, соответственно, возникновения облаков, предполагалось развитие тепловой неустойчивости в первоначально однородной среде [1]. Однако в рамках этой модели оказывается непонятным происхождение достаточно крупных молекулярных облаков (МО) с размерами  $10 + 100 \text{ пк}$  и массой  $(10^3 + 100^6) M_{\odot}$ . Содержащиеся в них в значительном количестве тяжелые элементы (C, N, O) свидетельствуют о том, что МО состоят, главным образом, из газа, выброшенного звездами, поскольку только там эти элементы могут синтезироваться.

Наблюдения в радиодиапазоне демонстрируют неоднородность (фрагментарность) облаков. При увеличении разрешения большие фрагменты оказываются состоящими из меньших частей. Фрагментарность имеет место на всех доступных наблюдениям масштабах [2]. Какого-либо выделенного пространственного масштаба в облаке не существует. Современные оценки минимального уровня фрагментации дают величину в несколько десятков а.е. [3]. Таким образом, структура облаков является иерархической. Облако состоит из большого количества конденсаций, каждая из которых представляет, в свою

очередь, совокупность отдельных образований повышенной плотности и т.д. [4]. Определяемые из наблюдений физические характеристики таких объектов представляют собой усредненные по пространству величины.

В ряде работ было установлено, что межзвездные облака всех типов обладают фрактальной структурой (см., например, [5-8]). Различными методами из наблюдений было получено, что фрактальная размерность проекции МО близка к  $D_2 \approx 1.4$ . Библиография работ, относящихся к определению  $D_2$  для МО, приведена в [3]. Там же отмечается, что даже те молекулярные облака, которые с первого взгляда кажутся не имеющими фрактальной структуры, при достаточно большом разрешении оказываются фракталами с той же фрактальной размерностью.

Фрагментарная структура характерна также для облаков, состоящих из нейтрального водорода. Очень интересным обстоятельством оказалось не только обнаружение фрактальности у таких объектов [9], но и то, что показатель фрактальной размерности  $D_2 \approx 1.4 + 1.5$ , как и для МО. По-видимому, можно полагать, что фрактальность не обуславливается составом облака, а характерна для межзвездных газовых облаков вообще.

Здесь уместно отметить, что ранее [10] был получен вывод о фрактальной структуре облаков и зон дождя в земной атмосфере. При этом значение  $D_2 \approx 1.35 \pm 0.05$  на масштабах от 1 км до 10000 км в пределах возможных погрешностей совпадает с величиной, которая получается для межзвездных облаков.

К сказанному можно добавить, что для межгалактических газовых облаков, также обладающих фрактальной структурой, значение  $D_2 \approx 1.3 \pm 0.2$  [11]. Таким образом, представляется вероятным, что называемые облаками образования, всегда являются фракталами с размерностью, заключенной в пределах  $2.3 \leq D \leq 2.5$ , что, возможно, связано с наличием некоторых общих свойств у таких образований.

В настоящей работе рассматривается возможный механизм образования облаков (на примере межзвездных молекулярных облаков Галактики), приводящий к образованию фрактальной структуры с размерностью, согласующейся с наблюдениями.

**2. Образование межзвездных облаков.** Основным источником поступления веществ в МЗС являются красные гиганты, каждый из которых за время своего существования выбрасывает в виде звездного ветра газ с массой порядка  $0.1 + 10^3 M_{\odot}$ . Первоначально выброшенное вещество, как и звезды, рассредоточено в объеме Галактики. Для того, чтобы этот газ оказался в области, занимаемой облаками, необходимы какие-то факторы, вызывающие его сосредоточение там. Процесс образования МО до сих пор плохо изучен; обычно рассматриваются явления в уже существующем объекте. По-видимому, нельзя считать, что возникновение МО обусловлено лишь

избытком содержания тяжелых элементов в составляющем его газе - необходимо также наличие условий, способствующих образованию большого количества молекул в этом газе и препятствующих их быстрой диссипации. Именно этим МО должны отличаться от облаков нейтрального водорода. Время жизни и тех, и других облаков не превосходит  $10^9$  лет и, по-видимому, наблюдаемые облака сформировались из уже имевшегося газа преимущественно вторичного происхождения. За время жизни облака существенного обогащения его тяжелыми элементами не происходит, поскольку за  $10^8$  лет из звезд, находящихся в занимаемом облаком объеме, выбрасывается мало вещества - порядка 0.001 полной массы облака.

Поток газа ("звездного ветра"), истекающего из красного гиганта, далек от сферически-симметричного, так как вследствие конвекции внешние области таких звезд обладают крайне неоднородной структурой. Таким образом, около красного гиганта постепенно образуется некоторое количество "элементарных облачков". Исходно "элементарные облачка" находятся на расстояниях, значительно превышающих их размеры, и гравитационно взаимодействуют только при тесных сближениях [12].

При взаимодействии элементарные облака могут объединяться, в результате чего возникают более крупные и массивные объекты, в частности, молекулярные облака. На возможность образования МО путем объединения объектов малой массы указывалось ранее (см., например, работу [13]). Фактически межзвездный газ оказывается изначально структурированным. Важнейшим обстоятельством, в силу которого фрагментация газа сохраняется, является отсутствие перемешивания элементарных облачков - обмена веществом между ними практически не происходит. Очевидно, что при малых временах перемешивания иерархичность структуры должна была бы сгладиться и система стала бы однородной.

Перемешивание вещества двух "слипшихся" элементарных облачков могло бы происходить в результате диффузии. Так как температура газа низка, то характерное время тепловой диффузии на расстояние порядка размера элемента  $l$ , при скорости внутренних (не обязательно турбулентных) движений газа  $u_{\text{urb}} \ll 10^6$  см/с, превышает время существования облака. Что касается турбулентной диффузии, характерное время которой  $t_{\text{mix}}$  равно:

$$t_{\text{mix}} \approx \frac{l}{u_{\text{urb}}}, \quad (1)$$

то оно также оказывается превосходящим время жизни облака (для  $l \approx 10^{20}$  см и  $u \ll 10^6$  см/с, получаем  $t_{\text{mix}} \gg 10^{14}$  с).

Для облаков в земной атмосфере, являющихся фрактальными образованиями, отсутствие перемешивания надежно установлено [14]. Они также состоят из малых элементов - капель, получающихся в результате конденсации водяного пара. Капли взаимодействуют друг с другом только на достаточно малых расстояниях.

Для того, чтобы в газовой среде образовалась и сохранялась иерархическая структура, необходимо выполнение следующих условий:

1. В среде изначально существуют "элементарные частицы", размер и масса которых малы по сравнению с размерами и массой системы;
2. "Элементарные частицы" должны обладать способностью к агрегации (объединению);
3. При объединении "элементарных частиц" в агрегаты и последующем объединении получающихся более сложных образований не происходит перемешивание.

Для выполнения этих условий требуется, чтобы:

- а) относительные скорости движения агрегатов были достаточно малыми;
- б) взаимодействие элементарных частиц и агрегатов происходило только при достаточно тесных сближениях.

Указанные условия 1-3, сформулированные в работе [15], являются необходимыми для того, чтобы иерархическая структура среды была также и фрактальной. Судя по тому, что для всех рассмотренных выше систем они выполняются, и эти системы обладают схожей фрактальной размерностью, не исключено, что они являются и достаточными для "фрактализации" газовых систем.

Последовательная агрегация может приводить, при выполнении определенных условий, к образованию фрактальных структур. Подобный процесс возникновения иерархической структуры характерен для объектов иной природы - химических агрегатов [16], где слипание элементов обусловлено взаимодействиями совершенно другого типа, чем в межзвездной среде.

3. *Обобщенное броуновское движение.* По определению, обобщенным броуновским движением в пространстве  $\mathbb{R}^n$  с показателем Херста  $H$  называется движение частицы, приращение координаты которой зависит от времени специальным образом:

$$\|B_H(t_2) - B_H(t_1)\| \propto \xi |t_2 - t_1|^H, \quad t_2 \geq t_1; \quad \mathbb{R} \xrightarrow{B_H} \mathbb{R}^n, \quad (2)$$

причем это соотношение выполняется для любых  $t_1$  и  $t_2$ .  $\xi$  - нормально распределенная случайная величина,  $\langle \xi \rangle = 0$ . Частным случаем обобщенного броуновского движения при  $H=1/2$  является обычное броуновское движение.

Легко показать [17], что обобщенное броуновское движение обладает памятью - при  $H \neq 1/2$  приращения не являются независимыми. В случае  $H > 1/2$  в процессе поддерживается имеющаяся тенденция, а при  $H < 1/2$  тенденция к росту в прошлом означает тенденцию к уменьшению в будущем и наоборот.

Рассмотрим процесс обобщенного броуновского движения с возможностью агрегации элементов при сближении их на достаточно малые расстояния. В настоящее время считается [17], что в результате такого процесса в пространстве  $\mathbb{R}^3$  образуются агрегаты с фрактальной размерностью  $D_3 = 3 - H$ . Это утверждение строго не доказано, но неоднократно проверялось в

вычислительных экспериментах. Если движение элементарных облачков в Галактике представимо в рамках модели обобщенного броуновского движения, то можно путем численного эксперимента получить значение показателя Херста и оценить таким образом фрактальную размерность получающихся для данной модели облаков.

При учете возможной агрегации в процессе появляется память, связанная с накоплением массы элементарным облачком. В таком случае можно ожидать, что движение элементарного облачка представимо моделью обобщенного броуновского движения с  $H \neq 1/2$ .

4. *Движение элементарного облачка.* Существенное влияние на процесс агрегации газовых облаков в межзвездной среде должны оказывать внешние условия, в которых эта среда находится, в первую очередь действие гравитационного поля, создаваемого звездами.

Рассмотрим задачу о движении одного элементарного облачка, выброшенного из красного гиганта, в гравитационном поле Галактики. Воспользуемся предложенным В.А.Амбарцумяном разложением поля на регулярную и иррегулярную компоненты. Поскольку размеры одного молекулярного облака малы по сравнению с размерами Галактики, то в пределах "бокса", близкого по размерам к облачку, регулярное гравитационное поле можно считать постоянным и рассматривать движение элементарного облачка исключительно в иррегулярном поле.

В таком случае элементарное облачко будет двигаться при достаточном удалении от звезд и других облачков прямолинейно и равномерно (в системе отсчета, связанной с боксом). При каждом близком сближении со звездой скорость будет меняться. Кроме этого, если эта звезда является красным гигантом, то при близком сближении элементарное облачко набирает на себя вещество, выброшенное из этого красного гиганта. При столкновении двух облачков с достаточно малой относительной скоростью, облачка сливаются.

В рамках такой модели можно рассчитать траекторию движения элементарного облачка. Для упрощения вычислений будем считать, что:

- 1) расстояние между двумя "соседними" звездами постоянно и равно  $L$ , отношение "частоты встреч" облачков и звезд  $N$ ;
- 2) звезда, с которой происходит сближение, является красным гигантом с вероятностью  $P$ ;
- 3) красные гиганты имеют массу  $\mathfrak{M} = \mathfrak{M}_g$ , остальные звезды имеют массу  $\mathfrak{M} = \mathfrak{M}_d$ ;
- 4) функция распределения звезд по скоростям имеет вид распределения Шварцшильда:

$$f(u, v, w) du dv dw = \frac{1}{(2\pi)^{3/2} \sigma_1 \sigma_2 \sigma_3} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{u^2}{\sigma_1^2} + \frac{v^2}{\sigma_2^2} + \frac{w^2}{\sigma_3^2} \right)} du dv dw,$$

$$\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3 = 15 : 10 : 8;$$

5) для красных гигантов  $\sigma_1 = 30$  км/с, для остальных звезд  $\sigma_1 = 60$  км/с (стандартные значения для звезд классов соответственно gG - gM и dG - dM:

6) прицельное расстояние  $p$  для каждого отдельного сближения определяется случайным образом, функция распределения гауссова с заданной дисперсией  $\sigma$ ;

7) начальная масса облачка  $m = m_1$ , причем  $m_1 \ll \varpi$ ;

8) функция распределения облачков по скоростям гауссова с дисперсией  $\sigma_2$ ;

9) слияние облачков происходит при относительной скорости движения меньше  $V$ ;

10) после каждого сближения с другим облачком или красным гигантом масса облачка увеличивается на  $m_1$ .

5. *Расчет показателя Херста.* Для получения значения показателя Херста был проведен численный эксперимент. Была написана программа, реализующая модель движения элементарного облака. Показатель  $H$  находится методом наименьших квадратов из соотношения

$$\ln|B_H(t) - B_H(t_0)| = H \cdot \ln|t - t_0| + \text{const}, \quad (3)$$

следующего из (2). Параметры программы и их значения, принятые для расчетов, приведены в табл.1.

При расчетах с этим набором параметров было получено значение  $H = 0.657 \pm 0.072$ . Характерное время увеличения начальной массы облачка на порядок составило  $(0.6 \pm 0.2) \cdot 10^5$  лет.

Была также исследована чувствительность результата к начальным данным. В табл.2 приводятся значения показателя Херста, рассчитанные для принципиально возможных границ диапазона параметров (значения возможных ошибок определения  $H$  во всех случаях не превышают 0.1). Видно, что только выбор дисперсии прицельного расстояния существенным

Таблица 1

## ПАРАМЕТРЫ ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЯ ХЕРСТА

Параметр	Значение
Расстояние между звездами	10 пк
Вероятность встречи с красным гигантом	0.03
Масса красного гиганта	3 $\varpi_{\odot}$
Масса обычной звезды	1 $\varpi_{\odot}$
Дисперсия прицельного расстояния	100 а.е.
Начальная масса облачка	$10^{-4}$ $\varpi_{\odot}$
Отношение частот встреч облачков и звезд	10
Дисперсия скоростей облачков	100 км/с
Максимальная относительная скорость движения	50 км/с
Количество сближений со звездами	100
Количество экспериментов	1000

Таблица 2

ВОЗМОЖНЫЙ РАЗБРОС ЗНАЧЕНИЙ ПОКАЗАТЕЛЯ ХЕРСТА ПРИ  
ВАРЬИРОВАНИИ ПАРАМЕТРОВ ЗАДАЧИ

Параметр	Значения		Показатель Херста, соответствующий:	
	минимум	максимум	минимуму	максимуму
Расстояние между звездами	1 пк	100 пк	0.657	0.657
Вероятность встречи с красным гигантом	0.001	1	0.553	0.703
Масса красного гиганта	1 $\%_{\odot}$	20 $\%_{\odot}$	0.646	0.659
Масса обычной звезды	0.5 $\%_{\odot}$	5 $\%_{\odot}$	0.662	0.642
Дисперсия прицельного расстояния	10 а.е.	1000 а.е.	0.510	0.833
Начальная масса элементарного облака <sup>1</sup>	$10^{-5} \%_{\odot}$	$10^{-1} \%_{\odot}$	0.643	0.641
Количество красных гигантов <sup>2</sup>	1	100	0.502	0.538

<sup>1</sup> Максимальное значение  $H = 0.660$  достигается при  $m_1 \approx 7 \cdot 10^{-5} \%_{\odot}$

<sup>2</sup> Максимальное значение  $H = 0.782$  достигается при  $N = 8$

образом влияет на результат. Поскольку [12] характерное расстояние, на котором возможно взаимодействие элементарных облаков, совпадает с их размерами, то дисперсия прицельного параметра принималась равной оценке минимального масштаба фрагментации межзвездных облаков [3].

Интересно отметить, что показатель  $H$  как при малом числе красных гигантов, так и при большом их числе близок к  $1/2$ . Когда количество красных гигантов  $N=1$ , процесс идет фактически без агрегации (за исключением последнего сближения). В таком случае он должен описываться обычным броуновским движением, т.е. для него в идеале  $H=1/2$ , что и наблюдается. Аналогично, при большом  $N$  на поздних стадиях процесса прирост массы облака оказывается малым по сравнению с массой облака, и агрегацией можно пренебречь. Движение также оказывается обыкновенным броуновским, а более сильное отклонение  $H$  от  $1/2$ , чем в первом случае, объясняется учетом начальных стадий движения, для которых  $H > 1/2$ .

Количество подэлементов в элементе для предложенной выше модели не может быть очень большим, поскольку структура оказывается "рыхлой". Например, химический агрегат с количеством элементов, превосходящим некоторую величину ( $N \geq 100$ ), является неустойчивым [16]. Вследствие этого реальное значение  $N$  не может превышать  $\tilde{N} \sim 100$ , так как получившийся агрегат будет рыхлым и достаточно быстро распадется.

6. *Выводы.* Таким образом, в результате данного процесса образуется облако со структурой с фрактальной размерностью  $D_3 = 3 - H = 2.37 \pm 0.07$ , что полностью согласуется с наблюдательными данными. Оценка характерного времени образования облака за счет данного механизма не противоречит

наблюдательным данным.

Поскольку облака различной природы имеют одну и ту же фрактальную размерность, можно ожидать, что это связано с наложением агрегации, т.е. эффекта памяти процесса, на обычное броуновское движение, которое существует во всех облаках, несмотря на различия в их природе. В таком случае конкретное значение показателя Херста для движения и, следовательно, фрактальной размерности облака, возможно, определяется исключительно законом изменения массы элементарного облака и не зависит от выбора конкретной физической системы.

Санкт-Петербургский государственный университет,  
Россия

## ON THE POSSIBLE MECHANISM OF INTERSTELLAR CLOUDS FORMATION

P.A. TARAKANOV

A possible mechanism of formation of interstellar clouds in the Galaxy by means of aggregation of "elementary" gaseous clouds ejected from red giants is considered. A numerical model of the movement of "elementary" clouds in interstellar clouds of the Galaxy is made. The clouds obtained in this way are fractals of a fractal size which coincides with observed data. The characteristic time of the formation of the cloud is in agreement with observations.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *G.H.Field*, *Astrophys. J.*, **142**, 531, 1965.
2. *P.C.Myers*, *Astrophys. J., Lett.*, **496**, L109, 1998.
3. *B.G.Elmergreen, E.Falgarone*, *Astrophys. J.*, **471**, 816, 1996.
4. *J.M.Scalo*, in *Physical Processes in Fragmentation and Star Formation*, R.Capuzzo-Dolcetta, C.Chiosi, A. Di Fazio, Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 151, 1990.
5. *E.Falgarone, T.Phillips, C.K.Walker*, *Astrophys. J.*, **378**, 186, 1991.
6. *E.Falgarone, J.L.Puget, M.Perault*, *Astron. Astrophys.*, **257**, 715, 1992.
7. *D.Pfenniger, F.Combes*, *Astron. Astrophys.*, **285**, 94, 1994.
8. *A.Hetem, J.R.D.Lépine*, *Astron. Astrophys.*, **270**, 451, 1993.

9. *M.G.R.Vogelaar, B.P.Wakker*, *Astron. Astrophys.*, **291**, 557, 1994.
10. *B.Lovejoy*, *Nature*, **216**, 185, 1982.
11. *В.Г.Горбацкий*, *Астрофизика*, **40**, 29, 1997.
12. *В.Г.Горбацкий, П.А.Тараканов*, *Астрофизика*, **41**, 81, 1998.
13. *P.M.Solomon, A.R.Rivolo, J.Barett, A.Yahil*, *Astrophys. J.*, **319**, 730, 1987.
14. *И.П.Мазин, Б.Н.Сергеев*, Численное моделирование облаков, Гидрометеоиздат, М., 1984.
15. *В.Г.Горбацкий, П.А.Тараканов*, *Письма в Астрон. ж.*, **25**, 270, 1999.
16. *М.Джейсок, Дж.Парфит*, *Химия поверхностей раздела фаз*, Мир, М., 1984.
17. *Е.Федер*, *Фракталы*, Мир, М., 1991.