

## АСТРОНОМИЯ И ФИЗИКА КОСМОСА

УДК 524.52; 524.57

ДИНАМИКА ГАЗА И ПЫЛИ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ  
ДИФФУЗНЫХ ОБЛАКОВ С УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

С. Ю. Дедиков, Е. О. Васильев

*Исследована эффективность выживания пыли при взаимодействии запыленных межзвездных облаков с ударной волной. Найдено, что при адиабатическом разрушении небольших облаков происходит разделение принадлежащих облаку пылевых частиц по размеру вдоль движения облака: крупные частицы пыли остаются далеко позади газовых фрагментов облака, мелкие частицы увлекаются облаком. В крупных радиационно охлаждающихся облаках большая часть пыли вне зависимости от ее размера содержится и сохраняется в плотных холодных фрагментах облака.*

**Ключевые слова:** межзвездная среда, ударные волны, пыль, газовая динамика.

*Введение.* Взаимодействие ударных волн (УВ) с межзвездными облаками играет важную роль в формировании многофазной межзвездной среды [МЗС, 1]. Сжатие газа за фронтами УВ, возможно, приводит к стимулированию звездообразования [2]. Поддержание сверхзвуковой турбулентности в МЗС также, по-видимому, связано с взаимодействием УВ и облаков [3]. В численных моделях взаимодействия УВ с облаком показано [4–11 и др.], что адиабатическое (нерадиационное) облако разрушается в течение нескольких времен прохождения УВ по облаку за счет развития гидродинамических неустойчивостей, таких как Рэлея–Тейлора, Рихтмайера–Мешкова и Кельвина–Гельмгольца. В последнее время интерес к этим моделям возрос в связи с проблемами увлечения массы (mass entrainment) в галактических истечениях [12, 13], обогащения околосгалактической и межгалактической среды тяжелыми элементами и пылью [14, 15], образования и выживания пыли в эжекте сверхновой [16, 17]. Полученные из наблюдений оценки скоростей газа в этих процессах превышают сотни км/с [18].

Содержание пыли в МЗС относительно мало: составляет порядка 1% от массы газа. При этом пространственные флуктуации отношения масс пыли и газа, по-видимому, могут быть значительными [19]. Так в работе [20] в рамках двумерной многожидкостной газодинамики исследована эволюция этого отношения при взаимодействии УВ с плотным (отношение плотностей газа в облаке и среде  $\sim 10^3$ ) адиабатическим облаком и найдены заметные флуктуации пространственного распределения отношения плотностей пыли и газа. Время охлаждения газа в таком облаке оказывается сравнимым со временем прохождения УВ по облаку, поэтому радиационные потери должны играть существенную роль в эволюции облака [10]. Очевидно, изменения тепловой эволюции будут влиять на динамику пылевых частиц.

В работе в рамках трехмерной многокомпонентной газовой динамики рассмотрена эволюция пылевых частиц при разрушении межзвездных облаков ударной волной в зависимости от теплового режима газа.

*Взаимодействие облака с ударной волной.* Исследуем динамику взаимодействия изолированного запыленного немагнитного облака с сильной УВ. Рассмотрим облако радиусом  $r_0$  и плотностью  $\rho_c$ , находящееся в равновесии с окружающей средой плотностью  $\rho_b$ . При взаимодействии УВ, распространяющейся по окружающему газу со скоростью  $v_b$ , с облаком ее скорость внутри облака будет составлять  $v_s = v_b/\chi^{1/2}$ , где  $\chi = \rho_c/\rho_b$  – превышение плотности в облаке над фоном [21, 22]. Тогда время прохождения УВ по облаку составит  $t_{ic} = 2r_0/v_b$  и характерное время разрушения облака равно  $t_{cc} = \chi^{1/2}r_0/v_b \simeq 3 \times 10^4 \chi_{10}^{1/2} r_{0,\text{pc}}/v_{b,100}$  лет [6], где  $\chi_{10} = \chi/10$ ,  $r_{0,\text{pc}}$  в пк,  $v_{b,100}$  в единицах 100 км/с. Радиационное охлаждение газа в облаке за фронтом УВ определяется временем  $t_{\text{cool}} \sim k_B T_c/n_c \Lambda \simeq 4 \times 10^4 T_{c,4}/n_{c,1} \Lambda_{-24}$  лет, где  $k_B$  – постоянная Больцмана,  $T_c$  и  $n_c$  – температура и концентрация газа в облаке,  $\Lambda$  – темп охлаждения,  $T_{c,4} = T_c/10^4$  К,  $n_{c,1} = n_c/1$  см $^{-3}$ ,  $\Lambda_{-24} = \Lambda/10^{-24}$  эрг см $^3$  с $^{-1}$ .

При распространении УВ газ в облаке нагревается, что приводит как к расширению газа и полному разрушению облака, так и к повышению темпа охлаждения вещества, принадлежащего облаку [6, 8, 10]. При эффективном охлаждении газа в облаке формируются плотные конденсации. В случае незначительных радиационных потерь облако за фронтом нагревается адиабатически. Этот переход определяется металличностью газа и превышением плотности в облаке над фоном. На рис. 1 показана зависимость значения начального радиуса облака от скорости УВ в среде для равенства времен разрушения облака и охлаждения газа за фронтом УВ в облаке:  $t_{cc} = t_{\text{cool}}$  (используется

изохорическая функция охлаждения из работы [23]). Газ в крупных облаках с радиусом больше представленного предела должен эффективно охлаждаться после прохождения УВ и значительная его часть переходить в плотные и холодные фрагменты. Мелкие облака, вероятно, будут нагреваться УВ и впоследствии разрушаться.

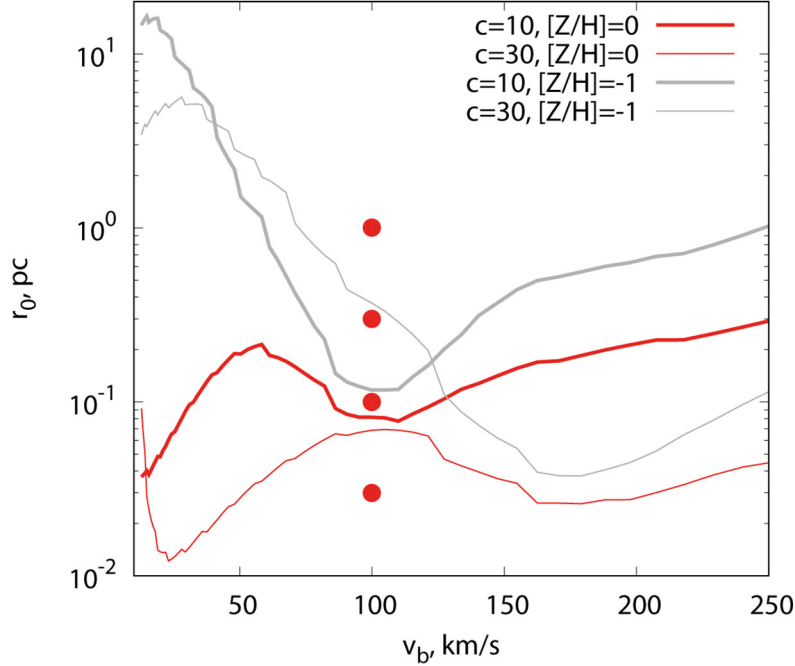


Рис. 1: Зависимость начального радиуса облака  $r_0$  от скорости УВ  $v_b$  в окружающей среде, для равенства времен разрушения облака и охлаждения газа за фронтом УВ в облаке,  $t_{cc} = t_{cool}$ , для металличности газа (как в облаке, так и в окружающей среде)  $[Z/H] = 0$  (красные линии) и  $-1$  (серые линии) и значения превышения плотности  $\chi = 10$  (толстые линии) и  $30$  (тонкие линии).

Проследить эти процессы можно при помощи трехмерного моделирования динамики взаимодействия УВ с облаками разного размера. Для расчетов используется программный пакет [24, 25], основанный на явной схеме без расщепления потоков величин по пространству с условием уменьшения полной вариации<sup>1</sup>. Программный пакет успешно прошел весь набор тестов из работы Klingenberg et al. [26]. Для учета радиационных потерь в расчетах используется неравновесная изохорическая функция охлаждения [23, 27]. Динамика пыли описывается с помощью метода “суперчастиц”<sup>2</sup>, предложенном в

<sup>1</sup>total variation diminishing – TVD.

<sup>2</sup>Каждая из “суперчастиц” представляет собой конгломерат одинаковых микрочастиц – пылинок.

[28], более подробно рассмотренном в [29, 30] и адаптированным в используемом программном пакете (см. описание и тесты в приложении А в [25]). Для каждой суперчастицы решаются уравнения движения с учетом взаимного влияния на газ за счет сил трения [31–33] и уравнение для изменения радиуса пылинки благодаря тепловому и кинетическому испарению<sup>3</sup> [34].

Рассмотрим эволюцию диффузных облаков с радиусами 1, 0.3, 0.1 и 0.03 пк, взаимодействующих с УВ со скоростью  $v_b = 100$  км/с. На диаграмме “размер облака – скорость УВ” (рис. 1) эти значения, отмеченные красными символами, отражают переход от радиационного охлаждения вещества облаков к их разрушению за фронтом УВ для металличности  $[Z/H] = 0$  и величины превышения плотности в облаках  $\chi = 10$  (толстая красная линия). Концентрация окружающего газа равна  $0.1 \text{ см}^{-3}$ . Для простоты предполагается, что пыль изначально находится только в облаке. Отношение плотностей пыли к газу внутри облака составляет 0.01. Пыль изначально полагалась монодисперсной с размером  $a = 0.1$  мкм. Для отделения вещества, принадлежащего облаку, от окружающего газа применяется метод “цветной жидкости” [7]: в начальный момент времени значение “цвета” в облаке  $C = 1$  и 0 вне его. Надо отметить, что этот метод отслеживания не лишен численной диффузии [7, 35], поэтому масса “цветной жидкости” зависит от выбранного уровня концентрации  $C$  (см. обсуждение в [36]). В начальный момент времени центр облака имеет координаты  $(x_0, y_0, z_0) = (0, 0, 2r_0)$ . Число ячеек на радиус облака в расчетах составляло 20, что достаточно для адекватного отслеживания тепловой структуры облака [37]. Число “суперчастиц” пыли задавалось равным 8 миллионам.

Приведем распределения газодинамических величин и плотности пыли в облаках для позднего момента времени  $t = 20t_{\text{cc}}$ , когда эволюционные особенности проявляются явно. На рис. 2 показаны группы панелей для облаков с  $\chi = 10$  и радиусами  $r_0 = 1$  пк (а), 0.3 пк (б), 0.1 пк (в), 0.03 пк (д). В каждой группе представлены распределения плотности газа, температуры, концентрации “цвета” и плотности пыли (слева направо) вдоль среза, проходящего через центр облака в направлении распространения УВ (ось  $z$ ).

Нужно отметить, что в области  $z \sim (50 - 60)r_0$  находится множество фрагментов, образованных в результате охлаждения ударного фронта (это следует из того, что масса этих фрагментов заметно выше массы облака). С уменьшением радиуса облака конечное время расчета уменьшается, поэтому влияние охлаждения на УВ падает. Для

---

<sup>3</sup>sputtering.

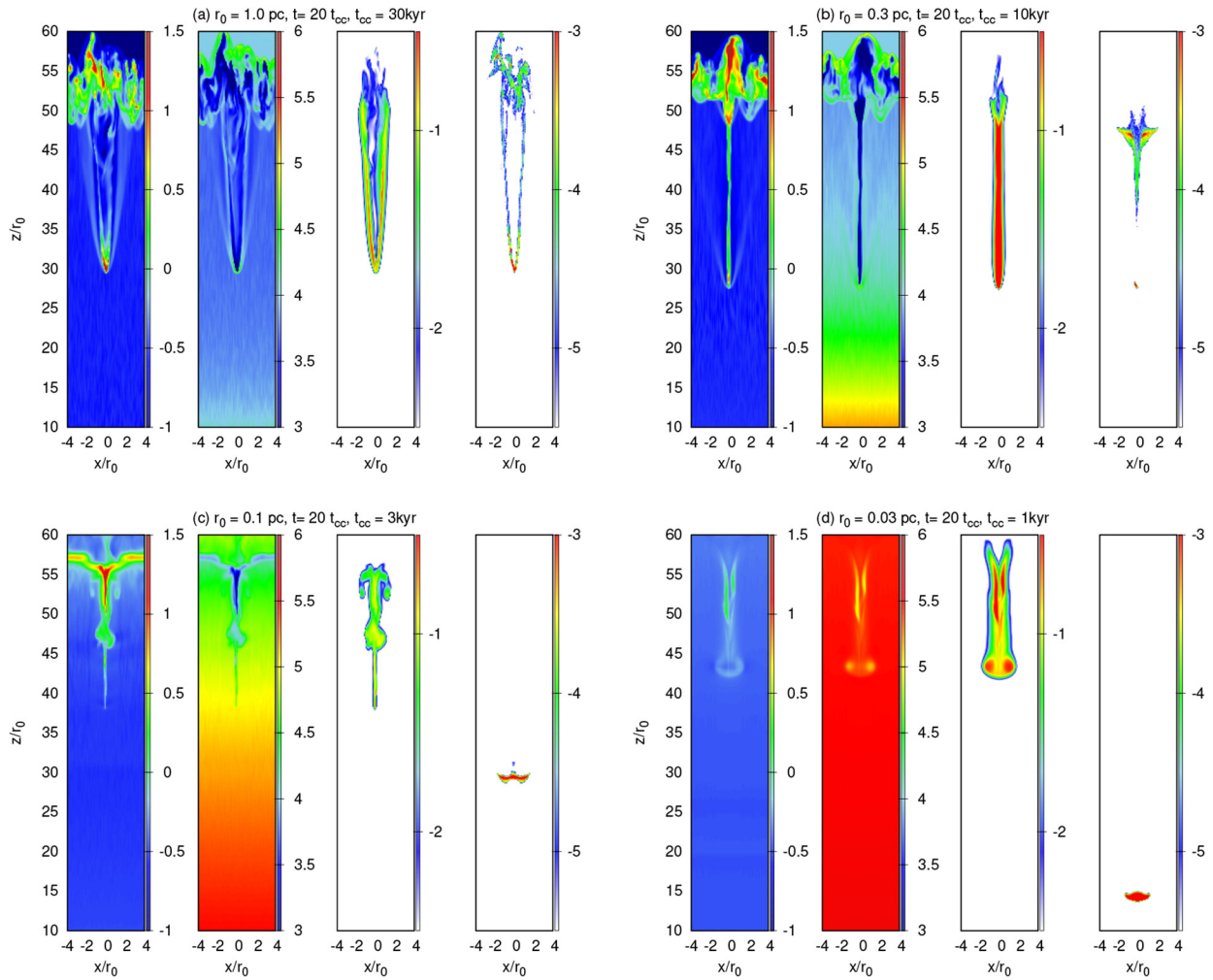


Рис. 2: Распределения газодинамических величин и плотности пыли вдоль среза, проходящего через центр облака в направлении распространения УВ (снизу вверх вдоль оси  $z$ ), для диффузных облаков с  $\chi = 10$  и радиусами  $r_0 = 1$  пк (a), 0.3 пк (b), 0.1 пк (c), 0.03 пк (d) в момент времени  $t = 20t_{cc}$ . В каждой группе показаны плотность газа  $\log(n, \text{см}^{-3})$  (первая панель в каждой группе (a)–(d)), температура  $\log(T, \text{K})$  (вторая панель), концентрация “цвета”,  $\log C$  (третья панель), плотность пыли  $\log(\rho_d/m_p, \text{см}^{-3})$  (четвертая панель).

наименьшего размера облака УВ остается адиабатической, ее скорость не уменьшается и к моменту  $t = 20t_{cc}$  ударный фронт находится за пределами показанной области на рис. 2. Для того, чтобы легко отделить вещество, принадлежащее облаку в начальный момент, приведено распределение концентрации “цвета”  $C$  (третья панель).

На распределении плотности газа (рис. 2) видно, что с уменьшением радиуса вещество облака сосредоточено в менее компактной области: для  $r_0 = 1$  пк (а) к моменту времени  $t = 20t_{cc}$  сформировался плотный и холодный фрагмент размером менее  $0.5r_0$ , расположенный около  $(x, z) \sim (0, 30)r_0$ . Подобная конденсация образуется и в случае взаимодействия УВ с облаком меньшего размера  $r_0 = 0.3$  пк (б), хотя она оказывается более рыхлой и растянутой в направлении распространения УВ. Это ожидаемо для облака с радиусом, близким к критическому значению на диаграмме “начальный размер – скорость УВ”. Для размера облака  $r_0 = 0.1$  пк, примерно равного критическому значению на диаграмме (рис. 1), плотный фрагмент не образуется, температура вещества облака оказывается близкой к значению для окружающего газа (с). Для еще меньшего размера  $r_0 = 0.03$  пк (д) облако фактически разрушено, газ, принадлежавший облаку, нагрелся до температуры окружающей среды.

*Динамика пыли в облаке.* Пыль в радиационно охлаждающемся диффузном облаке, в основном остается связанной с газом. За фронтом УВ газ быстро охлаждается и собирается в плотные фрагменты, передача импульса которым от УВ не эффективна. Для радиуса облака  $r_0 = 1$  пк (группа панелей (а) на рис. 2) видно, что максимумы плотности газа и пыли пространственно совпадают. Распределения газа, изначально принадлежащего облаку, и пыли оказываются близки (ср. панели для концентрации “цвета” и плотности пыли в группе (а)). При уменьшении радиуса облака до 0.3 пк часть пылевых частиц остается в плотном газовом фрагменте, однако значительная часть пыли выносится из облака (правая панель в группе (б) на рис. 2).

При уменьшении роли охлаждения перепады плотности газа в облаке остаются незначительными, импульс УВ передается газу облака эффективнее, чем более инерционным, крупным частицам пыли (напомним, что размер пылевых частиц в облаке равен 0.1 мкм). Поэтому для радиуса облака 0.1 пк распределение пыли и газа кардинально отличаются (см. панели (с) на рис. 2). Газ облака уносится УВ, при этом пыль, находившаяся в облаке, остается далеко позади разрушенного облака. Даже к позднему времени  $t = 20t_{cc}$  она остается сосредоточенной в довольно компактной области, в которой локально повышается соотношение плотностей пыли и газа. Таким образом, для облаков с размером, близким к критическому значению на диаграмме “размер облака – скорость УВ” (рис. 1), пыль и газ облака пространственно разделяются вследствие прохождения УВ. Для наименьшего радиуса 0.03 пк пыль еще в меньшей степени переносится УВ: расстояние между газом облака и пылевым фрагментом увеличивается,

форма этого фрагмента меньше отличается от первоначальной сферической (см. панели (d) на рис. 2).

Таким образом, динамика пыли при взаимодействии облака с УВ существенно зависит от соотношения времен охлаждения и разрушения облака. В радиационно охлаждающихся облаках ( $t_{cc}/t_{cool} > 1$ ) после взаимодействия в УВ значительная доля вещества сжимается в плотный фрагмент, передать импульс которому сложно. В слабо охлаждающихся или адиабатических облаках ( $t_{cc}/t_{cool} \lesssim 1$ ) флуктуации плотности в облаке после прохождения УВ значительно меньше, поверхность фрагментов больше и передача импульса газу становится более эффективной.

Пылевые частицы более инерционны. Время ускорения (торможения) частиц,  $\tau \sim \rho_m a / \rho_g \sigma_T \simeq 6 \times 10^4 a_{0.1} n_1 \sigma_{T,100}$  лет [31, 32]<sup>4</sup> в радиационных облаках быстро падает из-за увеличения плотности газа и оказывается меньше времени разрушения облака. Адиабатически эволюционирующие облака разрушаются быстрее, чем достаточно крупная пыль может быть ускорена. Это хорошо видно из сравнения распределения плотностей газа и пыли на рис. 2.

При уменьшении размера пылевых частиц время их ускорения уменьшается и они увлекаются потоком газа более эффективно. На рис. 3 показаны распределения плотности пыли после взаимодействия облака радиусом  $r_0 = 0.03$  пк с УВ в момент времени  $t = 20t_{cc}$  для монодисперсных пылевых частиц с различным начальным размером. Распределение газа для этой модели представлено на первой панели группы (d) рис. 2. Видно, что для меньшего размера пространственное разделение пыли и газа уменьшается, и для  $a = 0.003$  мкм их распределения оказываются близки.

В межзвездной среде и облаках частицы пыли распределены по размерам в широком интервале размеров [38]. Поэтому при адиабатическом ( $t_{cc}/t_{cool} \lesssim 1$ ) взаимодействии облака с УВ происходит сегрегация пылевых частиц, принадлежащих облаку, вдоль движения облака, мелкие частицы увлекаются облаком, а крупные частицы покидают газ облака, формируя флуктуации плотности пыли за фронтом УВ. При высокой скорости УВ ( $v_b \gtrsim 200$  км/с) пыль при попадании в горячий газ за фронтом уменьшается в размере благодаря тепловому испарению [33]. В случае значительных радиационных потерь ( $t_{cc}/t_{cool} > 1$ ) при взаимодействии облака с УВ основная часть массы пыли сохраняется в плотном и холодном фрагменте [36]. Таким образом, диаграмма “размер облака – скорость УВ” (рис. 1) определяет эффективность выживания пыли при взаимодействии

<sup>4</sup> $\rho_m$  – плотность материала пыли,  $a$  – радиус частицы,  $\rho_g$  – плотность газа,  $\sigma_T$  – тепловая скорость газа,  $a_{0.1} = a/0.1$  мкм,  $n_1 = (\rho_g/m_p)/1$  см<sup>-3</sup>,  $\sigma_{T,100} = \sigma_T/100$  км/с.

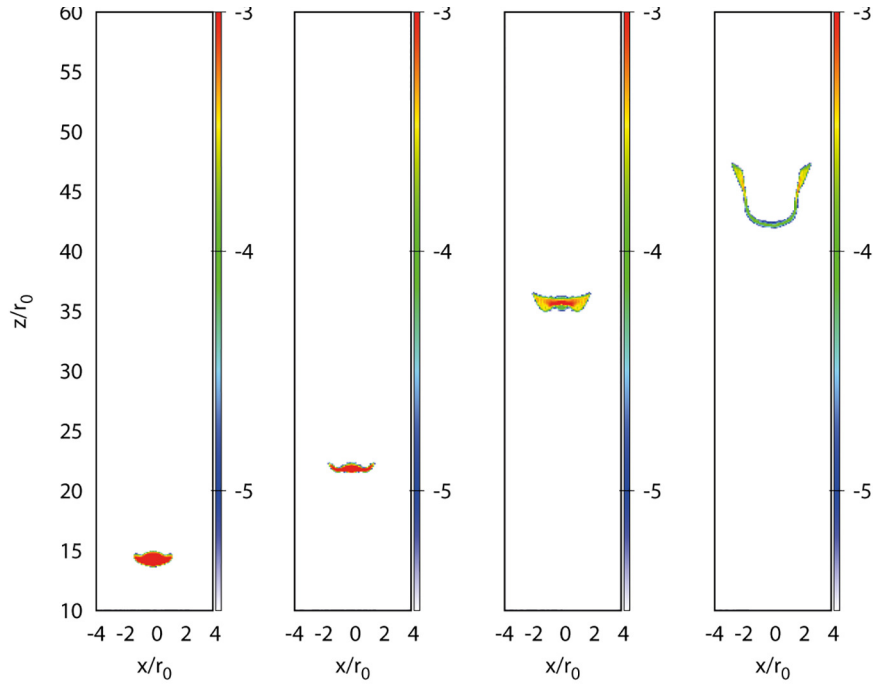


Рис. 3: Распределения плотности пыли вдоль среза облака с радиусом  $r_0 = 0.03$  пк в момент времени  $t = 20t_{cc}$  для пылевых частиц с начальным размером  $a = 0.1$  мкм (левая панель),  $0.03$  мкм (вторая панель),  $0.01$  мкм (третья панель),  $0.003$  мкм (правая панель).

УВ с межзвездными облаками. Процесс перераспределения пылевых частиц по размерам при взаимодействии облаков с УВ может оказываться важным и для их транспорта из галактик в окологалактическую и мегалактическую среду [39, 40], и для объяснения измерений экстинкции в скоплениях галактик (см. обзор, [14]).

*Заключение.* В рамках трехмерного моделирования исследована динамика взаимодействия УВ с запыленными диффузными облаками. Найдено, что при разрушении небольших облаков, эволюционирующих адиабатически, происходит сегрегация пылевых частиц, принадлежащих облаку, вдоль движения облака: крупные частицы пыли остаются далеко позади газовых фрагментов облака, мелкие частицы увлекаются облаком. В радиационно охлаждающихся облаках пыль вне зависимости от ее размера сохраняется в плотных холодных фрагментах облака. Таким образом, эффективность выживания пыли при взаимодействии УВ с межзвездными облаками определяется соотношениями времен охлаждения газа, разрушения облака и ускорения (торможения) частиц.



Авторы благодарны Ю. А. Шекинову за обсуждение и ценные указания.  
Е. О. Васильев выражает благодарность проекту ФИАН ННГ–36–2024.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] C. F. McKee, J. P. Ostriker, *Astrophys. J.* **218**, 148 (1977).
- [2] B. G. Elmegreen, C. J. Lada, *Astrophys. J.* **214**, 725 (1977).
- [3] M.-M. Mac Low, R. S. Klessen, *Reviews of Modern Physics* **76**, 125 (2004). DOI: astro-ph/0301093.
- [4] A. G. Sgro, *Astrophys. J.* **197**, 621 (1975).
- [5] G. Tenorio-Tagle, M. Rozyczka, *Astron. and Astrophys.* **155**, 120 (1986).
- [6] R. I. Klein, C. F. McKee, P. Colella, *Astrophys. J.* **420**, 213 (1994).
- [7] J. Xu, J. M. Stone, *Astrophys. J.* **454**, 172 (1995).
- [8] F. Nakamura, C. F. McKee, R. I. Klein, R. T. Fisher, *Astrophys. J. Suppl.* **164**, 477 (2006). DOI: astro-ph/0511016.
- [9] E. E. Matvienko, Y. A. Shchekinov, *Astronomy Reports* **51**, 109 (2007).
- [10] K. Yirak, A. Frank, A. J. Cunningham, *Astrophys. J.* **722**, 412 (2010); DOI: 0912.4777.
- [11] J. M. Pittard, T. W. Hartquist, S. A. E. G. Falle, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **405**, 821 (2010). DOI: 1002.2091.
- [12] D. Zhang, T. A. Thompson, E. Quataert, N. Murray, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **468**, 4801 (2017). DOI: 1507.01951.
- [13] M. Gronke, S. P. Oh, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **480**, L111 (2018). DOI: 1806.02728.
- [14] Y. A. Shchekinov, B. B. Nath, E. O. Vasiliev, *Universe* **8**, 212 (2022). DOI: 2203.14073.
- [15] Y. A. Shchekinov, E. O. Vasiliev, B. M. Shustov, *Physics Uspekhi* **66**, 1071 (2023).
- [16] D. W. Silvia, B. D. Smith, J. M. Shull, *Astrophys. J.* **715**, 1575 (2010). DOI: 1001.4793.
- [17] F. Kirchschrager, F. D. Schmidt, M. J. Barlow, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **489**, 4465 (2019). DOI: 1908.10875.
- [18] S. Veilleux, R. Maiolino, A. D. Bolatto, S. Aalto, *Astron. and Astrophys.* **28**, 2 (2020). DOI: 2002.07765.
- [19] P. F. Hopkins, H. Lee, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **456**, 4174 (2016). DOI: 1510.02477.

- [20] R. Monceau-Baroux, R. Keppens, *Astron. and Astrophys.* **600**, A134 (2017).
- [21] K. V. Bychkov, S. B. Pikelner, *Soviet Astronomy Letters* **1**, 14 (1975).
- [22] C. F. McKee, L. L. Cowie, *Astrophys. J.* **195**, 715 (1975).
- [23] E. O. Vasiliev, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **431**, 638 (2013). DOI: 1302.0159.
- [24] E. O. Vasiliev, B. B. Nath, Y. Shchekinov, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **446**, 1703 (2015). DOI: 1401.5070.
- [25] E. O. Vasiliev, Y. A. Shchekinov, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **527**, 8755 (2024). DOI: 2308.03106.
- [26] C. Klingenberg, W. Schmidt, K. Waagan, *Journal of Computational Physics* **227**, 12 (2007). DOI: 0711.4141.
- [27] E. O. Vasiliev, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **414**, 3145 (2011). DOI: 1009.1026.
- [28] A. Youdin, A. Johansen, *Astrophys. J.* **662**, 613 (2007). DOI: astro-ph/0702625.
- [29] A. Mignone, M. Flock, B. Vaidya, *Astrophys. J. Suppl.* **244**, 38 (2019). DOI: 1908.10793.
- [30] E. R. Moseley, R. Teyssier, B. T. Draine, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **518**, 2825 (2023). DOI: 2204.07681.
- [31] P. S. Epstein, *Physical Review* **23**, 710 (1924).
- [32] M. J. Baines, I. P. Williams, A. S. Asebiomo, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **130**, 63 (1965).
- [33] B. T. Draine, E. E. Salpeter, *Astrophys. J.* **231**, 77 (1979).
- [34] B. T. Draine, E. E. Salpeter, *Astrophys. J.* **231**, 438 (1979).
- [35] M. A. de Avillez, M.-M. Mac Low, *Astrophys. J.* **581**, 1047 (2002). DOI: astro-ph/0208441.
- [36] S. Dedikov, E. Vasiliev, *Universe* **10**, 155 (2024). DOI: 2404.00381.
- [37] R. J. Farber, M. Gronke, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **510**, 551 (2022). DOI: 2107.07991.
- [38] J. S. Mathis, W. Rumpl, K. H. Nordsieck, *Astrophys. J.* **217**, 425 (1977).
- [39] B. Ménard, R. Scranton, M. Fukugita, G. Richards, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **405**, 1025 (2010). DOI: 0902.4240.
- [40] Y. A. Shchekinov, B. Nath, *Astrophys. and Space Sci.* **335**, 207 (2011).

Поступила в редакцию 20 июля 2024 г.

После доработки 26 октября 2024 г.

Принята к публикации 27 октября 2024 г.