

УДК 524.6-1/-7,524.6-36-54

ВЫМЕТАНИЕ ПЫЛИ ДАВЛЕНИЕМ ИЗЛУЧЕНИЯ ЗВЕЗД И ОСОБЕННОСТИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ДИСКОВЫХ ГАЛАКТИК

© 2021 г. Е. Э. Сивкова¹, *, Д. З. Вибе¹, Б. М. Шустов¹

¹ Институт астрономии РАН, Москва, Россия

*E-mail: sivkova@gmail.com

Поступила в редакцию 11.10.2020 г.

После доработки 30.12.2020 г.

Принята к публикации 30.12.2020 г.

Рассмотрено движение пылевых частиц различных размеров и химического состава под действием давления излучения звезд в окрестностях Млечного Пути. При интегрировании уравнений движения помимо давления излучения учитывались гравитационное притяжение компонентов Галактики и сопротивление газа. Показано, что эффективнее всего из галактического диска выметаются углистые частицы средних размеров (~0.01 мкм). Более мелкие пылинки выметаются в существенно меньших количествах или не выметаются совсем. В работе рассмотрено также движение силикатных пылевых частиц, в том числе имеющих пористую структуру. Показано, что силикатные частицы значительно меньше подвержены действию давления излучения, а учет пористости не оказывает существенного влияния на результат моделирования их движения. Суммарный темп потери пыли Галактикой оказывается большим — примерно $0.03 M_{\odot}/\text{год}$, что сопоставимо с другими механизмами выброса тяжелых элементов в окологалактическое пространство. Обсуждается возможная роль выметания пыли из Галактики в формировании радиального градиента металличности, а также перспективы обнаружения протяженных пылевых структур у эллиптических галактик.

DOI: 10.31857/S0004629921050066

1. ВВЕДЕНИЕ

Космическая пыль — один из основных компонентов межзвездной среды как в нашей Галактике, так и в других подобных галактиках. Основная масса пыли сосредоточена в галактических дисках, при этом наблюдения показывают, что толщина пылевого диска, как правило, меньше толщины звездного диска, тогда как в радиальном направлении пыль наблюдается даже на больших расстояниях, чем звезды [1–4]. Однако значительные количества пыли часто наблюдаются и на больших расстояниях от плоскости симметрии дисковых галактик, в галактических гало. На это указывают, например, вертикальные темные полосы (dark lanes), отходящие от галактических дисков [5–8]. Одной из наиболее изученных в этом отношении является галактика NGC 891, видимая с ребра. Авторы серии работ Хоук и Сэвидж [6, 9] обнаружили в ней многочисленные темные пылевые волокна, простирающиеся до высот более 2 кпк. Масса индивидуальных волокон в окрестностях диска галактики NGC 891 составляет $\sim 10^5 M_{\odot}$, тогда как общая масса внеплоскостного (extraplanar) газа составляет $\sim 10^8 M_{\odot}$ — 2% от полной массы межзвездного ве-

щества в этой галактике. В работе [10] анализ пылевых волокон в NGC 891 по наблюдениям на Космическом телескопе им. Хаббла показал, что они тянутся в направлении, перпендикулярном диску, до высот порядка 1.5 кпк, указывая на связь формирования пылевых структур с динамическими явлениями в перпендикулярном диску направлении.

Подобные же результаты по наблюдениям поглощения в оптическом диапазоне были получены и для других спиральных галактик [7, 11]. Если обособленные пылевые структуры обнаруживаются на высотах порядка нескольких кпк, то признаки диффузного покраснения, вызванного пылью, иногда наблюдаются на расстояниях от десятков кпк до нескольких Мпк [12, 13].

Еще одним проявлением наличия пыли на больших галактических высотах являются так называемые ультрафиолетовые (УФ) гало. В работах [14, 15] сообщалось об обнаружении в галактике NGC 891 внеплоскостного диффузного УФ излучения. Свойства этого излучения указывают на наличие “толстого” пылевого диска (более протяженного в вертикальном направлении, чем обычный тонкий диск), пылинки в котором рассеивают УФ излучение звезд диска галактики. В работе

[16] сообщалось об аналогичных протяженных областях диффузного УФ излучения, наблюдаемых вокруг многих галактик, видимых почти с ребра, на расстояниях до 20 кпк. Свойства этого излучения также согласуются с наличием внеплоскостной пыли, рассеивающей УФ излучение звезд галактического диска.

Прямые свидетельства наличия пыли на больших галактических высотах можно получить из наблюдений в ИК диапазоне. Ирвин и Мадден [17] при помощи обсерватории ISO обнаружили излучение полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) в вытянутых структурах, простирающихся на несколько кпк в гало галактики NGC 5907. Аналогичные структуры были найдены также в гало галактики NGC 5529 [18]. Наблюдения галактики NGC 5775 на телескопе “Spitzer” показывают, что в этой галактике нитевидное излучение частиц ПАУ на длине волны 8 мкм прослеживается до $z \sim 5$ кпк [19]. Косвенным признаком наличия ПАУ в гало нашей Галактики могут являться наблюдения абсорбционной особенности на длине волны 6565 \AA [20]. Наблюдения пыли в гало NGC 891 при помощи космического телескопа “Herschel” представлены в работе [21], где показано, что шкала высот пылевого диска, оцененная по наблюдениям в диапазоне от 70 до 250 мкм, составляет примерно 1.5 кпк. Наблюдения, полученные космической обсерваторией “Planck”, показали присутствие пылевой эмиссии в направлении на Северный Полярный Шпур в нашей Галактике [22].

В целом можно считать доказанным, что пыль является типичным компонентом гало дисковых галактик, который наблюдается на расстояниях как минимум нескольких кпк и по массе может составлять несколько процентов от полной массы пыли в галактике. Интерес к этой внеплоскостной пыли связан как с изучением свойств источников и динамики пылинок в галактиках, так и с возможными помехами, которые могут вноситься ею в различные наблюдения [23]. Между тем, до сих пор нет внятного ответа на вопрос, каков механизм или механизмы выноса пыли на большие высоты и насколько свойства пыли в галактических гало отличаются от свойств пыли в тонких дисках. Оценки типичных размеров пылинок в окологалактической среде дают различные результаты. Например, авторами работы [24] показано, что радиус углистых пылинок в галактических гало заключен в диапазоне $\approx 0.01\text{--}0.03$ мкм, то есть примерно в том же диапазоне, что и в межзвездной среде нашей Галактики. С другой стороны, имеются свидетельства того, что пылинки в гало дисковых галактик по своим свойствам могут отличаться от пыли в диске [19, 25].

Для интерпретации обсуждаемых наблюдений необходимы модели, в которых описывался бы

генезис внеплоскостной пыли. Поскольку для образования пыли необходимы низкая температура и высокая плотность газа, в котором образуются пылинки, а за пределами галактик эти условия не встречаются, логично считать, что пыль образуется в галактиках и выносятся в окологалактическое пространство. Наиболее очевидным механизмом выметания пыли из галактик является движение пыли под действием галактического ветра. Такой механизм действительно эффективен в галактиках с активным звездообразованием и (или) активными ядрами [26–29]. Однако внеплоскостная пыль наблюдается и в галактиках с невысоким темпом звездообразования [17, 18]. Неединственность ветра как механизма выноса пыли из галактики указывает также возможное различное пространственное распределение пыли и газа в галактических гало [30].

В качестве альтернативного механизма в литературе широко рассматривается выметание пыли давлением излучения звезд. Впервые эта идея была высказана несколько десятилетий назад [31–33], и моделирование выметания пыли из дисковой галактики проводилось неоднократно [34–38]. В этих работах авторы, как правило, приходят к выводу, что выдувание пылинок давлением излучения звезд характерно для большинства дисковых галактик и может приводить к появлению наблюдаемой внеплоскостной пыли с одновременным выносом значительного количества тяжелых элементов из галактических дисков.

Пылинки в межзвездной среде не остаются неизменными (см., например, [39]). Перемещаясь в межзвездной среде (МЗС), они попадают в области с различными свойствами и претерпевают изменения. Поэтому при моделировании эволюции пыли нужно учитывать и динамические факторы, и кинетику пылевых частиц. Одна из первых таких попыток была сделана в [39]. За прошедшие четверть века наши знания о космической пыли существенно углубились и появилась возможность скорректировать и заметно уточнить представления об эволюции пылевой компоненты дисковых галактик. В этой работе мы развиваем модель движения пыли под действием давления излучения звезд, представленную в работе [40]. Модель усовершенствована для проведения трехмерных расчетов движения пылевых частиц различных размеров, химического состава и для различных начальных координат с учетом давления излучения звезд, гравитации и сопротивления межзвездного газа. Также в модель включено влияние темного гало. В разделе II описывается модель выметания пыли из Галактики, а также приводятся используемые предположения о свойствах и источниках пылевых частиц. В разделе III описаны основные результаты вычислений, характеризующие движение пыли в окологалактическом пространстве. В разделе IV обсуждают-

ся астрофизические приложения полученных результатов.

2. МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ПЫЛИ В ГАЛАКТИКЕ

В предлагаемой модели динамика пыли в галактике определяется тремя силами: силой давления излучения, силой гравитационного притяжения и силой сопротивления межзвездного газа. Для вычисления сил давления излучения и гравитации необходимы модель распределения поля излучения и гравитационного потенциала в Галактике и модель свойств пылинок. Для вычисления силы сопротивления газа необходимо также задать свойства среды, через которую движется пыль.

2.1. Свойства пылевых частиц

В этой работе нами рассмотрены пылевые частицы трех видов: графитовые, силикатные и ПАУ. Они отличаются друг от друга плотностью вещества и оптическими свойствами.

Взаимодействие пылинки с излучением определяется процессами поглощения, рассеяния и поляризации, которые характеризуются соответствующими сечениями. Эффективность передачи импульса излучения частотой ν пылинке описывается фактором эффективности давления излучения

$$Q_{pr}(\nu) = Q_{abs}(\nu) + Q_{sca}(\nu)(1 - \langle \cos \theta(\nu) \rangle), \quad (1)$$

где $Q_{abs}(\nu)$ и $Q_{sca}(\nu)$ – безразмерные коэффициенты, представляющие собой отношения сечений поглощения и рассеяния к геометрическому сечению пылинки, а величина $\langle \cos \theta(\nu) \rangle$ характеризует ее рассеивающие свойства. Значения $Q_{abs}(\nu)$, $Q_{sca}(\nu)$ и $\langle \cos \theta(\nu) \rangle$ для графитовых и силикатных пылинок брались нами из работы [41], где они вычислены в широком диапазоне размеров и частот. Следует отметить, что о структуре и химическом составе так называемых углистых пылинок имеются разные представления. В дальнейшем мы называем их графитовыми с точки зрения принятых оптических свойств и плотности вещества. Оптические свойства ПАУ взяты из работы [42]¹.

Вычисляя силу давления излучения, мы использовали значения Q_{pr} , рассчитанные по формуле (1) и усредненные по планковскому распределению энергии в спектре для принятой температуры источника излучения (см. ниже).

Оптические свойства рассматриваемых пылинок проиллюстрированы на рис. 1–2. На рис. 1а показаны зависимости фактора эффективности

давления излучения от длины волны для графитовых пылинок трех различных размеров и ПАУ двух размеров. На рис. 1б показаны аналогичные зависимости для силикатных пылинок различных размеров. Здесь и далее пунктирными линиями показаны пылинки с радиусом 10 Å, штриховыми линиями показаны пылинки с радиусом 100 Å, сплошными линиями – 1000 Å. Цвет на графиках обозначает химический состав (структуру) пылинки: синий – графитовая, красный – ПАУ, зеленый – силикатная, черный – пористая силикатная пыль. Из графиков видно, что значение $Q_{pr}(\nu)$ для крупных пылинок на порядок превышает значение $Q_{pr}(\nu)$ для пылинок средних размеров, которое, в свою очередь, на порядок больше значения для мелких пылевых частиц. Видно также, что значения Q_{pr} для углистых пылинок с радиусом 100 Å и более практически не зависят от предположения об их структуре (ПАУ или графит). Для мелких пылинок значение $Q_{pr}(\nu)$ на длинах волн $10^{-4} - 10^{-1}$ см заметно зависит от материала пылинки, однако оно существенно ниже, чем $Q_{pr}(\nu)$ для этих же частиц в оптическом диапазоне.

Силикатные пылинки также могут иметь различную структуру. В частности, не исключено, что в межзвездной среде они являются пористыми [43], т.е. их средняя плотность может быть меньше, чем у компактных частиц. Масса пылинки данного размера при этом уменьшается, следовательно, и притяжение со стороны Галактики будет иметь меньшее значение, что может способствовать выметанию пылинки в околосгалактическое пространство. Однако оптические свойства пористых частиц также будут иными. На рис. 1б показаны зависимости фактора эффективности давления излучения от длины волны для пористых и компактных силикатных пылинок трех размеров. Для расчета величины $Q_{pr}(\nu)$ пористых пылинок использовалась модель [44]. Из рис. 1б видно, что при учете пористости пылинки значение $Q_{pr}(\nu)$ несколько снижается, однако и в этом случае учет структуры не будет иметь критического характера, поскольку значение $Q_{pr}(\nu)$ уменьшается приблизительно в том же соотношении, что и масса пылинки.

Интегральная сила давления излучения определяется не только фактором $Q_{pr}(\nu)$, но и формой спектра излучения. Чтобы проиллюстрировать эту зависимость, на рис. 2 мы показываем, как значение фактора эффективности давления излучения, проинтегрированного по длинам волн, зависит от температуры T планковского спектра. Из этих графиков видно, что значения $Q_{pr}(T)$ для силикатных пылинок ниже, чем для углистых ча-

¹ <https://www.astro.princeton.edu/draine/dust/dust.diel.html>

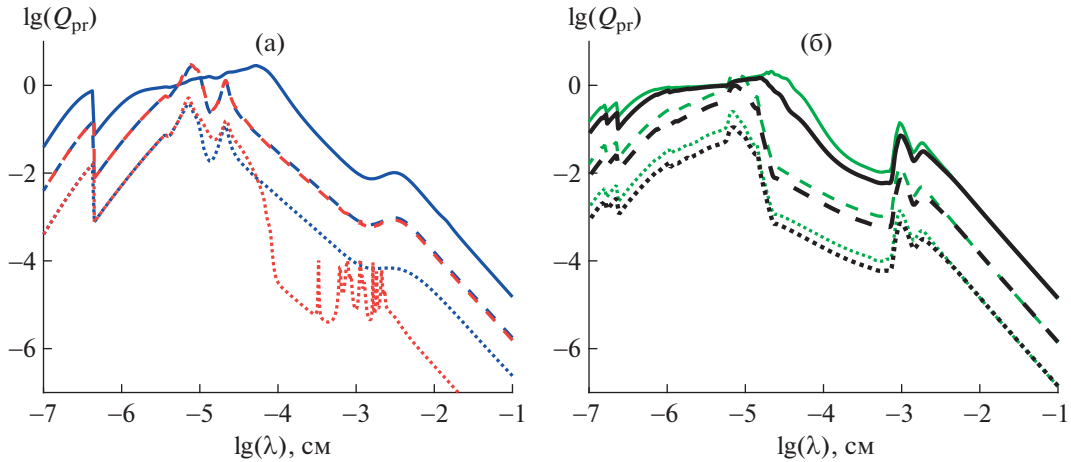


Рис. 1. Зависимость фактора эффективности давления излучения $Q_{pr}(v)$ от длины волны для графитовых (а) и силикатных (б) пылинок. Пунктирными линиями показаны данные для частиц размером 10 \AA , штриховыми — для частиц размером 100 \AA , сплошными — для частиц размером 1000 \AA (0.1 мкм). На панели (а) показаны зависимости для графитовых пылинок (синие кривые) и для частиц ПАУ (красные кривые). На панели (б) показаны зависимости для силикатных пылинок. Зеленым цветом показаны зависимости для компактных пылинок, черным — с пористостью 50%.

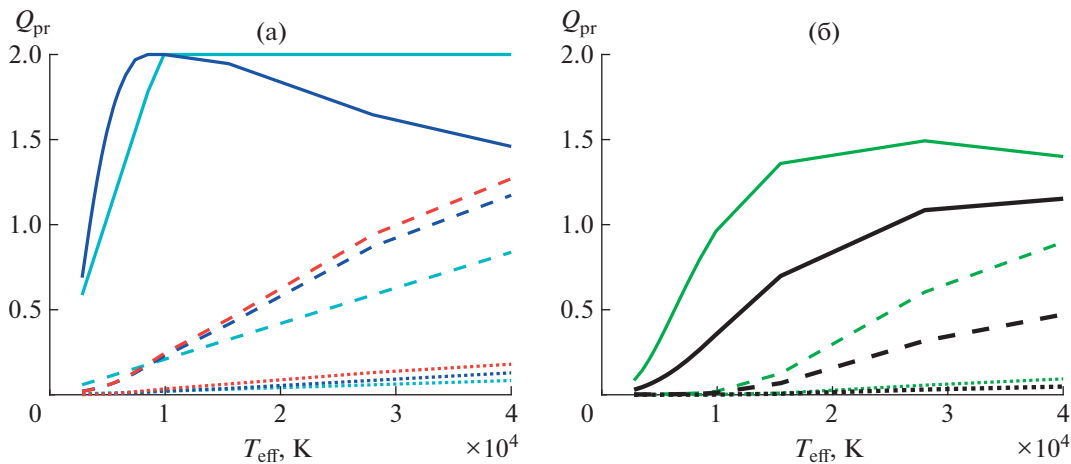


Рис. 2. Зависимость интегрального фактора эффективности давления излучения Q_{pr} от эффективной температуры источника излучения для углистых (а) и силикатных (б) пылинок. Обозначения те же, что на рис. 1; на рисунке а) голубым цветом показаны зависимости фактора эффективности давления излучения от температуры излучения в приближении рэлеевского рассеяния для углистых пылинок трех размеров: пунктиром — 10 \AA , штриховыми линиями — 100 \AA , сплошными линиями — 1000 \AA (0.1 мкм).

стиц тех же размеров. На рис. 2б зеленым цветом показаны значения $Q_{pr}(T)$ для компактных пылинок, черным — для пылинок с пористостью 50%. Здесь также видно, что с уменьшением средней плотности за счет учета пористой структуры силикатов примерно в том же отношении снижается и значение $Q_{pr}(T)$. Таким образом, мы снова получаем подтверждение того, что в контексте решения уравнения движения частицы учет пористости силикатной пыли, вероятно, не имеет существенного значения.

На рис. 2а голубым цветом также показаны зависимости фактора эффективности давления излучения от температуры излучения в приближении рэлеевского рассеяния, т.е. $Q_{pr} = 2\pi a/\lambda$ (это приближение использовалось в работе [40]). Видно, что такой приближенный подход к оценке Q_{pr} приводит к ее завышению для крупных пылинок (радиусом 0.1 мкм) и занижению для пылинок меньших размеров. Последствия этих расхождений будут обсуждаться далее.

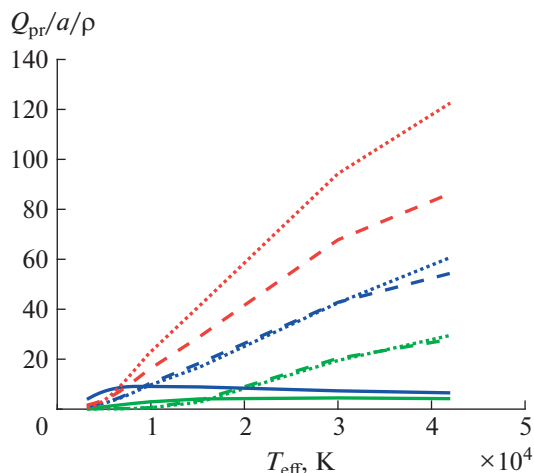


Рис. 3. Отношение $Q_{pr}/a/\rho$, где a – радиус пылинки в мкм, ρ – плотность в $г/см^3$; пунктирная линия – 0.001 мкм, штриховая линия – 0.01 мкм, сплошная линия – 0.1 мкм. Синим цветом показаны соотношения для графитовых пылинок, красным – ПАУ, зеленым – силикатных.

Для пылинки данного размера и состава (плотности) можно получить (с точностью до постоянного множителя) оценку отношения ускорений, вызываемых лучистым давлением и силой гравитации. Это отношение пропорционально величине $Q_{pr}/a/\rho$. На рис. 3 показаны зависимости отношения $Q_{pr}/a/\rho$ от эффективной температуры. Мы считали, что графитовые пылинки имеют плотность $2.2 г/см^3$, ПАУ – $1.5 г/см^3$, силикатные пылинки – $3.3 г/см^3$. Видно, что наименее эффективно должны выметаться из галактического диска силикатные частицы, а наиболее подвержены влиянию давления излучения частицы ПАУ. Значения рассматриваемого отношения невысоки для крупных графитовых частиц при высоких T_{eff} , однако при низких T_{eff} значения $Q_{pr}/a/\rho$ для этих пылинок напротив лежат выше, чем для пылинок всех остальных типов. В дисковых галактиках такое соотношение вряд ли реализуется, но может встречаться в системах с более старым звездным населением.

2.2. Силы, действующие на пыль в окрестностях Галактики

В этом подразделе мы рассмотрим основные факторы, определяющие динамику пыли в Галактике: давление излучения, гравитацию и сопротивление межзвездного газа. Для расчета сил давления излучения и гравитации мы использовали данные о детальном распределении звезд в Галактике (см. далее). Влияние галактического ветра в данной работе не рассматривалось. Поскольку в

данной работе пылинки считаются электрически нейтральными, влияние магнитного поля на их движение также не учитывалось (см. обсуждение в разделе 4), хотя необходимая инфраструктура в модели предусмотрена.

2.2.1. Сила давления излучения. Сила давления излучения, действующая на пылинку со стороны точечного источника со светимостью L на расстоянии r от него, равна

$$f_r = \frac{L\sigma_d}{4\pi cr^2} Q_{pr},$$

где c – скорость света, $\sigma_d = \pi a^2$ – поперечное сечение пылинки радиуса a .

Чтобы детально учесть вклад в давление излучения различных звездных населений Галактики, мы используем функцию светимости, разделенную на m групп (в данной работе $m = 21$), каждая из которых характеризуется светимостью L_i , эффективной температурой T_i и собственными параметрами распределения в Галактике. Мы считаем, что объемная плотность звезд i -й группы ϕ_i в точке с цилиндрическими координатами (r, z) определяется выражением

$$\phi_i(z, r) = \phi_0^i \exp(-|z|/\beta_i) \exp(-r/r_h),$$

где ϕ_0^i – количество звезд i -й группы на единицу объема в центре Галактики, β_i – экспоненциальная шкала высот, r_h – радиальная шкала, которая для всех объектов выбрана равной 5 кпк. Разбиение звезд на группы и выбор параметров каждой группы проводились на основе данных [45], которые также сравнивались и корректировались в соответствии с данными [46]. Функция светимости нормировалась таким образом, чтобы звездная масса диска Галактики составляла $\sim 6 \times 10^{10} M_\odot$ [47]. Полная светимость при этом составляет $\sim 2.8 \times 10^{10} L_\odot$ в полосе V. Для контроля мы сравнивали полученную функцию светимости с более поздними результатами [48, 49] и не нашли значимых отличий.

Со стороны элемента объема $d\tau$ в точке с радиус-вектором \vec{r} (т.е. в точке с цилиндрическими координатами (r, z)) на пылинку, расположенную в точке с радиус-вектором \vec{r}_0 , действует сила давления излучения

$$d\vec{F}_{pr} = \sum_i \frac{L_i \sigma_d}{4\pi c} Q_{pr} \phi_i \times \exp(-|z|/\beta_i) \exp(-r/r_h) \frac{\vec{r}_0 - \vec{r}}{|\vec{r}_0 - \vec{r}|^3} d\tau.$$

Интегрируя это выражение по всему объему Галактики, получим формулу для силы давления излучения, действующей на пылинку:

$$\vec{F}_r = \int_{\tau} \sum_i \frac{L_i \sigma_d}{4\pi c} Q_{pr} \phi_i \exp(-|z|/\beta_i) \times \exp(-r/r_h) \frac{\vec{r}_0 - \vec{r}}{|\vec{r}_0 - \vec{r}|^3} d\tau.$$

2.2.2. Сила гравитационного притяжения. Пылинка, расположенная в точке с радиус-вектором \vec{r}_0 , притягивается элементарным объемом $d\tau$ с радиус-вектором \vec{r} с силой

$$d\vec{F}_g = \sum_i GM_i m_d \phi_i \exp(-|z|/\beta_i) \times \exp(-r/r_h) \frac{\vec{r}_0 - \vec{r}}{|\vec{r}_0 - \vec{r}|^3} d\tau.$$

Интегрируя это выражение по всему объему, получим силу притяжения, действующую на пылинку со стороны Галактики:

$$\vec{F}_g = \int_{\tau} GM_i m_d \phi_i \exp(-|z|/\beta_i) \times \exp(-r/r_h) \frac{\vec{r}_0 - \vec{r}}{|\vec{r}_0 - \vec{r}|^3} d\tau,$$

где G – гравитационная постоянная, m_d – масса пылинки.

Кроме того, отдельно учитывалось влияние гало темной материи. Масса гало в пределах радиуса R рассчитывалась из профиля Наварро–Френка–Уайта [50] плотности темной материи [51]:

$$M(R) = 4\pi\rho_c \delta_0 R_s^3 \left[\ln(1 + R/R_s) - \frac{R/R_s}{1 + R/R_s} \right],$$

где

$$\delta_0 = \frac{200}{3} \frac{C^3}{\ln(1 + C) - C/(1 + C)},$$

$$R = \sqrt{r^2 + z^2}.$$

Значение параметра C было принято равным 10, значение масштабного параметра R_s – 16 кпк [52]. Значение безразмерной постоянной Хаббла $h = H/(100 \text{ (км/с)}/\text{Мпк})$ для расчета критической плотности было принято равным 0.67.

Отсюда вычислялись компоненты силы, с которой темное гало действует на пылинку вдоль галактоцентрического радиуса и высоты:

$$F_{\text{halo},r} = -\frac{rGm_d M(R)}{(r^2 + z^2)^{3/2}}, \quad F_{\text{halo},z} = -\frac{zGm_d M(R)}{(r^2 + z^2)^{3/2}}.$$

Полное распределение массы барионного и темного вещества в Галактике использовалось для

вычисления азимутального компонента кривой вращения $V_R(r, z)$.

2.2.3. Сила сопротивления межзвездного газа. Торможение пылинок окружающим газом играет важную роль в их движении даже при значениях плотности газа, соответствующих межгалактическому пространству. В силу торможения вносят вклад как прямые, так и кулоновские столкновения с ионами и электронами. Подробно этот процесс рассмотрен в работе [53]. Сила торможения пылинки с зарядом z_d при ее движении сквозь частично ионизованный водород равна

$$F_{\text{drag}} = 2\pi a^2 k T n [G_0(s) + \varphi^2 \ln(\Lambda) G_2(s)],$$

где

$$s = \left[\frac{m_H v^2}{2kT} \right]^{1/2},$$

$$G_0(s) \approx \frac{8s}{3\sqrt{\pi}} \left[1 + \frac{9\pi}{64} s^2 \right]^{1/2},$$

$$\varphi = \frac{z_d e^2}{akT},$$

$$\Lambda = \frac{3}{2ae\varphi} \left[\frac{kT}{\pi n_e} \right]^{1/2},$$

где n – концентрация водорода, e – заряд электрона, n_e – концентрация электронов. Хотя в общей формулировке модели кулоновское торможение учитывается, в данной работе зарядом пылинки мы пренебрегаем.

Для оценки распределения плотности газа, сквозь который движется пылинка, использовались данные из работы [54]:

$$n(r, z) = n_0 \exp(-r/r_n) \exp(-z/z_n),$$

где $n_0 = 0.9 \text{ см}^{-3}$, $r_n = 3150 \text{ пк}$. Вертикальная шкала высот дается выражением

$$z_n = h_0 \exp((r - R_\odot)/r_n),$$

где $h_0 = 150 \text{ пк}$. Газ вращается вокруг оси симметрии Галактики с неизменной скоростью $V_{\text{gas}}^\varphi = V_R(r, z)$. Компоненты скорости газа V_{gas}^r и V_{gas}^z всегда равны нулю.

2.3. Уравнение движения пылинки

С учетом рассмотренных сил уравнение движения пылинки записывается следующим образом:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F}_r + \vec{F}_g - F_{\text{drag}} \frac{\vec{v}}{v} + \vec{F}_{\text{halo}},$$

где v – скорость пылинки. Чтобы оценить способность пылинок покинуть диск и выйти в гало

за время существования Галактики, мы интегрировали уравнение движения до 10 млрд. лет. Частицы начинают движение с различных начальных координат и считаются покинувшими галактический диск, если за время 10 млрд. лет они достигают высоты 200 пк. Хотя все силы, учитываемые в данной работе, не имеют азимутальной зависимости, уравнение движения интегрировалось в трехмерной цилиндрической системе координат для учета вращения Галактики. Эволюция параметров Галактики со временем не учитывалась.

В начальный момент времени компоненты скорости пылинки v_r и v_z полагались равными нулю. Компонент скорости v_ϕ задавался в соответствии с кривой вращения $V_R(r, z)$. В ходе расчета все три компонента скорости пылинки могут меняться.

2.4. Источники пыли

Главными источниками пыли в Галактике являются звезды на поздних стадиях эволюции и оболочки сверхновых звезд (см. [55] и ссылки в этой работе). На их долю приходится ~90% всей пыли, образующейся в Галактике. Основные составляющие пыли, производимые этими источниками, — графитовые и силикатные пылинки [56]. Согласно данным [57] основную часть всей массы межзвездной пыли составляют мелкие частицы, в том числе ПАУ.

В данной работе информация об образовании пыли является основным источником неопределенностей. Темпы потери массы различными типами звезд по данным разных авторов расходятся более чем на порядок [58, 59]. Также неоднозначна оценка доли каждого вида источников в производстве пыли [60]. До сих пор ведутся дискуссии о возможном вкладе молекулярных облаков в общий баланс производства пыли [61], однако пылью, находящейся (формирующейся) в молекулярных облаках, при оценке темпа выметания пыли за пределы Галактики в любом случае можно пренебречь. Оценки показывают, что при концентрациях вещества в темных холодных облаках более 10 см^{-3} пыль заморожена в облако и не принимает участия в крупномасштабном движении, связанном с давлением излучения звезд [62]. Поэтому в данной работе за шкалу высот для основных источников пыли принята шкала высот для проэволюционировавших звезд, составляющая примерно 350 пк [63, 64].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Основными целями данной работы являются исследование динамической эволюции графито-

вых и силикатных пылинок и оценка общего темпа потери пыли из галактического диска. Мы рассмотрели три представительных значения радиуса частиц: 0.001 мкм (ПАУ и очень мелкие пылинки, very small grains, VSG), 0.01 мкм (промежуточное значение радиуса), 0.1 мкм (“классические” пылинки). Доля пыли каждого размера была рассчитана в соответствии с распределением [57]. Согласно этой модели мелкая пыль (включая ПАУ, представляющие собой промежуточное звено между пылинками и макромолекулами) составляет примерно 80% всей массы пыли, а средняя и крупная — примерно по 10%. Исходя из этих предположений, особенно важным представляется проследить движение именно мелких частиц, которые должны вносить основной вклад в выметание твердого вещества из галактического диска. Для них мы рассматривали два варианта оптических свойств: свойства ПАУ и свойства графита. Как будет показано далее, для оценок потери пылевой массы выбор конкретного вида частиц не имеет существенного значения.

3.1. Результаты расчетов без учета вращения Галактики

В этом подразделе мы представляем результаты расчетов без учета вращения для демонстрации различий в движении пылинок с различными свойствами (компактных и пористых силикатных и углистых со свойствами графита и ПАУ). На рис. 4 показаны траектории движения компактных силикатных и графитовых пылинок для различных начальных положений по галактоцентрическому радиусу (0, 5, 10, 15 кпк) и двух начальных высот — 10 и 100 пк. Видно, что частицам различного химического состава свойственен разный характер движения. Силикаты (линии зеленого цвета), как можно ожидать из результатов, показанных на рис. 3, меняют свое положение вдоль оси z лишь незначительно. Наиболее заметно над плоскостью диска поднимаются пылинки средних размеров (штриховые линии). Мелкие силикатные частицы пролетают столь малое расстояние, что в области построения графика на рис. 4 их движение вовсе не прослеживается, поскольку для них соотношение $Q_{\text{pr}}/a/\rho$ для большинства типов звезд оказывается ниже, чем для пылинок средних размеров.

Средние и крупные графитовые пылинки (штриховые и сплошные синие линии), напротив, поднимаются на значительную высоту вне зависимости от начального положения. Исключение составляют крупные пылинки, находящиеся в центре Галактики ниже высоты $z = 10$ пк: такие частицы движутся в сторону плоскости диска (“вниз”). Мелкие графитовые пылинки эффективно выметаются из Галактики вблизи ее цен-

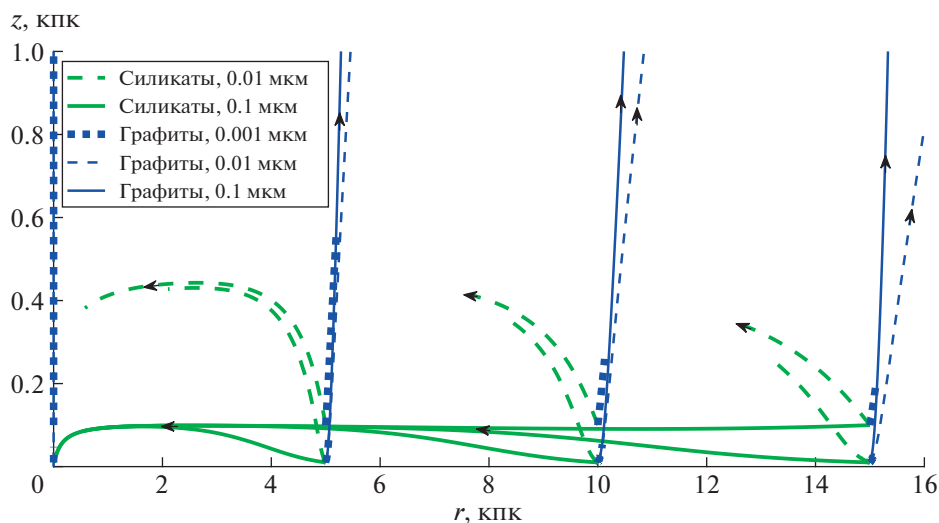


Рис. 4. Траектории движения пылинок без учета вращения Галактики: пунктирная линия – 0.001 мкм, штриховая линия – 0.01 мкм, сплошная линия – 0.1 мкм. Синим цветом показаны траектории графитовых пылинок, зеленым – компактных силикатных.

тра; с удалением от центра эффективность выметания снижается.

На рис. 5 сравниваются треки компактных и пористых силикатных пылинок. Видно, что компактные пылинки движутся несколько быстрее пористых, однако качественных отличий в характере движения нет. Это подтверждает сделанный ранее вывод о том, что при оценке общего темпа выметания пыли из Галактики учет возможной пористости силикатных частиц не играет существенной роли.

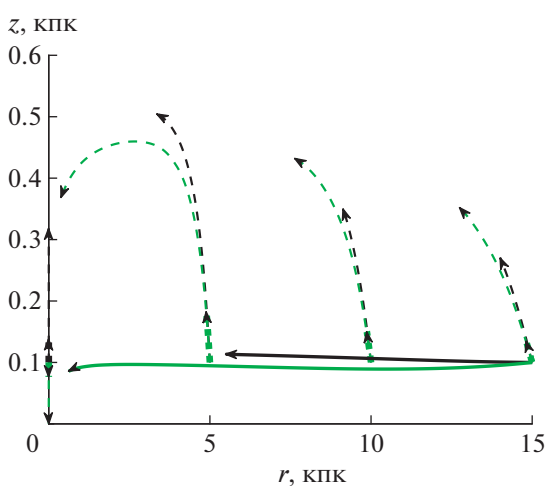


Рис. 5. Примеры треков силикатных пылинок: пунктирная линия – 0.001 мкм, штриховая линия – 0.01 мкм, сплошная линия – 0.1 мкм. Зеленым цветом показаны траектории движения компактных пылинок, черным – пористых.

При рассмотрении движения углистых частиц выбор оптических свойств оказывается более критичным. На рис. 6 показаны траектории движения углистых пылинок для одинаковой начальной высоты (100 пк), различных начальных положений по радиусу (0, 5, 10, 15 кпк) и с различными оптическими свойствами (графит или ПАУ). Поскольку пылинки разного типа имеют разную плотность (плотность ПАУ ниже, чем плотность графитовых частиц, а их плотность, в свою очередь, ниже силикатных), пылинки одинакового размера, но разного химического состава подвергаются разному воздействию гравитации, и поэтому их траектории заметно отличаются. Пылинки среднего размера с оптическими свойствами графита, поднимаясь над галактическим диском, заметно смещаются к оси симметрии Галактики (рис. 6а). Поскольку сила гравитации пропорциональна массе пылинки, еще более сильное воздействие барионной и темной материи испытывают крупные частицы. Для крупных графитовых пылинок появляется предельное значение высоты z , которой они могут достичь. Мелкие графитовые частицы преодолевают значительно меньшее расстояние, чем более крупные за то же самое время, т.е. их выметание значительно менее эффективно. По этой причине их траектории в области построения графика практически неразличимы.

На рис. 6б показаны треки мелких и средних частиц с оптическими свойствами ПАУ. Их движение существенно отличается от движения графитовых частиц. Даже без учета вращения с удалением от центра Галактики мелкие и средние ча-

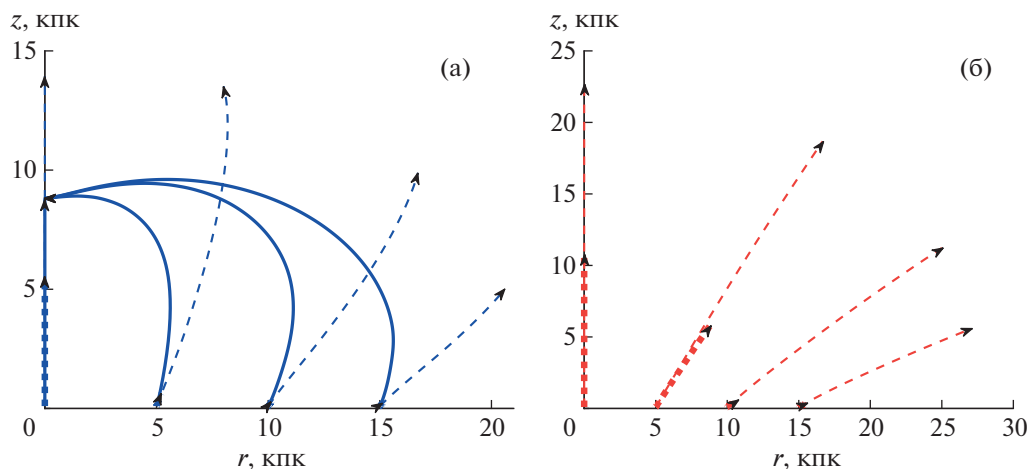


Рис. 6. Примеры треков графитовых пылинок (а) и ПАУ (б): пунктирная линия – 0.001 мкм, штриховая линия – 0.01 мкм, сплошная линия – 0.1 мкм. Синим цветом показаны траектории движения графитовых пылинок, красным – ПАУ.

стицы ПАУ движутся от центра Галактики по наклонным траекториям, т.е. движение вдоль диска Галактики все сильнее преобладает над движением по высоте. Учет вращения усиливает эту тенденцию (см. далее).

Еще одной иллюстрацией важности корректного учета оптических свойств пылинки является сравнение движения углистых пылинок при использовании двух различных подходов к вычислению Q_{pr} : расчет по формуле (1) с последующим усреднением по планковскому распределению энергии в спектре для принятых температур T_{eff} источников излучения и расчет по упрощенной формуле $Q_{pr} = 2\pi a / (0.3 / T_{eff})$. На рис. 7 показано изменение высоты пылинки со временем для различных способов вычисления Q_{pr} и при нулевом начальном положении пылинки по галактоцентрическому радиусу. Упрощенный вариант обозначен голубым цветом. Видно, что использование разных значений фактора эффективности давления излучения заметно меняет картину выметания мелких частиц, которые представляют особенный интерес, поскольку на их долю приходится значительная часть межзвездной пыли. При более физически обоснованных значениях Q_{pr} (формула (1)) мелкие пылинки, как показано на рис. 7а, могут достигать высот вдвое больших, чем при использовании рэлеевского приближения. Кроме того, на рис. 7г видно, что использование рэлеевского приближения для расчета фактора эффективности давления излучения для крупных частиц, напротив, дает завышенное значение достигаемой высоты над плоскостью диска.

3.2. Результаты расчетов с учетом вращения Галактики

Учет вращения в начальной скорости пылинки приводит к тому, что все пылинки независимо от начальных галактоцентрических координат движутся в направлении периферии Галактики (за исключением пылинок, находящихся на оси симметрии Галактики, $r = 0$). На рис. 8 приведены траектории движения пылинок для различных начальных положений по галактоцентрическому радиусу (0, 5, 10, 15 кпк) и двух начальных высот (10 и 100 пк) с учетом вращения.

Сравнение рис. 4 и рис. 8 показывает, что характер движения графитовых пылинок (синие линии) при учете вращения качественно не меняется. Для силикатных пылинок (зеленые линии) наличие начального вращения оказывается критически важным, и его включение в модель приводит к тому, что по радиусу они движутся в противоположную сторону – прочь от центра Галактики. Однако движение силикатных частиц в вертикальном направлении происходит практически одинаково и при учете вращения, и без него.

На рис. 9 отдельно показаны примеры треков углистых пылинок с оптическими свойствами графитов и ПАУ и размерами 0.001, 0.01 и 0.1 мкм (только для графитовых частиц) для различных начальных положений пылинок по галактоцентрическому радиусу (0, 5, 10 и 15 кпк) и одинаковой начальной высоте 100 пк. Из графиков видно, что при ненулевом начальном радиусе пылинки с оптическими свойствами графита достигают определенной максимальной высоты (тем большей, чем ближе к центру Галактики расположена стартовая точка), а затем начинают двигаться

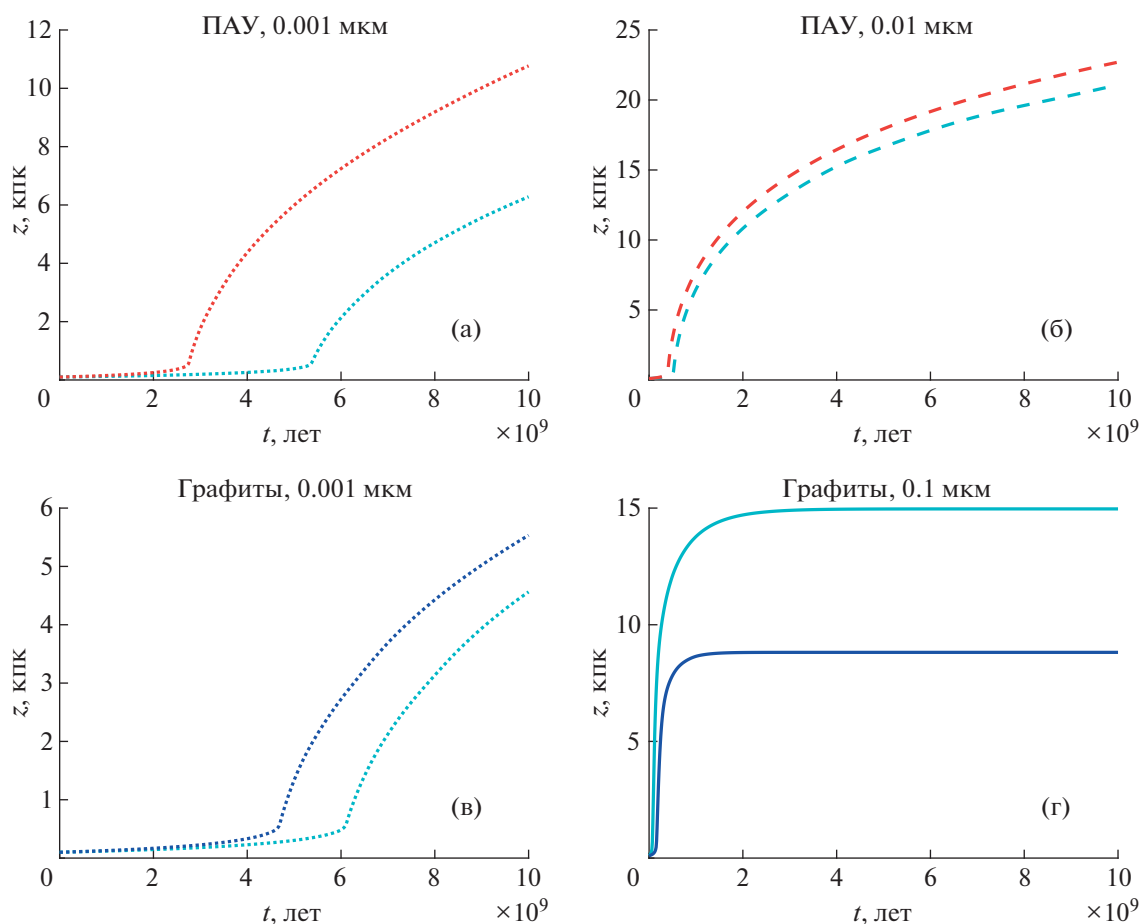


Рис. 7. Зависимость высоты над плоскостью диска от времени для ПАУ (а, б) и графитовых (в, г) пылинок при $r = 0$. Обозначения те же, что на рис. 1; голубым цветом показаны те же зависимости в приближении рэлеевского рассеяния.

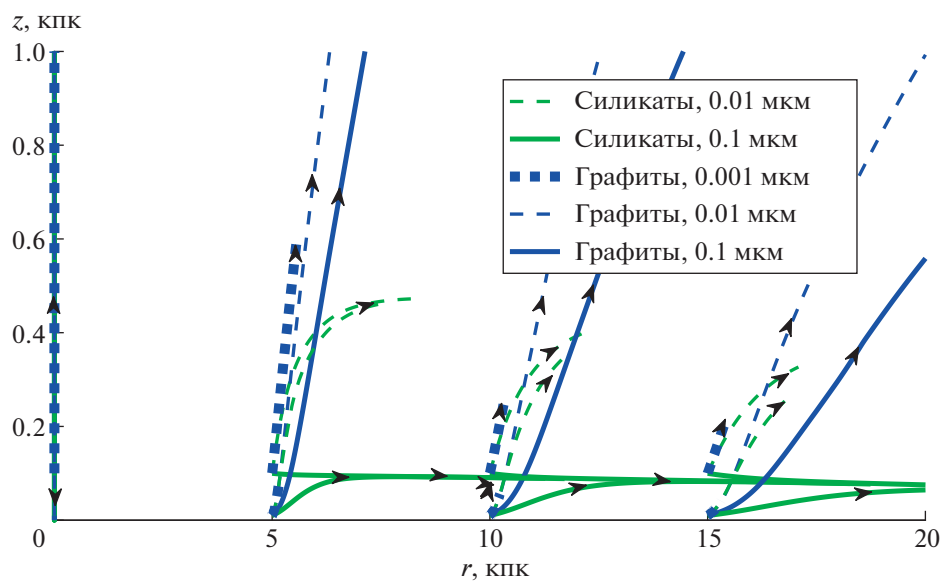


Рис. 8. Траектории движения пылинок; пунктирная линия – 0.001 мкм, штриховая линия – 0.01 мкм, сплошная линия – 0.1 мкм. Синим цветом показаны траектории графитовых пылинок, зеленым – силикатных.

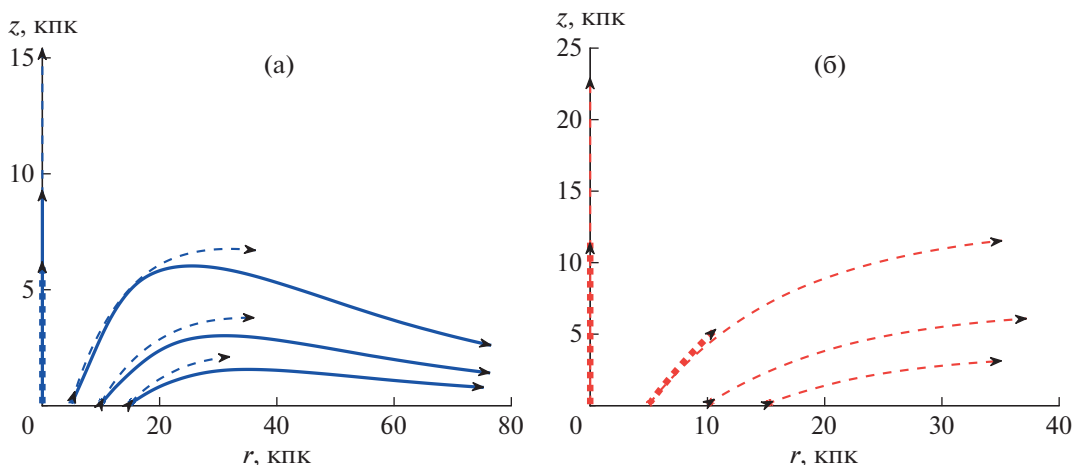


Рис. 9. Примеры треков графитовых пылинок (а) и ПАУ (б): пунктирная линия – 0.001 мкм, штриховая линия – 0.01 мкм, сплошная линия – 0.1 мкм. Синим цветом показаны траектории движения графитовых пылинок, красным – ПАУ.

вниз. Движение частиц с оптическими свойствами ПАУ в вертикальном направлении также постепенно замедляется, хотя максимальная высота в пределах $r < 40$ кпк не достигается. В обоих случаях движение вдоль плоскости диска Галактики сильно преобладает над движением по высоте. Эта особенность может объяснять сглаживание градиентов металличности [65, 66], наблюдающиеся на галактоцентрических расстояниях >10 кпк. Мелкие частицы и в этом случае движутся с существенно меньшими скоростями, т.е. выметаются менее эффективно.

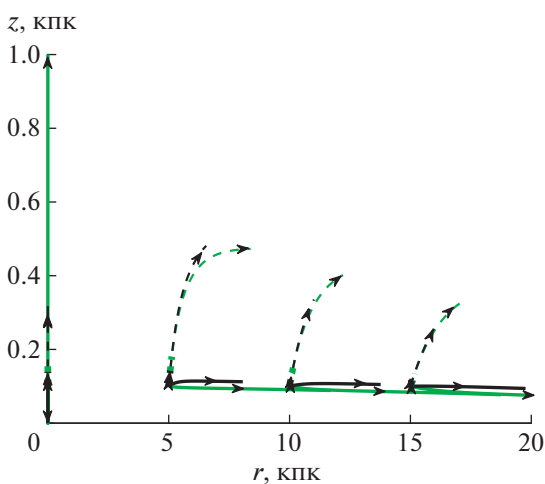


Рис. 10. Примеры треков силикатных пылинок: пунктирная линия – 0.001 мкм, штриховая линия – 0.01 мкм, сплошная линия – 0.1 мкм. Зеленым цветом показаны траектории движения компактных пылинок, черным – пористых.

На рис. 10 показаны аналогичные траектории силикатных пылинок. Крупные и мелкие частицы практически не меняют своего положения по высоте, а заметно смещаются только средние пылинки. Полученные результаты указывают, что силикатная пыль не покидает пределы Галактики за счет исследуемого механизма, т.е. действия давления излучения звезд, но может выметаться на большие расстояния в радиальном направлении. Следует впрочем отметить, что силикатные частицы в межзвездном пространстве, скорее всего, покрыты углеродными мантиями [57], их оптические свойства отличаются от свойств чисто силикатных частиц, однако в реалистичную модель выметания пылинок этого вида давлением излучения звезд необходимо включить также процессы образования и разрушения мантий, что выходит за рамки данной работы.

3.3. Темп выметания пылинок из Галактики

В целом на рис. 8–10 видно, что не любые частицы могут покидать пределы Галактики, и эта способность зависит от нескольких факторов: расчетного времени, начального положения, химического состава и размеров пылинки. В данной работе нас интересуют условия, при которых пылевые частицы покидают пределы тонкого диска Галактики за расчетное время (10 млрд. лет). Таким образом, задача сводится к нахождению предельной высоты $z_{\text{lim}}(r)$, начиная с которой вся пыль данного вида будет заведомо покидать пределы диска Галактики.

На рис. 11 показана зависимость $z_{\text{lim}}(r)$ от начального положения пылинки по галактоцентрическому радиусу для трех выбранных размеров пылинок. Вся пыль данного размера, образующая-

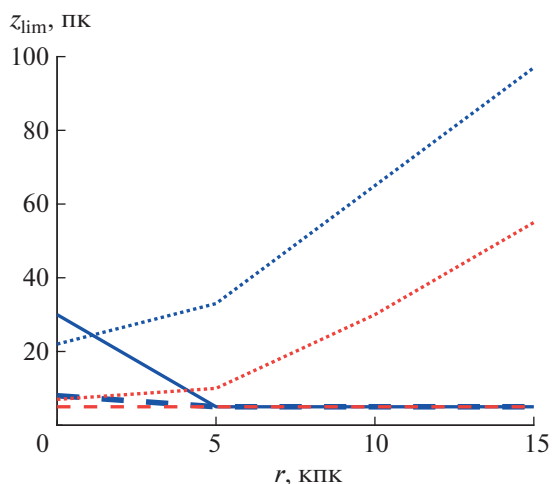


Рис. 11. Зависимость высоты, начиная с которой пыль за расчетное время покидает пределы диска Галактики, от начальной координаты вдоль галактического радиуса; пунктирная линия – 0.001 мкм, штриховая линия – 0.01 мкм, сплошная линия – 0.1 мкм. Синим цветом показана граничная высота для графитовых пылинок, красным – для ПАУ.

ся выше границы, показанной на графике, покидает пределы Галактического диска. Видно, что наиболее эффективно из Галактики выметаются пылинки средних и крупных размеров: за расчетное время пределы диска Галактики покидает практически вся крупная пыль, за исключением узкой области вблизи плоскости диска, а также центральной области для крупной пыли. Однако, поскольку большую часть массы межзвездной пыли составляют мелкие пылинки [57], основной вклад в потерю массы за счет рассмотренных процессов вносят именно они. В этом случае предельная высота начинает существенно зависеть от оптических свойств пылинки. Разными цветами на рис. 11 показаны кривые, рассчитанные для пылинок с оптическими свойствами графита (синий цвет) и ПАУ (красный цвет). Мелкие пылинки ПАУ в центральной области диска вылетают за его пределы при условии, что они образовались выше нескольких парсек, тогда как на периферии диска мелкая частица ПАУ может покинуть его, только если она образовалась на высоте порядка 50 пк и выше. Для мелких графитовых частиц предельная высота на периферии диска составляет около 100 пк.

Зная распределение источников пыли в диске, можно рассчитать поверхностную плотность скорости потери пылевой массы. Поскольку, как следует из рис. 11, выметание пыли из центральной части Галактики идет эффективнее, чем с периферии, следует ожидать большей потери массы из центра и уменьшения этой величины с удалением от него вдоль галактического радиуса. На

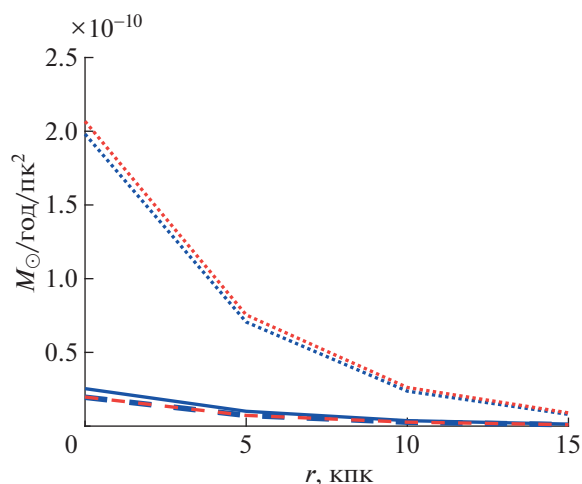


Рис. 12. Зависимость поверхностной плотности скорости потери массы в зависимости от галактоцентрического расстояния. Пунктирная линия – 0.001 мкм, штриховая линия – 0.01 мкм, сплошная линия – 0.1 мкм.

рис. 12 показана поверхностная плотность скорости потери массы в зависимости от галактоцентрического расстояния для трех выбранных нами размеров пылинок. Основной вклад в потерю пыли вносят мелкие частицы, которые в принятой модели составляют большую часть всей массы межзвездной пыли. Отметим, что, в отличие от предельной высоты, суммарный темп потери мелких частиц с единицы площади практически не зависит от предположения об их оптических свойствах, поскольку практически вся пыль образуется выше полученных нами предельных значений z (рис. 11).

В конкретном контексте описания возможных причин возникновения радиального градиента металличности в дисковых галактиках (в данном случае в Млечном Пути) нас интересует также поверхностная плотность скорости потери массы в виде пыли, нормированная на поверхностную плотность газа, поскольку содержание металлов в Галактике также представляет собой относительную величину. Эта величина показана на рис. 13. Здесь видно, что абсолютная величина потери пылевой массы действительно уменьшается по направлению к периферии Галактики, но ее относительный вклад в металличность газа с удалением от центра, напротив, несколько возрастает. Это означает, что выметание пыли давлением излучения звезд может вносить вклад в формирование радиального градиента тяжелых элементов, входящих в состав пыли.

Интегрирование по всем размерам пылинок и всему объему Галактики дает общий темп потери массы в виде пыли примерно $0.03 M_{\odot}/\text{год}$. Полу-

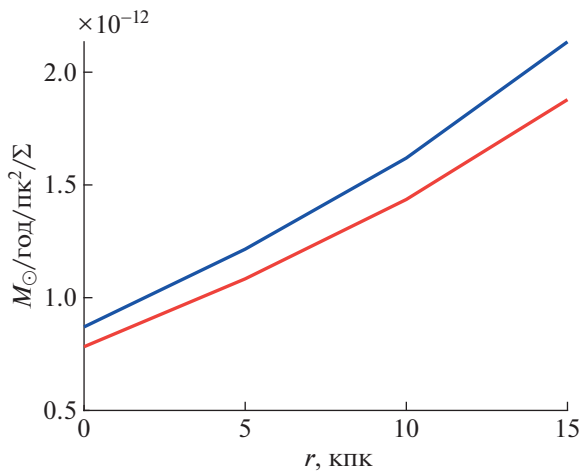


Рис. 13. Поверхностная плотность темпа потери пыли, нормированная на поверхностную плотность газа, в зависимости от галактоцентрического расстояния.

ченная величина сопоставима с выбросом тяжелых элементов с ветром и указывает, что описанный механизм выметания пыли из Галактики является значительным фактором в процессах обмена веществом с межгалактической средой и может объяснять наличие окологалактических пылевых структур.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как отмечалось во Введении, выметание пыли из галактического диска, по всей видимости, происходит не только в Млечном Пути, но и вообще в большинстве дисковых галактик, благодаря чему пыль становится существенной составной частью окологалактической и межгалактической среды. Как показывают расчеты, выполненные нами и другими авторами, давление излучения звезд является важным фактором, определяющим эффективность этого процесса. Ранее выметание пылинок давлением излучения звезд уже рассматривалось Вибе и Шустовым в работе [40], однако появление новых данных о свойствах пыли в галактических дисках и о ее эволюции в окологалактическом пространстве заставляет вернуться к этому вопросу. В отличие от работы [40] в представленную модель внесены следующие усовершенствования:

- Использованы более точные значения фактора Q_{pr} для пылинок различного химического состава и структуры. Показано, что выбор оптических свойств не оказывает существенного влияния на оценку потери пыли из диска, однако заметно меняет траектории частиц на больших галактических высотах.

- Модель переформулирована в трехмерной постановке задачи, что позволяет использовать ее для исследования более сложных движений пыли, например, с учетом магнитного поля.

- В модель включено темное гало, учет которого также существенно влияет на движение частиц на больших высотах.

В результате этих изменений общий характер движения частиц и темп потери пылевой массы по сравнению с работой [40] изменился незначительно, но некоторые расчетные траектории заметно отличаются от полученных ранее.

Согласие старых и новых результатов по темпу потери пыли из Галактики позволяет сделать некоторые замечания относительно роли выметания пыли в формировании распределения химического состава по галактическому диску. Хорошо известной особенностью этого распределения является наличие в дисковых галактиках градиентов металличности, наблюдаемых по различным химическим элементам (C, N, O, Ne, S, Fe, Ar, Al, см. напр., [67]). Эти элементы частично входят в состав пылевых частиц [68]. Очевидно, что если мы учтем вклад выметания пыли давлением излучения звезд в формирование радиальных градиентов металличности, то градиенты содержания для элементов, входящих в состав пыли, должны отличаться от тех, которые в ее состав не входят. Конечно, эти элементы содержатся в пыли в различных соотношениях. Также помимо выметания пыли давлением излучения в формировании градиента немаловажную роль может играть галактический ветер, моделирование которого в данной работе не проводилось. Это, в частности, по-видимому верно для карликовых галактик на $z \sim 2$, демонстрирующих инвертированные радиальные градиенты металличности. Это указывает, что основную часть продуктов звездного нуклеосинтеза переносит на окраины галактики мощный галактический ветер, вызванный центральной вспышкой звездообразования [69].

В нашей Галактике сопоставление величины градиента для различных элементов дает противоречивые результаты. Можно проследить сильное отличие градиентов таких элементов, как Ne, Ar, Ne [70], и их сходство для элементов, входящих в состав пыли [70, 71]. С другой стороны, данные [72] свидетельствуют о сходстве градиентов для большинства элементов, вне зависимости от того, входят ли они в состав межзвездной пыли. Однако значения градиента по наблюдательным данным имеют довольно широкий разброс, и не всегда можно утверждать что-либо определенное о радиальной зависимости для выбранного химического элемента. Пока представляется возможным только качественное сравнение наблюдательных данных с результатами моделирования. Наши результаты показывают, что прене-

брегать выметанием пыли и зависимостью темпа выметания от галактоцентрического расстояния нельзя.

Примечательно, что для большинства дисковых галактик, в том числе и для Млечного Пути, наблюдается изменение вида зависимости содержания тяжелых элементов от галактоцентрического расстояния, которое проявляется в уменьшении наклона радиального градиента металличности [65, 66]. На расстояниях ~ 10 кпк от центра зависимость становится более пологой, т.е. градиенты сглаживаются. Как говорилось выше, это может быть связано с уменьшением наклона траекторий движения пылинок относительно галактического диска при удалении от центра Галактики.

В данной работе мы ограничились выводами, связанными с движением пылинок на небольших галактических высотах. Исследование других вопросов — выброса пыли на большие расстояния, ее разрушения в окологалактическом пространстве и пр. — потребует внесения в модель следующих дополнений. В данной работе мы считали пылинки электрически нейтральными и потому пренебрегали вкладом магнитного поля в их динамику. Однако на самом деле пылинки могут иметь электрический заряд и потому двигаться вдоль силовых линий магнитного поля Галактики. С одной стороны, величина напряженности магнитного поля на больших галактических высотах невелика [73], и в ней существенен вклад нерегулярного компонента, так что оно будет, скорее, хаотизировать движение пыли, не оказывая существенного влияния на его глобальные характеристики. Поскольку в данной работе нас, главным образом, интересует не детальная динамика пылевых частиц, а общий темп выметания пыли на разных галактоцентрических радиусах, мы не учитывали силу Лоренца при расчете движения пылинки. С другой стороны, при включении в модель процессов разрушения пылинок действие магнитного поля может оказаться более важным. Влияние магнитного поля будет рассмотрено нами в отдельном исследовании.

Модель предполагает включение детального расчета процессов разрушения пылинок. В приближенной форме этот процесс учтен в работе [40], однако в настоящее время нами разработана существенно более детальная модель эволюции пылевых частиц различных размеров SHIVA [74], которая позволит ответить на вопрос о возможной связи выметаемых пылинок с появлением внеплоскостных частиц ПАУ в нашей и других галактиках. Поскольку формирование звездного диска Галактики, по всей видимости, происходило в относительно ранние времена [75], а также в силу того, что большая часть звезд — источников пыли — образовалась за время ~ 1.5 млрд. лет, в

контексте поставленной задачи учет эволюционных процессов представляется не столь необходимым. Различные исследования показывают, что за последние 10 млрд. лет существенных вариаций темпа звездообразования в диске Галактики не было [76, 77]. Однако мы также планируем применить модель к другим галактикам, в том числе к галактикам со вспышкой звездообразования, для чего в модель будет включено влияние галактического ветра. Рассмотрение подобных систем потребует рассмотрения изменяющихся со временем параметров галактики.

В заключение отметим, что рассмотренные нами закономерности движения пылинок в невращающейся галактике косвенно применимы к эллиптическим галактикам и указывают на то, что протяженные пылевые структуры могут формироваться и в окрестностях подобных систем. Прозволюционировавшие звезды — источники пыли — в эллиптических галактиках имеются. Выметание пыли давлением излучения звезд будет облегчаться существенно меньшей плотностью межзвездного вещества. Однако, как показывают наши расчеты (см. рис. 2), эффективность давления излучения сильно снижается с понижением характерной температуры звездных населений. Этот вопрос заслуживает отдельного изучения.

5. ВЫВОДЫ

Нами исследована динамическая эволюция углистых и силикатных пылинок с тремя значениями радиусов: 0.001, 0.01 и 0.1 мкм. Рассчитана результирующая сила, действующая на такие пылинки в галактических окрестностях, приведены характерные траектории. Рассмотрены углистые пылинки (с оптическими свойствами графита и полициклических ароматических углеводородов) и силикатные пылинки (с учетом возможной пористости).

Выполненные расчеты показали, что наиболее эффективно из Галактики выметаются углистые пылинки средних размеров, на долю которых, однако, приходится малая часть всей массы межзвездной пыли. Силикатные частицы в меньшей степени подвержены действию давления излучения и потому не достигают больших высот. Возможная пористость силикатных пылинок приводит к меньшей плотности при данном размере, что снижает действующую на них силу тяготения, однако наши оценки показывают, что при увеличении пористости силикатной пыли снижается также фактор эффективности давления излучения, что суммарно приводит к незначительным изменениям в движении самих частиц.

Хотя абсолютное значение темпа потери пыли с единицы площади растет с приближением к центру Галактики, его величина относительно

плотности газа увеличивается на периферии Галактики. Это указывает, что выметание пыли давлением излучения звезд может быть фактором, влияющим на формирование радиального градиента химического состава. Показано, что при приближении к краю диска Галактики частицы начинают двигаться под наклоном к плоскости диска, т.е. движение вдоль радиуса преобладает над движением по высоте, что может объяснять сглаживание градиентов металличности, которое наблюдается на галактоцентрических расстояниях ~ 10 кпк многих дисковых галактик.

Полная потеря массы Галактикой в виде пыли составляет $0.03M_{\odot}$ /год, что существенно влияет на химическую эволюцию галактических дисков. Поскольку механизм выметания пыли давлением излучения звезд является общим для дисковых галактик, он вполне может объяснить существование пыли в околосколовых пространствах, а также существование межгалактической пыли. Расчеты, проведенные без учета вращения Галактики, также продемонстрировали эффективное выметание пылевых частиц. Поскольку такая постановка задачи на качественном уровне напоминает условия в эллиптических галактиках, наши результаты указывают на перспективность поиска околосколовых пыли вблизи подобных систем.

БЛАГОДАРНОСТИ

Благодарим анонимного рецензента за внимательное прочтение нашей работы и за сделанные замечания.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Е. Сивкова и Б. Шустов благодарят за поддержку грант РНФ 19-72-20089.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *E. M. Xilouris, N. D. Kylafis, J. Papamastorakis, E. V. Paleologou, and G. Haerendel*, *Astron. and Astrophys.* **325**, 135 (1997).
2. *E. M. Xilouris, Y. I. Byun, N. D. Kylafis, E. V. Paleologou, and J. Papamastorakis*, *Astron. and Astrophys.* **344**, 868 (1999), astro-ph/9901158.
3. *S. Bianchi*, *Astron. and Astrophys.* **471**, 765 (2007), 0705.1471.
4. *G. De Geyter, M. Baes, P. Camps, J. Fritz, I. De Looze, T. M. Hughes, S. Viaene, and G. Gentile*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **441**, 869 (2014), 1403.7527.
5. *Y. Sofue*, *Publ. Astron. Soc. Jap.* **39**, 547 (1987).
6. *J. C. Howk and B. D. Savage*, *Astron. J.* **114**, 2463 (1997), astro-ph/9709197.
7. *J. C. Howk and B. D. Savage*, *Astron. J.* **117**, 2077 (1999), astro-ph/9902061.
8. *B. W. Holwerda, W. C. Keel, B. Williams, J. J. Dalcanton, and R. S. de Jong*, *Astron. J.* **137**, 3000 (2009).
9. *J. C. Howk and B. D. Savage*, *Astron. J.* **119**, 644 (2000), astro-ph/9910248.
10. *J. Rossa, R.-J. Dettmar, R. A. M. Walterbos, and C. A. Norman*, *Astron. J.* **128**, 674 (2004), astro-ph/0405401.
11. *T. W. J. Thompson, J. C. Howk, and B. D. Savage*, *Astron. J.* **128**, 662 (2004).
12. *D. Zaritsky*, *Astron. J.* **108**, 1619 (1994).
13. *B. Ménard, R. Scranton, M. Fukugita, and G. Richards*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **405**, 1025 (2010), 0902.4240.
14. *K.-I. Seon and A. N. Witt*, in *The Spectral Energy Distribution of Galaxies – SED 2011*, edited by R. J. Tuffs and C. C. Popescu (2012), vol. 284 of IAU Symposium, pp. 135–137.
15. *K.-i. Seon, A. N. Witt, J.-h. Shinn, and I.-j. Kim*, *Astrophys. J. Lett.* **785**, L18 (2014), 1403.4905.
16. *E. Hodges-Kluck and J. N. Bregman*, *Astrophys. J.* **789**, 131 (2014), 1401.4170.
17. *J. A. Irwin and S. C. Madden*, *Astron. and Astrophys.* **445**, 123 (2006), astro-ph/0509726.
18. *J. A. Irwin, H. Kennedy, T. Parkin, and S. Madden*, *Astron. and Astrophys.* **474**, 461 (2007), 0708.3808.
19. *R. J. Rand, K. Wood, R. A. Benjamin, and S. E. Meidt*, *Astrophys. J.* **728**, 163 (2011), 1101.1491.
20. *S. K. Sethi, Y. Shchekinov, and B. B. Nath*, *Astrophys. J. Lett.* **850**, L20 (2017), 1711.00476.
21. *M. Bocchio, S. Bianchi, L. K. Hunt, and R. Schneider*, *Astron. and Astrophys.* **586**, A8 (2016), 1509.07677.
22. *Planck Collaboration, A. Abergel, P. A. R. Ade, N. Aghanim, M. I. R. Alves, G. Aniano, C. Armitage-Caplan, M. Arnaud, M. Ashdown, F. Atrio-Barandela, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **571**, A11 (2014), 1312.1300.
23. *E. Hodges-Kluck, L. Corrales, S. Veilleux, J. Bregman, J. Li, and M. Melendez*, in *Bull. Amer. Astron. Soc.* (2019), vol. 51, p. 249, 1903.09693.
24. *H. Hirashita and C.-Y. Lin*, *Planetary and Space Science* (2018), ISSN 0032-0633.
25. *R. J. Rand, K. Wood, and R. A. Benjamin*, *Astrophys. J.* **680**, 263 (2008), 0802.3156.
26. *H. Kaneda, M. Yamagishi, T. Suzuki, and T. Onaka*, *Astrophys. J. Lett.* **698**, L125 (2009), 0905.3800.
27. *H. Kaneda, D. Ishihara, T. Suzuki, N. Ikeda, T. Onaka, M. Yamagishi, Y. Ohyama, T. Wada, and A. Yasuda*, *Astron. and Astrophys.* **514**, A14 (2010), 1002.4521.
28. *A. McCormick, S. Veilleux, and D. S. N. Rupke*, *Astrophys. J.* **774**, 126 (2013).
29. *A. McCormick, S. Veilleux, M. Meléndez, C. L. Martin, J. Bland-Hawthorn, G. Cecil, F. Heitsch, T. Müller, D. S. N. Rupke, and C. Engelbracht*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **477**, 699 (2018), 1803.03269.
30. *Y.-S. Jo, K.-i. Seon, J.-H. Shinn, Y. Yang, D. Lee, and K.-W. Min*, *Astrophys. J.* **862**, 25 (2018), 1806.06525.
31. *J. C. Pecker*, *Astron. and Astrophys.* **18**, 253 (1972).
32. *R. Y. Chiao and N. C. Wickramasinghe*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **159**, 361 (1972).
33. *J. C. Pecker*, *Astron. and Astrophys.* **35**, 7 (1974).

34. *J. M. Greenberg, F. Ferrini, B. Barsella, and S. Aiello*, *Nature* **327**, 214 (1987).
35. *B. Barsella, F. Ferrini, J. M. Greenberg, and S. Aiello*, *Astron. and Astrophys.* **209**, 349 (1989).
36. *A. Ferrara, F. Ferrini, J. Franco, and B. Barsella*, *Astrophys. J.* **381**, 137 (1991).
37. *J. I. Davies, P. Alton, S. Bianchi, and M. Trewhella*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **300**, 1006 (1998).
38. *E. O. Vasiliev and Y. A. Shchekinov*, *Astronomy Reports* **58**, 497 (2014).
39. *H. Hirashita and S. Aoyama*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **482**, 2555 (2019), 1810.07962.
40. *B. M. Shustov and D. Z. Vibe*, *Astron. Zhurn.* **72**, 650 (1995).
41. *B. T. Draine*, *Astrophys. J.* **57**, 587 (1985).
42. *A. Li and B. T. Draine*, *Astrophys. J.* **554**, 778 (2001), astro-ph/0011319.
43. *H. A. Smith, A. Li, M. P. Li, M. Köhler, M. L. N. Ashby, G. G. Fazio, J. S. Huang, M. Marengo, Z. Wang, S. Willner, et al.*, *Astrophys. J.* **716**, 490 (2010), 1004.2277.
44. *D. Semenov, T. Henning, C. Helling, M. Igner, and E. Sedlmayr*, *Astron. and Astrophys.* **410**, 611 (2003), astro-ph/0308344.
45. *Ален К.У.*, *Астрофизические величины* (Мир, Москва, 1977).
46. *A. Cox*, *Allen's astrophysical quantities*; 4th ed. (AIP, New York, NY, 2000), URL <https://cds.cern.ch/record/441599>.
47. *P. J. McMillan*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **414**, 2446 (2011), 1102.4340.
48. *I. N. Reid, J. E. Gizis, and S. L. Hawley*, *Astron. J.* **124**, 2721 (2002).
49. *J. Bovy*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **470**, 1360 (2017), 1704.05063.
50. *J. F. Navarro, C. S. Frenk, and S. D. M. White*, *Astrophys. J.* **490**, 493 (1997), astro-ph/9611107.
51. *I. Chattopadhyay, M. Sharma, B. B. Nath, and D. Ryu*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **423**, 2153 (2012), 1204.1133.
52. *F. Nesti and P. Salucci*, *J. Cosmol. and Astropart. Phys.* **2013**, 016 (2013), 1304.5127.
53. *B. T. Draine and E. E. Salpeter*, *Astrophys. J.* **231**, 77 (1979).
54. *P. M. W. Kalberla and J. Kerp*, *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.* **47**, 27 (2009).
55. *A. Gupta and S. Sahijpal*, arXiv e-prints arXiv:2004.11328 (2020), 2004.11328.
56. *R. Gehrz*, in *Interstellar Dust*, edited by L. J. Allamandola and A. G. G. M. Tielens (1989), vol. 135 of IAU Symposium, p. 445.
57. *A. P. Jones, L. Fanciullo, M. Köhler, L. Verstraete, V. Guillet, M. Bocchio, and N. Ysard*, *Astron. and Astrophys.* **558**, A62 (2013), 1411.6293.
58. *M. Matsuura, M. J. Barlow, A. A. Zijlstra, P. A. Whitelock, M. R. L. Cioni, M. A. T. Groenewegen, K. Volk, F. Kemper, T. Kodama, E. Lagadec, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **396**, 918 (2009), 0903.1123.
59. *A. Nanni, M. A. T. Groenewegen, B. Aringer, S. Rubele, A. Bressan, J. T. van Loon, S. R. Goldman, and M. L. Boyer*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **487**, 502 (2019), 1904.06702.
60. *R. McKinnon, P. Torrey, and M. Vogelsberger*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **457**, 3775 (2016), 1505.04792.
61. *S. Zhukovska, T. Henning, and C. Dobbs*, *Astrophys. J.* **857**, 94 (2018), 1803.01929.
62. *N. C. Wickramasinghe*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **159**, 269 (1972).
63. *T. Jackson, Ž. Ivezić, and G. R. Knapp*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **337**, 749 (2002), astro-ph/0202407.
64. *A. Siebert, O. Bienaymé, and C. Soubiran*, *Astron. and Astrophys.* **399**, 531 (2003), astro-ph/0211328.
65. *F. Bresolin, R. C. Kennicutt, and E. Ryan-Weber*, *Astrophys. J.* **750**, 122 (2012), 1203.0956.
66. *S. M. Andrievsky, R. E. Luck, P. Martin, and J. R. D. Lépine*, *Astron. and Astrophys.* **413**, 159 (2004).
67. *K. Z. Arellano-Córdova, C. Esteban, J. García-Rojas, and J. E. Méndez-Delgado*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **496**, 1051 (2020), 2005.11372.
68. *U. J. Sofia, J. A. Cardelli, and B. D. Savage*, *Astrophys. J.* **430**, 650 (1994).
69. *X. Wang, T. A. Jones, and T. Treu*, in *American Astronomical Society Meeting Abstracts #233* (2019), vol. 233 of American Astronomical Society Meeting Abstracts, p. 206.02.
70. *J. L. Hou, N. Prantzos, and S. Boissier*, *Astron. and Astrophys.* **362**, 921 (2000), astro-ph/0007164.
71. *K. Cunha, P. M. Frinchaboy, D. Souto, B. Thompson, G. Zasowski, C. Allende Prieto, R. Carrera, C. Chiappini, J. Donor, D. A. García-Hernández, et al.*, *Astronomische Nachrichten* **337**, 922 (2016), 1601.03099.
72. *R. E. Luck and D. L. Lambert*, *Astron. J.* **142**, 136 (2011), 1108.1947.
73. *A. Shukurov, L. F. S. Rodrigues, P. J. Bushby, J. Hollins, and J. P. Rachen*, *Astron. and Astrophys.* **623**, A113 (2019), 1809.03595.
74. *M. S. Murga, D. S. Wiebe, E. E. Sivkova, and V. V. Akimkin*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **488**, 965 (2019), 1906.11308.
75. *L. Casagrande, V. Silva Aguirre, K. J. Schlesinger, D. Stello, D. Huber, A. M. Serenelli, R. Schönrich, S. Cassisi, A. Pietrinferni, S. Hodgkin, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **455**, 987 (2016), 1510.01376.
76. *H. J. Rocha-Pinto, J. Scalo, W. J. Maciel, and C. Flynn*, *Astron. and Astrophys.* **358**, 869 (2000), astro-ph/0001383.
77. *M. Cignoni, S. Degl'Innocenti, P. G. Prada Moroni, and S. N. Shore*, *Astron. and Astrophys.* **459**, 783 (2006), astro-ph/0608654.