

УДК 524.78:524.57-337

ВЫМЕТАНИЕ ПЫЛИ ИЗ СПИРАЛЬНОЙ ГАЛАКТИКИ ВСЛЕДСТВИЕ ЭФФЕКТА “МАГНИТНОЙ ПРАЩИ”

© 2014 Ю. Н. Мишуров*, И. А. Ачарова, М. Г. Шевченко, Д. А. Тышлангов

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, 344006 Россия

Поступила в редакцию 1 сентября 2013 года; принята в печать 5 ноября 2013 года

В работе предлагается новый механизм выметания пыли за пределы дисков галактик как в радиальном направлении вдоль галактической плоскости, так и в вертикальном направлении поперек дисков. Механизм связан с взаимодействием пылинок с бисимметричным нестационарным магнитным полем галактики, силовые линии которого искривлены и вращаются вместе с звездной спиральной волной плотности, ответственной за рукава. Явление переноса межзвездных пылинок в радиальном направлении в плоскости галактических дисков мы связываем с тем, что в силу “приклеенности” заряженных пылинок к магнитным силовым линиям они выталкиваются наружу благодаря наклону (к радиальному направлению в плоскости диска) и вращению магнитных силовых линий. Кроме того, вследствие дрейфового движения в скрещенных магнитном и гравитационном полях (напряженности обоих полей параллельны галактической плоскости) пыль выносятся еще и поперек диска в вертикальном направлении. Компьютерные расчеты движения пылинок в реальных гравитационно-магнитных полях с учетом силы сопротивления, действующей на пылинку со стороны межзвездного газа, показывают, что характерное время выноса пылинки за пределы галактических дисков составляет порядка 1 млрд лет и меньше.

Ключевые слова: *пыль, экстинкция—межзвёздная среда: кинематика и динамика—межзвёздная среда: магнитные поля*

1. ВВЕДЕНИЕ

Различные исследования галактик, в частности, покраснения их излучения, а также прямые инфракрасные наблюдения убедительно демонстрируют, что пыль присутствует в межгалактической среде [1]. Поскольку в межгалактической среде нет условий для формирования пыли, то мы вынуждены признать, что пыль, которая формируется лишь звездами внутри галактик, каким-то образом могла оказаться в межгалактическом пространстве. Наличие значительного количества пыли за пределами галактических дисков, как над их плоскостью, так и вблизи экваторов [2, 3], говорит в пользу такого процесса. Но тут возникает вопрос о механизме выметания пыли за пределы галактик.

К настоящему моменту предложено несколько таких процессов, например, множественные взрывы сверхновых [4], давление света звезд [5], перенос по радиусу галактики вследствие взаимодействия пылинок с возмущенным под действием спиральных рукавов движением межзвездного газа [6]. Мощным механизмом выметания пыли поперек галактического диска могут быть релятивистские джеты, генерируемые центральными

сверхмассивными черными дырами. Так, для умеренных параметров среды в джете ($v_p/c \sim 0.1$, v_p — скорость протонов в джете, c — скорость света, $n_p \sim 10^{-8} \text{ см}^{-3}$ — концентрация протонов [7]) ускорение пылинки массой около 10^{-13} г вследствие столкновения с протонами, оказывается равным примерно $2 \times 10^{-9} \text{ см с}^{-2}$, тогда как ускорение под действием силы гравитации галактического диска — приблизительно $-2 \times 10^{-11}|z| \text{ см с}^{-2}$ (здесь z — вертикальная координата пылинки в парсеках) [8]. Отсюда видно, что даже протонами джета пылинка вполне может быть выдавлена за пределы галактического диска несмотря на столь низкие концентрации протонов в джете. Но этот процесс охватывает лишь небольшую, самую центральную часть галактики, и длится стадия джета в течение непродолжительного периода времени, так что количество пыли, выброшенное за пределы диска этим механизмом, будет небольшим. Далее, в работе [5] показано, что за счет давления света звезд галактики пылинку можно вымести поперек диска на расстояние в несколько десятков (а то и сотни) килопарсеков от родительской галактики, но этот процесс будет эффективным, если пылинка стартует достаточно далеко от плоскости диска, на расстоянии порядка 1 кпк.

*E-mail: unmishurov@sfned.ru

Еще более сложной эта проблема оказывается, если рассматривать радиальный перенос пылинок параллельно галактической плоскости. Из предложенных механизмов переноса пылинок в радиальном направлении в плоскости галактического диска, пожалуй, эффективным может быть лишь комбинированное взаимодействие их с возмущенным спиральными рукавами гравитационным полем галактики и нелинейным (вплоть до формирования галактических ударных волн) течением межзвездного газа. Такая возможность продемонстрирована в работе [6] на примере достаточно открытых рукавов (угол закрутки рукавов равен примерно 25°), при которых формируются весьма мощные галактические ударные волны. Тогда указанный механизм радиального переноса пылинок оказывается эффективным. При этом пылинки даже могут перескочить через область коротационного резонанса.

В настоящей работе предлагается иной механизм переноса как по радиусу галактического диска, так и поперек него. Наша идея состоит в следующем. Пылинки имеют электрический заряд, а в галактиках наблюдаются магнитные поля средней напряженностью порядка нескольких микрогаусс. Оценки показывают [9], что при типичном заряде пылинки (приблизительно 10 элементарных зарядов) и указанных полях ларморовская частота ω_H оказывается порядка 10^{-4} лет $^{-1}$, а ларморовский радиус $r_L = v/\omega_H$ (здесь $v \sim 100$ км с $^{-1}$ — характерная скорость пылинки, движущейся с межзвездной средой относительно спиральной волны плотности) оказывается порядка 1 пк. Иными словами, пылинки будут в значительной степени “приклеенными” к магнитным силовым линиям. Если последние в галактической плоскости замкнуты, то пыль, двигаясь вдоль них, естественно будет описывать квазикруговые линии, возмущенные под действием спиральных рукавов гравитационного поля галактики. Но если магнитные силовые линии разомкнуты (в плоскости диска), т.е. начинаются и заканчиваются в бесконечности, как это имеет место для бисимметричных галактических магнитных полей [9], то ситуация меняется кардинально. Обсудим это явление более детально.

Как показано в ряде работ, значительная, если не подавляющая часть галактик имеет бисимметричное магнитное поле (см., например, [9] и цитированную там литературу; причина устойчивости появления таких структур обсуждается в работе [10]). Важное отличие этого поля от кольцевого состоит в том, что магнитные силовые линии параллельны спиральным рукавам, при этом если силовая линия в одном рукаве входит в диск, то покидает его она в другом рукаве, т.е. направление силовых линий в разных рукавах противоположное (по отношению к центру галактики). Далее, как показано в ряде

работ, например в [10], силовые линии вращаются в плоскости диска вместе с галактической спиральной волной плотности с угловой скоростью Ω_r , которая, как известно, не зависит от галактоцентрического расстояния [11], т.е. эта волна вращается твердотельно. Представим себе заряженную пылинку, которая под действием силы Лоренца вращается вокруг силовой линии, не имея возможности сместиться далеко относительно нее, но может свободно перемещаться вдоль силовой линии. Поскольку, как это было сказано выше, силовая линия вращается и искривлена, то она будет как бы выталкивать пылинку наружу.¹ По указанной причине мы и назвали наш механизм эффектом “магнитной пращи.” Кроме этого, можно ожидать, что в скрещенных магнито-гравитационных полях (возмущенные спиральными рукавами гравитационное поле галактики для упрощения расчетов также считаем расположенным в плоскости диска) возникнет дрейф пылинок поперек экваториальной плоскости диска галактики.

Оценке эффективности указанных механизмов и посвящена настоящая работа.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ

Поскольку в настоящей работе мы преследуем цель лишь продемонстрировать эффективность нашего механизма в определенных рамках, ниже будет рассмотрена упрощенная модель, описывающая движение пылинки. Более реалистические модели с учетом облачной структуры межзвездного газа и особенностей магнитного поля планируется исследовать отдельно.

Уравнение движения пылинки под комбинированным действием гравитационного и магнитного полей галактики имеет вид:

$$m_d \frac{d\vec{V}_d}{dt} = -\nabla\varphi_G + \vec{F}_L - \gamma(\vec{V}_d - \vec{V}_g), \quad (1)$$

где m_d и \vec{V}_d — соответственно масса и скорость пылинки, φ_G — гравитационный потенциал галактики, \vec{F}_L — сила Лоренца, действующая на пылинку. Здесь для общности введена также сила сопротивления, действующая на пылинку со стороны межзвездного газа, \vec{V}_g — скорость газа, γ — коэффициент силы сопротивления среды [12]. Опишем вкратце математические выражения для входящих в уравнение (1) величин.

¹Механическим аналогом предлагаемого нами эффекта магнитной пращи является известный прием, когда на стержень надевается кольцо, и затем делается взмах стержнем, удерживаемым за один из концов. При этом кольцо, двигаясь вдоль стержня, приобретает большую скорость.

Гравитационный потенциал галактики φ_G представим в виде:

$$\varphi_G = \varphi_0(r) + \varphi_S(r, \vartheta, t), \quad (2)$$

где φ_0 — невозмущенный гравитационный потенциал галактики, который определяет равновесное состояние диска $d\varphi_0/dr = \Omega^2 r$ (Ω — угловая скорость его вращения), φ_S — гравитационный потенциал, возмущенный действием галактической спиральной волны плотности. Здесь принята цилиндрическая система координат (r, ϑ, z) с началом в центре галактики и осью z , направленной перпендикулярно плоскости диска, t — время. Как видно из уравнения (2), невозмущенный гравитационный потенциал является осесимметричным, т.е. он не зависит от азимутального угла ϑ . Возмущенный потенциал, который описывает волну плотности, зависит как от координат в плоскости диска, так и от времени. Для него мы принимаем выражение в виде бегущей волны:

$$\varphi_S = A_S \cos(n\chi_\mu + \Delta), \quad (3)$$

где A_S — амплитуда возмущенного гравитационного поля, n — число спиральных рукавов, Δ — смещение по фазе между волной плотности и магнитной волной (см. ниже), χ_μ — магнитная фаза спиральной волны,

$$\chi_\mu = \cot p \ln(r/r_0) - \vartheta + \Omega p t, \quad (4)$$

p — угол закрутки рукавов. Для расчета силы Лоренца рассмотрим простую модель структуры магнитного поля, предложенную в ряде работ, например [13]. В этой работе силовые линии усредненного магнитного поля параллельны плоскости диска. Согласно работе [13], параллельность магнитных силовых линий плоскости галактического диска можно обеспечить, приняв, что у векторного потенциала \vec{A} отлична от нуля лишь z -компонента. Комбинируя представления [10] и [13], находим:

$$A_z = -h \sin p \sin \chi_\mu, \quad (5)$$

где h — амплитуда векторного потенциала. Выражение для силы Лоренца при заданном векторном потенциале получается стандартным образом: $\vec{F}_L = (q/c) \left([\vec{V}_d \text{ rot } \vec{A}] - \partial \vec{A} / \partial t \right)$, где q — заряд пылинки, c — скорость света.²

Отметим, что, как видно из (4), условие $\chi_\mu = 0$ есть уравнение магнитной силовой линии в галактической плоскости, соответствующее, скажем,

максимуму (по модулю) напряженности поля на данном галактоцентрическом радиусе. Очевидно, это есть логарифмическая спираль. Уравнение $\chi_\mu = \pi$ также дает спираль, но смещенную на 180° относительно предыдущего рукава. При этом, если в первом рукаве напряженность магнитного поля будет иметь компоненту, направленную к центру галактики, то во втором рукаве ее направление будет обратным. С другой стороны, сравнивая соотношения (3) и (4), мы видим, что в волне плотности при переходе от одного рукава к другому возмущенная гравитационная сила своего направления не меняет. По этой причине мы и назвали фазу χ_μ магнитной, хотя она входит в выражения как для силы Лоренца, так и для возмущенной гравитационной силы. Из последних упомянутых двух соотношений также видно, что эквипотенциальные линии для обоих полей параллельны друг другу.

Выражение для силы сопротивления, возникающей от взаимодействия пылинок с межзвездным газом мы приняли согласно [12]. Тогда коэффициент сопротивления оказывается равным: $\gamma = 2\pi a^2 k T n \sqrt{128 \pi m k T / 3 + (\pi m \Delta V)^2}$, где a — радиус пылинки, n — концентрация частиц межзвездного газа (атомов или молекул водорода), m — соответственно масса атома или молекулы водорода, T — температура межзвездного газа, ΔV — модуль полной скорости пылинки относительно газа, k — постоянная Больцмана.

В расчетах нами были приняты следующие значения параметров: $m_d = 10^{-13}$ г; $a = 3 \times 10^{-5}$ см; не привязываясь конкретно к нашей Галактике, тем не менее, в качестве невозмущенного гравитационного потенциала галактики φ_0 мы приняли параметры из работы [15]; число спиральных рукавов $n = 2$; угол закрутки рукавов $p = -7^\circ$; амплитуда возмущенного гравитационного поля A_S задается путем фиксации амплитуды возмущенной гравитационной силы $F_S = (n A_S \cot p) / (\Omega r)^2$ на некотором расстоянии, скажем, $r = 8.5$ кпк. В расчетах принято $F_S = 0.1$, отсюда для заданного невозмущенного потенциала рассчитывается численное значение амплитуды A_S ; заряд пылинки принимался равным от 2 до 10 элементарных зарядов; напряженность магнитного поля, H_0 , вблизи экваториальной плоскости галактики и на расстоянии $r_0 = 4$ кпк принималась равной 2 мкГс, тогда значение амплитуды векторного потенциала в этой же точке галактики находится из соотношения $h_0 = H_0 / r_0$, сам векторный потенциал мы принимали в виде $h = h_0 \exp(-|z|/D)$, $D = 0.125$ кпк — характерная шкала уменьшения напряженности магнитного поля с удалением от плоскости диска (очевидно, выбранная нами функциональная зависимость сохраняет параллельность магнитных силовых линий плоскости диска); угловая скорость

²Пылинка может также иметь электрический и магнитный дипольные моменты (см., например, [14]), но на первом шаге мы ограничимся рассмотрением лишь силы Лоренца, связанной с нескомпенсированным зарядом, т.к. эффекты от дипольных взаимодействий будут малыми величинами, примерно a/r (a — размер пылинки), по сравнению с рассматриваемыми нами эффектами.

вращения спирального узора $\Omega_R = 60$ км/с кпк, что при выбранной кривой вращения соответствует положению коротационного резонанса на расстоянии примерно 3.5 кпк. Для параметров межзвездного газа принимались следующие значения, типичные для молекулярной фазы. Температура $T = 20$ К; считалось, что пространственное распределение газа усреднено и имеет следующее распределение по галактическому радиусу и в вертикальном направлении: $n = n_0 \exp(-|z|/D_2 - (r - r_0)/d)$, $n_0 = 2 \text{ см}^{-3}$, $D_2 = 60$ пк, $d = 3.5$ кпк, $m/m_H = 2$, m_H — масса атома водорода; межзвездный газ совершает вращение в галактической плоскости в соответствии с условием равновесия (т.е. $V_{g,\theta} = r\Omega(r)$, $V_{g,r} = V_{g,z} = 0$, см. выше).

В начальный момент времени принималось, что пылинка имеет чисто круговую скорость, соответствующую ее начальному галактоцентрическому радиусу r_0 , возмущенную в пределах $10\text{--}20 \text{ км с}^{-1}$.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Многочисленные численные эксперименты, выполненные нами с различными параметрами и начальными условиями, приводят к выводу, что результаты слабо зависят от начальной хаотической скорости пылинки. Под хаотической скоростью мы понимаем скорость пылинки относительно общей вращательной скорости движения вещества в галактике. Это связано с тем, что относительная линейная скорость вещества галактики и волны плотности, с которой вращаются магнитные силовые линии ($r|\Omega - \Omega_R|$), начиная уже примерно с 6 кпк достигает ста и более километров в секунду, что существенно превышает начальные пекулярные скорости пылинок $10\text{--}20 \text{ км с}^{-1}$. Поэтому в дальнейшем мы не приводим результаты для различных начальных хаотических скоростей пылинок. Наши расчеты также показывают, что влияние силы сопротивления, действующей на пылинку, оказывается существенным, поэтому мы не приводим результаты без учета действия этой силы.

В качестве иллюстрации ниже демонстрируются результаты расчетов для двух значений электрического заряда пылинки q , равного 2 и 10 элементарным зарядам. Знак заряда для радиального переноса пылинки не существен, т.к. от него зависит лишь направление ее вращения относительно силовой линии; если говорить о вертикальном выметании, то при изменении заряда направление вертикального дрейфа, очевидно, меняется на противоположное. Заметим попутно, что направление вертикального дрейфа также меняется при изменении начальной магнитной фазы пылинки χ_μ на 180° , т.е. при переходе от одного спирального рукава к другому. Смещение по фазе между гребнями магнитной и “гравитационной” волн, Δ , мы

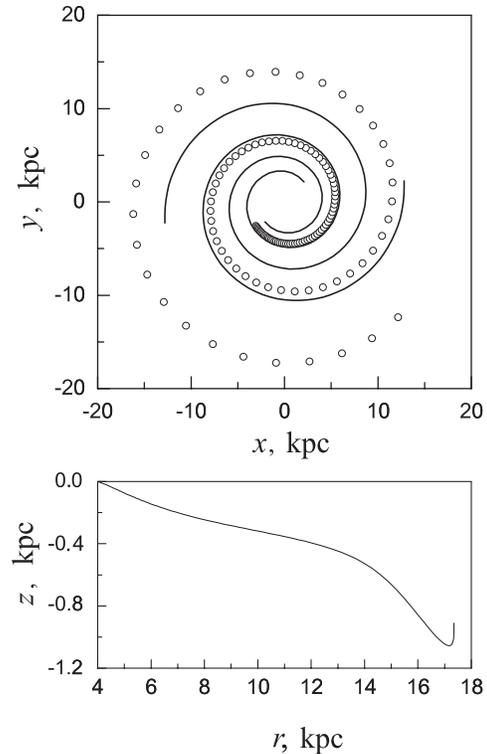


Рис. 1. На верхней панели показана траектория пылинки (кружки), имеющей заряд 2 элементарных заряда и стартующей с галактоцентрического расстояния $r = 4$ кпк, в проекции на галактическую плоскость относительно спиральных рукавов (сплошные линии) в течение времени 500 млн лет. На нижней панели показана траектория той же самой пылинки за тот же промежуток времени в проекции на плоскость (r, z) . Если изменить знак электрического заряда пылинки или принять, что при том же самом заряде она стартует вблизи другого рукава, то пылинка будет дрейфовать в положительном направлении оси z .

принимали таким, чтобы траектория пылинки не накладывалась на линию максимального (по модулю) значения фазы возмущенного гравитационного поля.

На Рис. 1 приведен результат расчетов для $q = 2$. Как видно, в проекции на галактическую плоскость (верхняя панель) пылинка описывает спираль, параллельную рукаву, подтверждая “приклеенность” ее к магнитным силовым линиям даже за пределами галактики, несмотря на то, что напряженность магнитного поля здесь гораздо меньше, чем во внутренней области диска (напомним, что $H \propto 1/r$). Стартуя с галактоцентрического расстояния $r = 4$ кпк, пылинка примерно за 500 млн лет выметается в радиальном направлении за пределы галактического диска.

На нижней панели этого рисунка показано движение пылинки в проекции на плоскость (r, z) .

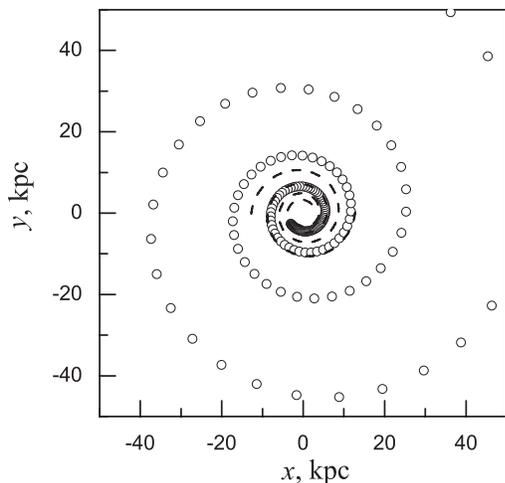


Рис. 2. То же, что на верхней панели Рис. 1, но для пылинки, имеющей заряд 10 элементарных зарядов и движущейся в течение 1 млрд лет. Штриховые линии — спиральные рукава.

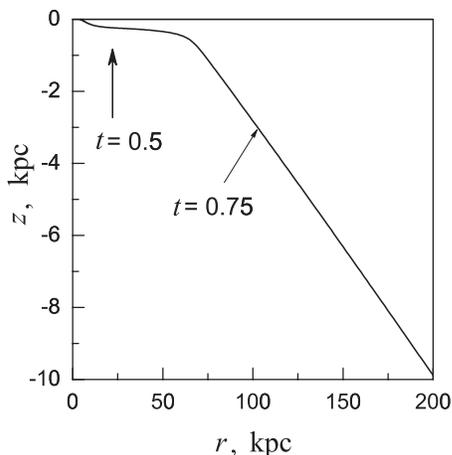


Рис. 3. То же, что на нижней панели Рис. 1, но для пылинки, имеющей заряд 10 элементарных зарядов и движущейся в течение 1 млрд лет.

Видно, что дрейф пылинки в скрещенных магнитном и (возмущенном) гравитационном полях действительно может быть существенным и приводить к выметанию пыли также в вертикальном направлении на расстояние порядка 1 кпк за 500 млн лет (мы приводим результат только для одного начального положения пылинки относительно рукава, если пылинка стартует из соседнего рукава на том же самом галактоцентрическом расстоянии, то, как показывают наши расчеты, она будет дрейфовать в положительном направлении оси z , см. выше).

На Рис. 2, 3 показана траектория пылинки в

проекции на галактическую плоскость и плоскость (r, z) для случая $q = 10$. В этом варианте результат расчета представлен для интервала времени 1 млрд лет. Как и следовало ожидать, скорость вертикального дрейфа пылинки с увеличением заряда уменьшается, по крайней мере, пока пылинка остается в пределах диска, тогда как скорость радиального переноса ее остается близкой к предыдущему случаю. Иными словами, увеличение заряда пылинки мало сказывается на ее выметании вдоль галактического радиуса. И это также ожидаемо в рамках предлагаемого нами механизма “пращи,” т.к. с увеличением заряда пылинки будут сильнее приклеены к магнитным силовым линиям, т.е. они будут меньше отклоняться от них, но свобода их перемещения вдоль этих линий остается прежней, что и требуется для механизма “пращи.” Примечательно также то, что, как и в предыдущем случае, пылинка продолжает следовать магнитным силовым линиям даже на огромных расстояниях, порядка 100 кпк. Конечно, на таких больших расстояниях наша упрощенная модель галактического магнитного поля может оказаться неприменимой. Тем не менее, наши расчеты демонстрируют принципиальную возможность действия механизма “пращи” даже в таких условиях.

Обсуждая роль предлагаемого механизма выметания пыли из галактических дисков, мы хотим отметить, что в каких-то ситуациях он вполне может играть самостоятельную роль как достаточно мощный. В других ситуациях он может играть промежуточную роль, например, выметая пылинки на некоторое расстояние в вертикальном направлении, где они будут дальше ускоряться давлением света звезд, как это предлагается в работе [5]. Комбинированное действие нашего механизма с возмущениями от ударной галактической волны плотности [6], формирующейся в межзвездной среде под действием спиральных рукавов, также может привести к взаимному усилению этих двух эффектов.

4. ВЫВОДЫ

В работе рассмотрено движение межзвездных пылинок под комбинированным воздействием гравитационного поля (с учетом возмущений от галактической волны плотности, ответственной за спиральные рукава) и бисимметричного магнитного поля галактики. Показана принципиальная возможность того, что электрически заряженные пылинки, двигаясь в магнитном и гравитационном полях спиральной галактики, будут выметаться за ее пределы, как в радиальном направлении параллельно плоскости галактического диска, так и в вертикальном направлении. Физическая причина этих двух эффектов связана с магнитным полем, но механизмы различные.

Радиальный перенос пылинок связан с тем, что магнитное поле нестационарное и искривленное. Силовые линии его параллельны спиральным рукавам (т.е. они наклонены к радиальному направлению в плоскости диска под некоторым углом) и вращаются вместе с рукавами. Пылинки, будучи приклеенными к магнитным силовым линиям, имеют возможность свободно перемещаться только вдоль них. Понятно, что искривленные вращающиеся магнитные силовые линии будут выталкивать пылинки наружу вдоль галактического радиуса. Это явление мы и назвали эффектом магнитной пращи. Наши расчеты показывают, что в течение сравнительно короткого времени порядка 500 млн лет пылинки выметаются за пределы галактического диска даже при учете силы сопротивления межзвездного газа.

С другой стороны, дрейфовое движение заряженных пылинок в скрещенных магнитном и гравитационном полях приводит к их выметанию и в вертикальном направлении на расстояние от нескольких сотен парсеков до килопарсека за 0.5–1 млрд лет. Комбинированное воздействие предлагаемого нами механизма с известными процессами, описанными в [5, 6], на наш взгляд, может ускорить выметание пыли как в радиальном, так и в вертикальном направлениях.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят рецензента за ценные замечания. Настоящая работа поддержана Министерством образования и науки РФ (грант № 14.A18.21.0787) и Южным федеральным университетом (грант № 213.01-24/2013-7).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. L. Cortes, G. J. Bendo, K. G. Isaak, et al., *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.* **403**, L26 (2010).
2. T. W. J. Thomson, J. C. Howk, and B. D. Savage, *Astronom. J.* **128**, 662 (2004).
3. S. Bianchi, P. B. Alton, and J. I. Davies, in *ISO Beyond Point Sources: Studies of Extended Infrared Emission*, Ed. by R. J. Laureijs, K. Leech, and M. F. Kessler (2000), ESA SP-455, p. 149.
4. C. A. Norman and S. Ikeuchi, *Astrophys. J.* **345**, 372 (1989).
5. B. M. Shustov, D. Z. Vibe, *Astronomy Reports* **39**, 578 (1995).
6. E. I. Vorobyov and Yu. A. Shchekinov, *New Astronomy* **11**, 240 (2006).
7. C. Konar and M. J. Hardcastle, *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.* **10**, 20 (2013).
8. Л. Спитцер, *Физические процессы в межзвездной среде* (Мир, Москва, 1981).
9. А. А. Рузмайкин, Д. Д. Соколов, А. М. Шукуров, *Магнитные поля галактик* (Наука, Москва, 1988), с. 280.
10. A. Bykov, V. Popov, A. Shukurov, and D. Sokoloff, *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.* **292**, 1 (1997).
11. C. C. Lin, C. Yuan, and F. H. Shu, *Astrophys. J.* **155**, 721 (1969).
12. B. T. Draine and E. E. Salpeter, *Astrophys. J.* **231**, 77 (1979).
13. J. L. Han and G. J. Qiao, *Astronom. and Astrophys.* **288**, 759 (1994).
14. M. E. Jordan and J. C. Weingartner, *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.* **400**, 536 (2009).
15. C. Allen and A. Santillan, *Review Mexican Astronom. Astrofis.* **22**, 255 (1991).

Sweeping-Out of Dust From Spiral Galaxy as a Result of “Magnetic Sling” Effect

Yu. N. Mishurov, I. A. Acharova, M. G. Shevchenko, D. A. Tyshlangov

A new mechanism of sweeping out of dust grains beyond galactic disks both in the radial direction along the galactic plane and in the vertical, cross-disk direction is proposed. The mechanism is driven by the interaction of dust grains with the bisymmetric nonstationary magnetic field of the galaxy, whose lines are curved and corotate with the stellar spiral density wave responsible for the arms. We attribute the radial transfer of interstellar dust grains in the plane of galactic disks to the fact that charged dust grains are “glued” to magnetic field lines and are therefore pushed outward because of the rotation of magnetic field lines and their tilt with respect to the radial direction parallel to the disk plane. In addition, dust is swept out vertically in the cross-disk direction because of the drift motion in crossed magnetic and gravitational fields (both are parallel to the galactic plane). Numerical computations of the motion of dust grains in real magneto-gravitational fields with the allowance for the drag force from interstellar gas show that the time scale of dust grain transport beyond galactic disks is on the order of 1 Gyr or shorter.

Keywords: *dust, extinction—ISM: kinematics and dynamics—ISM: magnetic fields*