

В. И. КРАСОВСКИЙ

О НЕКОТОРЫХ СВОЙСТВАХ КОСМИЧЕСКОЙ ПЫЛИ

(Представлено академиком О. Ю. Шмидтом 12 II 1953)

Любая космическая пылинка или тело, повидимому, в большинстве случаев несет на себе некоторый электрический заряд. Вследствие большей подвижности отрицательных электронов по сравнению с положительными ионами пылинки всегда при отсутствии света заряжаются в ионизованном газе отрицательно. В этом случае их равновесным потенциалом является потенциал, при котором приток разноименных зарядов выравнивается. Вычисления показывают, что в протоно-электронной плазме при максвелловском распределении скоростей величина такого равновесного потенциала E_0 в вольтах приблизительно равняется величине средней энергии газа E в электрон-вольтах, умноженной на $10^{1/2}$. В плазме, содержащей ионы более тяжелые, чем протоны, равновесный потенциал имеет еще большее значение.

В областях космического пространства с большой плотностью излучения (например около звезд) на пылинках более вероятен положительный заряд с потенциалом в несколько вольт за счет фотоэлектрической эмиссии (¹, ²).

Пылинка может также приобрести заряд за счет трения в среде нейтрального газа и даже при полном отсутствии излучения.

Очевидно, что полная нейтрализация зарядов космических пылинок маловероятна, для ее осуществления должны выдерживаться очень узкие интервалы соотношений между плотностями излучения ионизованного и нейтрального газов. Преобладание на пылинках вблизи звезд положительных зарядов, образующихся за счет фотоэлектрической эмиссии, достаточно обосновано в работе В. Г. Фесенкова (²), однако и отрицательный заряд представляется возможным в некоторых областях космического пространства с малой плотностью излучения. Действительно, если допустить, что в некоторых областях космического пространства имеется плотность электронов порядка 1 см^{-3} при плотности коротковолнового излучения, способного вызывать фотоэлектрическую эмиссию (т. е. с $\lambda \leq 2500 \text{ \AA}$), порядка $10^{-15} \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-3}$, то на 1 см^2 поверхности будет падать в секунду около $10^7 - 10^8$ электронов и около 10^6 фотонов. Однако квантовый выход фотоэлектронов всегда меньше единицы, поэтому приток электронов из плазмы не может быть скомпенсирован убылью фотоэлектронов.

Заряды космических пылинок или тел порождают ряд весьма характерных свойств этих объектов. В областях космического пространства, где на частицах преобладают отрицательные заряды за счет ионизованного газа, электроны с энергиями, меньшими $10^{1/2} E$ (E — средняя энергия электронов), отталкиваются от таких заряженных пылинок. Этот процесс совершается без непосредственного соприкосновения электронов с пылинками. Чем медленнее электроны, тем больше эффективное сече-

ние пылинок по сравнению с его газокинетическим сечением. Эффективный радиус шарообразных пылинок R для электронов, у которых энергия E (в электрон-вольтах) меньше равновесного потенциала E_0 (в электрон-вольтах), определяется для случая центрального удара как $R \sim r \frac{E_0}{E}$, где r — газокинетический (геометрический) радиус пылинки. Например, для электронов $E < E_0$, т. е. для тех электронов, которые составляют около 70% их полного числа, эффективное сечение пылинок в протоно-электронной плазме превышает газокинетическое на целый порядок. В конечном счете, проникновение космической пыли в ионизованный газ сопровождается разогреванием последнего за счет потерь кинетической энергии пылинок (в том числе при бесконтактном упругом столкновении с электронами и ионами).

Положительно заряженные пылинки или тела обладают в ионизованном газе свойствами, сходными со свойствами отрицательно заряженных пылинок, но только в отношении положительных ионов.

Из всего этого следует, что:

1. Эффективное сечение заряженных космических пылинок или тел, т. е. большинства космических пылинок или тел, при их столкновениях с облаками ионизованного газа больше их газокинетического (геометрического) сечения.

2. Конденсация межзвездного ионизованного газа вблизи звезд на положительно заряженных пылинках или телах затруднительна.

3. Конденсация межзвездного ионизованного газа более эффективна на нейтральных и отрицательно заряженных частичках, т. е. в областях космического пространства с малой плотностью ультрафиолетового излучения.

4. Конденсация нейтрального межзвездного газа возможна на частичках, несущих как положительный, так и отрицательный потенциалы*.

Одноименные заряды пылинок или тел оказывают существенное влияние и на характер их взаимодействия между собой. Так, одноименно заряженные частицы (безразлично — отрицательно или положительно) могут иметь по отношению друг к другу эффективные сечения, значительно превышающие газокинетические. Как следует из (1), это имеет место, когда энергия заряженной частицы U в электрон-вольтах, определяемая выражением $mv^2/2 = qU/300$, где m — масса частицы, v — ее скорость (в см/сек) и q — ее заряд (в CGSE), оказывается меньше потенциала на поверхности другой частицы (в вольтах). Относительная кинетическая энергия E_{1-2} двух заряженных пылинок при столкновении превращается частично или полностью в потенциальную энергию электрического поля. Эффективное сечение одноименно заряженных шарообразных пылинок l (в см/сек) для центральных ударов определяется выражением $r_1 u_1 r_2 u_2 / l = E_{1-2}$, где r_1 и r_2 — радиусы пылинок (в см) и u_1 и u_2 — соответственно, потенциалы на их поверхностях (в CGSE). Таким образом, l является расстоянием между частицами в момент их максимального сближения. Например, при очень медленном сближении, когда $E_{1-2} = 10^{-11}$ эрг, $r_1 = r_2 = 10^{-5}$ см и $u_1 = u_2 = 3$ в, $l = 10^{-3}$ см. Энергия 10^{-11} эрг значительно больше тепловой кинетической энергии пылинки, находящейся в термодинамическом равновесии с газом даже с $T = 10000^\circ\text{K}$ ($3/2 kT = 2 \cdot 10^{-12}$ эрг, где k — постоянная Больцмана).

* Данный вывод, однако, не означает, что конденсация нейтральных атомов и ионов на пылинках неизбежна во всех указанных случаях. На поверхности пылинок, покрытой адсорбированными атомами (прежде всего) водорода, осуществляется рекомбинация атомов в молекулы. Обычно энергия диссоциации достаточна, чтобы испарить образующуюся молекулу. При нейтрализации на поверхностях пылинок ионов также выделяется энергия нейтрализации, достаточная для испарения образующихся атомов. В общем случае эффективно конденсироваться могут лишь нейтральные молекулы, одноатомные газы и такие многоатомные, у которых энергия диссоциации или поступательного движения не превышает существенно энергию сублимации.

Однако межзвездный газ, повидимому, не имеет столь высокой температуры. Поэтому энергия 10^{-11} эрг заведомо выше средней кинетической энергии реального межзвездного газа. В межзвездном пространстве, повидимому, вопреки общепринятым представлениям, космические пылинки, находящиеся в термодинамическом равновесии с окружающей средой, никогда не соприкасаются механически.

Неупругое столкновение одноименно заряженных частичек с их испарением при столкновениях возможно, когда они обладают по отношению друг к другу значительной кинетической энергией. Такой случай, например, возможен при протекании межзвездной среды, вокруг звезд или их групп. Как уже указывалось ранее (¹), при таких обстоятельствах корпускулярная радиация может фокусироваться, и в фокальных точках около звезд вдоль оси движения могут происходить столкновения частичек со значительной кинетической энергией.

Однако в фокальных точках возможно не только испарение частичек при их непосредственном контактном столкновении. Из-за большого эффективного сечения и обусловленного им повышенного взаимодействия с ионизованным газом заряженные частицы теряют часть своей кинетической энергии, отдавая ее окружающему ионизованному газу. Этот процесс способствует уплотнению межзвездной материи и при благоприятных условиях захвату ее фокусирующими космическими телами. Вполне возможно, что некоторые газовые и пылевые волокнистые туманности имеют именно такое происхождение, а некоторые планетарные туманности являются волокнами, наблюдаемыми по направлению оси волокна.

Столкновение двух одноименно заряженных частичек, совершающееся без их непосредственного соприкосновения, необязательно должно быть упругим, т. е. необязательно, чтобы энергия электрического поля сталкивающихся частиц, образовавшаяся при сближении за счет их кинетической энергии, вновь полностью превращалась при удалении в эту форму энергии. Особенно интересен случай, когда две положительно заряженные частицы перезаряжаются между собой за счет фотоэлектрической эмиссии, не вступая в непосредственное соприкосновение. В этом весьма вероятном вблизи звезд процессе заряд одной из частиц может быть нейтрализован частично или полностью за счет увеличения заряда другой частицы.

Мы не имеем возможности входить здесь в детальное рассмотрение такой перезарядки, уже отмеченной в (¹). Ее возможность основывается на отсутствии разности потенциалов между двумя одноименно заряженными частицами с одинаковыми потенциалами на поверхностях, равными U . Между такими частицами имеется лишь некоторый потенциальный барьер u , который для одинаковых шарообразных частичек определяется выражением $u = U \left(1 - \frac{4r}{l} + \frac{r}{l-r} \right)$, где r — радиус частичек и l — расстояние между их центрами. Так как u всегда меньше U , обусловленного наиболее коротковолновым излучением звезд, то существенная часть фотоэлектронов будет иметь возможность преодолевать указанный барьер. Скорость перезарядки вблизи звезд велика, так как фотоэлектрическая эмиссия при таком нахождении пылинок значительна. Например, даже на расстоянии Земли от Солнца число фотонов, способных вызывать фотоэлектрическую эмиссию, может доходить до $10^{13} - 10^{15}$ и даже более фотонов в сек. на 1 см^2 *. Но Солнце не является самой яркой звездой. Напоминаем, что указанная перезарядка возможна даже при совершенно одинаковых частицах только за счет

* Такая большая фотоэмиссия весьма вероятна, если допустить, что металлические частицы покрыты мономолекулярной пленкой адсорбированного водорода или щелочноземельных металлов (кальция или магния). В этом случае фотоэмиссия будет создаваться коротковолновым излучением, начиная от синей или ближней ультрафиолетовой области спектра.

неодинаковой фотоэлектрической чувствительности или взаимно несимметричного освещения их. В последнем случае у частичек, находящихся в соседстве с одинокой звездой, будет всегда освещена только сторона, обращенная к этой звезде, соответственно и фотоэлектрическая эмиссия будет направлена к освещающей звезде. Более положительно зарядится частица, более удаленная от звезды или обладающая большей фотоэлектрической чувствительностью. При сближении частичек их относительная кинетическая энергия переходит вначале в энергию электрического поля. В случае равных зарядов эта энергия пропорциональна квадрату заряда q^2 . После взаимной перезарядки на величину Δq общая потенциальная энергия двух частичек окажется пропорциональной $q^2 - \Delta q^2$, что указывает на ослабление электростатического взаимодействия между двумя частицами или на невыполнение упругого столкновения. Увеличение положительного заряда и потенциала одной из частичек, совершающееся при посредничестве фотоэлектрической эмиссии, может быть скомпенсировано лишь за счет разряда ее в ионизованном газе. Однако этот процесс, сопровождающийся увеличением температуры ионизованного газа, при преобладании фотоэлектрической эмиссии, будет более медленным, чем описанная перезарядка. Вполне возможно, что космическое радиоизлучение частично может быть радиоизлучением, возникающим при непрерывной фотоэмиссии и перезарядке пылинок.

Мы пренебрегли для упрощения второстепенным взаимодействием частичек, вызываемым индуцированными зарядами. Поле возникающего таким образом диполя ослабевает с расстоянием значительно быстрее, чем поле одноименного заряда.

Поступило
7 II 1953

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ В. И. Красовский, ДАН, 51, № 3, 179 (1946). ² В. Г. Фесенков, Метеорная материя в межпланетном пространстве, 1947, стр. 114—122.