

# АКАДЕМИЯ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

# АСТРОФИЗИКА

ТОМ 13

НОЯБРЬ, 1977

ВЫПУСК 4

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

## МЕХАНИЗМ «ВЫЖИВАНИЯ» КОСМИЧЕСКИХ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ПЫЛИНОК

В последнее время был поставлен вопрос о новом астрофизическом явлении — существовании релятивистских космических пылинок [1, 2]. Такие пылинки могли бы, в частности, вызывать широкие атмосферные ливни с энергией  $E \geq 3 \cdot 10^{19}$  эв. Противоречие между пространственной изотропией таких ливней и отсутствием обрезания их спектра из-за действия реликтового излучения [3] было бы, таким образом, снято. Эта гипотеза сразу же столкнулась с трудностями, так как не было учтено накопление на пылинке электрического заряда. В частности, авторы [4] показали, что для пылинок с прочностью порядка нескольких кГ/мм<sup>2</sup>, накопление заряда вследствие фотоэффекта в световом поле Солнца, а также в результате взаимодействия с ядрами межзвездного водорода приводит к их механическому разрушению и дроблению. В настоящей работе подобный [4] анализ поведения пылинок проведен с учетом экспериментально установленного факта предельно высокой прочности малых металлических объектов (с линейными размерами 100 ÷ 1000 А) [5] и эффекта испарения поверхностных атомов в сильных электрических полях [6].

Условно механизм «выживания» пылинки может быть представлен следующим образом. Первичное накопление на пылинке заряда  $q_{\max}$  обеспечивает создание у ее поверхности электрического поля напряженностью  $F_n$ , достаточного для интенсивного испарения поверхностных атомов. Поскольку это испарение происходит в виде ионов, оно приводит к уменьшению общего заряда пылинки и, следовательно, к снижению напряженности электрического поля. По мере всего дальнейшего движения пылинки к Земле процесс накопления на ней заряда компенсируется его удалением при испарении полем материала пылинки. В результате «выживание» пылинки

(т. е. достижение ею Земли) зависит от ее прочности в поле  $F_n$  и от того, не будет ли «растрочена» вся масса пылинки в процессе испарения полем. Значения испаряющих полей  $F_n$  для четырех материалов (возможность образования из них пылинок отмечалась, например, в [7]), а также соответствующие величины растягивающих напряжений  $\tau_n$  и теоретической прочности  $\tau_T^*$  приведены в табл. 1. Как видно, на пылинках из Mg и C невозможно достижение поля  $F_n$ , т. е. они будут разрушены электростатическими силами уже в начале своего движения.

Таблица 1

Материал	Fe	Mg	C	Si
$F_n, \text{ в/А}$	3.6	2.4	8.2	3.4
$\tau_n, \text{ кг/мм}$	575	255	2980	510
$\tau_T, \text{ кг/мм}$	1100	235	45	540

Оценивая теперь вероятность «выживания» релятивистских пылинок (из железа), положим их энергию в конце пути (при достижении Земли)  $E_k = 10^{20}$  эв. Пороговое значение Лоренц-фактора частицы  $\gamma$ , соответствующее существенному влиянию фотоэффекта (т. е. пороговое значение длины волны фотонов  $\lambda_\phi$  выбирается равным  $\sim 5000 \text{ \AA}$  — примерно в центре распределения энергии в солнечном спектре [18]), определяемое:

$$\gamma' = \left( \frac{3E_k}{4\pi\rho} \right)^{1/4} \left( \frac{F_n \lambda_\phi}{hc} \right)^{3/4}, \quad (1)$$

(где  $\rho$  — плотность пылинки,  $h$  — постоянная Планка,  $c$  — скорость света), составляет 360. В этом случае конечная масса пылинки  $m_k \simeq 5 \cdot 10^{-16}$  г, ее конечный радиус  $R_k = 250 \text{ \AA}$ . Если учитывать фотоионизацию только за счет солнечного излучения, то накопленный пылинкой среднего радиуса  $\bar{R}_0 = \text{const}$  заряд  $\sum q$  при ее движении из бесконечности до Земли, равен

$$\sum_{\text{солн.}} q = \frac{L(\omega) x \bar{R}_0^2}{4c r_{\text{млн}}}, \quad (2)$$

где  $L(\omega)$  — число фотонов с энергией выше порога, испускаемых Солнцем в единицу времени,  $x$  — число электронов, вырываемых из пылинки одним фотоном ( $x = 0.01 - 0.1$ ),  $r_{\text{млн}}$  — радиус земной орбиты.

\* По данным автономномикроскопических экспериментов для образцов указанных размеров реализуется теоретическая прочность.

В данном случае  $\sum_{\text{слоев}} q = 2 \cdot 10^{11}$  кул ( $x = 0.1$ ), чему соответствует

$\sum_{\text{слоев}} n = 6 \cdot 10^7$  атомов. Принимая  $x = 0.1$  имеем, что для „выживания“

пылинки (сейчас мы учитываем только фотоэффект в оптическом излучении Солнца) ее исходный радиус должен составлять 640 А.

Учитывая теперь отдельно накопление пылинкой заряда за счет фотоэффекта в оптическом излучении в межгалактическом пространстве (согласно [9] плотность фотонов составляет  $\sim 10^{-3}$  см $^{-3}$ ), получаем для случая  $\gamma = \gamma' = 360$  среднее значение  $\sum_{\text{м.г.}} n \sim 10^{14} \sim 10^{15}$  атомов. Это оз-

начает, что взаимодействие релятивистских пылинок с  $\gamma \gg \gamma' = 360$  с оптическим излучением в межгалактическом пространстве приводит к их полному уничтожению. Однако для пылинок с  $\gamma < \gamma'$  (порядка 200 и менее) взаимодействие с оптическим излучением в межгалактическом пространстве приводит к удалению с их поверхности (за счет испарения полем) всего нескольких атомных слоев. Отметим, что более точное определение порогового значения  $\gamma'$ , соответствующее „гибели“ пылинок при прохождении ими космологических расстояний, требует учета (и знания) распределения фотонов в оптическом излучении межгалактического пространства.

Рассмотрим теперь взаимодействие пылинок с  $\gamma = 30$  и  $\gamma = \gamma'$  с атомами межзвездного водорода. Для  $\gamma = 30$  конечная масса пылинки  $m_k = 5.9 \cdot 10^{-15}$  г,  $R_k = 560$  А. Скорость накопления заряда на пылинке при ее взаимодействии с атомами водорода постоянна и равна (в предположении, что  $R_0$  усреднено и  $R_0 = \bar{R}_0 = \text{const}$ ):

$$\left(\frac{dq}{dt}\right)_H = D \frac{Z_p n_H \bar{R}_0}{A \beta (F_* \bar{R}_0 \varphi + \varphi)} \quad (3)$$

где  $A$  и  $Z$  — атомный номер и зарядовое число вещества пылинки,  $n_H$  — плотность водорода,  $\rho$  — плотность пылинки,  $\varphi$  — работа выхода материала пылинки,  $D$  — коэффициент. Поскольку основной вклад в энергию удаления электрона из пылинки дает  $qe^2/R_0$ , то  $\varphi$  в уравнении (3) можно пренебречь и величина суммарного заряда  $\sum_H q$ , накопленного на пылинке за время  $\tau$ , не будет зависеть от радиуса пылинки и равна

$$\sum_H q(\tau) = D \frac{Z_p n_H \tau}{A \beta F_*} \quad (4)$$

Существенное накопление заряда происходит лишь в пространстве Галактики, где  $n_H = 0.6$  атомов/см<sup>3</sup>:  $\sum_{\Gamma}^H q = 1.64 \cdot 10^{13}$  кул. Для того чтобы этот избыточный заряд был удален с пылинки, с ее поверхности полем должно быть испарено  $\sum_{\Gamma}^H n_e = 5.1 \cdot 10^7$  атомов; это более

чем на порядок меньше, чем один поверхностный слой пылинки. Поэтому можно считать, что в Галактике и в исходной галактике, где пылинка образовалась, общая потеря пылинкой массы составит  $10^4$  атомов, а исходный радиус практически не изменится. Приблизительно прежней останется и энергия. Накопление заряда во внегалактическом пространстве, с учетом, что там  $n_H = 0.6 \cdot 10^{-5}$  атомов/см<sup>3</sup>, составит, если взять расстояние, например, до Девы А (4100 клс),  $\sum_{\Gamma}^H q = 2.69 \cdot 10^{13}$  кул, что соответствует испарению всего 8 атомов.

Полагая, что время полета пылинки сравнимо со временем существования Вселенной  $\sum_{\Gamma}^H n_e = 2.05 \cdot 10^7$  атомов. Т. е. за все время полета пылинки как в пределах галактик, так и в междугалактическом пространстве, электрическим полем будет испарен один поверхностный слой и потеря массы составит  $\Delta m \approx 9.6 \cdot 10^{-13}$  г.

Необходимо еще учесть возможные атомные смещения в кристаллической решетке при ее бомбардировке атомами водорода. По приближенным оценкам скорость образования таких смещений в Галактике (мы считаем, что энергия первично смещенного атома обеспечивает ему выход из пылинки, но сам такой атом дополнительных смещений не производит)  $N_{\Gamma} = 2.4 \cdot 10^8$  смещений/сек, а во внегалактическом пространстве  $N_{в.г.} = 2.4 \cdot 10^{13}$  смещений/сек. Полагая, что пылинка приходит из наиболее отдаленных областей Вселенной и учитывая атомные смещения в пределах исходной и нашей галактик, общее число удаленных в результате указанного процесса атомов составит  $2 \cdot 10^7$ . Автономномикроскопические исследования показали отсутствие снижения прочности у образцов с соответствующей концентрацией вакансий [10].

В случае  $\gamma = \gamma'$  и  $\tau = 10^{11}$  сек исходный радиус пылинки практически не изменяется и составляет  $R_{min} \sim 250 \text{ \AA}$  (если учитывать взаимодействие пылинки только с атомами межзвездного водорода).

Таким образом, земной атмосферы могут достигать космические релятивистские пылинки, пролетевшие расстояния вплоть до космологических

(порядка  $10^{27}$  см), имеющие металлическую природу, с лоренц-фактором  $\gamma < 360$  при исходных радиусах  $300 \div 600$  А.

Авторы благодарят В. С. Березинского за полезные обсуждения.

*Mechanism of "Surviving" of the Cosmic Relativistic Specks of Dust.*

It is shown that the accumulation of the electrical charge on the relativistic specks of dust as a result of their interaction with the atoms of interstellar gas and photons can be sometimes compensated by evaporation of the specks of dust material in strong electric fields.

1 марта 1977

Институт теоретической  
и экспериментальной физики,  
Москва

Я. С. ЕЛЕНСКИЙ,  
А. Л. СУВОРОВ

ЛИТЕРАТУРА

1. S. Hayakawa, *Astrophys. Space Sci.*, 16, 238, 1972.
2. S. Hayakawa, *Astrophys. Space Sci.*, 19, 173, 1973.
3. A. A. Penzias, R. W. Wilson, *Ap. J.*, 142, 419 1965.
4. V. S. Berezinskii, O. F. Prilutskii, *Astrophys. Space Sci.*, 21, 172 1973.
5. Р. И. Гарбер, Ж. И. Дранова, И. М. Михайловский, *ДАН СССР*, 174, 1044, 1967.
6. E. W. Maller, *Phys. Rev.*, 102, 618, 1956.
7. М. Гринберг, *Межзвездная пыль*, Мир, М., 1970, стр. 34.
8. К. У. Аллен, *Астрофизические величины*, ИИЛ, М., 1960, стр. 169.
9. М. С. Лонгейр, Р. А. Сюняев, *УФН*, 105, 41, 1971.
10. J. A. Hudson, R. S. Nelson, B. Ralph, *Phil. Mag.*, 18, 836, 1968.