Письма в ЖЭТФ, том 27, вып.6, стр. 374 – 378 *20 марта 1978 г.*

О БАЛАНСЕ ЭНЕРГИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ПРИ МНОГОКРАТНОМ РАССЕЯНИИ В СЛУЧАЙНО-НЕОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Л.И.Дорман, М.Е. Кац, Ю.И.Федоров, Б.А.Шахов

На основе уравнения для плотности энергии космических лучей проведен анализ изменения их энергии при многократном рассеянии на случайных неоднородностях магнитного поля, движущихся со скоростью $\mathbf{u}(\mathbf{r})$. Показано, что при положительном радиальном градиенте космических лучей, частицы попадают в режим ускорения.

При распространении космических лучей (КЛ) в межпланетном пространстве происходит обмен энергией между заряженными частицами и вмороженными в плазму солнечного ветра случайными неоднородностями межпланетного магнитного поля. Доминирующим представлением при рассмотрении диссипации энергии в системе КЛ – солнечный ветер является предположение об адиабатическом замедлении заряженных частиц космического излучения, связанное с преобладающей вероятностью догоняющих столкновений с радиально движущимися неоднородностями магнитного поля. Мы покажем ограниченность этих концепций, обусловленную игнорированием конкретного характера пространственного распределения частиц и связанную с этим необходимость пересмотра представлений о характере распространения КЛ в межпланетном пространстве. Более того, резко неоднородный характер расширения плазмы солнечного ветра приводит к наличию своеобразного механизма ускорения КЛ, обусловленного постранственной неоднородностью функции распределения частиц.

Будем исходить из уравнения переноса КЛ [1]

$$\frac{\partial N(\mathbf{r},p,t)}{\partial t}-\frac{\partial}{\partial r_\alpha}\kappa_{\alpha\lambda}(\mathbf{r},p)\frac{\partial N(\mathbf{r},p,t)}{\partial r_\lambda}+\mathbf{u}\frac{\partial N(\mathbf{r},p,t)}{\partial \mathbf{r}}-\frac{p}{3}\frac{\partial N(\mathbf{r},p,t)}{\partial p}\,\mathrm{div}\,\mathbf{u}=0 \tag{1}$$

где $N(\mathbf{r},p,t)$ – плотность частиц с заданной величиной импульса p, $\kappa_{\alpha\lambda}(\mathbf{r},p)$ – тензор диффузии частиц в пространстве, $\mathbf{u}(\mathbf{r})$ – скорость солнечного ветра. По повторяющимся индексам в (1) и ниже подразумевается суммирование.

Соответствующее (1) уравнение для плотности энергии

$$E(\mathbf{r},t)=\int_0^\infty dp\,p^2\epsilon N(\mathbf{r},p,t) \tag{2}$$

КЛ (ϵ – полная энергия частицы) имеет следующий вид

$$\frac{\partial E(\mathbf{r},t)}{\partial t}+\mathrm{div}\,\mathbf{q}(\mathbf{r},t)=\frac{1}{3}\int_0^\infty dp\,p^3v\left(\mathbf{u}\frac{\partial N(\mathbf{r},p,t)}{\partial \mathbf{r}}\right), \tag{3}$$

где

$$\mathbf{q}(\mathbf{r},t)=\int_0^\infty dp\,p^2\epsilon\,\mathbf{j}(\mathbf{r},p,t) \tag{4}$$

– плотность потока энергии КЛ и

$$j_\alpha(\mathbf{r},p,t)=-\kappa_{\alpha\lambda}(\mathbf{r},p)\frac{\partial N(\mathbf{r},p,t)}{\partial r_\lambda}-u_\alpha(\mathbf{r})\frac{p}{3}\frac{\partial N(\mathbf{r},p,t)}{\partial p} \tag{5}$$

плотность потока КЛ; $v = \frac{c^2 p}{\epsilon}$ — скорость частицы, c — скорость света.

С другой стороны, уравнению (1) соответствует закон сохранения числа частиц:

$$\frac{\partial n(\mathbf{r},t)}{\partial t} + \mathrm{div}\,\mathbf{I}(\mathbf{r},t) = 0, \qquad (6)$$

где

$$n(\mathbf{r},t) = \int_0^\infty dp\,p^2 N(\mathbf{r},p,t)$$

— плотность частиц и

$$\mathbf{I}(\mathbf{r},t) = \int_0^\infty dp\,p^2 \mathbf{j}(\mathbf{r},p,t)$$

— плотность потока КЛ со всеми энергиями.

Уравнение (3) имеет вид уравнения непрерывности с источником в правой части, знак которого и определяет характер изменения плотности энергии КЛ. Как следует из (3) знак члена, соответствующего источнику при радиальном характере истечения плазмы солнечного ветра, определяется направлением радиального градиента КЛ и при положительном радиальном градиенте (что имеет место для галактических КЛ) этот член представляет собой количество энергии, приобретаемой частицами в единице объема за единицу времени при их взаимодействии с движущимися неоднородностями магнитного поля. Таким образом, в этом случае полное число частиц в соответствии с уравнением (6) сохраняется, а плотность энергии частиц увеличивается — ситуация типичная для наличия процесса ускорения частиц. Если радиальный градиент КЛ отрицателен, то имеет место обратный процесс — частицы отдают энергию неоднородностям магнитного поля и замедляются.

Такой же вывод о характере обмена энергией между КЛ и движущимися неоднородностями магнитного поля следует из уравнения (1). Уравнение (1) есть уравнение типа Фоккера — Планка и для выяснения физического смысла входящих в это уравнение кинетических коэффициентов его необходимо записать в канонической форме, т.е. в виде условия сохранения числа частиц в фазовом пространстве:

$$\frac{\partial N(\mathbf{r},p,t)}{\partial t} + \mathrm{div}\,\mathbf{j}(\mathbf{r},p,t) + \mathrm{div}_p \mathbf{J}_p(\mathbf{r},p,t) = 0, \qquad (7)$$

где $\mathbf{J}_p(\mathbf{r},p,t)$ — плотность потока частиц в импульсном пространстве, а индекс p у оператора div_p обозначает, что в рассматриваемом случае необходимо учитывать только зависящую от модуля импульса часть оператора дивергенции в импульсном пространстве. Учитывая (7), запишем уравнение (1) в виде

$$\frac{\partial N(\mathbf{r},p,t)}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial r_a}\left\{-\kappa_{a\lambda}(\mathbf{r}_o p)\frac{\partial}{\partial r_\lambda}+D_{ap}\frac{\partial}{\partial p}\right\}N(\mathbf{r},p,t)+\frac{1}{p^2}\frac{\partial}{\partial p}p^2 D_{pa}\frac{\partial N(\mathbf{r},p,t)}{\partial r_a}=0, \tag{8}$$

где

$$D_{ap}=-D_{pa}=-\frac{1}{3}pu_a \tag{9}$$

компоненты перекрестного тензора диффузии частиц, описывающие процесс обмена энергией КЛ с вмороженными в плазму солнечного ветра неоднородностями магнитного поля. В соответствии с общей теорией, величины D_{ap}, D_{pa} (также, как и $\kappa_{a\lambda}$) удовлетворяют принципу симметрии кинетических коэффициентов. Как следует из (8), величина вектора плотности потока частиц в импульсном пространстве определяется выражением

$$J_p=D_{pa}\frac{\partial N(\mathbf{r},p,t)}{\partial r_a}.$$

Следует отметить, что в первоначальной формулировке задачи о распространении КЛ [2 – 4] вид уравнения Фоккера – Планка постулировался (в отличие от работы [1], в которой впервые был проведен последовательный вывод этого уравнения непосредственно из кинетического уравнения) на основе концепции о систематической потере энергии частицами при их взаимодействии с радиально расходящимися неоднородностями магнитного поля. При этом использовалось неправильное выражение для потока частиц $\mathbf{j}(\mathbf{r},p,t)$ в пространстве, а поток частиц в импульсном пространстве определялся выражением

$$J_p=\left\langle\frac{\partial p}{\partial t}\right\rangle N(\mathbf{r},p,t)$$

где кинетический коэффициент $\left\langle\frac{\partial p}{\partial t}\right\rangle$ имеет смысл изменения импульса частицы в единицу времени, и для вычисления которого привлекались интуитивные соображения, использующие предположение о систематической потере энергии частицами. Несмотря на полученное в результате этих ошибочных предположений, совершенно правильное уравнение переноса, приписываемый ему канонический вид не соответствует действительности[1)] и интерпретация на основе этого уравнения физи-

---

[1)] В дальнейших работах (см., например, [5]) использовалось правильное выражение для потока частиц $\mathbf{j}$ (см. (5)), соответствующее полученному в [1], однако, по-прежнему постулировалась неправильная каноническая форма уравнения переноса.

ческих явлений, имеющих место при распространении КЛ в межпланетном пространстве оказывается неверной. Более того, при последовательной феноменологической трактовке вообще не возникает задачи о вычислении кинетического коэффициента $\left\langle \frac{\partial p}{\partial t} \right\rangle$ а, как видно из (8), необходимо определить перекрестный коэффициент диффузии D_{pq}, характеризующий процесс обмена энергией между КЛ и магнитными неоднородностями, обусловленный пространственной неоднородностью функции распределения частиц в соответствии с общим выводом, следующим из уравнения (3). Таким образом, концепция адиабатического замедления частиц не носит глобального характера, а процесс обмена энергией в системе КЛ – солнечный ветер определяется конкретным видом функции распределения частиц. При этом галактические КЛ, распространяясь в солнечном ветре, попадают в режим ускорения, приобретая энергию в процессе рассеяния на радиально движущихся неоднородностях магнитного поля.

В заключение укажем, вытекающие из уравнения (8), соотношения, определяющие изменение импульса (энергии) частицы в единицу времени:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{p}{3}\left(\mathbf{u}\,\frac{1}{N}\,\frac{\partial N}{\partial \mathbf{r}}\right), \quad \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{a\epsilon}{3}\left(\mathbf{u}\,\frac{1}{N}\,\frac{\partial n}{\partial \mathbf{r}}\right),$$

$$a = \frac{\epsilon + 2mc^2}{\epsilon + mc^2}$$

где m – масса покоя частицы.

Из этих соотношений также видно, что изменение энергии частицы определяется знаком радиального градиента космических лучей и при положительном радиальном градиенте имеет место увеличение энергии частицы. Особенностью приведенных соотношений является то, что среднее изменение энергии частицы определяется величиной относительного градиента космических лучей – параметром, характеризующим коллективные свойства, рассматриваемого ансамбля частиц.

Институт геофизики
Академии наук
Украинской ССР

Поступила в редакцию
10 февраля 1978 г.

Литература

[1] А.З.Долгинов, И.Н.Топтыгин. ЖЭТФ, 51, 1771, 1966.

[2] Г.Ф.Крымский. Геомагн. и аэроном., 4, 6, 1964.

[3] L. I. Dorman. Proc. 9-th Cosmic Rays Intern. Conf., vol.2, 292, 1965

[4] E.N.Parker. Planetary Space Sci., 13, 9, 1965.

[5] J.Jokipii .Rev. Geophys. Space Phys., 9, 27, 1971.