

УДК 539.1.01

Деградационно-каскадная модель космических лучей

В. А. Никеров

Московский государственный институт электроники и математики, Москва, Россия

А. А. Рухадзе

Институт общей физики им. А. М. Прохорова, РАН, Москва, Россия

Г. В. Шолин

Российский научный центр "Курчатовский институт", Москва, Россия

Степенной характер энергетического распределения космических лучей (КЛ) в широком диапазоне энергий свидетельствует об их деградационном происхождении. Иными словами, каскад КЛ является степенным не потому, что он ускоряется в ударных волнах или электромагнитных полях, а потому, что он каскад. Анализ и сравнение спектров КЛ с типичными деградационными спектрами каскадных процессов позволяют сделать выводы о кинетике процессов возникновения и распространения КЛ, в частности, о дифференциальных вероятностях потери энергии, о вкладе каскадности, а также оценить энергию и количество первичных частиц КЛ.

PACS: 26.40.+r

Ключевые слова: космические лучи, каскадные процессы, деградационные процессы, степенные энергетические распределения.

Введение

Дадим сначала определения для описания модели КЛ. Деградационный процесс — это потери энергии быстрой частицей, например, за счет каскадных процессов или столкновений, а каскадный процесс — это потери энергии быстрой частицей за счет передачи энергии образующимся в каскаде вторичным частицам.

Первое деградационное уравнение (уравнение деградационного спектра) для ассиметричных потоков в пространстве энергий было сформулировано У. Фано и Л. Спенсером [1, 2].

Г. Бете и Дж. Якоб [3] в теории возраста рассмотрели и пространственную каскадную задачу. Долгое время общая задача считалась сложной и решаемой в основном методом Монте-Карло. Однако в выполненных в Курчатовском институте работах [4, 5] удалось сформулировать пространственно-энергетическую теорию деградационно-диффузионного каскада и деградационное уравнение, допускающие аналитические решения для широкого круга задач. В целом удалось получить решения для деградационно-диффузионного каскада заряженных частиц, атомов и молекул в диапазоне начальных энергий от единиц мегаэлектронвольт до долей электронвольт.

Рассматривались проблемы транспортировки релятивистских и нерелятивистских электронных пучков [4—11], физики верхней атмосферы [5, 6], кинетики гамма-лазера [11, 12], химической кинетики [6] и др. [13]. Энергетические распределения были получены с помощью деградационно-каскадной модели, пространственные распределения — с помощью модели обобщенной диффузии. Было выявлено фундаментальное свойство деградационно-диффузионного каскада: для самых разных частиц и реальных процессов практически всегда энергетический спектр быстрых частиц в широком диапазоне энергий имеет степенной характер убывания.

Еще в работах [5, 14] было подмечено, что каскад КЛ в широком диапазоне энергий по сути (деградация энергии и каскадность) и по форме (степенное убывание) является деградационно-диффузионным каскадом и может быть описан соответствующей теорией. Были выявлены прямая аналогия и сходные энергетические зависимости для ионизационного каскада пучков быстрых электронов и деградационного каскада КЛ. Таким образом, удалось привлечь внимание астрофизиков к деградационно-каскадной модели КЛ, однако математический аппарат оказался непривычен для широкого круга ученых.

В 2008 г. авторы проанализировали последние достижения в области КЛ и вновь поразились, насколько информативно они описываются с помощью деградиционно-каскадной модели. Сегодня глобальные степенные распределения КЛ по энергии обычно объясняются частными и недостаточно глобальными полуэмпирическими механизмами ускорения частиц в ударных волнах или электромагнитных полях. Такие объяснения, применяемые в многопорядковом энергетическом диапазоне, на наш взгляд, похожи на подгонку или полуэмпирику. Тем не менее, существует более простая и глобальная интерпретация КЛ через неравновесные деградиационные распределения.

Вид равновесных и неравновесных распределений определяется свойствами пространства. Так, равновесное экспоненциальное распределение Максвелла выводится уже из изотропии пространства и независимости распределений по координатам. В свою очередь типичный степенной характер зависимости от энергии неравновесных деградиационных распределений можно связать с трехмерностью пространства. Например, степенное квадратичное убывание вероятности и сечения кулоновского взаимодействия с ростом потери энергии выводятся из степенного квадратичного убывания кулоновской силы в трехмерном пространстве с ростом расстояния.

Следует подчеркнуть, что типичный деградиационный каскад — это обычно не рождение из одной частицы двух с половиной (или сравнимой) энергии. Несложно показать, что такой процесс дает экспоненциальное распределение, что нехарактерно как для КЛ, так и для ионизационного каскада. Скорее, типичный деградиационный каскад — это рождение энергичной частицей первого поколения большого количества частиц второго поколения с относительно малой энергией, рождающих частицы третьего поколения и т. д.

Математическое описание деградиационного каскада космических лучей и ионизационного каскада

Деградиационный каскад быстрых электронов (аналог деградиационного каскада КЛ) описывается деградиационным уравнением [5, 12] относительно деградиационного спектра $Z(E)$:

$$Z(E) = \int_{E+I}^{\infty} P_T^i(T-E)Z(T)dT + P_{E+U}^{ex}(U)Z(E+U) + f_1(E) \quad (1)$$

с граничным условием $Z(\infty) = 0$.

Здесь $P_E^{\xi}(W)$ — вероятность того, что частица с энергией E в процессе типа ξ (i — ионизация, ex — возбуждение) потеряет энергию W ;

$f_1(E)$ — энергетическое распределение первичных частиц;

I и U — средние потенциалы ионизации и возбуждения частиц среды.

При этом одной первичной частице с энергией E_0 соответствует δ -функция

$$f_1(E) = \delta(E - E_0).$$

Деградиационное уравнение отчасти похоже на кинетическое уравнение, рассматривающее обмен энергией между частицами в результате столкновений. Однако есть существенные различия. Кинетическое уравнение учитывает баланс (приток и отток) частиц в данную область энергий, в свою очередь деградиационное уравнение учитывает лишь приток частиц, что очень удобно для деградиационных задач с асимметричными потоками в пространстве энергий. В кинетическом уравнении традиционно определяющую роль играют сечения столкновений, а деградиационное уравнение определяется вероятностями процессов. При этом каскадные процессы могут быть бесстолкновительными (спонтанными типа β -распада) и сопровождаться рождением вторичных частиц.

В широком диапазоне энергий функцию распределения можно получить [6] из деградиационного спектра, домножив последний на время жизни частицы с энергией E .

Сложность описания каскадных процессов КЛ с помощью кинетического уравнения привела к тому, что эта задача решалась методом Монте-Карло, что не позволило выявить сколь-нибудь существенных аналитических зависимостей. В свою очередь деградиационное уравнение позволяет получить аналитические решения практически для любого каскада. При этом для ультрарелятивистских КЛ не так важен сорт частицы, как ее энергия (важна не масса, а энергия и импульс).

Это дало возможность выявить аналогию между хорошо изученными энергетическими распределениями ионизационного каскада электронов с энергией 1 кэВ—1 МэВ и распределениями КЛ с существенно более высокими энергиями.

Деградиационное уравнение решается путем сведения к системе интегральных уравнений для последовательных поколений ($k = 1, 2, 3, \dots$ — номер поколения):

$$Z_k(E) = \int_{E+I}^{\infty} P_T^{i1}(T-E)Z_k(T)dT + P_{E+U}^{ex}(U)Z_k(E+U) + f_k(E), \\ Z_k(\infty) = 0, \dots$$

Парциальная вероятность ионизации представлена в виде суммы двух членов, соответствующих первичному и вторичному электронам, т. е.

$$P_T^i(W) \equiv P_T^{i1}(W) + P_T^{i2}(W) \sim W^{-3} + (E - W + I)^{-3},$$

причем первичному электрону, по определению, соответствует составляющая $P_T^{i1}(W) \sim W^{-3}$.

Типичный степенной характер деградационного спектра следует из уравнения (1), поскольку интеграл от степенной функции дает обычно степенную функцию.

Деградации энергии для каждого поколения в нулевом приближении соответствует дифференциальное уравнение

$$\frac{dZ_k^{(0)}(E)}{dE} = -\frac{f_k(E)}{W_k},$$

(W_k — средняя потеря энергии в столкновении частиц k -го поколения) с решением

$$Z_k^{(0)}(E) = \int_E^\infty f_k(E) dE / W_k.$$

Предложенный алгоритм для деградационного спектра с учетом размножения электронов вплоть до третьего поколения (вкладом последующих поколений можно пренебречь) дает решение

$$Z_\Sigma(E) = \frac{1}{W_1} \times \left\{ 1 + \frac{\alpha_0 \gamma_2 E_0 I^2 (1+q)}{W_2 (E+I)^2} \left[1 + \frac{6\alpha_2 I^2 \ln\left(\frac{E}{I} + 2\right)}{(E+I)^2} \right] \right\},$$

где α_n и γ_n — усреднения вероятностей ионизации и возбуждения по степенным функциям;

q — поправка на частицы 3-го поколения.

На рис. 1, *a* представлен характерный вид деградационных спектров торможения электрона с различной начальной энергией (1 МэВ и 1 кэВ) в молекулярном водороде (видно, что спектры с различной начальной энергией подобны), а на рис. 1, *б* — деградационный спектр торможения электрона с начальной энергией 1 МэВ в молекулярном фторе.

Из сопоставления рис. 1, *a* и *б* видно, что спектры торможения в разных средах подобны и различаются в первую очередь величиной потенциала ионизации (средней потерей энергии в неупругом процессе).

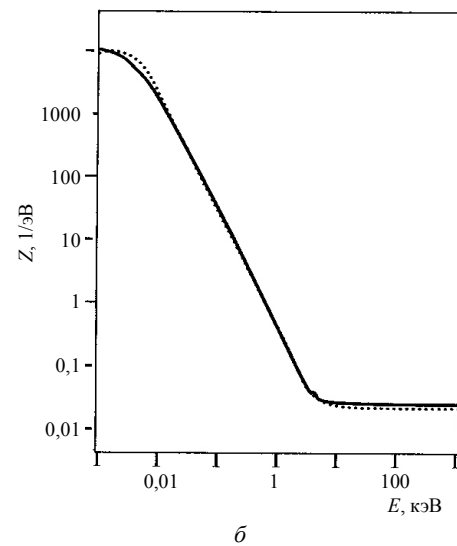
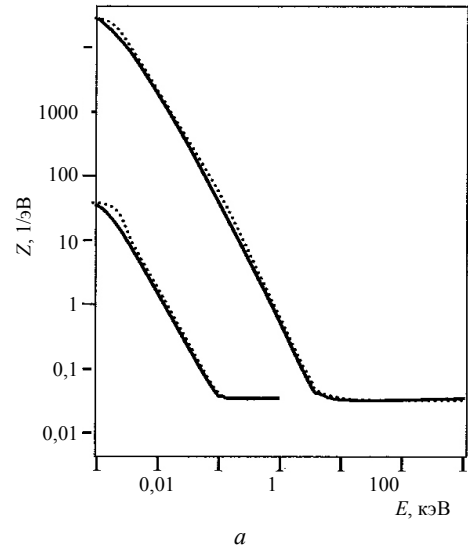


Рис. 1. Деградационные спектры торможения электрона:
a — с начальными значениями энергии 1 МэВ и 1 кэВ в молекулярном водороде;
б — с начальным значением энергии 1 МэВ в молекулярном фторе:
 ————— аналитический расчет; - - - - - численный расчет

Таким образом, можно показать, что с точностью 10 % для молекул водорода, гелия, азота, кислорода в диапазоне энергий от сотен электронвольт до единиц мегаэлектронвольт различия сводятся к разным потенциалам ионизации:

$$Z_\Sigma(E) = \frac{0,6}{I} + \frac{0,5E_0}{(E+I)^2} \left(1 + \frac{3I^2 \ln(E/I + 2)}{(E+I)^2} \right). \quad (2)$$

Особый интерес представляет вклад первичных, вторичных и третичных частиц в суммарный энергетический спектр (рис. 2).

Итак, сходство между энергетическими распределениями ионизационного каскада электронов в диапазоне энергий от сотен электронвольт до еди-

ниц мегаэлектронвольт и распределениями КЛ с существенно более высокими энергиями позволяет предположить каскадную природу образования КЛ, что дает возможность сделать ряд выводов.

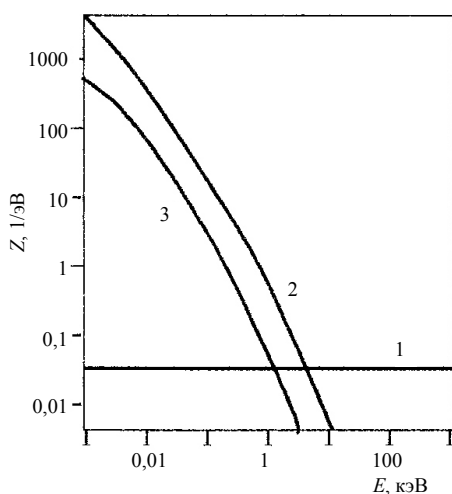


Рис. 2. Парциальный вклад 1-го, 2-го и 3-го поколений электронов ионизационного каскада при торможении электрона с начальным значением энергии 1 МэВ в молекулярном водороде

Прежде всего дифференциальные вероятности потери энергии частицами КЛ сходны с вероятностями ионизационного каскада электронов в диапазоне энергий от сотен электронвольт до единиц мегаэлектронвольт.

Следует заметить, что степенной вид деградационных распределений имеет начало и конец, которым соответствуют два излома деградационного спектра. Нижний излом имеет место при энергиях E_{1br} порядка средней единичной потери энергии в каскадном процессе. Так, для ионизационного каскада $E_{1br} \approx 2 I$. Верхний излом имеет место в области энергии E_{2br} , где примерно равны количества первичных и вторичных частиц. Верхний излом в соответствии с решением деградационного уравнения (2) связан с энергией E_0 первичных частиц КЛ:

$$E_0 \approx E_{2br}^2 / I. \quad (3)$$

Имеющиеся экспериментальные данные позволяют оценить энергию первичных частиц КЛ, а также их количество (см. (2) и рис. 2).

Если излом имеет место при $E_{2br} \sim 10^{15-19}$ эВ и $I \sim 10^9$ эВ, то оценка снизу в соответствии с (3) дает энергию первичной частицы $E_0 \sim 10^{21-29}$ эВ. Если энергия Вселенной 10^{90} эВ, то в этом случае оценка дает количество первичных частиц 10^{61-69} . Оценка сверху для одной—двух первичных частиц

дает энергию первичной частицы КЛ 10^{90} эВ, а энергия излома в соответствии с (3) $E_{2br} \sim 10^{50}$ эВ.

Выводы

1. Степенной характер энергетического распределения КЛ в широком диапазоне энергий свидетельствует об их деградационном происхождении, иными словами, каскад КЛ является степенным не потому, что он ускоряется в ударных волнах или электромагнитных полях, а потому, что он каскад.

2. Дифференциальные вероятности потери энергии частицами космических лучей сходны с вероятностями ионизационного каскада электронов в диапазоне энергий от сотен электронвольт до единиц мегаэлектронвольт. Подобие этих вероятностей может носить фундаментальное объяснение, связанное с трехмерностью Вселенной.

3. Фундаментальным свойством деградационно-каскадного энергетического распределения частиц является излом в конце степенного спада. Если излом имеет место при 10^{15-19} эВ (оценка снизу), то энергия первичной частицы — 10^{21-29} эВ, а количество первичных частиц 10^{61-69} . Оценка сверху для одной—двух первичных частиц дает энергию первичной частицы 10^{90} эВ и энергию излома — 10^{50} эВ.

Литература

1. Fano U. // Phys. Rev. 1953. V. 92. No. 2. P. 328.
2. Spencer L. V., Fano U. // Ibid. 1954. V. 93. No. 6. P. 1172.
3. Bethe H. A., Jacob J. H. // Ibid. A. 1977. V. 16. No. 5. P. 1952.
4. Никеров В. А., Шолин Г. В. // Физика плазмы. 1978. Т. 4. № 6. С. 1265.
5. Никеров В. А., Шолин Г. В. Кинетика деградационных процессов. — М.: Энергоатомиздат, 1985.
6. Никеров В. А. Применения частиц и излучений высокой энергии. — М.: Высш. шк., 1988.
7. Никеров В. А. Электронные пучки за работой. — М.: Энергоатомиздат, 1988.
8. Абрамов В. Н., Никеров В. А.: Тез. докл. 1-го Междунар. совещ. "Радиационная физика твердого тела". — г. Сочи, 1989. С. 22.
9. Кузнецов Н. М., Никеров В. А. // Химическая физика. 1995. Т. 14. № 4. С. 66.
10. Никеров В. А., Пожидаев Е. Д. Транспортировка пучков заряженных частиц через различные среды. — М.: МГИЭМ, 1997.
11. Карягин С. В., Никеров В. А. // Химическая физика. 1997. Т. 16. № 8. С. 99.
12. Nikerov V. A., Sholin G. V. Fast Particle Degradation Diffusion Cascade. — Harwood Academic Publishers, Supplement to Phys. Rev., 2000.
13. Никеров В. А., Шолин Г. В., Русанов В. Д. // Доклады АН СССР. 1979. Т. 248. № 3. С. 610.
14. Никеров В. А. // Химия и жизнь. 1984. № 12. С. 107.

Статья поступила в редакцию 30 января 2009 г.

Degradation cascade model of cosmic rays

V. A. Nikerov

Moscow State Institute of Electronics and Mathematics, 3/12 Large Trekhsvyatitsky al.,
109028, Moscow, Russia
E-mail: nik@cea.ru

A. A. Rukhadze

Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences, 38 Vavilova str., 119991, Moscow, Russia
E-mail: rukh@fpl.gpi.ru

G. V. Sholin

Russian Scientific Center Kurchatov Institute, 1 Academician Kurchatov sq., 123182, Moscow, Russia
E-mail: sholin2@rambler.ru

The power dependency of cosmic rays energy distribution over a wide energy range shows their degradation origin. Analysis of the cosmic rays spectra in comparison with the typical degradation spectra of cascade processes makes possible to describe the kinetics processes of origin and propagation of cosmic rays, in particular the differential loss energy probabilities, the cascade role, and to estimate the energy and number of primary cosmic rays particles.

PACS: 26.40.+ r

Keywords: cosmic rays, cascade processes, degradation processes, power dependency of energy distribution.

Никеров Виктор Алексеевич, профессор
109028, Москва, Б. Трехсвятительский пер., д. 3/12, МИЭМ
Тел. (495) 235-20-22; E-mail: nik@cea.ru

Рухадзе Анри Амвросиевич, главн. науч. сотр., профессор
119991, Москва, ул. Вавилова, 38, ИОФ РАН
Тел. 8 (499) 135-02-47; E-mail: rukh@fpl.gpi.ru

Шолин Геннадий Васильевич, главн. науч. сотр.
123182, Москва, пл. академика Курчатова, 1, РНЦ "Курчатовский институт"
Тел. 8 (499) 196-75-68; E-mail: sholin2@rambler.ru