

02;09

Определение ориентации оси каскадного ливня космической частицы сверхвысокой энергии

© А.Д. Филоненко

Восточноукраинский национальный университет, Луганск

В окончательной редакции 16 августа 2001 г.

Найдено практическое решение задачи о направлении оси каскадного ливня с помощью двух околосолнечных модулей и системы трех взаимно перпендикулярных диполей, установленных на каждом из них. Это решение дополняет ранее опубликованные результаты исследования возможности определения энергии электромагнитного каскада по радиочастотному компоненту излучения δ -электронов ливня.

Известно, что успехи физики космических лучей очень высокой энергии ($W_0 > 10^{19}$ eV) связаны в основном с развитием традиционных методов детектирования [1]. Однако верхняя энергетическая граница этих установок, по-видимому, не поднимется в ближайшем будущем выше, чем 10^{20} – 10^{21} eV. Например, гигантский детектор известного проекта "Пьер Оже" будет иметь суммарную рабочую площадь для обоих полушарий, равную 600 km^2 [2]. Это соответствует частоте событий 60 частиц в год для диапазона энергий $W_0 > 10^{20}$ eV. Имеющиеся на сегодня данные о потоке космических лучей для таких энергий свидетельствуют о незначительном изменении показателя энергетического спектра [3]. С учетом этого факта частота событий для частиц с энергией $W_0 > 10^{21}$ eV составит для этой установки всего около одной частицы за год. Для получения надежной информации о космических лучах эту величину следует поднять хотя бы на один порядок. Сохранение прежней частоты регистрации (60 событий в год) для частиц с энергией $W_0 > 10^{21}$ eV потребует увеличения площади детектора почти на два порядка. Эти данные свидетельствуют о том, что детектор на традиционных принципах с площадью около 10^6 km^2 в настоящее время построить практически невозможно.

По-видимому, уже сейчас есть другая возможность увеличить площадь детектора до 10^7 km^2 . Имеется в виду метод радиодетектирования. Характеристики поля излучения, вызванного δ -электронами каскадного ливня в газообразной или конденсированной среде, могут вполне обеспечить его реализацию [4–6]. Особенно перспективной представляется такая возможность для радиоастрономического метода [7–10], а также для детектирования частиц высокой энергии с лунной орбиты [11–12].

В методе радиодетектирования космических лучей (КЛ) имеется одно существенное обстоятельство. За всю историю его развития была единственная попытка экспериментально определить направление прихода космической частицы [13]. Весьма приблизительно оно определялось посредством измерения относительного запаздывания радиосигналов, наводимых на антеннах радиодетектора черенковским компонентом радиоэмиссии широкого атмосферного ливня. Известно [14], что эта составляющая изучения ливня настолько слаба за пределами узкого конуса излучения, что не может быть достаточно эффективно использована в методе радиодетектирования. Для детектирования космических частиц очень высокой энергии ($W_0 > 10^{21} \text{ eV}$) с помощью лунных орбитальных модулей такой метод в принципе не применим.

В этой работе показано, как это может быть сделано, если каскадный ливень распространяется в конденсированной непроводящей электрический ток среде. В этом случае можно не только определить направление прихода частицы, но и с достаточной для практических целей точностью найти ее энергию. Доказательство этих фактов, вместе с ранее опубликованными результатами исследования механизма радиоэмиссии δ -электронов каскадного ливня в области длин волн $\lambda > L$, где L — эффективная длина каскада, ставит на принципиально новую основу метод радиодетектирования космических лучей сверхвысокой энергии ($W_0 > 10^{21} \text{ eV}$) на окололунной орбите.

Определение направления оси каскадного ливня в этом случае должно осуществляться с помощью трех взаимно перпендикулярных вибраторов. Известно, что пространственная диаграмма излучения изолированного вибратора длиной $2a$ определяется выражением:

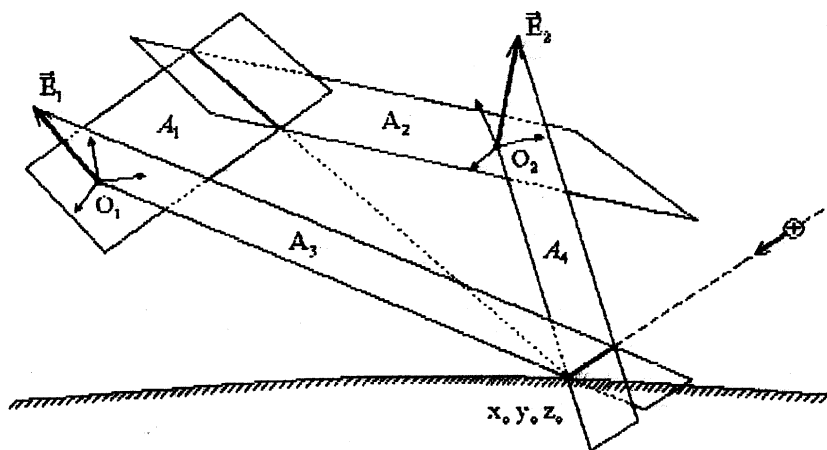
$$F(\alpha) = \frac{\cos(ma \cos \alpha) - \cos ma}{(1 - \cos ma) \cdot \sin \alpha}, \quad (1)$$

где $m = 2\pi/\lambda$ и α — угол между осью диполя и направлением наблюдения \mathbf{n} (см., например, [15]). Обычно в качестве простых антенн

(и как элементы более сложных) используются полуволновые вибраторы. Однако если рассматривать реальную конструкцию детектора на орбите искусственного спутника Луны, то применение полуволнового вибратора ($a = \lambda/4$) длиной около $2a = 5m$ (например, для подходящей в этом случае частоты $\nu = 30$ МГц [9–10]) может вызвать определенные технические трудности. В таких условиях часто используют укороченные вибраторы, в цепь которых включают последовательно индуктивности для сохранения резонансной частоты. В этом случае легко убедиться, что выражение (1) с достаточной для практических целей точностью можно заменить простейшей функцией $F_1(\alpha) = \sin \alpha$. Например, при укорочении полуволнового вибратора в два раза ($a = \lambda/8$) отличие между этими диаграммами не превышает 2%. Поэтому будем использовать далее нормированную функцию $F_1(\alpha) = \sin \alpha$ в качестве пространственной диаграммы направленности приемной антенны детектора. Кроме этого, будем учитывать, согласно [4–6], тот факт, что пространственная диаграмма излучения ливня в диапазоне длин волн $\lambda > L$ приблизительно выражается также с помощью функции $F_1(\alpha)$, т.е. напряженность поля излучения в произвольной точке равна $E = E_0 \sin \alpha$, где α — угол между направлением излучения \mathbf{n} и осью каскада. Известно, кроме этого, что вектор напряженности \mathbf{E} лежит в плоскости, составленной осью ливня (или диполя) и направлением наблюдения. В дальней зоне напряженность поля $\mathbf{E} \perp \mathbf{n}$ всегда.

Для определения направления оси каскадного ливня, а следовательно и направления прибытия космической частицы, на орбите Луны должны находиться два модуля, каждый из которых должен иметь три одинаковых взаимно перпендикулярных вибратора, усилители сигналов и измерители амплитуды э.д.с, наводимых в каждой антенне, а также комплекс приборов для определения положения модуля относительно системы координат, связанной с Луной (см. рисунок). Для уменьшения ошибки измерения направления прихода при заданной высоте орбиты h расстояние между модулями не должно быть намного меньшим, чем расстояние прямой видимости $S = 2\sqrt{2R_m h}$.

Каскадный ливень в грунте Луны, вызванный прохождением заряженной частицы сверхвысокой энергии через ее поверхность, наведет э.д.с. u_{1x}, u_{1y}, u_{1z} и u_{2x}, u_{2y}, u_{2z} на клеммах соответствующих антенн первого и второго модулей. Очевидно (см. например, [15]), она может быть выражена через величину напряженности поля E и направляющие косинусы углов ϕ, ξ, η . Это дает систему из 8 уравнений для опреде-



Определение положения оси каскадного ливня.

ления направляющих косинусов векторов \mathbf{E}_1 и \mathbf{E}_2 в системе координат каждого из модулей:

$$u_{lx} = \frac{lE_i}{R_i} \sin \alpha_i \cos \phi_i,$$

$$u_{ly} = \frac{lE_i}{R_i} \sin \alpha_i \cos \xi_i, \quad i = 1, 2, \quad (2)$$

$$u_{lz} = \frac{lE_i}{R_i} \sin \alpha_i \cos \eta_i,$$

$$\cos^2 \phi_i + \cos^2 \xi_i + \cos^2 \eta_i = 1,$$

где l — эффективная длина антенны, i — номер модуля, R_i — расстояние от модуля с номером i до ливня, α_i — угол между направлением оси ливня и вектором \mathbf{R}_i .

Рассмотрим прямую, определяемую пересечением плоскостей A_1 и A_2 , проведенных через начало координат каждого модуля. Направляющим вектором для каждой плоскости выберем соответственно \mathbf{E}_1 и \mathbf{E}_2 , составляющие которых пропорциональны э.д.с., наводимой в

соответствующих антеннах:

$$\begin{aligned} u_{1x}x' + u_{1y}y' + u_{1z}z' &= 0, \\ u_{2x}x'' + u_{2y}y'' + u_{2z}z'' &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Если в произвольной точке прямой (3) поместить источник, то направление излучения n_1 и n_2 на каждый из модулей будет перпендикулярно соответственно к \mathbf{E}_1 и \mathbf{E}_2 для произвольно выбранных углов α . Другими словами, каскадный ливень (как точка) для данного набора величин u_{1x} , u_{1y} , u_{1z} , и u_{2x} , u_{2y} , u_{2z} может находиться только на прямой (3). Известно, что каскадный ливень может иметь место только на поверхности Луны. Поэтому пересечение (3) со сферой $x^2 + y^2 + z^2 = R_m^2$, где R_m — радиус Луны, однозначно определяет его координаты x_0 , y_0 , z_0 (см. рисунок).

Ось ливня, согласно выше сказанному, должна лежать одновременно в плоскости векторов \mathbf{R}_1 , \mathbf{E}_1 и \mathbf{R}_2 , \mathbf{E}_2 . Поэтому, чтобы найти ее направление, необходимо провести: а) одну плоскость A_3 через начало координат $O_1(x_1, y_1, z_1)$ первого модуля, точку x_0, y_0, z_0 и направление \mathbf{E}_1 , б) вторую плоскость A_4 через начало координат $O_2(x_2, y_2, z_2)$ второго модуля, точку x_0, y_0, z_0 и направление \mathbf{E}_2 :

$$\begin{vmatrix} x - x_1 & y - y_1 & z - z_1 \\ x_1 - x_0 & y_1 - y_0 & z_1 - z_0 \\ E_{1x} & E_{1y} & E_{1z} \end{vmatrix} = 0, \quad \begin{vmatrix} x - x_2 & y - y_2 & z - z_2 \\ x_2 - x_0 & y_2 - y_0 & z_2 - z_0 \\ E_{2x} & E_{2y} & E_{2z} \end{vmatrix} = 0. \quad (4)$$

Прямая (4), определяемая пересечением этих плоскостей, и есть направление оси каскадного ливня.

Такая методика расчета направления движения космической частицы позволяет решить вопрос и о количестве N_0 электронов в максимуме каскадного ливня. Согласно [4–6], амплитуда напряженности поля радиоимпульса выражается как $E = BN_0 \sin \alpha / R$, где B зависит только от физических констант и является известной. Поэтому определение направляющих косинусов из (3), а также отношения $\sin \alpha / R$, согласно описываемой здесь методике, однозначно решает вопрос о количестве N_0 электронов в ливне, а следовательно, и о величине энергии W_0 космической частицы.

К схеме определения направления движения нужно добавить следующее. Уравнения (2) для $i = 1, 2$ определяют координаты E'_{ix} , E'_{iy} и E'_{iz} вектора \mathbf{E}_i в системе первого ($i = 1$) или второго ($i = 2$)

модулей. Для решения (3), (4) необходимо выразить проекции E'_{ix} , E'_{iy} и E'_{iz} через соответствующие проекции E_{ix} , E_{iy} и E_{iz} этих векторов в системе координат, связанной с Луной. Это можно сделать с помощью матрицы преобразований векторов при повороте декартовой системы координат. Ее компоненты в любой момент могут быть получены системой определения ориентации модулей, и эта операция является давно технически решенной задачей.

Список литературы

- [1] Гинзбург В.Л. // УФН. 1966. Т. 166. № 2. С. 169.
- [2] Schwarzschild B. // Physics to day. 1997. N 2. P. 616.
- [3] Takeda M., Nayashida N., Honda K. et al. // Phys. Rev. Lett. 1998. V. 81. P. 1163.
- [4] Голубничий П.И., Филоненко А.Д. // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. В. 12. С. 57.
- [5] Голубничий П.И., Филоненко А.Д., Яковлев В.И. // Изв. РАН. Сер. физ. 1994. Т. 58. № 12. С. 115.
- [6] Голубничий П.И., Филоненко А.Д. // Укр. физ. журнал. 1989. Т. 41. № 7–8. С. 696.
- [7] Дагкесаманский Р.Д., Железных И.М. // Письма в ЖЭТФ. 1989. Т. 50. В. 5. С. 233.
- [8] Alvarez-Muniz J. // E. Zas. 25-th ICRC. 1997. V. 7. P. 309.
- [9] Филоненко А.Д. // Изв. РАН. Сер. физ. 1997. Т. 61. № 3. С. 543.
- [10] Филоненко А.Д. // Письма в ЖЭТФ. 1999. Т. 70. В. 10. С. 639.
- [11] Филоненко А.Д. // Письма в ЖЭТФ. 1997. Т. 23. В. 10. С. 57.
- [12] Голубничий П.И., Филоненко А.Д. // Космическая наука и технология. 1999. Т. 5. № 4. С. 87.
- [13] Hazen W.E., Hendel A.Z., Howard Smith, Shah N.J. // Physical Review Letters. 1970. V. 24. N 9. P. 476.
- [14] Атрашкевич В.Б., Веденеев О.В., Аллан Х.Р., Джонс Д.К. и др. // Ядер. физика. 1978. Т. 28. № 3(9). С. 712.
- [15] Пистолькорс А.А. Антенны. М., 1947. 479 с.