

09;12

Определение энергии и состава ядра космических частиц сверхвысоких энергий радиоастрономическим методом

© А.Д. Филоненко, В.А. Филоненко

Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля, Луганск,
Украина
E-mail: filonenko_ad@dsip.net

В окончательной редакции 9 октября 2010 г.

Показано, что с помощью широкополосных многодиапазонных антенн двух радиотелескопов, разнесенных на расстояние 5–10 тысяч километров, можно определить энергию каскадного ливня в лунном реголите и состав космической частицы, если ливень вызван тяжелым ядром.

За последние 8–10 лет метод детектирования космических частиц, основанный на возможности регистрации радиоимпульса, сопровождающего каскадный ливень, претерпел существенные изменения. На смену простейшим антеннам и аналоговой электронике пришли комплексы радиоастрономических антенн и высокотехнологичные цифровые радиоприемники с большим динамическим диапазоном и большими возможностями для обработки сигналов.

Наиболее важными параметрами для выяснения природы частиц, приходящих из космического пространства, являются энергия, направление прихода и ее состав. В настоящее время существующие методы радиодетектирования не позволяют сделать практически никаких предположений относительно состава зарегистрированных частиц. Даже традиционные (ионизационные) методы, энергетический потолок которых составляет около 10^{20} – 10^{21} eV, не столь надежно отвечают на этот вопрос. Для более высоких энергий детекторов сейчас нет. Существующая точка зрения на возможности детектирования частиц с энергий 10^{21} eV и выше однозначно отдает предпочтение радиоастрономическому методу, в основе которого лежит возможность регистрации радиоимпульса, вызванного каскадным ливнем в реголите на краю лунного диска, с помощью антенны с большой эффективной площадью.

Такая идея была обоснована в одной из пионерских работ [1] и на тот момент казалась весьма смелой фантазией. Однако уже через несколько лет была сделана первая попытка регистрации частиц сверхвысокой энергии радиоастрономическим методом на 64-метровом радиотелескопе Parkes (Австралия) в диапазоне частот 1175–1675 MHz [2]. Авторы этой работы за 10 часов наблюдения не обнаружили среди зарегистрированных импульсов такой, у которого параметры были бы близки к ожидаемым. На основании этих данных и известной эффективной площади детектора они оценили верхний предел на поток нейтрино с энергией выше 10^{20} eV. По крайней мере, он оказался на порядок меньше, чем предсказывалось в теоретической работе [1]. На сегодняшний день известны еще несколько оценок верхних пределов на потоки нейтрино, полученных на усовершенствованных в дальнейшем [3–9] установках.

При использовании ограниченного количества антенн этот метод позволяет оценить только минимальную энергию первоначальной частицы. Причина в том, что амплитуда радиосигнала зависит от расположения приемной антенны относительно диаграммы излучения каскадного ливня. Ее угловая ширина для наиболее благоприятных частот наблюдения (~ 0.5 – 0.6 GHz [10]) составляет несколько градусов. Понятно, что в зависимости от направления прихода частицы относительно лунной поверхности приемная антенна на Земле может оказаться в произвольной области поля излучения. Только в том случае, когда известно положение приемной антенны относительно диаграммы излучения, можно сделать поправку и уточнить энергию частицы. Однако с помощью одной или нескольких близкорасположенных антенн этого сделать нельзя. Ниже показано, что если две группы антенн разнесены на угловую ширину несколько градусов (с точки зрения лунного наблюдателя), то открывается возможность не только указать на правильное значение энергии, но и оценить количество нуклонов, входящих в состав первоначального ядра. В настоящее время в связи с острой необходимостью измерения потока частиц сверхвысокой энергии стало экономически оправданным использование уже имеющихся больших комплексов радиоастрономических антенн. Имеются в виду такие комплексы, как например WSRT, GMRT, VLA и другие, каждый из которых имеет не менее десятка параболических антенн. Угловое расстояние между комплексами составляет 1 – 2° . Приблизительно

такую же ширину имеет и диаграмма излучения каскадного ливня, вызванного частицей сверхвысокой энергии в лунном реголите.

Пусть два комплекса радиоантенн (или две антенны, но широкополосные) расположены так, что угол между направлениями наблюдений из произвольной точки лунной поверхности составляет $1-2^\circ$, причем все антенны направлены на одну и ту же область на краю лунного диска. Будем считать далее, что измерение амплитуды радиосигнала конкретного события, вызванного каскадным ливнем на поверхности Луны, проводится независимо каждым из двух комплексов на различных частотах и по результатам измерений построены спектральные кривые. Запишем каскадную функцию в виде [1]

$$N(\chi) = 0.31\alpha^{-1/2} \exp[\alpha - (\chi - \alpha)^2/3\alpha], \quad (1)$$

где $\chi = z/z_0$ — глубина ливня в относительных (радиационных) единицах $\alpha = \ln W_0/W_{cr}$, W_0 — энергия первичного гамма-кванта; $W_{cr} \approx 40 \text{ MeV}$ — критическая энергия электрона для лунного реголита; $z_0 = 0.14 \text{ m}$ — величина радиационной единицы и z — текущая координата каскадного диска. Причем максимальное число частиц в ливне равно $N_0 = 0.31e^\alpha/\sqrt{\alpha}$. Тогда выражение для интенсивности радиоизлучения $I(\omega)$ с учетом конечных размеров диска запишем как [11]:

$$I(\omega, \theta) = \frac{\mu_0}{c} \left(\frac{0.31e^\alpha z_0 \eta e}{4\pi r} \right)^2 e^{-\frac{3\alpha}{2}(pkz_0)^2} \omega^2 e^{-(kn\rho_0 \sin \theta)^2} \sin^2 \theta, \quad (2)$$

где $k = \omega/c$, θ — угол наблюдения, $\rho_0 \approx 0.06 \text{ m}$ — средний квадратичный радиус каскадного диска, $p = (1 - n \cos \theta)$ и $n = 1.7$ — показатели преломления лунного реголита.

При расчете ливней от ядер обычно считают, что ядро с атомной массой A взаимодействует как A независимых нуклонов с энергией W/A [12]. Это приведет к изменению продольного размера ливня и соответственно величины α . Известно также, что энергия ливня пропорциональна числу частиц в его максимуме. Поэтому для каскадной функции от ядра с числом нуклонов A можно записать максимальное число частиц как $N_0 = 0.31Ae^\alpha/\sqrt{\alpha}$, где $\alpha = \ln(W_0/AW_{cr})$. Исходя из этого представим (2) в более удобном виде с точностью до известной константы D , зависящей от характеристик радиотелескопа

$$I(k_i, \theta_i) = DA^2 e^{\alpha(2 - \frac{3}{2} p_i^2 k_i^2 z_0^2)} k_i^2 e^{-k_i^2 n^2 \rho_0^2 \sin^2 \theta_i} \sin^2 \theta_i. \quad (3)$$

Для каждого из радиоастрономических комплексов можно построить кривые (3), отличающиеся частотой максимума k_i и величиной $p_i = 1 - n \cos \theta_i$, где индексы $i = 1, 2$ относятся к первому или второму комплексу. Легко убедиться из (3), что каждому углу θ соответствует свой максимум [13]. Поэтому величины $p_1 \neq p_2$ и равны нулю только при угле наблюдения $\theta = \arccos(1/n)$.

Условие максимумов и отношение интенсивностей для каждого из комплексов дают:

$$\frac{3}{2} \alpha p_1^2 z_0^2 + \rho_0^2 n^2 \sin^2 \theta_1 = \frac{1}{k_{m1}^2}; \quad \frac{3}{2} \alpha p_2^2 z_0^2 + \rho_0^2 n^2 \sin^2 \theta_2 = \frac{1}{k_{m2}^2};$$

$$\ln \frac{k_{2m}^2 I_1 \sin^2 \theta_2}{k_{1m}^2 I_2 \sin^2 \theta_1} = \frac{3}{2} \alpha z_0^2 (p_2^2 k_{2m}^2 - p_1^2 k_{1m}^2) + \rho_0^2 n^2 (k_{2m}^2 \sin^2 \theta_2 - k_{1m}^2 \sin^2 \theta_1),$$
(4)

где для упрощения принято $D_1 = D_2$. Выражения (4) представляют собой систему трех алгебраических уравнений относительно неизвестных α , θ_1 , θ_2 , после нахождения которых из (3) получим A .

Известно, что радиоастрономический метод является логическим развитием нетрадиционных методов регистрации частиц сверхвысокой энергии (см., например, [14]). Поэтому все полученное здесь можно применить и для детектирования космических лучей, вызывающих каскадные ливни в атмосфере Земли (ШАЛ), например для сильно наклонных ливней очень высокой энергии [15]. Величина A для тяжелых ядер, пришедших в атмосферу Земли, может достигать значений ~ 50 .

В последние годы развита идея регистрации нейтрино высокой энергии в лунном реголите. В этом случае каскадный ливень, доступный для детектирования, вызывается одним адроном и выражения (4) определяют только величину α , т.е. фактически энергию ливня.

Наконец, следует отметить, что поставленную задачу можно решить с помощью одной или двух антенн. В этом случае каждая из них должна содержать набор излучателей с близко лежащими частотами, так чтобы можно было определить частоту максимальной интенсивности для каждой из двух географических точек.

В настоящее время предпринято около пяти попыток реализации радиоастрономического метода различными экспериментальными группами. Несмотря на относительно простые и физически обоснованные идеи этого метода, положительный результат еще не достигнут. Пока

усилия направлены только на факт уверенной регистрации радиоимпульсов от каскадного ливня. Описанная выше идея о расширении возможностей радиоастрономического метода будет дополнительным стимулом в исследовательской работе.

Список литературы

- [1] *Дагкесаманский Р.Д., Железных И.М.* // Письма в ЖЭТФ. 1989. Т. 50. № 5. С. 233–235.
- [2] *Hankins T.H., Ekers R.D., O'Sullivan J.D.* // Mon. Not. R. Astron. Soc. 1996. V. 283. P. 1027–1030.
- [3] *Березняк А.Р., Дагкесаманский Р.Д., Железных И.М.* и др. // *Астрономический журнал*. 2005. Т. 82. № 2. С. 149–156.
- [4] *Hankins T.H., Ekers R.D., O'Sullivan J.D.* // Mon. Not. R. Astron. Soc. 1996. V. 283. P. 1027–1030.
- [5] *Gorham P.W., Liewer K.M., Naudet C.J.* et al. arXiv:astro-ph/0310232.
- [6] *Gorham P.W., Hebert C.L., Liewer K.M.* et al. arXiv:astro-ph/0310232.
- [7] *Buitink S., Bacelar J., Braun R.* et al. arXiv 0808.1878 (astro-ph).
- [8] *Jaeger T.R., Mute R.L., Gayley K.G.* arXiv 0910.5949 (astro-ph).
- [9] *Sholten O., Buitink S., Bacelar J.* et al. arXiv 0910.4745 (astro-ph).
- [10] *Филоненко А.Д.* // Письма в ЖЭТФ. 2007. Т. 86. В. 5. С. 339–343.
- [11] *Филоненко А.Д.* // ЖТФ. 2008. Т. 78. В. 9. С. 120–126.
- [12] *Мурзин В.С.* Введение в физику космических лучей. М.: МГУ, 1988. 319 с.
- [13] *Филоненко А.Д.* // Письма в ЖЭТФ. 2009. Т. 89. В. 8. С. 445–448.
- [14] *Филоненко А.Д.* // УФН. 2002. Т. 172. № 4. С. 439–471.
- [15] *Бейсембаев Р.У., Вавилов Ю.Н., Воловик В.Д.* Краткие сообщения по физике ФИАН. 1980. № 1. С. 9–12.