

12

## Перспективы детектирования космических лучей супервысоких энергий на поверхности Луны

© А.Д. Филоненко

Восточно-украинский государственный университет,  
Луганск

Поступило в Редакцию 16 августа 1996 г.

Работа посвящена теоретическому обоснованию создания радиодетектора космических лучей с энергией  $E \geq 10^{21}$  эВ. Детектирование предлагается реализовать с помощью радиодетектора на Земле или системы радиоантенн на искусственных спутниках Луны, которые должны регистрировать импульс радиоизлучения, возбуждаемого ливнем в грунте Луны.

Одно из направлений физики космических лучей связано с исследованием частиц энергетического диапазона  $W_0 \geq 10^{20}$  эВ. В настоящее время не вызывает сомнения только факт их существования. Недостаток информации об этом диапазоне энергии связан с отсутствием детекторов вследствие причин, которые более детально обсуждались, например, в [1].

Известно, что суперпроекты ШАЛ-1000 и ШАЛ-5000 (с рабочей площадью  $10^3$  и  $5 \cdot 10^3$  км кв. соответственно) направлены на решение проблемы детектирования частиц в энергетическом диапазоне  $10^{20} - 10^{21}$  эВ. Для соседнего диапазона  $10^{21} - 10^{22}$ , а тем более для диапазона  $10^{22} - 10^{23}$  эВ потребуются площади приблизительно на 3–4 порядка большие. Если же попытаться решить эту проблему с помощью метода радиодетектирования в соответствии с [1], то количество приемных антенн в таком детекторе на несколько порядков увеличится, что, соответственно, его значительно усложнит. Дело в том, что на таких огромных площадях ( $> 10^7$  км кв.) при недостаточном количестве антенн вследствие конечной кривизны поверхности Земли будет отсутствовать прямая видимость между источником излучения (ШАЛ) и приемным пунктом. Интенсивность дифрагированного луча может оказаться на несколько порядков меньше.

Поскольку рабочая длина волны в условиях атмосферы для сильно наклонных ливней (чтобы ШАЛ прошел все фазы развития не поглощаясь в грунте) будет иметь величину в соответствии с [2–3] более 10 км, то такой детектор окажется под воздействием сильных атмосферных помех со стороны экваториального грозового пояса. Это обстоятельство (как уже говорилось в [1]) является еще одним существенным недостатком такого метода.

Эти факты, а также ряд других вызвали необходимость поисков нетрадиционных способов детектирования космических лучей супервысоких энергий. Идея использования поверхности Луны в качестве рабочей площади детектора частиц супервысоких энергий впервые была высказана в [4], а затем более детально разработана в [5]. В соответствии с этим отрицательный избыточный заряд электрон-фотонного ливня в грунте Луны должен вызвать, как и в атмосфере Земли [6], когерентное черенковское излучение в радиочастотном диапазоне. Однако ряд обстоятельств серьезным образом препятствуют реализации этих идей. Например, одно из них (см. [5]) связано с тем фактом, что черенковское излучение всегда направлено вперед, т. е. по направлению движения частиц, поэтому только для небольшой доли из них, падающих под скользящими углами к поверхности на узкую кольцевую зону видимой стороны Луны, черенковское излучение окажется направленным к Земле. Это обстоятельство не менее чем на один–два порядка уменьшает рабочую площадь поверхности Луны.

Однако оно, по-видимому, не является главным. Более серьезным препятствием на пути осуществления такого проекта является эффект многократного рассеяния электронов в лавине. Он, как показано в [7], на два–три порядка понижает интенсивность черенковского излучения в широком атмосферном ливне. Электроны электрон-фотонной лавины в конденсированном веществе испытывают еще большее рассеяние (приблизительно радиан на одну  $t$ -единицу), поэтому говорить о направленном излучении [5], которое является одним из основных отличительных свойств черенковского излучения, нельзя. Кроме этого, радикальным образом изменяется и условие когерентного приема. Фронт черенковского излучения вследствие рассеяния будет сильно размыт, что на несколько порядков уменьшит граничную частоту диапазона когерентного приема и, как следствие этого, вызовет падение интенсивности излучения [7].

Второстепенная роль черенковского излучения в общем механизме эмиссии ШАЛ подтверждается результатом почти двадцатилетнего цикла экспериментальных исследований механизма излучения. Одним из обобщений его является работа [8], представляющая собой итог дискуссии между группами исследователей в Москве, Хавера Парк и Болонье. По их мнению, существует единая точка зрения, состоящая в том, что доминирующим механизмом генерации радиоизлучения ШАЛ в метровом диапазоне длин волн является геомагнитное разделение зарядов.

Оценки величины напряженности электрического поля, создаваемого торможением  $\delta$ -электронов ливня [2–3], показывают, что этот механизм излучения с успехом может быть использован для детектирования космических лучей сверхвысоких энергий с помощью радиотелескопа. При попадании такой частицы на поверхность Луны в ее грунте развивается электрон-фотонный ливень. Так как грунт является хорошим диэлектриком, то радиоизлучение метрового диапазона практически без поглощения выходит из глубины в несколько метров на его поверхность.

Оценим напряженность электрического поля, создаваемого таким лунным ливнем на Земле. Выражение (9) из работы [2] для этого случая может быть приведено к виду (по-прежнему  $K_1 z_0 < 1$ ):

$$E(\nu) = q\omega N_0 z_0 \sin \theta / 4\pi\epsilon_0 c^2 f_0, \quad \text{В/мГц.} \quad (1)$$

Для лунного грунта с плотностью 2 г/см куб. длина активного пути ливня  $z_0$  приблизительно равна 2.5 м. Подставим, кроме этого,  $q = 1.6 \cdot 10^{-19}$  Кл,  $R_0 = 0.4 \cdot 10^9$  м — расстояние до Луны,  $N_0 = 10^{14}$  (для энергии первоначальной частицы  $W_0 = 10^{23}$  эВ). Для того чтобы выполнялось условие когерентности  $K_1 z_0 = \frac{\omega}{c} (1 - \cos \theta) z_0 < 1$ , выберем  $\omega \leq 0.4 \cdot 10^8$  с<sup>-1</sup> или  $\nu \lesssim 50$  мГц. Тогда  $E(\nu) = 5 \cdot 10^{-12}$  В/мГц или 5 мкВ/мГц.

Сравним мощность полезного сигнала  $P_S = E_\nu^2 \Delta\nu^2 \epsilon_0 c A$  на согласованной нагрузке антенны с эффективной площадью  $A$  с мощностями сигналов, наводимых космическими источниками радиоизлучения — небесной сферой  $P_n = kT_A \Delta\nu$  и наиболее яркими точечными источниками в этом диапазоне длин волн  $P_A = F_\nu \Delta\nu A$ , где  $F_\nu$  — спектральный поток энергии (от самого мощного точечного источника Кассиопея А для  $\nu = 50$  мГц поток  $F_\nu = 10^{-21}$  Вт/м<sup>2</sup> Гц [9]),  $K = 1.4 \cdot 10^{-23}$  Дж/К,  $\Delta\nu = 5 \cdot 10^6$  Гц — ширина полосы радиоприемного устройства и

$T_A = 10^y$  – шумовая температура антенны или, другими словами, средняя эквивалентная температура небесной сферы для  $\nu = 50$  мГц. Подставляя соответствующие величины в эти формулы, найдем для  $A = 100 \text{ м}^2$   $P_s = 2 \cdot 10^{-10}$  Вт,  $P_n = 0.7 \cdot 10^{-12}$  Вт и  $P_A = 0.5 \cdot 10^{-12}$  Вт.

Этот результат показывает, что антенна с площадью  $A$  не более  $100 \text{ м}^2$  может эффективно регистрировать космические лучи с энергией  $W_0 = 10^{23}$  эВ. Так как  $W_0 \sim N_0 \sim E_\nu$ , то для  $W_0 = 10^{22}$  эВ потребуется площадь телескопа  $A 10^4 \text{ м}^2$ , что вполне соответствует уже имеющимся в настоящее время.

В этом случае отношение  $P_s/P_n = n$  по-прежнему останется равным приблизительно  $n = 300$ . Для частиц с  $W_0 = 10^{23}$  эВ  $n$  будет равно  $3 \cdot 10^y$ , а амплитуда сигнала увеличится в 10 раз при неизменной среднеквадратичной амплитуде галактических шумов. Совершенно очевидно, что для такого детектора мастер сигнал не нужен. Вполне достаточно иметь анализатор сигнала (по амплитуде, форме, длительности) и достаточную степень защиты от помех индустриального характера, что практически всегда является решаемой задачей.

Какую информацию можно получить с помощью такого радиодетектора? Если в антеннах использовать взаимно перпендикулярные вибраторы, то при благоприятных условиях, когда электронная концентрация ионосферного слоя F значительно уменьшится (для ослабления деполяризации сигнала из-за наличия магнитного поля Земли), можно надеяться получить некоторую информацию об анизотропии космических лучей с  $W_0 \sim 10^{23}$  эВ.

Так как надежды на это не слишком велики, то остается уверенная возможность узнать, реально ли существование частиц такого диапазона энергий. Сейчас однозначно ответить на этот вопрос нельзя. Достаточно вспомнить о гипотезе реликтового обрезания спектра на уровне  $10^{19} - 10^{20}$  эВ [10]. Однако если с помощью такого радиодетектора–телескопа будет экспериментально доказано существование частиц столь высоких энергий (т. е.  $10^{22} - 10^{23}$  эВ), то для более детального изучения космических лучей не только этого, но и нижележащих диапазонов с помощью метода радиодетектирования имеется вполне реальная перспектива. Реализовать ее можно с помощью двух–трех искусственных спутников Луны, на каждом из которых имеются три взаимно перпендикулярных вибратора с приемными устройствами. Известно, что такая система антенн по величине и полярности принятого сигнала на каждом из вибраторов совершенно однозначно осуществляет не только локацию

источника сигнала, но и ориентацию его антенны (т. е. направление оси ливня в грунте Луны).

Таким образом, можно решить вопрос об измерении анизотропии космических лучей для этих диапазонов. Кроме этого, по известной амплитуде сигналов однозначно определяется число частиц в ливне.

Известно, что порядок величины площади, необходимой для минимально приемлемой частоты событий, составляет приблизительно  $10^3$ ,  $5 \cdot 10^4$ ,  $10^6$  и  $5 \cdot 10^7$  км кв. соответственно для частиц с энергиями более  $10^{20}$ ,  $10^{21}$ ,  $10^{22}$  и  $10^{23}$  эВ. Эти данные получены из условия, что показатель энергетического спектра сохраняет свою величину  $\gamma = 2.5$ . Для наблюдения за такими площадями достаточно иметь высоту спутника над поверхностью Луны приблизительно 10, 70, 500 и 1500 км соответственно для каждого из диапазонов. В этом случае направление на источник не будет превышать отклонения более чем на  $60^\circ$  от максимума диаграммы направленности спутниковых антенн. Соответствующие напряженности полей  $E_\nu$  для каждого из диапазонов будут, согласно (1), равны  $(25, 40, 50$  и  $125) \cdot 10^{-12}$  В/мГц. Найдем отношение  $P_s/P_h$ , учитывая, что для полуволнового вибратора эффективна площадь антенны  $A = \lambda^2/4\pi$ . Даже для самого неблагоприятного случая ( $E_\nu = 25 \cdot 10^{-12}$  В/мГц) подстановка дает  $P_s/P_h = 60$ , т. е. оно остается достаточно высоким. Такая благоприятная ситуация усиливается еще тем фактом, что при таком способе детектирования (т. е. непосредственно у поверхности Луны) радиопомехи искусственного происхождения практически полностью будут отсутствовать из-за весьма значительной удаленности от Земли.

Таким образом, приведенные здесь оценки убедительно показывают, что метод радиодетектирования имеет весьма обнадеживающие перспективы, но они таковыми являются только для диапазона очень высоких энергий ( $W_0 > 10^{21}$  эВ). И, несмотря на то, что радиодетектор по ряду параметров, по-видимому, не сможет конкурировать с традиционными методами детектирования, альтернативы ему для супервысоких энергий сейчас нет.

**Список литературы**

- [1] Голубничий П.И., Филоненко А.Д. // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. № 23. С. 59–62.
- [2] Голубничий П.И., Филоненко А.Д., Яковлев В.И. Международная конференция по космическим лучам, Москва, 1994; // Известия РАН, сер. физ. 1994. Т. 58. № 12. С. 115–118.
- [3] Голубничий П.И., Филоненко А.Д. // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. № 12. С. 57–61.
- [4] Аскарьян Г.А. // ЖЭТФ. 1961. Т. 41. № 2 (8). С. 616–618.
- [5] Дагкесаманский Р.Д., Железных И.М. // Письма в ЖЭТФ. 1989. Т. 50. № 5. С. 233–235.
- [6] Аскарьян Г.А. // ЖЭТФ. 1965. Т. 48. С. 988–990.
- [7] Филоненко А.Д. Международная конференция по космическим лучам, Москва, МИФИ, 1996 г.; // Изв. РАН, сер. физ. (в печати).
- [8] Атрашкевич В.Б., Веденеев О.В., Аллан Х.Р., Джонс Дж.К. Мандолези Н., Мориджи Г., Палумбо Дж.Дж. // Ядерная физика. 1978. Т. 28. № 3(9). С. 712–716.
- [9] Таблицы физических величин. Справочник под ред. И.К. Кикоина. Москва, Атомиздат, 1976. 1006 с.
- [10] Зацепин Г.Т., Кузьмин В.А. // Письма в ЖЭТФ. 1966. Т. 4. С. 114–116.