

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 δ -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⁻¹ 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_ν — спектральный поток энергии (от самого мощного точечного источника Кассиопея А для $\nu = 50$ мГц поток $F_\nu = 10^{-21}$ Вт/м² 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 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° от максимума диаграммы направленности спутниковых антенн. Соответствующие напряженности полей E_ν 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.