

О ВОЗМОЖНОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ СУПЕРВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ ($> 10^{20}$ эВ)

Г.А. Гусев Л.Г. Деденко, И.М. Железных, М.А. Марков

Обсуждается детектирование ШАЛ в области энергий больше 10^{20} эВ по их радиоизлучению при отражении и рассеянии радиоволн от ионосферы. Оценки показывают, что в изучении спектра космических лучей можно продвинуться до энергий 10^{22} эВ со статистикой порядка одного события в год при отсутствии „реликтового обрезания” спектра космических протонов или в случае наклонных ШАЛ от нейтрино.

Вопрос о том, есть ли верхняя граница у масс элементарных частиц имеет принципиальный интерес ¹, поэтому необходимы специальные экспериментальные исследования этой проблемы.

Если частицы сверхбольших масс ($M \sim 10^{23} \div 10^{25}$ эВ), предсказываемые теориями „большого объединения” (лептокварки, монополи и т.д.), действительно существуют, то при их взаимодействиях могут рождаться адроны и лептоны с энергиями, значительно превышающими 10^{20} эВ. В случае существования максимона (элементарной стабильной черной дыры с массой $\sim 10^{-5} \Gamma$), спектр элементарных частиц (включая нейтрино), возникающих на конечной стадии развития систем из нескольких максимонов мог бы простираться вплоть до энергий 10^{28} эВ ^{1,2}. Поиски частиц с энергиями $10^{20} \div 10^{28}$ эВ могут проводиться в экспериментах типа ДЮМАНД и при регистрации ШАЛ супервысоких энергий в атмосфере радиометодами ^{1,2}.

Исследования ШАЛ в области энергий 10^{20} эВ позволит также выяснить вопрос о том, имеется ли „обрезание” спектра протонов космических лучей реликтовыми фотонами. Если спектры протонов с $E_p > 10^{20}$ эВ подавлены, то остается возможность детектирования каскадов от нейтрино с энергиями $E_\nu > 10^{20}$ эВ (конечно, в случае существования значительных потоков таких нейтрино) как в экспериментах ДЮМАНД, так и в атмосфере. Дело в том, что длина электронно-фотонных каскадов в воде (грунте) при $E_0 > 10^{20}$ эВ превышает несколько сотен метров, и поэтому есть смысл рассмотреть возможности детектирования каскадов, которые могли бы быть вызваны нейтрино с $E_\nu > 10^{20}$ эВ вблизи поверхности Земли в грунте (воде) и развитие которых продолжалось бы вверх в атмосферу.

На возможность регистрации ШАЛ по их когерентному радиоизлучению впервые указал Аскарьян³. Радиоизлучение обусловлено следующими механизмами дипольным излучением Вавилова — Черенкова, синхротронным излучением в геомагнитном поле, релятивистским тормозным излучением в электрическом поле Земли, переходным излучением при „ударе” ШАЛ о Землю и излучением, обусловленным эффективным торможением заряда ШАЛ за счет его „старения”. Первые наблюдения⁴ показали, что порог регистрации лежит в области энергий $10^{15} \div 10^{16}$ эВ. Поскольку, эффективный заряд каскада пропорционален первичной энергии (число частиц в каскаде $\sim E_0$, $q \sim E_0$), мощность когерентного радиоизлучения растет с энергией как E_0^2 . Следовательно, поиск радиоизлучения ШАЛ представляется наиболее адекватным методом детектирования ШАЛ супервысоких энергий². Однако детектирование прямого радиоизлучения при $E_0 > 10^{20}$ эВ маловероятно, так как радиоизлучение имеет острую направленность, а статистика бедна. Ниже обсуждаются возможности детектирования радиоизлучения ШАЛ с энергией $> 10^{20}$ эВ, рассеянного при отражении от Земли и ионосферы.

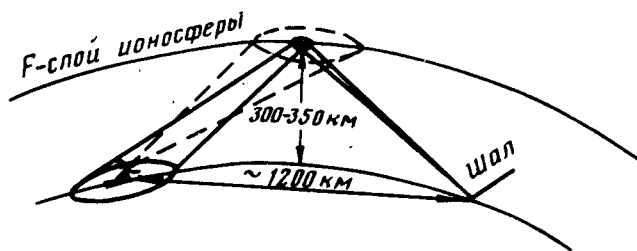


Рис. 1

Известно, что на площади 1 км^2 в 1 стерадиане за год падает 1 ШАЛ с энергией $E_0 \sim 10^{19}$ эВ. Если интегральный спектр E_0^{-2} , то переход к энергиям $10^{21} \div 10^{22}$ эВ требует увеличения эффективной площади регистрации на 4 – 6 порядков. Из-за острой направленности механизмов излучения (кроме нерелятивистского дипольного) площадь „засветки” на Земле невелика (поперечник порядка сотен метров), поэтому продвижение в область высоких энергий путем увеличения числа приемников не эффективно. Мы хотели бы обратить внимание на то, что после отражения от Земли и затем от F-слоя ионосферы на высотах 300 – 350 км (или спорадического E-слоя) ионосферы с сильным рассеянием в диапазоне углов до 20° , характерным для высоких и низких широт⁵, площадь засветки резко увеличивается¹⁾. Оценим величину сигнала радиоизлучения ШАЛ на частотах $f \cong 25 \div 45$ МГц в полосе $\Delta f \sim 5$ МГц при энергиях $E \cong 10^{21}$ эВ. Пусть в некоторой точке находится приемная антенна с диаграммой направленности порядка 20° , ориентированная под углом к горизонту около 30° .

1) Г.А. Аскарьян обратил наше внимание, что при больших E_0 учет многократного рассеяния частиц ливня также приводит к некоторому увеличению пятна на Земле.

Она обеспечивает обзор площади в форме эллипса с размерами $300 \times 600 \text{ км}^2$ в ионосфере, в которую попадает сигнал от ШАЛ в телесном угле $0,05 \text{ ср}$ из области таких же размеров. Из-за ионосферного рассеяния пятно засветки от ШАЛ также будет иметь размеры $\sim 300 \times 600 \text{ км}^2$ (см. рис. 1).



Рис. 2

Экспериментальное значение электрического поля ⁶ в полосе 5 МГц около 20 мкВ/м (при уровне шумов 10 мкВ/м) на расстоянии около 300 м от оси ШАЛ с $E_0 = 10^{17} \text{ эВ}$. Для $E_0 = 10^{21} \text{ эВ}$ можно ожидать сигнал в месте падения ШАЛ на уровне $0,3 \text{ В/м}$, что даст в районе антенны при среднем поглощении в ионосфере порядка 10 дБ и максимальных потерях при отражении от сухой почвы порядка 8 дБ сигнал около 30 мкВ/м , т.е. втрое выше шума. При этом (с учетом телесного угла) площадь наблюдения $\sim 10^5 \text{ км}^2$ обеспечит статистику порядка одного события в год. Знание теории радиоизлучения и наличие информации о состоянии ионосферы и почвы (о высоте отражения, степени рассеяния, уровне поглощения) позволяет надеяться на точность определения энергии ШАЛ на уровне 50%. Выбор почти вертикальных углов приема, а также отражений от спорадических E-слоев (высота 100 – 120 км) позволяет регистрировать ШАЛ с $E_0 = 10^{20} \text{ эВ}$. Наконец, использование отражения и рассеяния от одного из склонов горной долины при ширине последней порядка 30 км даст возможность регистрировать ШАЛ с энергией порядка $3 \cdot 10^{19} \text{ эВ}$, причем благодаря отсутствию ионосферного поглощения с помощью специальной подготовки области попадания ШАЛ можно добиться уменьшения потерь в почве и достигнуть сильного рассеяния, т.е. увеличить статистику (см. рис.2).

В предложенных экспериментах необходимо решить сложную проблему выделения редких импульсных сигналов на фоне естественных и промышленных помех. Для успешного решения этой задачи необходимо знание характеристик импульса: спектр сигнала, его длительность, размер фронта (порядка 100 км). Именно, ограниченный размер фронта полезного сигнала позволяет легко выделить все удаленные грозовые разряды. Далее, использование дополнительных каналов с всенаправленными антеннами позволяет отделить локальные помехи. Возникает также вопрос, как отличить сигнал далеких ШАЛ от сигналов ШАЛ меньших энергий, идущих непосредственно в раскрыт антенны. Здесь следует учесть, что длительность сигнала, рассеянного от ионосферы или поверхности почвы существенно увеличивается, что надежно выделяет рассеянный сигнал от прямого. Наконец, сильные сигналы от радиостанции, радаров и т. п. отсекаются с помощью режекторных фильтров.

Отметим, что если спектр космических лучей при $E > 10^{20} \text{ эВ}$ падает медленнее, чем E^{-2} , можно описанным выше способом зарегистрировать радиоизлучение ШАЛ с энергиями, превышающими 10^{22} эВ .

В заключение авторы выражают глубокую благодарность за полезные обсуждения Г.А. Аскарьяну, Г.Т.Зацепину, В.В.Мигулину и Г.Б.Христиансену.

Литература

1. Markov M.A. On the upper limit of the cosmic ray energy spectrum (DUMAND-type experiment). Preprint INR, 1981, P-0197, Moscow; Markov M.A. On the maximum and the concept of elementary particles. Preprint INR, 1981, P-0206, Moscow; Markov M.A., Zheleznykh I.M. Proc. of the 1979 DUMAND Workshops at Khabarovsk and Lake Baikal, ed. J. Learned, Honolulu, p. 177.
2. Dedenko L.G., Markov M.A., Stern B.E., Zheleznykh I.M. Proc. 17-th ICRC, Paris, 1981, 10, 303; Dedenko L.G., Markov M.A., Zheleznykh I.M. Proc. Neutrino-81, Maui, Hawaii, v. 1, p. 292.

3. Аскарьян Г.А. ЖЭТФ, 1961, 41, 616.
4. Jelly J.V. et al. Nature , 1965, 205, 327; Боржковский И.А., Воловик В.Д., Шатко Е.С. Изв. АН СССР , сер. физ., 1966, 30, 1705.
5. Гершман Б.Н. Динамика ионосферной плазмы. М.: Наука, 1974.
6. Христиансен Г.Б. Куликов Г.В. Фомин Т.А. Космическое излучение сверхвысоких энергий М.: Атомиздат, 1975.

Институт ядерных исследований
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
10 августа 1982 г.
