

## РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИЙ МЕТОД РЕГИСТРАЦИИ НЕЙТРИНО И ДРУГИХ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ СУПЕРВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

*Р.Д.Дагкесаманский, И.М.Железных*

Рассматривается возможность использования радиотелескопов для детектирования излучения электронно-фотонных и адронных каскадов, производимых при взаимодействиях нейтрино и других частиц супервысоких энергий ( $\geq 10^{20}$  эВ) с Луной и другими космическими телами.

1. Современные теории элементарных частиц предсказывают существование новых массивных объектов как в микромире, так и в макрокосмосе (например, магнитных монополей или сверхпроводящих космических струн). Один из возможных путей экспериментального поиска таких объектов связан с изучением взаимодействий космических частиц сверхвысоких и супервысоких энергий, их потоков и энергетических спектров, верхних границ спектров, что требует крупномасштабных детекторов адронов и лептонов<sup>1</sup>. Так, в последнее время для исследования частиц с энергиями  $E \approx 10^{19} \div 10^{20}$  эВ предложен проект детектора ШАЛ с площадью до 1000 км<sup>2</sup><sup>2</sup>. С целью регистрации взаимодействий нейтрино и других космических частиц создается комплекс подземных детекторов с регистрирующим объемом до 10<sup>4</sup> м<sup>3</sup><sup>3</sup>, предполагается создание глубоководных оптических детекторов типа ДЮМАНД, "просматривающих" объемы воды  $> 10^7$  м<sup>3</sup><sup>4</sup>.

Более 25 лет назад возможность регистрации каскадов в плотной среде (частности во льду) по когерентному черенковскому радиоизлучению избытка отрицательных зарядов в каскадах была отмечена Аскарьяном<sup>5</sup>. Им обсуждалась регистрация каскадов в различных подземных породах, а также в лунном грунте с помощью аппаратуры, размещаемой на Луне.

В 1981 г. было предложено регистрировать нейтрино из нижней полусферы по радиоизлучению каскадов, возникающих в оболочке Земли и продолжающихся в атмосфере<sup>6</sup>. В качестве мишени для нейтрино с  $E_\nu \geq 10^{15}$  эВ был рассмотрен и антарктический лед<sup>7</sup> (объем мишени  $\leq 10^{10}$  м<sup>3</sup>). На станции "Восток" ведутся исследования фоновых условий для радиодетектора мюонов и нейтрино (РАМАНД)<sup>8</sup>. Представляется своевременным рассмотреть перспективы создания в Антарктиде комплексной установки, включающей также сцинтилляционные детекторы электронной компоненты, мюонов малых энергий ШАЛ, телескопы, регистрирующие черенковское излучение каскадов в атмосфере, и, возможно, детекторы черенковского излучения мюонов<sup>9</sup> на таких глубинах льда, где он становится прозрачным. Согласно<sup>10</sup>, на глубинах 1300 ÷ 1400 м в "совершенно прозрачном льду" отмечаются лишь спорадические включения пузырьков воздуха.

2. Энергия когерентного черенковского радиоизлучения каскада  $W \approx 10^{-10} (E(\text{эВ})/10^{14})^2$  эрг (см. <sup>1,7</sup>), а значит, расстояние, на котором он может быть зарегистрирован, пропорционально  $E$ . Нейтрино с энергиями  $10^{20} - 10^{22}$  эВ предсказываются в ряде моделей со сверхпроводящими струнами<sup>11</sup>, а в случае существования таких массивных частиц, как монополи и максимоны, верхняя граница спектра нейтрино могла бы достигать  $10^{25} - 10^{28}$  эВ<sup>12</sup>. Современные радиотелескопы могут позволить регистрировать каскады, возникающие при взаимодействии таких нейтрино даже с веществом обращенного к нам приповерхностного слоя Луны<sup>13</sup>.

Действительно, спектр излучения на частотах  $f \leq f_{max} \approx 1$  ГГц пропорционален  $f$ . Энергия излучается в импульсе ( $\Delta t \approx 10^{-8}$  с) под некоторым углом к вектору скорости каскада в пределах "толстого конуса", телесный угол которого для оценок принят равным 0,5 ср. К попавшему в этот конус земному наблюдателю поступает поток излучения плотностью

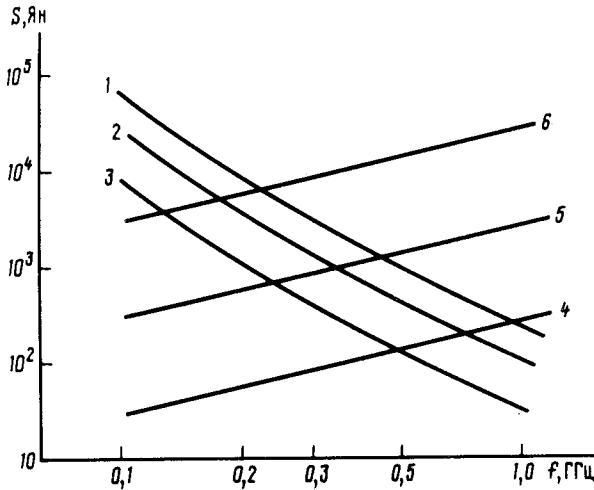
$$S_{\text{нмп}} = 2fW(f_{max}^2 \Omega D^2 \Delta t)^{-1} = 3 \cdot 10^{-23} f_0 E_{20} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ Гц}) \quad (1)$$

( $D$  – расстояние до Луны,  $f_{\oplus} = f$  (Гц)/ $10^9$  и  $E_{20} = E$  (эВ)/ $10^{20}$ ).

Чувствительность радиотелескопа  $\Delta S = 2kT(A_{\text{эфф}}\sqrt{\Delta f\tau})^{-1}$ ; здесь  $T$  – шумовая температура,  $A_{\text{эфф}}$  – эффективная площадь радиотелескопа,  $k$  – постоянная Больцмана,  $\Delta f$  – полоса пропускания приемника и  $\tau$  – время накопления сигнала ( $\tau \geq 1/\Delta f$ ). Принимая во внимание ограничения на  $\tau$  и  $\Delta f$  (последнее связано с дисперсией в ионосфере  $\Delta f \leq \Delta f_{\text{дисп}} = 1,2 \cdot 10^{-19} f^3$ ), а также возможность использования многоканального приема с шириной синтезированной полосы  $\Delta f_{\text{эфф}} = n\Delta f \approx 0,3f$ , получаем

$$\Delta S_{\text{эфф}} = 2kT(A_{\text{эфф}}\Delta t\sqrt{\Delta f_{\text{дисп}}\Delta f_{\text{эфф}}})^{-1} = 1,5 \cdot 10^{-13} T(A_{\text{эфф}}\Delta t f^2)^{-1} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ Гц}). \quad (2)$$

Как видно из рисунка, уже сегодня есть принципиальная возможность регистрировать каскады, возникающие при взаимодействии с веществом Луны частиц с энергиями  $E \gtrsim 10^{20}$  эВ.



Зависимость от частоты чувствительности  $\Delta S_{\text{эфф}}$  радиотелескопов диаметром 70 м (1), 100 м (2) и радиотелескопа в Аресибо (3), а также поступающей плотности потока  $S_{\text{имп}}$  от каскадов при  $E = 3 \cdot 10^{19}$  эВ (4),  $10^{20}$  эВ (5) и  $3 \cdot 10^{20}$  эВ (6)

3. Оценки потоков нейтрино супервысоких энергий, сделанные в <sup>11</sup>, позволяют оценить и число соответствующих нейтринных событий. Так, при  $E \gtrsim 10^{20}$  эВ в обращенном к нам слое лунной поверхности толщиной  $\sim 5$  м должно происходить до  $10^5$  наблюдаемых событий в год (принималось, что  $\sigma_{\nu N} = 10^{-31} \text{ см}^2$  <sup>14</sup>), то есть можно было бы проверить ряд моделей Вселенной со сверхпроводящими струнами <sup>11</sup>. Радиоизлучение каскадов, вызываемых протонами (ядрами), может выходить из лунного грунта из-за процессов рассеяния. Особый интерес может представлять взаимодействие с Луной космических адронов ( $\gamma$ -квантов) с энергиями  $\gtrsim 10^{20}$  эВ. В отличие от нейтринных процессов вспышки, обусловленные протонами, будут наблюдаться лишь на краю лунного диска.

Пороговую энергию регистрации можно уменьшить, разместив антенны на спутниках Луны или некоторых планет. Со специальных геостационарных спутников можно в принципе детектировать радиоизлучение каскадов, производимых нейтрино в ледовых массивах антарктического континента.

Используя характерную "окраску" сигнала, обусловленную прохождением сигнала через ионосферу (дисперсионное запаздывание импульса на более низких частотах), а также одновременные наблюдения на нескольких инструментах, можно существенно повысить надеж-

ность обнаружения интересующих нас всплесков радиоизлучения. И хотя существующие радиотелескопы пока еще не оснащены подходящей аппаратурой, есть надежда, что эта задача может быть решена уже в недалеком будущем.

4. Итак, лунная поверхность может оказаться весьма подходящей мишенью для радиодетектора нейтрино и адронов с энергиями  $10^{20}$  эВ и выше. Эффективная площадь и регистрирующий объем этого детектора могут составить  $\approx 10^7$  км<sup>2</sup> и  $\approx 10^5$  км<sup>3</sup>, соответственно.

Авторы глубоко признательны М.А.Маркову за стимулирующие обсуждения.

#### Литература

1. *Markov M.A., Zheleznykh I.M.* Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A, 1986, **248**, 242.
2. *Христиансен Г.Б. и др.* Изв. АН СССР, сер. физ., 1989, **53**, 286.
3. *Galeotti P. et al.* Proc. Symp. Undergr. Phys. Baxan Valley. М.: Nauka, 1987, p. 198; *Cecchini S. et al.* Ibid., p. 204.
4. *Roberts A. et al.* Proc. "Neutrino-81". Eds. R.Cence, E.Ma and A.Roberts, Maui, Hawaii, 1981, **2**, 240; *Bezrukov L.B. et al.* Proc. 20th ICRC, М.: Nauka, 1987, **6**, 292.
5. *Аскарьян Г.А.* ЖЭТФ, 1961, **41**, 616; 1965, **48**, 988.
6. *Dedenko L.G. et al.* Proc. "Neutrino-81". Eds. R.Cence, E.Ma and A.Roberts, Maui, Hawaii, 1981, **1**, 292.
7. *Гусев Г.А., Железных И.М.* Письма в ЖЭТФ, 1983, **38**, 505.
8. *Bogomolov A.F. et al.* Proc. Symp. Undergr. Phys. Baxan Valley, М.: Nauka, 1987, p. 237.
9. *Halzen F., Learned J.* High energy neutrino detection in deep polar ice, Preprint Univ. of Wisconsin, Mad., June, 1988; *March R.* Proc. Int. Workshop on Neutrino Telescopes. Ed. M.Baldo Ceolin, Venecia, 1988, p. 313.
10. *Барков М.И., Луненков В.Я.* Материалы гляциологических исследований, 1984, вып. 51, 178.
11. *Hill C.T. et al.* Phys. Rev. D, 1987, **36**, 1007.
12. *Markov M.A., Zheleznykh I.M.* Proc. DUMAND Workshop at Khabarovsk and Lake Baikal. Ed. J.Learned, Honolulu, Hawaii, 1979, p. 177.
13. *Zheleznykh I.M.* Proc. Int. Seminar "Quarks '88", Tbilisi, World Scientific, 1988, p. 789; Proc. "Neutrino-88", Boston, USA.
14. *Butkevich A.V. et al.* Z.Phys. C. Particles and Fields, 1988, **39**, 241.

Физический институт им. П.Н.Лебедева  
Академии наук СССР

Институт ядерных исследований  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
10 августа 1989 г.