

О ДЕТЕКТИРОВАНИИ НЕЙТРИНО И МЮОНОВ ПО РАДИОИЗЛУЧЕНИЮ КАСКАДОВ, ПРОИЗВОДИМЫХ ИМИ В ЕСТЕСТВЕННЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СРЕДАХ

Г.А.Гусев, И.М.Железных

Показана возможность создания радиодетектора мюонов и нейтрино объемом $10^9 - 10^{11} \text{ м}^3$ в массивах глетчерного и полярного льда с малым поглощением радиоволн дециметрового диапазона (4 – 12 дБ/км). Отмечен ряд проблем нейтринной астрофизики, нейтринной физики, физики мюонов высоких энергий и др., которые могут быть решены с помощью предложенного детектора.

Изучение в космических лучах взаимодействий элементарных частиц при энергиях, недосягаемых ускорителям, задачи нейтринной астрофизики высоких и сверхвысоких энергий, поиск новых явлений и частиц, предсказываемых теориями "большого объединения" и суперсимметрии, требуют создания наземных, подземных и глубоководных детекторов больших площадей и объемов. Так, активно обсуждаются и исследуются возможности глубоководного детектирования нейтрино ¹ в установках объемом 10^7 м^3 и более в оптическом и в акустическом вариантах (проект ДЮМАНД ²). М.А.Марковым было также сделано предложение исследовать возможности детектирования нейтрино во льдах Антарктиды, в частности, акустическим методом.

Предложенный Аскарьяном ³ способ регистрации каскадов в плотных средах (в слоях льда, вечной мерзлоты, очень сухих породах) по радиоизлучению избытка заряда, по нашему мнению, является перспективным способом регистрации взаимодействий элементарных частиц в очень больших объемах вещества. Размеры каскадов в плотном веществе таковы, что возможно когерентное излучение избытка заряда в каскаде (мощность излучения пропорциональна квадрату энергии каскада) в диапазоне дециметровых волн. Поэтому в работе ⁴ было предложено в качестве детектора электронно-фотонных или адронных каскадов от мюонов в объеме воды $\sim 10^5 \text{ м}^3$ использовать систему диэлектрических (полиэтиленовых) полос, каждая из которых играет роль волновода для радиоволн этого диапазона.

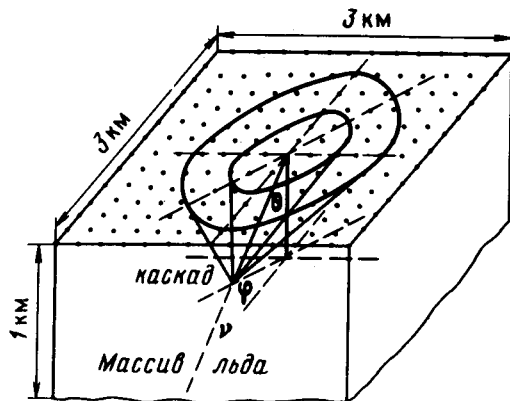
Ниже мы рассмотрим возможности создания радиодетекторов мюонов и нейтрино объемом $10^9 - 10^{11} \text{ м}^3$ глетчерного или полярного льда (в Антарктиде, в Гренландии и др.) при относительно небольшом числе регистрирующих элементов (антенн), располагаемых на поверхности льда. Предложение основано на том, что поглощение радиоволн во льду в диапазоне частот $10^7 - 3 \cdot 10^9 \text{ Гц}$ оказывается весьма малым ^{5, 6} (при температуре -50°C на частотах $500 \div 1000 \text{ МГц}$ оно составляет $(4 - 12) \cdot 10^{-3} \text{ дБ/м}$), что позволяет принимать слабые радиосигналы с расстояний порядка 1 км, а по форме и размерам области приема радиоизлучения Вавилова – Черенкова, идущего из нижней полусферы, (пересечение черенковского

конуса с углом 56° с поверхностью льда) можно определить направление и энергию каскада. Отметим, что рассеяние радиоволн на мелких неоднородностях льда практически несущественно для частот меньше 1 ГГц⁷. Можно рассматривать в качестве детектирующей среды и другие естественные диэлектрики, например, сухой песок, но поглощение в нем радиоволн гораздо больше (0,05 дБ/м на частоте 30 МГц⁷). Возможность регистрации электрон-ных нейтрино в слоях соли рассматривались в⁸.

Согласно³ избыток заряда q составляет $\sim 10\%$ от общего числа электронов и позитронов каскада, так что $q = e \cdot 5 \cdot 10^{-10} E_0$ (эВ) (E_0 — энергия каскада). Энергия излучения Вавилова — Черенкова в полосе частот $\Delta\omega$ при пролете избытком заряда q расстояния l дается известной формулой

$$W = \frac{q^2}{c^2} \omega \Delta\omega l (1 - 1/\beta^2 n^2), \quad (1)$$

где n — показатель преломления льда, $n^2 = 3 \cdot 17^5$. Принимая $\Delta\omega = \omega \cdot 10^{-1}$, $\omega = 2\pi f$, $f = 10^9$ Гц, $l = 200$ см (l — эффективная длина каскада), для энергий в интервале $E_0 = 10^{13} \div 10^{16}$ эВ получим $W = 3 \cdot (10^{-10} \div 10^{-4})$ эрг. Эта энергия приходит в кольцевую область с площадью, зависящей от глубины H , на которой образовался каскад от нейтрино. В случае вертикального направления оси каскада $S = 2\pi H^2 \Delta\alpha \sqrt{\epsilon - 1}/\epsilon \approx 0,3 H^2$ (если уширение черенковского конуса $\Delta\alpha \sim 5^\circ$), так что энергия радиопульса, приходящаяся на 1 м^2 , есть $W/S = 3W/H^2$. Энергия шумов за время действия полезного сигнала $\tau \sim 1/\Delta f$ составляет 10^{-13} эрг, так как с учетом шумов приемника, антенны, атмосферы и льда эффективная шумовая температура согласно⁶ может быть $\sim 1000^\circ$. Следовательно, при глубине образования каскада $H = 100$ м в качестве пороговой энергии каскада примем $E_0 \approx 3 \cdot 10^{13}$ эВ, а при глубине 1 км $\sim 5 \cdot 10^{14}$ эВ (отношение сигнал/шум 10 при эффективной площади антенны $\sim 1 \text{ м}^2$).



Если на площади $3 \times 3 \text{ км}^2$ разместить на поверхности льда через 100 – 200 м антенны (с малозумящими предусилителями) с эффективной площадью порядка нескольких квадратных метров и полосой более 100 МГц на частоте порядка 1 ГГц (см. рисунок), то эффективный объем детектора при глубине льда 1 км составит $\sim 10^{10} \text{ м}^3$. Радиосигнал от каскада, вызванного нейтрино, идущего снизу вверх на глубине 1 км, с учетом размытия черенковского конуса будет принят в нескольких десятках приемников, расположенных в области между двумя эллипсами, или в области, заключенной между двумя параболой, когда каскад от мюонов и нейтрино идет сбоку. По форме, ориентации и величине области "засветки" можно определить ориентацию каскада (угол θ с вертикалью и азимут φ , см. рисунок) и расстояние от него (следовательно, найти энергию каскада). Подчеркнем, что регистрация сигнала большим числом приемников (многократные совпадения) позволит уменьшить порог регистрации даже при наличии спорадических помех во льду. Для регистрации каска-

дов меньших энергий ($\lesssim 10^{13}$ эВ), образующихся на малых глубинах порядка десятков метров, предлагается одну из ячеек 200×200 м² заполнить более плотной сетью антенн, например, через 20 м, т. е. добавить еще ~ 100 - антенн. Можно также показать, что помехи, возникающие от каскадов, порождаемых адронами космических лучей, легко идентифицируются по форме области "засветки".

С помощью предлагаемого радиодетектора мюонов и нейтрино (РАМИНЦ) возможны поиск локальных источников нейтрино высоких энергий галактического и внегалактического происхождения, исследование поглощения нейтрино с $E > 10^{13}$ эВ в Земле и генерации "прямых" нейтрино ¹³. Особый интерес представляет исследование реакции $\bar{\nu}_e + e^- \rightarrow W^- \rightarrow$ адроны в области W -бозонного резонанса ⁹⁻¹¹. Недавно открытый W -бозон имеет массу ~ 80 ГэВ и, следовательно, резонансная энергия $E_{\text{рез}} = M_W^2 / 2m_e = 6 \cdot 10^6$ ГэВ. В объеме льда $\sim 10^{11}$ м³ можно ожидать за год несколько десятков адронных каскадов с энергией $\sim 6 \cdot 10^6$ ГэВ ¹⁰.

Исследуя спектр каскадов, вызываемых в детекторе мюонами из горизонтальных широких атмосферных ливней, можно определить спектр таких мюонов и, например, получить сведения о химическом составе первичного космического излучения.

Предлагаемый детектор является адекватным детектором для поиска суперсимметричных частиц высоких энергий (фотоно), для поиска нейтрино (и других элементарных частиц) супервысоких энергий ($E > 10^{20}$ эВ). Например, в случае существования максимонов с массой $\sim 10^{-5}$ г при определенных сценариях Вселенной верхняя граница энергетического спектра нейтрино могла бы быть $\sim 10^{28}$ эВ ¹². В случае существования значительных потоков нейтрино с $E > 10^{20}$ эВ они могут вызывать в грунте каскады при направлениях, близких к горизонтальным.

Радиодетектор нейтрино может использоваться в геофизических экспериментах при "просвечивании" Земли пучками нейтрино высоких энергий от ускорителей.

В заключение подчеркнем, что предложенный радиодетектор мюонов и нейтрино, несмотря на простоту и дешевизну, позволит увеличить объем регистрации на 5 - 7 порядков по сравнению с объемом существующих установок, что даст новые возможности для решения фундаментальных проблем физики высоких энергий и астрофизики.

Авторы выражают глубокую благодарность М.А.Маркову, Г.А.Аскарьяну, В.В.Богородскому, В.Л.Гинзбургу, Л.Г.Деденко, Г.Т.Защепину и А.Е.Чудакову за стимулирующие обсуждения.

Литература

1. Markov M.A. Proc. X Int. Conf. High Energy Phys., Rochester, 1960, p. 579.
2. Reines F. et al. Proc. Neutrino-76, 1977, Aachen, ed H. Faissner; Аскарьян Г.А., Долгошеин Б.А. Письма в ЖЭТФ, 1977, 25, 276; Железных И.М., Леонов Ю.С. Письма в ЖЭТФ, 1978, 27, 466; Stenger V. et al. Proc. Neutrino-81, 1981, v. 2, p. 233, Maui, Hawaii.
3. Аскарьян Г.А. ЖЭТФ, 1961, 41, 616; 1965, 48, 988.
4. Гусев Г.А., Деденко Л.Г., Железных И.М. Труды Всесоюзной конференции по детектированию нейтрино в больших водных объемах, июнь 1983, Алма-Ата (в печати).
5. Гляциология (сб) т. 1 Геофизические методы в гляциологии, М., 1977.
6. Богородский В.В., Бенгли Ч., Гудмансен П. Радиогляциология, Л. 1983.
7. Богородский В.В., Гусев А.В., Хохлов Г.П. Физика пресноводного льда, Гидрометеониздат, Л. 1975.
8. Alikhanian A.I., Laziev E.V., Tumanian W.A. Nucl. Instr. and Methods, 1963, 20, 276.
9. Березинский В.С., Газизов А.З. Письма в ЖЭТФ, 1977, 25, 276; Beresinsky V.S., Cline D., Schramm D.N. Phys. Lett., 1978, 78B, 635.
10. Dedenko L.G. et al. Proc. DUMAND-78, 1978, v. 2, p. 81, ed. A. Roberts, La Jolla.
11. Mikaelian K.O., Zheleznykh I.M. Phys. Rev D, 1980, 22, 2122.
12. Dedenko L.G., Markov M.A., Zheleznykh I.M. Proc. Neutrino-81, 1981, v. 1, p. 202, Maui, Hawaii.
13. Volkova L.V., Zatsepin G.T. Proc. 17-th ICRC, Paris, 1981, 7, p. 114.