

# АКУСТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ, СОЗДАВАЕМОЕ В ВОДЕ ПУЧКОМ ЭЛЕКТРОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 50 МЭВ

А.А. Афанасьев

Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ

E-mail: [andrei.afanasiev@gmail.com](mailto:andrei.afanasiev@gmail.com)

Детектирование нейтрино высоких энергий играет уникальную роль в решении задач современной космологии. Это связано с тем, что нейтрино обладают очень малым сечением взаимодействия с веществом и не имеет электрического заряда, а следовательно, не меняют своей траектории из-за магнитных полей в космосе.

На данный момент существует три метода детектирования нейтрино высоких энергий. Все они основаны на различных процессах, происходящих при взаимодействии нейтрино с веществом детектора (рис. 1).

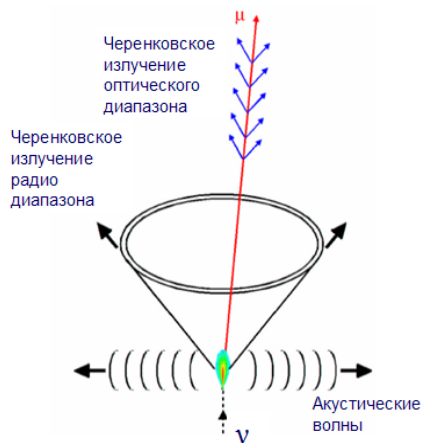


Рис.1. Схематическое изображение происходящих в веществе процессов при взаимодействии нейтрино с атомом вещества.

Первый метод основан на эффекте Черенкова-Вавилова. При взаимодействии нейтрино с веществом может образоваться заряженный лептон соответствующего аромата, обладающий высокой энергией, который будет двигаться в веществе со скоростью, превышающей скорость света в этом веществе. В таком случае лептон будет испускать излучение Черенкова-Вавилова в оптическом диапазоне. Черенковское излучение можно зафиксировать фотоэлектронными умножителями и, учитывая геометрию распространения излучения, восстановить трек частицы [1].

Второй метод заключается в регистрации звуковых волн, которые возникают в воде при распространении адронных ливней. Основным преимуществом акустического метода перед черенковским является возможность достижения больших объемов регистрации при меньшей стоимости установки. Это связано с тем, что расстояние, на которое может распространяться звук с частотой 10 кГц в воде, составляет порядка нескольких километров, в то время как интенсивность черенковского излучения на расстоянии 40 метров от трека составляет лишь один фотон на регистрирующую поверхность ФЭУ (диаметром 24,5 см).

Третий метод основан на регистрации радиоволн, испущенных электромагнитным ливнем. В случае электронного нейтрино рожденный лептон является электроном, вызывающим электромагнитный ливень. Последний испускает когерентное излучение радиодиапазона 0.1–1 ГГц (Эффект Аскаряна). Условием когерентности является размер области испускания, который должен быть меньше длины волны испущенного сигнала. Таким образом, системой детекторов радиоволн можно зарегистрировать развитие электромагнитного ливня и его направление [2].

При поглощении излучения в среде происходит выделение теплоты. Поскольку частицы распространяются в среде со скоростью, близкой к скорости света, то с точки зрения акустики в ограниченной области пространства практически мгновенно создается зона разогрева. Тепловая энергия частично преобразуется в энергию звуковых волн: поскольку жидкость расширяется при нагревании, в зоне разогрева создается область повышенного давления, которая и порождает акустическую волну. Такой механизм генерации звука носит название терморadiационного. Большое число работ, в том числе эксперименты на ускорителях, показали, что именно этот механизм является доминирующим механизмом генерации звука проникающим излучением в воде [3,4,5].

Мы рассматриваем ситуацию, когда полное энергосодержание в процессе прохождения частиц в среде имеет величину  $E \geq 10^{15}$  эВ. Лишь при таких больших значениях энергосодержания возможна уверенная регистрация акустического сигнала, когда его уровень существенно превышает уровень шума. Такое энергосодержание достигается на ускорителях при большой интенсивности пучка протонов или электронов. Оно соответствует энергии, которая выделяется в каскаде, образованном нейтрино высоких энергий.

Нейтрино высоких энергий в основном взаимодействуют с веществом посредством неупругого рассеяния на адронах. Получивший энергию адрон рождает адронный ливень. При увеличении энергии нейтрино возрастает и сечение взаимодействия нейтрино с веществом. Для нейтрино с энергией  $10^{21}$  эВ пробег в воде составляет порядка 100 км. После первого взаимодействия энергия нейтрино распределяется между ядром и лептоном. В среднем лептон получает около 80% всей энергии. Оставшаяся энергия идет на развитие адронного ливня в воде, направление которого совпадает с направлением движения провзаимодействовавшего нейтрино [6]. Объем воды вдоль оси адронного ливня подвергается нагреванию и расширяется, производя акустический импульс, который распространяется перпендикулярно оси ливня. В случае с нейтрино, обладающим энергией  $10^{20}$  эВ, 99% всей энергии адронного ливня заключено в объеме цилиндрической формы с радиусом 20 см, и длиной 10 м. Область распространения сигнала является сильно сплюснутым цилиндром, ось которого совпадает с осью распространения адронного ливня. Высота такого цилиндра приблизительно равна длине ливня, а радиус определяется расстоянием распространения звуковых волн в веществе:  $\sim 10$  км для воды. Расстояние, на которое распространяется звук в веществе, зависит от частоты акустического сигнала.

В апреле 2006 года был проведен эксперимент на импульсном разрезном микротроне RTM70 НИИЯФ МГУ [7]. Энергия электронов в эксперименте составляла 50 МэВ, длительность импульса ускорителя – 8 мкс, частота повторения импульсов – 10 Гц. Ток пучка в среднем составлял 2 мА. Это соответствует средней интенсивности около  $10^{11}$  частиц в импульсе. Суммарное энерговыделение в импульсе составляло порядка  $5 \cdot 10^{18}$  эВ.

В качестве среды, в которой возникало исследуемое акустическое поле, использовалась дистиллированная вода, заполнявшая бассейн из оргстекла, который применялся ранее в акустических экспериментах на ускорителе протонов [5]. Бассейн имел форму параллелепипеда размерами 50,8 x 52,3 x 94,5 см. Уровень воды в эксперименте составлял 390 мм, ее средняя температура была равна 20,5°C. При этом возможное локальное увеличение температуры в результате прохождения пучка не контролировалось. Размеры бассейна были достаточными, чтобы при анализе данных разделить прямой сигнал от пучка и сигналы, отраженные от стенок. Пучок электронов вводился в центр измерительного объема через дюралюминиевую трубу, закрытую заглушкой из тефлона.

Измерения проводились с помощью широкополосного (до 160 кГц) высокочувствительного ( $> 1$  мВ/Па) измерительного гидрофона, изготовленного специалистами ВНИИФТРИ для проведения измерений по радиационной акустике.

Блок-схема эксперимента представлена на рис. 2. Гидрофон подключался через собственный предусилитель, а также через измерительный усилитель Robotron (усиление 50 Дб, полоса частот 20 Гц - 200 кГц) и усилитель У7-1 (усиление 10 Дб, полоса частот 10-100 кГц).

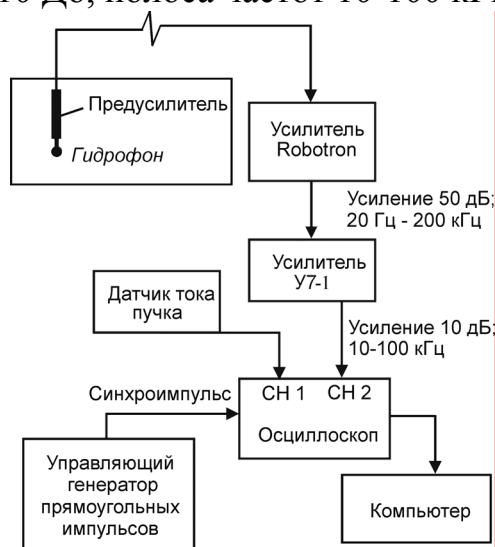


Рис. 2. Блок-схема эксперимента.

Считывание информации производилось с помощью 2-лучевого осциллоскопа TEKTRONIX TDS 3032, управляемого с помощью персонального компьютера. Время наблюдения сигнала составляло 1 мс, каждое измерение содержало 104 точек по 0.1 мкс. Запуск осциллоскопа производился синхроимпульсом от генератора, управляющего работой

ускорителя, и предшествовал по времени приходу пучка на мишень приблизительно на 4 мкс. Осциллограммы акустических сигналов были зарегистрированы в 100 точках на прямолинейной трассе, коллинеарной оси пучка электронов и расположенной в горизонтальной плоскости, проходящей через ось пучка. Расстояние между трассой и осью пучка составляло  $X_0=6,5$  см. Гидрофон перемещался вдоль трассы с помощью электромеханического сканера с дистанционным управлением оригинальной конструкции В.И. Албула. Шаг сканера составлял 4,45 мм. Координата  $Z$  начальной точки измерения совпадала с началом акустической антенны.

На рисунке 3 пунктирной линией показан фрагмент сигнала с гидрофона, зарегистрированного на расстоянии 8 см от начала сканирования.

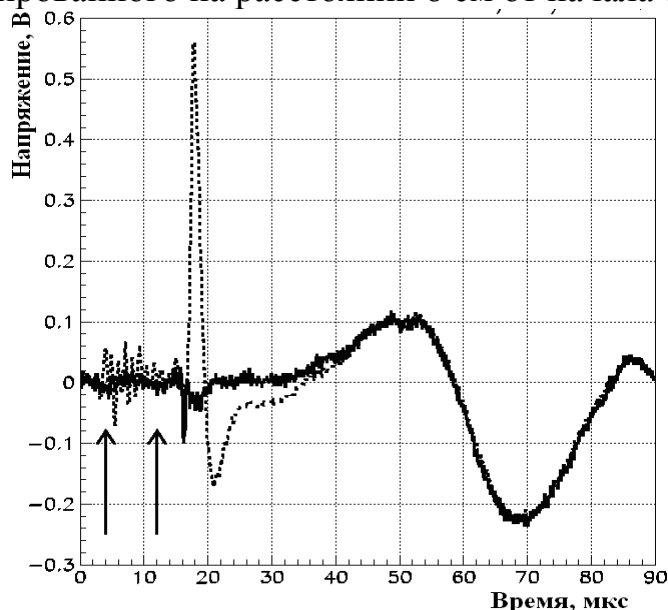


Рис. 3. Сигнал с гидрофона, зарегистрированный на расстоянии  $Z = 8$  см от начала акустической антенны и  $X_0 = 6,5$  см от ее оси.

По оси абсцисс отложено время от момента прихода синхроимпульса в мкс, по оси ординат – величина напряжения в вольтах. Интервал времени действия электронного пучка (4-12 мкс) отмечен стрелками. Акустический сигнал, возбуждаемый пучком, расположен в интервале от 34 до 85 мкс и имеет биполярную форму. При  $t=18$  мкс наблюдается электромагнитная наводка, связанная с работой ускорителя, по амплитуде превышающая полезный сигнал в несколько раз и затрудняющая анализ при малых временах ( $< 36$  мкс) и, следовательно, при малых расстояниях между источником и приемником звука. Можно существенно уменьшить влияние наводки, вычитая её из зарегистрированного сигнала. Наводка была измерена при работе ускорителя в отсутствие электронного пучка, ее характер определяет форму зарегистрированного сигнала в интервале 18-36 мкс. Результат вычитания показан на рисунке сплошной линией. Из рисунка следует, что процедура вычитания наводки позволяет, по крайней мере, в 7 раз подавить влияние паразитных сигналов при  $t < 25$  мкс, что важно для уточнения механизма возникновения радиационно-акустических волн. Результаты, представленные ниже, получены с применением данной процедуры.

На рисунке 4 изображены друг под другом временные зависимости

ультразвуковых сигналов, зарегистрированные в 66 точках на трассе измерения. Сигналы нормированы на 1 мА тока пучка.

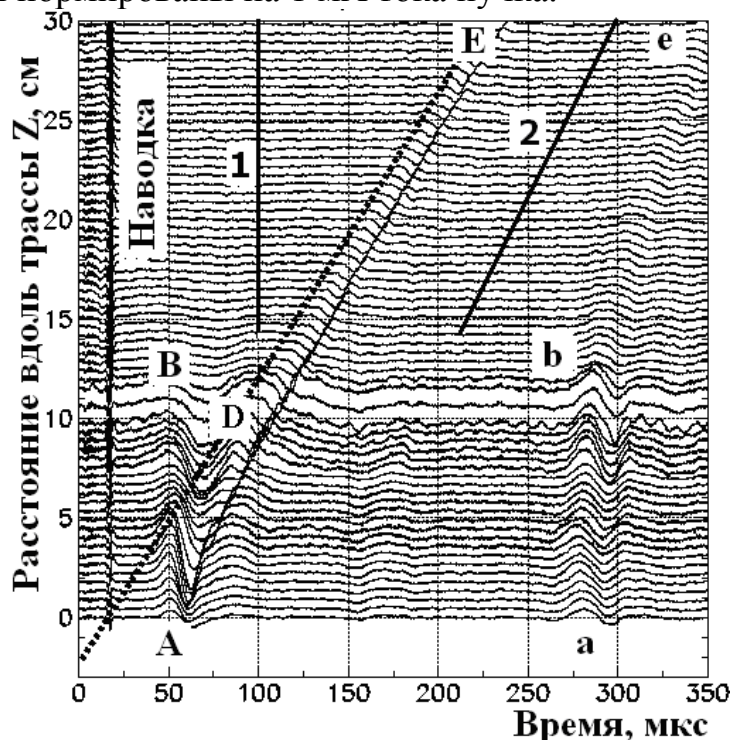


Рис. 4. Пространственно-временная структура акустического поля, создаваемого пучком электронов в воде.

Акустические сигналы образуют в плоскости (t-Z) три траектории, две из которых (AB и DE) имеют в качестве источника область распространения пучка электронов, третья (abe) является отражением сигналов исследуемого источника от дна бассейна. Траектории AB в виде гребней переменной амплитуды соответствует первая полуволна акустического сигнала (полуволна сжатия) от ближайшей точки излучающей цилиндрической антенны. Траектория почти параллельна оси расстояний, т.к. время распространения данного сигнала от источника до приемника одинаково с точностью до изменения поперечных размеров электронно-фотонного ливня.

Сигналы, образующие траекторию DE, начинаются с полуволны разрежения. Судя по времени появления сигналов, по форме (прямая линия) и направлению траектории, их источник находится в окрестности заглушки, отделяющей водную среду от воздуха. Ранее подобные сигналы были зарегистрированы в экспериментах с электронным [4] и протонным [5] пучками. Пунктирная линия на рисунке – результат аппроксимации точек, соответствующих началу акустических сигналов, линейной зависимостью  $R_i = V t_i + r$ , где  $i$  - номер точки трассы с координатой  $Z_i$ , в которой зарегистрирован данный сигнал (начало отсчета координаты  $Z$  совпадает с началом трассы сканирования),  $t_i$  – время прихода сигнала к гидрофону,  $R_i = \sqrt{X_0^2 + Z_i^2}$  – расстояние от центра заглушки до гидрофона. Аппроксимация выполнена на отрезке трассы от 13 до 37,5 см. Численные значения скорости звука  $V$  и расстояния  $r$  до источника звука в начальной точке сканирования находились в результате аппроксимации.

Для установления момента  $t_i$  прихода сигнала применялся следующий

алгоритм. В каждой  $i$ -ой точке находился минимум акустического сигнала  $t_{\min}$  в области, нижняя и верхняя границы которой отмечены на рисунке 4 прямыми 1 и 2, соответственно. Далее методом наименьших квадратов в интервале  $(t_{\min}-120 \text{ мкс} < t < t_{\min}+5 \text{ мкс})$  находились параметры аппроксимирующего гауссиана. Отсюда вычислялся момент прихода сигнала к гидрофону  $t_0$ . Таким образом, для каждой из 57 точек на отрезке были известны времена  $t_{0i}$  и расстояния  $R_i$ . Из этих данных было найдено значение скорости звука на данной траектории –  $V=(1435\pm 12)$  м/сек. Скорость звука, измеренная в калибровочном опыте, с пьезоэлектрическим излучателем в качестве источника звука –  $V=(1461\pm 15)$  м/сек. Значения совпадают в пределах двух стандартных отклонений, небольшие различия могут иметь место из-за конечных размеров излучателя и приемника.

Что касается вычисленного значения коэффициента  $\gamma = (-2,50 \pm 0,05)$  см, то его статистически значимое отклонение от  $X_0$  при  $t=0$ , возможно, свидетельствует о неодинаковой скорости звука в невозмущенной среде (далеко от источника) и в среде, где накладываются сигналы от двух источников звука. Одной из причин увеличения скорости звука вблизи электронного пучка могло быть локальное увеличение температуры, вызванное действием пучка.

В результате эксперимента впервые получена детальная пространственно-временная картина акустического поля, создаваемого в воде интенсивным пучком электронов, на прямой, параллельной оси пучка. Методика эксперимента исключала влияние отраженных волн в области наблюдения, которая составляла около 30 см и приблизительно в 3 раза превышала продольные линейные размеры акустической антенны, возникающей при прохождении пучка в воде. Используемый алгоритм обработки сигналов и способ представления результатов позволили надежно разделить сигналы от самой цилиндрической антенны и сигналы из области заглушки, через которую пучок электронов входит в воду. В результате анализа скорости распространения последних получено указание на возможное увеличение скорости звука в области наложения двух указанных сигналов. Причину этого эффекта предполагается установить в дальнейших экспериментах.

1. N.G. Lehtinen et al. :astro-ph/0104033
2. Gunter Sigl :astro-ph/0104291
3. L. Sulak, T. Armsrong, H. Baranger et al. // Nuclear Instruments and Methods, 1979, V.161, №2, 203-217.
4. В.А. Балицкий, В.С. Городецкий, Л.М. Лямшев и др. // Акустический журнал, 1985, Т. 31, № 5, 47.
5. В.И. Албул, В.Б. Бычков, С.С. Васильев и др. // Акустический журнал, 2005, Т. 51, №1, 47.
6. R.U. Abbasi et al. :astro-ph/0208301
7. В.Б. Бычков, В.С. Демидов и др. // Вестник МГУ, серия "Физика и астрономия", 2007, №3 (ru.arxiv.org/pdf/physics/0610241).