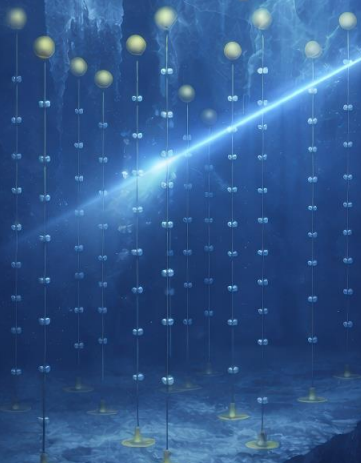
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

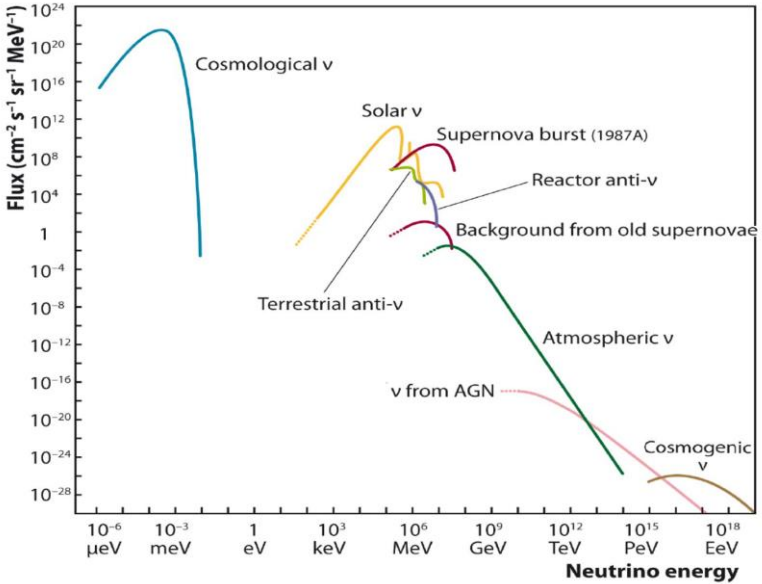
Нейтринные детекторы нового поколения для изучения астрофизических нейтрино

А.А. Захаров



Семинар ОФВЭ 3 ноября 2026 года

Источники и детекторы высокоэнергетических нейтрино



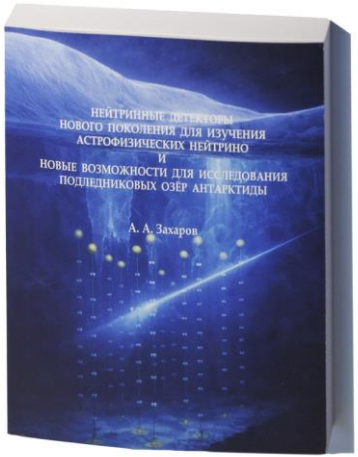
Детекторы: KM3Net ARCA (1 км^3), Baikal-GVD (0,7 км^3), IceCube (1 км^3), P-ONE (0,9 км^3).

Детектор KM3NeT ARCA зафиксировал в 2023 г. уникальное событие с энергией нейтрино 220 ПэВ.
Детектор IceCube за 9 лет зарегистрировал два нейтринных события в диапазоне энергий от 1 ПэВ до 10 ПэВ. В год IceCube регистрирует 30 – 40 событий с энергией нейтрино >100 ТэВ. В 2017 г. было зарегистрировано нейтрино ~290 ТэВ от блазара TXS 0506+056.
Baikal-GVD зарегистрировал 8 событий с энергией нейтрино >200 ТэВ.

В 2026 году Нобелевскую премию по физике «за решающий вклад в работу нейтринной обсерватории IceCube и открытие высокоэнергетических нейтрино астрофизического происхождения» получил бельгийско-американский астрофизик Фрэнсис Хальцен. Его видение и научное лидерство сыграли основополагающую роль в создании нейтринной обсерватории IceCube.

Проекты новых детекторов:
IceCube-Gen2 (7,9 км^3), TRIDENT (8 км^3), NEON (10 км^3), HUNT (30 км^3).

Концепция нейтринного телескопа Vostok с оптическим и акустическим детекторами объёмом соответственно 21 км^3 и ~100 км^3.
Общеинститутский семинар НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ, 2023.
Ученый совет НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ, 2023.
Объединенный семинар ИЯИ РАН, ОИЯИ, 2023.



Изд. НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, 2026 – 239 с.; 130 ил. ISBN 978-5-86763-506-0

Актуальность тематики

Ожидается, что благодаря новым экспериментальным установкам, повышающим чувствительность и энергетический охват, появится возможность сделать открытия в области физики частиц высоких энергий, астрофизики и космологии.

Поиск источников астрофизических нейтрино сверхвысоких энергий

Локализованными источниками высокоэнергетических нейтрино могут быть активные галактические ядра со струями (блазары), слияния нейтронных звёзд или чёрных дыр, вспышки сверхновых, двойные звёзды.

К нелокализованным источникам нейтрино относится образование ГЗК-нейтрино, Z-вспышки от взаимодействия нейтрино высоких энергий с реликтовыми нейтрино, распад или аннигиляция частиц тёмной материи.

Существование ГЗК-предела

Взаимодействие релятивистских заряженных частиц с реликтовым микроволновым фоном фотонов приводит к образованию пионов и нуклонов, которые распадаются на нейтрино. Помимо рождения нейтрино это взаимодействие, как предполагается, подавляет поток космических лучей с энергией выше $5 \cdot 10^{19}$ эВ – эффект, известный как предел Грайзена – Зацепина – Кузьмина.

Изучение осцилляций нейтрино сверхвысоких энергий

Нейтрино ν_e, ν_μ и ν_τ, осциллируют по мере своего распространения и соотношение ароматов нейтрино сильно зависит от их энергии.

Изучение поперечного сечения нейтрино сверхвысоких энергий

Поток нейтрино уменьшается с увеличением энергии, а поперечное сечение растет, что делает Землю непрозрачной для нейтрино. Менее 20 % нейтрино с энергией 100 ТэВ и всего 5 % нейтрино с энергией 1 ПэВ могут пересечь Землю под вертикальным зенитным углом.

Исследование стабильности нейтрино

Поскольку нейтрино обладают массой, они могут распадаться при этом их время жизни больше, чем возраст Вселенной, однако если нейтрино соединятся с безмассовым посредником, то скорость распада может быть увеличена.

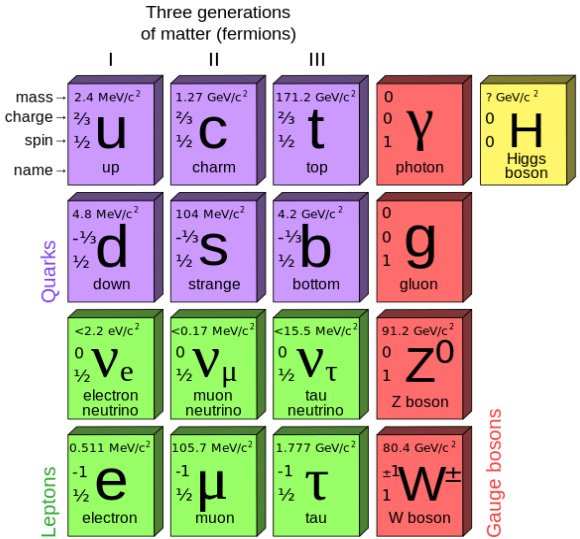
Изучение скрытых взаимодействий с космическим фоном

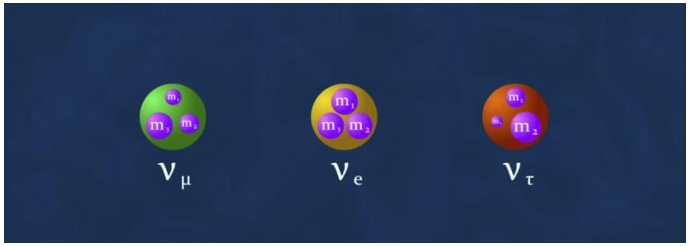
Космические нейтрино высоких энергий могут взаимодействовать с низкоэнергетическим реликтовым фоном или с темным фоном посредством новых взаимодействий.

Изучение природы темной материи

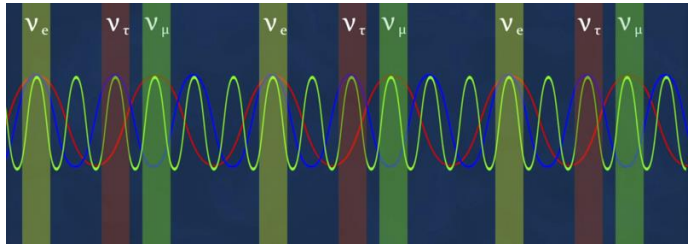
Темная материя может распадаться или самоаннигилировать в нейтрино, что отразится на энергетическом спектре нейтрино.

Нейтрино





Свободное нейтрино существует в виде суперпозиции собственных состояний фундаментальных масс ν_1, ν_2, ν_3, смешивание которых приводит к появлению трех ароматов нейтрино ν_e, ν_μ, ν_τ.



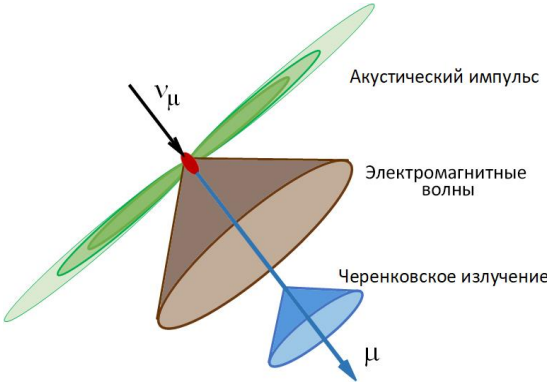
Предполагаемое соотношение ароматов в источнике
$(\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau)_s = (1 : 2 : 0)_s$
Соотношение на Земле $(\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau)_\oplus = (1 : 1 : 1)_\oplus$
Соотношение ароматов зависит от энергии нейтрино.

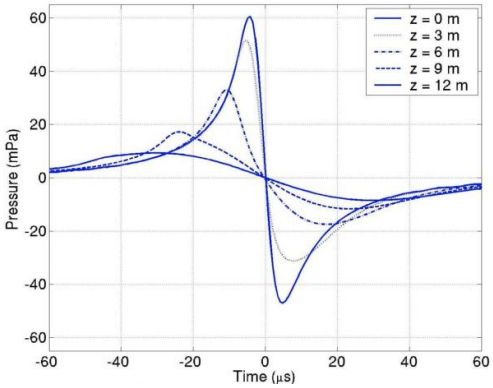
$$n^\circ \to p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$$
$$p^+ \to n^\circ + e^+ + \nu_e$$
$$p^+ + e^- \to n^\circ + \nu_e$$
$$\pi^- \to \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$
$$\pi^+ \to \mu^+ + \nu_\mu$$
$$\mu^- \to e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$$
$$\mu^+ \to e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e$$
$$\tau^- \to \mu^- + \bar{\nu}_\mu + \nu_\tau$$
$$\tau^+ \to \mu^+ + \nu_\mu + \bar{\nu}_\tau$$

Атмосферные нейтрино высоких энергий

$$K_S^0 : K_{Se3}^0 \to \pi^\pm + e^\mp + \overline{\nu_e}(\nu_e)$$
$$K_{S\mu 3}^0 \to \pi^\pm + \mu^\mp + \overline{\nu_\mu}(\nu_\mu)$$

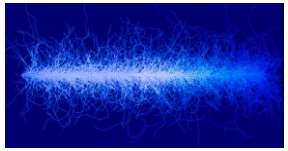
Результаты взаимодействия нейтрино со средой







Электронное нейтрино



Мюонное нейтрино



Тау-нейтрино

1) Термоакустический эффект был предсказан Г.А. Аскаряном в 1957 г. и описан в 1979 г. Так как скорость звука в воде намного меньше, чем скорость распространения каскада, энерговыделение приводит к почти мгновенному расширению объема.
2) Эффект испускания электромагнитными каскадами когерентного излучения в радиочастотном диапазоне был предсказан Г.А. Аскаряном в 1962 г. Если длина электромагнитной волны превосходит диаметр каскада, то возникает когерентность, в результате чего сигнал увеличивается пропорционально E_ν^2.
3) В прозрачной среде при движении в ней заряженной частицы со скоростью, превышающей скорость распространения света в этой среде возникает свечение Вавилова – Черенкова.

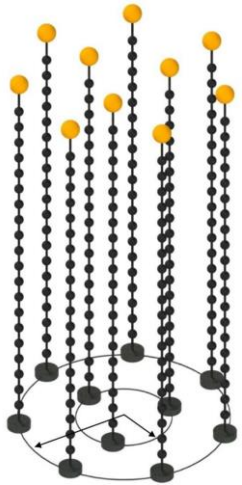
Протяженность каскада от электронного нейтрино:
~4 м для потока с энергией 10 ГэВ,
~7 м для потока с энергией 1 ТэВ.

Мюоны имеют малые энергетические потери в среде.
Длина мюонного трека в воде достигает 1 км при энергии мюона 350 ГэВ и доходит до 10 км при энергиях в масштабе ПэВ.
Мюон эмитирует ~ 400 фотонов с длиной волны от 300 до 700 нм на каждый сантиметр пройденного пути.

Время распада тау-частицы связано с энергией частицы и её массой по формуле: $t = t_0 \cdot (E/m)$, где t_0 — время распада для покоящейся частицы.
Длина трека с высокой энергией может составить несколько десятков метров, так для энергии 1 ПэВ она достигает ~50 м.
Если энергия τ-нейтрино составляет ≤100 ТэВ будет наблюдаться единичная вспышка.

Общие требования к нейтринному детектору

1. Детектор должен иметь большой объём для набора статистики событий, достаточной для проведения исследований в области нейтрино высоких и сверхвысоких энергий.
2. Величина затухания сигнала в среде должна быть низкой, что способствует распространению сигнала.
3. В детекторе не должно быть большого количества фоновых событий, мешающих регистрации нейтринных событий.
4. Сенсоры в детекторе должны иметь пространственное и временное разрешение обеспечивающее регистрацию нейтринных событий.
5. Плотность сенсоров в объёме детектора должна позволять определить направление движения нейтрино для выявления их источника.
6. Сенсоры должны обеспечивать необходимую чувствительность для измерения сигнала.
7. Детектор должен обеспечить возможность определения аромата нейтрино с целью изучения осцилляций нейтрино высоких энергий.



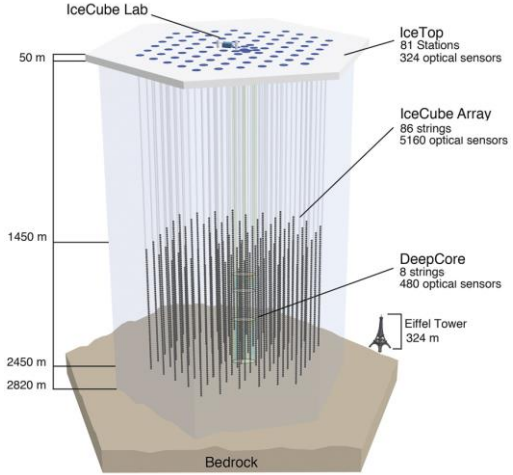
Детекторы астрофизических нейтрино

Нейтринный детектор IceCube

Гирлянды детектора располагаются по гексагональной решётке в 86 скважинах с расстоянием 125 м между ними на глубине от 1450 до 2450 метров. Каждая гирлянда состоит из 60 оптических модулей ∅ 35,6 см установленных на расстоянии 17 м между собой. Детектор имеет объем 1 км^3 и содержит 5160 оптических модулей. Разрешение IceCube на уровне 1° для трековых событий (ν_μ) и 10°- 15° для каскадных событий (ν_e, ν_τ) оставляет большие неопределенности нахождения источника нейтрино.



ФЭУ Hamamatsu R7081-02 с катодом ∅ 220 мм

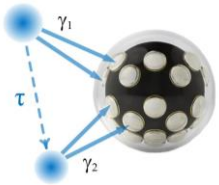


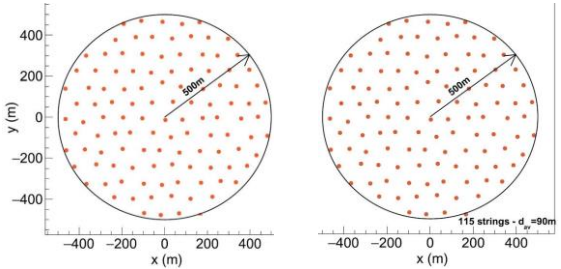
Нейтринный детектор KM3NeT ARCA

Детектор находится в Средиземном море в 100 км от Сицилии на глубине около 3 500 м. Толщина слоя экранирующей морской воды над детектором составляет 2 800 м. Детектор состоит из двух блоков высотой ~ 700 м по 115 гирлянд в каждом блоке. Расстояние между соседними гирляндами ~ 90 м. Гирлянда содержит 18 оптических модулей ∅44 см, установленных на расстоянии 36 м друг от друга. Полный объём нейтринного детектора из двух расположенных рядом блоков равен ~ 1 км^3.



31 ФЭУ Hamamatsu R12199-02 с катодом ∅ 72 мм



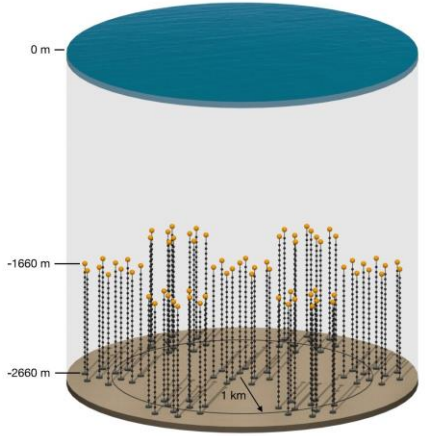


Детекторы астрофизических нейтрино

Нейтринный детектор P-ONE

Детектор располагается у западного побережья Канады, в 380 км от Ванкувера, на глубине 2 660 м. Детектор содержит 1 400 оптических модулей и включает 7 кластеров по 10 гирлянд длиной 1 000 м. Объём одного кластера составляет ~ 0,125 км^3. Гирлянда состоит из 20 оптических модулей.

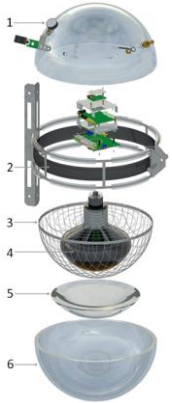


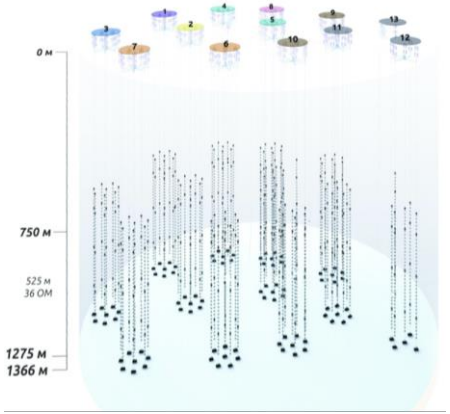


Нейтринный детектор Baikal-GVD

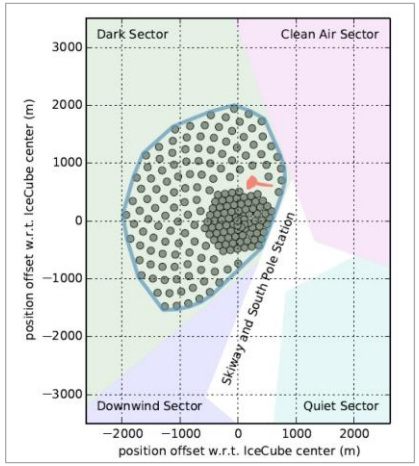
Детектор расположен в южной части озера Байкал в 4 км от берега. Глубина озера в этом месте составляет 1367 метров. Эффективный объём детектора позволяет регистрировать каскады частиц с энергией >100 ТэВ с угловым разрешением ~ 4°.

Телескоп по состоянию на 2023 год состоит из 12 глубоководных кластеров, расположенных друг от друга на удалении 250 м. Каждый кластер объединяет 8 вертикальных гирлянд в окружности радиусом 60 м. Каждая гирлянда крепится ко дну озера при помощи якоря и имеет в верхней части поплавок, который поддерживает её в вертикальном положении. Гирлянда включает 36 оптических модулей, установленных на расстоянии 15 м между собой. Детектор имеет 3 456 оптических модулей. Слой воды над детектором равен 750 м. Из-за небольшой глубины присутствует фон атмосферных мюонов, который мешает регистрации нейтрино высоких энергий.





Новые проекты нейтринных детекторов большого объёма



Проект нейтринного детектора IceCube-Gen2

В настоящее время началось осуществление проекта IceCube-Gen2, в котором планируется увеличить объём детектора до **7,9 км^3**. Дополнительно будут установлены 120 гирлянд на расстоянии 240 м друг от друга. Гирлянды оснащены 80 оптическими модулями каждая и имеют протяжённость по вертикали 1 250 м. Проект IceCube-Gen2 позволит повысить чувствительность к нейтринным источникам в 5 раз по отношению к существующей и улучшить угловое разрешение.



Проект нейтринного детектора TRIDENT

Нейтринный детектор TRIDENT предполагается разместить в Южно-Китайском море, в 540 км к югу от Гонконга на глубине 3 500 м. Объём детектора высотой 700 м будет равен ~ **8 км^3**.

Проект нейтринного детектора NEON

Нейтринный детектор NEON предполагается разместить в Южно-Китайском море. Детектор будет иметь геометрический объёмом **10 км^3**.

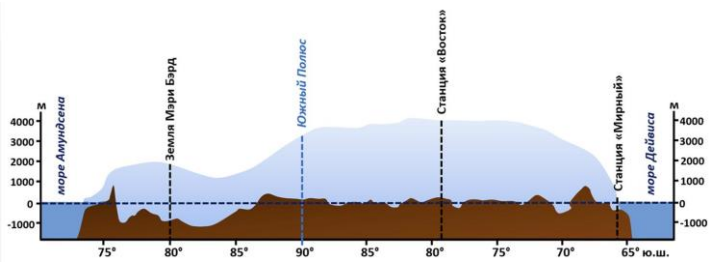
Проект нейтринного детектора HUNT

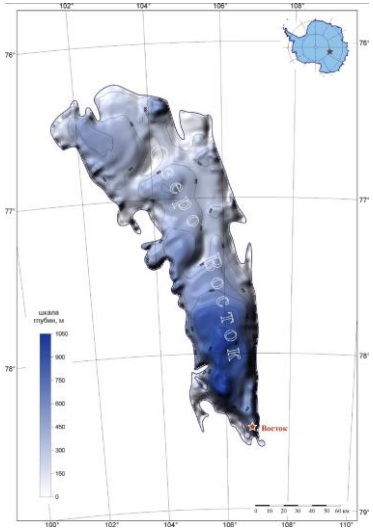
Геометрический объём детектора будет достигать **30 км^3**. В качестве места для размещения детектора нейтринного детектора HUNT кроме Южно-Китайского моря рассматривается озеро Байкал.

Концепция оптического нейтринного детектора в озере Восток

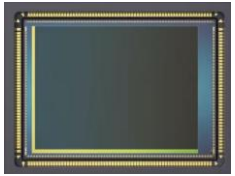
В основу концепции создания нейтринного детектора нового поколения положены три инновационных подхода

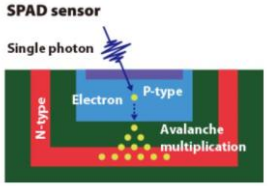
1. Размещение детектора в подледниковом озере в условиях экстремально низкого фона





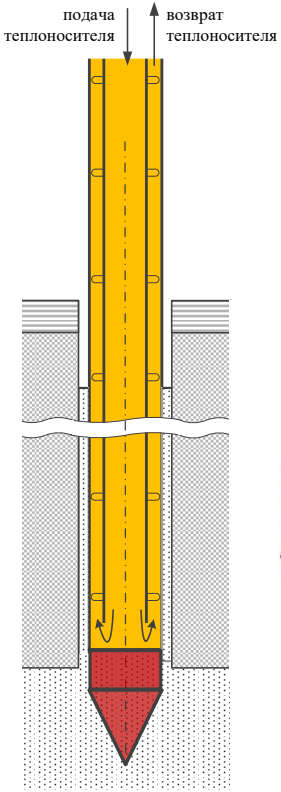
2. Использование SPAD сенсоров для регистрации черенковского излучения





SPAD-сенсоры регистрируют каждый фотон, достигший пикселя. Образовавшийся электрон умножается в лавине, позволяя выделить один фотон в виде одного электрического сигнала.

3. Применение новой технологии скоростного бурения льда и экологически чистого проникновения в подледниковое озеро





Преимущества и недостатки локации нейтринного детектора в подледниковом озере

Преимущества

+ Глубины до 1200 м и наличие кубических километров чистой пресной воды позволят создать детектор объемом > 20 км^3.
+ Высокая прозрачность воды в озере способствует регистрации черенковского излучения.
+ Слой льда толщиной около четырех километров эффективно экранирует детектор от потоков солнечного и атмосферного излучения.
+ В пресной воде озера отсутствует световой фон от распада изотопа ^{40}K, который содержится в морской воде и производит до 150 фотонов на распад.
+ Ожидаемое малое содержание микроорганизмов в воде озера обеспечит низкий световой фон (вплоть до полного его отсутствия) от возможной биолюминесценции, что важно для работы оптических модулей.
+ Отсутствие течений, способных смещать датчики, обеспечит их стабильное положение в объёме детектора.
+ В подледниковом озере отсутствует посторонняя активность, которая может повлиять на работу нейтринного детектора.
+ Размещение оптических датчиков в воде подо льдом потребует бурения двух скважин. Одна скважина будет использоваться для монтажа оборудования, а вторая для вывода кабелей.
+ Необходимость бурения всего двух скважин значительно сократит расходы и время на создание детектора сверхбольшого объёма.
+ Наличие льда открывает возможность использования акустического и электромагнитного метода регистрации нейтрино дополнительно к оптическому методу.

Недостатки

– Высокие экологические требования к проникновению и работе в озере (*новая экологически чистая технология бурения и вскрытия озера*).
– Использование ФЭУ требует бурение скважины большого диаметра (*новый компактный оптический модуль со SPAD-сенсором*).
– Географическая удаленность, суровые климатические условия (*новый зимовочный комплекс станции*).
– Необходимость использования автономного глубоководного дрона для монтажа оборудования в озере *(современные технологии позволяют)*.

Прозрачность среды нейтринного детектора

$I(L) = I_0 e^{-L/\lambda att}$

L – расстояние

I_0 – начальная интенсивность света

λ_{att} – длина затухания

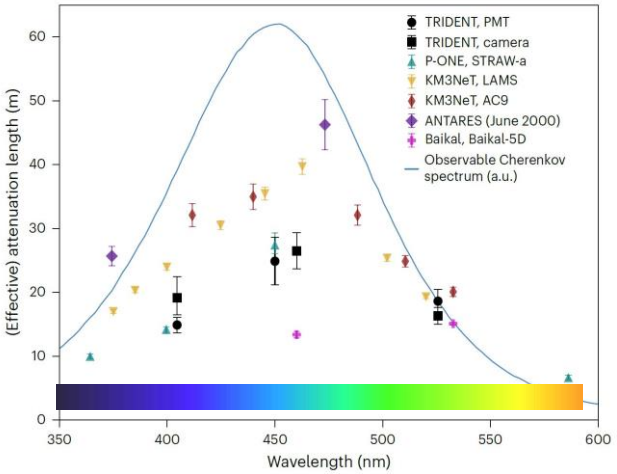
$$\frac{1}{\lambda_{att}} = \frac{1}{\lambda_{abs}} + \frac{1}{\lambda_{Ray}} + \frac{1}{\lambda_{Mie}},$$

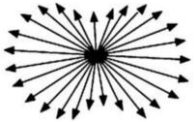
λ_{abs} – длина поглощения

λ_{Ray} – рэлеевская длина рассеяния

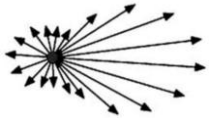
λ_{Mie} –длина рассеяния Ми

Длина затухания – это расстояние, на котором интенсивность света падает до *1/e*, то есть около 63% фотонов остановлены или рассеяны.

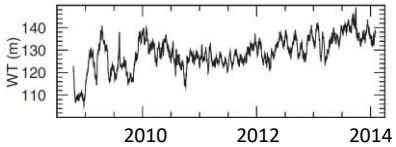




Рэлеевское рассеяние, r << λ



Ми рассеяние, r ≥ λ

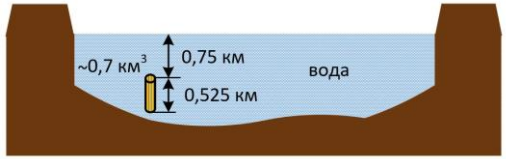


Super-Kamiokande

Локации нейтринных детекторов астрофизических нейтрино

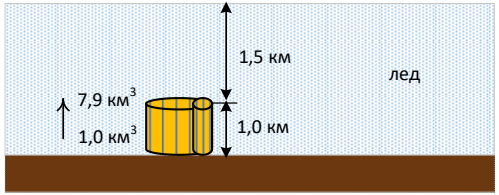


3456 шт.



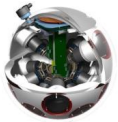
Baikal-GVD

IceCube

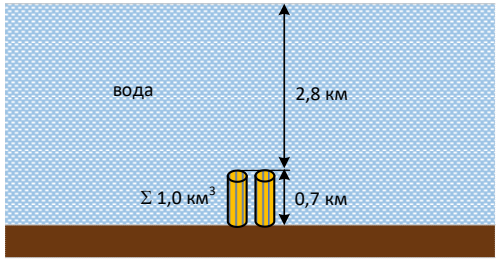




5160 шт. + 4440 шт.

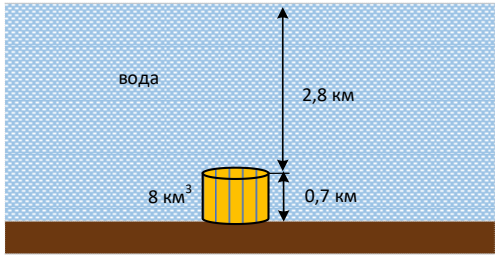


4140 шт.



KM3NeT ARCA

TRIDENT

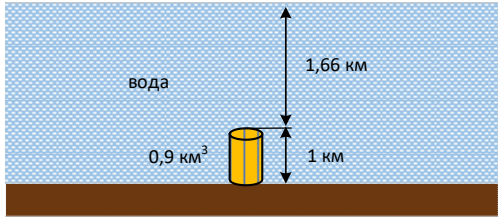




24000 шт.

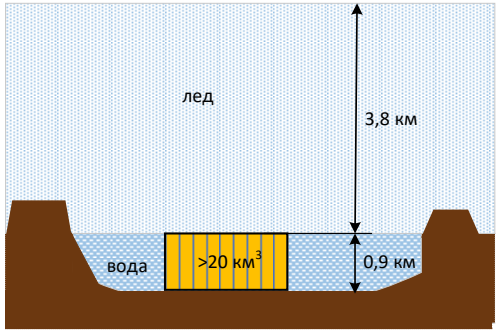


1400 шт.



P-ONE

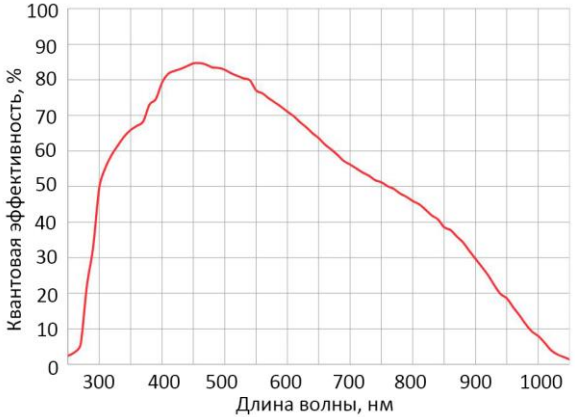
Vostok



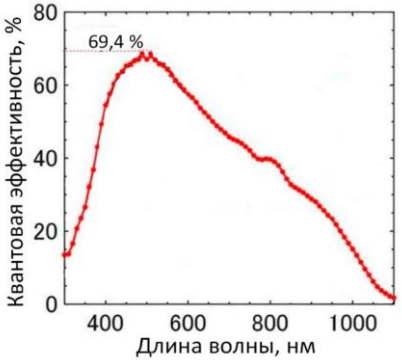


3752 шт.

Использование видеокамеры со SPAD сенсором



Сенсор Hamamatsu 9,4 Мп



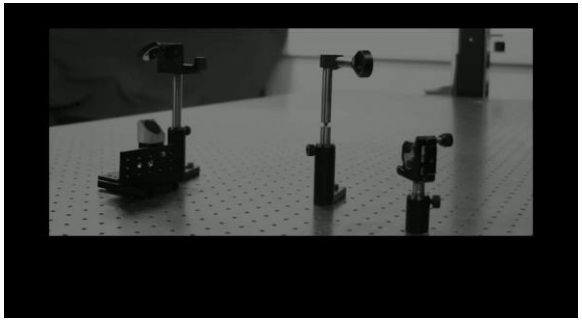
Сенсор Canon 3,2 Мп





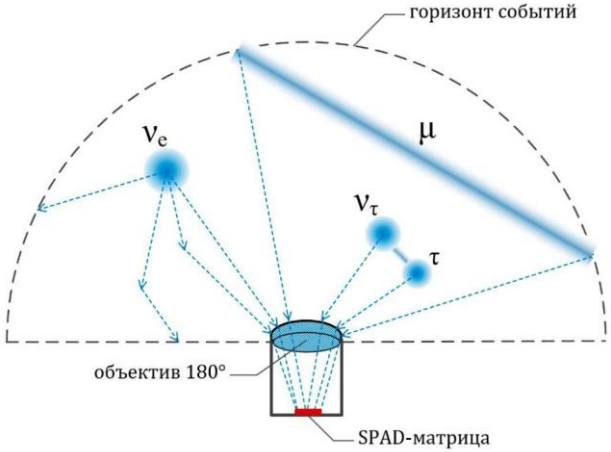
ФЭУ для сравнения:
квантовая эффективность ~ 25 % @ 450 нм,
временное разрешение ~ 2 нс.

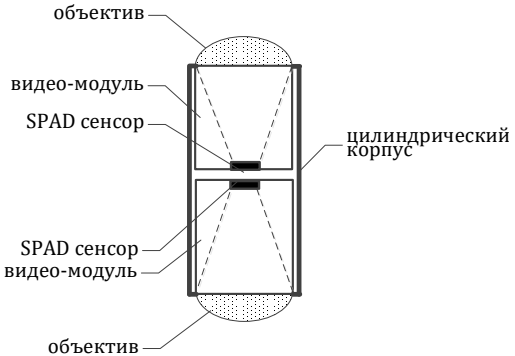
Тип	Размер фотодиода, мм	Площадь фотодиода, см^2	Квантовая эффективность, %	Относительная эффективность
ФЭУ	∅ 72	40,7	25	3,3
Мп SiPM	19 × 19	3,6	85	1

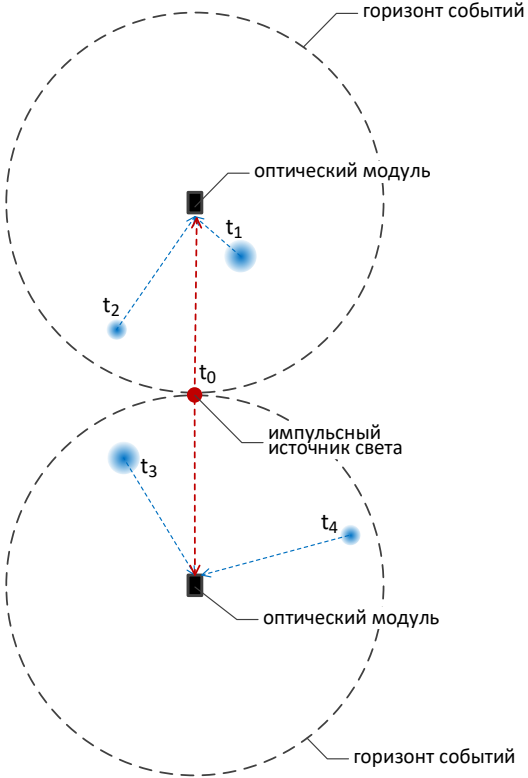


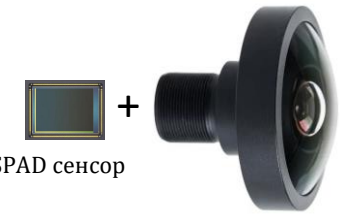
Временное разрешение составляет 100 пикосекунд. *З*а это время свет проходит в воде 22,5 мм.

Возможности оптического модуля детектора Vostok









SPAD сенсор

Объектив 180 °– 190°



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

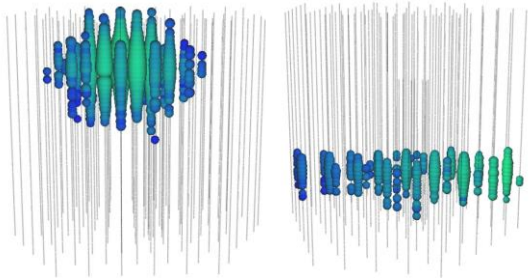
НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2866086

Способ регистрации нейтрино высоких энергий

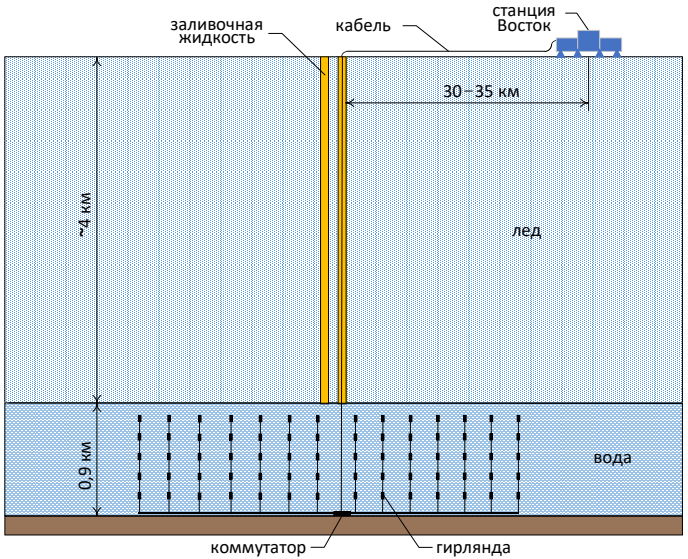
Патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение "Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт" (НИЦ "Курчатовский институт" - ПИЯФ) (RU)

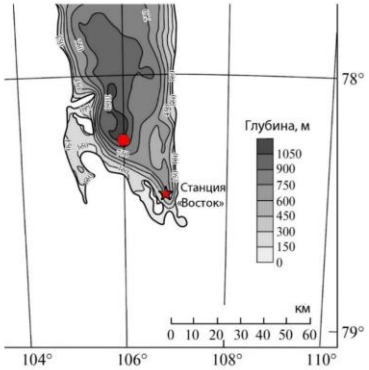
Авторы: Захаров Аркадий Анатольевич (RU)

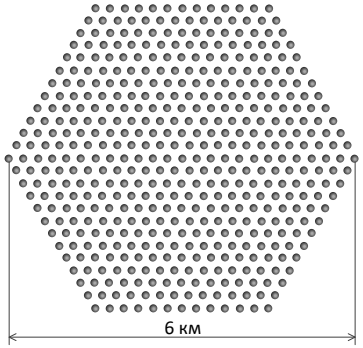


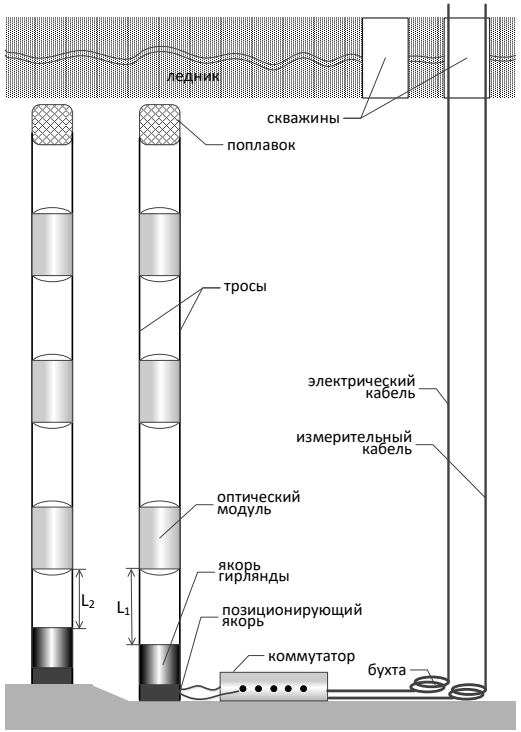
при λ_{att} = 50 м $V_{сферы} \approx 524\,000$ м^3

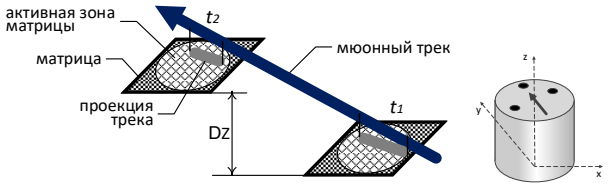
Размещение оптических модулей в озере Восток











Решетка детектора состоит из 469 гирлянд, по 8 оптических модулей с расстоянием 50 м. Общее количество оптических модулей 3752 шт. Площадь нейтринного детектора составляет 23,4 км^2, объем равен 21 км^3.

Геотермальный тепловой поток оценивается в 46 мВт/м^2. В южной части озера наблюдается приращение льда со скоростью 4,5 мм/год. Ледник движется с запада на восток со скоростью 2,0 м/год.

Использование экологически чистой технологии бурения и проникновения в озеро

Разработана экологически чистая технология бурения льда комбинированным тепловым снарядом на большие глубины без контакта буровой жидкости с водой и стенками скважины.


РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2825375

СПОСОБ БУРЕНИЯ И ВСКРЫТИЯ ПОДЛЕДНИКОВЫХ ОЗЕР

Патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение "Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт" (НИЦ "Курчатовский институт" - ПИЯФ) (RU)

Авторы: Захаров Аркадий Анатольевич (RU)

Заявка № 2023112860

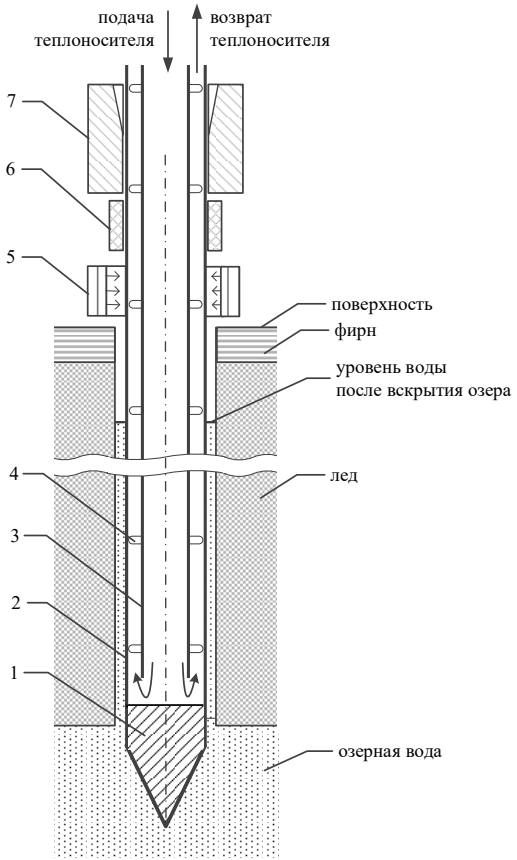
Приоритет изобретения 17 мая 2023 г.

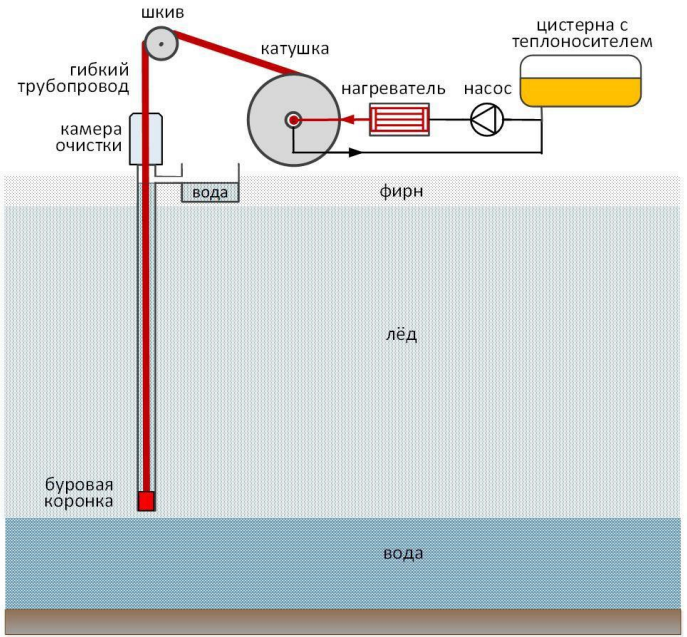
Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 26 августа 2024 г.

Срок действия исключительного права на изобретение истекает 17 мая 2043 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности Ю.С. Зубов

1 – тепловая буровая коронка;
2 – наружный трубопровод;
3 – внутренний трубопровод;
4 – центрующие упоры;
5 – ультрафиолетовый излучатель;
6 – устройство для очистки поверхности бурового снаряда;
7 – направляющее устройство.

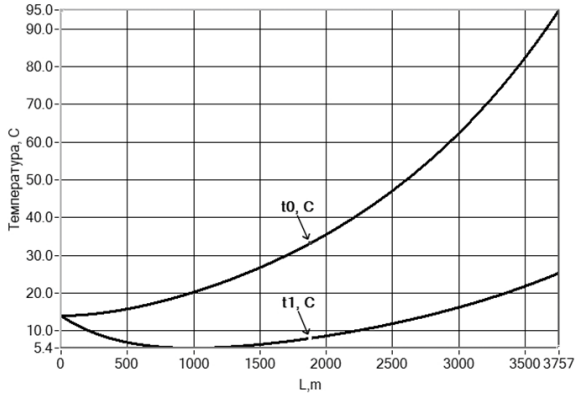




Расчетные параметры бурения скважины к озеру Восток

Выполнен тепловой расчет бурения скважины к озеру Восток, который демонстрирует возможность использования комбинированного теплового бурового снаряда.

Толщина ледника (глубина скважины), м	3758
Диаметр проходки, м	0,150
Теплоноситель	ПМС-2
Расход теплоносителя, кг/с	**6,80**
Температура теплоносителя на входе, °С	**95,0**
Температура теплоносителя в забое, °С	14,0
Температура теплоносителя на выходе, °С	25,3
Температура воды на выходе из скважины, °С	**0,87**
Тепловая мощность нагревателя буровой коронки, кВт	**96**
Тепловая мощность потока теплоносителя, кВт	**900**
Тепловые потери в сторону льда, кВт	**547**
Скорость теплоносителя на входе в трубопровод, м/с	2,98
Скорость теплоносителя на выходе из трубопровода, м/с	2,75
Скорость воды на выходе из скважины, м/с	0,33
Плавление льда буровой коронкой, кг/с	0,29
Плавление льда теплоносителем, кг/с	1,02
Гидравлическое сопротивление внутреннего трубопровода, МПа	3,95
Гидравлическое сопротивление кольцевого канала трубопровода, МПа	4,61
Полное гидравлическое сопротивление гибкого трубопровода, МПа	8,57
Гидравлическое сопротивление кольцевого канала воды, МПа	0,33
Время бурения скважины, час	**72**
Диаметр скважины у поверхности, м	**0,157**
Объем скважины, м^3	72,7
Средняя скорость проходки, м/мин	0,87
Удельный расход топлива, л/кВт час	0,104
Расход топлива на скважину, м^3	**7,47**

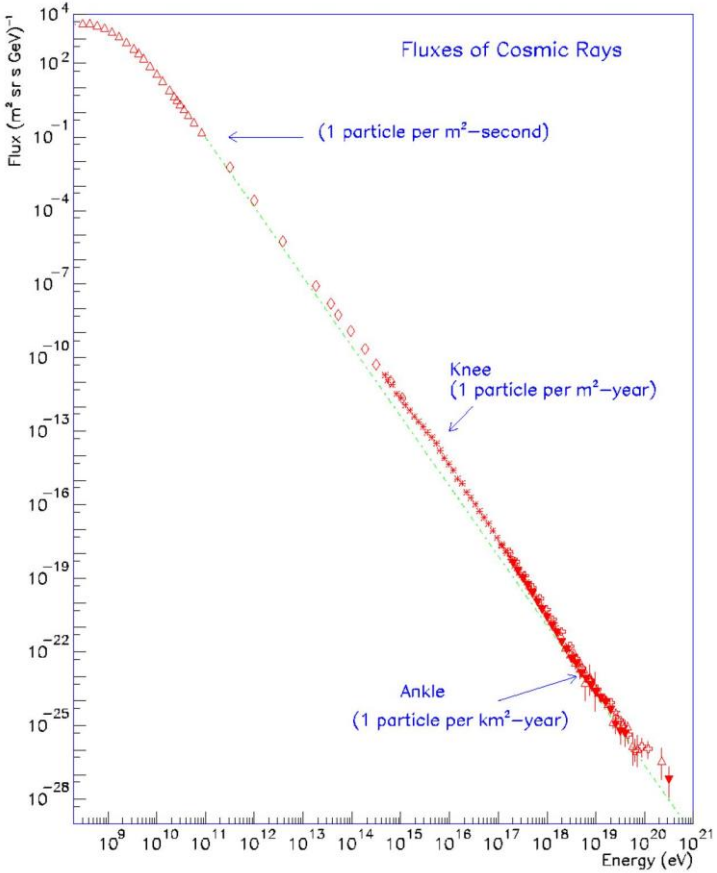


Температура теплоносителя
на опускном участке трубопровода (t0) и на подъемном участке (t1)

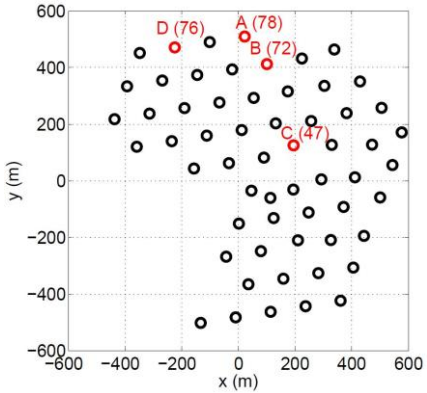
Скважина диаметром 250 мм
При мощности буровой коронки 110 кВт, время бурения составит ~ 7 суток,
мощность нагревателя теплоносителя – 838 кВт,
расход топлива без учета тепловых потерь на поверхности – 17,2 м^3.

Препринт НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, №3075, 2023 г.

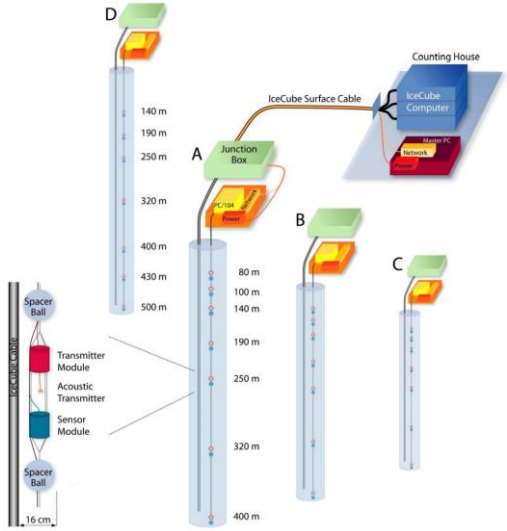
Акустический нейтринный детектор астрофизических нейтрино



Для изучения возможности детектирования высокоэнергетических нейтрино акустическим методом были созданы экспериментальные установки SAUND, ACoRNE, AMADEUS, Baikal, SPATS.



Четыре гирлянды SPATS в массиве IceCube по 7 датчиков в каждой гирлянде



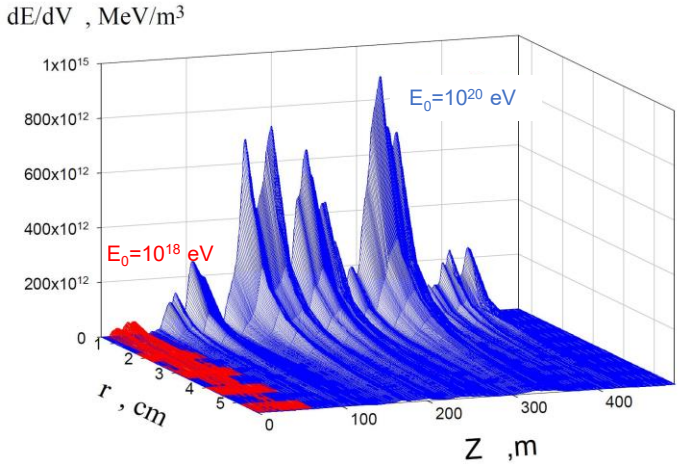
Гирлянда	Расстояние, м
AB	124,8
AC	421,1
AD	249,2
BC	302,2
BD	330,3
CD	543,0



Внешний диаметр 24 мм, длина 15 мм.
В датчиках использовалась пьезокерамика, работающая на частоте ~ 5–25 кГц.

Адронный каскад

В результате взаимодействия с нуклонами ядер кислорода и водорода энергия нейтрино распределяется между образовавшимся лептоном и адронным каскадом.
Нейтрино с энергией E_ν генерирует адронный каскад с энергией $E_{had} = yE_\nu$, где y = 0,2. Лептон уносит в среднем 80 % энергии. Направление адронного каскада совпадает с направлением движения первичного нейтрино. Структура адронного каскада не зависит от аромата нейтрино. Энергия адронного каскада выделяется в объёме цилиндрической формы радиусом несколько сантиметров и протяжённостью от нескольких десятков до нескольких сотен метров в зависимости от энергии нейтрино.



Миронович А.А.

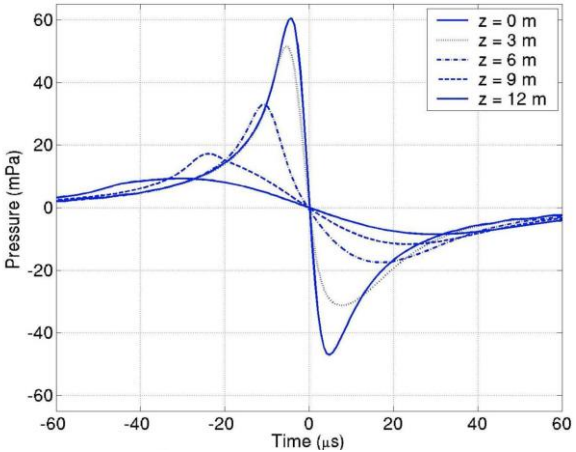
Для расчёта акустического сигнала, вызванного каскадом частиц, необходимо знать пространственное распределение тепловой энергии, выделяемой каскадом в плотной (твёрдой или жидкой) среде. Пространственное распределение энергии так же важно, как и общая выделенная энергия, поскольку оно определяет частотный спектр акустического сигнала и его направленность.

Акустический импульс

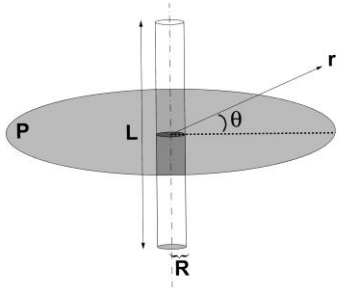
Энергия адронного каскада нагревает материал среды, что приводит к почти мгновенному расширению объёма, которое сопровождается генерацией биполярного акустического импульса. Частота импульса 10÷50 кГц.
Из-за мгновенного развития каскада акустическое излучение испускается в такой фазе, что отдельные импульсы интерферируют. В плоскости, перпендикулярной оси ливня, акустическое возмущение является когерентным, что приводит к большой амплитуде импульсов давления. Это аналогично линии когерентных источников, расположенных вдоль оси ливня. На удалении от этих источников звуковая волна в результате когерентности распространяется в плоскости, перпендикулярной оси каскада с углом раскрытия до 5°. Величина импульса давления быстро спадает при удалении от этой плоскости.

Поскольку акустический источник когерентен и простирается от десятков до сотен метров вдоль каскада, акустические условия ближнего поля могут поддерживаться на километровых расстояниях, и амплитуда акустической волны, которая распространяется в плоскости, перпендикулярной оси каскада, спадает как $1/\sqrt{R}$

Слабое затухание акустического сигнала в плотной среде позволят разместить чувствительные акустические датчики на большом расстоянии друг от друга и создать детектор сверхбольшого объема, что увеличит количество регистрируемых событий пропорционально объему.



Акустический импульс в морской воде от адронного каскада с энергией 10^{20} эВ



Акустический импульс

Амплитуда давления связана с энергией нейтрино зависимостью: $P_{max} \approx E_\nu \cdot \frac{1}{4} \cdot \gamma$,

где коэффициент Грюнайзена γ определяется свойствами среды: $\gamma = c_s^2 \cdot \frac{\beta}{C_p}$

c_s – скорость звука, β – коэффициент температурного расширения, C_p – теплоемкость.

Амплитуда акустического импульса на расстоянии R:

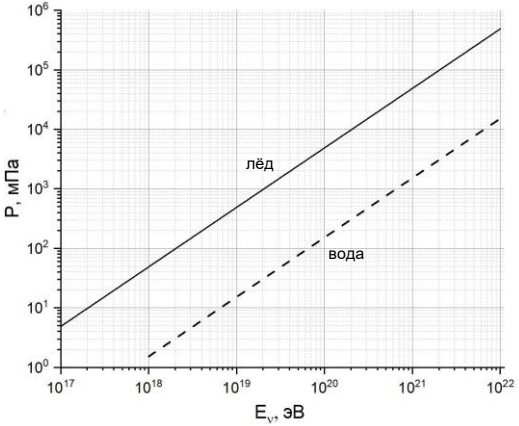
$P_R = P \cdot e^{-\frac{R}{\lambda}}$, где λ – длина затухания акустической волны.

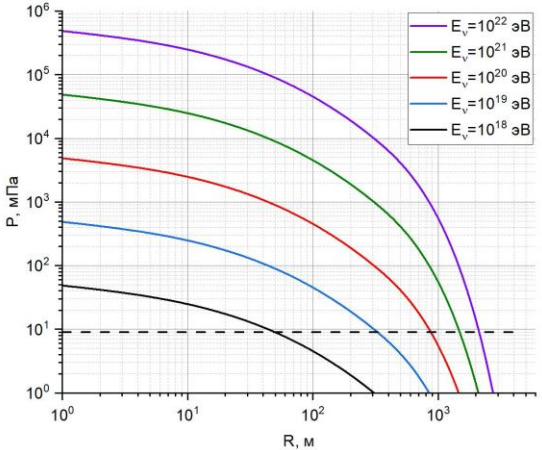
Коэффициент Грюнайзена:

γ = 0,153 морская вода

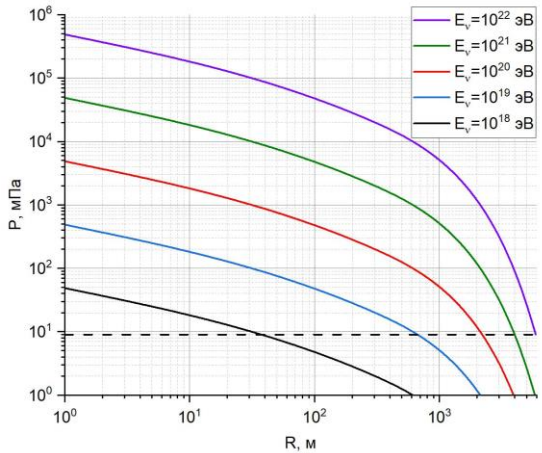
γ = 0,038 пресная вода 0°C, 40 МПа c_s = 1 468 м/с, C_p = 4 057 Дж/кг К, β = 7,13 · 10^{-5}.

γ = 1,12 лёд при температуре -20°C c_s = 3 878 м/с, C_p = 1 943 Дж/кг К, β = 1,58 · 10^{-4}.

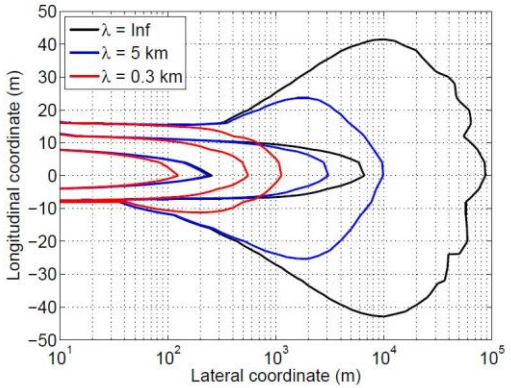




Зависимость амплитуды акустического импульса внутри льда от расстояния с учётом длины затухания λ = 300 м для нейтрино разных энергий

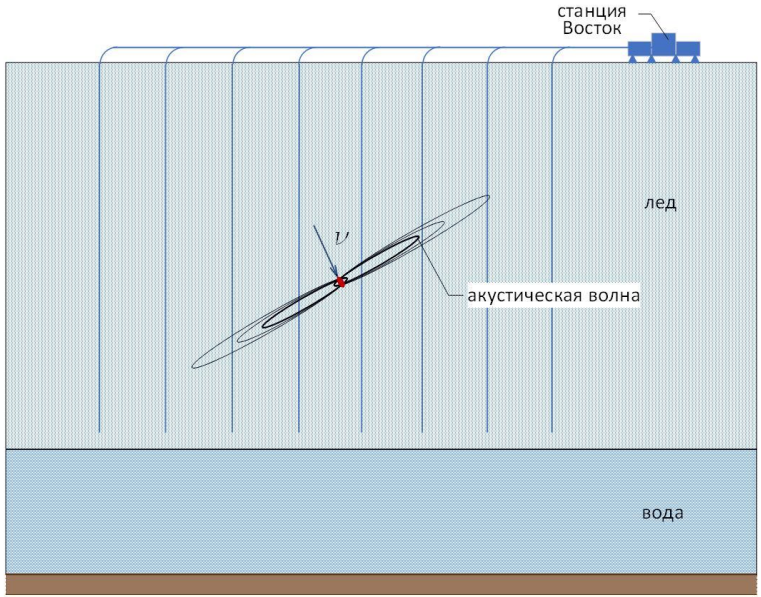


Зависимость амплитуды акустического импульса внутри льда от расстояния с учётом длины затухания λ = 900 м для нейтрино разных энергий



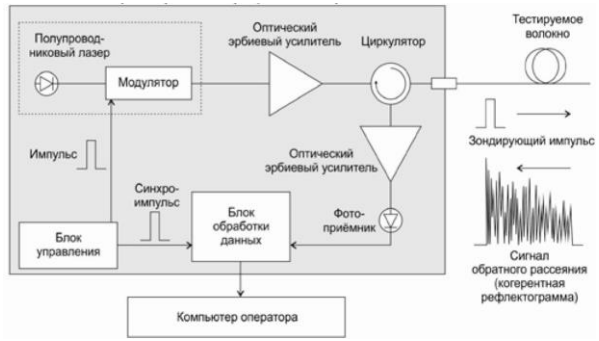
Контуры акустического поля внутри льда с порогом 9 мПа для нейтрино с энергиями 10^{18}, 10^{19} и 10^{20} эВ при различных длинах акустического затухания (λ)

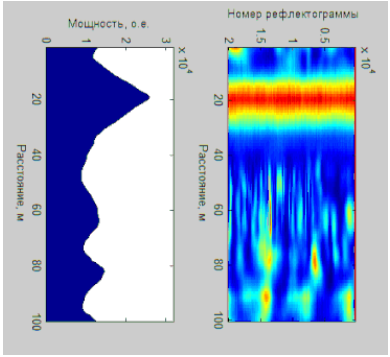
Концепция акустического нейтринного детектора



Детектор высотой 3,5 км и объёмом 100 км^3 будет иметь 16 гирлянд, расположенных с расстоянием между ними 1км или 81 гирлянду с расстоянием 0,5 км. Гирлянда представляет собой волоконно-оптический распределённый акустический сенсор.

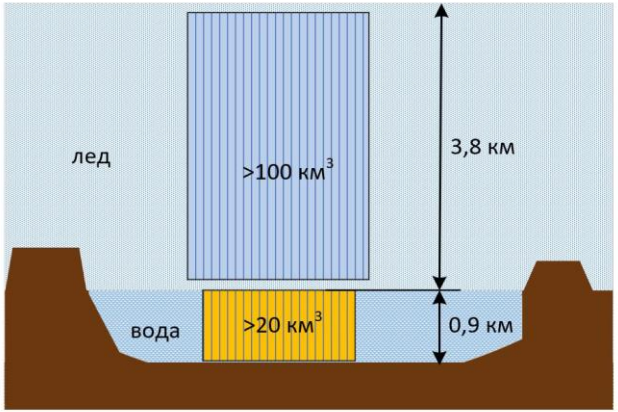
Метод когерентной рефлектометрии позволяет локализовать место воздействия, изучить спектр воздействующего сигнала, оценить частоту и интенсивность воздействия, его продолжительность и характер изменения во времени.

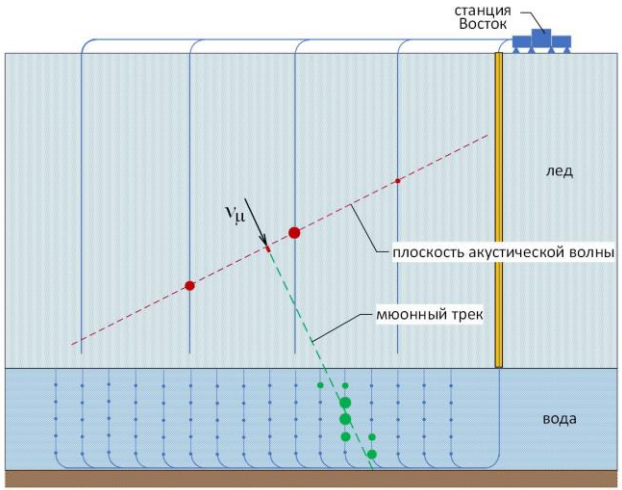


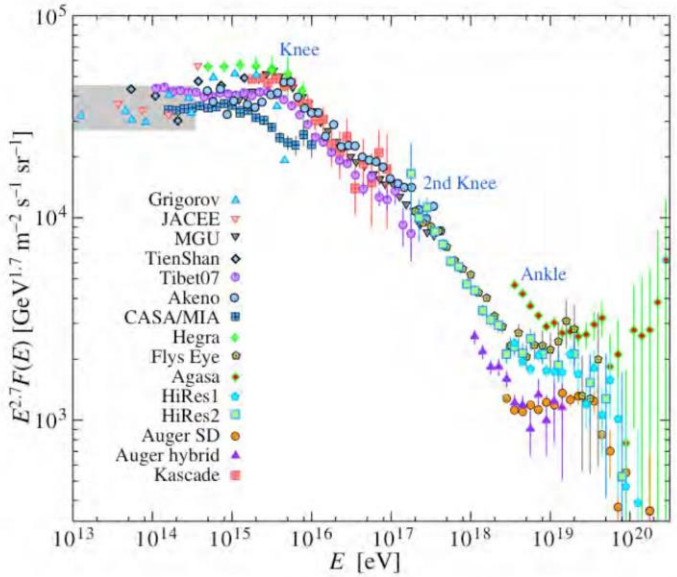


Смещения неоднородностей волокна порядка 100 нм вызывают изменения в когерентной рефлектограмме.

Нейтринный телескоп Vostok







Обнаружение ~100 событий ГЗК-эффекта (подавление потока космических лучей с энергией выше $5 \cdot 10^{19}$ эВ) могло бы помочь решить вопрос о сверхвысоком ускорении космических лучей и позволить измерить полное нейтрино-нуклонное сечение при энергиях > 10^{18} эВ.

К оптическому и акустическому детекторам может быть добавлен радиоволновый детектор с энергетическим пределом 10^{25} эВ, расположенный на поверхности.

Экспериментальные задачи

1. Определение энергии нейтрино

Исходным значением для определения энергии нейтрино является величина зарегистрированного акустического сигнала или интенсивность черенковского излучения.

2. Определение направления движения нейтрино

В точности определении направления траектории нейтрино решающее значение играет плотность решётки как оптического, так и акустического нейтринного детектора.

3. Определение аромата нейтрино

Аромат нейтрино может быть определён по сигнатуре оптического сигнала.

Спасибо за внимание!

