Баксанской нейтринной обсерватории – 55 лет. Научная программа БНО.

В.Б. Петков

Институт ядерных исследований РАН, Баксанская нейтринная обсерватория

(из письма в ЦК КПСС, 1963 г.)

В последние годы развитие физики элементарных частиц привело к возникновению новых перспективных направлений современной науки – физики нейтрино и нейтринной астрофизики. Исследования по физике нейтрино открывают совершенно новые возможности в исследовании структуры элементарных частиц, природы так называемых слабых взаимодействий и других вопросов ядерной физики.

Вследствие того, что нейтрино чрезвычайно слабо взаимодействуют с веществом, проведение исследований в области физики нейтрино и нейтринной астрофизики возможно только в условиях надежного экранирования от фона, создаваемого космическими лучами. Это диктует необходимость сооружения подземной станции, защищенной скальными породами толщиной около 2000 м.

Намечаемые исследования по физике нейтрино и нейтринной астрофизике необходимо проводить в ускоренном темпе, поскольку мы значительно отстаем в этой области от США. До сих пор такие исследования не проводились, в то время как развитие этой области физики в США началось 10 лет назад и особенно форсируется в последние годы. В частности, в ближайшее время в США начнутся эксперименты с использованием нейтрино, образованных космическими лучами в атмосфере Земли, а также нейтрино солнечного происхождения. Предлагаемая Академией наук СССР программа нейтринных исследований позволит за ближайшие 5-7 лет в значительной степени ликвидировать наше отставание в этой области физики.

В связи с изложенным Академия наук СССР просит рассмотреть прилагаемый проект постановления ЦК КПСС и Совета Министров СССР о развитии исследований в области физики нейтрино и нейтринной астрофизики и строительстве с этой целью подземной нейтринной станции.

Президент Академии наук СССР академик

М.В.Келдыш

выписка

.....

РАСПОРЯЖЕНИЕ # 0122 от 14 сентября 1967г.

Совет Министров СССР распоряжением от 29 июня 1967г. № 1804-рс: - принял предложение Академии наух СССР о строительстве в 1967-1975гг. в районе Бавсанского ущелья (Кабардино-Балкарская АССР)нейтринной станции Физического института им.П.Н.Лебедева АН СССР;

- обязал Минтяжстрой СССР выполнить силами треста "Кабалпромстрой" по генеральному договору с Академией наук СССР работы по строительству нейтринной станции Физического института им.П.Н.Лебедевь - поручил Минтрансстрою выполнить горнопроходческие работы

по сторительству нейтрикной станции Физического института с железобетонной и бетонной обделкой подземных лабораторий, камер, токналей и ютолен;

- поручил Минтяжстрою СССР, Минтрансстрою и Академии наук СССР обеспечить сдачу и наладку комплексов сооружений сцинтилляционного телескопа нейтринной станции ФИАН в 1970году;

- установил, что материально-технические ресурсы и оборудование для строительства нейтринной станции ФИАН выделяются в порядке, предусмотренном для тыпровения однациельных работ.

va cuppertito

Копия верна:

hourie mener paen te mer japange va haxopenire blororie Inte mer apprictore

Баксанская нейтринная обсерватория (БНО) – филиал Института ядерных исследований РАН Расположение – Баксанское ущелье (Кабардино-Балкария), недалеко от горы Эльбрус





Баксанская нейтринная обсерватория ИЯИ РАН: уникальный комплекс наземных и подземных установок, созданных для решения фундаментальных задач в различных областях науки: от нейтринной астрофизики до геофизики.





Подземные лаборатории БНО ИЯИ РАН

Вентиляция: 55 кВт, 30.8 м³/сек



Распределение интенсивности мюонов вдоль штольни

ЦКП (Центр коллективного пользования)

ГАИШ МГУ:

Баксанский лазерный интерферометр-деформограф Опто-акустическая Гравитационная Антенна (ОГРАН)

Геофизическая служба РАН:

сейсмическая станция.

Институт физики Земли РАН:

сейсмическая станция, наклономеры, гравиметры, магнитометры.

ИОФ РАН: лидар обратного рассеяния

Геофизика

Мониторинг региональной геодинамики Приэльбрусья с целью оценки рисков возможных природных катастроф.

- Кавказский регион, включая территорию КБР, относится к одному из наиболее сейсмоактивных регионов России, где возможны катастрофические землетрясения с магнитудой 7.0 и более.
- Эльбрус единственный в европейской части России активный вулкан (находящийся в настоящее время в состоянии покоя), расположенный в условиях достаточно плотного заселения и развитой инфраструктуры, и поэтому представляющий несомненную опасность для юга Европейской части России.
- Размещение систем наблюдения непосредственно в толще горных пород, где уровень природных и техногенных шумов минимален, позволяет регистрировать слабые сейсмические события, сопровождающие проявления современной магматической и тектонической активности непосредственно в горном массиве.

Основные геофизические и геодинамические задачи, решаемые на основе данных Баксанского лазерного интерферометра:

- Изучение магматических структур вулкана Эльбрус: резонансные свойства и динамика;
- Приливные деформации и региональные неоднородности;
- Собственные колебания Земли и расщепление фундаментальных мод;
- Деформационные процессы в литосфере и глобальная геодинамика;
- Тонкие резонансные эффекты ядра Земли (собственные колебания внутреннего ядра – мода Шлихтера; близсуточный резонанс внешнего жидкого ядра).



Геофизическая лаборатория № 2.

Геофизические приборы (наклономеры, гравиметры, магнитные вариометры) и лидар обратного рассеяния.

Низкий уровень помех и стабильный температурный режим (постоянная температура +38 °C) способствуют успешному проведению геофизических наблюдений

Лидар обратного рассеяния: мониторинг активности вулкана Эльбрус по вариации магматических аэрозолей.



ОГРАН предназначена для регистрации гравитационно-волновых всплесков, от космических катастроф с релятивистскими звездами в Галактике и её ближайшей окрестности (~ 100 кпс).



главная штольня БНО

Для уменьшения фона шумов окружения необходимо размещение установки в подземной лаборатории БНО (+ защита от космических частиц) и работа в режиме совпадений с нейтринными детекторами в программе «коллапс». Условие «поиска редких событий» (оценка вероятности события 0.03 /год) предполагает длительные наблюдения, что требует технического обеспечения надежного функционирования установки в течении ряда лет.



Камера ОГРАН в пылезащитном боксе



Низкофоновые лаборатории

Поиск и исследование редких реакций и распадов: требуется дополнительная защита.

ЦКП БНО:

использование низкофоновых лабораторий БНО

Прикладные исследования

- Измерение содержания радиоизотопов в различных материалах, в том числе радиоактивных изотопов природного и техногенного происхождения в различных биологических образцах.
- Изучение особенностей протекания молекулярно-биологических процессов в условиях низкого радиационного фона

Институт неорганической химии СО РАН, Институт экологии горных территорий РАН

ОИЯИ:

Изучению влияния пониженного радиационного фона на модельные биологические объекты (Zarubin M. et al. First Transcriptome Profiling of D. melanogaster after Development in a Deep Underground Low Radiation Background Laboratory. PLoS ONE. 2021;

https://journals.plos.org/plosone/article/authors?id=10.1371/journal.pone.0255066).

Исследование сверхглубоких микробных сообществ, обитающих в экстремальных условиях (в подземном горячем источнике на расстоянии 4200 метров от входа в штольню).

Низкофоновая Лаборатория Глубокого Заложения (НЛГЗ-4900) глобальная интенсивность мюонов: 3.0±0.15)·10⁻⁹ µ / (см²·с) ~ 1 мюон/(м²·10 час.)



Стены низкофоновой комнаты – 25 см полиэтилен + 0.1 см Cd + 15 см Pb

Сферхнизкофоновые гамма-спектрометры для измерения содержания радиоизотопов в материалах



Измерение радиоактивности материалов для эксперимента *Hyper-Kamiokande*



Низкофоновая лаборатория на глубине 660 м. в.э., полезная площадь 100 м², введена в эксплуатацию в 1974 г. Толщина свинца – 100 мм

Основные задачи:

Измерение радиоактивности материалов:

- 1) Образцы пластикового сцинтиллятора
- 2) Исходные компоненты, для создания пластиковых сцинтилляторов: пластиковая основа (ПММА), переизлучатели (РОРОР, РРО, Mbis)
- ФЭУ: целые ФЭУ, а также отдельные компоненты стекло, динодная система
- 4) Кабели, разъёмы сигнальные, высоковольтные разьемы

ОИЯИ:

Исследование сверхглубоких микробных сообществ, обитающих в экстремальных условиях (в подземном горячем источнике на расстоянии 4200 метров от входа в штольню).



Ковёр-2



Ковёр: 1973 год

Установка "Ковер-2" В- выносной пункт, - жидкостный детектор, - нейтронный монитор, - детектор тепловых нейтронов, - пластический сцинтилляционный детектор.

Отбор фотоноподобных событий, $E_{\gamma} > 300$ ТэВ



Наблюдение вспышки гамма–излучения сверхвысоких энергий из области Кокона Лебедя IceCube: 20 ноября 2020 года, 154 ТэВ



Spectral energy distribution of Cygnus Cocoon above 1 GeV.



Spectral energy distribution averaged over the same d = 82-day period around the neutrino arrival using publicly available data of the Fermi Large Area Telescope (Fermi-LAT)

Time-averaged

- 4FGL flux model (Abdollahi et al. 2020)
- ARGO (Bartoli et al. 2014)
- HAWC (Abeysekara et al. 2021)

Carpet-2, this work

Flare

Fermi LAT

Carpet-2, this work

Estimate of the IceCube neutrino fluence



Схема установки Ковер-3.

 (А) - установка Ковер; (В) – "старые" выносные пункты;
(С) - подземный мюонный детектор, 410 счетчиков на основе пластического сцинтиллятора; Новые выносные пункты регистрации на основе пластического сцинтиллятора (D) – готовые к работе, (Е) – в стадии укомплектования.

Ковёр-3: 1-й тоннель мюонного детектора



Baksan Underground scintillation telescope (BUST): 1977 – to date. Stable scintillator, stable operation of the BUST



scintillation layer + concrete overlap: 7.2 r.l. = $165 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$

The radiation length for our scintillator is 47 g/cm^2



✓ the scintillator C_nH_{2n+2} (n ≈ 9)
✓ the total mass of scintillator is 330 t (3180 counters)
✓ three lower horizontal layers (the interior) -130 t, 1200 counters

counter's threshold: inner planes – 8 MeV outer planes –10 MeV

Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп

 Поиск на БПСТ мюонных нейтрино/антинейтрино с энергией ≥ 1 ГэВ от транзиентных астрофизических объектов.
Мониторинг нейтринных вспышек в Галактике (Сверхновые с коллапсом ядра). Observing of muon neutrino/antineutrino from south hemisphere with the BUST: $E_v \ge 1 \text{ GeV}$

Muon neutrinos traveling through the rock may interact with nucleons to create energetic muons: $v_{\mu} + N \rightarrow \mu + X$

Separation of arrival directions between up and down hemispheres is made by time-of-flight method



Dec 14 1978: First upward-going muon was observed

12.1978 – 31.03. 2022, 35.54 года чистого времени

1872 события с $\theta \ge 100^{\circ}$

Мюонные нейтрино/антинейтрино с $E_v \ge 1$ GeV, атмосферного происхождения.



 \approx 1 событие за 6.9 суток

Нейтринные события высокой энергии от блазара PKS 0735+17 (RA = 114.53, Dec= 17.7)

8 декабря 2021 IceCube (172 ТэВ), 20:02:51.1 UT RA: 114.52 (+2.82 -2.50 deg 90% PSF containment) Dec: 15.56 (+1.81 -1.39 deg 90% PSF containment) на угловом расстоянии 2.14° от источника

Baikal-GVD (43 T $_{3}$ B), 2021-12-08 at 20:02:51.1 UT 4.68 degrees from PKS 0735+17 and 5.30 degrees from the best-fit direction of IceCube-211208A. Error (50 %) = 5.5 deg

БПСТ (≥ 1 ГэВ), 4 декабря 2021, 14:52:47.83 UT Направление прихода нейтрино (RA= 116.5, Dec = 16.6) находится на угловом расстоянии 2.18° от источника. Error (90 %) = 5.0 deg

КМЗNeT (18 TeV), 15 декабря 2021, 08:51:31.6 UT Направление прихода нейтрино (RA=113.5 deg, DEC=17.6 deg), находится на угловом расстоянии 0.99° от источника. Error (50 %) = 1.8 deg



Вспышка блазара РКS 0735+17

БПСТ: ≥1 ГэВ, 4 декабря 2021, 14:52:47.83 UT

IceCube: 172 TeV, 8 декабря 2021, 20:02:51.1 UT

Baikal-GVD: 43 TeV, 8 декабря 2021, через 3.95 hours после IceCube

KM3NeT: 18 TeV, 15 декабря 2021, 08:51:31.6 UT





⁷¹Ga (v_e, e⁻) ⁷¹Ge - порог реакции 0.233 МэВ, что существенно ниже максимальной энергии 0.423 МэВ нейтрино от рр-цепи. Благодаря этому ГГНТ имеет возможность регистрировать рр-нейтрино, дающие наибольший вклад в полный поток солнечных нейтрино. $\begin{array}{l} \mbox{Global intensity of muon} \\ - (3.03 \pm 0.19) \times 10^{-9} \ (cm^2 s)^{-1} \\ \mbox{Average energy of muon: 381 GeV} \\ \mbox{Fast neutron flux (>3MeV)} \\ - (6.28 \pm 2.20) \times 10^{-8} \ (cm^2 s)^{-1} \end{array}$

l = 60 mw = 10 m h = 12 m Low background concrete - 60 cm

INCHAT

) tons

Gamet

Эксперимент BEST (Baksan Experiment on Sterile Transitions): поиск стерильных нейтрино, $v_e \rightarrow v_s$



BEST installation

BEST

Источник ⁵¹Сг, 3.4 МКи



$$V_{in} = 1.2 \text{ m}^3, \qquad M_{in} = 7.5 \text{ T}$$

 $V_{out} = 6.6 \text{ m}^3, \qquad M_{out} = 40.0 \text{ T}$

 $<L_{in}> = 52.03 \pm 0.18$ cm $<L_{out}> = 54.41 \pm 0.18$ cm



- Независимые измерения в 2 зонах на 2 расстояниях
- Увеличена масса мишени (48 т вместо 13 т)
- Увеличена активность источника ⁵¹Cr (в 6.5 раз, до 3.4 МКи)

⁵¹Cr source





Irradiated for ~100 d in the SM-3 nuclear reactor (RIAR, Dimitrovgrad) with thermal neutrons $\Phi = 2-5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$ $\sigma_{50} = 15.9 \text{ b}, \sigma_{51} = 10.2 \text{ b}$ Neutron path length in Ga ~ 0.7 cm

Source mass 4007.5 g Enrichment on ⁵⁰Cr 96.6 % (3869 g) composed of 26 discs with a thickness of 4 mm, Ø84 and 88 mm

Biological protection of the source W alloy (W - 95%, Ni – 3%, Cu – 2%) ρ =17.6 g/cm³ Thickness 2.8 cm



2-zone gallium target

Calorimeter Lead cham ber

Source

Results of the counting



Errors of total measurements from experiments with sources

		R	σ
1	SAGE – Cr	0.95	0.12
2	SAGE – Ar	0.79	0.095 (+0.09 -0.10)
3	GALLEX – Cr1	0.953	0.11
4	GALLEX – Cr2	0.812	0.11
5	BEST – in	0.766	0.05
6	BEST – out	0.791	0.05

All errors are independent, except for cross-section errors in chrome experiments(+3.6% -2.8%)

Total result $R_0 \pm \sigma_0 = 0.80 \pm 0.05 (5.7\%)$

Ga anomaly confirmed and intensified



Осцилляционный анализ

 $\chi^2 (\Delta m^2, \sin^2(2\theta)) = (R^{meas} - R^{calc})^T V^{-1} (R^{meas} - R^{calc})$ R^{meas} - вектор измеренных в эксперименте значений $R^{calc}(\Delta m^2, \sin^2(2\theta))$ - вектор вычисляемых значений V - ковариационная матрица ошибок, корреллированные - неопределенности сечения захвата Вычисленные контуры уровней достоверности, соответствуют $\Delta \chi^2 \equiv \chi^2 - \chi^2_{min}$ с 2 d.o.f: $\Delta \chi^2 = 2.30$, 6.18, 11.83 для 68.27% (1 σ), 95.45% (2 σ) и 99.73% (3 σ) C.L., соответственно:

Среднее взвешенное для всех Ga экспериментов - 0.80±0.05, если не учитывать переходы на 2 возбужденных уровня (5%) – 0.84 ±0.04

b.f.p.

 $\begin{array}{c} 0.9 & 1.0\\ \sin^2 2\theta \end{array}$



10

9

Новый Ga эксперимент BEST-2

Основная цель – измерение параметра Δm^2 в гипотезе стерильных осцилляций



1)Увеличиваем число зон мишени, добавляем информацию о расстоянии L: делим внешнюю, цилиндрическую зону BEST на 2 части равной толщины цилиндрической вставкой

2)Меняем источник: вместо ⁵¹Cr используем ⁶⁵Zn энергия нейтрино увеличивается в (1.35 МэВ / 0.75 МэВ =) 1.8 раза

Длина осцилляций:

$$L_0 = \frac{\pi}{1.27} \cdot \frac{E}{\Delta m^2}$$

Для ⁵¹Cr $L_0 \cdot \Delta m^2 = 1.9 \text{ м} \cdot \Im B^2$ Для ⁶⁵Zn $L_0 \cdot \Delta m^2 = 3.3 \text{ м} \cdot \Im B^2$

Максимальные значения Δm^2 , которые достигаются в эксперименте $\Delta m_{\text{max}}^2 \sim \frac{L_0 \cdot \Delta m^2}{\Delta L}$

Для ⁵¹Cr $\Delta m^2_{\text{max}} \sim 1.9/0.5 \sim 4 \ \Im B^2$ Для ⁶⁵Zn $\Delta m^2_{\text{max}} \sim 3.3/0.5 \sim 6.5 \ \Im B^2$ Т.е. расширяем диапазон измерений Δm^2

Источник 65 Zn



Изготовление источника облучением цинка, обогащённого по изотопу ⁶⁴Zn, в форме металла или ZnO тепловыми нейтронами в ядерном реакторе

Примеры реализаций



Считаем, что в первых двух реализациях параметры определяются, в третьей – нет

Криогенные эксперименты

Рассматриваются два варианта развития криогенных экспериментов в БНО ИЯИ РАН:

 Детекторы на сниженных благородных газах - ксенон, аргон
Детекторы на основе сцинтилляционных кристаллов охлажденных до температуры 10 мК работающих в режиме болометров.

Сжиженные благородные газы (большой чувствительный объем, легкость масштабирования)

Двухфазный эмиссионный детектор:

поиск темной материи (Xe, Ar), поиск аксионов, $0\nu\beta\beta$ ¹³⁶Xe, coherent elastic neutrino-nucleus scattering (CEvNS) (Xe, Ar), регистрация солнечных нейтрино (pp, ⁸B), SN-neutrinos

Болометры (высокое энергетическое разрешение и эффективность регистрации)

исследование $0\nu\beta\beta$ - распада изотопов ¹⁰⁰Mo, ¹³⁰Te, ⁴⁸Ca, ⁸²Se, ¹¹⁶Cd, ¹²⁴Sn поиск темной материи, аксионов исследование CE ν NS X-ray - спектроскопия



Низкофоновые исследования: перспективы.



Предполагаемое место для низкофоновой криогенной лаборатории

Предполагаемое место для низкофоновой криогенной лаборатории



2620 м, ~ 3000 м в.э.



Сцинтилляционный детектор большого объёма (~10 кт) в БНО для для регистрации природных потоков нейтрино низкой энергии (до 100 МэВ).

- 1. Изучение потока антинейтрино, излучаемого дочерними продуктами распада урана и тория (геонейтрино), содержащимися внутри Земли, и определение, таким образом, радиогенной составляющей теплового потока Земли;
 - 2. Оценка содержания калия внутри Земли по спектру электронов отдачи от рассеяния нейтрино на электронах (аналогично солнечным нейтрино);
- 3. Изучение динамики взрыва сверхновых путем регистрации интенсивности и спектра нейтринной вспышки;
 - 4. Поиски изотропного потока антинейтрино, накопившихся во Вселенной за миллиарды лет при гравитационных коллапсах ядер массивных звезд и образовании нейтронных звезд и "черных дыр";
- 5. Регистрация совокупного потока антинейтрино от всех имеющихся на Земле энергетических ядерных реакторов. Изучение осцилляций электронных антинейтрино;
- 6. Исследование спектра солнечных нейтрино и поиск нейтрино от реакций CNO.



Underground Laboratories of the BNO INR RAS

First prototype:

0.5 t of LAB-based liquid organic scintillator in a acrylic sphere.

Structurally, the prototype of the scintillation detector consists of an external cylindrical tank and the inner part, including the acrylic sphere and stainless steel construction, which are attached photodetectors, and which provides additional fixation of acrylic sphere. An array of 20 10-inch Hamamatsu R7081-100 PMTs surrounds the acrylic sphere.





The acrylic sphere: inner diameter of 960 mm.

First prototype.

The external tank is a polypropylene cylinder with an inner diameter of 2400 mm (wall thickness of 20 mm) and 2800 mm high. To fill the tank with ultrapure water, a piping system was installed connecting the housing with water purification system.

The prototype is installed in the hall of the GGNT (4800 m.w.e.)



Water purification system



External tank from polypropylene

Второй прототип:

5 т сцинтиллятора, акриловая сфера диаметром 2200 мм, 70 ФЭУ







Нейтринная физика и астрофизика

- 1. Новый галлий-германиевый эксперимент (BEST-2) по поиску стерильных нейтрино
- 2. Поиск на БПСТ мюонных нейтрино/антинейтрино с энергией ≥ 1 ГэВ от транзиентных астрофизических объектов.
- 3. Мониторинг нейтринных вспышек в Галактике (Сверхновые с коллапсом ядра).
- Создание сцинтилляционного детектора большого объёма для задач нейтринной астрофизики и геофизики: создан и исследован 1-й прототип (0.5 т), ведутся работы по созданию 2-го прототипа (5 т).
- Работа по созданию проекта уникальной установки «Низкофоновая криогенная лаборатория»: солнечные нейтрино (исследование спектра солнечных нейтрино и поиск нейтрино от реакций CNO), двойной безнейтринный бета-распад.