

### 1. Нейтрино высоких энергий рождаются в радио-ярких блазарах

Нахождение источников астрофизических нейтрино и изучение механизмов их образования крайне важно для понимания высокоэнергетических процессов во Вселенной, включая ускорение релятивистских протонов. Используя данные нейтринного телескопа IceCube, наблюдения на международных радиоинтерферометрических сетях и на РАТАН-600 САО РАН обнаружено, что нейтрино широкого спектра энергий — от ТэВ до ПэВ — рождаются в центральных областях ярких блазаров, то есть активных галактик со струями, направленными на наблюдателя. Моменты прихода нейтрино совпадают с мощными вспышками синхротронного излучения в компактных джетах этих объектов. Предложен механизм рождения нейтрино. Показано, что весь наблюдаемый поток астрофизических нейтрино высоких энергий может порождаться блазарами.

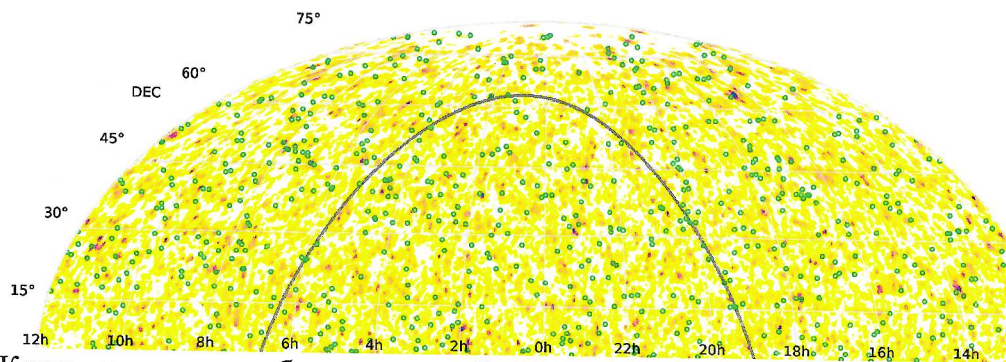


Рис. 1. Карта северного неба с яркими блазарами, отмеченными зелеными кружками. Тёмные области означают наибольшую вероятность наличия нейтринного источника в этих направлениях.

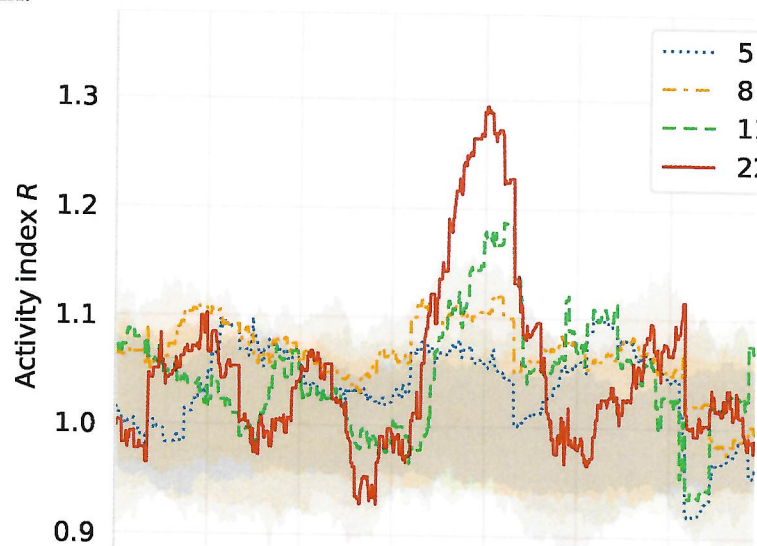


Рис. 2. Корреляция времени прихода нейтрино с радиовспышками, наблюдаемыми на РАТАН-600. Максимальная корреляция видна на наибольшей частоте с нулевой задержкой по времени, как и предсказывается из эффекта синхротронного самопоглощения.

Результат получен совместно с ФИАН и МФТИ (А.В. Плавин, Ю.Ю. Ковалев, Ю.А. Ковалев)

**Публикации:**

1. Plavin, Y.Y. Kovalev, Y.A. Kovalev, S.V. Troitsky, *Observational Evidence for the Origin of High-energy Neutrinos in Parsec-scale Nuclei of Radio-bright Active Galaxies*, *ApJ*, **894** (2020) 101.
2. Plavin, Y.Y. Kovalev, Y.A. Kovalev, S.V. Troitsky, *Directional Association of TeV to PeV Astrophysical Neutrinos with Radio Blazars*, *ApJ*, accepted, arXiv:2009.08914 (2020).

**Координатор работ: Троцкий Сергей Вадимович**

тел.: 8(499)783-92-91,

эл.почта: st@ms2.inr.ac.ru

ПФНИ ГАН «II, Физические науки, направление 15»

Тема НИР: № 0031-2019-0003

## 2. Новое ограничение на нарушение симметрии между материей и антиматерией в нейтринных осцилляциях.

**Авторы:** Международный эксперимент T2K, котором участвует ИЯИ РАН. Членами коллаборации являются сотрудники и аспиранты ИЯИ, а также студенты МИФИ и МФТИ: А.С. Горин, Н.В. Ершов, А.О. Измайлов, А.С. Костин, Ю.Г. Куденко, В.А. Матвеев, А.В. Мефодьев, О.В. Минеев, С.Б. Суворов, М.М. Хабибуллин, А.Н. Хотянцев, А.А. Шайкина, А.Т. Шайхиев, А.С. Шварцман и др. Всего в эксперименте участвуют сотрудники около 60 институтов из 11 стран.

В апреле 2020 г. в авторитетном научном журнале *Nature* [1] опубликованы новые результаты международного нейтринного эксперимента T2K (Tokai-to-Kamioka), указывающие на возможное нарушение комбинированной  $CP$ -симметрии ( $C$  – зарядовая четность,  $P$  – пространственная четность) в лептонном секторе Стандартной Модели.

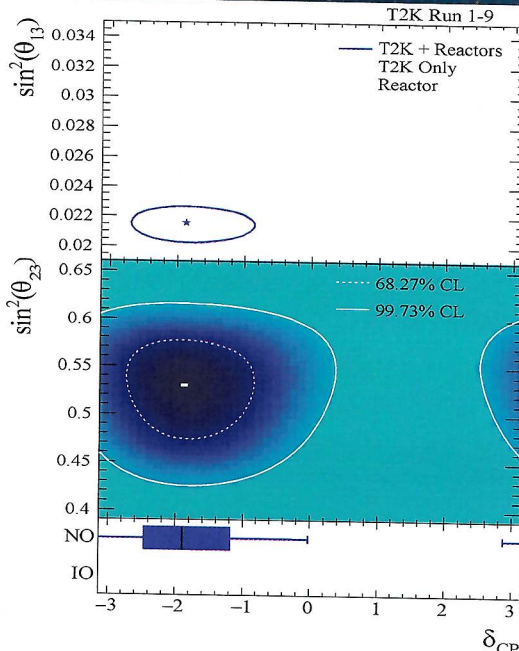


Параметр, который определяет степень  $CP$ -нарушения, является фаза  $\delta_{CP}$ . Если фаза  $\delta_{CP}$  равна нулю или кратна  $\pm 180^\circ$ , то это означает, что переходы мюонных *нейтрино* в электронные *нейтрино* проходят с той же вероятностью, что и переходы соответствующих античастиц – мюонных *антинейтрино* в электронные *антинейтрино*, т.е.  $CP$ -симметрия сохраняется.

Полученный в T2K результат на основе данных, накопленных в 2010-2019 гг., исключает  $CP$  сохранение в лептонном секторе (значения фазы  $\delta_{CP}$   $0^\circ$  и  $180^\circ$ ) на уровне достоверности 95%. Около половины возможных значений фазы  $\delta_{CP}$  исключены на уровне достоверности 99.7% ( $3\sigma$ ). Новые данные T2K также подтверждают, что наиболее вероятное значение  $\delta_{CP}$  близко к значению – 90 градусов, что соответствует максимальному  $CP$ -нарушению в нейтринных осцилляциях.

Данный результат демонстрирует, что ускорительные нейтринные эксперименты с длинной базой обладают большим потенциалом и перспективами в исследовании  $CP$  нарушения в лептонном секторе, и в случае открытия нового источника  $CP$  нарушения, откроет новые пути для разрешения одной из интереснейших загадок нашей Вселенной: преобладания вещества над антивеществом.

Для подтверждения этого результата открытия  $CP$  нарушения в нейтринных осцилляциях на уровне  $5\sigma$  необходимо увеличение статистики нейтринных событий и уменьшение систематических ошибок, что будет возможно осуществить как в T2K, так и в будущих нейтринных экспериментах.



### Публикация:

[1.] K. Abe, R. Akutsu, A. Ali, ..., A. Gorin, ..., A. Izmaylov, ..., M. Khabibullin, A. Khotjantsev, ..., A. Kostin, ..., Y. Kudenko, ..., V. Matveev, ..., A. Mefodiev, ..., O. Mineev, ..., A. Shaikhiev, ..., A. Shaykina, ..., A. Shvartsman, ..., S. Suворov, ..., N. Yershov et al. (T2K Collaboration) /

**Координатор работ:** Куденко Юрий Григорьевич

тел.: 8(495)8510184, эл.почта: kudenko@inr.ru

ПФНИ ГАН «И, Физические науки, направление 15»

Тема НИР: № 0031-2019-0003

### 3. Поиск аксионо-подобных и скалярных частиц в эксперименте NA64

Коллаборация NA64, используя высокоэнергетический электронный пучок SPS в ЦЕРНе, провела модельно независимый поиск легких скалярных и псевдоскалярных аксионоподобных частиц, которые взаимодействуют с двумя фотонами. Новые частицы, если они существуют, могли бы рождаться за счет эффекта Примакова при взаимодействии жестких тормозных фотонов, генерируемых электронами с энергией 100 ГэВ в активной мишени NA64, с виртуальными фотонами, создаваемыми ядрами этой мишени. После рождения частицы проникали бы через первый модуль адронного калориметра, служащий в качестве поглотителя, и наблюдались бы в оставшейся части калориметра либо через их распад на два фотона, либо как события с большой недостающей энергией, если частицы распадаются за пределами калориметра. Этот метод позволяет исследовать пространство параметров короткоживущих скаляров и аксионов, в том числе предсказываемых общими моделями аксионов, которое было недоступно для предыдущих экспериментов.

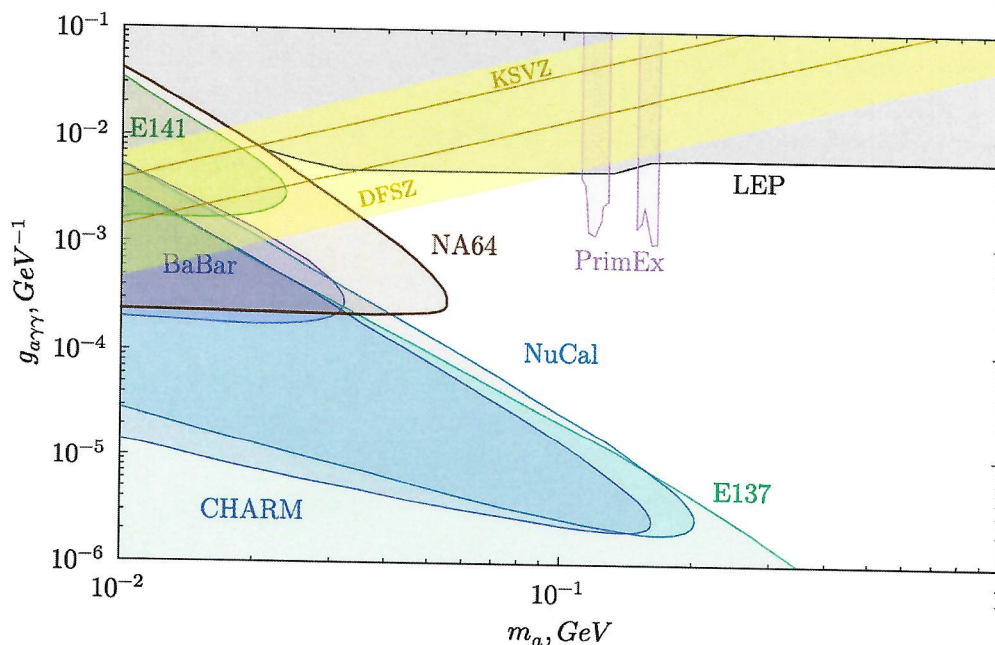


Рис 1. Область параметров аксионов, исключенная экспериментом NA64. Желтым цветом показана область параметров, соответствующая предсказаниям основных аксионных моделей.

**Публикация:** NA64 Collaboration. Search for Axionlike and Scalar Particles with the NA64 Experiment //

Phys. Rev. Lett. 125, 081801 (2020) DOI: 10.1103/PhysRevLett.125.081801

Коллаборация NA64, авторы из ИЯИ РАН: А.Дерменев, С.Гниненко, А.Корнеев, Д.Кирпичников, М.Кирсанов, Л.Кравчук, Н.Красников, И.Тлисова, Д.Тлисов†, А.Торопин

**Координатор: Гниненко Сергей Николаевич**

тел.: 8(495)850-42-50

эл. почта: sergei.gninenko@cern.ch

ПФНИ ГАН «II, Физические науки, направление 15»

Тема НИР: №

#### ***4. Получен новый верхний предел для безнейтринного двойного бета-распада германия-76***

Группой ИЯИ РАН в составе международной коллаборации GERDA (Germanium Detector Array), начиная с 2004 г ведется поиск безнейтринного двойного бета-распада германия-76 с помощью полупроводниковых детекторов нового поколения с ультранизким собственным фоном. Его целью является определение природы массы нейтрино и возможное нарушение лептонного числа. Решение этих задач будет иметь фундаментальные следствия, как для физики частиц, так и для космологии. Принципиальная схема установки GERDA основана на расположении безоболочечных германиевых детекторов внутри жидкого аргона большого объема (рис.1). Обогащенный германий по изотопу германий-76 для эксперимента получен в России. В середине 2020 г закончена вторая фаза эксперимента. В результате получен новый верхний предел для искомого распада -  $T_{1/2} > 1,8 \cdot 10^{26}$  лет. Результат является наилучшим мировым достижением для аналогичных экспериментов.

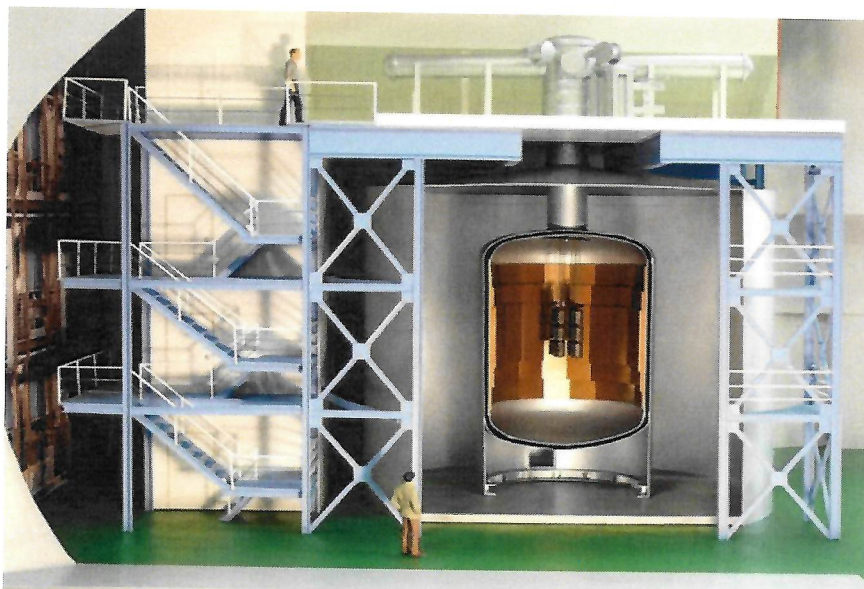


Рис.1. Общий вид установки, расположенной в подземной лаборатории LNGS INFN в Гран-Сассо.

#### ***Публикации:***

1. "The first search for bosonic super-WIMPs with masses up to 1 MeV/c<sup>2</sup> with GERDA" Phys. Rev. Lett. 125 (2020) 011801

2. "Modeling of GERDA Phase II data" J. High Energ. Phys. 2020, 139 (2020)

Коллаборация GERDA авторы из ИЯИ РАН: И. Р. Барабанов, Л. Б. Безруков, А. Вересникова, А. М. Гангапшев, В. Гуренцов, Е. Дорошкевич, В. Казалов, В. В. Кузминов, Б. К. Лубсандоржиев, О.И. Селиваненко, Е.Янович

II. Физические науки, направление 15  
**Координатор: Барбанов Игорь Романович**  
тел.: 8 963 6081029  
эл. почта: barabanovi@mail.ru  
ПФНИ ГАН «II, Физические науки, направление 15»

### **5. Достигнуты проектные параметры Европейского лазера на свободных электронах XFEL**

На Европейском лазере на свободных электронах XFEL в Германии достигнута проектная энергия 17,5 ГэВ при ускорении 5000 сгустков электронов в секунду. Получена средняя мощность лазера 6 Вт при энергии фотонов 9,3 кэВ. Описание работы сверхпроводящего электронного ускорителя с данными рекордными параметрами впервые представлено в журнале Nature Photonics.

**Публикация:** Decking W. et al. A MHz-repetition rate hard X-ray free-electron laser driven by a superconducting linear accelerator. Nature Photonics, vol.14, p.6311, 2020  
Коллаборация XFEL.  
Авторы из ИЯИ РАН: Л.В.Кравчук, В.В.Парамонов, Д.А.Завадцев.

**Координатор: Кравчук Леонид Владимирович**  
тел.: 8(495)850-42-74  
эл. почта: kravchuk@inr.ru  
ПФНИ ГАН «II, Физические науки, направление 15»

### **6. Первые результаты поиска астрофизических нейтрино по алертам на нейтринном телескопе Baikal-GVD**

В апреле 2020 года развернуты и введены в эксплуатацию шестой и седьмой кластеры создаваемого на оз.Байкал глубоководного нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба Baikal-GVD. С их вводом эффективный объем телескопа достиг значения 0,35 км<sup>3</sup> в задаче регистрации ливней от нейтрино высоких энергий астрофизической природы. Установка содержит в своем составе 2016 глубоководных детекторов черенковского света на основе больших фотоэлектронных умножителей и работает в режиме постоянной регистрации и накопления данных. Получаемые данные о потоке атмосферных мюонов и нейтрино находятся в хорошем соответствии с ожидаемыми. Темп счета первых событий от нейтрино высоких энергий находится в согласии с данными о потоке астрофизических нейтрино, полученными на антарктическом нейтринном телескопе IceCube. Совместная работа этих двух крупнейших телескопов Северного и Южного полушария позволяет вести обзор всего неба в нейтринном излучении, осуществлять поиск астрофизических источников на всей небесной сфере. Детектор Baikal-GVD включен в международные системы многоканальных оповещений, с целью поиска и последующего изучения транзитных астрофизических источников методами многоволновой и многоканальной астрономии. Выполнен анализ данных и опубликованы первые результаты поиска событий от нейтрино на детекторе Baikal-GVD, ассоциированных с алертами детектора IceCube (ИЯИ РАН, ОИЯИ, Коллаборация Baikal-GVD)

#### **Публикация:**

А.В.Аврорин, А.Д.Аврорин, В.М.Айнутдинов и др., "СЛЕЖЕНИЕ ЗА ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫМИ НЕЙТРИНО НА БАЙКАЛЬСКОМ НЕЙТРИННОМ ТЕЛЕСКОПЕ ВАЙКАЛ-GVD", Письма в Астрономический Журнал, т. 47, 01 (2021)

**Координатор: Домогацкий Григорий Владимирович**  
 тел.: 8(499)783-92-98, 8(499)135-65-85, 8(903)629-32-70  
 эл. почта: domogats@yandex.ru  
 ПФНИ ГАН «II, Физические науки, направление 15»

**7. Впервые в мире измерена спиновая асимметрия в фоторождении мезонных пар  $\pi^0\eta$  на ядрах углерода, алюминия и свинца**

Исследование одно- и двухмезонного фоторождения имеет важное значение для понимания спектра и свойств барионных резонансов. В дополнение к изучению процессов на свободном протоне исследование фоторождения мезонов на более тяжелых мишенях позволяет понять возможные модификации адронов, и в том числе барионных резонансов, в ядерной среде. Коллаборацией A2 на ускорителе МАМИ (Германия) с участием ученых из ИЯИ РАН впервые в мире выполнены измерения спиновой асимметрии фоторождения  $\pi^0\eta$  пар на ядрах углерода, алюминия и свинца (Рис. 1). Существенно, что на спиновую асимметрию в гораздо меньшей степени влияет взаимодействие в конечном состоянии, чем на полное сечение. Полученные результаты показывают, что механизм фоторождения  $\pi^0\eta$  пар на ядрах подобен фоторождению на свободном нуклоне. Доминирующей в этом процессе является парциальная волны  $D_{33}$  с промежуточным состоянием  $\eta\Delta(1232)$  [1].

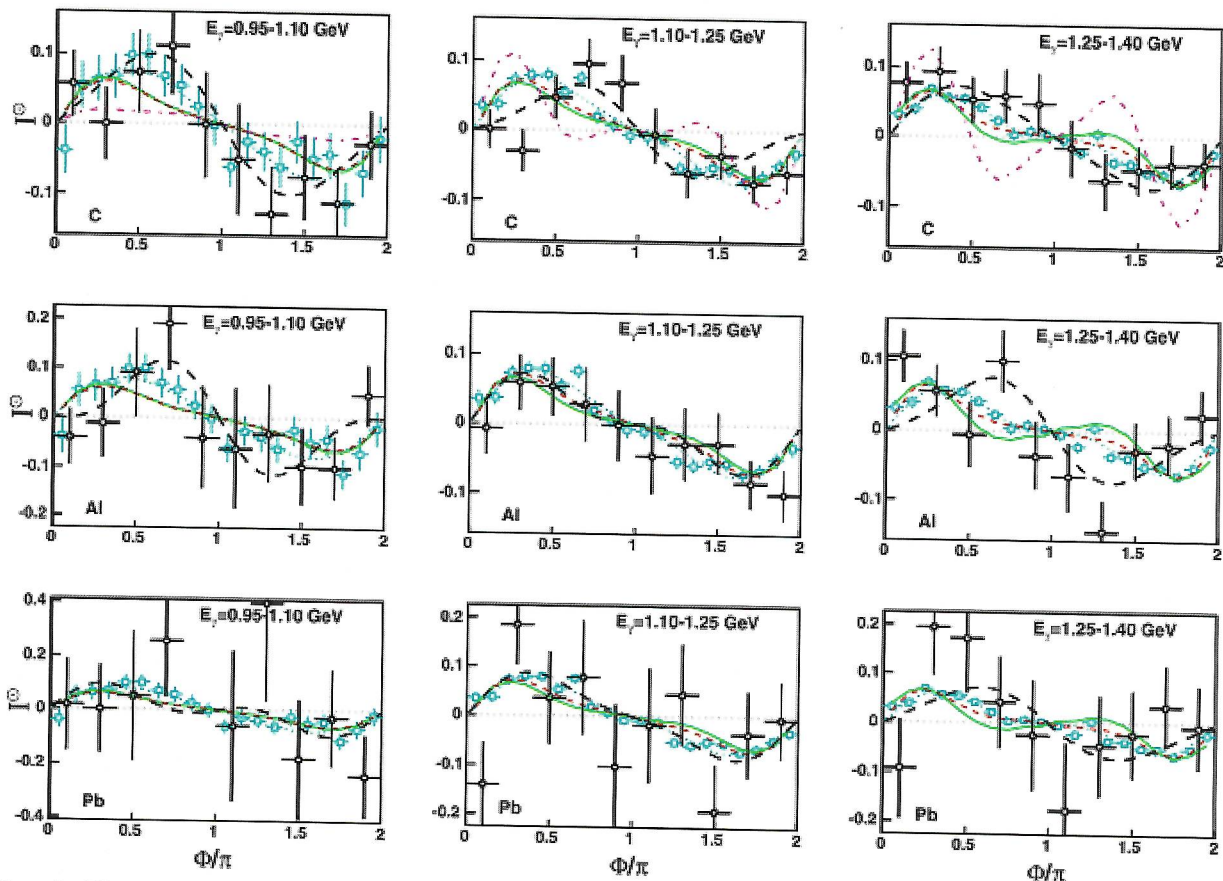


Рис.1. Измеренные спиновые асимметрии (черные кружки) для ядер C, Al, Pb (верхняя, средняя и нижняя панели, соответственно). Голубые кружки – данные для свободного протона. Кривые – модельные расчеты по модели Майнца.

**Публикация:**

1. V.Sokhoyan, et al. (A2 collaboration – 92 authors) // Measurement of the beam-helicity asymmetry in photoproduction of  $\pi^0\eta$  pairs on carbon, aluminium, and lead. // Phys. Let. B, 802 (2020) 135243.

ПФНИ ГАН: Физические науки, направление 15

Коллаборация A2 авторы из ИЯИ РАН: Г.М. Гуревич, Р.Л. Кондратьев, А.Н. Мушкаренко

**Координатор: Гуревич Григорий Манович**

тел.: 8(499)135-40-43

эл. почта: gurevich@inr.ru

ПФНИ ГАН «II, Физические науки, направление 15»

### **8. Разработан программный код CLASS-PT для расчетов в рамках нелинейной космологической теории возмущений**

Представлен новый код CLASS-PT, реализующий теоретические вычисления на базе космологической теории возмущений наиболее эффективным образом. Главной особенностью разработанного модуля является использование наиболее точной теоретической модели для описания нелинейных эффектов сгущивания материи. Уникальность кода заключается в высокой скорости вычисления теоретических предсказаний с учетом нелинейных эффектов, что позволило впервые исследовать пространство космологических параметров с помощью моделирования Монте-Карло марковских цепей. Данный модуль позволил получить новые сильные ограничения на космологические параметры по данным Слоановского цифрового обзора неба, а также был использован в прогнозе точности измерения космологических параметров и масс нейтрино с помощью предстоящей космической миссии «Евклид». CLASS-PT доказал свою высокую эффективность в построении надежных теоретических предсказаний и может быть использован ведущими международными коллективами для анализа данных крупномасштабной структуры Вселенной, такими как DESI и «Евклид».

#### **Публикация:**

Anton Chudaykin, Mikhail M. Ivanov, Oliver Philcox and Marko Simonović Non-linear perturbation theory extension of the Boltzmann code CLASS, Phys. Rev. D 102, 063533

**Координатор: Чудайкин Антон Сергеевич**

тел.: 8(499)783-92-91

эл. почта: anchudaykin@gmail.co

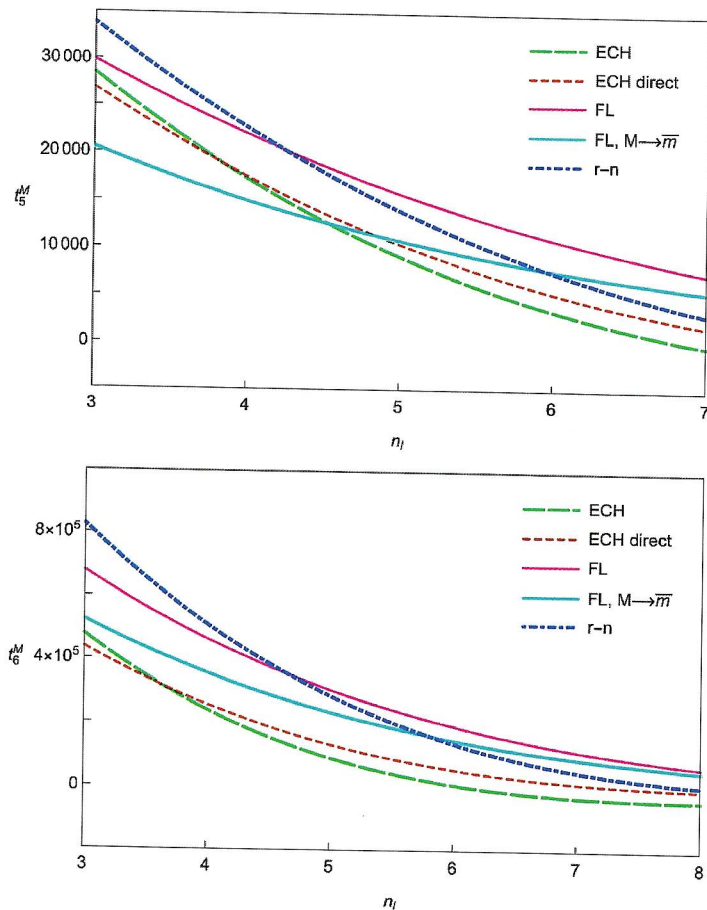
ПФНИ ГАН «II, Физические науки, направление 16»

### **9. Изучена асимптотическая структура соотношения между полюсными и определенными MS-bar схеме бегущими массами тяжёлых кварков в КХД**

Была изучена асимптотическая структура соотношения между полюсными и определенными MS-bar схеме бегущими массами тяжёлых кварков в КХД. Для этой цели были получены оценки пяти и шестипетлевых поправок к рассматриваемому соотношению при помощи трёх различных подходов, а именно процедуры эффективных зарядов, метода наивной неабелианизации и ренормалонной техники.



Как видно из рисунка, все найденные оценки согласуются друг с другом на уровне фактора два. Такая неопределенность является удовлетворительной при исследовании асимптотической структуры рядов теории возмущений с помощью приближённых методов.



На основании данных оценок был сделан вывод, что в случае  $b$ -кварка асимптотическое поведение соответствующего ряда наблюдается, начиная с четырёхпетлевого уровня, а для  $t$ -кварка проявляется лишь после 7-го порядка. Таким образом, в феноменологически ориентированных исследованиях процессов с участием  $b$ -кварка, где учитываются поправки 4-го порядка, целесообразнее использовать понятие его бегущей, а не полюсной массы. Для  $t$ -кварка применимы оба эти понятия при параметризации его массы, используемые при обработке экспериментальных данных Большого Адронного Коллайдера (в которых, в настоящее время учитываются двухпетлевые и ряд трехпетлевых эффектов КХД). Демонстрируется, что все изучаемые методы получения оценок, и в первую очередь ренормалонный подход, основанный на использовании асимптотической ренормалонной формулы для коэффициентов рассматриваемого соотношения, выявляют знакопеременный характер в их разложении по степеням количества безмассовых ароматов. Результаты двух других методов (процедуры эффективных зарядов и метода наивной неабелизации) находятся в полном согласии с ренормалонными оценками. Данный факт не позволяет делать предпочтение в пользу какого-либо одного подхода из этих трёх. Таким образом, базирующийся на методе эффективных зарядов развиваемый подход по фиксации теоретических неопределенностей учета высших поправок теории возмущений к наблюдаемым величинам и таким параметрам КХД, как массы  $b$  и  $t$ -кварков, является конкурентно-способным с традиционно используемым ренормалонным подходом.

**Публикация:**

А.Л.Катаев и В.С. Молокоедов. “Multiloop contributions to the on-shell-MS-bar heavy quark mass relation in QCD and the asymptotic structure of the corresponding series: the updated consideration”, принята в печать журнал European Physical Journal C в ноябре 2020 г.

**Координатор: Катаев Андрей Львович**

тел.: 8(495)133-65-33

эл.почта: andreikataev@gmail.com

ПФНИ ГАН «И, Физические науки, направление 15»

**10. Первое наблюдение взаимодействия тау-нейтрино с рождением чарма в эксперименте OPERA**

При анализе нейтринных взаимодействий в данных детектора OPERA обнаружена событийная топология с двумя вторичными вершинами, совместимая с распадом короткоживущих частиц. Наблюдаемая топология совместима с взаимодействиями заряженного тока тау-нейтрино с образованием очарования и взаимодействиями нейтринного нейтрального тока с рождением пар. Для достижения оптимального отделения сигнала от фона использовался метод многомерного анализа. Скорее всего, это событие является взаимодействием заряженного тока тау-нейтрино с образованием чарма, при этом тау-частица и чарм-частица распадаются. Значимость этого наблюдения составляет  $4.0\sigma$ .

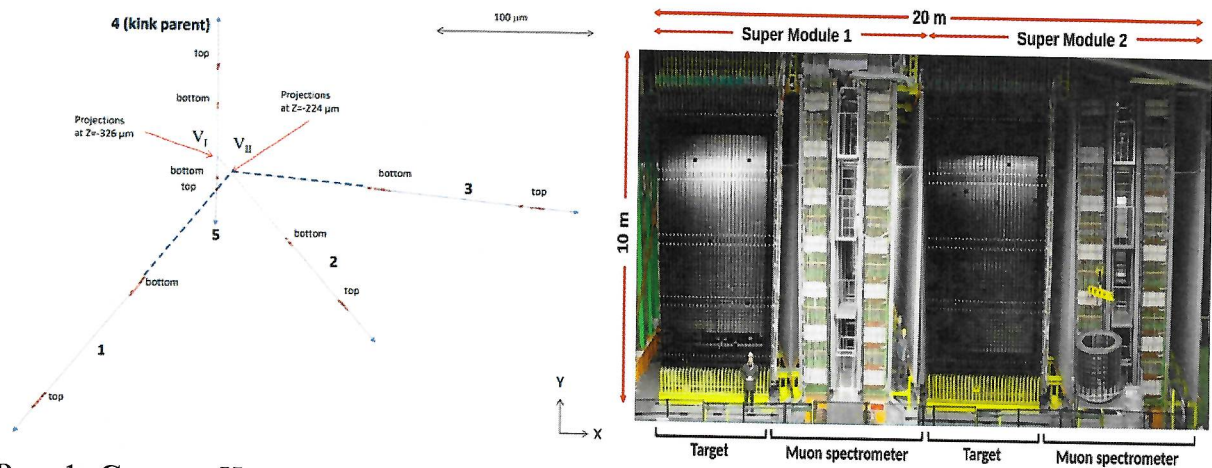


Рис. 1. Слева - Наложение нескольких изображений томографической эмульсии, снятых на разной глубине вдоль пленки 32. Реконструированные треки показаны сплошными линиями, экстраполяция - сегментированными линиями. Справа - Детектор OPERA, вид сбоку. Пучок нейтрино шел слева. Верхние горизонтальные линии указывают на два идентичных супермодуля (SM1 и SM2).

**Публикация:**

Agafonova, N., Aleksandrov, A., Anokhina, A. et al. (OPERA Collaboration) «First observation of a tau neutrino charged current interaction with charm production in the OPERA experiment». Eur. Phys. J. C 80, 699 (2020). <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-020-8160-y>

**Координатор: Агафонова Наталья Юрьевна**

тел.: 8(495)954-39-35

эл.почта: agafonova@inr.ru

ПФНИ ГАН «И, Физические науки, направление 15»

**11. Разработан метод и программный код реконструкции направлений прихода событий наземной решетки Telescope Array с повышенной точностью.**

Эксперимент по наблюдению космических лучей ультравысоких энергий (КЛУВЭ) Telescope Array является вторым по масштабу в мире в данном классе экспериментов и крупнейшим обзоревающим небо Северного полушария. За 12 лет его непрерывной работы накоплен большой объем данных о космических лучах и получены важные результаты. Однако такие существенные вопросы как выявление источников КЛУВЭ и однозначное измерение их массового состава КЛУВЭ до сих пор не решены. Нами была построена новая реконструкция событий Telescope Array основанная на сверточных нейронных сетях и нейронных сетях глубокого обучения. Точность этой реконструкции превосходит точность базовой реконструкции Telescope Array и таким образом имеет огромный потенциал для решения вышеназванных проблем. В качестве первого применения новой реконструкции нами было рассмотрено восстановление направления прихода КЛУВЭ. На базе Монте-Карло симуляций Telescope Array было показано что улучшение углового разрешения эксперимента в новой реконструкции составляет до 25% по сравнению с базовой реконструкцией.

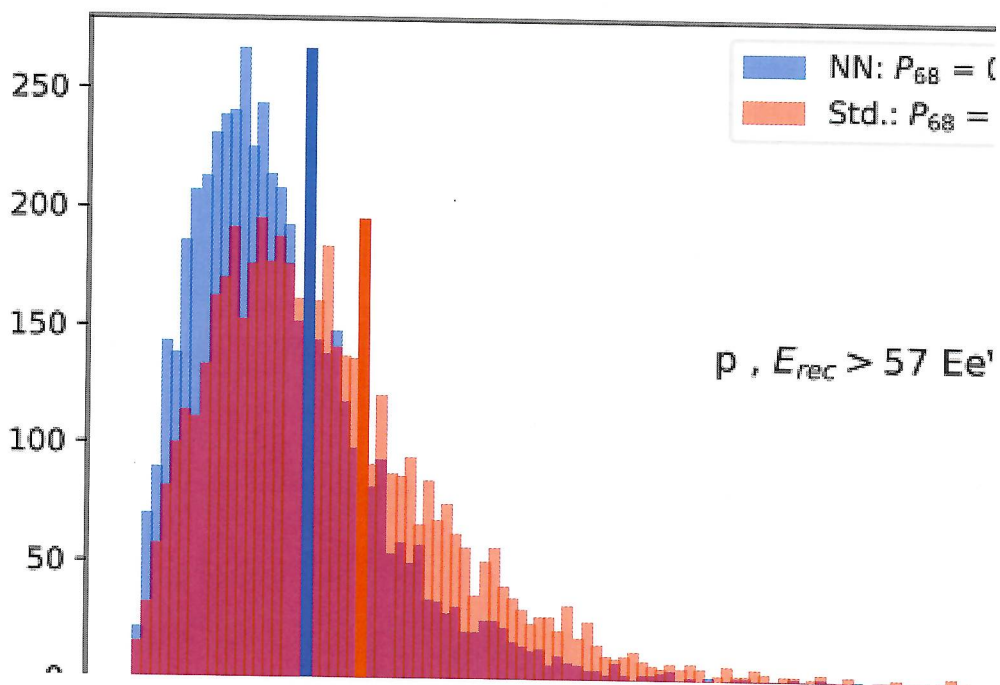


Рис. 1 Распределение углового расстояния между истинным и реконструированным направлением прихода протонов с энергиями более 57 ЭэВ: базовая реконструкция Telescope Array (красная гистограмма) и новая нейросетевая реконструкция (синяя гистограмма). Вертикальными линиями отмечены значения углового разрешения в соответствующих реконструкциях

Статья по результатам этого исследования принята к печати в журнале «Machine Learning»: Science and Technology (<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2632-2153/abae74>).

**Координатор: Рубцов Григорий Игоревич**

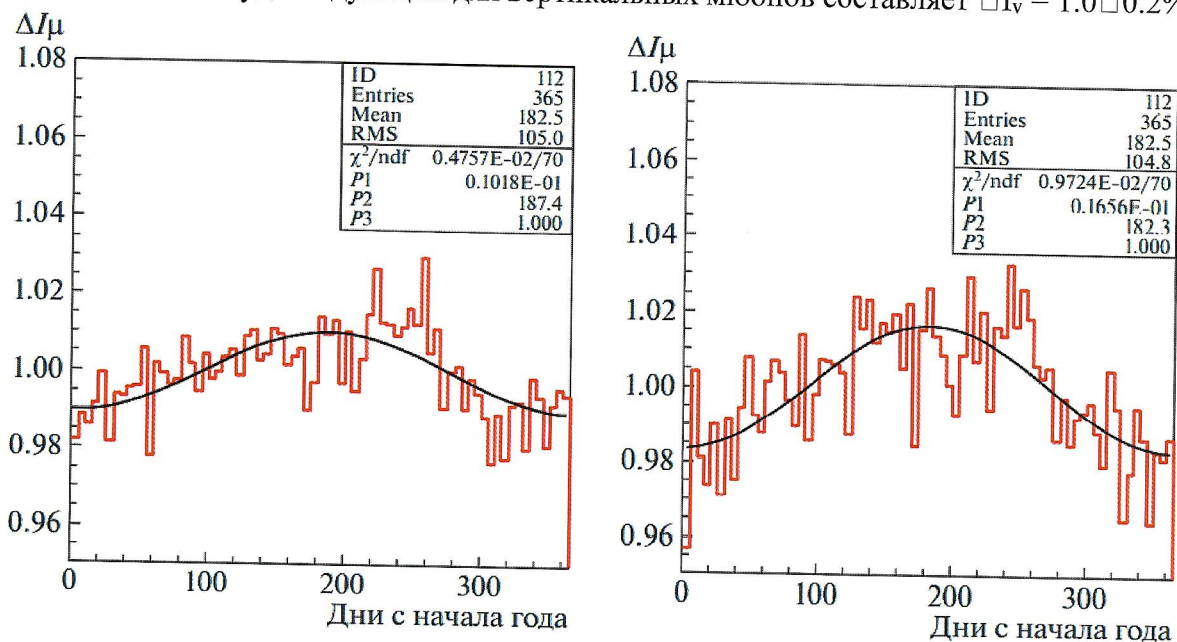
тел.: 8(903)755-17-32, 8(499)135-05-85,

эл.почта: [grisha@inr.ac.ru](mailto:grisha@inr.ac.ru)

ПФНИ ГАН «II, Физические науки, направление 15»

## 12. Измерение сезонных вариаций горизонтальных и вертикальных мюонов на подземном детекторе LVD

По данным LVD были получены характеристики сезонных вариаций потоков мюонов разных направлений в период с 2001 по 2018 гг. Методом «независимых простых годоскопов» определены амплитуда и фаза сезонных вариаций для горизонтальных и вертикальных мюонов. Амплитуда модуляции для горизонтальных мюонов  $\Delta I_h = 1.7 \pm 0.3\%$ . Амплитуда модуляции для вертикальных мюонов составляет  $\Delta I_v = 1.0 \pm 0.2\%$ .



**Рис. 1 Слева** - Вариации темпа счета вертикальных мюонов, метод наложения эпох. **Справа** - Вариации темпа счета горизонтальных мюонов, метод наложения эпох. Бин — 5 сут. Кривые — аппроксимация  $f(t)=1+ P1 \cos(2\pi(t - P2)/365)$ .

Коллаборация LVD авторы из ИЯИ РАН: Н.Ю. Агафонова, В.В. Ашихмин, Е.А. Добрынина, А.С. Мальгин, О.Г. Ряжская, И.Р. Шакирьянова

### Публикация:

Н.Ю. Агафонова, В.В. Ашихмин, Е.А. Добрынина, А.С. Мальгин, О.Г. Ряжская, И.Р. Шакирьянова, от имени Коллаборации LVD, "Измерение сезонных вариаций горизонтальных мюонов на подземном детекторе LVD", ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА, 2020, том 83, № 1, с. 70–75, DOI:10.1134/S004400272001002X

**Координатор: Агафонова Наталья Юрьевна**

тел.: 8(495)954-39-35

эл.почта: [agafonova@inr.ru](mailto:agafonova@inr.ru)

ПФНИ ГАН «II, Физические науки, направление 15»

### 13. Исследовано фоторождение странных мезонов на протоне и дейтроне при экстремально малых углах рассеяния.

В коллаборации (BGO-OD, Бонн, Германия) создана уникальная установка для исследования фоторождения мезонов, сочетающая в себе широкоапертурный кристалл-болл (BGO) и открытый дипольный магнит (OD) в переднем направлении. На ускорителе (ELSA) с энергией электронов 3.5 ГэВ с помощью этой установки получены новые экспериментальные данные по фоторождению странных мезонов, отличающиеся высоким разрешением по импульсу. Возможности установки иллюстрирует рис.1, где показаны недостающие (missing) массы для разных интервалов масс в сравнении с результатами моделирования. Это позволило изучить механизмы обменных реакций в t-канале, включая фоторождение нейтральных и заряженных каонов на протоне и нейтроне (дейтроне) при экстремально малых углах рассеяния. Полученные данные находятся в согласии с результатами теоретических расчетов в рамках изобарной модели с использованием метода парциальных волн.

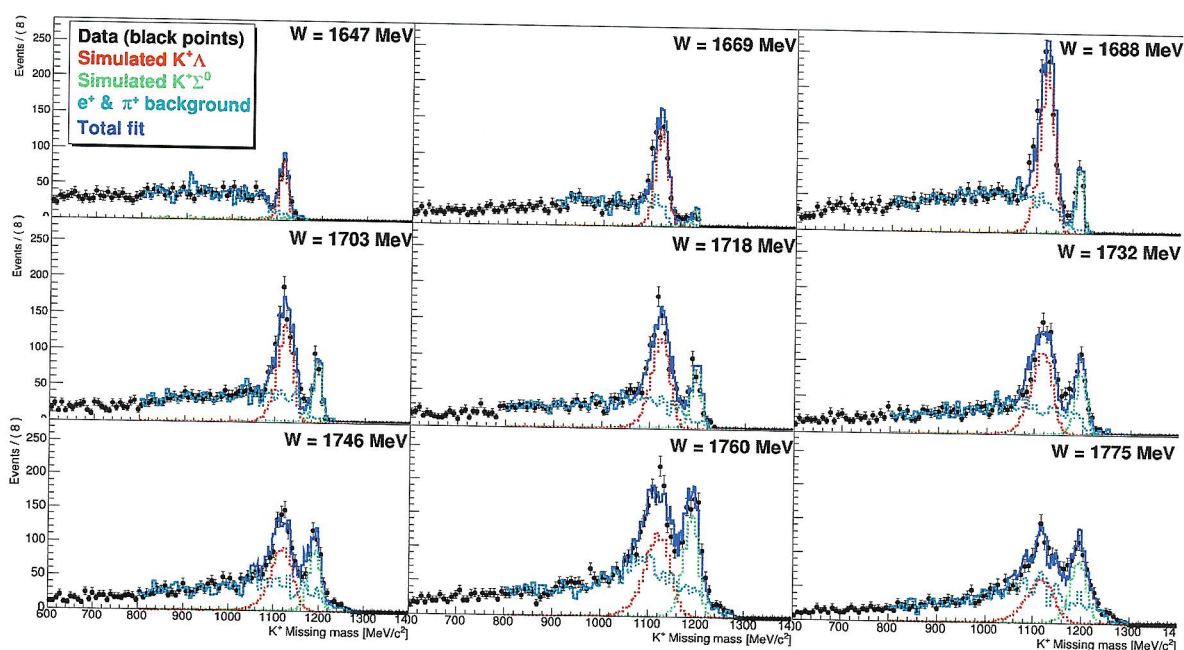


Рис.1. Спектр недостающих (missing) масс в реакциях фоторождения странных мезонов. Черные точки – результаты эксперимента, красные и зеленые точки соответствуют моделированию реакции  $K^+\Lambda$  и  $K-\Sigma^0$ , соответственно.

Коллаборация BGO-OD авторы от ИЯИ РАН А.М.Лапик, В.П. Лисин, А.Н. Мушкаренок, В.Г. Недорезов, А.Л. Полонский

#### Публикация:

T.C. Jude, S. Alef, P. Bauer et al. (BGO-OD collaboration, 32 автора, 5 из ИЯИ РАН). Strangeness Photoproduction at the BGO-OD Experiment // *Phys. Part. Nucl.* 51 (2020) 1.

**Координатор: Недорезов Владимир Георгиевич**

тел.: 8(499)135-05-78

эл.почта: vladimir@срс.inr.ac.ru

ПФНИ ГАН «II, Физические науки, направление 15»

#### 14. Разработан фотоядерный метод получения медицински значимого радионуклида $^{47}\text{Sc}$

Л.З. Джилавян (ИЯИ РАН) совместно с Р.А. Алиевым<sup>1, 2</sup>, С.С.Белышевым<sup>2</sup>, Е.В. Фрумкиной<sup>1, 2</sup>, В.В. Ханкиным<sup>3</sup>, А.А. Кузнецовым<sup>3</sup>, А.В. Приселковым<sup>4</sup>, Б.С. Ишхановым<sup>3</sup>.  
1 - НИЦ КИ, 2- МГУ им М.В. Ломоносова, 4 – НИИЯФ МГУ

Разработан метод получения радиоизотопов Sc при облучении Ti-мишеней естественного изотопного состава тормозными фотонами с энергиями до 55 МэВ. Измеренный спектр  $\gamma$ -квантов с основными линиями  $E_\gamma$  от распадов образованных при различных фотоядерных реакциях в облученной мишени радиоизотопов Sc и Ti приведен на рис.1. Периоды полураспада указаны в табл.1. Установлено, что примеси нуклидов  $^{46}\text{Sc}$  и  $^{48}\text{Sc}$  по отношению к активности  $^{47}\text{Sc}$  составляют соответственно ~1.5% и 9.1%. Процедура радиохимического выделения Sc занимала ~2 часа, проводилась методом экстракционной хроматографии с использованием сред  $\text{HNO}_3$  и  $\text{HCl}$  при достигнутой эффективности > 97%. Показано, что метод позволяет получать пригодные для радиотерапии количества  $^{47}\text{Sc}$  [1].

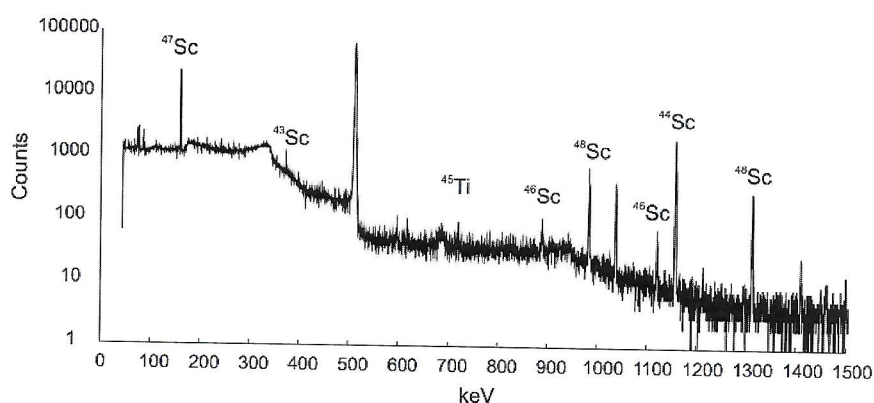


Рис.1. Спектр  $\gamma$ -квантов от титановой мишени, облученной в течение 2-х часов тормозными фотонами с максимальной энергией 55 МэВ.

Нуклид	$T_{1/2}$	$E_\gamma$ , keV	Основные реакции	Выход, Bq/( $\mu\text{A}\cdot\text{h}\cdot(\text{g}/\text{cm}^2)$ )
$^{43}\text{Sc}$	2.89 h	372.8	$^{46}\text{Ti}(\gamma, 2n\text{p})$	$(2.10 \pm 0.25) \cdot 10^4$
$^{44}\text{Sc}$	3.93 h	1157	$^{46}\text{Ti}(\gamma, n\text{p})$	$(1.88 \pm 0.11) \cdot 10^5$
$^{44\text{m}}\text{Sc}$	58.6 h	271	$^{46}\text{Ti}(\gamma, n\text{p})$	$(0.89 \pm 0.05) \cdot 10^3$
$^{46}\text{Sc}$	83.8 days	889	$^{47}\text{Ti}(\gamma, p)$	$(3.59 \pm 0.20) \cdot 10^3$
		1120	$^{48}\text{Ti}(\gamma, n\text{p})$	
$^{47}\text{Sc}$	3.35 days	159	$^{48}\text{Ti}(\gamma, p)$	$(2.97 \pm 0.17) \cdot 10^5$
$^{48}\text{Sc}$	43.7 h	983	$^{49}\text{Ti}(\gamma, p)$	$(2.79 \pm 0.19) \cdot 10^4$
		1037	$^{50}\text{Ti}(\gamma, n\text{p})$	
		1312		
$^{45}\text{Ti}$	3.08 h	720	$^{46}\text{Ti}(\gamma, n)$	$(2.12 \pm 0.31) \cdot 10^6$
			$^{47}\text{Ti}(\gamma, 2n)$	

Табл.1. Измеренные выходы, энергии и периоды полураспада фотоядерных реакций на Ti-мишени естественного изотопного состава

**Публикация:**

1. R. A. Alyev e.a. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry (2020) Vol. 326, pp. 1099–1106,

**Координатор: Джилавын Леонид Завенович**

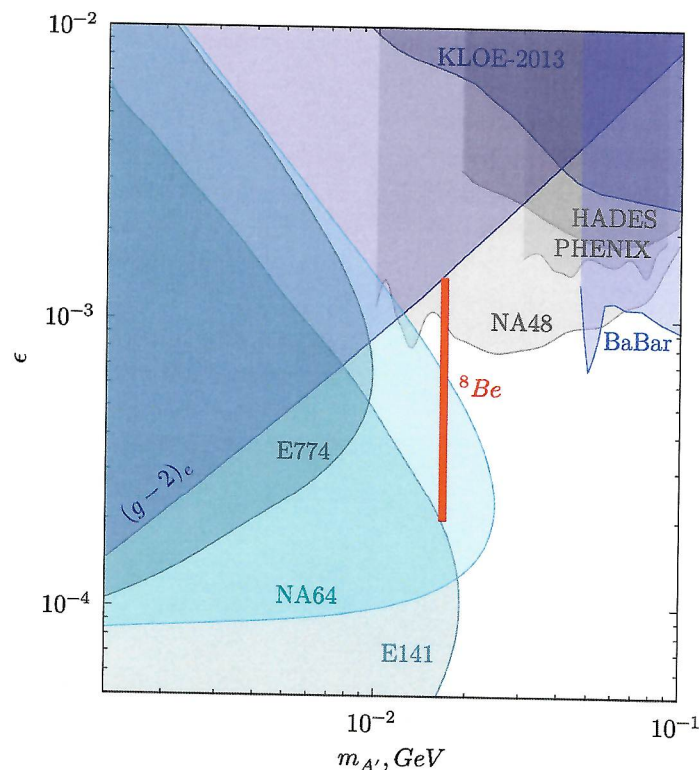
тел.: 8(499)135-21-12

эл.почта: dzhil@inr.ru

ПФНИ ГАН «II, Физические науки, направление 15»

### 15. Улучшенные пределы на распад гипотетического бозона X17 и темного фотона на электрон-позитронную пару в эксперименте NA64

В 2020 г. коллаборация NA64 сообщила об улучшенных результатах прямого поиска нового бозона X17 с массой 17 МэВ, который наблюдался в виде аномального избытка пар  $e^+e^-$  в распадах возбужденных ядер  $^8\text{Be}$  (“бериллиевая аномалия”) и был недавно обнаружен в ядерных переходах другого ядра,  $^4\text{He}$ . Если X-бозон существует, то он может рождаться в реакции тормозного излучения  $e^-Z \rightarrow e^-Z+X17$  пучка электронов высокой энергии, в эксперименте NA64 на SPS ЦЕРН, и наблюдаться через его последующий распад на пару  $e^+e^-$ . В результате анализа данных 2017 и 2019 годов эксперимента NA64 не обнаружено существования распада X17  $\rightarrow e^+e^-$  и установлены новые пределы на константу связи  $e-X17$  с исключением части области параметров, объясняющих X17-аномалию. В 2021 году установка будет модернизирована для дальнейшего, более чувствительного поиска.



Ограничения на константу связи. Красная область соответствует области параметров нового бозона X17, голубая область исключена экспериментом NA64 в 2020 г.

Коллаборация NA64, авторы из ИЯИ РАН: А.Дерменев, С.Гниненко, А.Корнеев, Д.Кирпичников, М.Кирсанов, Л.Кравчук, Н.Красников, И.Тлисова, Д.Тлисов†, А.Торопин

**Публикация:**

**Координатор: Гниненко Сергей Николаевич**

тел.: 8(495)850-42-50

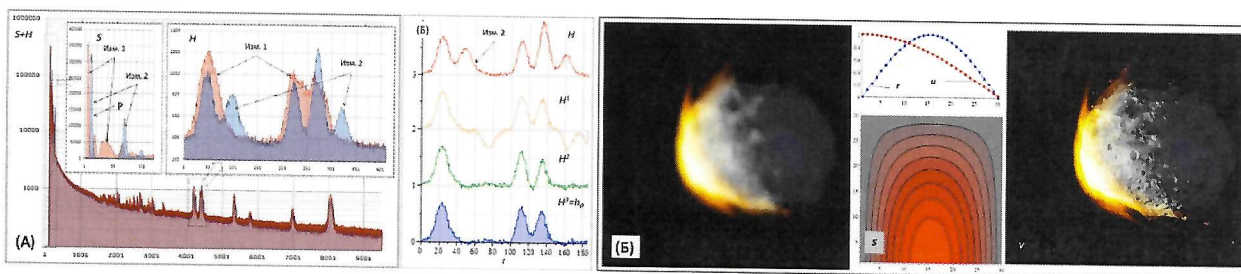
эл. почта: sergei.gninenko@cern.ch

ПФНИ ГАН «II, Физические науки, направление 15»

## 16. Реконструкция экспериментальных данных физических установок прямыми преобразованиями

Методы математической обработки экспериментальных данных физических установок были разработаны для устранения искажений, вносимых измерительной аппаратурой в процессе измерений. Методы позволяют осуществить реконструкцию входного воздействия из сигнала на выходе линейных стационарных измерительных систем с помощью прямых преобразований и обеспечить минимальные потери информации в сложных случаях плохой обусловленности задач и при наличии случайных шумов в данных.

Предложенные методы математической обработки данных могут быть использованы во многих прикладных областях науки и техники: в экспериментальной физике, в области цифровой обработки сигналов и изображений, в компьютерной алгебре, статистике, в медицинской физике при моделировании полей облучения и томографии и многих других. Алгоритмы методов реконструкции и моделирования описаны в статьях и препринтах и готовы к практическому применению. На рисунке 1А представлен пример реконструкции экспериментальных данных времяпролётного нейтронного спектрометра ТРОНС ИЯИ РАН, где методом сдвигов были устранены ложные спектральные линии от послеимпульсов нейтронных потоков, что означает повышение разрешающей способности установки в 2-3 раза. На рисунке 1Б представлен пример восстановления размытого по Гауссу цветного изображения  $600 \times 700$  пикселей в .jpeg формате методом компенсации наложений (Б). Время реконструкции методом компенсации наложений составило 2,063 сек, точность восстановления  $1,43 \cdot 10^{-5}$ .



**Рисунок 1.** Реконструкция экспериментальных данных времяпролётного нейтронного спектрометра ТРОНС ИЯИ РАН (А) и восстановление изображения, размытого по Гауссу методом компенсации наложений (Б).

Технический и экономический эффект от внедрения состоит в том, что повысить качество измерений можно доступными математическими методами вместо дорогостоящих конструктивно-технических методов разработки высокоточной измерительной аппаратуры, сопряженных с трудноразрешимыми научно-техническими проблемами.



Предлагаемые методы реконструкции имеют широкую область применения и большой инновационный потенциал. Методы относятся к сфере научных разработок, апробированы в докладах на семинарах в ОИЯИ и ИЯИ РАН, на международных конференциях, защищены публикациями в рецензируемых журналах в России и за рубежом. Патентная защита алгоритмов и программ расчета не проводилась.

**Публикации:**

1. Новиков-Бородин А.В. Прямая реконструкция экспериментальных данных при плохой обусловленности задач и наличии искажений. – Приборы и техника эксперимента, 2020, № 5, с.48-59. doi:10.31857/S003281622005033X.
2. Novikov-Borodin A.V. Direct Reconstruction of the Experimental Data in the Case of Ill-Conditioned Problems and in the Presence of Data Distortions. – Instruments and Experimental Techniques, 2020, Vol.63, No.5, pp.658-669, © Pleiades Publishing, Ltd., 2020. doi:10.1134/S0020441220050322.
3. Novikov-Borodin A.V. Experimental Data Processing Using Shift Methods. – EPJ Web of Conferences 226, 03014, 2020. doi:10.1051/epjconf/202022603014

**Координатор: Новиков-Бородин Андрей Валерьевич**

тел.: 8(495)850-42-55

эл. почта: novikov@inr.ru

ПФНИ ГАН «II, Физические науки, направление 15,16»

Заместитель директора  
Профессор РАН



Г.И. Рубцов

Протокол заседания Ученого совета ИЯИ РАН от «14» декабря 2020 г. № 11