

## КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

## К 100-летию открытия космических лучей

Научная сессия Отделения физических наук  
Российской академии наук, 24 октября 2012 г.

PACS number: 01.10.Fv

DOI: 10.3367/UFNr.0183.201303g.0315

24 октября 2012 г. в конференц-зале Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (РАН) состоялась научная сессия Отделения физических наук РАН, посвящённая 100-летию открытия космических лучей.

Объявленная на web-сайте ОФН РАН [www.grad.ac.ru](http://www.grad.ac.ru) повестка заседания содержала следующие доклады:

1. **Панасюк М.И.** (Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва). *Вклад российских учёных в 100-летнюю историю развития физики космических лучей.*

2. **Ряжская О.Г.** (Институт ядерных исследований РАН, Москва). *Об экспериментах в подземной физике.*

3. **Крымский Г.Ф., Бережко Е.Г.** (Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск). *Происхождение космических лучей.*

4. **Стойков Ю.И.** (Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва). *Космические лучи в гелиосфере.*

5. **Троицкий С.В.** (Институт ядерных исследований РАН, Москва). *Космические частицы с энергиями  $> 10^{19}$  эВ — краткий обзор результатов.*

Статьи, написанные на основе докладов 2 и 5, публикуются ниже.

PACS numbers: 01.65. + g, 26.65. + t, 98.70.Sa  
DOI: 10.3367/UFNr.0183.201303h.0315

## Об экспериментах в подземной физике

О.Г. Ряжская

## 1. Введение

В этой статье я хотела бы представить своё видение основных исторических этапов становления подземной физики, отметить наиболее важную тематику выполненных за это время работ, рассказать о самых интересных современных экспериментах. Подземная физика обсуждается здесь как эффективный метод изучения широкого

класса редких процессов в физике космических лучей и элементарных частиц, особенно связанных с ролью нейтрино в астрофизике. Вся моя работа связана с развитием подземной физики в России. В процессе этой деятельности мне довелось много лет сотрудничать с подземной Национальной лабораторией Гран-Сассо (Италия), в которой находится построенный нами при участии итальянских коллег 1000-тонный сцинтилляционный детектор LVD (Large Volume Detector). Я надеюсь, что читатели поймут вызванную этим обстоятельством некоторую субъективность моих оценок.

Я хотела бы обратить внимание на то, что эксперименты в современной подземной физике — чрезвычайно трудоёмкая область интеллектуальной деятельности. Здесь работают и получают результаты большие коллективы, часто коллаборации, физиков, и главная заслуга в успехе принадлежит этим коллективам.

## 2. Изучение проникающей компоненты космических лучей под землёй

Работы, которые положили начало подземной физике, шли одновременно с открытием и исследованием природы космических лучей (КЛ). Физики изучают КЛ на уровне моря и в горах, в верхних слоях атмосферы на баллонах, под землёй и под водой.

К пионерам этих работ можно отнести итальянца Доменико Пачини и советского исследователя Льва Мысовского, разместивших свои приборы под водой. Первый сделал это в 1905–1912 гг. [1], второй — в 1926–1929 гг. [2]. В последующие 40 лет, особенно после открытия мюона [3, 4] в 1937 г., большая группа физиков активно изучает мюонную компоненту под землёй. Была измерена зависимость интенсивности мюонов от глубины до 7000 метров водного эквивалента (м.в.э.) [5–10].

С 1960-х годов в подземных экспериментах начинает доминировать нейтринная тематика. Это касается прежде всего изучения нейтрино атмосферного происхождения. Г.Т. Зацепиным и В.А. Кузьминым, а также М.А. Марковым и И.М. Железным [11–13] были рассчитаны потоки нейтрино, приходящие к Земле под разными углами — как из верхней полусферы, так и с обратной стороны Земли.

В 1963–1969 гг. в трёх экспериментах: 1) М. Менон, А. Вольфендейл и др. [14] (шахта Колар Голд Филдс

О.Г. Ряжская. Институт ядерных исследований РАН, Москва, РФ  
E-mail: [ryazhskaya@vaxmv.tower.ras.ru](mailto:ryazhskaya@vaxmv.tower.ras.ru)

(Индия), глубина 7500 м.в.э.); 2) Ф. Райнес, В. Кропп и др. [15] (шахта вблизи Йоханнесбурга (Южная Африка), глубина 8640 м.в.э.); 3) Дж. Койфель и др. [16] (глубина 1500 м.в.э. (Юта, США)) — впервые были измерены потоки атмосферных нейтрино для углов  $\theta > 50^\circ$  (в экспериментах 1 и 2) и  $\theta > 90^\circ$  (в эксперименте 3). Данные этих экспериментов согласуются с линейным ростом полного сечения взаимодействия нейтрино–нуклон с энергией [17]. Статистическая точность в опытах была невысокой.

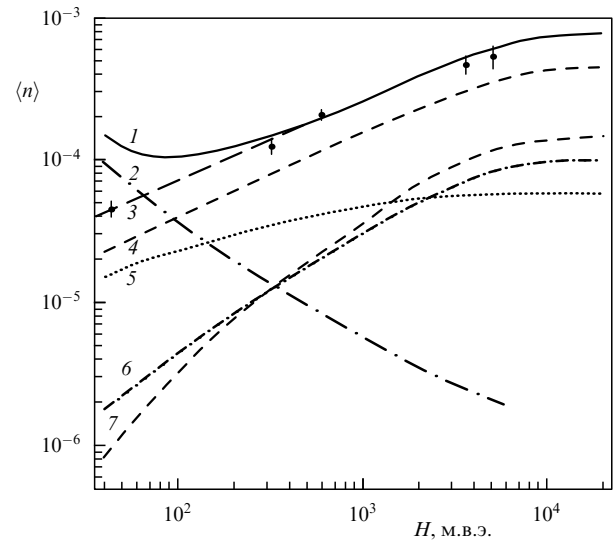
Работы с нейтрино ясно показали, что для успеха здесь требуются большие детекторы с массой 100–1000 т, способные дать информацию о траектории частицы. Кроме того, очень важно знать фоновые условия в подземных лабораториях. Эти вопросы стали особенно актуальными в связи с предложениями о регистрации солнечных нейтрино [18, 19], проведении работ по экспериментальному подтверждению существования нейтринных осцилляций, а также по поиску и регистрации нейтринного излучения от звёздных коллапсов.

Нейтрино ( $\nu$ ) — слабо взаимодействующая частица — регистрируется либо по измерению продуктов взаимодействия с ядрами, либо по  $\nu e^-$ -рассеянию. Такие события — редкие, поэтому важно снизить фон, способный имитировать эффект. Главным источником фона в подземных экспериментах на глубине  $H$  (м.в.э.) являются мюоны КЛ со средней энергией  $\bar{E}_\mu(H)$  несколько сотен ГэВ.

В грунте такие мюоны за счёт тормозного излучения генерируют электромагнитные каскады, гамма-кванты которых взаимодействуют с ядрами грунта:  $\gamma A \rightarrow A' + (\pi^\pm, \pi^0, p, n, \alpha, \dots)$ . В этих реакциях рождается небольшое количество ядерно-активных частиц, являющихся опасным фоном в поисковых экспериментах.

Такая точка зрения на природу фонов под землёй существовала довольно долго, хотя и сложилось общее впечатление, что в указанной схеме фоны явно недооцениваются. Взгляд на эту проблему кардинально изменился после расчётов Г.Т. Зацепина и О.Г. Ряжской [20] (1965 г.). Авторы статьи [20], рассмотрев все возможные каналы рождения ядерно-активных частиц, показали, что основная доля этих частиц рождается в ядерных ливнях, которые генерируются при глубоко неупругом взаимодействии мюонов с ядрами грунта в реакциях типа  $\mu A \rightarrow \mu + \pi\pi + \chi$ , где  $\pi\pi$  — сумма  $\pi$ -мезонов,  $\chi$  — фрагменты ядра. В результате фон на глубине, например, 4000 м.в.э. увеличивается в 2,5 раза по сравнению с его оценками, учитывающими лишь электромагнитное взаимодействие мюонов с грунтом (рис. 1). Причём фоновые события с энергией более 100 МэВ обусловлены только глубоко неупругим взаимодействием мюонов.

Результаты этих расчётов были подтверждены в серии экспериментов, выполненных О.Г. Ряжской с сотрудниками с помощью построенных ими больших жидкостных сцинтилляционных (ЖС) детекторов. Авторы измерили число нейтронов под землёй на различных глубинах — 25, 316, 570 м.в.э. (Артёмовск, 1968–1987 гг.) [21–24] и до 5400 м.в.э. (Монблан, 1985–1998 гг.) [25, 26], а также зависимость числа нейтронов и  $\pi \rightarrow \mu \rightarrow e$ -распадов от энергии в электромагнитных и ядерных ливнях на глубине 570 м.в.э. в соляных шахтах вблизи Артёмовска (рис. 2). Было показано, что генерация нейтронов под землёй зависит не только от интенсивности мюонов  $J_\mu(H)$ , но и от их средней энергии на данной глубине  $H$  —

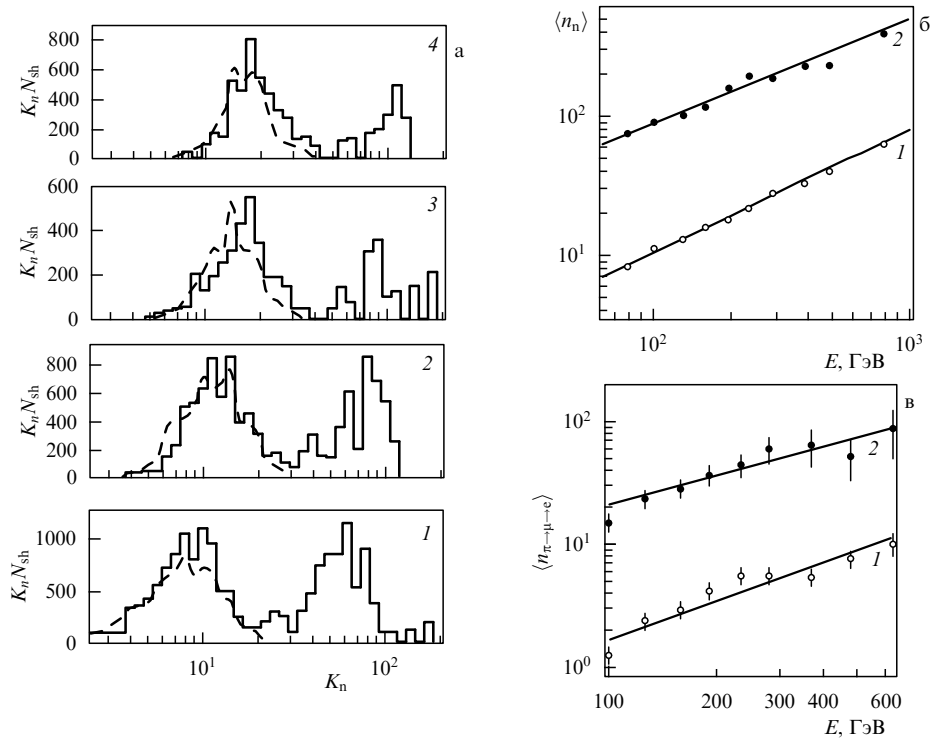


**Рис. 1.** Количество генерируемых медленных нейтронов в  $1 \text{ г см}^{-2}$  грунта в расчёте на один мюон в зависимости от глубины. 1 — полное число нейтронов, рождённых во всех процессах; 2 — число нейтронов, образованных при захвате  $\mu^-$ ; 3 — число нейтронов, рождённых во всех процессах, за исключением  $\mu^-$ -захвата; 4 — число нейтронов, генерируемых виртуальными фотонами с учётом ядерных ливней; 5–7 — число нейтронов, генерируемых фотонами электромагнитных ливней, индуцированных  $\delta$ -электронами,  $e^+e^-$ -парами и тормозным излучением соответственно. Тёмные кружки — экспериментальные данные. Для того чтобы можно было оценить фоны в черенковских и сцинтилляционных детекторах на разных глубинах, кривые нормированы (коэффициент нормировки  $\approx 0,7$ ) к результатам эксперимента, выполненного на глубине 25 м.в.э. с помощью ЖС-детектора.

как  $\bar{E}_\mu^{0,75 \pm 0,05}(H)$  — и число нейтронов и  $\pi$ -мезонов, генерируемых в ядерных ливнях, примерно в 10 раз больше, чем в электромагнитных [27].

Установленная, теоретически обоснованная и экспериментально подтверждённая в этих работах концепция природы фонов под землёй в настоящее время определяет качество и уровень достоверности всех без исключения фундаментальных поисковых экспериментов.

Разработки больших подземных детекторов шли по нескольким направлениям. Вместо дорогостоящих пластических сцинтилляторов со сложной технологией производства было предложено использовать ЖС с простой технологией, легко реализуемой в условиях неспециализированных лабораторий. Эти ЖС, основой которых служили дешёвые и доступные нефтепродукты, имели достаточно высокую сцинтилляционную эффективность, являлись быстрыми, прозрачными для собственного излучения и в общем вполне безопасными и удобными в работе. В качестве альтернативы ЖС были предложены килотонные водяные черенковские детекторы. Для того чтобы сделать последние конкурентоспособными по чувствительности, пришлось увеличить в них относительную долю площадей фотокатодов ФЭУ (фотоэлектронных умножителей) на порядок по сравнению с нормой в ЖС-детекторах. Черенковские детекторы дают возможность определять, кроме величины энерговыделения, вертекс и угол траектории частицы, что бывает очень ценным. Примером такого черенковского детектора являлся Kamiokande II (К II) с водяной массой 2,14 кт [28]. Что касается больших детекторов на ЖС, то здесь прежде всего надо назвать Баксанский подземный сцинтилля-



**Рис. 2.** (а) Зависимость числа ливней  $N_{sh}$  от количества нейтронов, зарегистрированных в них, полученная на детекторе АСД.  $K_n$  — множественность нейтронов. Гистограммы — экспериментальные результаты. Штриховые кривые — результаты расчёта методом Монте-Карло. 1 —  $\Delta E = 90-115$  ГэВ, 2 —  $\Delta E = 145-170$  ГэВ, 3 —  $\Delta E = 212-250$  ГэВ, 4 —  $\Delta E = 250-344$  ГэВ. (б) Зависимость среднего числа медленных нейтронов  $\langle n_n \rangle$  от энергосвечения  $E$  в детекторе для ядерных (2) и электромагнитных (1) ливней. (в) Зависимость среднего числа  $\pi \rightarrow \mu \rightarrow e$ -распадов  $\langle n_{\pi \rightarrow \mu \rightarrow e} \rangle$  от энергосвечения  $E$  в детекторе для ядерных (2) и электромагнитных (1) ливней.

сионный телескоп (БПСТ) с массой ЖС 330 т, построенный А.Е. Чудаковым с сотрудниками [29] в 1978 г. Жидкий сцинтиллятор для этого детектора был разработан сотрудниками Института ядерных исследований (ИЯИ) А.В. Воеводским, В.Л. Дадыкиным, О.Г. Рязской [30] (1966 г.). Именно в этот период нами были предложены и реализованы основные методики, с использованием которых позднее были сооружены все большие подземные детекторы ИЯИ. Об этом этапе работ, сыгравшем важную роль в развитии подземной физики в России, подробно и точно рассказано в препринте В.Л. Дадыкина "К истории сооружения БПСТ" [31]. С 1977 г. нами были построены АСД (Артёмовский сцинтилляционный детектор (1977 г.) [32], БПСТ (1978 г.), LSD (Liquid Scintillation Detector) (1984 г.) [33], LVD (1992, 2001 гг.) [34, 35]. О достоинствах разработанного нами ЖС было сказано немало. Обратим внимание лишь на одно важное обстоятельство. Первые подземные детекторы с этим ЖС используются уже более 35 лет, и за это время ни в одном из них сцинтиллятор не потерял стартовых условий. Эта суперстабильность нашего ЖС позволяет эффективно использовать его в таких долговременных мегапроектах, как программа поиска и изучения нейтрино от звёздных коллапсов.

Кроме упомянутых выше сцинтилляционных и черенковских детекторов, с 1980-х годов в подземных нейтринных экспериментах применяются железные калориметры с разнообразными приспособлениями для определения координат траекторий регистрируемых частиц. Это Fréjus [36, 37] с искровыми камерами и гейгеровскими счётчиками, NUSEX (NUcleon Stability EXperiment) [38]

со стримерными камерами, Soudan 2 [39, 40] с пропорциональными дрейфовыми трубками. Продолжает работать один из наиболее совершенных в своё время сцинтилляционных детекторов KGF (Kolar Gold Fields) [14], снабжённый магнитным спектрографом и неоновыми трубками. Позднее были созданы сцинтилляционный детектор MACRO (Monopole, Astrophysics and Cosmic Ray Observatory) [41] со стримерными камерами, черенковский водяной детектор IMB (Irvine–Michigan–Brookhaven) [42] с массой 5 кт и самый большой из современных черенковских детекторов SuperK [43] с активной массой воды 22,5 кт.

На подземных детекторах была измерена интенсивность мюонов на глубинах до  $H = 18000$  м.в.э. Было показано, что для  $H > 15000$  м.в.э. интенсивность мюонов становится постоянной, поскольку на таких глубинах основной поток мюонов образуется при взаимодействии атмосферных нейтрино с ядрами грунта (рис. 3) [44, 45].

В этих экспериментах были также измерены сечение тормозного излучения мюонов и сечение неупругого взаимодействия мюонов при передачах энергии до 3 ТэВ [46]. Были изучены энергетические спектры мюонов и получены показатели спектров  $\pi$ - и  $K$ -мезонов, родителей мюонов, при энергиях до  $E \approx 40$  ТэВ [47].

На детекторах БПСТ, KGF, Fréjus, MACRO, Soudan 2 осуществлялся поиск астрофизических точечных источников нейтрино по наблюдению мюонов, приходящих в детекторы с направлений, на которых фон атмосферных мюонов минимален: с обратной стороны Земли и вблизи горизонта [47].

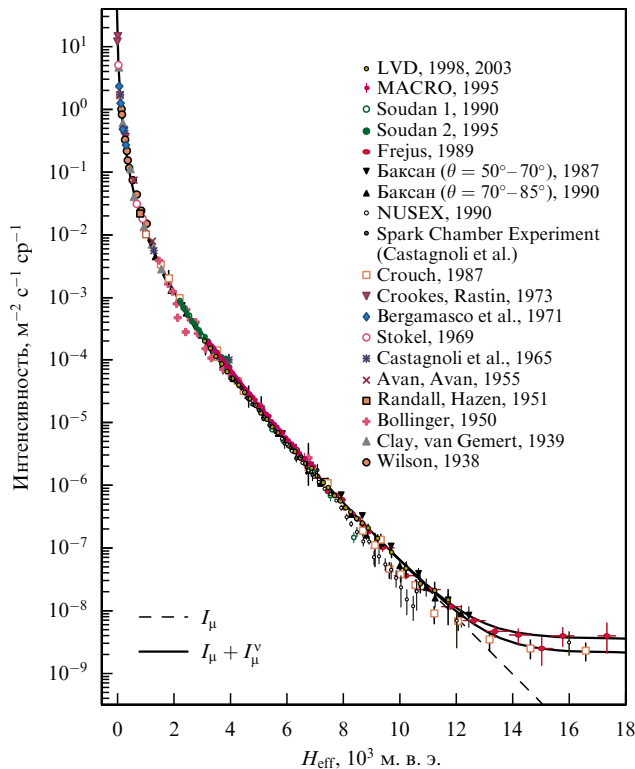


Рис. 3. Зависимость интенсивности мюонов от эффективной глубины грунта  $H_{\text{eff}}$  [44, 45].

Таких источников пока не обнаружено. В настоящее время получены лишь верхние пределы потока нейтрино от этих источников:  $\leq 10^{-15} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ .

### 3. Регистрация солнечных нейтрино и опыты по изучению нейтринных осцилляций

Идея о том, что нейтрино одного типа могут самопроизвольно переходить в нейтрино другого типа и обратно, была высказана советским физиком Б.М. Понтекорво [48] в 1958 г. В 1968 г. Р. Дэвис [18] измерил поток нейтрино от Солнца и обнаружил, что этот поток в три раза меньше, чем предсказывает стандартная солнечная модель (ССМ) [49, с. 104]. Этот факт был интерпретирован как результат осцилляций, и он сильно оживил интерес к идее Понтекорво. Гипотеза об осцилляциях нейтрино развивалась в работах С.И. Биленького, Б.М. Понтекорво, С.П. Михеева, А.Ю. Смирнова, Л. Вольфенштейна, К. Джунти и др. [50, 51] и получила современное звучание.

Около десяти групп физиков пытались подтвердить существование осцилляций в опытах с атмосферными нейтрино. В этих опытах наблюдали нейтрино, приходящие в подземные детекторы из нижней полусферы с обратной стороны Земли и по направлениям, близким к горизонтальным. По всем этим направлениям фон от мюонов КЛ был минимальным. Принципиально подобный опыт прост. Атмосферные нейтрино, мюонные  $\nu_\mu$  и электронные  $\nu_e$ , взаимодействуют в детекторе или вблизи него. Первые создают в детекторе мюон, одиночную частицу, вторые — электромагнитный каскад, т.е. много частиц, а мюона в этом случае нет. Это даёт возможность определить количество зарегистрированных  $\nu_\mu$  и  $\nu_e$ .

Полученный результат сравнивается с расчётом. Экспериментаторы представляли результаты в виде двойного отношения числа зарегистрированных  $\nu_\mu$  и  $\nu_e$   $R_{(\mu/e)}^{\text{data}}$  к числу рассчитанных методом Монте-Карло  $R_{(\mu/e)}^{\text{MC}}$ , т.е. величины  $R = R_{(\mu/e)}^{\text{data}}/R_{(\mu/e)}^{\text{MC}}$ . Если осцилляции в опыте не проявляются, то  $R = 1$ . Значимое отличие  $R$  от единицы можно интерпретировать как влияние осцилляций.

В этих опытах использовались следующие детекторы (приводятся в порядке увеличения глубины их залегания): IMB ( $H = 1570$  м.в.э.), Soudan 2 (1800 м.в.э.), КП (2700 м.в.э.), SuperK (2700 м.в.э.), MACRO (3650 м.в.э.), Fréjus (4710 м.в.э.), NUSEX (5300 м.в.э.). Для первых пяти детекторов получены величины  $R$  от  $0,54 \pm 0,02 \pm 0,07$  до  $0,71 \pm 0,05 \pm 0,18$ , а для двух последних, самых глубоких,  $R$  оказалось близким к единице:  $1 \pm 0,15 \pm 0,08$  и  $0,99 \pm 0,25$  [47].

Видно, что существует большой разброс в значениях  $R$ . Это связано с неточностями расчётов генерации разных типов нейтрино в атмосфере, вычислений сечений взаимодействия  $\nu_e$  и  $\bar{\nu}_e$  с веществом и учёта зависимости расчётного соотношения от геомагнитного эффекта. Следует также обратить внимание на тот факт, что события, интерпретируемые как вызванные  $\nu_e$ , могут быть имитированы обсуждавшимися выше фонами ядерно-активных частиц, генерируемых вблизи детектора. Главную опасность здесь представляют изолированные нейтрино с энергией более 400 МэВ, которые легко преодолевают несколько метров защиты и могут дать в детекторе каскад, похожий на регистрацию  $\nu_e$ . Влияние этого эффекта убывает с увеличением глубины расположения детекторов и меньше проявляется в результатах Fréjus и NUSEX.

Более обещающими представляются эксперименты, в которых нейтринный пучок от современного протонного ускорителя направляется через большую толщу земли в сторону подземного детектора. В таких опытах детектор регистрирует поток, состоящий почти на 99 % из мюонных нейтрино. Направление и энергетический спектр этого потока, синхронизованного с работой ускорителя, известны. В настоящее время такие эксперименты с использованием различных ускорителей проводятся на детекторах SuperK (эксперимент Tokai-to-Kamioka — T2K) [52], OPERA (Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus) (эксперимент CERN Neutrinos to Gran Sasso — CNGS) [53] и ICARUS (Imaging Cosmic And Rare Underground Signals) (CNGS) [54], а также MINOS (Main Injector Neutrino Oscillation Search) (NuMI — Neutrinos at Main Injector) в Фермилаб [55, 56].

При анализе данных очень важно точно знать состав нейтринного пучка на выходе из распадного канала. Ближний к ускорителю детектор, который контролировал бы состав пучка на выходе, не всегда удаётся расположить в том месте, где хотелось бы, и это создаёт трудности. Если ближний детектор находится слишком близко к ускорителю, то он будет переполнен фоновыми импульсами, что сильно осложнит обработку информации от него. Желательно, чтобы оба детектора, ближний и дальний, были однотипными — это облегчает анализ результатов опыта.

Неопределённостей в расчётах здесь, конечно, меньше, чем в опытах с атмосферными нейтрино, но расчёты всё равно необходимы. Исчезновение  $\nu_\mu$  из пучка может быть результатом не только осцилляций, но и рассеяния в 1000-километровой толще земного грунта на пути от

ускорителя до детектора. И всё, что недоучтено в расчётах, будет приписано действию осцилляций.

Более независимым от расчётов представляется изучение осцилляций по схеме "на появление" в детекторе, скажем,  $\tau$ -мезонов, произвести которые пучок  $\nu_\mu$  от ускорителя в отсутствие осцилляций никак не мог бы. В последнее время сообщалось о наблюдении  $\tau$ -подобных событий в детекторах OPERA [57] и SuperK [58]. Авторы экспериментов ведут анализ зарегистрированных данных.

Отвлечёмся на минуту от опытов по осцилляциям. Я расскажу, как мы применили пучок CNGS совсем для другой цели, а именно для изучения фонов под землёй. Мне давно хотелось измерить с помощью детектора LVD число нейтронов, произведённых не атмосферными мюонами, а мюонами, рождёнными  $\nu_\mu$  глубоко под землёй, там, где интенсивность мюонов выходит на константу. Для этого необходимо работать с мюонами, приходящими в детектор по направлениям, на которых атмосферных мюонов практически нет, т.е. из области вблизи горизонта и из нижней полусферы. Набор статистики по этим направлениям потребовал бы нескольких десятков лет. Счастливая возможность использовать в этом эксперименте вместо атмосферных  $\nu_\mu$  пучок нейтрино от ускорителя позволила сократить это время примерно в 20 раз. Результаты в настоящее время обрабатываются и готовятся к публикации.

В другом опыте с использованием детектора LVD (CNGS) мы измерили скорость  $\nu_\mu$  в пучке на пути длиной 732 км от ЦЕРНа до Гран-Сассо. Результат зависит от трёх величин: длины пути, времени старта нейтрино и времени его финиша. Принципиальная неопределённость заложена во времени старта, которое определяется вероятностным характером рождения  $\nu_\mu$  в распадном канале. Для того чтобы повысить точность определения времени старта, в опыте использовались банчи длительностью 3 нс. Синхронизацию измерений в детекторе с этими банчами даёт ЦЕРН. Длину пути определяет геодезическая служба, время финиша мы измеряем сами.

В период с 10 по 24 мая 2012 г. детектором LVD было зарегистрировано 48 мюонных нейтрино со средней энергией 17 ГэВ. Результат этого опыта оказался вполне предсказуемым. На 99 %-ном уровне достоверности получена следующая относительная разница скорости нейтрино и скорости света:  $-3,3 \times 10^{-6} < (v_\nu - c)/c < 3,5 \times 10^{-6}$  [59].

Переходя к обсуждению проблемы Солнца, заметим, что источником энергии Солнца являются термоядерные реакции превращения водорода в гелий, сопровождающиеся интенсивным излучением электронных нейтрино. Первые измерения  $\nu_e$  от Солнца, начатые Р. Дэвисом в 1968 г., продолжались около 20 лет [18; 49, с. 333]. В этих опытах использовался радиохимический детектор  $\nu_e$ , предложенный ещё в 1946 г. Б.М. Понтекорво [60]. Хлорсодержащая жидкость массой 615 т экспонировалась под землёй на глубине  $4,1 \times 10^3$  м.в.э. в условиях сильно сниженного фона от КЛ. Радиоактивные атомы  $^{37}\text{Ar}$ , образованные в реакции  $^{37}\text{Cl}(\nu_e, e^-)^{37}\text{Ar}$ , извлекались из детектора барботированием и закачивались в пропорциональный счётчик, измерявший число атомов  $^{37}\text{Ar}$ , накопившихся за сеанс экспозиции ( $\approx 30$  сут). Авторы приняли все меры, необходимые для обеспечения чистоты результатов опыта. Были быстро установ-

лены два очень важных факта: нейтринное излучение от Солнца действительно существует, но число зарегистрированных  $\nu_e$  оказалось в три раза меньшим, чем ожидалось в соответствии со стандартной солнечной моделью (ССМ). Измерения последующих лет уточняли, но принципиально не меняли результат. Этот опыт являлся чувствительным примерно к 6 % всех  $\nu_e$  от Солнца.

Два других эксперимента с радиохимическими детекторами,  $^{71}\text{Ga}(\nu_e, e^-)^{71}\text{Ge}$ , работавшие в принципе по той же схеме, что и опыт Дэвиса, также показали почти двукратный дефицит нейтринного потока от Солнца по сравнению с предсказаниями ССМ. Это опыты SAGE (Баксанская нейтринная обсерватория) — советско-американский галлиевый эксперимент (Soviet-American Gallium Experiment), В.Н. Гаврин и др., — 50 т  $^{71}\text{Ga}$ ,  $H = 4700$  м.в.э., с 1991 г. — по настоящее время [61, 62], и GNO (Gallium Neutrino Observatory) + GALLEX (Gallium solar neutrino experiment) (международная коллаборация, Гран-Сассо — 30 т  $^{71}\text{Ga}$ ,  $H = 3650$  м.в.э., 1991–2008 гг.) [63]. Благодаря очень низкому энергетическому порогу в реакции  $^{71}\text{Ga}(\nu_e, e^-)^{71}\text{Ge}$  галлиевые опыты чувствительны почти к 100 % излучаемых Солнцем  $\nu_e$ , что очень важно. Идея галлиевого эксперимента высказана в 1964 г. Г.Т. Зацепиным и В.А. Кузьминым [19].

Солнечные нейтрино были также измерены сцинтилляционным детектором Bogerino (международная коллаборация, Гран-Сассо), 300 т псевдокумола,  $H = 3650$  м.в.э., 2007 г. — настоящее время [64, 65]. Благодаря специальным мерам по очистке сцинтиллятора от естественной радиоактивности этот детектор оказался самым чувствительным (порог 0,2 МэВ) из всех приборов, регистрирующих нейтрино по  $\nu_e e^-$ -рассеянию. Измерения подтвердили существование дефицита солнечных нейтрино.

В трёх других опытах солнечные нейтрино были измерены по  $\nu_e e^-$ -рассеянию с помощью черенковских детекторов: упоминавшихся ранее КП (2,14 кт воды) и SuperK (22,5 кт воды) [66, 67], а также детектора SNO (Sudbury Neutrino Observatory), который подробнее рассматривается ниже. Черенковские детекторы измеряют углы траектории регистрируемых заряженных частиц. С учётом резко выраженной угловой анизотропии процесса  $\nu_e e^-$ -рассеяния, эксперименты показали, что частицы действительно приходят от Солнца, как и ожидалось. Большой дефицит  $\nu_e$  в сравнении с потоком  $\nu_e$ , ожидаемым согласно ССМ, сохранился и в этих трёх измерениях.

Дефицит нейтрино, обнаруженный всеми радиохимическими, сцинтилляционными и черенковскими детекторами, общественное мнение склонно было считать проявлением действия осцилляций. Однако все упомянутые выше эксперименты были проведены по схеме исчезновения, и, таким образом, всегда имела принципиальная возможность объяснить дефицит нейтрино коррекцией ССМ либо недоучётом каких-либо расчётных факторов. И в этом смысле очень важным является результат, полученный на детекторе SNO.

Черенковский детектор SNO (Садбери, Онтарио, Канада, А.Б. Мак-Дональд и др.) — 1 кт тяжёлой воды,  $\text{D}_2\text{O}$ ,  $H = 6000$  м.в.э., 1999–2010 гг. [68–70] — измерял солнечные  $\nu_e$  не только по реакции  $\nu_e e^-$ -рассеяния, но и по реакции  $\text{D} + \nu_e \rightarrow 2\text{p} + e^-$ , заряженные токи (CC) и любые типы нейтрино по реакции  $\text{D} + \nu_i \rightarrow \text{p} + \text{n} + \nu_i$ , где  $i = e^-, \mu^-, \tau^-$ , и нейтральные токи (NC). Авторами были приняты специальные меры, позволявшие регистриро-

вать нейтроны, образующиеся в реакциях, по нейтральным токам.

Результаты измерений по СС подтвердили наличие дефицита  $\nu_e$ , в то время как измерения по NC его не обнаружили. Это может указывать на связь дефицита  $\nu_e$  с действием осцилляций.

Однако следует отметить, что в эксперименте SNO с регистрацией нейтронов в реакциях по NC авторы не обсуждают, как они учитывают фон, связанный с быстрыми нейтронами, генерируемыми мюонами КЛ в грунте. Эти нейтроны могли бы в принципе компенсировать дефицит солнечных нейтрино, получаемый при измерении по СС.

Из всего сказанного выше видно, что опыты по регистрации солнечных нейтрино оказались тесно связанными с вопросами изучения нейтринных осцилляций. Здесь следует обратить внимание на то, что основная часть экспериментов, доказывающих существование нейтринных осцилляций и делающих это с большей или меньшей силой убедительности, выполнена по схеме исчезновения. Это касается всех опытов с атмосферными нейтрино, большей части опытов с нейтринным пучком от ускорителя, результатов наблюдений нейтрино от Солнца. Другими словами, мы постоянно пытаемся доказать существование некоего явления на основании того, что мы чего-то не находим. Здесь есть альтернатива: а может быть, просто плохо ищем? Мне всегда казалось, что всё решится, если мы увидим, как один тип нейтрино непосредственно переходит в другой, т.е. речь идёт об опытах по схеме "на появление". На самом деле, доказательства факта присутствия обладают большей силой убедительности, чем доказательства факта отсутствия. Поэтому мне представляется, что успех ждёт тех, кто сумеет убедительно идентифицировать появление  $\tau$ -мезона в своём детекторе. И наличие ядерных эмульсий в эксперименте OPERA может дать ему в этом определённые преимущества.

#### 4. Поиски и регистрация нейтрино от гравитационных коллапсов звёзд

Теория предсказывает, что эволюция массивных звёзд главной последовательности может завершиться гравитационным коллапсом и мощным коротким импульсом нейтринного излучения [71]. В модели стандартного коллапса (МСК) (сферически-симметричная невращающаяся немагнитная звезда) излучаются все типы нейтрино в равных энергетических долях [72]. В этом случае наиболее естественно попытаться зарегистрировать поток электронных антинейтрино по реакции с водородом, имеющей максимальное сечение. Для этого требуется хорошо защищённый от фона космических лучей подземный детектор, содержащий 100 т, а ещё лучше 1000 т, водородосодержащего вещества в качестве мишени для реакции  $\bar{\nu}_e p \rightarrow e^+ n$ . Эффект от коллапса идентифицируется по появлению в течение 20 с статистически редкого сгущения импульсов, регистрируемых детектором. Важным является совпадение эффекта с оптическим наблюдением вспышки сверхновой по времени. Существенно улучшить достоверность результатов позволяет параллельная работа нескольких детекторов, расположенных в разных местах Земного шара.

Исследование нейтринного излучения от коллапса звёзд позволит получить информацию о поведении и свойствах вещества в экстремальных условиях ядерной плотности,

сверхвысоких температур и давлений, мощных гравитационных полей, образовании нейтронных звёзд и чёрных дыр — самых фундаментальных процессах во Вселенной, где результаты экспериментов имеют особую ценность.

С конца 1970-х годов в ИЯИ нами были построены несколько больших подземных скинтилляционных детекторов, способных измерить нейтринное излучение от коллапса: АСД (1977 г.), БПСТ (1978 г.), LSD (1984 г.), LVD (первые 330 т, 1992 г.). Два последних сооружены с участием итальянских коллег в туннеле под Монбланом и туннеле под Гран-Сассо.

23 февраля 1987 г., когда в галактике Большое Магелланово Облако вспыхнула сверхновая SN1987A, работали детекторы БПСТ и LSD. К сожалению, детектор АСД в тот момент был выключен, зато, к счастью, оказались работающими два больших черенковских детектора, КИ и ИМВ, предназначенные для поиска распада протона. Вспышка была очень далёкой, на расстоянии 50 кпк. Поэтому сигналы в детекторах были малы и плохо статистически обеспечены, а схемы интерпрета-

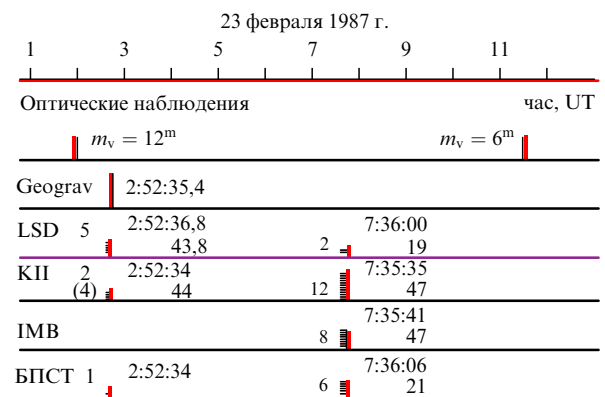


Рис. 4. Временная последовательность событий, зарегистрированных различными детекторами 23 февраля 1987 г. [62]. Для каждого нейтринного детектора по оси ординат условно показано число импульсов в пачке; рядом дано время прихода первого и последнего импульса. ( $m_v$  — видимая звёздная величина,  $6^m$  и  $12^m$  — 6-я и 12-я звёздные величины, Geograv — гравитационная антенна в Риме.)

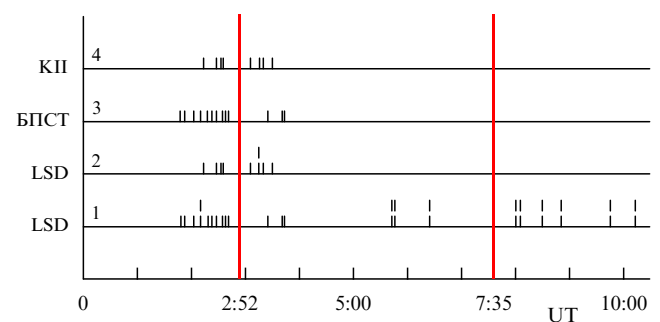


Рис. 5. Временная диаграмма импульсов в БПСТ (линия 3), совпадающих с импульсами в LSD (линия 1) во временном окне 1 с, и аналогичные совпадения для КИ (линия 4) и LSD (линия 2), а также двойные импульсы в LSD (линия 1, временной интервал 5:42–10:13 UT) 23 февраля 1987 г. Средняя частота фоновых совпадений для обоих экспериментов по корреляциям, БПСТ-LSD и КИ-LSD, была измерена в интервале  $23.02.1987 \pm 15$  сут и оказалась приблизительно одинаковой, около  $1 \text{ ч}^{-1}$ . Измеренная средняя частота фоновых двойных импульсов за тот же период равна  $0,275 \text{ ч}^{-1}$ . На рисунке не показаны фон для совпадений вне интервала 1:45–3:45 UT и фон для двойных импульсов вне интервала 5:42–10:43 UT.

ции вызывали вопросы и сомнения. Тем не менее информация, полученная 23 февраля 1987 г., оказалась интересной и поучительной [73–75] (рис. 4, 5).

Прежде всего я хочу обратить внимание на то, что регистрация нейтрино от коллапса SN1987A является выдающимся достижением в экспериментальной нейтринной астрофизике последних лет не только по фундаментальности результата, но и по высокой убедительности самого факта. При анализе данных следует также выделить три аспекта.

1. Относительно регистрации нейтрино от SN1987A детекторами КИ и ИМВ в 7:35 UT (Universal Time) с самого начала сформировалось устойчивое мнение, что результат хорошо подтверждает МСК. Если реализуется МСК, то подавляющее большинство взаимодействий в черенковских детекторах будет вызвано реакцией  $\bar{\nu}_e p \rightarrow e^+ n$ , а энергетический спектр зарегистрированных детектором позитронов должен соответствовать спектру, ожидаемому в этой модели, и служить для неё хорошей доказательной базой. Поэтому, чтобы убедиться в реализации МСК, необходимо показать, что основная часть импульсов вызвана именно реакцией обратного  $\beta$ -распада. Идентифицировать эту реакцию можно было бы по характерному изотропному угловому распределению позитронов в черенковских детекторах. Однако опыт показал резкую анизотропию частиц в КИ и ИМВ. Вероятность получить наблюдаемую в опыте степень анизотропии суммы импульсов КИ и ИМВ из-за флуктуаций не превышает 2%. Примерно этой же величиной следует оценить шансы того, что результат КИ и ИМВ подтверждает МСК для SN1987A. Как мы видим, эти шансы невысоки. Поэтому использовать основные параметры МСК в качестве единственно правильного шаблона при анализе эксперимента с SN1987A недопустимо.

2. Эффект, измеренный в 2:52 UT в детекторе LSD, является совершенно необъяснимым в МСК. Этот эффект получил интерпретацию в модели, учитывающей вращение ядра звезды. Данная модель была сконструирована В.С. Имшенником, чтобы получить механизм сброса оболочки на заключительном этапе эволюции массивных звёзд главной последовательности [76], и названа им моделью вращающегося коллапсара (МВК). Эта модель предсказывает возможность двустадийного коллапса. На первой стадии излучаются в основном электронные нейтрино со средними энергиями 30–40 МэВ, а на второй — все типы нейтрино, как и в МСК, со средними энергиями 10–15 МэВ.

3. Данные, представленные на рис. 5, касающиеся корреляции отдельных импульсов в различных парах нейтринных детекторов между собой и двойных импульсов в LSD, пока не нашли объяснения в рамках современных моделей.

Комментируя результаты, представленные на рис. 4 и 5, отметим, что эффекты во всех детекторах в момент около 7:35 UT, без сомнения, связаны со вспышкой сверхновой. Они совпали по времени между собой с точностью до минуты, а также с оптическими наблюдениями сверхновой в пределах нескольких часов. Это утверждение в основном касается детекторов КИ и ИМВ, в которых эффекты заметны, а вероятность имитации фоном ничтожна. Эффекты в LSD и БПСТ в это время соответствуют в пределах статистической точности эффектам КИ и ИМВ с учётом разницы в массах водорода.

Основная интрига эксперимента связана с LSD. В 2:52 UT детектор LSD зарегистрировал серию из пяти импульсов, пришедших в течение 7 с. Эта серия, очевидно, не была вызвана реакцией  $\bar{\nu}_e p$ , иначе в детекторе КИ в это время был бы зарегистрирован сигнал из 50 импульсов. Тот факт, что в 2:52 UT в трёх других детекторах значимого сигнала не было, никак не компрометирует сигнал в LSD. Данный факт означает лишь следующее: LSD зарегистрировал то, что не был способен зарегистрировать ни один из трёх других детекторов. Это связано с наличием в составе LSD 200 т железа и регистрацией электронных нейтрино по реакции  $\nu_e + {}^{56}\text{Fe} \rightarrow e^- + {}^{56}\text{Co}^* \rightarrow e^- + {}^{56}\text{Co} + \gamma$ , а также с тем, что большие сцинтилляционные танки LSD эффективно регистрируют вторичные продукты взаимодействия в железе, выходящие в сцинтиллятор. Всё это подробно обсуждается в работах [74, 77], где показано, что нет никаких оснований считать эффект в 2:52 UT в LSD игрой статистики или помехой. Эффект — очень качественный, безусловно, связанный со вспышкой SN1987A и устойчивый в отношении принятых в настоящее время схем нейтринных осцилляций.

Что касается результатов работ, в которых изучались совпадения во временном окне длительностью около 1 с между импульсами для различных пар детекторов, LSD–БПСТ и LSD–КИ, и двойные импульсы в LSD (см. рис. 5), то в этих опытах был обнаружен статистически обеспеченный избыток совпадений и двойных импульсов. Следует обратить внимание на то, что избыток совпадений концентрируется во время, близкое к 2:52 UT, а избыток двойных импульсов — в 7:35 UT. Вероятность того, что такое могло произойти случайно, чрезвычайно мала. Это свидетельство генетической связи обсуждаемых эффектов со вспышкой сверхновой.

Напомним, что 2:52 UT и 7:35 UT — два ключевых момента в эволюции SN1987A, которые отмечены нейтринными сигналами в LSD (2:52 UT) и в трёх других детекторах (в 7:35 UT). И если нейтринные сигналы в КИ, ИМВ и БПСТ как бы подтверждали друг друга, то нейтринный сигнал в LSD был одинок, как перст, что до сих пор вызывает недоумение и порождает скепсис в отношении этого эффекта. В связи с этим особое значение приобретает тот факт, что избыток совпадений импульсов для всех сочетаний пар детекторов группируется именно вблизи момента 2:52 UT — "времени LSD", а избыток двойных импульсов в LSD группируется около 7:35 UT — "времени КИ".

Видно, что регистрация нейтринного излучения от SN1987A породила вопросы, многие из которых до сих пор не имеют ответов. И эти ответы можно надеяться получить при регистрации нейтрино от следующих коллапсов.

Основные детекторы, которые участвуют в современной службе поиска нейтрино от звёздных коллапсов (см. таблицу), чувствительны не только к  $\bar{\nu}_e$ , но и к нейтрино других типов, прежде всего к электронным нейтрино, излучаемым на первой стадии коллапса в модели вращающегося коллапсара.

Большой мегатонный детектор IceCube (США) [78],  $H = 1450\text{--}2450$  м.в.э., расположенный на Южном полюсе, регистрирует черенковское излучение в 1000-метровом слое льда с помощью замороженных в него ФЭУ. IceCube является очень чувствительным и хорошо осуществляет мониторинг ситуации, однако не даёт информа-

**Таблица.** Основные детекторы в современной службе поиска нейтрино от звёздных коллапсов

Детектор	Страна *	Масса и тип мишени	Число $N_{\bar{\nu}_e}$ (МСК)**	Число $N_{\nu_e}$ (МБК)***
АСД	Россия	0,1 кт ЖС, 1 кт NaCl	57	44
БПСТ	Россия	0,2 кт ЖС, 0,16 кт Fe	67	8
KamLAND	Япония, США	1 кт ЖС	500	180
Borexino	Италия	0,3 кт ЖС	120	60
LVD	Россия, Италия	1 кт ЖС, 1 кт Fe	500	410
SuperK	Япония, США	22,5 кт H <sub>2</sub> O	9400	650

\* Страна (страны), осуществившая разработку и сооружение детектора.

\*\* Число регистрируемых электронных антинейтрино согласно МСК.

\*\*\* Число регистрируемых электронных нейтрино для первой стадии коллапса согласно МБК при условии вспышки сверхновой типа SN1987A в центре Галактики.

ции о деталях нейтринной вспышки. Он может быть полезен при совместной работе с детекторами, указанными в таблице<sup>1</sup>.

Выше мы обсуждали, как важно иметь способ идентифицировать реакцию обратного  $\beta$ -распада. Для этого детектор должен быть способен регистрировать не только  $e^+$ , но и  $p$ . Это возможно в детекторах LVD, Borexino, KamLAND, АСД.

Нейтрино всех типов с энергией более чем 15 МэВ могут быть измерены АСД, БПСТ, LVD, Borexino, KamLAND в реакциях по нейтральным токам из-за присутствия  $^{12}\text{C}$  в сцинтилляторе.

Электронные нейтрино в настоящий момент могут быть надёжно зарегистрированы только АСД и LVD. В первом — благодаря наличию соли NaCl вокруг него, во втором — благодаря наличию в его структуре 1000 т Fe.

## 5. Заключение

В завершение хотелось бы обратить внимание читателя на следующее.

1. Изучение редких событий требует тщательного анализа фона в подземной лаборатории. Имитации, вызванные неконтролируемым фоном, часто обесценивают результаты эксперимента.

2. Мне кажется, что успех в опытах по изучению нейтринных осцилляций придёт при решительном переходе от схемы "на исчезновение" к схеме "на появление".

3. Поиском источников нейтрино высокой энергии на протяжении последних 20 лет занимается, используя различные методы наблюдения, около десяти групп. Несмотря на все усилия, ни одного источника нейтрино высокой энергии пока не обнаружено.

4. Эксперименты по регистрации нейтрино от Солнца и от звёздных коллапсов имеют много общих черт. Прежде всего, и в тех и в других экспериментах убедительно установлен факт регистрации нейтрино. В обоих случаях экспериментальный результат не согласуется с предсказаниями моделей. В обоих случаях нельзя исклю-

чить, что коррекция моделей может снять противоречия. Эксперименты в этих направлениях имеют ясные перспективы и являются приоритетными в экспериментальной нейтринной астрофизике.

Автор благодарит И.Р. Шакирьянову и Н.Ю. Агафонову за помощь в подготовке статьи к публикации.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований РАН (грант № 12-02-00213-а, 12-02-12127\_офи\_м), научной школы НШ-871.2012.2 и программы фундаментальных исследований Президиума РАН "Фундаментальные свойства материи и астрофизика".

## Список литературы

1. Pacini D *Nuovo Cimento* VI 3 93 (1912)
2. Myssowsky L, Tuwim L Z. *Phys.* **39** 146 (1926)
3. Neddermeyer S H, Anderson C D *Phys. Rev.* **51** 884 (1937)
4. Neddermeyer S H, Anderson C D *Phys. Rev.* **54** 88 (1938)
5. Wilson V C *Phys. Rev.* **53** 337 (1938)
6. Clay J, v. Gemert A *Physica* **6** 497 (1939)
7. Bollinger L M *Phys. Rev.* **79** 207 (1950)
8. Randall C A, Hazen W E *Phys. Rev.* **81** 144 (1951)
9. Avan L, Avan M C.R. *Acad. Sci. Paris* **241** 1122 (1955)
10. Castagnoli C et al. *Nuovo Cimento* **35** 969 (1965)
11. Markov M A, in *Proc. of the Tenth Annual Intern. Rochester Conf. on High-Energy Physics, 1960* (Eds E C G Sudarshan, J H Tinlot, A C Melissinos) (New York: Interscience, 1960) p. 578
12. Зацепин Г Т, Кузьмин В А *ЖЭТФ* **41** 1818 (1961) [Zatsepin G T, Kuz'min V A *Sov. Phys. JETP* **14** 1294 (1962)]
13. Зацепин Г Т и др. *Изв. АН СССР Сер. физ.* **51** 738 (1962)
14. Menon M G K et al. *Proc. Phys. Soc.* **90** 649 (1967)
15. Reines F *Proc. R. Soc. Lond. A* **301** 125 (1967)
16. Койфель Д, в сб. *Труды международного семинара по физике нейтрино и нейтринной астрофизике* (М.: ФИАН СССР, 1969) с. 3
17. Волкова Л В, Зацепин Г Т, Препринт (М.: ФИАН, 1969)
18. Davis R (Jr.), Harmer D S, Hoffman K C *Phys. Rev. Lett.* **20** 1205 (1968)
19. Kuzmin V, Zatsepin G, in *Proc. of the 9 Intern. Conf. of Cosmic Ray, London, UK, 1965*, Vol. 2 (Ed. A Stichland) (London: Institute of Physics and the Physical Society, 1966) p. 1023
20. Ryazhskaya O, Zatsepin G, in *Proc. of the 9 Intern. Conf. of Cosmic Ray, London, UK, 1965*, Vol. 2 (Ed. A Stichland) (London: Institute of Physics and the Physical Society, 1966) p. 987
21. Безруков Л Б и др. *ЯФ* **17** 98 (1973) [Bezrukov L B et al. *Sov. J. Nucl. Phys.* **17** 51 (1973)]
22. Безруков Л Б и др. *ЯФ* **28** 1548 (1978)
23. Еникеев Р И и др. *Изв. АН СССР Сер. физ.* **46** 1847 (1982)
24. Мальгин А С и др. *Письма в ЖЭТФ* **36** 308 (1982) [Malygin A S et al. *JETP Lett.* **36** 376 (1982)]
25. Dadykin V L et al. *Nuovo Cimento* **C 9** 271 (1986)
26. Aglietta M et al. *Nuovo Cimento* **C 12** 467 (1989)

<sup>1</sup> История открытия и исследования космических лучей отражена на страницах *УФН* как в обзорах классиков в этой области физики [79–83], так и в недавних публикациях, посвящённых 100-летию С.Н. Вернова [84–86], а также в планируемых к публикации в следующем номере *УФН* материалах сессии Отделения физических наук РАН, посвящённой Д.В. Скобельцыну. (Примеч. ред.)



27. Еникеев Р И и др. *ЯФ* **46** 1492 (1987) [Enikeev R I et al. *Sov. J. Nucl. Phys.* **46** 883 (1987)]
28. Hirata K S et al. *Phys. Lett. B* **280** 146 (1992)
29. Alexeyev E N et al., in *Proc. of the 16th Intern. Cosmic Ray Conf., Kyoto, Japan, 1979* Vol. 10 (Ed. S Miyake) (Tokyo: Institute for Cosmic Ray Research, Univ. of Tokyo, 1979) p. 282
30. Воеводский А В, Дадькин В Л, Рязжская О Г *ПТЭ* (1) 85 (1970)
31. Дадькин В Л "К истории сооружения Басканского подземного скантillationонного телескопа", Препринт № 1297/2011 (М.: ИЯИ РАН, 2011)
32. Korchagin P V et al., in *Proc of the 16th Intern. Cosmic Ray Conf., Kyoto, Japan, 1979* Vol. 10 (Ed. S Miyake) (Tokyo: Institute for Cosmic Ray Research, Univ. of Tokyo, 1979) p. 299
33. Badino G et al. *Nuovo Cimento C* **7** 573 (1984)
34. Aglietta M et al. *Nuovo Cimento A* **105** 1793 (1992)
35. Aglietta M et al. (LVD Collab.), in *Proc. of 27th Intern. Cosmic Ray Conf., Hamburg, Germany, 2001* Vol. 3 (Hamburg: Copernicus Gesellschaft, 2001) p. 1093
36. Rhode W et al. *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.* **35** 250 (1994)
37. Rhode W et al. (Fréjus Collab.) *Astropart. Phys.* **4** 217 (1996)
38. Aglietta M et al. (NUSEK Collab.) *Europhys. Lett.* **8** 611 (1989)
39. Goodman M C et al. *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.* **38** 337 (1995)
40. Goodman M C et al., in *Proc. of the 26th Intern. Cosmic Ray Conf., Salt Lake City, Uta, USA, 1999* Vol. 2 (Eds D Kieda, M Salamon, B Dingus) (Melville, N.Y.: AIP, 2000) p. 151
41. Ahlen S et al. (MACRO Collab.) *Phys. Rev. D* **46** 4836 (1992)
42. Becker-Szendy R et al. *Phys. Rev. D* **46** 3720 (1992)
43. Fukuda Y et al. (Super-Kamiokande Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **81** 1562 (1998)
44. Bugaev E V et al. *Phys. Rev. D* **58** 054001 (1998)
45. Aglietta M et al. (The LVD Collab.) *ЯФ* **66** 125 (2003) [*Phys. Atom. Nucl.* **66** 123 (2003)]
46. Зацепин Г Т и др. *ЯФ* **49** 426 (1989) [Zatsepin G T et al. *Sov. J. Nucl. Phys.* **49** 266 (1989)]
47. Ryazhskaya O G *Nuovo Cimento C* **19** 655 (1996)
48. Понтекорво Б М *ЖЭТФ* **34** 247 (1958) [Pontecorvo B M *Sov. Phys. JETP* **7** 172 (1958)]
49. Bahcall J N *Neutrino Astrophysics* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1989) [Бакал Дж *Нейтринная астрофизика* (М.: Мир, 1993) с. 104]
50. Михеев С П, Смирнов А Ю *УФН* **153** 3 (1987) [Mikheev S P, Smirnov A Yu *Sov. Phys. Usp.* **30** 759 (1987)]
51. Bilenky S M, Fabbrichesi M, Petcov S T *Phys. Lett. B* **276** 223 (1992)
52. Aliu E et al. (K2K Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **94** 081802 (2005)
53. Acquafredda R et al. *JINST* **4** P04018 (2009)
54. Pietropaolo F (ICARUS Collab.), in *14th Intern. Workshop on Neutrino Telescopes, Venezia, Italy, 2010* (Ed. M Mezzetto) p. 87
55. Adamson P et al. (MINOS Collab.) *Phys. Rev. D* **77** 072002 (2008)
56. Adamson P et al. (MINOS Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **107** 011802 (2011)
57. Агафонова Н Ю и др. *Изв. РАН Сер. физ.* **75** 456 (2011) [Agafonova N Yu et al. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **75** 427 (2011)]
58. Abe K et al. (Super-Kamiokande Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **97** 171801 (2006)
59. Agafonova N Yu et al. (LVD Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **109** 070801 (2012)
60. Pontecorvo B, Chalk River Report PD-205 (Chalk River: Chalk River Laboratories, 1946)
61. Abdurashitov J N et al. (SAGE Collab.) *Phys. Rev. C* **59** 2246 (1999)
62. Abdurashitov J N et al. *Phys. Rev. C* **73** 045805 (2006)
63. Altmann M et al. (GNO Collab.) *Phys. Lett. B* **490** 16 (2000)
64. Bellini G et al. (Borexino Collab.) *Phys. Lett. B* **687** 299 (2010)
65. Bellini G et al. (Borexino Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **107** 141302 (2011)
66. Hosaka J et al. (Super-Kamiokande Collab.) *Phys. Rev. D* **73** 112001 (2006)
67. Abe K et al. (Super-Kamiokande Collab.) *Phys. Rev. D* **83** 052010 (2011)
68. Aharmim B et al. (SNO Collab.) *Phys. Rev. C* **75** 045502 (2007)
69. Aharmim B et al. (SNO Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **101** 111301 (2008)
70. Aharmim B et al. (SNO Collab.) *Phys. Rev. C* **81** 055504 (2010)
71. Зельдович Я Б, Гусейнов О Х *ДАН СССР* **162** 791 (1965) [Zel'dovich Ya B, Guseinov O Kh *Sov. Phys. Dokl.* **10** 524 (1965)]
72. Имшенник В С, Надёжин Д К *УФН* **156** 561 (1988); Imshennik V S, Nadezhin D K *Sov. Sci. Rev. E Astrophys. Space Phys.* **8** (1) 1 (1989)
73. Дадькин В Л, Зацепин Г Т, Рязжская О Г *УФН* **158** 139 (1989) [Dadykin V L, Zatsepin G T, Ryazhskaya O G *Sov. Phys. Usp.* **32** 459 (1989)]
74. Рязжская О Г *УФН* **176** 1039 (2006) [Ryazhskaya O G *Phys. Usp.* **49** 1017 (2006)]
75. Дадькин В Л, Рязжская О Г *Письма в Астрон. журн.* **35** 427 (2009) [Dadykin V L, Ryazhskaya O G *Astron. Lett.* **35** 384 (2009)]
76. Imshennik V S *Space Sci. Rev.* **74** 325 (1995)
77. Дадькин В Л, Рязжская О Г *Письма в Астрон. журн.* **34** 643 (2008) [Dadykin V L, Ryazhskaya O G *Astron. Lett.* **34** 581 (2008)]
78. Gaisser T K, in *14th Intern. Workshop on Neutrino Telescopes, Venezia, Italy, 2010* (Ed. M Mezzetto) p. 349
79. Вернов С Н *УФН* **14** 120 (1934)
80. Вернов С Н и др. *УФН* **63** 131 (1957)
81. Вернов С Н и др. *УФН* **63** 149 (1957)
82. Вернов С Н, Чудаков А Е *УФН* **70** 585 (1960) [Vernov S N, Chudakov A E *Sov. Phys. Usp.* **3** 230 (1960)]
83. Вернов С Н, Добротин Н А *УФН* **123** 531 (1977) [Vernov S N, Dobrotin N A *Sov. Phys. Usp.* **20** 970 (1977)]
84. Панасюк М И *УФН* **181** 197 (2011) [Panasyuk M I *Phys. Usp.* **54** 190 (2011)]
85. Стожков Ю И, Базилевская Г А *УФН* **181** 218 (2011) [Stozhkov Yu I, Bazilevskaya G A *Phys. Usp.* **54** 210 (2011)]
86. Бережко Е Г, Крымский Г Ф *УФН* **181** 223 (2011) [Berezhko E G, Krymsky G F *Phys. Usp.* **54** 215 (2011)]

PACS numbers: 95.55.Vj, 95.85.Ry, 98.70.Sa  
DOI: 10.3367/UFNr.0183.201303i.0323

## Космические частицы с энергиями выше $10^{19}$ эВ: краткий обзор результатов

С.В. Троицкий

### 1. Введение

Интерес к природе космических лучей сверхвысоких (более  $10^{19}$  эВ) энергий (КЛСВЭ) со стороны исследователей, работающих как в физике элементарных частиц, так и в астрофизике, не ослабевает на протяжении десятилетий. Вопросы, возникавшие в этой области, были связаны с происхождением частиц столь высоких энергий, ни при каких других условиях не зарегистрированных в природе, и с поиском новой физики, которая может проявляться в этом энергетическом диапазоне и определять отклонения экспериментальных результатов от теоретических ожиданий. Как мы увидим ниже, эти две группы вопросов сохраняют актуальность и во многом определяют развитие исследований на стыке физики элементарных частиц и астрофизики и в наши дни.

Изучение физики КЛСВЭ ограничено двумя основными трудностями, связанными со спецификой исследуемых явлений. Во-первых, поток таких космических частиц очень мал (в среднем за год на  $1 \text{ км}^2$  попадает одна частица с указанной энергией). Малость потока означает невозможность непосредственной регистрации первичных частиц, взаимодействующих в верхних слоях атмосферы, с помощью летающих детекторов и, как следствие, предопределяет косвенный характер их исследования наземными установками, которые регистрируют широкие атмосферные ливни (ШАЛ), вызванные этими частицами. Более того, даже большие наземные установки, работающие на протяжении многих лет, набирают число событий, пренебрежимо малое по сравнению, например, с числом фотонов астрофизического

С.В. Троицкий. Институт ядерных исследований РАН, Москва, РФ  
E-mail: st@inr.ac.ru