

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 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 аэронавтики 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. Железых [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

(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 (ν) — слабо взаимодействующая частица — регистрируется либо по измерению продуктов взаимодействия с ядрами, либо по νe^- -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. Рязской [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 π -мезонов, χ — 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. Рязской 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 —

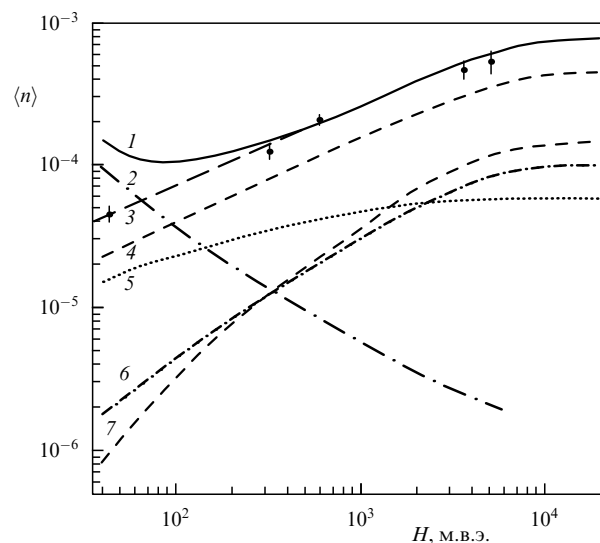


Рис. 1. Количество генерируемых медленных нейтронов в 1 г см^{-2} грунта в расчёте на один мюон в зависимости от глубины. 1 — полное число нейтронов, рождённых во всех процессах; 2 — число нейтронов, образованных при захвате μ^- ; 3 — число нейтронов, рождённых во всех процессах, за исключением μ^- -захвата; 4 — число нейтронов, генерируемых виртуальными фотонами с учётом ядерных ливней; 5–7 — число нейтронов, генерируемых фотонами электромагнитных ливней, индуцированных δ -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 π -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-

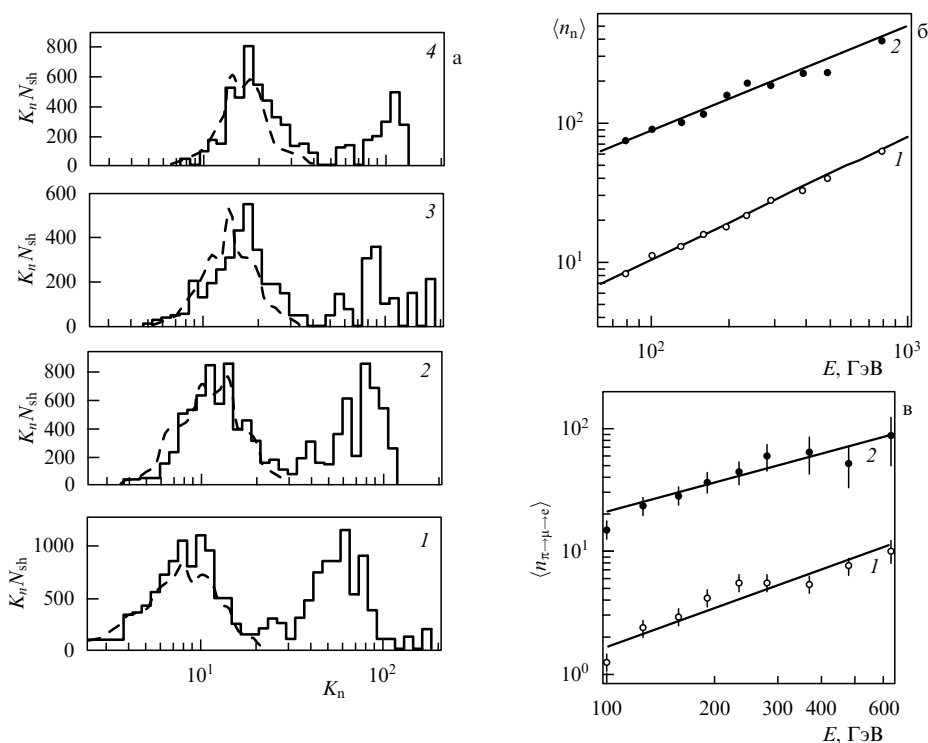


Рис. 2. (а) Зависимость числа ливней N_{sh} от количества нейтронов, зарегистрированных в них, полученная на детекторе АСД. K_n — множественность нейтронов. Гистограммы — экспериментальные результаты. Штриховые кривые — результаты расчёта методом Монте-Карло. 1 — $\Delta E = 90-115$ ГэВ, 2 — $\Delta E = 145-170$ 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 π - 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].

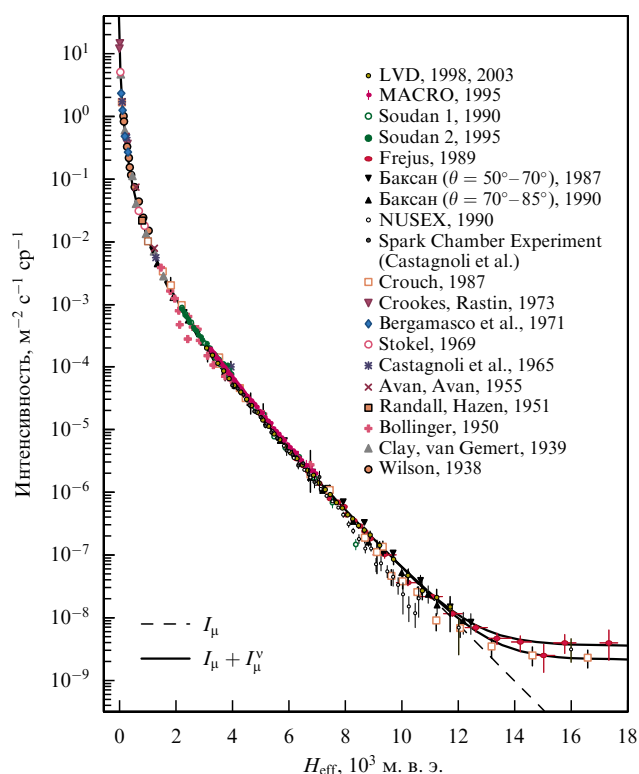


Рис. 3. Зависимость интенсивности мюонов от эффективной глубины грунта H_{eff} [44, 45].

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 ν_μ и электронные ν_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 ν_μ и ν_e .

Полученный результат сравнивается с расчётом. Экспериментаторы представляли результаты в виде двойного отношения числа зарегистрированных ν_μ и ν_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 ν_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 ν_e , могут быть имитированы обсуждавшимися выше фонами ядерно-активных частиц, генерируемых вблизи детектора. Главную опасность здесь представляют изолированные нейтроны с энергией более 400 МэВ, которые легко преодолевают несколько метров защиты и могут дать в детекторе каскад, похожий на регистрацию ν_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 ν_μ 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, τ -мезонов, произвести которые пучок ν_μ от ускорителя в отсутствие осцилляций никак не мог бы. В последнее время сообщалось о наблюдении τ -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 ν_μ 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 ν_μ 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 ν_μ 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 ν_μ 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 разность 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 ν_e от Солнца, начатые Р. Дэвисом в 1968 г., продолжались около 20 лет [18; 49, с. 333]. В этих опытах использовался радиохимический детектор ν_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}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}Ar , накопившихся за сеанс экспозиции (≈ 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 ν_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 ν_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}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}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 ν_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 Borexino (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 ν_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 КИ (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 ν_e в сравнении с потоком ν_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, D_2O , $H = 6000$ м.в.э., 1999–2010 гг. [68–70] — измерял солнечные ν_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 ν_e , в то время как измерения по NC его не обнаружили. Это может указывать на связь дефицита ν_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 τ -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 сцинтилляционных 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, КЛ и IMB, 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-

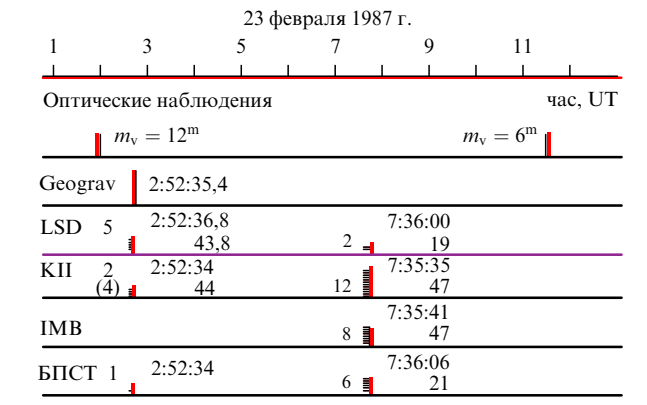


Рис. 4. Временная последовательность событий, зарегистрированных различными детекторами 23 февраля 1987 г. [62]. Для каждого нейтринного детектора по оси ординат условно показано число импульсов в пакете; рядом дано время прихода первого и последнего импульса. (m_v — видимая звёздная величина, 6^m и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

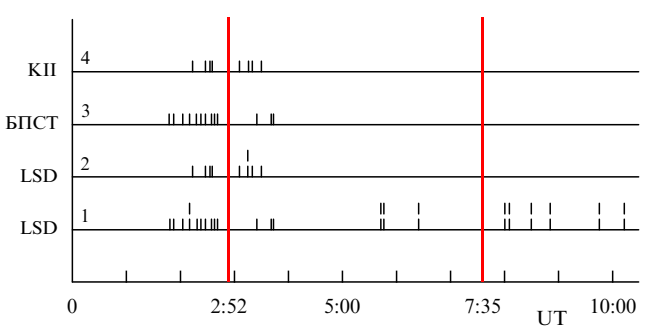


Рис. 5. Временная диаграмма импульсов в БПСТ (линия 3), совпадающих с импульсами в LSD (линия 1) во временном окне 1 с, и аналогичные совпадения для КП (линия 4) и LSD (линия 2), а также двойные импульсы в LSD (линия 1, временной интервал 5:42–10:13 UT) 23 февраля 1987 г. Средняя частота фоновых совпадений для обоих экспериментов по корреляциям, БПСТ-LSD и КП-LSD, была измерена в интервале $23.02.1987 \pm 15$ сут и оказалась приблизительно одинаковой, около 1 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 KII и IMB 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 β -распада. Идентифицировать эту реакцию можно было бы по характерному изотропному угловому распределению позитронов в черенковских детекторах. Однако опыт показал резкую анизотропию частиц в KII и IMB. Вероятность получить наблюдаемую в опыте степень анизотропии суммы импульсов KII и IMB из-за флуктуаций не превышает 2%. Примерно этой же величиной следует оценить шансы того, что результат KII и IMB 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 KII и IMB, в которых эффекты заметны, а вероятность имитации фоном ничтожна. Эффекты в LSD и БПСТ в это время соответствуют в пределах статистической точности эффектам KII и IMB 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 KII 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–KII, 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 KII, IMB 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 KII".

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 вмороженных 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_{ν_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 ₂ 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 таблице¹.

Выше мы обсуждали, как важно иметь способ идентифицировать реакцию обратного β -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}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.), Harner 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)

¹ 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, Дадыкин В Л, Рязская О Г *ПТЭ* (1) 85 (1970)
31. Дадыкин В Л "К истории сооружения Басканского подземного сцинтилляционного 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. Дадыкин В Л, Зацепин Г Т, Рязская О Г *УФН* **158** 139 (1989) [Dadykin V L, Zatsepin G T, Ryazhskaya O G *Sov. Phys. Usp.* **32** 459 (1989)]
74. Рязская О Г *УФН* **176** 1039 (2006) [Ryazhskaya O G *Phys. Usp.* **49** 1017 (2006)]
75. Дадыкин В Л, Рязская 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. Дадыкин В Л, Рязская 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) [Berezko 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 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

происхождения, регистрируемых телескопами в любом другом диапазоне энергий. Во-вторых, взаимодействие частиц с атмосферой происходит при энергиях, которые недоступны лабораторному изучению (для протона с энергией 10^{19} эВ, взаимодействующего с покоящимся нуклоном в атмосфере, энергия в системе центра масс составляет несколько сотен ТэВ), поэтому модели, с помощью которых характер развития атмосферного ливня связывается со свойствами первичной частицы, с неизбежностью включают в себя экстраполяцию свойств взаимодействия в неизученную область энергий (и переданных импульсов).

С точки зрения экспериментальной техники, активно работающие сегодня установки, регистрирующие ШАЛ, подразделяются на наземные решётки (НР) детекторов и флуоресцентные телескопы (ФТ). Наземная решётка детекторов регистрирует частицы в ливне на уровне земли. Детекторы образуют сетку с шагом порядка 1 км, что позволяет определять функцию пространственного распределения плотности частиц в ливне. Флуоресцентный детектор представляет собой телескоп, фиксирующий ультрафиолетовое излучение, вызванное флуоресценцией молекул атмосферного азота, возбуждённых заряженными частицами в ливне. НР регистрирует только двумерный срез ШАЛ, но работает вне зависимости от погоды и времени суток и детектирует (а в принципе и позволяет разделять) различные компоненты ливня (электромагнитную, мюонную, барионную). ФТ видит картину продольного развития ливня, но может регистрировать события только в ясные безлунные ночи, что составляет около 10 % от полного времени работы, и является чувствительным только к электромагнитной компоненте ШАЛ. При этом НР регистрирует в основном периферийную часть ливня, а ФТ — центральный ствол (рис. 1).

В настоящее время в мире работают три эксперимента, которые способны изучать ШАЛ, вызванные частицами с энергиями свыше 10^{19} эВ. Эти эксперименты очень различны, и у каждого из них есть свои сильные и слабые стороны.

Якутская комплексная установка ШАЛ, работающая уже более 40 лет, сейчас имеет эффективную площадь НР пластиковых сцинтилляторов около 10 км², что по современным масштабам совсем немного. Основным до-

стоинством этой установки является возможность одновременной регистрации различных компонент ШАЛ. Это единственная современная установка, предоставляющая данные мюонных детекторов с достаточно большой экспозицией; также данные крайне полезны при анализе состава первичных частиц и проверке моделей взаимодействия частиц при высоких энергиях.

Экспериментальная установка в США (штат Юта) *Telescope Array* (ТА), эксплуатируемая международной коллаборацией, в состав которой входят и российские учёные, включает в себя НР пластиковых сцинтилляторов площадью ≈ 680 км² и три ФТ. Существенным преимуществом данной установки является возможность её работы в гибридном режиме — одновременной регистрации одного и того же ШАЛ с помощью как НР, так и ФТ, причём реконструкция события может проводиться независимо двумя способами (в том числе для ФТ — в стереорежиме).

Крупнейший современный эксперимент в физике КЛСВЭ — международный эксперимент *Обсерватория им. Пьера Оже* (Pierre Auger cosmic ray Observatory — РАО) в Аргентине — имеет НР площадью ≈ 3000 км², что делает РАО бесспорным лидером в экспозиции, и четыре ФТ. РАО также может работать в гибридном режиме, однако независимая от НР реконструкция событий с помощью ФТ не производится, в частности отсутствует стереорекострукция. Можно также сомневаться в удачности выбора водных баков в качестве детекторных станций НР — такие детекторы имеют повышенную чувствительность к мюонной компоненте ШАЛ, которая менее других изучена и хуже моделируется; это иногда приводит к увеличению систематических неопределённостей.

Как и завершившие работу эксперименты прошлых лет, эти установки нередко дают не вполне согласующиеся между собой результаты. Примечательно, что в 2012 г. для обсуждения результатов и устранения противоречий были созданы рабочие группы, включающие в себя представителей всех трёх работающих экспериментов. Первые результаты работы этих групп обсуждались на конференции в ЦЕРНе весной 2012 г.; мы будем во многом опираться на них в разделе 3.

2. Основные наблюдаемые

В этом разделе мы определим основные связанные с КЛСВЭ наблюдаемые, относящиеся как к индивидуальным ШАЛ, так и к совокупности данных. Эта информация понадобится нам для обсуждения экспериментальных результатов в разделе 3. Независимо от способа регистрации ШАЛ, в результате обработки "сырых" данных извлекается информация о нескольких основных характеристиках первичной частицы: её типе, энергии и направлении прихода.

Направление прихода. Наименее подверженная модельной зависимости наблюдаемая величина, реконструируемая по атмосферному ливню, — это направление прихода первичной частицы, которое определяется геометрически. Наземные детекторы восстанавливают направление прихода по времени срабатывания отдельных детекторных станций, на которые фронт ливня, движущийся со скоростью, близкой к скорости света, прибывает неодновременно. ФТ непосредственно фиксирует положение содержащей ствол ливня плоскости,

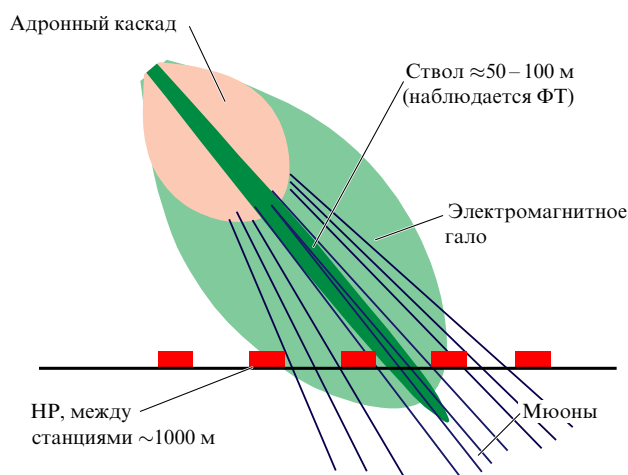


Рис. 1. Схема развития ШАЛ и его регистрации.

проходящей через детектор; в стереорежиме положение ствола в пространстве находится как пересечение двух таких плоскостей; при наблюдениях одним телескопом учитывается временная развёртка сигнала. Точность геометрической реконструкции НР зависит не только от точности измерения времени, но и от числа сработавших станций; в случае ФТ определяющим является расстояние от телескопа до оси ливня. На практике точность определения направления прихода уменьшается с возрастанием эффективной площади детектора — станции НР располагаются реже, а ФТ просматривают больший объём атмосферы. Лучшее угловое разрешение (направления прихода 68 % событий восстанавливались с точностью не хуже, чем $0,6^\circ$) было достигнуто в эксперименте прошлого поколения HiRes¹ (ФТ в стереорежиме). Для современных экспериментов с большой эффективной площадью эта величина составляет $\sim 1,5^\circ$.

Энергия. Энергия первичной частицы восстанавливается косвенными методами. В случае НР сигнал регистрируется каждым отдельным детектором, а затем пространственное распределение сигнала сравнивается с ожидаемым. Такая процедура определения энергии, естественно, привносит значительную неопределённость, связанную с моделированием ожидаемого сигнала для разных энергий. ФТ наблюдают ствол ливня, частицы в котором несут основную часть энергии; этот метод позволяет оценить полную энергию электронов и позитронов в стволе на основе измерений, в связи с чем метод часто называется калориметрическим. Следует отметить, что остаются значительные источники неопределённости, связанные как с величиной выхода флуоресцентного света, так и с оценкой энергии, которая не содержится в электронах ствола ливня. Во всех случаях дополнительным источником неопределённости (статистической) являются флуктуации в первых взаимодействиях частиц в атмосфере. Энергия конкретной первичной частицы сейчас оценивается со статистической ошибкой $\approx (15-20)\%$ и систематической неопределённостью $\approx 25\%$.

Тип первичной частицы. Вследствие значительных флуктуаций в развитии ШАЛ, вызванных одними и теми же первичными частицами, а также из-за схожести между собой характеристик ливней, вызванных разными частицами, определение типа исходной частицы для отдельно взятого события сегодня, как правило, не представляется возможным. Подходы к решению этой задачи основаны на изучении отдельных компонент ШАЛ (электрон-фотонная, мюонная, адронная, черенковское излучение и т.д.) и детальных характеристик продольного и/или поперечного развития ливня (глубина максимального развития, форма фронта и т.д.). Даже вероятностные оценки, получаемые этими методами, сильно зависят от используемой модели.

Наблюдаемые ансамбли ШАЛ. Три основных характеристики, определяемые для индивидуального события, позволяют проанализировать ансамбль ливней и получить статистическую информацию о свойствах КЛСВЭ: составе первичных частиц, энергетическом спектре и распределении направлений прихода. При анализе последнего ищутся отклонения от изотропного распределения на больших (глобальная анизотропия) или малых (кластеры; совпадения с возможными источниками) угловых

масштабах. Результаты этих исследований обсуждаются в разделе 3.

3. Обзор экспериментальных результатов

3.1. Оценка энергии и спектр

Энергетические спектры КЛСВЭ, измеренные различными экспериментами, приведены на рис. 2а. Определение спектра космических лучей, основанное на абсолютном измерении энергии первичных частиц по вызванным ими атмосферным ливням, а для флуоресцентных детекторов — ещё и на детальном компьютерном моделировании экспозиции, не может быть проведено произвольно, независимым образом. С целью устранения произвола, связанного с выбором моделей, и подавления систематических ошибок в работе [1] было предположено, что причина различия спектров, построенных по данным разных экспериментов, состоит в не зависящей от энергии систематической ошибке определения энергии для каждого эксперимента. Это предположение косвенно подтверждается наличием систематической разницы между определёнными с помощью НР и ФТ значениями энергии первичных частиц ШАЛ, которые наблюдались двумя типами детекторов как в РАО, так и в ТА одновременно. Величины относительных систематических сдвигов легко найти, если потребовать, чтобы спектры, измеренные различными экспериментами, совпадали. Для того чтобы определить абсолютную нормировку, требуется дополнительное теоретическое предположение; в работе [1] для калибровки масштаба энергий используется положение теоретически предсказанного провала в спектре, связанного с потерями энергии протонов на рождение электрон-позитронных пар. Совпадение как формы, так и абсолютной нормировки сдвинутых спектров в широком интервале энергий $10^{17,5} \lesssim E \lesssim 10^{19,5}$ эВ является сильным аргументом в пользу такого подхода. Как видно из рис. 2б, при наиболее высоких энергиях согласие несколько ухудшается.

В течение долгого времени интерес к физике КЛСВЭ подогревался предсказанием Грейзена [8], Зацепина и Кузьмина [9] об обрезании спектра космических протонов при энергиях выше $\sim 7 \times 10^{19}$ эВ, соответствующих порогу рождения π -мезонов во взаимодействиях протонов с фотонами реликтового излучения (эффект ГЗК), и одновременно экспериментальным наблюдением ШАЛ, вызванных первичными частицами, реконструированная энергия которых превышала 10^{20} эВ (первое такое событие было зарегистрировано экспериментом Volcano Ranch [10] ещё до открытия реликтового излучения). Как видно из рис. 2, существование таких событий подтверждено всеми экспериментами, однако данные последних лет указывают на наличие завала в спектре [4, 6, 11]. Статистическая значимость завала оценивается обычно из сравнения данных с продолжающимся степенным спектром, который исключается на определённом уровне достоверности. Количественные оценки значимости, очевидно, зависят от модели продолжающегося спектра, поэтому они здесь не приводятся; следует также помнить, что эти результаты не являются доказательством того, что завал связан с обрезанием ГЗК, и не исключают продолжения спектра в виде "ступеньки".

¹ High Resolution Fly's Eye Experiment.

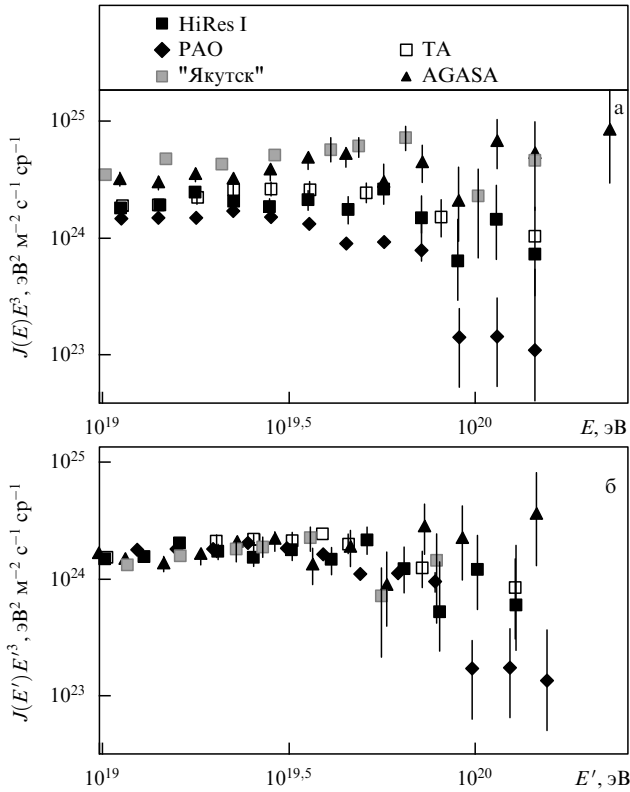


Рис. 2. Спектры КЛСВЭ ($J(E)$ — поток частиц), измеренные экспериментами AGASA (Akeno Giant Air Shower Array) [2], "Якутск" [3], HiRes I [4], PAO [5] и TA [6] до (а) и после (б) сдвига масштаба энергий. Величины [7] сдвиг энергий для указанных экспериментов $E'/E = 0,652, 0,561, 0,911, 1,102, 0,906$ соответственно.

3.2. Состав первичных частиц

Сегодня вопрос о составе первичных частиц КЛСВЭ следует считать открытым. В течение нескольких последних лет на конференциях и в литературе активно обсуждаются противоречивые результаты, полученные в экспериментах HiRes и PAO. В то время как результаты первого из них полностью согласуются с не зависящим от энергии преимущественно протонным составом, измерения второго указывают на постепенное утяжеление первичных ядер с увеличением энергии. В качестве основных наблюдаемых в обоих анализах использовались глубина максимального развития ливня $X_{\max}$, определяемая с помощью ФТ, и величина её флуктуаций. Кроме того, глубина $X_{\max}$ исследовалась (на меньшей статистике) по данным ФТ установки TA и по наблюдениям черенковского света на установке "Якутск" (в последнем случае оценивались и флуктуации).

Результаты всех экспериментов, расположенных в Северном полушарии (и наблюдающих Северное небо), согласуются с протонным составом, в отличие от результатов PAO (Южное полушарие). Рассогласование с результатами PAO можно было бы объяснить наличием близких источников, приводящим к существенной зависимости состава первичных частиц от направления на небесной сфере. Однако в 2012 г. коллаборация PAO представила (см. [12]) раздельный анализ событий, пришедших из Южной и Северной небесных полусфер (близкая к экватору часть последней наблюдается всеми экспериментами), — никакой систематической разницы не было

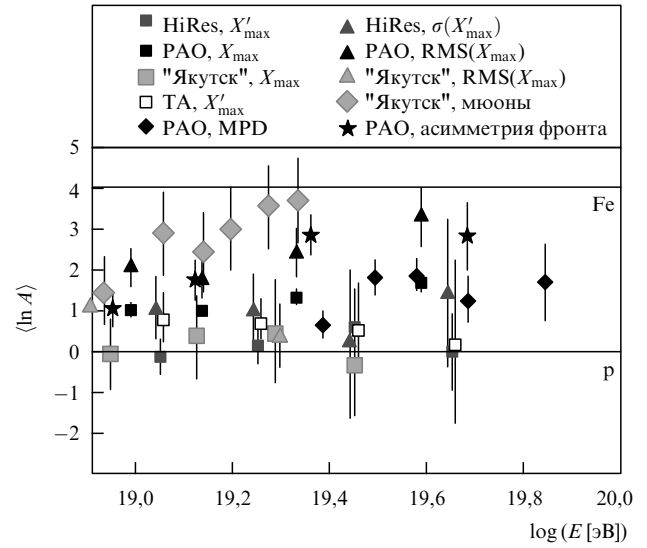


Рис. 3. Результаты анализа состава первичных частиц КЛСВЭ разными методами: глубина развития ливня и её флуктуации по данным HiRes [14], PAO [15], TA [16] и "Якутск" [17]; мюонные данные "Якутска" [18]; восстановление глубины рождения мюонов (Muon Production Depth — MPD) и асимметрия формы фронта по данным HP PAO [19]. (RMS — Root Mean square.)

обнаружено. Северные эксперименты пока не обладают достаточным количеством событий для такого анализа.

В качестве другой возможной причины противоречия в результатах по $X_{\max}$ указывалось методическое различие в обработке данных в экспериментах PAO и "Якутск", с одной стороны, и HiRes и TA — с другой. В то время как $X_{\max}$ индивидуального ливня определена всеми указанными экспериментами примерно одинаково, для изучения ансамбля событий PAO и "Якутск" отбирают (накладывая множество условий и существенно сокращая используемый набор данных) наиболее репрезентативную (с минимальным смещением — minimum-bias) выборку событий, распределение которых по $X_{\max}$ должно совпадать с распределением для всех ШАЛ, в том числе не вошедших в выборку. HiRes и TA, напротив, анализируют весь набор зарегистрированных ШАЛ, но учитывают эффекты селекции при расчёте теоретически ожидаемых средних значений, $X'_{\max}$, для конкретной выборки. Кроме того, HiRes использовал несколько иную, по сравнению с таковой в PAO и "Якутске", величину, параметризующую флуктуации. Таким образом, непосредственное сравнение результатов установок возможно лишь в терминах окончательного результата — состава первичных ядер, традиционно параметризующего усреднённым логарифмом их атомной массы $\langle \ln A \rangle$. К сожалению, такой анализ с необходимостью зависит от применяемой модели развития ливня, связывающей $\langle \ln A \rangle$ с наблюдаемыми параметрами.

Результаты такого анализа с использованием как упомянутых, так и ряда других параметров ШАЛ приведены на рис. 3, где в качестве модели высокоэнергетических адронных взаимодействий использовалась QGSJET II² [13] (её выбор определяется наличием опубликованных данных для сравнения с результатами этой модели). По нашему мнению, разброс полученных разными методами

² QGSJET — Quark Gluon String model with JETs.

значений $\langle \ln A \rangle$ указывает на преждевременность выводов о каких-либо серьёзных противоречиях между экспериментами: так, выраженная в терминах $\langle \ln A \rangle$ разница в результатах анализа $X_{\max}$ экспериментами HiRes и PАО не превышает разницы между результатами PАО, полученными из $X_{\max}$ и из флуктуаций $X_{\max}$. Следует признать, что, по-видимому, вклад систематических ошибок в результаты определения состава первичных частиц пока доминирует над вкладами реальных эффектов.

Завершая обсуждение химического состава, обратим внимание на то, что с астрофизической точки зрения наличие большого количества первичных тяжёлых ядер представляется менее вероятным, чем наличие протонного (в основном) состава, так как требует механизмов повышения металличности инжектированного вещества в источниках на несколько порядков величины по сравнению с максимально известной звёздной металличностью. Аргументация, связанная с более эффективным ускорением частиц с большим электрическим зарядом, приводит к требованию резкого (экспериментально не наблюдаемого) скачка как в составе, так и в полном потоке космических частиц при энергиях, соответствующих максимальным энергиям ускоренных протонов.

3.3. Анизотропия направлений прихода

Небольшое количество событий, достаточно плохое угловое разрешение и отклонения заряженных частиц космическими магнитными полями делают на нынешнем этапе невозможной пообъектную идентификацию источников, привычную для классической астрономии. Вместо этого приходится оперировать статистическими методами и искать проявления той или иной модели популяции источников в анизотропном распределении направлений прихода космических лучей для выборки событий в целом. Здесь можно выделить поиски глобальной и мелкомасштабной анизотропии.

Глобальная анизотропия направлений прихода ожидается в случае, когда наблюдаемый поток космических лучей создаётся ограниченным числом относительно близких источников. Такая картина возможна в двух случаях: либо имеется значительный избыток плотности источников вблизи наблюдателя, либо частицы от далёких источников по тем или иным причинам до нас не долетают. Первому случаю соответствует предположение о наличии источников в нашей Галактике. Второй реализуется для астрофизических источников протонов при энергиях, близких к порогу ГЗК; основной вклад в поток космических лучей с такими энергиями должны вносить источники, расположенные внутри так называемой сферы ГЗК с радиусом порядка 100 Мпк. Поскольку материя внутри этой сферы распределена неоднородно, астрофизический сценарий с большим числом источников протонов предполагает анизотропное распределение направлений прихода. Это распределение можно предсказать на основе функции распределения плотности источников, т.е. распределения вещества во Вселенной, и предположений о характере распространения частиц. Поиски проявлений тех или иных источников в мелкомасштабной анизотропии сводятся в основном к изучению автокорреляционной функции (кластеринга) или корреляций направлений прихода космических лучей с положениями объектов определённого класса.

Результаты практически всех анализов распределения направлений прихода первичных частиц с энергиями,

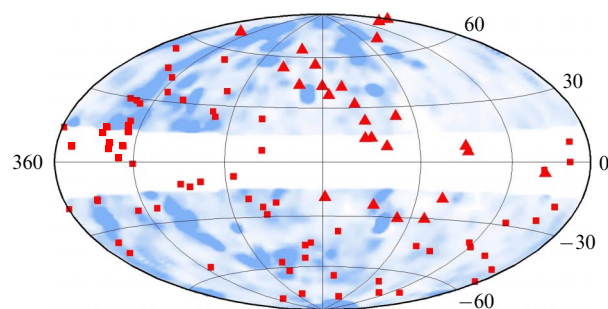


Рис. 4. Ожидаемый поток протонов с $E \geq 5,5 \times 10^{19}$ эВ от внегалактических источников, распределение которых повторяет крупномасштабную структуру Вселенной, с учётом экспозиции PАО и ТА (галактические координаты). Более тёмные области соответствуют большему потоку. Методика вычисления описана в [20]. Относительные экспозиции нормированы на число опубликованных событий. Светлая полоса — зона галактического поглощения, в которой данные о структуре неточны. Направления прихода событий PАО [21] показаны квадратами, а ТА [22] — треугольниками.

превышающими 10^{19} эВ, статистически согласуются с изотропным распределением на неплохом уровне достоверности. В то же время в отдельных случаях имеются указания на отклонения от изотропии, т.е. данные, оставаясь совместными с изотропным распределением, не исключают и некоторых сценариев анизотропии. Так, в Южном полушарии (PАО) глобальное распределение направлений прихода указывает на возможную их корреляцию с крупномасштабной структурой Вселенной, в то время как в данных северных экспериментов такой корреляции не видно (рис. 4); результаты ТА исключают на уровне достоверности 90 % такую корреляцию для событий с энергиями $E > 10^{19}$ эВ (направления прихода частиц с $E > 4 \times 10^{19}$ эВ совместны с обоими сценариями).

Одним из наиболее важных для астрофизики результатов последнего времени является отсутствие статистически значимой кластеризации направлений прихода на небольших масштабах. Поиск кластеров событий позволяет ограничить число их источников в ближайшей Вселенной: в пределе, когда есть всего один источник, направления прихода концентрировались бы в одно пятно около него; напротив, в пределе бесконечного множества источников распределение являлось бы изотропным. Количественный метод, позволяющий ограничить снизу число источников исходя из отсутствия кластеров, был разработан в [23]; несколько усложнённая его версия недавно была применена к результатам PАО [24]. Надёжные результаты, ограничивающие плотность источников, могут быть получены для самых высоких энергий, когда все вносящие вклад в наблюдаемый поток космических частиц источники расположены недалеко (вследствие эффекта ГЗК), а отклонения частиц магнитными полями невелики. Результатом анализа является ограничение $n \gtrsim 10^{-4}$ Мпк $^{-3}$ на концентрацию источников частиц с $E \gtrsim 5,5 \times 10^{19}$ эВ при предположении небольших отклонений. Это ограничение является очень строгим: источники должны быть гораздо более многочисленными, чем предполагается в большинстве моделей. Действительно, простейшие ограничения на физические параметры источника частиц с такими энергиями [25] показывают, что для классических механизмов диффуз-

ного ускорения частиц до приобретения ими обсуждаемых энергий (например, для ускорения в ударных волнах) требуемые условия выполняются только в весьма экзотических и мало распространённых во Вселенной объектах — мощнейших активных галактиках. В то же время редко обсуждаемый механизм непосредственного ускорения частиц в магнитосферах сверхмассивных чёрных дыр [26] позволяет удовлетворить ограничения на концентрацию и построить модель популяции источников [27].

Автокорреляционная функция для направлений прихода событий с $E > 10^{19}$ эВ полностью совместна с ожидаемой для изотропного распределения [22], однако для более высоких энергий наблюдаются незначительные отклонения, выражающиеся в избытке событий, разделённых угловым масштабом около 15° . В данных РАО этот избыток определяется наличием пятна событий [28, 29] вокруг близкой радиогалактики Cen A, которое, возможно, отвечает и за эффект корреляций с крупномасштабной структурой (Cen A проектируется на более далёкое, но очень многочисленное сверхскопление галактик); в Северном полушарии (ТА) такого очевидного пятна нет. Отметим, что при $E > 10^{20}$ эВ эксперименты РАО и ТА зарегистрировали всего шесть событий, направления прихода двух из которых совпадают в пределах углового разрешения [30].

Одним из наиболее известных результатов сравнения направлений прихода частиц с положениями астрофизических объектов определённого класса является заключение коллаборации Pierre Auger [31] о корреляции направлений прихода частиц с $E > 5,6 \times 10^{19}$ эВ с положениями близких активных галактик, которая была интерпретирована как свидетельство в пользу того, что события с такими энергиями вызываются протонами либо этих галактик, либо других объектов, распределённых во Вселенной сходным образом. Такая гипотеза плохо согласуется с результатами анализа других наблюдаемых (состав первичных частиц, глобальная анизотропия) и с астрофизикой источников. Гипотеза под-

тверждалась анализом данных "Якутска" [32], но не подтверждалась HiRes [33]. Позднее полученные данные РАО [21] указывают на заметно более слабый по сравнению с результатом [31] эффект. Результаты ТА [22] исключают первоначальную [31] оценку величины эффекта и являются совместными как с его отсутствием вообще, так и с оценкой [21].

4. Приложения к физике частиц

Именно в космических лучах были открыты многие элементарные частицы, и сегодня фундаментальная физика частиц и взаимодействий продолжает использовать информацию из физики и астрофизики космических лучей. Основные направления здесь — изучение адронных взаимодействий при энергиях, на порядок превышающих достигнутые на ускорителях; поиск неизвестных эффектов, влияющих на развитие атмосферного ливня; поиски "новой физики" для решения проблем объяснения астрофизических результатов в рамках стандартных сценариев.

4.1. Взаимодействия частиц при очень высоких энергиях

Энергия протон-протонного столкновения на Большом адронном коллайдере (Large Hadron Collider — LHC) на порядок величины меньше энергии (в системе центра масс) первого взаимодействия частицы сверхвысоких энергий в атмосфере. С одной стороны, это приводит к значительной неопределённости в моделях, описывающих ШАЛ (хотя результаты LHC, в том числе специально созданной экспериментальной установки LHCf (LHC forward), сейчас активно используются для улучшения этих моделей, избежать экстраполяции не удаётся). С другой стороны, измерение модельно-независимых характеристик ШАЛ позволяет непосредственно получать количественную информацию о первом взаимодействии. Оба этих аспекта иллюстрируются на рис. 5. Сегодняшний уровень точности как моделей, так и

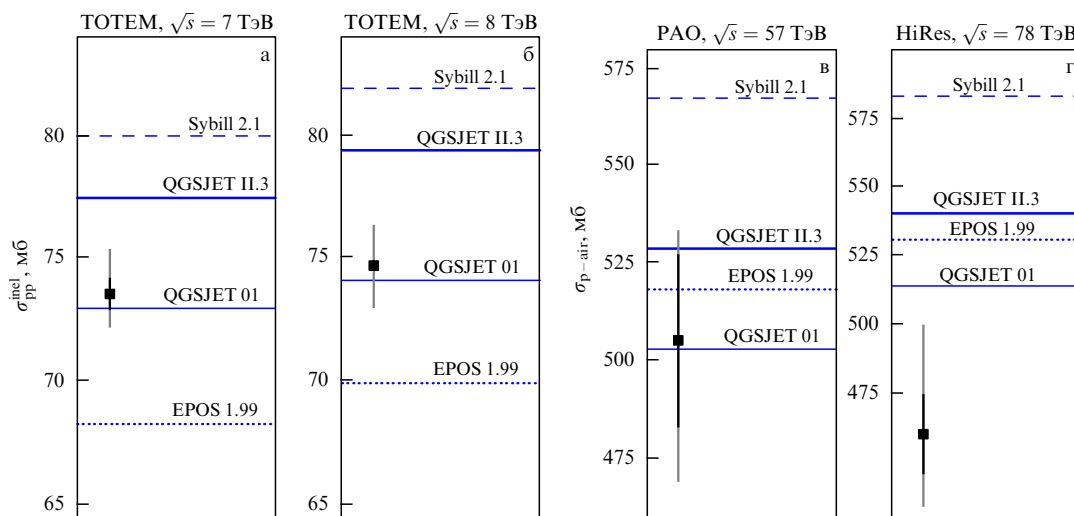


Рис. 5. Сравнение сечений рассеяния, используемых в моделях адронных взаимодействий Sybill 2.1 [34], QGSJET 01 [35], QGSJET II [13] и EPOS 1.99 [36], с экспериментальными результатами. Сечение неупругого рр-рассеяния $\sigma_{pp}^{\text{inel}}$ согласно указанным моделям и по данным эксперимента TOTEM при энергии LHC $\sqrt{s} = 7$ ТэВ [37] (а) и $\sqrt{s} = 8$ ТэВ [38] (б). Сечение рассеяния р-воздух $\sigma_{p-\text{air}}$ согласно указанным моделям и по данным анализа ШАЛ в экспериментах РАО [39] при $\sqrt{s} = 57$ ТэВ (в) и HiRes [40] при $\sqrt{s} = 78$ ТэВ (г). Статистические и систематические ошибки результатов экспериментальных измерений (квадраты) показаны тёмными и светлыми отрезками соответственно.

измерений не позволяет что-либо утверждать о влиянии неизвестных физических эффектов на развитие ШАЛ.

4.2. Поиски "новой физики"

Остановимся теперь на двух (далеко не уникальных, но наиболее, на наш взгляд, интересных сегодня) примерах применения КЛСВЭ для поиска и ограничения моделей "новой физики" — частиц и взаимодействий, существование которых предполагается в теориях, расширяющих Стандартную модель (СМ) физики элементарных частиц и решающих некоторые её проблемы [41].

Нейтральные частицы от лацертид. В 2004 г. при анализе выборки данных с наилучшим угловым разрешением в физике КЛСВЭ (HiRes-стерео [42]) были обнаружены [43] статистически значимые корреляции направлений прихода небольшой доли (около 2 %) космических частиц с энергиями, превышающими 10^{19} эВ, с яркими лацертидами — мощными активными галактиками определённого типа, находящимися на больших расстояниях от Земли. Угловое разрешение установки было значительно меньше ожидаемого отклонения протонов с такими энергиями в магнитном поле Галактики, так что это наблюдение указало на наличие нейтральных частиц сверхвысоких энергий, распространяющихся на космологические расстояния. В последующей работе коллаборации HiRes [44] этот результат был подтверждён с помощью альтернативного метода анализа. Данное явление не находит объяснения в рамках стандартной физики и астрофизики (см., например, обсуждение в работе [45]). Не помогают в этом случае и популярные расширения СМ, например суперсимметрия. Единственное непротиворечивое и доступное экспериментальной проверке объяснение этого эффекта, помогающее решить также ряд других астрофизических проблем, предложено в [46] — это объяснение основано на эффекте аксион-фотонных осцилляций. К сожалению, само наличие корреляций пока не удалось проверить в независимом аналогичном эксперименте: из-за худшего углового разрешения единственной установки (ТА), в которой ФТ работают в стереорежиме, требуется очень большое число событий, пока ещё не набранное. Отсутствие эффекта в данных НР РАО [47] согласуется с предсказаниями аксион-фотонной гипотезы: водные баки РАО практически нечувствительны к маломюонным ШАЛ, вызванным первичными фотонами.

Сверхтяжёлая тёмная материя. Один из экспериментальных результатов, требующих для своего объяснения расширения СМ, состоит в наличии во Вселенной большого количества невидимого вещества — так называемой тёмной материи. В одном классе моделей предполагается, что это вещество состоит из метастабильных (время жизни τ_X порядка времени жизни Вселенной) сверхтяжёлых (масса $M_X > 10^{20}$ эВ) частиц X, среди продуктов распада которых могут быть первичные частицы КЛСВЭ. Процесс распада частиц X может быть описан достаточно модельно-независимым образом, так как ключевую роль в его физике играют довольно хорошо изученные процессы адронизации. Предсказания этого сценария включают в себя очень жёсткий спектр при самых высоких энергиях, большую долю первичных фотонов и галактическую анизотропию распределения направлений прихода. Наиболее строгие ограничения сегодня связаны с ограничениями на поток фотонов, однако и они оставляют [48] разрешённую большую область значений пара-

метров частиц X. Данная модель привлекает особый интерес в связи с необнаружением других кандидатов на роль частицы тёмной материи в ЛНС.

5. Заключение

На протяжении нескольких десятилетий физика КЛСВЭ остаётся одной из самых интересных областей на стыке астрофизики и физики элементарных частиц. Несмотря на серьёзный прогресс в эксперименте, сегодня мы мало что можем сказать о происхождении частиц с энергиями выше 10^{19} эВ, и лишь немногие модели ускорения частиц в астрофизических источниках могут одновременно удовлетворить требованиям, налагаемым на физические условия в этих космических ускорителях, и полученному недавно исходя из отсутствия кластеров направлений прихода строгому ограничению снизу на плотность источников. В результатах исследования химического состава первичных частиц с такими энергиями систематические ошибки, по-видимому, доминируют над вкладами от физических эффектов. По-прежнему не выяснена физическая причина систематической разницы в определении энергии первичной частицы разными методами. Пристального внимания заслуживают некоторые указания на возможные проявления "новой физики" в космических лучах.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты 10-02-01406, 11-02-01528 и 12-02-01203), Президента РФ (грант НШ-5590.2012.2), Министерства образования и науки РФ (соглашения 8142 и 14.В37.21.0457) и фонда "Династия".

Список литературы

1. Berezhinsky V, Gazizov A, Grigorieva S *Phys. Rev. D* **74** 043005 (2006)
2. Takeda M et al. *Astropart. Phys.* **19** 447 (2003)
3. Egorova V P et al. *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.* **136** 3 (2004)
4. Abbasi R U et al. (High Resolution Fly's Eye Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **100** 101101 (2008)
5. Salamida F (for the Pierre Auger Collab.), in *Proc. of the 32nd Intern. Cosmic Ray Conf., ICRC2011, 11–18 August, 2011, Beijing, China* Vol. 2 (2011) p. 145; arXiv:1107.4809, p. 1
6. Abu-Zayyad T et al. (TA Collab.), arXiv:1205.5067
7. Tsunesada Y et al. (Spectrum Working Group), UHECR-2012 (Geneva: CERN, 2012)
8. Greisen K *Phys. Rev. Lett.* **16** 748 (1966)
9. Зацепин Г Т, Кузьмин В А *Письма ЖЭТФ* **4** 114 (1966) [Zatsepin G T, Kuz'min V A *JETP Lett.* **4** 78 (1966)]
10. Linsley J *Phys. Rev. Lett.* **10** 146 (1963)
11. Abraham J et al. (Pierre Auger Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **101** 061101 (2008)
12. Bellido H et al. (Composition Working Group), UHECR-2012 (Geneva: CERN, 2012)
13. Ostapchenko S *Phys. Rev. D* **74** 014026 (2006)
14. Abbasi R U et al. (High Resolution Fly's Eye Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **104** 161101 (2010)
15. Facal P et al. (Pierre Auger Collab.), in *Proc. of the 32nd Intern. Cosmic Ray Conf., ICRC2011, 11–18 August, 2011, Beijing, China* (2011); Abreu P et al. (Pierre Auger Collab.), arXiv:1107.4804
16. Jui C C H (for the Telescope Array Collab.), arXiv:1110.0133
17. Berezhko E G, Knurenko S P, Ksenofontov L T *Astropart. Phys.* **36** 31 (2012)
18. Dedenko L G et al. *J. Phys. G Nucl. Part. Phys.* **39** 095202 (2012)
19. Garcia-Pinto D et al. (Pierre Auger Collab.), in *Proc. of the 32nd Intern. Cosmic Ray Conf., ICRC2011, 11–18 August, 2011, Beijing, China* (2011); Abreu P et al. (Pierre Auger Collab.), arXiv:1107.4804
20. Kalashev O E et al. *JCAP* (03) 003 (2008)

21. Abreu P et al. (Pierre Auger Collab.) *Astropart. Phys.* **34** 314 (2010)
22. Abu-Zayyad T et al. (TA Collab.) *Astrophys. J.* **757** 26 (2012)
23. Dubovsky S L, Tinyakov P G, Tkachev I I *Phys. Rev. Lett.* **85** 1154 (2000)
24. De Domenico M et al. (Pierre Auger Collab.), in *Proc. of the 32nd Intern. Cosmic Ray Conf., ICRC2011, 11–18 August, 2011, Beijing, China* Vol. 2 (2011) p. 113; Abreu P et al. (Pierre Auger Collab.), arXiv:1107.4809
25. Птицына К В, Троицкий С В *УФН* **180** 723 (2010) [Ptitsyna K V, Troitsky S V *Phys. Usp.* **53** 691 (2010)]
26. Neronov A Yu, Semikoz D V, Tkachev I I *New J. Phys.* **11** 065015 (2009)
27. Kalashev O E, Ptitsyna K V, Troitsky S V *Phys. Rev. D* **86** 063005 (2012)
28. Gorbunov D et al. *Письма ЖЭТФ* **87** 547 (2008) [*JETP Lett.* **87** 461 (2008)]
29. Gorbunov D S et al., arXiv:0804.1088
30. Troitsky S V *Письма ЖЭТФ* **96** 14 (2012) [Troitsky S V *JETP Lett.* **96** 13 (2012)]
31. Abraham J et al. (Pierre Auger Collab.) *Science* **318** 938 (2007)
32. Иванов А А *Письма ЖЭТФ* **87** 215 (2008) [Ivanov A A *JETP Lett.* **87** 185 (2008)]
33. Abbasi R U et al. (High Resolution Fly's Eye Collab.) *Astropart. Phys.* **30** 175 (2008)
34. Ahn E-J et al. *Phys. Rev. D* **80** 094003 (2009)
35. Калмыков Н Н, Остапченко С С *ЯФ* **56** (3) 105 (1993) [Kalmykov N N, Ostapchenko S S *Phys. Atom. Nucl.* **56** 346 (1993)]
36. Werner K, Liu F-M, Pierog T *Phys. Rev. C* **74** 044902 (2006)
37. Antchev G et al. (TOTEM Collab.) *Europhys. Lett.* **96** 21002 (2011)
38. Antchev G et al. (TOTEM Collab.), Preprint CERN-PH-EP-2012-354 (Geneva: CERN, 2012)
39. Abreu P et al. (Pierre Auger Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **109** 062002 (2012)
40. Belov K et al. (High Resolution Fly's Eye (HiRes) Collab.) *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.* **151** 197 (2006)
41. Троицкий С В *УФН* **182** 77 (2012) [Troitsky S V *Phys. Usp.* **55** 72 (2012)]
42. Abbasi R U et al. (HiRes Collab.) *Astrophys. J.* **610** L73 (2004)
43. Gorbunov D S et al. *Письма ЖЭТФ* **80** 167 (2004) [*JETP Lett.* **80** 145 (2004)]
44. Abbasi R U et al. (HiRes Collab.) *Astrophys. J.* **636** 680 (2006)
45. Tinyakov P G, Tkachev I I *ЖЭТФ* **133** 556 (2008) [*JETP* **106** 481 (2008)]
46. Fairbairn M, Rashba T, Troitsky S *Phys. Rev. D* **84** 125019 (2011)
47. Harari D (for the Pierre Auger Collab.), arXiv:0706.1715
48. Kalashev O E, Rubtsov G I, Troitsky S V *Phys. Rev. D* **80** 103006 (2009)