

## МЮОННАЯ ЗАГАДКА В КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ И ВОЗМОЖНОСТИ ЕЕ РЕШЕНИЯ

© 2021 г. А. А. Петрухин<sup>1)\*</sup>

Поступила в редакцию 19.07.2020 г.; после доработки 19.07.2020 г.; принята к публикации 19.07.2020 г.

В истории открытия и проведения исследований как самого мюона, так и мюонной компоненты космических лучей было немало загадок. Последняя из них — растущий с энергией первичных космических лучей избыток групп мюонов большой множественности, который регистрируется в различных экспериментах. Вторым аспектом мюонной загадки является избыток мюонов сверхвысоких энергий (больше 100 ТэВ). В статье рассматриваются различные подходы к решению мюонной загадки, связанные с измерением энергетических характеристик мюонной компоненты космических лучей.

DOI: 10.31857/S0044002721010141

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Исторически слова “мюон” и “загадка” были практически синонимами в течение многих лет, начиная с открытия этой частицы. После предсказания Х. Юкавой существования кванта сильного взаимодействия в виде частицы с массой, в 200–300 раз превышающей массу электрона, начались ее поиски в космических лучах. И когда была зарегистрирована частица с массой  $\sim 200$  масс электрона, все решили, что это и есть та самая частица, предсказанная Юкавой. Однако дальнейшие эксперименты показали, что обнаруженная частица слабо взаимодействует с веществом и имеет большую проникающую способность. Эта новая частица, позднее названная мюоном, вела себя как тяжелый электрон.

Возник естественный вопрос, чем еще кроме массы мюон отличается от электрона? Поиски этого отличия велись по двум основным направлениям: поиск аномального магнитного момента в экспериментах по измерению  $(g - 2)/2$ -отношения, которые продолжают до сих пор, и поиск аномального взаимодействия мюонов по сравнению с предсказаниями квантовой электродинамики. Первые эксперименты, особенно по рассеянию мюонов на ядрах, давали противоречивые результаты, но с увеличением точности измерений на более совершенной аппаратуре обнаруженные аномалии рассосались, и этот путь решения загадки мюона был закрыт.

Загадка мюона в значительной степени была решена спустя 30 лет со времени его открытия,

когда стало ясно, что мюон был первой частицей из второго поколения кварков и лептонов (наряду с мюонным нейтрино,  $s$ - и  $c$ -кварками), хотя причины существования второго, а также третьего поколения не ясны до сих пор. Для объяснения практически всех объектов и явлений, наблюдаемых во Вселенной, достаточно первого поколения.

Следующий этап появления различных мюонных загадок связан с процессами их генерации. Мюоны могут рождаться лишь в двух процессах: в распадах более тяжелых мезонов и в электромагнитных процессах образования мюонных пар  $(\mu^+ \mu^-)^2$ . Поэтому характеристики потока регистрируемых мюонов широко используются для оценки параметров родивших их частиц. Наибольший размах такие эксперименты приобрели в космических лучах, в которых присутствуют частицы с энергиями, недоступными современным ускорителям.

Мюоны, регистрируемые на поверхности Земли, образуются в верхних слоях атмосферы в результате распада вторичных частиц, в основном пионов и каонов, которые генерируются в процессах взаимодействия первичных космических лучей, состоящих из ядер различных элементов, с ядрами атомов воздуха: азота и кислорода. Основными характеристиками потока мюонов являются энергетический спектр и угловое распределение для одиночных мюонов и множественность и пространственное распределение для групп мюонов. При включении каких-либо новых процессов генерации мюонов,

<sup>1)</sup>Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия.

\*E-mail: AAPetrukhin@mephi.ru

<sup>2)</sup>Процесс рождения мюонов от взаимодействия мюонных нейтрино, который очень важен для нейтринных телескопов, не дает значимого вклада в общий поток мюонов.

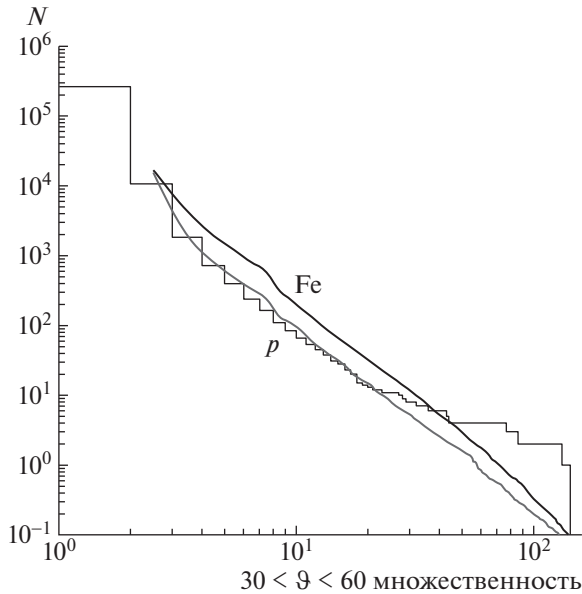


Рис. 1. Распределение по множественности мюонов в эксперименте ALEPH [6].

например, более тяжелых и короткоживущих частиц, по сравнению с  $\pi$ - и  $K$ -мезонами, должны изменяться все эти характеристики.

## 2. КРАТКАЯ ИСТОРИЯ МЮОННОЙ ЗАГАДКИ

Термин “мюонная загадка” в отношении к современному состоянию исследований мюонной компоненты впервые прозвучал во время Международного симпозиума по будущим направлениям в физике космических лучей ультравысоких энергий, который проходил в ЦЕРН в феврале 2012 г., хотя различные аномалии в характеристиках потока мюонов наблюдались и значительно раньше. В работе [1] были рассмотрены два аспекта мюонной загадки: избыток мюонов в инклюзивном энергетическом спектре мюонов космических лучей при сверхвысоких энергиях ( $>100$  ТэВ) и избыток групп мюонов большой множественности в широких атмосферных ливнях, который увеличивается с ростом энергии первичных частиц.

Проблема образования мюонов быстрой генерации в области энергий мюонов выше 10 ТэВ, а тем более выше 100 ТэВ в космических лучах не решена до сих пор, хотя в экспериментах на ускорителях были открыты  $D$  и другие тяжелые и короткоживущие мезоны, которые могут распадаться с испусканием мюонов. Обзор данных, полученных в области энергий до 100 ТэВ, приведен в работе [2], из которой виден большой разброс в экспериментальных данных. Для энергий выше 100 ТэВ экспериментальные данные получены в двух экспериментах: BUST [3], в котором был

зарегистрирован избыток таких мюонов, и IceCube, в котором вначале также был зарегистрирован избыток мюонов выше 100 ТэВ [4], но при дальнейшем анализе экспериментальные точки легли на расчетные кривые [5]. Причина таких разбросов и колебаний — в трудностях измерения энергии мюонов в этой области энергий и малой интенсивности потока мюонов из-за круто падающего энергетического спектра космических лучей.

В последние годы доминирует второй аспект мюонной загадки, так как избыток групп мюонов зарегистрирован во многих экспериментах. Первые указания на возможность существования плотных групп мюонов большой множественности были получены в экспериментах, проведенных в 60–70-х гг. прошлого столетия. Но в этих экспериментах возможности надежного измерения количества мюонов в группах были весьма ограничены из-за недостаточного пространственного разрешения детекторов, а энергия первичных частиц не оценивалась. Так как общепринятые схемы расчета прохождения космических лучей через атмосферу в то время отсутствовали, то ценность этих результатов была невелика.

Надежные результаты по измерению количества мюонов в группах были получены на детекторах ALEPH, DELPHI и L3, работавших на ускорителе LEP, которые имели хорошее пространственное разрешение. На рис. 1 приведено распределение событий по множественности мюонов, полученное на детекторе ALEPH [6]. Хорошо видно, что в области множественностей  $\sim 100$  мюонов наблюдается их избыток по сравнению с расчетами, основанными на современных моделях взаимодействия частиц и общепринятом описании прохождения космических лучей через атмосферу, даже в предположении тяжелого состава первичных космических лучей (только ядра железа). Конечно, частично этот избыток может быть объяснен за счет вклада хвоста распределения с еще большими множественностями, которые обрезаются на уровне 100 частиц. Но круто падающие энергетический спектр космических лучей и распределение по множественности мюонов не позволяют объяснить весь избыток за счет этого эффекта.

Более наглядно сложившуюся ситуацию можно пояснить на результатах другого эксперимента, выполненного значительно позднее на детекторе ALICE [7], в котором можно регистрировать до 300 мюонов (рис. 2). Из рисунка видно, что до множественности мюонов  $\sim 100$  распределение хорошо описывается современными моделями в рамках общепринятой программы моделирования CORSIKA и соответствует нормальному составу космических лучей, по крайней мере, экспериментальные точки

лежат между кривыми для двух предельных случаев состава: только протоны или только ядра железа. Однако при большей множественности зарегистрировано пять событий, которые не описываются расчетными кривыми, приведенными на рисунке. Для их объяснения требуются либо очень большие флуктуации в процессах взаимодействия при прохождении космических частиц через атмосферу, либо включение нового физического процесса, ответственного за генерацию дополнительного потока мюонов при сверхвысоких энергиях.

К сожалению, в перечисленных экспериментах не было возможности оценивать энергию первичных частиц, при которых появляется избыток групп мюонов. Такая возможность есть у установок, предназначенных для исследования космических лучей и оснащенных ливневыми установками для определения мощности ШАЛ, которые позволяют оценить энергию первичной частицы, вызвавшей этот ливень. Но для надежной регистрации групп мюонов необходимо еще одно условие: хорошее координатное разрешение мюонных детекторов. Обычно в качестве детекторов мюонов используются сцинтилляторы, отклик которых пропорционален количеству прошедших через них частиц. Но при этом нет возможности отличить случаи прохождения чистой группы мюонов от случая образования одним из мюонов каскадного ливня, частицы которого могут существенно повысить количество зарегистрированных мюонов. Обратная ситуация возникает при использовании газоразрядных детекторов большого размера, в которых нет возможности определить количество частиц, вызвавших их срабатывание. Это обстоятельство может занижить оценку числа мюонов при большой множественности. Естественно, при уменьшении размеров детекторов вероятность такой ситуации уменьшается и смещается в сторону больших множественностей.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТ НЕВОД-ДЕКОР

Первым экспериментом, в котором была обеспечена хорошая пространственная точность измерения количества мюонов в группах (порядка 1 см) и был применен оригинальный подход к оценке энергии первичных частиц, стал НЕВОД-ДЕКОР [8]. Этот экспериментальный комплекс, состоящий из двух основных детекторов: черенковского водного объемом 2000 м<sup>3</sup> и координатно-трекового площадью 72 м<sup>2</sup>, позволил провести исследования групп мюонов от первичных частиц с энергиями от  $3 \times 10^{14}$  до  $3 \times 10^{18}$  эВ. Столь широкий диапазон был достигнут за счет регистрации мюонной компоненты ШАЛ под большими зенитными углами.

Специфика генерации мюонов в распадах пионов и каонов приводит к сильной зависимости

потока мюонов от зенитного угла. С одной стороны, при увеличении зенитного угла поток обогащается мюонами высоких энергий из-за увеличения вероятности распада пионов и каонов в разреженных слоях атмосферы и энергетический спектр мюонов становится более пологим. С другой стороны, из-за увеличения расстояния, проходимого мюонами в атмосфере, их пространственное распределение становится шире и количество мюонов, попадающих в детектор, уменьшается. К тому же для мюонов под большими зенитными углами необходимо учитывать влияние магнитного поля Земли, которое отклоняет положительно и отрицательно заряженные мюоны в разные стороны, тем самым еще более расширяя их пространственное распределение. Поэтому, чтобы получить одинаковую множественность мюонов под различными зенитными углами, необходимо увеличивать энергию первичных частиц, которые ответственны за генерацию мюонов под большими зенитными углами. Это обстоятельство открывает возможность оценки энергии первичных частиц по множественности мюонов и зенитному углу их появления. Естественно, необходимо учитывать условия регистрации, поэтому зарегистрированная множественность мюонов  $m$  пересчитывается в локальную плотность мюонов  $D$  по формуле

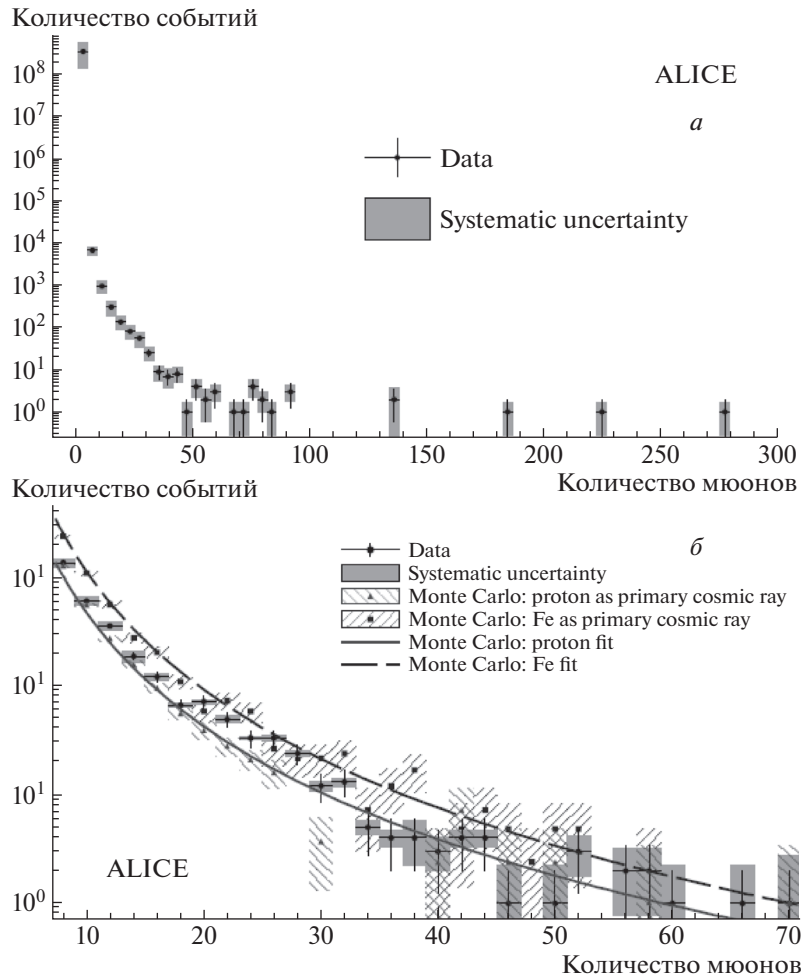
$$D = \frac{m}{S_{\text{eff}}},$$

где  $S_{\text{eff}}$  — эффективная площадь установки для данного направления.

Такой подход получил название метода спектров локальной плотности мюонов (метод СЛПМ). Полученные данным методом результаты исследования групп мюонов наклонных ШАЛ в эксперименте НЕВОД-ДЕКОР [9, 10] показали, что во всей исследованной области первичных энергий наблюдается рост множественности и, соответственно, локальной плотности мюонов, превышающий расчетные значения. И если в области энергий  $10^{15}$ – $10^{17}$  эВ этот рост может быть объяснен утяжелением состава первичных космических лучей вплоть до чистого железа, то дальнейшее возрастание этих величин по сравнению с результатами моделирования не может быть объяснено за счет такого эффекта. Этот результат был получен новым методом, имеющим к тому же большую неопределенность в оценке энергии первичных частиц, и, естественно, требовал подтверждения, которое было получено в эксперименте обсерватории Пьер Оже [11].

### 4. СОВРЕМЕННЫЙ СТАТУС МЮОННОЙ ЗАГАДКИ

В 2018 г., во время международной конференции TeVPA, проходившей в Берлине, была сформирована рабочая группа из представителей почти всех



**Рис. 2.** Распределение по множественности мюонов в эксперименте ALICE [3]: *a* — экспериментальные данные; *б* — сравнение с результатами расчетов.

лабораторий, в которых проводились исследования групп мюонов. Руководитель этой группы Х. Дембински предложил для сравнения результатов различных экспериментов использовать безразмерный параметр

$$z = \frac{\ln N_{\mu}^{\text{exp}} - \ln N_{\mu p}^{\text{sim}}}{\ln N_{\mu \text{Fe}}^{\text{sim}} - \ln N_{\mu p}^{\text{sim}}},$$

где  $N_{\mu}^{\text{exp}}$  — результат измерений множественности, плотности мюонов и т. п.,  $N_{\mu p}^{\text{sim}}$  и  $N_{\mu \text{Fe}}^{\text{sim}}$  — результат моделирования той же величины при двух предположениях о составе первичного космического излучения: только протоны и только ядра железа.

При таких предположениях величина  $z$  может меняться от 0 до 1. Естественно, значения моделированных величин зависят от используемой модели взаимодействия. Это обстоятельство может служить своеобразным критерием корректности модели, так как при энергиях меньше  $10^{15}$  эВ

массовый состав космических лучей известен из прямых измерений.

Международная рабочая группа свела воедино результаты практически всех имеющихся экспериментов для шести наиболее популярных моделей, используемых в программе CORSIKA (рис. 3 [12, 13]). Совокупность представленных на рисунке данных свидетельствует об увеличении множественности мюонов в широком интервале первичных энергий от  $10^{15}$  до  $10^{19}$  эВ. При этом выше  $10^{17}$  наблюдается избыток мюонов, который увеличивается с ростом энергии первичных частиц. Этот избыток и является главной проблемой мюонной загадки.

На рис. 4 приведено сопоставление трех крупнейших экспериментов по исследованию групп мюонов: IceCube, НЕВОД-ДЕКОР и Pierre Auger, из которого видно, что использование наклонных ШАЛ для исследования групп мюонов позволяет на установке небольшой площади ( $\sim 100 \text{ м}^2$ ) полностью перекрыть возможности IceCube (площадь

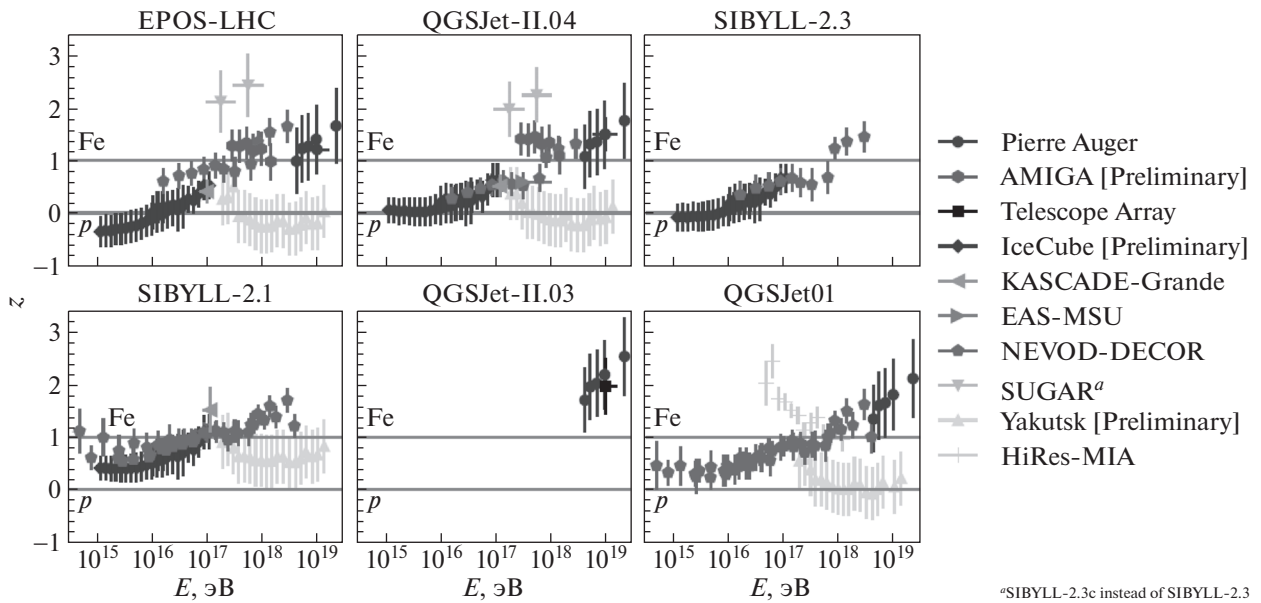


Рис. 3. Результаты работы международной группы по анализу данных 10 экспериментов [12].



Рис. 4. Сравнение трех крупнейших экспериментов по исследованию мюонов ШАЛ.

1 км<sup>2</sup>) и достичь нижней границы энергий первичных частиц ( $3 \times 10^{18}$  В), регистрируемых обсерваторией Pierre Auger (площадь 3000 км<sup>2</sup>). При этом важно отметить, что результаты НЕВОД-ДЕКОР были получены значительно раньше.

### 5. ВОЗМОЖНЫЕ ВАРИАНТЫ РЕШЕНИЯ МЮОННОЙ ЗАГАДКИ

В принципе, возможны два подхода к решению мюонной загадки: космо-физический и ядерно-физический. В первом из них причиной появления избытка мюонов являются изменения энергетического спектра и/или массового состава ПКЛ.

Во втором, изменение модели взаимодействия. К сожалению, прямые эксперименты в обсуждаемой области энергий невозможны, и вся информация получается из результатов регистрации ШАЛ. На рис. 5 представлены схемы исследования характеристик ПКЛ при известной модели взаимодействия и, наоборот, исследования модели взаимодействия при известных характеристиках ПКЛ [14].

Единственная возможность одновременного исследования характеристик ПКЛ и модели взаимодействия связана с измерением энергетических характеристик мюонов (рис. 6 [15]). Включение какого-либо нового процесса генерации мюонов будет приводить к увеличению их количества и

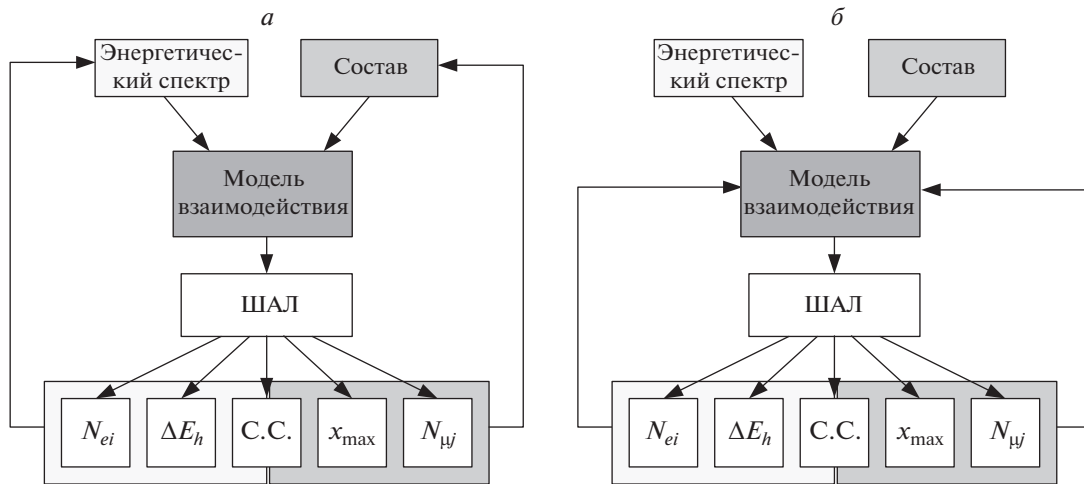


Рис. 5. Космофизический (а) и ядерно-физический (б) подходы к анализу зарегистрированных характеристик ШАЛ.

энергии. Поэтому существуют два возможных подхода к решению мюонной загадки: измерение инклюзивного энергетического спектра мюонов выше энергий 100 ГэВ и измерение энерговыделения групп мюонов.

В первом случае требуемая для такого эксперимента площадь детектора должна быть порядка км<sup>2</sup>. Для этой цели могут быть использованы имеющиеся и строящиеся нейтринные телескопы IceCube, Байкал, KM3Net, которые имеют не только большую площадь, но и достаточную толщину, чтобы использовать их в качестве калориметра или параметра для регистрации каскадных ливней, генерируемых мюонами сверхвысоких энергий. Основная трудность в реализации такого эксперимента состоит в том, что мюоны сверхвысоких энергий сопровождаются большим количеством обычных мюонов, которые также будут взаимодействовать с

веществом детектора. С этой точки зрения более подходящей для решения такой задачи является установка HAWC, предназначенная для исследования  $\gamma$ -квантов сверхвысоких энергий [16]. Она также может быть использована для регистрации мюонов сверхвысоких энергий в горизонтальном потоке космических лучей (рис. 7), где плотность мюонов меньше, а структура установки, состоящей из отдельных баков, уменьшает вероятность одновременной регистрации двух каскадов от различных мюонов.

Более простым представляется второй способ. Для его реализации необходимы два независимых детектора: один координатно-трековый с высоким пространственным разрешением для измерения количества мюонов в группах, а второй — калориметрический для измерения энерговыделения групп мюонов, зарегистрированных координатно-трековым детектором. В случае изменения массового состава ПКЛ удельное энерговыделение (рассчитанное на 1 мюон) должно оставаться практически постоянным. В случае включения нового физического процесса и появления мюонов сверхвысоких энергий удельное энерговыделение начнет расти, так как энергетические потери мюонов линейно растут с их энергией, и появление даже одного мюона с энергией, в сотни раз превышающей среднюю энергию мюонов, существенно увеличит среднее энерговыделение.

В настоящее время такой эксперимент может быть проведен только на комплексе НЕВОД-ДЕКОР, в котором сочетаются два независимых детектора: ДЕКОР — координатно-трековый детектор и НЕВОД — черенковский водный калориметр. Такой эксперимент уже проводится, и первые результаты [17] указывают на возможное увеличение удельного энерговыделения в области энергий первичных частиц  $\sim 10^{18}$  эВ. К сожалению,

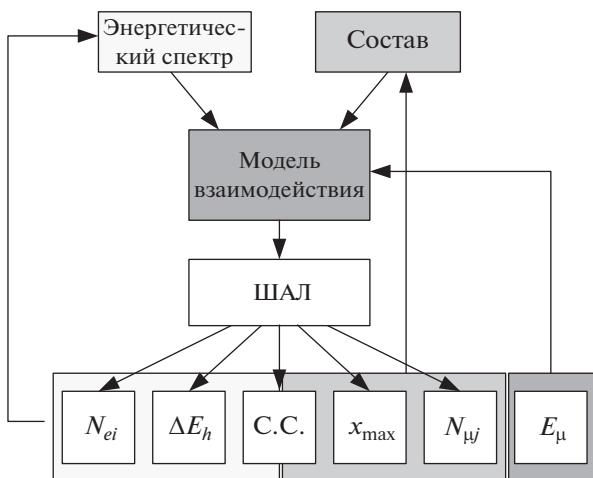


Рис. 6. Включение энергетических характеристик мюонной компоненты в анализ данных ШАЛ.

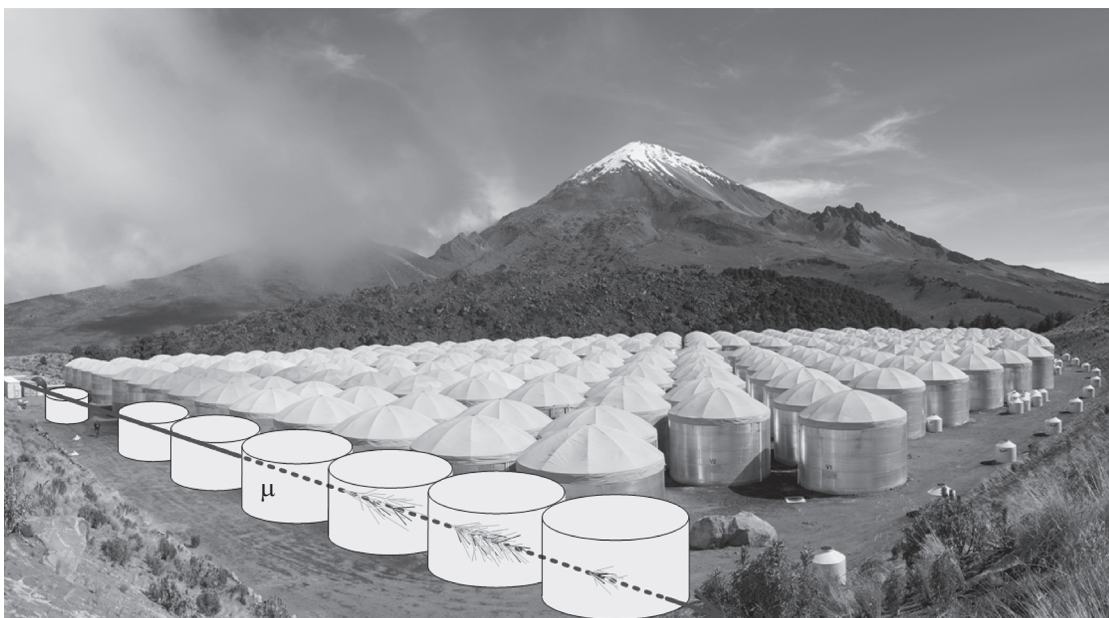


Рис. 7. Прохождение мюона сверхвысокой энергии через черенковские водные детекторы установки HAWC.

детектор ДЕКОР имеет два серьезных недостатка, которые могут помешать получению надежных данных по энерговыделению групп мюонов. Во-первых, стримерные трубки, из которых собран ДЕКОР, имеют поперечное сечение  $1 \times 1 \text{ см}^2$ , поэтому возможность разделения двух близких треков ограничивается 3 см, что затрудняет продвижение в область больших множественностей и соответствующих энергий. Во-вторых, супермодули детектора ДЕКОР перекрывают лишь около 20% боковой поверхности черенковского водного калориметра, и при этом между ними есть пустые промежутки. Это приводит к тому, что полное количество мюонов, проходящих через НЕВОД, остается неизвестным и может быть оценено лишь на основе модельных представлений, что, естественно, снижает точность оценок удельного энерговыделения.

Для решения этих проблем в настоящее время на боковой поверхности черенковского водного детектора НЕВОД создается новый координатно-трековый детектор ТРЕК на базе дрейфовых камер [18]. Преимущества этого детектора следующие. Во-первых, он полностью перекрывает всю боковую поверхность детектора НЕВОД, так как его площадь будет  $250 \text{ м}^2$  (в 7 раз больше, чем у ДЕКОР) с очень малыми зонами нечувствительности между дрейфовыми камерами. Во-вторых, пространственное разрешение дрейфовых камер 1 мм, поэтому разрешение двух близких треков составит около 3 мм, т.е. в 10 раз лучше, чем в детекторе ДЕКОР. Все это существенно улучшит условия эксперимента по измерению энерговыделения на-

клонных групп мюонов и позволит продвинуться в область более высоких энергий, вплоть до  $10^{19} \text{ эВ}$ .

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мюонная загадка была сформулирована на основе результатов, полученных в различных экспериментах, проведенных как с использованием ускорительных детекторов, так и в космических лучах. С большой вероятностью, за появление избытка групп мюонов ответственны новые процессы в ядро-ядерных взаимодействиях, поскольку космические лучи состоят в основном из ядер, которые взаимодействуют с ядрами атомов воздуха: азота и кислорода.

Если эта идея верна, то новые процессы можно искать на ЛНС в ядро-ядерных взаимодействиях, что является достаточно сложной задачей из-за большой множественности вторичных частиц, образующихся в таких взаимодействиях. В космических лучах для решения мюонной загадки наиболее перспективны действующие эксперименты НЕВОД-ДЕКОР (ТРЕК) для измерения энерговыделения групп мюонов и IceCube и HAWC (а в будущем Байкал и КМ3Net) для измерения инклюзивного энергетического спектра мюонов.

Работа выполнена на Уникальной научной установке НЕВОД при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание, проект “Фундаментальные проблемы космических лучей и темная материя” (№ 0723-2020-0040)).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. A. Petrukhin, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **742**, 228 (2014).
2. E. V. Bugaev, A. Misaki, V. A. Naumov, T. S. Sinegovskaya, S. I. Sinegovsky, and N. Takahashi, Phys. Rev. D **58**, 054001 (1998).
3. A. G. Bogdanov, R. P. Kokoulin, Yu. F. Novoseltsev, R. V. Novoseltseva, V. B. Petkov, and A. A. Petrukhin, Astropart. Phys. **36**, 224 (2012).
4. P. Berghaus and C. Xu, in *Proceedings of the 32nd International Cosmic Ray Conference, Beijing, 2011*, Ed. by H. Chen (2011), Vol. 4, p. 103.
5. M. G. Aartsen *et al.* (IceCube Collab.), Astropart. Phys. **78**, 1 (2016).
6. C. Grupen, N.-O. Hashim, B. Jost, F. Maciuc, S. Luitz, A. Mailov, A.-S. Müller, A. Putzer, B. Rensch, H.-G. Sander, S. Schmeling, M. Schmelling, R. Tcaciu, H. Wachsmuth, Th. Ziegler, and K. Zuber, Nucl. Phys. B Proc. Suppl. **175–176**, 286 (2008).
7. The ALICE Collab., J. Cosmol. Astropart. Phys. **1**, 32 (2016).
8. A. G. Bogdanov, R. P. Kokoulin, G. Mannocchi, A. A. Petrukhin, O. Saavedra, V. V. Shutenko, G. Trinchero, and I. I. Yashin, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **588**, 189 (2008).
9. А. Г. Богданов, Д. М. Громушкин, Р. П. Кокouлин, Дж. Маннокки, А. А. Петрухин, О. Сааведра, Дж. Тринкоро, Д. В. Чернов, В. В. Шутенко, И. И. Яшин, ЯФ **73**, 1904 (2010) [Phys. At. Nucl. **73**, 1852 (2010)].
10. A. G. Bogdanov, R. P. Kokoulin, G. Mannocchi, A. A. Petrukhin, O. Saavedra, V. V. Shutenko, G. Trinchero, and I. I. Yashin, Astropart. Phys. **98**, 13 (2018).
11. G. Rodriguez (for the Pierre Auger Collab.), EPJ Web Conf. **53**, 07003 (2013).
12. H. P. Dembinski *et al.* (for the EAS-MSU, IceCube, KASCADE-Grande, NEVOD-DECOR, PierreAuger, SUGAR, Telescope Array, and Yakutsk EAS Array Collabs.), EPJ Web Conf. **210**, 02004 (2019).
13. H. P. Dembinski, Phys. At. Nucl. **82**, 644 (2019).
14. A. A. Petrukhin, Nucl. Phys. B Proc. Suppl. **212–213**, 235 (2011).
15. A. A. Petrukhin, in *Proceedings of the 32nd International Cosmic Ray Conference, Beijing, 2011*, Ed. by H. Chen (2011), Vol. 1, p. 50.
16. A. U. Abeysekara, A. Albert, R. Alfaro, C. Alvarez, J. D. Álvarez, R. Arceo, J. C. Arteaga-Velázquez, H. A. Ayala Solares, A. S. Barber, N. Bautista-Elivar, A. Becerril, E. Belmont-Moreno, S. Y. BenZvi, D. Berley, J. Braun, C. Brisbois, *et al.* Astrophys. J. **843**, 39 (2017).
17. E. A. Yurina, N. S. Barbashina, A. G. Bogdanov, S. S. Khokhlov, V. V. Kindin, R. P. Kokoulin, K. G. Kompaniets, G. Mannocchi, A. A. Petrukhin, V. V. Shutenko, G. Trinchero, and I. I. Yashin, Phys. At. Nucl. **82**, 620 (2019).
18. E. A. Zadeba, N. V. Ampilogov, N. S. Barbashina, A. G. Bogdanov, A. A. Borisov, D. V. Chernov, L. I. Dushkin, R. M. Fakhrutdinov, S. S. Khokhlov, R. P. Kokoulin, K. G. Kompaniets, A. S. Kozhin, V. V. Ovchinnikov, A. A. Petrukhin, V. A. Selyakov, V. V. Shutenko, and I. I. Yashin, JINST **9**, C08018 (2014).

## MUON PUZZLE IN COSMIC RAYS AND ITS POSSIBLE SOLUTION

A. A. Petrukhin<sup>1)</sup><sup>1)</sup>National Research Nuclear University “MEPhI”, Moscow, Russia

The history of discovery and investigations of muon and muon component of cosmic rays was full of various puzzles. The last of them is an increasing with energy of primary cosmic rays excess of muon bundles with large multiplicity, which has been detected in various experiments. The second aspect of muon puzzle is the excess of very high energy muons (more than 100 TeV). In this paper, various approaches to muon puzzle solution connected with measurements of energy characteristics of cosmic ray muon component are considered.