

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

Эффект Грейзена – Зацепина – Кузьмина: взгляд сверху и снизу

М.И. Панасюк

В 1966 г. были опубликованы работы К. Грейзена и независимо Г.Т. Зацепина и В.А. Кузьмина о существовании реликтового обрезания энергетического спектра ядер космических лучей предельно высоких энергий (КЛПВЭ), более 5×10^{19} эВ. В течение полувекковой истории экспериментальных исследований КЛПВЭ с помощью наземных установок было получено много данных о их энергетических спектрах, анизотропии и массовом составе. В 2016 г. начал осуществляться первый космический эксперимент, направленный на регистрацию КЛПВЭ. Обсуждаются следствия результатов этих экспериментальных исследований и перспективы их развития в связи с предложенной теоретической моделью эффекта Грейзена – Зацепина – Кузьмина.

Ключевые слова: космические лучи, широкие атмосферные ливни

PACS number: 98.70.Sa

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2017.05.038170>

Содержание

1. Введение (1000).
 2. Экспериментальные поиски эффекта Грейзена – Зацепина – Кузьмина (1003).
 3. Энергетический спектр космических лучей предельно высоких энергий (1004).
 4. Массовый состав космических лучей предельно высоких энергий (1005).
 5. Анизотропия космических лучей предельно высоких энергий и поиск их возможных источников (1006).
 6. Космические проекты по исследованию космических лучей предельно высоких энергий (1008).
 7. Заключение (1008).
- Список литературы (1009).

*Если эксперимент подтверждает теорию, это приятно.
Если не подтверждает — это интересно.
Я.Б. Зельдович*

1. Введение

Частицы космических лучей (КЛ) имеют огромный диапазон по шкале энергии: от $\sim 10^8$ эВ до по крайней мере $\sim 10^{21}$ эВ. Атомы КЛ лишены электронных оболочек, т.е., по сути, представляют собой полностью ионизованные атомы, или "голые ядра". Причина этого явления — взаимодействие атомов КЛ с веществом в процессе их переноса во Вселенной. Взаимодействуя с нейтральными частицами, атомы теряют электронные

оболочки в результате перезарядки. Расчёты показывают, что средний путь, который проходят атомы от места их генерации до Земли, достаточен для того, чтобы они могли потерять все орбитальные электроны вследствие взаимодействий с космической средой. Массовый состав КЛ также широк: от протонов, потоки которых доминируют, до сверхтяжёлых элементов.

Несмотря на более чем вековой период исследований КЛ, полного понимания их природы пока нет. Выяснение источников, механизмов ускорения и транспорта КЛ представляет собой актуальную проблему современной астрофизики, которая теперь является частью более широкого направления, названного *физикой астрочастиц* (astroparticle physics), объединяющей взаимосвязанные исследования заряженного компонента — ядер КЛ, гамма-астрономию и астрофизику нейтрино. При этом исследования КЛ предельно высоких энергий (КЛПВЭ), с энергиями более 10^{18} эВ, самых энергетичных частиц — ядер КЛ, рождающихся во Вселенной, имеют приоритетный характер ввиду высокой значимости актуальных фундаментальных проблем, связанных с ними.

Важнейшей физической характеристикой космических лучей является их энергетический спектр — зависимость между потоком частиц и их кинетической энергией.

В двойном логарифмическом масштабе спектр всех частиц КЛ может быть описан суперпозицией нескольких спектров. В первом приближении каждый последовательный участок спектра ядер КЛ отличается от предыдущего величиной показателя спектра и, как установлено в настоящее время, характерным изменением их массового состава. На рисунке 1 [1] приведён энергетический спектр КЛ по данным нескольких современных экспериментальных установок.

Наиболее достоверно экспериментально исследованное изменение наклона спектра всех частиц КЛ было описано Г.Б. Христиансенем и Г.В. Куликовым в 1956 г.

М.И. Панасюк. Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова,
Ленинские горы 1, стр. 2, 119234 Москва, Российская Федерация
E-mail: panasyuk@sinp.msu.ru

Статья поступила 6 июля 2017 г.

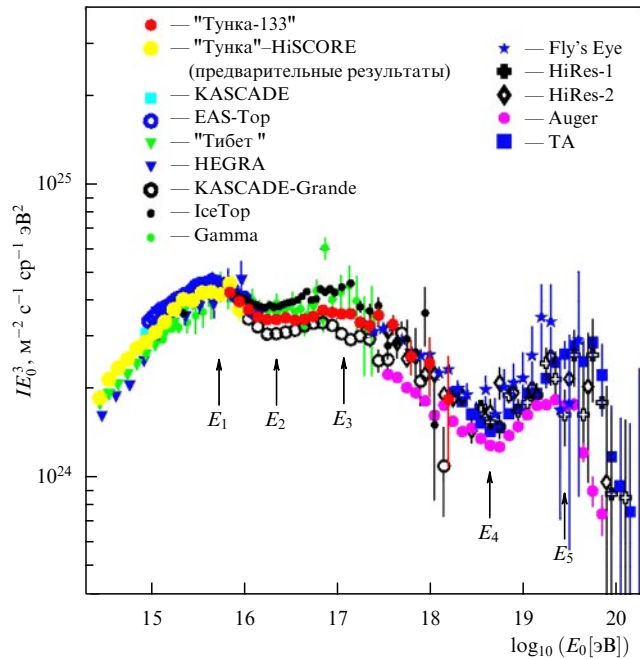


Рис. 1. Дифференциальный энергетический спектр КЛ по данным разных экспериментальных установок согласно [1]. (EAS-Top — детектор ШАЛ (Extensive Air Shower) над (on top) подземной лабораторией Гран-Кассо, HEGRA — High Energy Gamma Ray Astronomy.)

(так называемое астрофизическое колено Христиансена) [2] при $E \approx 3 \times 10^{15}$ эВ (обозначено как E_1 на рис. 1). В настоящее время благодаря измерениям на наземных установках широких атмосферных ливней (ШАЛ) установлено, что при $E > E_1$ начинается обогащение ядерного состава КЛ тяжёлыми ядрами, что не противоречит теоретическим модельным представлениям о регулярном диффузионном ускорении частиц КЛ на ударных волнах, образующихся при взрывах сверхновых звёзд в Галактике, впервые предложенным Г.Ф. Крымским [3] и развитым позднее в большом числе публикаций (см., например, [4–6]). При этом максимальная энергия ускоренных частиц не может превышать величину $E_{\max} \sim \sim BLZ \approx 10^{14}$ эВ, где B — напряжённость межзвёздного магнитного поля, оцениваемая в несколько мкГс, L — характерный размер области ускорения в магнитных полях межзвёздной среды, Z — заряд ядра частицы. Современные модели, основанные на эффекте усиления локального магнитного поля в ударных волнах от взрывов сверхновых за счёт взаимодействия с ними самих КЛ, позволили оценить максимальную энергию как $E_{\max} \approx 10^{17}$ эВ (см., например, [7]).

На рисунке 1 в области энергий $E > E_1$ спектр представлен по данным установок "Тунка-133" и TAIGA-HiSCORE (Hundred Square km Cosmic ORigin Explorer) в сравнении со спектрами по данным других экспериментов согласно [8]. Более сложный, чем это предполагалось ранее, характер спектра КЛ в этой области энергий является одним из главных результатов, полученных по данным установки "Тунка-133" [9]. Здесь в спектре КЛ наблюдаются две статистически обеспеченные особенности. При $E_2 \approx 2 \times 10^{16}$ эВ показатель наклона энергетического спектра уменьшается примерно на 0,2 [10], а при энергии $E_3 \approx 3 \times 10^{17}$ эВ показатель наклона спектра опять увеличивается примерно на 0,3 [9]. На рисунке 1

приведён также спектр, полученный на установке "Тунка-25" [11], предшественнице установки "Тунка-133". При $E \approx 8 \times 10^{16}$ эВ (см. ниже рис. 3) [9] в спектре "тяжёлых" ядер наблюдается излом, свидетельствующий о изменении ядерного состава КЛ.

Уже при $E = E_4 > 3 \times 10^{18}$ эВ наклон спектра всех частиц вновь становится более жёстким. Отметим, что по данным многих наземных установок (см., например, [12, 13]) обнаружено, что именно в этой области наблюдается появление более лёгкой фракции КЛ, что может быть указанием на присутствие внегалактического компонента при $E > 10^{18}$ эВ.

Приведённые выше спектральные характеристики КЛ при энергиях до $E \approx 10^{18}$ эВ не противоречат данным и других современных наземных установок, таких как KASCADE-Grande (KASCADE — аббр. от KArllsruhe Shower Core and Array DETector) [14], IceCube [15], а также Якутской комплексной установки по изучению ШАЛ [12].

Вариации показателя наклона энергетического спектра КЛ могут свидетельствовать о различных эффектах в КЛ, связанных как с их ускорением, транспортом и потерями, так и с пространственным распределением их источников в межзвёздной среде. Тем не менее экспериментальные данные в области энергий до 10^{18} эВ (характерное, зависящее от Z изменение наклонов спектра и изменение ядерного состава) не противоречат основной парадигме о галактической природе КЛ и определяющей роли сверхновых как основных ускорителей КЛ. При этом первое "колено" при $E = E_1$ соответствует началу обрезания потока лёгких ядер, а второе, при $E = E_3$ — потока тяжёлых (преимущественно ядер железа). В то же время эти экспериментальные результаты могут служить основой для дальнейшей модификации стандартного механизма ускорения космических лучей в остатках сверхновых, а также механизмов транспорта КЛ [3–6].

Средний наклон спектра КЛ в области энергий $E > 10^{15}$ эВ является довольно крутым (см. рис. 1), и поток космических лучей изменяется в широком диапазоне: от одной частицы на 1 м^2 в 1 с при энергии $\sim 10^{10}$ эВ и до одной частицы на 1 км^2 в 100 лет при энергии в несколько единиц 10^{20} эВ. Именно этот фактор ставит перед экспериментаторами трудную задачу — создание установок большой площади для достижения приемлемой статистики измерений. Это особенно критично для частиц КЛПВЭ с $E > 10^{18}$ эВ.

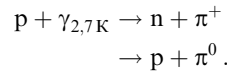
Первое событие — регистрация ШАЛ столь высокой энергии (6×10^{19} эВ) Джоном Линсли (John Linsley) и др. [16] — произошло в 1963 г. на американской установке Volcano Ranch (рис. 2). Стало очевидным, что во Вселенной есть астрофизические объекты, способные ускорить ядра КЛ до столь больших энергий.

В 1966 г., вскоре после пионерского эксперимента Дж. Линсли, Г.Т. Зацепин и В.А. Кузьмин [17] и независимо от них американский физик К. Грейзен [18] публикуют работы о возможном существовании обрезания спектра протонов на реликтовом космическом микроволновом излучении Вселенной (cosmic microwave background, CMB), оставшемся после Большого взрыва. В этих работах было показано, что для равномерно распределённых источников во Вселенной протоны КЛПВЭ при энергиях начиная с $E_5 = E_{\max} = 5 \times 10^{19}$ эВ эффективно взаимодействуют с реликтовым фоновым излучением, имеющим максимум интенсивности при 3,5 эВ.



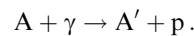
Рис. 2. Джон Линсли, первым зарегистрировавший ШАЛ КЛПВЭ с максимальной на начало 1960-х годов энергией — 6×10^{19} эВ.

Этот эффект был назван эффектом Грейзена – Зацепина – Кузьмина (ГЗК) (в англоязычной литературе GZK-cutoff — ГЗК-обрезание) в честь авторов работ [17, 18] (рис. 3). Протоны при неупругом взаимодействии с реликтовым фоном фотонов теряют до 10 % первоначальной энергии, рождая пионы и барионы:



Иными словами, при энергиях в области ГЗК-обрезания должно наблюдаться уменьшение потока протонов КЛ. Было оценено максимальное расстояние D_{max} , за пределами которого приход к Земле протонов столь высоких энергий становился бы невозможным. Оно оказалось в пределах (в зависимости от энергии частиц) нескольких десятков или сотен Мпк. Так, для протона КЛПВЭ с $E = 10^{20}$ эВ величина $D_{\text{max}} \approx 100$ Мпк.

Для более тяжёлых ядер (A) длина свободного пробега до полного поглощения определяется фоторасщеплением ядер химических элементов (см., например, [19]) на ультрафиолетовом и инфракрасном фоне реликтовых фотонов:



Вследствие этого процесс пробег тяжёлых ядер становится больше, чем пробег лёгких. Так, для ядер железа с $E = 10^{20}$ эВ $D_{\text{max}} \approx 1000$ Мпк. Следствием этих реакций

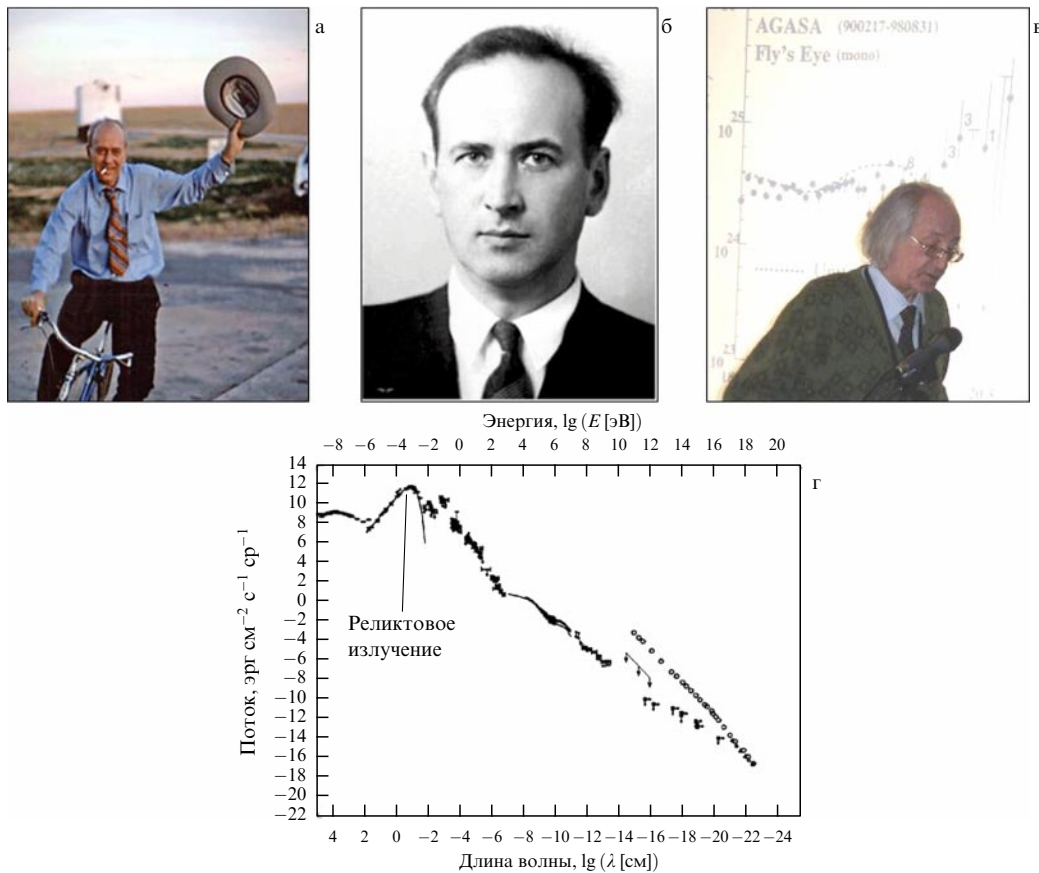


Рис. 3. Авторы теоретической модели обрезания спектра КЛПВЭ: К. Грейзен (а), Г.Т. Зацепин (б), В.А. Кузьмин (в). (г) Спектр электромагнитного излучения Вселенной; стрелкой отмечен максимум при температуре 2,7 К, соответствующий реликтовому излучению при длине волны 0,1 см.

также должно быть обрезание спектра тяжёлых ядер КЛПВЭ при энергиях, сопоставимых с энергией обрезания для протонов при $E_{\max} = E_5$.

Очевидно, что только эксперимент именно в указанной области энергий КЛ по определению энергетических характеристик и массового состава КЛПВЭ может дать ответ относительно справедливости выводов такой модели. Немаловажно также исследование анизотропии прихода таких частиц к Земле: выявленная анизотропия потоков КЛ может дать информацию о локализации их источников.

Таким образом, проблематика изучения КЛПВЭ актуальна — исследование самых энергетичных частиц во Вселенной дадут ответ на такие важные для астрофизики вопросы, как:

— какие именно астрофизические объекты ответственны за генерацию КЛПВЭ, т.е. способны ускорять частицы вплоть до энергий 10^{20} эВ, и в каких областях Вселенной они расположены?

— каков ядерный состав этих частиц, отличается ли он от состава галактических космических лучей и солнечных КЛ?

История экспериментальных исследований КЛПВЭ в области возможного ГЗК-обрезания потоков достаточно интересна и драматична, поэтому следует остановиться на ней более подробно.

2. Экспериментальные поиски эффекта Грейзена – Зацепина – Кузьмина

Установки с большими эффективными площадями детекторов стали создаваться в 1960–1970-е годы. Среди них — построенная в Якутске установка ШАЛ-13 площадью в 13 км^2 . Её первые результаты на основе небольшой статистики были опубликованы в 1971 г., а в 1973 г., но уже на несколько большей статистике событий были представлены новые данные [20]. На рисунке 4 наряду с результатами измерений интегрального спектра КЛПВЭ Якутской установки приведены данные зарубежных установок. Данные установок Volcano Ranch, SUGAR (Sydney University Giant Air-shower Recorder) и ШАЛ-13 не позволяли сделать вывод о наличии ГЗК-обрезания, поскольку статистика событий ШАЛ КЛПВЭ была недостаточно велика для получения однозначного заключения.

Но уже к началу 1980-х годов на фоне увеличенной статистики данные Якутской установки, как отмечено в [21], не противоречили существованию реликтового обрезания КЛПВЭ. С другой стороны, данные установок SUGAR и Haverah Park свидетельствовали об отсутствии такого обрезания. Они регистрировали довольно значительное количество событий с энергией более 10^{20} эВ (рис. 5).

В 1985 г. данные Якутской установки о наличии укращения спектра при энергиях более 10^{19} эВ были подтверждены установкой Fly's Eye в США, которая регистрировала ШАЛ КЛПВЭ по их флуоресцентному свечению в атмосфере — калориметрическим методом.

В 1980-е годы в Японии начала создаваться установка большой светосилы на базе компактной установки Akeno. В 1985 г. начались наблюдения на Akeno-20 площадью около 20 км^2 , а 1992 г. была запущена установка AGASA (Akeno Giant Air Shower Array) площадью $\approx 100 \text{ км}^2$. Данные этой установки впечатляющи:

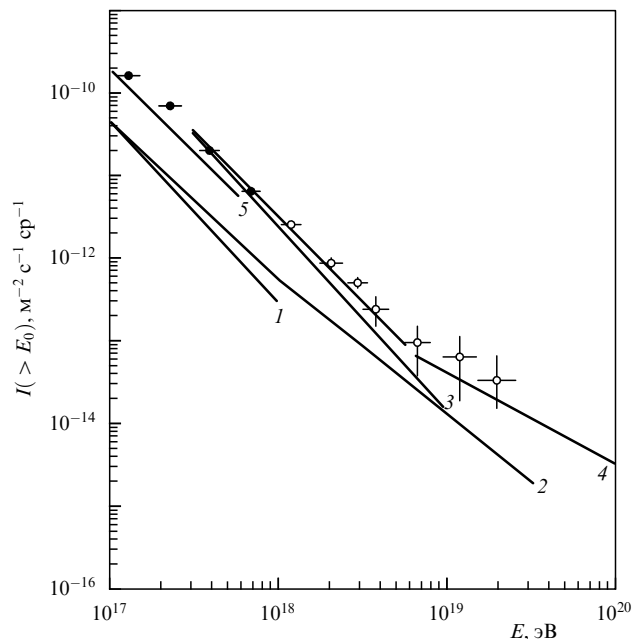


Рис. 4. Интегральные энергетические спектры КЛ по данным, опубликованным к 1973 г., демонстрирующие отсутствие ГЗК-обрезания при $E > 10^{19}$ эВ согласно [20]. Кружки — данные Якутской установки (ШАЛ-13). Линия 1 — данные установки AGASA (1961 г.), линия 2 — Volcano Ranch (1963 г.), 3 — La Pointe (1968 г.), 4 — SUGAR (1970 г.), 5 — Haverah Park (1971 г.).

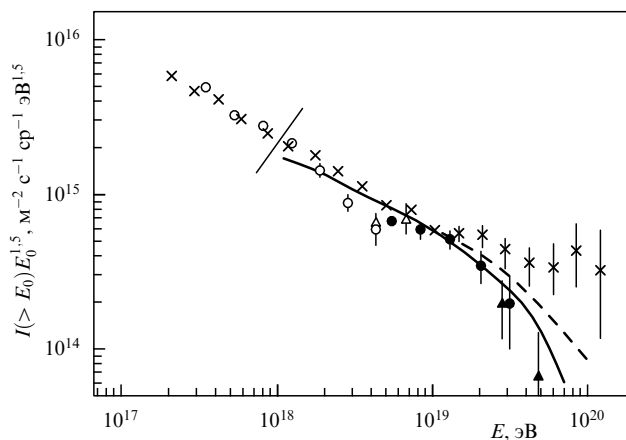


Рис. 5. Интегральные энергетические спектры КЛ по данным к 1985 г. Кружки и треугольники — данные Якутской установки, как на рис. 3, косые кресты — Haverah Park. Кривые — результаты расчёта [22] для внегалактических источников КЛ.

было зарегистрировано достаточно много событий ШАЛ КЛПВЭ с $E > 10^{20}$ эВ. Эти данные заинтриговали научную общественность отсутствием предсказанного теорией механизма реликтового обрезания спектра КЛПВЭ. Однако они принципиально отличались от результатов установки HiRes (модернизированная Fly's Eye в США) и Якутской установки, которые указывали на существования такого обрезания спектра КЛПВЭ.

В конце 1980-х годов появились идеи строительства крупномасштабных наземных установок для регистрации ШАЛ КЛПВЭ с целью обеспечения высокой статистической значимости измерений на "конце" спектра КЛ.

Проект ШАЛ-1000, инициированный в России Г.Б. Христансеном в 1990-е годы, не был реализован по

экономическим причинам. В 2000 г. приступили к работе построенная в Аргентине крупная установка Pierre Auger Observatory (Auger), предложенная Дж. Крониным (J. Cronin) и А. Ватсоном (A. Watson), а также Telescope Array (TA) на базе флуоресцентной установки HiRes в штате Юта в США.

В 2007 г. на международной конференции обе международные коллаборации, Auger и TA, одновременно объявили о наличии статистически значимого изменения наклона спектра КЛПВЭ при энергиях более нескольких единиц 10^{19} эВ [23, 24]. Именно эти результаты дали мощный импульс как дальнейшим исследованиям КЛПВЭ, так и интерпретации полученных данных.

Основными физическими характеристиками КЛ, необходимыми для верификации теоретических моделей, являются: энергетический спектр, ядерный состав и анизотропия. Необходимо учитывать, что при распространении в межзвёздной среде частицы КЛПВЭ теряют энергию во взаимодействиях с фоновыми излучениями (главным образом в процессах фоторасщепления ядер и фоторождения пионов протонами). Это может привести к искажению как первоначального состава, так и энергетического спектра частиц, ускоренных в источниках, и тем самым затруднить выяснение природы КЛ.

Остановимся более подробно на тех экспериментальных данных по измерениям КЛПВЭ, которые существуют сегодня, и проблемах, связанных с их интерпретацией.

3. Энергетический спектр космических лучей предельно высоких энергий

На рисунке 6 представлены скомпилированные результаты измерений дифференциального энергетического спектра КЛ при энергиях более 10^{16} эВ, согласно [25]. Несмотря на то что по данным Auger и HiRes наблюдается изменение наклона степенного спектра всех частиц с пологого на более крутой ($-4,3$ (Auger), $-4,7$ (HiRes)) и положение области изменения спектрального индекса близко к теоретической оценке ГЗК-обрезания 5×10^{19} эВ, вопросы к точности определения спектральных характеристик КЛПВЭ на этих установках остаются. Это нетрудно увидеть из данных, приведённых на рис. 6, где показан спектр Якутской установки, получен-

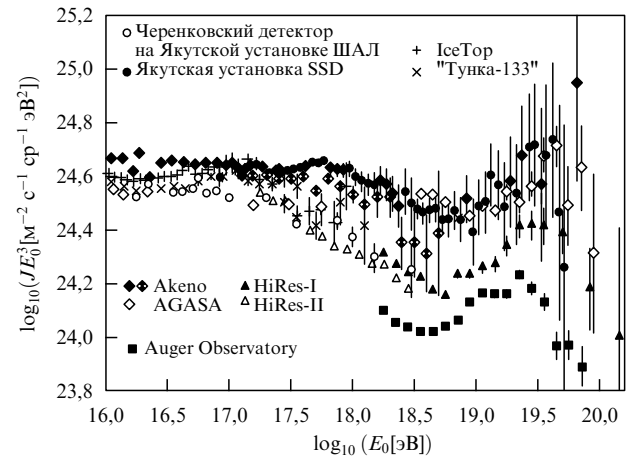


Рис. 6. Дифференциальный энергетический спектр КЛ по данным разных наземных установок. Наряду со статистической неопределённостью можно отметить различие в определении абсолютной интенсивности частиц КЛПВЭ по данным наземных установок. (Рисунок любезно предоставлен М.И. Правдиным [25].)

ный в 2017 г. с новой оценкой энергии. Можно сделать вывод, что данные этой установки не противоречат релятивистскому обрезанию спектра КЛ, так же как и данные TA и Auger, но по интенсивности якутский спектр выше, чем на других установках. Спектр Якутской установки хорошо согласуется со спектром AGASA, за исключением области энергий $\gtrsim 10^{20}$ эВ. Потоки КЛПВЭ по данным Auger меньше, чем по данным HiRes. Еще большее различие наблюдается в сравнении с современными данными Якутской установки. Таким образом, вопросы точности измерений энергетического спектра КЛПВЭ наземными установками, безусловно, остаются.

В связи с этим следует упомянуть работу [26], в которой посредством "рекалибровки" энергетической шкалы разных установок удалось добиться довольно хорошего согласования результатов измерений КЛПВЭ на этих установках (рис. 7).

Результаты работы [26] свидетельствует, в первую очередь, о необходимости совершенствования моделей взаимодействия частиц, используемых при анализе экс-

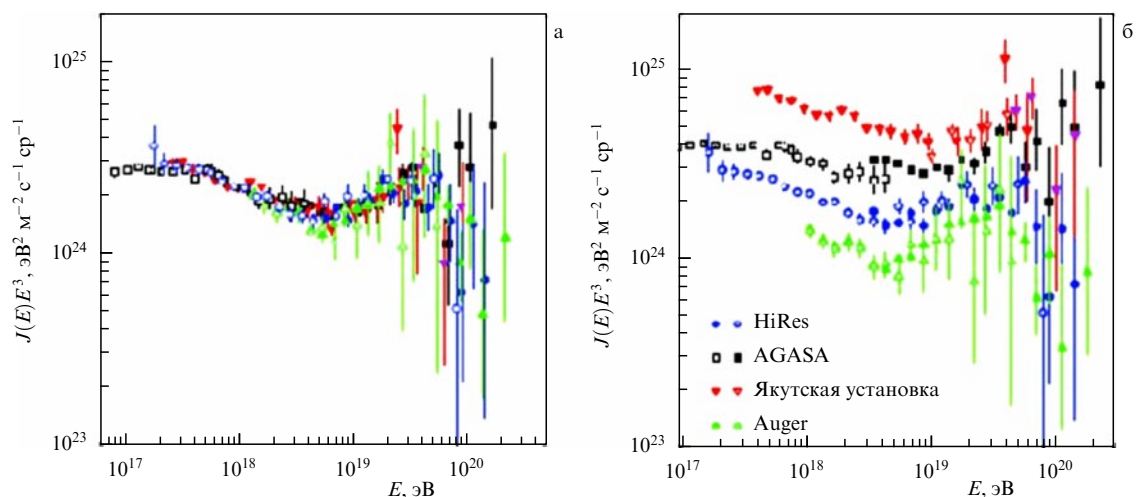


Рис. 7. Результаты [26] "рекалибровки" (а) первичных экспериментальных данных разных установок (б).

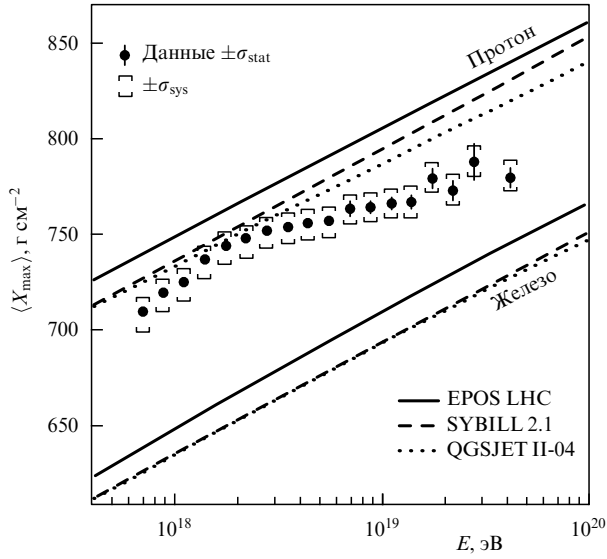


Рис. 8. Глубина максимума X_{\max} ШАЛ КЛПВЭ, характеризующая ядерный состав КЛ, по данным установки Auger: наблюдается тенденция к обогащению тяжёлыми элементами с увеличением энергии [27]. Различными линиями показаны результаты расчёта в рамках разных моделей, указанных на рисунке.

периментальных данных. Основная проблема здесь — отсутствие ускорительных данных по сечениям взаимодействия частиц при столь больших энергиях. Процесс восстановления типа и энергии первичной частицы по экспериментальным данным требует, чтобы были известны процессы взаимодействия адронов в области предельно высоких энергий КЛ. На сегодняшний день таких сведений нет: очевидно, что экспериментально определённая верхняя граница спектра КЛПВЭ достигает по крайней мере 3×10^{20} эВ, что примерно на три порядка выше эквивалентной энергии, которая получена на Большом адронном коллайдере (Large Hadron Collider). Поэтому современные модели адронных взаимодействий опираются на данные, полученные при более низких энергиях, таким образом, результаты восстановления событий ШАЛ в рамках разных расчётных моделей могут существенно различаться.

4. Массовый состав космических лучей предельно высоких энергий

Первые опубликованные данные по массовому составу КЛПВЭ, полученные на установках Auger и TA, противоречили друг другу: если по данным Auger состав характеризовался доминированием протонов при энергиях $E < 3 \times 10^{18}$ и обогащением более тяжёлыми элементами при переходе к большим энергиям (рис. 8) [27], то по данным TA состав интерпретировался только как доминирование протонов в КЛПВЭ (рис. 9) [28]. После создания совместной рабочей группы Auger и TA по анализу данных результаты измерений состава сблизилсь в пределах систематических ошибок (рис. 10 [29]). Однако сравнивать непосредственно результаты TA и Auger, как отмечают коллаборации, нельзя, так как они используют разные методы анализа данных.

Данные установок Auger, TA и Якутской установки позволили выявить новую особенность формы энергетического спектра КЛПВЭ (рис. 11) — появление эффекта

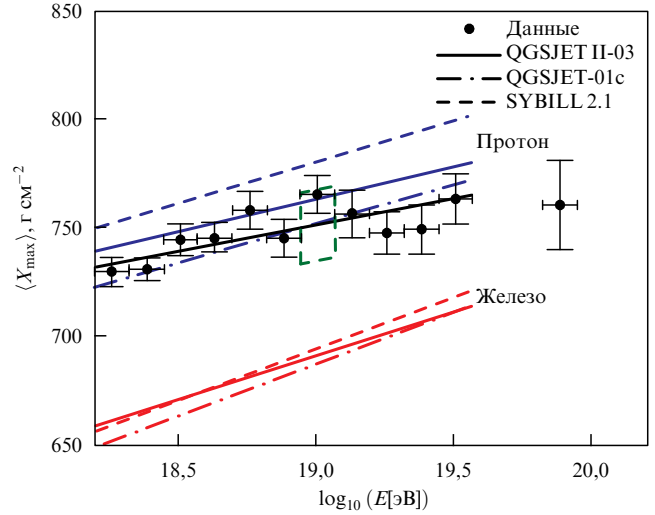


Рис. 9. Глубина максимума X_{\max} ШАЛ КЛПВЭ, характеризующая ядерный состав КЛ, по данным установки TA (2015 г.): наблюдается доминирование лёгкого компонента при энергиях вплоть до 10^{19} эВ [28]. Показаны также результаты расчёта в рамках разных моделей.

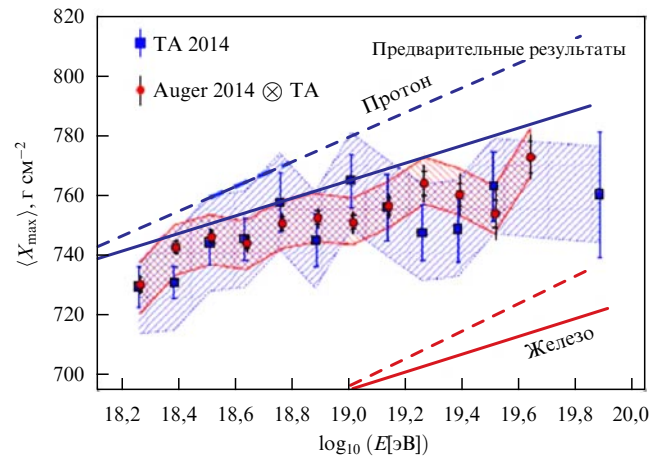


Рис. 10. Результаты совместного рассмотрения данных установок Auger и TA: отмечается согласие в пределах ошибок измерения данных по глубине максимума X_{\max} ШАЛ КЛПВЭ [29].

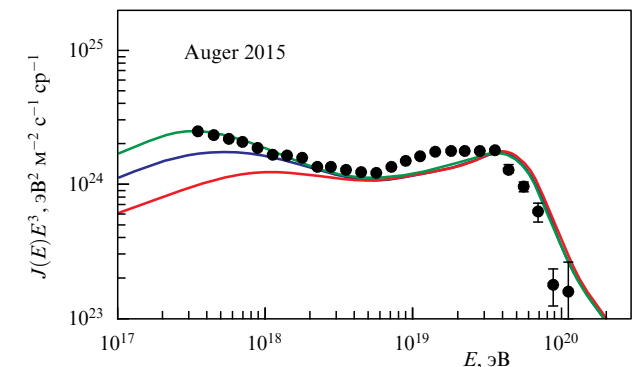


Рис. 11. Формирование структуры "провала" (dip) при различных модельных параметрах (кривые) [30] для однородно распределённых источников КЛПВЭ на примере экспериментальных данных установки Auger (кружки).

локального ужесточения спектра — "ступни" в диапазоне $E_4 < E < E_5$ ($10^{18} - 5 \times 10^{19}$ эВ), обусловленного, согласно

[30], потерями протонов в поле реликтового излучения в процессе образования электрон-позитронных пар. Указанная спектральная особенность — провал (dip) в терминологии [30] — непосредственно примыкает к области обрезания спектра за пределами $E > E_5 = 5 \times 10^{19}$ эВ. В связи с этим накладываются ограничения на возможность выводов, касающихся массового состава частиц: данный механизм потерь частиц может быть актуальным только при доминировании лёгкого компонента — протонов КЛПВЭ — в этом диапазоне энергий. Этот факт можно естественным образом интерпретировать как начало доминирования внегалактического источника КЛ, состоящего из лёгких ядер, преимущественно протонов.

Однако следует заметить, что опубликованные недавно относящиеся к области "ступни" данные установки Auger [49] для КЛПВЭ в диапазоне энергий $10^{18} - 10^{19}$ эВ, основанные на изучении корреляции между глубиной максимума X_{\max} ШАЛ и числом мюонов, указывают скорее на смешанный, чем на чисто протонный, состав КЛПВЭ. Данные другой установки, ТА [38], не противоречат модели провала [30]: согласно данным этой установки вклад протонов в смешанном потоке КЛПВЭ составляет более 50%. С другой стороны, можно отметить, что наблюдение исключительно тяжёлого компонента вблизи Земли едва ли возможно вследствие процесса фоторасщепления первичного компонента КЛПВЭ.

Неоднозначность в интерпретации современных экспериментальных данных по КЛПВЭ в части их ядерного состава приводит к необходимости рассмотрения и альтернативных к эффекту ГЗК-обрезания механизмов формирования энергетического спектра. Действительно, если обогащение тяжёлыми элементами состава КЛПВЭ с возрастанием их энергии подтвердится, то данный факт может указывать на спектр частиц, зависящий от Z (или от жёсткости) частиц. В свою очередь это может быть указанием на доминирование процесса ускорительных механизмов частиц в астрофизических объектах, подобных предлагаемым для галактических космических лучей, а именно: ускорение на ударных волнах в остатках сверхновых [3–6], но для объектов значительно большей энергоёмкости. Экспериментальной верификацией этих двух сценариев формирования спектра КЛПВЭ могут быть только прецизионные измерения их массового состава, что в настоящее время, как показано выше, недоступно.

5. Анизотропия космических лучей предельно высоких энергий и поиск их возможных источников

Поиск источников КЛПВЭ по направлениям прихода ШАЛ возможен только в случае протонов и лёгких ядер. Действительно, ларморовский радиус протонов с $E = 10^{19}$ эВ в магнитном поле напряжённостью в несколько мкГс (характерная величина для межзвёздного пространства) составляет около 50 кпк, что более чем в два раза превышает размеры Галактики. Для ядер железа соответствующий ларморовский радиус на порядок меньше — около 2 кпк. Тяжёлые ядра при равных полных энергиях имеют ларморовский радиус, меньший, чем более лёгкие, поэтому траектории их движения в межзвёздных полях будут отклоняться от первоначаль-

ного направления их выхода из источника. Именно поэтому, имея в виду лёгкие ядра КЛПВЭ, можно говорить о "протонной астрономии", способной визуализировать астрофизические объекты Вселенной, ответственные за их генерацию.

Среди возможных источников КЛПВЭ рассматриваются разные астрофизические объекты. В первую очередь это активные ядра галактик (Active Galactic Nuclei — AGN), звездообразующие галактики (Starburst galaxies), сейфертовские галактики и гамма-всплески (gamma ray bursts — GRB) (см., например, [33]). Среди AGN наиболее вероятный кандидат в источники КЛПВЭ — так называемые радиогалактики (Radiogalaxies) — особый класс AGN с интенсивным локализованным синхротронным излучением. Это тип астрофизических объектов, в которых кинетическая энергия струй, инжектированных из центра AGN, достаточна для ускорения частиц с характерными энергиями КЛПВЭ (см., например, [34, 35]). Выбор именно таких астрофизических источников обусловлен допущением того, что для них выполняется условие Хилласа [22], согласно которому ларморовский радиус R частицы КЛПВЭ не должен превышать размера области ускорения (как было отмечено в разделе 2, это же условие определяет и максимальную энергию галактических КЛ (10^{17} эВ), ускоряемых в остатках сверхновых).

Поиск возможных источников КЛПВЭ с $E > 5,7 \times 10^{19}$ эВ на северной установке ТА привёл к обнаружению избытка ШАЛ КЛПВЭ (всего было зарегистрировано 109 событий ШАЛ), приходящих из локализованной области в северном полушарии в интервале зенитных углов около 20° . Эта область была названа горячим пятном (hot spot) (рис. 12) [36]. Интерес к этому экспериментальному факту был велик, поскольку непосредственно в области горячего пятна не наблюдалось каких-либо значимых астрофизических объектов, которые можно было бы рассматривать в качестве источников лёгких ядер КЛПВЭ.

В ряде работ (см., например, [37]) в качестве возможного источника КЛПВЭ северного (ТА) горячего пятна рассматривалась "близлежащая" звездообразующая галактика M82 (см. рис. 12) с расположенной в ней чёрной

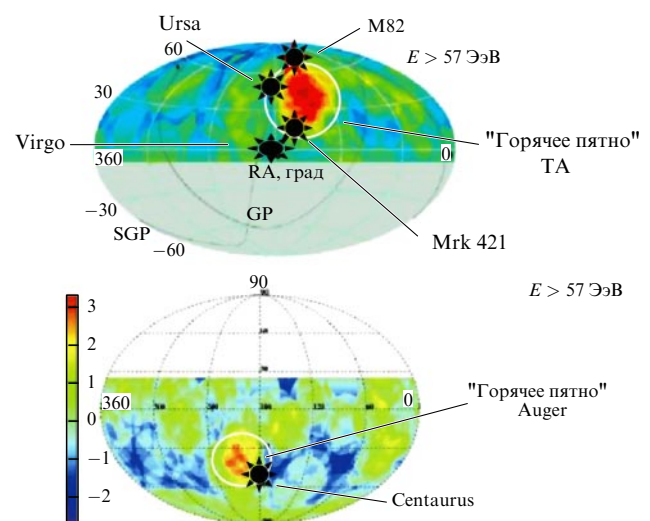


Рис. 12. Анизотропия (отмечена кружками) ШАЛ КЛПВЭ по данным установок Auger [38] в Южном полушарии и ТА [36] в проекции на северное и южное полушария звёздного неба. Звёздами показаны звёздные скопления и астрофизические объекты, наиболее близко расположенные к "горячим пятнам".

дырой среднего размера ($10^2 - 10^4$ масс Солнца). Среди возможных ускорительных механизмов КЛПВЭ в подобных галактиках рассматриваются, как правило, процессы ускорения на ударных волнах, связанных с аккрецией вещества на чёрную дыру. Тем не менее "рядом" с горячим пятном ТА расположены также мощный звёздный кластер Ursa (на расстоянии 20 Мпк) и блазары Mrk 421. Эти объекты также рассматриваются в качестве источников КЛПВЭ (см., например, [38, 39]).

Коллаборация Auger исследовала анизотропию КЛПВЭ в направлении созвездия Центавра А (Cen A) — наиболее близкой к Земле радиогалактики (см. рис. 12), которая на протяжении длительного времени также рассматривается в качестве вероятного источника частиц КЛПВЭ. Всего было локализовано 157 событий ШАЛ КЛПВЭ с $E > 5,7 \times 10^{19}$ эВ. Из них некоторое количество (около 9%) действительно было обнаружено с проявлением узкой угловой направленности в пределах 15° в направлении на Cen A [40], что, конечно, не может служить достаточным основанием для идентификации источника частиц.

Отсутствие строго коррелированного пространственного совпадения северного (ТА) и южного (Auger) горячих пятен с близлежащими мощными астрофизическими объектами — возможными источниками КЛПВЭ, наподобие перечисленных выше, свидетельствует скорее в пользу более тяжёлого состава КЛПВЭ, чем лёгкого, как следствие более сильного отклонения тяжёлых ядер, чем протонов, в магнитных полях. Это представляет собой важный вывод относительно самой природы КЛПВЭ и противоречит механизму формирования "ступни" в энергетическом спектре КЛПВЭ (в которой должен присутствовать именно лёгкий состав). Можно отметить, что однозначного соответствия между данными по анизотропии и имеющимися на сегодня результатами по массовому составу КЛПВЭ нет.

Возникает вопрос: если данные установок, регистрирующих КЛПВЭ, не представляют очевидных доказательств существования корреляции между выделенной анизотропией КЛПВЭ (координатами горячих пятен) и расположением астрофизических объектов, то означает ли это "закрытие" моделей их генерации, связанных с ускорением их в таких источниках (модели типа сверху – вниз (top – down))? Пока "закрытие" астрофизических моделей обсуждать преждевременно. Если обратиться к космическим лучам в нашей Галактике, то и история их экспериментальных исследований, и уже накопленные экспериментальные данные не только не позволяют на нынешнем этапе отказываться от астрофизических моделей (процесс генерации и ускорения КЛ в остатках сверхновых), но и во многих аспектах их поддерживают (см. введение). Поэтому вполне естественной выглядит парадигма о существовании аналогичных процессов и в других галактиках. Следует лишь заметить, что на случай "закрытия" существуют альтернативные модели генерации КЛПВЭ (модели снизу – вверх (bottom – up)), а именно: распад гипотетической сверхтяжёлой частицы тёмной материи (см., например, [41]) либо аннигиляция топологических дефектов типа космических струн (см., например, [42]).

Дополнительную очень важную информацию о источниках КЛПВЭ могут дать исследования гамма-квантов и нейтрино — вторичных частиц, генерированных КЛПВЭ в процессе их транспорта. В отличие от КЛПВЭ, эти вторичные частицы не испытывают воздействия межзвёздных магнитных полей в процессе их транспорта и могут быть использованы как эффектив-

ный "астрономический" инструмент идентификации источников КЛПВЭ. Однако анализ альтернативных моделей и других видов космических излучений выходит за рамки данной статьи.

Из вышеприведённых экспериментальных данных, полученных на основе анализа ШАЛ КЛПВЭ, следует, что основная проблема их интерпретации и сравнения с существующими моделями сводится к недостаточной высокой статистической и, возможно, систематической точности измерений. Эффективная площадь крупнейшей на сегодня установки Auger в Южной Америке около 3000 км^2 . Очевидно, что создание таких гигантских установок сталкивается не только с их затратным инфраструктурным обеспечением, но и с ограничением по количеству мест на поверхности Земли, где можно обеспечить их эффективное использование. К последним факторам относятся и климатические условия, и обеспечение безопасности, и доступность для работы персонала.

Поэтому не альтернативным, а скорее комплементарным представляется использование космических средств регистрации КЛПВЭ, предоставляющих большие возможности для экспериментаторов с точки зрения обеспечения приемлемой статистики измерений КЛПВЭ.

Космический метод измерений КЛПВЭ впервые был предложен Дж. Линсли (J. Linseley) и Р. Бенсоном (R. Benson) [43] в 1981 г. Идея этого метода основана на регистрации флуоресцентного излучения ШАЛ КЛПВЭ в атмосфере ультрафиолетовым телескопом-концентратором, размещённым на космическом аппарате (рис. 13). Сопутствующее черенковское излучение ШАЛ КЛПВЭ может служить триггером для начала измерений ШАЛ, а также дать дополнительную информацию о траектории самого ШАЛ.

Оценки показывают, что при умеренных габаритах космических телескопов и относительно низких орбитах космических аппаратов можно регистрировать КЛПВЭ на площадях, сопоставимых с таковыми для наземных установок или даже значительно их превосходящих, иными словами, добиться приемлемой для однозначных выводов экспозиции и тем самым статистики измерений. Кроме того, орбитальные измерения КЛПВЭ, в отличие от наземных, позволяют регистрировать частицы со всей небесной сферы. Рассмотрим основные нацеленные на изучение КЛПВЭ космические проекты, развиваемые в настоящее время.

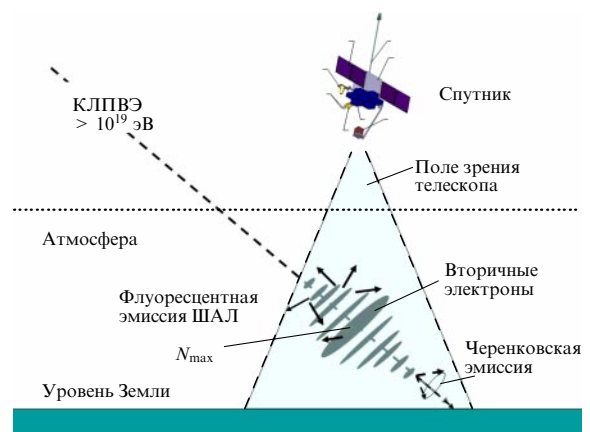


Рис. 13. Принцип космического метода регистрации ШАЛ КЛПВЭ: атмосфера Земли используется в качестве детектора флуоресцентного излучения — результата взаимодействия вторичных электронов ШАЛ КЛПВЭ с атомами воздуха.

6. Космические проекты по исследованию космических лучей предельно высоких энергий

Вскоре после опубликования идеи Дж. Линсли [43] появился проект космической установки, основанной на схеме оптического телескопа, состоящего из трёх линз Френеля с широким полем зрения — OWL (Orbiting Wide-angle Light collectors) [44]. Этот проект не был осуществлён, но на его основе появился другой проект, предложенный Ливьо Скарси (Livio Scarsi) — EUSO (Extreme Universe Space Laboratory) [45]. Схема этого телескопа приведена на рис. 14. С помощью такого орбитального широкопольного телескопа с апертурой 60° возможно наблюдение КЛПВЭ на площади атмосферы не менее 10^4 км^2 при высоте орбиты космического аппарата около 400 км. Это соответствует геометрическому фактору установки около $2 \times 10^4 \text{ км}^2 \text{ ср год}$. Данный проект, однако, также не осуществлён к настоящему времени.

Другой подход к созданию орбитальных детекторов для регистрации КЛПВЭ, предложенный в [46, 47], основан на конструкции телескопа, состоящего из зеркала-концентратора с фотоприёмником, расположенным в его фокусе. Схематическое изображение такого телескопа, ставшего основой отечественных проектов ТУС (Трековая установка) и КЛПВЭ, приведено на рис. 15. Эксперимент ТУС начал осуществляться в 2016 г. на спутнике "Ломоносов", запущенном 28 апреля 2016 г. на солнечно-синхронную орбиту высотой около 500 км. Зеркало френелевского типа площадью 2 м^2 телескопа ТУС концентрирует поток ультрафиолето-

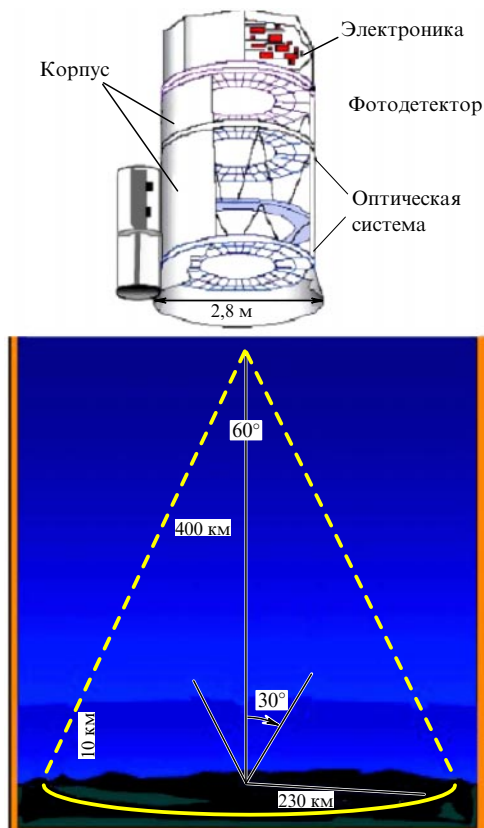


Рис. 14. Проект орбитального телескопа EUSO [44].

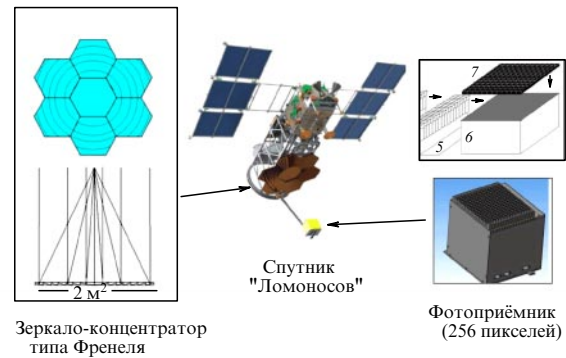


Рис. 15. Основные составные части орбитального телескопа ТУС, установленного на спутнике "Ломоносов".

вого (УФ) излучения на фотоприёмник, состоящий из 256 фотоумножителей, которые формируют изображение трека ШАЛ в атмосфере. Проекция каждого пикселя на нижние слои атмосферы составляет $5 \times 5 \text{ км}$, общая площадь обзора — $80 \times 80 \text{ км}$. Детальное описание телескопа ТУС можно найти в [48].

Основная цель эксперимента ТУС — проверка самой возможности регистрации частиц КЛПВЭ с использованием атмосферы Земли в качестве гигантского детектора. Сложность проведения такого эксперимента заключается в наличии большого количества источников фона как транзитного, так и квазистационарного УФ-излучения. К первым относятся транзитные световые события (Transient Luminous Events) в верхних слоях тропосферы (высоты в несколько десятков километров), вспышки молний в приземном слое атмосферы, УФ-следы метеоров и нейтральных пылинок, а также биолюминесценция. Среди квазистационарных УФ-излучений в атмосфере можно отметить авроральные свечения, антропогенные источники света. Наличие такого "многокомпонентного" атмосферного фона делает нетривиальной задачу выявления УФ-сигналов реальных ШАЛ КЛПВЭ.

Тем не менее уже первые полученные результаты эксперимента ТУС на спутнике "Ломоносов" демонстрируют принципиальную возможность выделения ШАЛ КЛПВЭ при наличии сложного атмосферного фона [49].

В настоящее время работа телескопа ТУС на борту спутника "Ломоносов" продолжается. Следующий, более масштабный проект — КЛПВЭ, основанный на том же принципе, предназначен для реализации на Международной космической станции. По сравнению с диаметром телескопа ТУС диаметр его зеркала-концентратора увеличен до 10 м. В настоящее время конструкция проекта КЛПВЭ модифицирована с целью увеличения его геометрического фактора. Эти установки предоставляют исследователям космических лучей предельно высоких энергий принципиально новый инструментарий для их изучения.

7. Заключение

Теоретическая работа Грейзена – Зацепина – Кузьмина о реликтовом обрезании энергетического спектра КЛПВЭ сыграла выдающуюся роль в развитии экспериментальных исследований самых энергетичных частиц, существующих во Вселенной, известных к настоящему времени. Эта модель стимулировала как создание широко-масштабных установок на поверхности Земли, так и развитие космических методов исследований КЛПВЭ. В

отличие от наземных установок, предоставивших ряд значительных результатов, космические проекты находятся на первоначальном этапе реализации. Особая значимость космических экспериментов, отличающая их от наземных, заключается в возможности обзора всей небесной сферы и увеличения статистики измерений благодаря большей, по сравнению с площадью наземных установок, эффективной площади детектора ШАЛ КЛПВЭ, которым является сама атмосфера Земли.

Следует подчеркнуть: совокупность имеющихся на сегодня данных наземных установок не может дать исчерпывающего ответа о природе наблюдающихся частиц КЛПВЭ, включая наличие ГЗК-обрезания энергетического спектра. Дальнейшее развитие и сочетание наземных и космических измерений КЛПВЭ должны способствовать дальнейшему прогрессу исследований в этой актуальной области астрофизики космических лучей.

Благодарности. Автор настоящей статьи в течение многих лет работал вместе с Г.Т. Зацепиным, который, будучи заведующим кафедрой космических лучей на физическом факультете Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, успешно "погружал" нас, студентов и сотрудников, в актуальные проблемы астрофизики космических лучей. Благодаря этому мы в Московском университете смогли сделать, в частности, многое из того, что представлено в данной статье. Поэтому наша благодарность ГТ, так мы звали этого выдающегося человека, — наши научные результаты в астрофизике космических лучей.

Автор благодарен М.И. Правдину и Л.А. Кузьмичеву за предоставленную возможность обсуждения с ними результатов анализа данных наземных установок по изучению космических лучей.

Список литературы

1. Prosin V V et al. *EPJ Web Conf.* **121** 03004 (2016)
2. Куликов Г В, Христиансен Г Б *ЖЭТФ* **35** 635 (1958); Kulikov G V, Christiansen G B *Sov. Phys. JETP* **8** 441 (1959)
3. Крымский Г Ф *ДАН СССР* **234** 1306 (1977); Krymskii G F *Sov. Phys. Dokl.* **22** 327 (1977)
4. Bell A R *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **182** 147 (1978)
5. Бережко Е Г, Крымский Г Ф *УФН* **154** 49 (1988); Berezhko E G, Krymskii G F *Sov. Phys. Usp.* **31** 27 (1988)
6. Berezhko E G *Adv. Space Res.* **41** 429 (2008)
7. Völk H J, Berezhko E G, Ksenofontov L T *Astron. Astrophys.* **433** 229 (2005)
8. Prosin V V et al. *JPS Conf. Proc.* **9** 010009 (2016)
9. Prosin V V et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **756** 94 (2014)
10. Berezhnev S F et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **692** 98 (2012)
11. Budnev N et al. *Astropart. Phys.* **50–52** 18 (2013)
12. Knurenko S P et al., arXiv:1310.1978
13. Kampert K-H, Unger M *Astropart. Phys.* **35** 660 (2012); arXiv:1201.0018
14. Apel W D et al. *Astropart. Phys.* **36** 183 (2012)
15. Aartsen M G et al. (IceCube Collab.) *Phys. Rev. D* **88** 042004 (2013)
16. Linsley J, Scarsi L, Rossi M *Phys. Rev. Lett.* **6** 485 (1961)
17. Зацепин Г Т, Кузьмин В А *Письма в ЖЭТФ* **4** 114 (1966); Zatsepin G T, Kuz'min V A *JETP Lett.* **4** 78 (1966)
18. Greisen K *Phys. Rev. Lett.* **16** 748 (1966)
19. Stecker F W *Phys. Rev.* **180** 1264 (1969)
20. Krasilnikov D D, in *Proc. 13th ICRC, Denver* Vol. 4 (1973) p. 2393
21. Glushkov A V et al., in *19th Intern. Cosmic Ray Conf., La Jolla* Vol. 2 (1985) p. 198
22. Hillas A M *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **22** 425 (1984)
23. Abbasi R U et al. (High Resolution Fly s Eye Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **100** 101101 (2008)
24. Abraham J et al. (The Pierre Auger Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **101** 061101 (2008)
25. Pravdin M I, private communication; in *35 ICRC, Busan, Korea, Proc. of Science* (2017) in press
26. Blümer J, Engel R, Hörandel J R *Prog. Part. Nucl. Phys.* **63** 293 (2009); arXiv:0904.0725
27. Aab A et al. (Pierre Auger Collab.) *Phys. Rev. D* **90** 122005 (2014); arXiv:1409.4809
28. Kampert K-H, Unger M *Astropart. Phys.* **35** 660 (2012); arXiv:1201.0018
29. Abbasi R et al. (Telescope Array Collab.) *JPS Conf. Proc.* **9** 010016 (2016); arXiv:1503.07540
30. Berezhnev V, Gazizov A, Grigorieva S *Phys. Rev. D* **74** 043005 (2006)
31. Aab A et al. (Pierre Auger Collab.) *Phys. Rev. D* **90** 122006 (2014); arXiv:1409.5083
32. Aab A et al. (Pierre Auger Collab.) *Phys. Lett. B* **762** 288 (2016); arXiv:1609.08567
33. Torres D F, Anchordoqui L A *Rep. Prog. Phys.* **67** 1663 (2004)
34. Cavallo G *Astron. Astrophys.* **65** 415 (1978)
35. Romero G E et al. *Astropart. Phys.* **5** 279 (1996)
36. Abbasi R U et al. *Astrophys. J.* **790** L21 (2014)
37. He N-H et al. *Phys. Rev. D* **93** 043011 (2016)
38. Fang K et al. *Astrophys. J.* **794** 126 (2014)
39. He N-H et al., arXiv:1411.5273
40. Aab A et al. (Pierre Auger Collab.) *Astrophys. J.* **804** 15 (2015); arXiv:1411.6111
41. Kalashev O E, Ptitsyna K V, Troitsky S V *Phys. Rev. D* **86** 063005 (2012); arXiv:1207.2859
42. Bhattacharjee P, Sigl G *Phys. Rep.* **327** 109 (2000); astro-ph/9811011
43. Linsley J, Benson R, in *Proc. 17th ICRC* Vol. 8 (1988) p. 145
44. Strietmatter R et al. *AIP Conf. Proc.* **433** 95 (1998)
45. Scarsi L et al., Proposal to ESA F2/F3 Misions (2000)
46. Garipov G K et al. *AIP Conf. Proc.* **433** 108 (1998)
47. Гарипов Г К и др. *Изв. РАН Сер. физ.* **66** 1464 (2002)
48. Klimov P A et al. *Space Sci. Rev.* **212** 1687 (2017); arXiv:1706.04976
49. Biktemerova S V et al., arXiv:1706.05369

Greisen – Zatsepin – Kuzmin effect: top – down and bottom – up view

M.I. Panasyuk

Skobel'syn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University,
Leninskie gory 1, str. 2, 119234 Moscow, Russian Federation
E-mail: panasyuk@sinp.msu.ru

In 1966, K. Greisen, and independently G.T. Zatsepin and V.A. Kuzmin, published evidence for the existence of a relic (GZK) cutoff in the proton energy spectrum of $> 5 \times 10^{19}$ eV ultra-high energy cosmic rays (UHECRs). Half a century of experimental ground-based UHECR research has resulted in a large amount of data on energy spectra, anisotropy and mass composition. The first space experiment to measure UHECRs was launched in 2016. This paper discusses the results of and prospects for experimental UHECR research in the light of the proposed theoretical model of GZK cutoff.

Keywords: cosmic rays, extensive air showers

PACS number: 98.70.Sa

Bibliography — 49 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **188** (9) 1000–1009 (2018)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2017.05.038170>

Received 6 July 2017

Physics – Uspekhi **61** (9) (2018)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2017.05.038170>