

УДК 524.1: 539.1

КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ: ПРОБЛЕМЫ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ

Арынгазин Ансар Аскарлович

aringazinansar@gmail.com

Студент ФТФ, кафедры Ядерной физики, новых материалов и технологий

ЕНУ им. Л.Н.Гумилёва, Нур-Султан, Казахстан

Научный руководитель – к.ф.-м.н. Шаханова Г.А.

Начало физики космических лучей восходит к вопросу об ионизации атмосферы, открытой Кулоном и подтвержденной Фарадеем. Открытие радиоактивности Беккерелем казалось бы, поставило ответ на вопрос о разрядке изолированных наэлектризованных тел извне, но явные наблюдаемые нарушения теории радиоактивности как ионизатора привели к интересному заключению, сделанному В. Гессом: он обнаружил в эксперименте с ионизационными камерами на воздушных шарах, что с высотой скорость их разрядки увеличивается; модифицированные версии этих экспериментов были подтверждены другими исследователями. Позже, Милликеном и Отисом проводились измерения поглощения этого излучения в свинце, показавшие, что это излучение поглощается так же, как и проникающее γ -излучение. Милликен первым дал этому излучению название космических лучей. Скобельцын в своём эксперименте с камерой Вильсона увидел треки космических лучей и установил, что они состоят из заряженных частиц. В дополнение к этому он пронаблюдал одновременный приход большого числа связанных частиц на большую площадь, однако не придал этому значения. Позже, П.Оже, наблюдая тот же каскад, назвал их широкими атмосферными ливнями (ШАЛ). Из наблюдений космических лучей учёные вывели две компоненты, различные по своей проникающей способности. Первая, сильно ослабляясь после проникновения в 10см свинца, была названа мягкой компонентой; другая, оставляя свою интенсивность неизменной после тех

же 10 см свинца – жёсткой. Позднее был определен тип частиц компонент: мягкая представляла собой ЭМ частицы – электроны и фотоны, жёсткая – мюоны.

Естественным образом возникает вопрос – какой естественный источник во Вселенной способен ускорить частицы до столь огромных, сверхвысоких энергий? Этот вопрос, спустя более, чем 70 лет после открытия явления космических лучей, до сих пор остаётся открытым. Так как первичная энергия частиц КЛСВЭ может достигать 10^{20} эВ, претенденты в источники должны обладать экстремальными физическими условиями. Критерии эти просты:

- 1) Геометрический критерий: ускоряемая частица должна оставаться внутри ускорителя до тех пор, пока не наберёт требуемую энергию;
- 2) Источник должен обладать достаточным запасом энергии для обеспечения частицей самой высокой энергией;
- 3) Потери на излучение и на столкновение не должны превышать приобретаемой энергии;
- 4) Полное число и результирующая мощность источников должны быть достаточно велики для получения наблюдаемого потока космических лучей;
- 5) Сопутствующее излучение фотонов, нейтрино и космических лучей меньших энергий (фон) не должно превышать наблюдательных ограничений как для отдельного источника, так и для диффузного потока.

Первый критерий также называют критерием Хилласа, который может быть интерпретирован так: ларморовский радиус частицы не должен превышать линейного размера ускорителя.

Таковыми источниками, способными удовлетворить этим требованиям, являются взрывы сверхновых и его остатки [1, 10], а также производные объекты, создающиеся после сверхновой: нейтронные звезды, белые карлики и черные дыры [1, 2, 10]. Другой тип потенциальных источников – активные ядра галактик, которые составляют: сейфертовские галактики, лацертиды, радиогалактики, квазары, блазары [2]. Галактики со вспышками звездообразования также являются возможным кандидатом в источники КЛСВЭ, так как на них происходят процессы, требующие очень большого количества энергии – так, эти галактики отличаются от «обычных» галактик невероятной скоростью образования звёзд, достигая 100 солнечных масс в год, тогда как например в Млечном Пути скорость образования звёзд около 1 солнечной массы в год. Последний потенциальный тип источников – события приливного разрушения - возникающие, когда звезда проходит около горизонта событий сверхмассивной чёрной дыры, во время чего передняя часть проходит этап «спагеттификации», вызванный приливными силами этой черной дыры. Это явление в дальнейшем создаёт два джета в противоположных направлениях, вылетающих из черной дыры, в которых ударные волны и магнитные поля ускоряют частицы до сверхвысоких энергий.

Вопрос о типе источника естественно включает в себя определение типа ускорения космических лучей до сверхвысоких энергий, ответ на который более содержателен, но также не определен с достаточной точностью. Типы ускорения можно разделить всего по двум направлениям [3]:

Диффузное – ускоряет частицы, удерживая их внутри ускорителя и вынуждая многократно «сталкиваться» со стенками внутри него до тех пор, пока не будет достигнута требуемая энергия посредством «ударной волны» от соприкосновения слоёв, движущихся с различной скоростью (примерами режима можно назвать ускорение Ферми I и II порядков);

Ударное – которое одним резким выбросом высвобождает достаточное количество энергии за малый промежуток времени. Обычно к таким источникам относятся джеты, в которых преобладает синхротронное излучение, либо нейтронные звезды и черные дыры, в которых преобладает излучение кривизны.

На данный момент в научном обществе поощряется вторая гипотеза ускорения частиц до сверхвысокой энергии. Причина поощрения исходит из траты огромного количества времени, требуемого для ускорения частиц до сверхвысоких энергий диффузным методом.

Особенно важным ограничением на источники и их расстояние до Земли является ГЗК-эффект (ГЗК-предел, обрезание спектра для частиц на сверхвысокой энергии), открытый Грейзенем

[4], и независимо от него Зацепиным и Кузьминым [5]: протон, имеющий максимальную энергию $5 * 10^{19}$ эВ, не может исходить от источника любого типа, располагающегося на расстоянии более 50 Мпк. Причиной этому является взаимодействие протонов с реликтовым излучением, впоследствии которого протоны теряют свою энергию на создание заряженных пионов или других адронов. Следствием этого эффекта оказывается резкое подавление спектра около этой энергии, что и было подтверждено современными экспериментами по наблюдению за космическими лучами, несмотря на то, что одной из старых установок (AGASA) было обнаружено нарушение ГЗК-эффекта, которое впоследствии было интерпретировано как систематическая неопределённость ввиду несовершенства аппаратуры. Открытие AGASA породило несколько экзотических теорий происхождения протонов, превышающих ГЗК-предел:

Существование такой частицы назвали парадоксом ГЗК [6], и породило несколько предположений, решающих этот парадокс:

- 1) результаты наблюдений были неверно объяснены;
- 2) в пределах 50 Мпк расположены какие-либо мощные источники (что позже было опровергнуто);
- 3) тяжелые ядра могут преодолеть предел ГЗК;
- 4) слабовзаимодействующие частицы (нейтрино) также могут преодолеть этот предел.

Порожденные экзотические теории, объясняющие существование парадокса ГЗК – WIMP, Z-всплеск, дважды СТО и другие, не смогли устоять по причинам наблюдений и измерения потока высокоэнергетических фотонов и нейтрино. Следует отметить, что этот предел был выведен в предположении, что КЛСВЭ – протоны, что означает, что для более тяжелых элементов этот ГЗК-предел не имеет своей силы и что наблюдение КЛ более высокой энергии вполне допустимо.

Вторая, но не по важности проблема, которая также, на данный момент, остаётся нерешённой – определение точного массового (химического) состава космических лучей на таких высоких энергиях. Известный состав ниже 10^{15} эВ [2] становится неопределённым при увеличении энергии ввиду очень малого потока прибывающих на Землю КЛСВЭ. Важность определения состава лежит в определении природы тяжелых элементов, обнаруженных на нашей планете, а также в природе и определении самих источников космических лучей.

Первой помехой в определении состава является детальное определение типа первичных частиц. Для более низких энергий, ввиду определенности адронных взаимодействий, задача оказывается решённой: из достоверных статистических данных ядра делят на группы, соответственно близости их масс: ядра лития, бериллия и бора группируют в L-группу (light – легкие), ядра группы CNO и фтор F – в M-группу (medium – средние); ядра с зарядовым числом выше 10 – в H-группу (heavy – тяжелые); трудность в точном разделении по массе и дальнейшее увеличение статистики вынудило разделить H-группу еще на одну подгруппу – VH (very heavy – очень тяжелые), включающую в себя ядра с зарядовым числом выше 20. Доминирующую роль в составе малых энергий играют протоны, как в плане энергии, так и в плане численности, занимая более 90% по масштабу энергии и числу частиц. Общий обзор на химический состав космических лучей, а также на его сравнение с распространённостью этих же элементов во Вселенной позволяет сделать заключение: в целом наблюдается схожесть в сравнении состава космических лучей и состава элементов во Вселенной, за исключением группы легких ядер – Li, Be и B. Причиной этому является расщепление более тяжелых ядер при их взаимодействии с межзвездным газом, состоящим, в основном, из протонов [1, 10]. На величинах энергии выше 10^{15} эВ задача значительно усложняется по причине неопределённости особенностей адронных взаимодействий на такой энергии и, впоследствии, зависимости от принимаемой экстраполированной адронной модели. Эксперимент HiRes, например, утверждает на основе данных, что роль протонов остается преобладающей даже на таких энергиях [7], в то время как на обсерватории PАО заключение подводит к прибавке в среднее массовое число промежуточных ядер по мере увеличения энергии [8, 9].

Важной вехой в становлении физики космических лучей в экспериментальном являются детекторы, позволяющие вести наблюдение за потоком космических лучей, получая всю возможную информацию о них: от энергетического спектра до возможного массового состава и направлений их прихода. Космические лучи с такой энергией обладают очень малой интенсивностью (для 10^{20} эВ, интенсивность достигает 1 частицы/ $1 \text{ км}^2 * 100$ лет), поэтому единственным доступным методом регистрации этих частиц является их измерение через создающиеся широкие атмосферные ливни, возникающие при столкновении КЛСВЭ с атмосферой Земли – в них входят мюонная, электромагнитная и адронная компоненты. Сами детекторы в основе своей делятся на два вида: флуоресцентные телескопы и наземные решетки (массивы):

Флуоресцентные телескопы регистрируют фотоны, вызванные флуоресценцией атомов азота в атмосфере при их взаимодействии с заряженными частицами в ливне. Из наблюдений установлено, что в среднем на одну заряженную частицу выходит пять флуоресцентных фотонов.

Наземные решетки детекторов предстают в двух видах: пластиковые сцинтилляторы, либо водонаполненные Черенковские резервуары, регистрирующие Черенковское излучение. Детекторы располагаются на одинаковом расстоянии друг от друга по двум осям плоскости, образуя массив-решётку, регистрируя заряженные частицы на уровне земли. На сегодняшний день в большинстве используется второй тип поверхностных детекторов.

Первый метод обнаружения позволяет запечатлеть продольное развитие ливня и имеет способность воссоздать трёхмерную картину ливня, а также не зависит от предполагаемой модели адронных взаимодействий, так как регистрирует лишь ЭМ компоненту ШАЛ. Ещё одним преимуществом, вытекающим из пересечения наблюдаемых двумя телескопами плоскостей одного и того же ливня, является возможность определения направления прихода космических лучей, ведущего к местоположению его источника. Недостатком же является её эффективность работы, так как точность и хорошее разрешение регистрации событий происходит только в ясные безоблачные ночи, при нормальных условиях давления и температуры, что составляет около 10% от общего срока службы. С другой стороны, эффективность регистрации наземных детекторов достигает 100% в любое время суток и в любых условиях, показывая поверхностную картину развития ливня, позволяя запечатлеть области максимального развития поперечного профиля. Важным преимуществом, которым обладает поверхностная решетка, является определение первичной энергии частицы, создающей ливень, из числа регистрирующих событие на данный момент детекторов совместно с определением размера сигнала, однако наблюдаемая величина сильно зависит от зенитного угла прибытия ливня. Техника измерения тончайшей разницы во времени прибытия (лучше 10^{-6} сек) сигнала на различные детекторы применяется для определения направления прихода космических лучей.

Очевидным препятствием прямого определения энергии оказываются потери энергии первичной частицей в атмосферных ливнях и последующие потери энергии вторичных частиц, проникающих глубоко в атмосферу и взаимодействующих с ней. Единственными «выжившими» частицами, долетающими уровня земли, оказываются мюонная и электромагнитная компоненты. Мюонная компонента выживает ввиду своей жёсткой проникающей способности, электромагнитная – ввиду своей многочисленности (мюонная компонента составляет около 10% от электронной, а число гамма-квантов в 2 раза превосходит число электронов). Помимо этого, адронный каскад ШАЛ подпитывает каждую из этих компонент: низкоэнергетические заряженные пи-мезоны и К-мезоны дают вклад в мюонную, нуклоны и адроны высокой энергии (нейтральные пионы) – в ЭМ компоненту.

Наблюдаемая величина поверхностных детекторов – число мюонов N_μ или число электронов N_e , может быть использована в качестве оценочной функции первичной энергии частицы, однако для большей определённости используется другая величина, преобразуемая из вышесказанных – плотность частиц на определённом расстоянии от оси ливня, которая выводится из горизонтального распределения мюонов/электронов - $S(R)$. Было доказано,

аналитически и экспериментально, что $S(R)$ прямо пропорциональна первичной энергии частицы и независима от принимаемой модели адронных взаимодействий и массового состава, и таким образом является лучшей оценочной функцией энергии, даже с учетом неопределенностей. Проблемой является их зависимость от зенитного угла относительно оси ливня, для решения которого были применены различные методы.

Немаловажная величина, которая регистрируется флуоресцентными телескопами – **глубина максимума развития ливня** X_{max} ($\text{Г} * \text{см}^{-2}$), показывающая максимальное число заряженных частиц в продольном профиле ливня, которая соотносится пропорционально массовому числу, что делает её лучшей оценочной функцией в определении типа первичной частицы. Недостатком является ее модельная зависимость, что на данный момент в ряде работ оказывает несущественный вклад в общую погрешность её определения.

Как было выяснено, для описания адронных взаимодействий частиц такой высокой энергии с атомами атмосферы требуется вводить экстраполяцию до энергий таких порядков, так как максимально достигнутая энергия взаимодействия на Земле, для которой уже созданы программы, описывающие их взаимодействия и согласующиеся с экспериментальными данными, на 6-7 порядков ниже достигаемой в космосе. Модели адронных взаимодействий для энергий за пределами искусственно созданной на сегодняшний день имеют в своей основе надежную теоретическую базу и крепкий математический фундамент для хорошего описания взаимодействия ливней с атмосферой. Однако серьезные противоречия наблюдаются даже с учетом всех допустимых погрешностей, так как применяемые модели для сверхвысоких энергий не согласуются с экспериментальными данными.

Другой проблемой становится точное определение энергетического спектра на таких энергиях, однако различные эксперименты, посвященные детальному изучению спектра, в пределах неопределенностей, отлично согласуют свои данные в перекрестной проверке: например, доказано, что спектр соответствует спадающему степенному закону, а также имеет несколько разрывов, так называемых особенностей спектра. Этими особенностями являются: область чуть дальше 10^{15} эВ, называемая «коленом» спектра, которая меняет зависимость спектра от энергии: от $E^{-2.7}$ до $E^{-3.3}$, которое может быть интерпретировано как свидетельство утечки частиц из зоны их удержания; область в диапазоне энергий $4 - 6 * 10^{18}$ эВ, называемая «лодыжкой» спектра (с $E^{-3.0}$ до $E^{-2.7}$), объяснение которой – переход галактического потока космических лучей в преимущественный внегалактический поток; либо, если КЛСВЭ являются в основном протонами – объясняется процессом образования электрон-позитронных пар при взаимодействии протонов с реликтовым излучением; последняя особенность – вышесказанный ГЗК-эффект, который иллюстрируется в виде резкого спада спектра выше $5 - 6 * 10^{19}$ эВ (с $E^{-2.7}$ до $E^{-5.0}$). Помимо этих особенностей, коллаборация РАО засекла существование новой особенности между «лодыжкой» и спадом спектра, где степень сменяется с $E^{-2.7}$ до $E^{-3.0}$ [12]. Даже несмотря на сдвиги на графиках спектров различных экспериментов, связанные с различием в реконструкции энергии, а также в связи с расположением различных обсерваторий в разных полушариях, использование коэффициента нормировки позволяет в отличной степени сдвинуть спектры различных установок так, что наблюдается отличная согласованность и по форме, и по абсолютной нормировке.

Третья немаловажная задача исходит из определения степени анизотропии направлений прихода космических лучей. Это исследование наименее подвержено влиянию принятой модели адронных взаимодействий и исходит из чисто геометрических соображений. Проблемой однако остается малое число данных для статистической оценки направления ввиду малого потока космических лучей на сверхвысоких энергиях; другое затруднение, с которым сталкивается эта задача – отклонения направлений заряженных частиц в галактических и внегалактических магнитных полях, потому как до сих пор не существует определённой модели, однозначно описывающей силу и направление этих полей.

Результаты установок по определению массового состава:

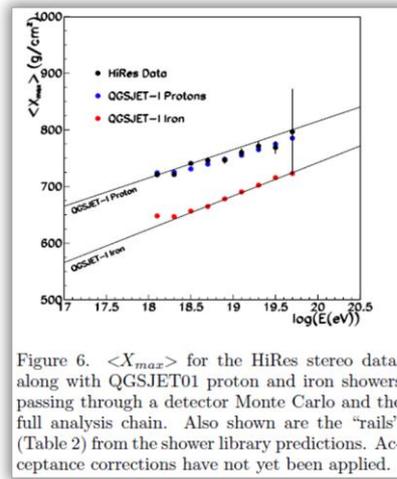


Figure 6. $\langle X_{max} \rangle$ for the HiRes stereo data, along with QGSJET01 proton and iron showers passing through a detector Monte Carlo and the full analysis chain. Also shown are the "trails" (Table 2) from the shower library predictions. Acceptance corrections have not yet been applied.

Рисунок 1- Результаты измерения $\langle X_{max} \rangle$ в стерео-режиме установкой HiRes, вместе с границами модельных предсказаний [7].

Table 1: Observed $r_G(X_{max}^*, S_{38}^*)$ with statistical uncertainty, and simulated $r_G(X_{max}^*, S_{38}^*)$ for various compositions using different interaction models (statistical uncertainties are ≈ 0.01).

data	-0.125 ± 0.024 (stat)		
	EPOS-LHC	QGSJetII-04	Sibyll 2.1
p	0.00	0.08	0.06
He	0.10	0.16	0.14
O	0.09	0.16	0.17
Fe	0.09	0.13	0.12
0.5 p - 0.5 Fe	-0.37	-0.32	-0.31
0.8 p - 0.2 He	0.00	0.07	0.05

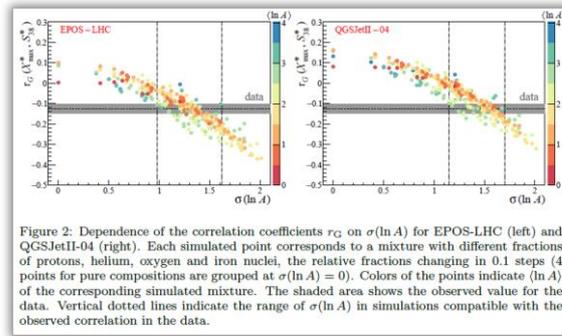


Figure 2: Dependence of the correlation coefficients r_G on $\sigma(\ln A)$ for EPOS-LHC (left) and QGSJetII-04 (right). Each simulated point corresponds to a mixture with different fractions of protons, helium, oxygen and iron nuclei, the relative fractions changing in 0.1 steps (4 points for pure compositions are grouped at $\sigma(\ln A) = 0$). Colors of the points indicate $(\ln A)$ of the corresponding simulated mixture. The shaded area shows the observed value for the data. Vertical dotted lines indicate the range of $\sigma(\ln A)$ in simulations compatible with the observed correlation in the data.

Таблица 1-Наблюдаемая $r_G(X_{max}^*; S_{38}^*)$, полученная из данных, вместе с неопределенностями, и результаты $r_G(X_{max}^*; S_{38}^*)$ различных моделей взаимодействия для разнообразных составов (коллаборация PAO) [8].

Рисунок 2-Зависимость r_G от $\sigma(\ln A)$ для EPOS-LHC (слева) и QGSJetII-04 (справа) (коллаборация PAO) [8].

Результаты установок по определению энергетического спектра (из работы [13]):

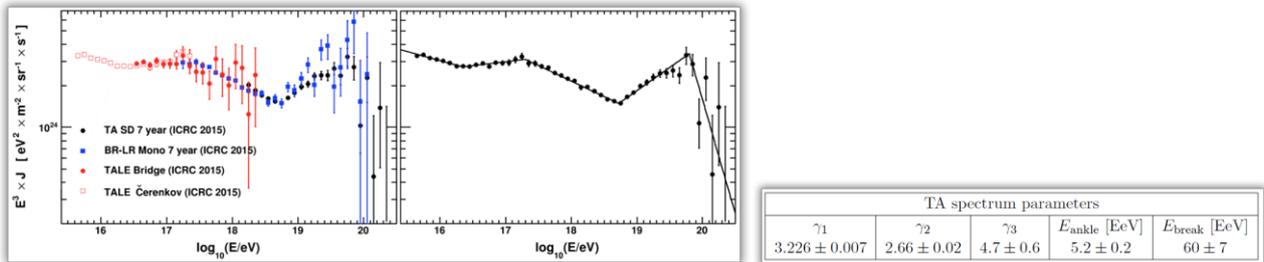


Рисунок 3- Результаты измерения спектра ТА.

Таблица 2-Спектральные параметры ТА.

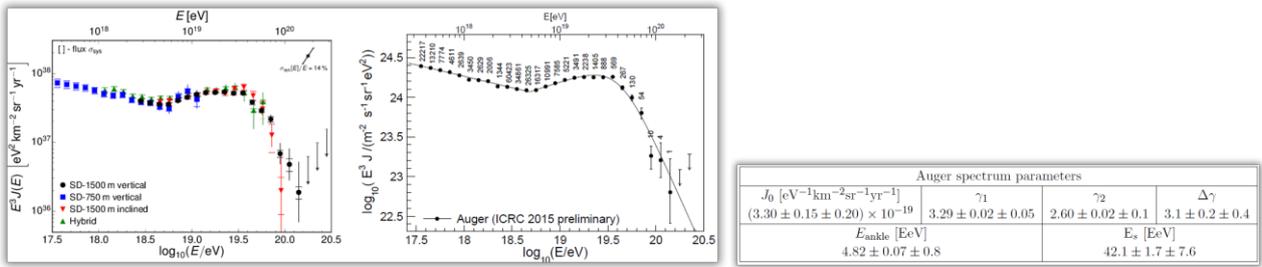


Рисунок 4- Результаты измерения спектра РАО.

Таблица 3- Спектральные параметры РАО.

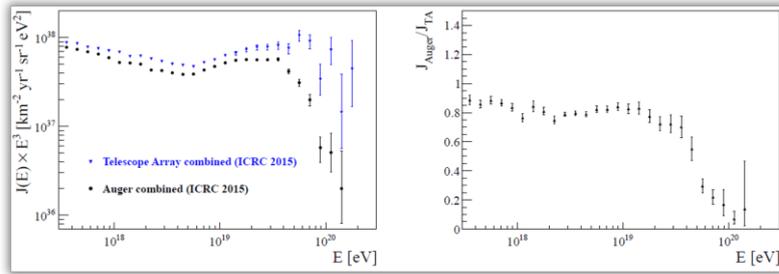


Рисунок 5-Слева – комбинированный спектр ТА и РАО. Справа – отношение спектра РАО к спектру ТА.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гинзбург В. Л. Происхождение космических лучей и радиоастрономия // Успехи физических наук. 1953. Т. 51, № 11. С. 343–392.;
2. Березинский, В.С.; Буланов, С.В.; Гинзбург, В.Л. и др. Астрофизика космических лучей. -М.: Наука, 1984. -359 с.;
3. Hillas A.M.// Annu. Rev. Astron. Astrophys. 22 425 (1984).;
4. Greisen, Kenneth. End to the Cosmic-Ray Spectrum? (англ.) // Physical Review Letters : journal. — 1966. — Vol. 16, no. 17. — P. 748—750.;
5. Зацепин Г. Т., Кузьмин В. А., «О верхней границе спектра космических лучей», Письма в ЖЭТФ, 1966, Т.4, № 3, 114—117.
6. Dedenko, L. G., Fedorova, G. F., Fedunin, E. Y., Kirillov, A. A., & Roganova, T. M. The GZK Paradox and Estimation of Energy of the Primary Cosmic Rays // Proceedings of the 28th International Cosmic Ray Conference.
7. J. Belz, Nucl.Phys.B (Proc. Suppl.) 190 (2009) 5–11;
8. A. Aab, et al., Pierre Auger Collaboration, Phys.Lett. B762 (2016) 288-295;