ПОДЗЕМНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ТЕНИ ЛУНЫ

С. Н. Карпов, В. Н. Закидышев

Баксанская нейтринная обсерватория Института ядерных исследований РАН
пос. Нейтрино, Эльбрусский р-н, 361609 Кабардино-Балкарская Республика, Россия
e-mail: karpov@neutr.novoch.ru

Выполнено наблюдение эффекта затенения космических лучей Луной по данным регистрации одиночных мюонов на Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе (БПСТ). Обнаружен статистически значимый (3 сигма) дефицит интенсивности мюонов в направлении на Луну. Проведено сравнение результатов эксперимента и моделирования эффекта затенения для условий наблюдения на БПСТ. Получена экспериментальная оценка углового разрешения БПСТ при регистрации одиночных мюонов. Доказано отсутствие систематических погрешностей в астрономической привязке телескопа и в определении направлений прихода мюонов с точностью до углового разрешения БПСТ. Обоснована возможность изучения эволюции крупномасштабной структуры межпланетного магнитного поля по наблюдениям на БПСТ тени Солнца в потоке галактических космических лучей.

UNDERGROUND OBSERVATIONS OF THE MOON SHADOW, by Karpov S. N., Zakidyshev V. N. – Observations of the Moon's shadowing effect on the cosmic ray flux were made by the single muon registration at the Baksan Underground Scintillation Telescope (BUST). A statistically significant deficit of muons (3 st.dev.) was found in the Moon direction. The experimental results were compared with the shadowing effect simulation for the BUST observation conditions. An experimental estimate of the angular resolution of the BUST for the single muon detection was obtained. The absence of systematic errors in the absolute position of the telescope and in the muon arrival direction measurement was proved with an accuracy of the BUST angular resolution. It is substantiated that the evolution of the large-scale structure of the interplanetary magnetic field can be studied using the observations of the Sun shadow in the galactic cosmic ray flux.

ВВЕДЕНИЕ

В 1957 г. Кларк [1] предложил использовать эффект затенения Луной и Солнцем потока космических лучей (КЛ) для оценки углового разрешения детекторов КЛ и систематических ошибок при определении углов прихода частиц. Суть эффекта в следующем. Луну и Солнце можно рассматривать как экран в виде диска с угловым диаметром около 0.5° на пути почти изотропного потока КЛ. В результате поглощения Луной и Солнцем должно наблюдаться уменьшение интенсивности КЛ в направлении этих космических тел. Уменьшение будет тем больше, чем выше угловое разрешение детектора, вплоть до 100 % при разрешении много меньше 0.5°. Из-за искривления траекторий заряженных частиц в геомагнитном и межпланетном магнитном поле (ММП) положение тени Луны и Солнца будет сдвинуто относительно истинного положения светил. Величина сдвига будет тем больше, чем ниже энергия регистрируемых частиц.

Первое экспериментальное наблюдение эффекта было выполнено значительно позже [2]. Оно было связано с появлением детекторов широких атмосферных ливней (ШАЛ) с угловым разрешением $\leq 1°$, ориентированных на поиск гамма-источников сверхвысоких энергий (10–100 ТэВ). Луна и Солнце являются, как бы антиисточниками КЛ, удобными для калибровки таких детекторов. На установке CYGNUS (ШАЛ, 50 ТэВ) впервые наблюдался суммарный эффект затенения КЛ Луной и Солнцем на уровне 4.9 стандартных отклонений (сигма) за 3.5 года наблюдений [2]. Было экспериментально подтверждено высокое угловое разрешение установки (0.75°), а также отсутствие систематических ошибок в определении направлений прихода ШАЛ. Несколько позже аналогичные результаты были получены группой CASA-MIA (ШАЛ, 100 ТэВ, 5σ, 1 год) [3] и HEGRA (ШАЛ, 50 ТэВ, 4σ, 1.7 года) [4]. Отклонение частиц с энергией 50 и 100 ТэВ от прямолинейного движения в геомагнитном поле пренебрежимо мало, а в ММП составляет 0.15° и 0.08° соответственно, что много меньше углового разрешения детекторов.

Позже группа TIBET (ШАЛ, 10 ТэВ) выполнила первое раздельное наблюдение тени Луны (7.1σ) и Солнца (4.6σ) [5]. Благодаря более низкой энергии регистрируемых частиц и лучшей статистической точности был обнаружен сдвиг центра тени Луны на 0.16° к западу от истинного положения тела. Кроме того, был обнаружен сдвиг тени Солнца на 0.7° к западу и на 0.4° к югу от положения светила. Это вполне согласуется с отклонением частиц в геомагнитном поле и ММП. Используя данные за два разных интервала наблюдения, впервые удалось наблюдать изменение положения тени Солнца на 0.34° вследствие изменения секторной структуры ММП.

Первое наблюдение тени Луны под землей по мюонам космических лучей выполнено на детекторе MACRO (мюоны, 10–15 ТэВ, 3.6σ, 7.4 года наблюдений) [6]. Мюоны, регистрируемые подземными детекторами, являются вторичными сильно проникающими частицами в составе ШАЛ. Первое наблюдение тени Солнца по мюонам выполнено на детекторе Soudan 2 [7].

Целью наблюдения тени Луны на Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе (БПСТ) также является экспериментальная проверка углового разрешения и отсутствия систематических ошибок. В дальнейшем предполагается использовать тот же метод и полученные результаты при наблюдении тени Солнца. В последнем случае можно ожидать получения интересной физической информации о крупномасштабной структуре ММП. Энергия первичных протонов, порождающих регистрируемые БПСТ мюоны, значительно меньше, чем у всех вышеперечисленных детекторов, и составляет 1–2 ТэВ. В силу этого эффект отклонения их в ММП будет сильнее ($\approx 5°$). Это обстоятельство осложняет поиск тени Солнца, но по величине и направлению отклонения позволит изучать динамику ММП в течение солнечного цикла (величина и направление ММП, секторная структура на орбите Земли и т. п.).

БАКСАНСКИЙ ПОДЗЕМНЫЙ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ ТЕЛЕСКОП (БПСТ)

Телескоп расположен на Северном Кавказе на высоте 1700 м над уровнем моря в скальной выработке под склоном горы Андырчи на глубине 850 м водного эквивалента (300 м скального грунта). Географические координаты: 43.28° с. ш. и 42.69° в. д. БПСТ представляет собой параллелепипед высотой 11 м и основанием 17×17 м^2. Все его грани сплошь покрыты стандартными счетчиками размером 70×70×30 см^3 на основе жидкого сцинтиллятора. Внутри телескопа имеется еще два горизонтальных слоя счетчиков, расположенные с интервалом по высоте 3.6 м. Общее число счетчиков – 3150. Более подробное описание телескопа можно найти в работе [8]. Ячеистая структура БПСТ позволяет восстанавливать траектории регистрируемых мюонов. Угловое разрешение определяется в первую очередь отношением размеров счетчика и телескопа, а также длиной траектории мюона. Величина углового разрешения определялась как моделированием методом Монте-Карло, так и экспериментально по разнице измеренных углов у параллельных двоек мюонов [9]. В обоих случаях угловое разрешение составило 1.6° для области углов, покрываемых траекторией Луны. Следует заметить, что оба метода не являются прямым измерением углового разрешения. Кроме того, наблюдение тени Луны – единственный прямой метод экспериментальной проверки возможных систематических погрешностей в астрономической привязке телескопа и в определении направлений прихода мюонов.

ОСОБЕННОСТИ ВЫХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ БПСТ

В выходном потоке информации с БПСТ отсутствуют данные по углам регистрации и времени прихода каждого мюона. Вместо записи каждого события набирается гистограмма темпа счета мюонов с различных направлений с длинной траектории в телескопе не меньше 7 м. Гистограмма накапливается в течение 15 минут, а затем записывается. Шаг гистограммы по зенитному углу – 2.5° и переменный шаг по азимуту от 3.75° вблизи горизонта до 360° в зените так, чтобы телесный угол ячеек гистограммы отличался не более чем в два раза. Отсутствие индивидуальных значений времени и углов регистрации мюонов является главной методической трудностью при изучении эффекта затенения космических лучей Луной. Из-за разбиения на фиксированные угловые ячейки большого размера величина эффекта определяется не столько угловым разрешением телескопа, сколько отношением величины телесного угла Ω_{Moon}, под которым видна Луна, к телесному углу Ω_{cell} ячейки гистограммы. Величина эффекта в среднем составляет

$$R(\%) = \Omega_{Moon}/\ \overline{\Omega_{cell}} = 2.5\,\%. \tag{1}$$

Угловое разрешение БПСТ еще уменьшает эту величину примерно на 30 %. Крупный шаг гистограммы, суммирование за 15 минут и движение Луны относительно ячеек гистограммы создают дополнительные ошибки в определении углов регистрации мюонов. Уменьшается также статистическая обеспеченность за счет ухода мюонов в соседние ячейки гистограммы. Луна за

15 минут “посещает” в среднем 2–3 ячейки гистограммы, что приводит к уменьшению статистической обеспеченности эффекта в среднем в 2.5 раза и, как следствие, к увеличению необходимого времени наблюдения. В результате перечисленных и ряда других трудностей время, необходимое для наблюдения эффекта на БПСТ на уровне трех стандартных отклонений, возрастает с 1.5–2 лет (по отдельным траекториям) до 10–12 лет набора информации (при использовании гистограммы).

Дискретная структура телескопа, составленного из крупных счетчиков, приводит к фиксированному дискретному набору направлений регистрации мюонов, а не к континууму направлений. Наложение гистограммы с переменным шагом на такой дискретный набор направлений приводит к появлению дополнительных угловых ошибок и к дальнейшему уменьшению статистической обеспеченности эффекта из-за систематической “перекачки” части мюонов в соседние ячейки гистограммы. Корректно учесть эти дополнительные угловые ошибки не представляется возможным.

МЕТОД АНАЛИЗА НАБЛЮДЕНИЙ

Для получения тени Луны были использованы данные регистрации одиночных мюонов на БПСТ за 1987–1998 гг. При этом гистограмма темпа счета мюонов преобразовывалась в квазиточечное пространственное распределение, где каждой точке приписывались значения зенитного и азимутального углов центра соответствующей ячейки гистограммы и количество отсчетов ячейки. Такое преобразование не увеличивает ошибку в определении угла прихода мюонов, возникающую после разбиения на ячейки гистограммы, $\sigma_a = 1.7^\circ$. Положение Луны вычислялось для середины 15-минутного интервала накопления гистограммы. В результате ошибка в определении углов, возникающая из-за движения Луны по ячейке за 15 минут, минимизируется и равна $\sigma_t = 1.05^\circ$. Положение Луны вычисляется в геоцентрической системе координат, а затем вводится поправка на параллакс для географических координат БПСТ. Ошибки вычислений при этом пренебрежимо малы по сравнению с точностью определения углов на БПСТ.

Прямоугольное окно размером $21^\circ\times21^\circ$, разбитое на ячейки $1^\circ\times1^\circ$, накладывается на полученное квазиточечное пространственное распределение мюонов так, чтобы Луна находилась в центре окна. Все точки распределения, попавшие в окно, суммируются в соответствующие ячейки размером $1^\circ\times1^\circ$. Такая процедура повторяется для каждой 15-минутной гистограммы набора БПСТ. Для получения фона используется тот же самый метод, но берутся четыре окна $21^\circ\times21^\circ$, центр каждого из которых ориентируется на положение, где Луна была 15 и 30 минут назад и где она будет через 15 и 30 минут соответственно. Впоследствии “фоновые окна” суммируются, и получается средняя величина фона для каждой ячейки $1^\circ\times1^\circ$. Несмотря на то, что окна взаимно перекрываются, данные являются статистически независимыми, так как суммируются ячейки $1^\circ\times1^\circ$, находящиеся в разных точках каждого окна.

В результате такой обработки за 12 календарных лет (1987–1998) использовано 10.6 лет “живого” времени набора и число мюонов, накопленных в каждом из пяти окон размером $21^\circ\times21^\circ$, составляет $7.6 \cdot 10^6$. Остаточная неравномерность, связанная с тем, что разбиение окна меньше шага гистограммы, составляет при этом не более 0.1σ.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

После суммирования информации описанным выше методом, вычислялось отклонение от фона темпа счета каждой ячейки размером $1^\circ\times1^\circ$ в стандартных отклонениях с использованием Ли–Ма-статистики [10]. Она позволяет для пуассоновского потока получать отклонения от фона в стандартных отклонениях σ распределения Гаусса.

Контурная карта окна $20^\circ\times20^\circ$ представлена на рис. 1. Контурные линии нарисованы через 0.5σ. В центре окна, то есть в точке положения Луны, дефицит мюонов максимален, и отклонение от фона равно 3σ.

Эффект затенения был смоделирован с учетом условий наблюдения на БПСТ и с использованием того же алгоритма обработки, что и в эксперименте. Величина эффекта затенения задавалась с учетом только геометрических факторов и дискретной структуры выходной информации БПСТ. Такой подход умышленно не учитывает потерь сигнала из-за углового разрешения телескопа. Наблюдается неплохое согласие эксперимента и моделирования. Ширина экспериментально полученной тени Луны лишь незначительно превышает расчетную. Это подтверждает, что ошибка, вносимая использованием гистограммы, значительно превышает угловое разрешение телескопа.

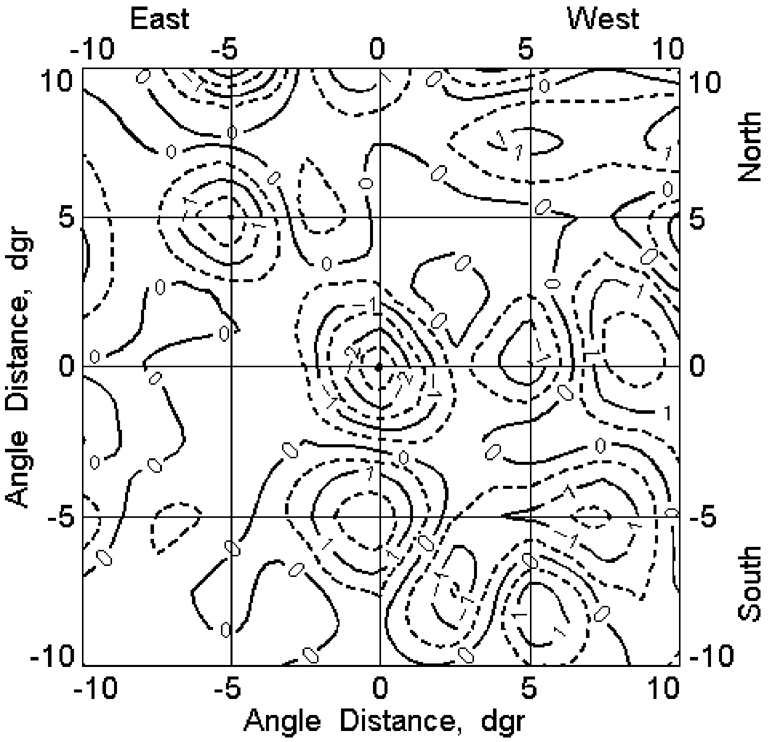

Рис. 1. Контурная карта отклонений темпа счета мюонов от фона. Отклонения выражены в сигмах распределения Гаусса. Луна находится в центре окна

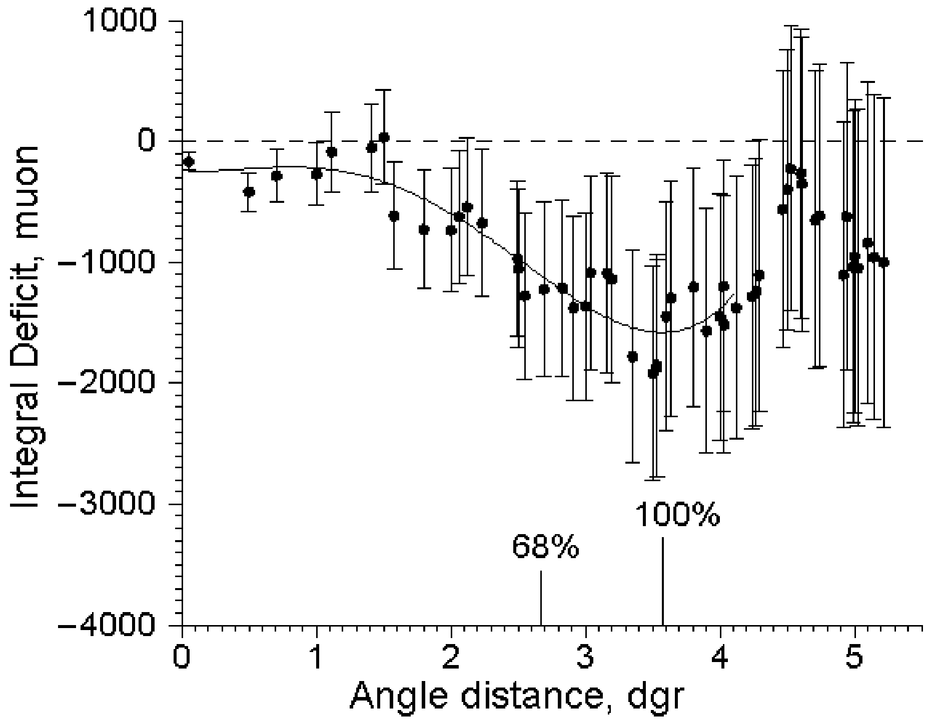

Рис. 2. Величина интегрального дефицита D мюонов в зависимости от углового расстояния R до центра Луны. В области радиусом 3.6° сосредоточено 100 % дефицита мюонов. 68 % дефицита наблюдается в области с радиусом 2.7°, что соответствует суммарной угловой ошибке телескопа и метода сбора и анализа информации

Процедура обработки была полностью повторена также для трех “ложных Лун”. А именно, анализировалась информация для точек, сдвинутых относительно истинной Луны по ее траектории на 12, 6 и +6 часов (антилунное направление и направления на восток и запад от Луны). Это необходимо для проверки того, что полученный дефицит мюонов не может быть имитирован достаточно сложным алгоритмом обработки или его интерференцией с дискретной структурой выходной информации БПСТ, и что результат не содержит систематических ошибок. Дефицит мюонов отсутствует в каждом из трех случаев, как и должно быть для чисто фоновых участков неба.

ОЦЕНКА УГЛОВОГО РАЗРЕШЕНИЯ БПСТ

Для оценки углового разрешения БПСТ была получена функция интегрального дефицита D мюонов, представленная на рис. 2, в зависимости от углового расстояния до центра Луны. Для повышения точности оценки обработка данных была проведена с более мелким шагом разбиения по угловым координатам ($0.5^\circ \times 0.5^\circ$). При этом не произошло качественных изменений величины эффекта и формы кривой дефицита, что говорит об устойчивости эффекта и метода обработки.

Как видно из рис. 2, интегральный дефицит D непрерывно увеличивается до 3.6° от центра Луны, а затем начинает уменьшаться. Это означает, что весь дефицит мюонов (100 %), связанный с затенением космических лучей Луной, сосредоточен в круге радиусом 3.6°. В круге радиусом 2.7° сосредоточено 68 % дефицита мюонов. Эта величина $\sigma_{res} = 2.7^\circ$ является суммарной ошибкой, включающей в себя угловое разрешение БПСТ, ошибки метода обработки и ошибки, связанные с использованием гистограммы. Вычтя ошибку, связанную с дискретной структурой по угловым координатам $\sigma_a = 1.7^\circ$, и ошибку, связанную с суммированием данных за 15 минут $\sigma_t = 1.05^\circ$, получим:

$$\sigma_{TEL} = \sqrt{\sigma_{res}^2 - \sigma_a^2 - \sigma_t^2} = 1.8^\circ. \qquad (2)$$

Полученное значение не противоречит ранее сделанной расчетной оценке – 1.6° [9]. Небольшое отличие связано с тем, что не поддаются корректному учету ошибки, вызванные систематической “перекачкой” мюонов в соседние ячейки. Поэтому приведенная величина является экспериментальной верхней границей углового разрешения БПСТ по одиночной мюонной составляющей для зенитных углов в диапазоне $20^\circ - 80^\circ$ (полоса, покрываемая движением Луны в условиях наблюдения на БПСТ).

ВЫВОДЫ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Наблюдение статистически значимого эффекта затенения космических лучей Луной на БПСТ позволило экспериментально подтвердить расчетную величину углового разрешения телескопа $\sigma_{TEL} \leq 1.8^\circ$. Доказано отсутствие систематических ошибок в измерении направлений прихода мюонов на БПСТ и правильность астрономической привязки детектора. Это важно для совместной работы установок “Андырчи” и БПСТ по поиску локальных источников и изучению анизотропии и вариаций КЛ, а также для наблюдений на БПСТ тени Солнца.

Для наблюдения тени Солнца невозможно использовать уже накопленные данные за 1981–2000 гг. Из-за отклонения частиц в ММП тень Солнца будет смещена относительно самого Солнца на угол $\approx 5^\circ$ для энергий регистрации на БПСТ. Кроме того, ее положение изменяется в течение цикла активности, и за 10–12 лет сигнал распределится по широкой области с радиусом $\approx 5^\circ$, что не оставляет надежды выделить его из фона. Для выполнения таких наблюдений была изменена структура выходной информации БПСТ так, чтобы сохранялись данные о времени регистрации и углах прихода каждого мюона. Теперь наблюдение эффекта можно вести с угловым разрешением не хуже 1.8°, а время, необходимое для наблюдения эффекта значимостью 3σ, уменьшается до 1.5–2 лет набора информации. Это позволит наблюдать изменение положения тени Солнца в течение солнечного цикла активности, и тем самым наблюдать эволюцию крупномасштабной структуры ММП.

Работа была выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), грант 01-02-16947.

[1] *Clark G. W.* Arrival directions of cosmic-ray air showers from the northern sky // Phys. Rev.–1957.–**108**.–P. 450–457.

[2] *Alexandreas D. E., Allen R. C., Berley D., et al.* Observation of shadowing of ultrahigh-energy cosmic rays by the Moon and the Sun // Phys. Rev. D.–1991.–**43**, N 5.–P. 1735–1738.

[3] *Fick B. E., Borione A., Covault C. E., et al.* UMC: A sensitive new detector for UHE gamma-ray astronomy // Proc. 22nd Intern. Cosmic Ray Conf.–1991.–**2**.–P. 728–731.

[4] *Karle A., Merck M., Bott-Bodenhausen M., et al.* Observation of the Shadowing of Cosmic Rays by the Moon and the Sun // Proc. 22nd Intern. Cosmic Ray Conf.–1991.–**4**.–P. 460–463.

[5] *Amenomori M., Cao Z., Ding L. K., et al.* Direct evidence of the interplanetary magnetic field effect on the cosmic-ray shadow by the Sun // Astroph. J.–1993.–**415**.–P. L147–L150.

[6] *Ambrosio M., Antolini R., Aramo C., et al.* Observation of the shadowing of cosmic rays by the Moon using a deep underground detector // Phys. Rev. D.–1998.–**59**, N 1.–P. 012003-1–012003-7.

[7] *Allison W. W. M. et al. (The Soudan 2 Collaboration)* Cosmic Ray Sun Shadow in Soudan 2 Underground Muon Flux // Proc. 26th Intern. Cosmic Ray Conf.–SH 3.2.41.–1999.

[8] *Alexeyev E. N., Alexeyenko V. V., Andreyev Yu. M., et al.* Baksan underground scintillation telescope // Proc. 16th Intern. Cosmic Ray Conf.–1979.–**10**.–P. 276–281.

[9] *Андреев Ю. М., Гуренцов В. И., Когай И. М. и др.* Угловое разрешение Баксанского подземного сцинтилляционного телескопа ИЯИ АН СССР.–М.: Препринт ИЯИ, 1989.

[10] *Li Ti-pei, Ma Yu-qian.* Analysis methods for results in gamma-ray astronomy // Astroph. J.–1983.–**272**.–P. 317–324.