

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования**

«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Кафедра физики элементарных частиц (№40)

Отчет по НИРС на тему:

**Выделение событий от одиночных мюонов по данным
атмосферных черенковских телескопов TAIGA-AICT**

Место выполнения: МГУ имени М.В. Ломоносова,
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени
Д.В. Скобельцына, Лаборатория наземной гамма-астрономии

Студент M24-114: Горбунов Д.С.

Руководитель работы: Волчугов П.А. (младший научный сотрудник)

Оценка руководителя 4

Москва – 2024 г.

Введение

Цель работы:

Реализовать алгоритм для выделения событий от одиночных мюонов по данным атмосферных черенковских телескопов TAIGA-AICT.

Основные задачи:

- 1) Ознакомиться с методикой наземной регистрации космических лучей и гамма-квантов высоких энергий, посредством атмосферных черенковских телескопов;
- 2) Изучить реализованный в TAIGA подход к выделению одиночных мюонов по форме регистрируемых изображений;
- 3) Применить данный подход к смоделированному набору данных и сравнить полученные значения радиусов мюонных колец с теоретически рассчитанным.

Актуальность:

Наземная гамма-астрономия регистрирует гамма-кванты косвенным методом - через черенковское излучение ШАЛ. Телескопы способны измерять потоки фотоэлектронов, но не фотонов. Таким образом, чтобы достоверно измерить энергию первичных частиц, необходимо знать точную связь числа черенковских фотонов с числом зарегистрированных фотоэлектронов. Одиночные мюоны позволяют установить эту связь, так как с помощью них возможно посчитать число испущенных фотонов и число зарегистрированных и таким образом оценить искомую пропускную способность.

Введение

В настоящее время под первичными космическими лучами (ПКЛ) принято понимать любые заряженные частицы, приходящие на Землю из космоса. В состав ПКЛ входят солнечные космические лучи, энергия которых не превышает десятков ГэВ (10^9 эВ) и космические лучи галактического и внегалактического происхождения, спектр которых является степенным и обрывается при энергии $\sim 10^{20}$ эВ.

Нестандартный, но весьма перспективный подход, расширяющий возможности традиционных IACT телескопов в области высоких энергий, сейчас реализуется в гамма-обсерватории TAIGA. Он заключается в совместном использовании IACT телескопов с широкоугольными черенковскими детекторами. Широугольная черенковская установка ШАЛ представляет собой сеть черенковских детекторов с угловым обзором $\sim 60^\circ$, распределенных в пространстве на площади ~ 1 км².

Гамма-обсерватория TAIGA Развитие в атмосфере ШАЛ, индуцированного первичным адроном высокой энергии, имеет ряд характерных отличий от аналогичного ливня порожденного гамма-квантом. Этот факт используется в IACT методике разделения ПКЛ и гамма-квантов: формируемое телескопом изображение ливня, посредством регистрации черенковского излучения, содержит информацию о продольном и поперечном развитии ШАЛ в атмосфере. Для улучшения эффективности подавления адронного фона при работе с IACT телескопами зачастую используется стереоскопический подход — система IACT телескопов, расположенных таким образом, чтобы изображение ШАЛ могло быть зарегистрировано, по меньшей мере, двумя из них.

Телескоп имеет сферический отражатель диаметром 2,15 м и фокусным расстоянием 4,75 м. Регистрирующая камера телескопа имеет 22 кластера ФЭУ, каждый из которых содержит 28 умножителей. Каждый пиксель имеет диаметр 3 см.



Рис. 1. Фотография телескопа в эксперименте TAIGA

Определение потока мюонов в камере телескопа

Черенковское излучение возникает при скорости движения частицы больше скорости света в данной среде и в определенном угле, для газов очень узком, относительно траектории распространения частицы. Угол излучения зависит от скорости частицы, среды распространения и выражается формулой:

$$\cos \theta = \frac{1}{\beta n}$$

где n показатель преломления среды, и s скорость частицы в среде и скорость света соответственно. Скорость распространения зависит от энергии. Учитывая это можно переписать формулу:

$$\cos \theta = \frac{1}{n \sqrt{1 - \left(\frac{E_0}{E}\right)^2}}$$

где E полная энергия частицы, E_0 масса покоя.

Таким образом, при условии слабого изменения показателя преломления среды и энергии частицы можно считать, что угол черенковского излучения остается постоянным. Для расчета пороговой энергии мюона, при которой будет возникать черенковское излучение необходимо учесть условие $v > c / n$. Тогда выражение для пороговой энергии имеет вид:

$$E = \frac{E_0}{\sqrt{1 - \frac{1}{n^2}}}$$

Таким образом, для вычисления пороговой энергии необходимо знать энергию покоя мюонов и показатель преломления среды, в которой частица распространяется. Коэффициент преломления света n в атмосфере мал и зависит от высоты:

$$n = 1 + 2,9 * 10^{-4} * e^{-\frac{h}{7,1 \text{ км}}}$$

где h высота над уровнем моря.

Тогда для высоты 700 м над уровнем моря, на которой расположена гамма-обсерватория TAIGA, получим коэффициент преломления света:
 $n = 1.000262773$

Подставляя его в формулу для энергии, получим значение пороговой энергии для мюонов:

$$E = 4,6 \text{ ГэВ}$$

Полная энергия мюона и показатель преломления среды позволяют рассчитать угол раствора конуса черенковского излучения. Угол раствора конуса растет с увеличением энергии мюона и при энергиях $E > 20$ ГэВ меняется слабо, стремясь в пределе к величине :

$$\theta = 1,31^\circ$$

Если спроецировать этот конус на поверхность зеркала телескопа, то получится круг. Однако за счёт сферической формы зеркал, в фокальной

плоскости будет наблюдаться окружность, которая и регистрируется ФЭУ. Таким образом, полученные в ходе эксперимента события можно аппроксимировать кольцами.

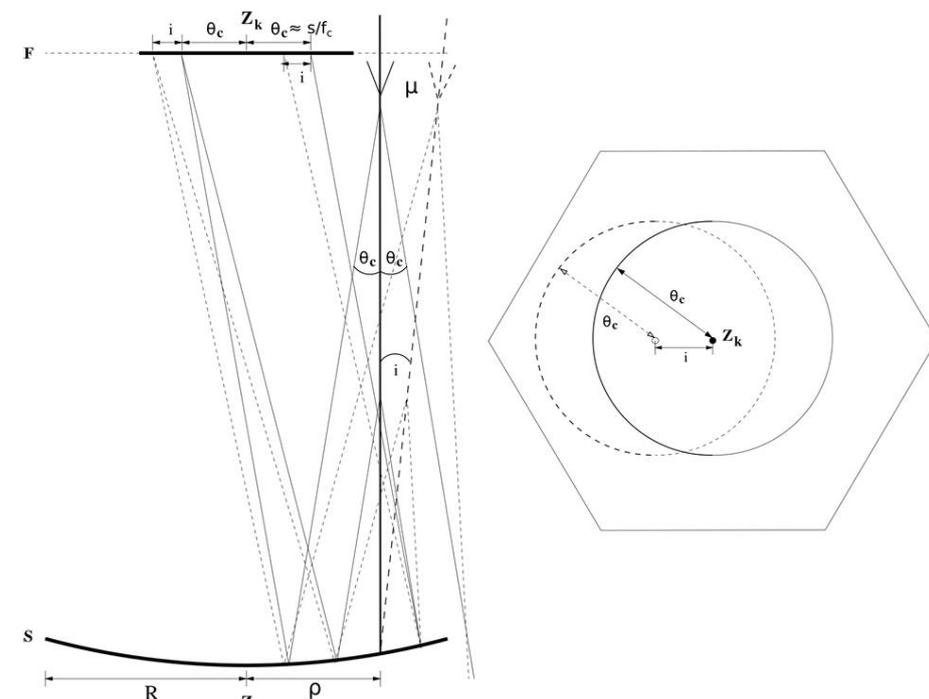


Рис. 2. Траектория излучения черенковских фотонов

s - расстояние от центра камеры до точки падения луча в фокальной плоскости, θ_c - угол между отраженным лучом и перпендикуляром, восстановленным из точки отражения равным фокусному расстоянию f_c .

Расчет числа черенковских фотонов в кольце от одиночного мюона

Для расчёта линейной плотности потока черенковских фотонов используется следующая формула:

$$\frac{dN}{dl} = 2\pi\alpha \sin^2 \theta \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \frac{\eta(\lambda)}{\lambda^2} d\lambda$$

В рамках данной работы была написана программа, позволяющая рассчитать значение данного интеграла:

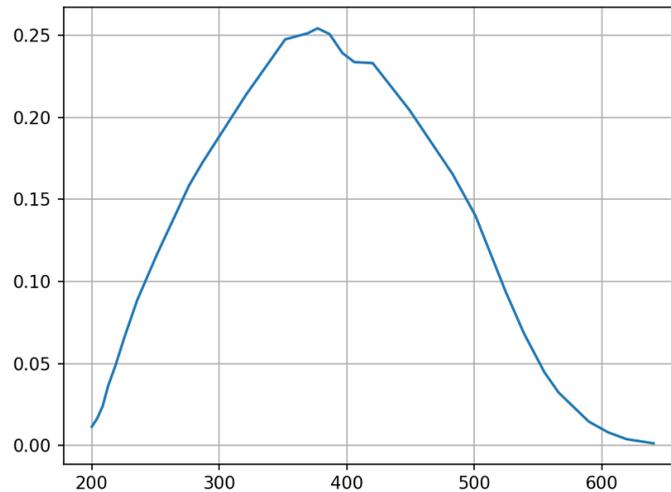


Рис. 3. Эмпирическая зависимость квантовой эффективности регистрации фотонов от их длины волны

Грубая оценка средней квантовой эффективности регистрации:

$$\overline{\eta(\lambda)} \approx \frac{\eta(\lambda)_{max}}{2} = \frac{0,25}{2} = 0,125$$

Точное значение средней квантовой эффективности регистрации:

$$\overline{\eta(\lambda)} = \frac{1}{640 \text{ нм} - 200 \text{ нм}} \int_{200 \text{ нм}}^{640 \text{ нм}} \eta(\lambda) d\lambda = \frac{60 \text{ нм}}{640 \text{ нм} - 200 \text{ нм}} = 0,136$$

Вычисление интеграла с помощью грубой оценки средней квантовой эффективности регистрации:

$$\overline{\eta(\lambda)} \int_{200 \text{ нм}}^{640 \text{ нм}} \frac{d\lambda}{\lambda^2} = 0,125 * 10^9 * \left(\frac{1}{200 \text{ нм}} - \frac{1}{600 \text{ нм}} \right) = 0,000417 \text{ м}^{-1} (10\%)$$

Вычисление интеграла с помощью точного значения средней квантовой эффективности регистрации:

$$\overline{\eta(\lambda)} \int_{200 \text{ нм}}^{640 \text{ нм}} \frac{d\lambda}{\lambda^2} = 0,136 * 10^9 * \left(\frac{1}{200 \text{ нм}} - \frac{1}{600 \text{ нм}} \right) = 0,000453 \text{ м}^{-1} (2\%)$$

Точное вычисление интеграла квантовой эффективности регистрации:

$$\int_{200 \text{ нм}}^{640 \text{ нм}} \frac{\eta(\lambda)}{\lambda^2} d\lambda = 0.000463 \text{ м}^{-1}$$

Линейная плотность потока фотонов:

$$\begin{aligned} \frac{dN}{dl} &= 2 * 3,14 * \frac{1}{137} * \sin^2 1,31^\circ \int_{200 \text{ нм}}^{640 \text{ нм}} \frac{\eta(\lambda)}{\lambda^2} d\lambda = \\ &= 2 * 3,14 * \frac{1}{137} * \sin^2 1,31^\circ * 0.000463 \text{ м}^{-1} = 11,1 \frac{\text{фотонов}}{\text{м}} \end{aligned}$$

Высота, с которой фотоны регистрируются телескопом:

$$\text{tg } \theta = \frac{D}{h} \Leftrightarrow h = \frac{D}{\text{tg } \theta} = \frac{2,15 \text{ м}}{\text{tg } 1,31^\circ} = 94 \text{ м}$$

Число фотонов, образующих кольцо:

$$N = \frac{dN}{dl} * h = 11,1 \frac{\text{фотонов}}{\text{м}} * 94 \text{ м} = 1043 \text{ фотона}$$

Периметр кольца:

$$P = \frac{2\pi r}{\omega} = \frac{2 * 3,14 * 1,31^\circ}{0,36^\circ/\text{пиксель}} = 22,85 \text{ пикселя}$$

Плотность распределения фотонов в кольце:

$$\rho = \frac{N}{P} = \frac{1043 \text{ фотона}}{22,85 \text{ пикселя}} = 46 \frac{\text{фотонов}}{\text{пикселя}}$$

Полученную величину можно напрямую соотнести с потоком фотонов, получаемым при регистрации черенковских колец в рамках моделирования и эксперимента.

Построение изображения черенковского кольца на шестиугольной сетке

Для уточнения экспериментальных данных производилось дополнительное моделирование. В качестве примера, рассмотрим событие №37. В него входят сработавшие пиксели, имеющие следующие параметры:

X, см	Y, см	N, фотон
-3	15,5885	10,521
-4,5	18,1865	24,596
0	20,7846	21,164
-1,5	18,1865	12,199
15	5,19615	29,74
...

Для аппроксимации события кольцом необходимо вычислить координаты его центра и радиус. Впоследствии его можно будет наложить на данные моделирования.

Наиболее простым способом вычислить координаты центра является усреднение координат пикселей с учётом их интенсивности. Вычислим центр кольца, используя следующие формулы:

$$x_c = \frac{\sum_i N_i x_i}{\sum_i N_i} = 9,29 \text{ см}$$

$$y_c = \frac{\sum_i N_i y_i}{\sum_i N_i} = 13,40 \text{ см}$$

Для вычисления радиуса черенковского кольца используем формулу среднеквадратичного отклонения координат пикселей от координат центра кольца с учётом их интенсивности:

$$R = \sqrt{\frac{\sum_i N_i ((x_c - x_i)^2 + (y_c - y_i)^2)}{\sum_i N_i}} = 10,1 \text{ см}$$

Так как в фокальной плоскости имеет значение лишь угол, под которым фотон попал на зеркальную поверхность, то от линейных координат для удобства можно перейти к угловым. Исходя из вышеописанных геометрических соотношений:

$$\frac{s}{\sin \theta} = \frac{f}{\sin \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right)} \Leftrightarrow \frac{s}{\theta} \approx f \Leftrightarrow \theta \approx \frac{1}{f} s \Rightarrow$$

$$\Rightarrow k_f = \frac{180^\circ}{\pi f} = \frac{180^\circ}{3,14 * 4,75} = 0,1206^\circ/\text{см}$$

Таким образом, для перехода к градусам линейные размеры изображения необходимо умножать на 0,1206°/см. Отобразим кольцо, его центр и образующие его точки на следующем рисунке, а затем наложим его на шестиугольную сетку:

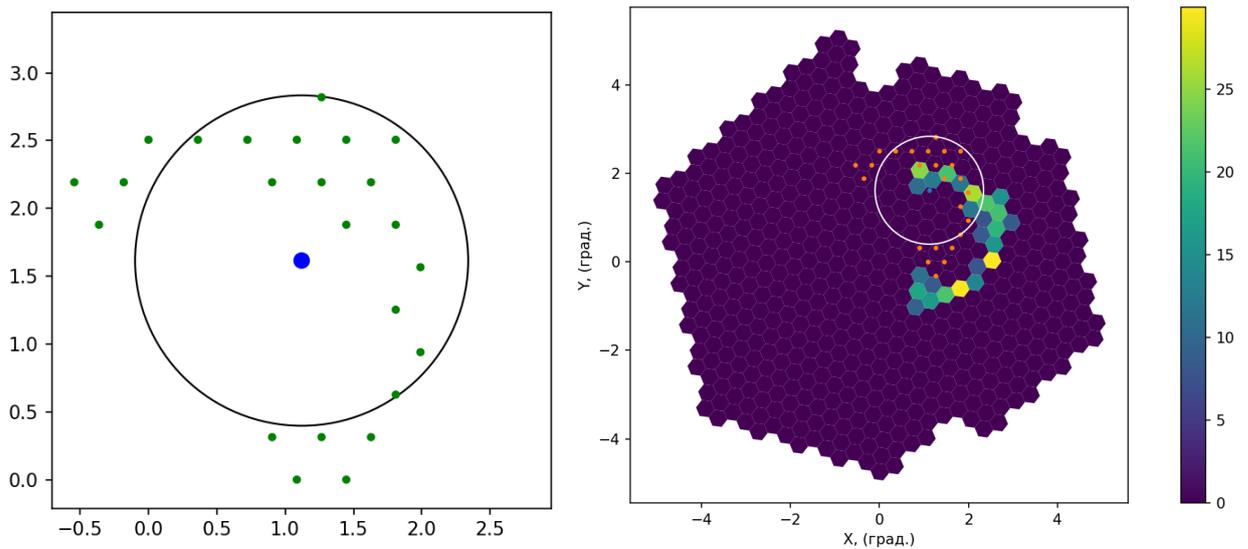


Рис. 4. Прямое наложение данных моделирования на шестиугольную сетку

Из-за поворота реальной камеры относительно моделируемой на 37° относительно центра камеры, изображения накладываются не точно друг на друга. Для поворота изображения используем матрицу поворота:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos 37^\circ & -\sin 37^\circ \\ \sin 37^\circ & \cos 37^\circ \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

После применения матрицы поворота получим:

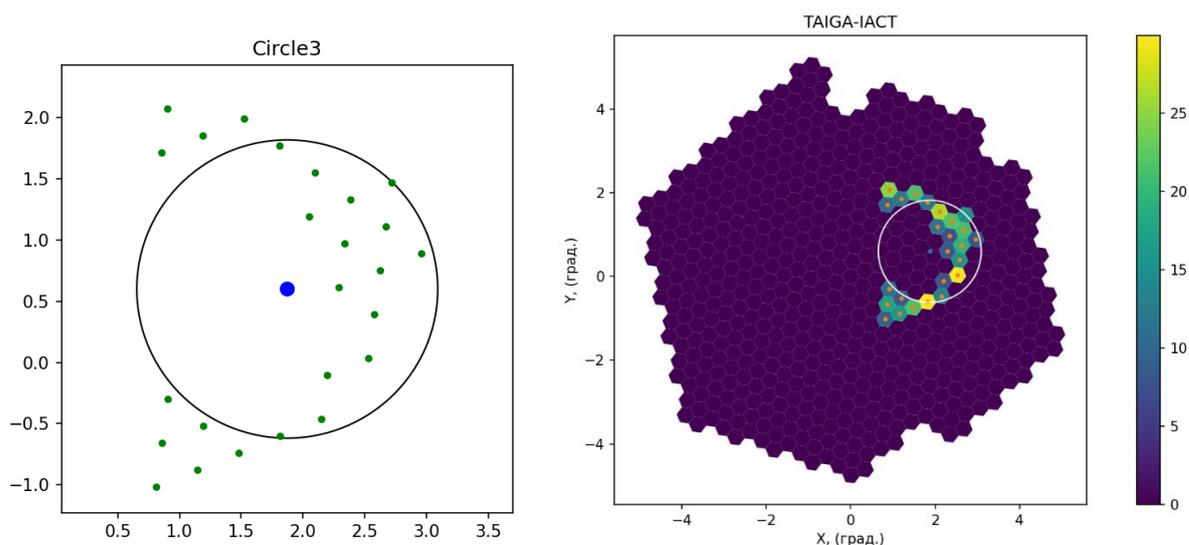


Рис. 5. Прямое наложение данных моделирования на шестиугольную сетку с учётом матрицы поворота

Построение распределения черенковских колец по радиусам

В случаи событий с маленькими дугами (меньшими 180^0), вышеописанная формула определения радиуса кольца даёт некорректный результат, так как часть фотонов просто может не попасть в отражатель телескопа.

В связи с вышеописанной проблемой, для увеличения точности необходимо набрать статистику из множества таких событий, по которой можно будет найти средний радиус черенковского кольца. В рамках моделирования было получено 147 293 события. Распределение их радиусов отражено на следующем графике:

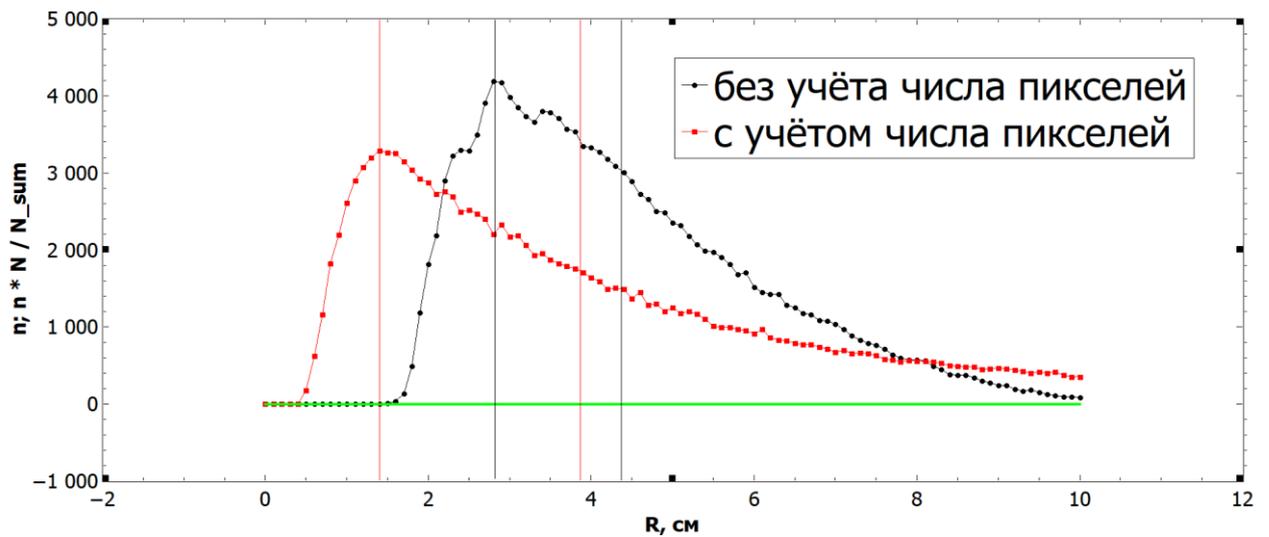


Рис. 6. Распределение черенковских колец по радиусам

На верхнем графике показано распределение, в котором число событий в данном интервале радиусов считалось без учёта числа пикселей. Его максимум пришёлся на радиус $R_{max} = 2,82$ см, а средний радиус был рассчитан по формуле:

$$\bar{R} = \frac{\sum_i n_i x_i}{\sum_i n_i} = 4,37 \text{ см}$$

На нижнем графике показано распределение, в котором число событий в данном интервале радиусов считалось с учёта числа пикселей. За счёт этого влияние некорректных событий с малыми дугами, число пикселей в которых значительно меньше, удалось существенно снизить. Его максимум пришёлся на радиус $R_{max} = 1,40$ см, а средний радиус был рассчитан по формуле:

$$\bar{R} = \frac{\sum_i n_i N_i x_i}{\sum_i n_i N_i} = 3,87 \text{ см}$$

Из выше описанных теоретических соображений следует, что радиус колец должен лежать в диапазоне:

$$8 \text{ см} \leq R \leq 13 \text{ см}$$

Однако все полученные выше значения лежат сильно левее этого диапазона, что говорит о том, что используемого критерия отбора недостаточно для получения достоверного результата, то есть следует использовать дополнительные критерии отбора, позволяющие исключить события с маленькими дугами (меньшими 180^0), что предполагается сделать в последующих исследованиях.

Заключение

В данной работе был частично реализован алгоритм для первичного выделения событий от одиночных мюонов в эксперименте TAIGA, был произведён расчёт линейной плотности потока черенковских фотонов, изучен подход к выделению одиночных мюонов по форме регистрируемых изображений и применён к смоделированному набору данных, что позволило сравнить полученные значения радиусов мюонных колец с теоретически рассчитанным.

В рамках первой части работы был произведен более точный расчет линейной плотности потока фотонов:

$$\frac{dN}{dl} = 11,1 \frac{\text{ФОТОНОВ}}{\text{М}}$$

Данный результат отличается от грубой оценки на 10%, что делает его более релевантным для дальнейших вычислений. На основании этой величины была вычислена плотность распределения фотонов в кольце:

$$\rho = 46 \frac{\text{ФОТОНОВ}}{\text{ПИКСЕЛЯ}}$$

Эту величину можно напрямую соотнести с потоком фотонов, получаемым при построении черенковских колец в рамках моделирования и эксперимента.

В рамках второй части работы было построено изображения черенковского кольца на шестиугольной сетке для одного из событий. После соответствующих геометрических преобразований кольцо достаточно точно наложилось на данные моделирования.

В рамках третьей части работы было построено распределение радиусов черенковских колец с учётом их относительной интенсивности и без их учёта. В первом случае радиус максимума распределения и средний радиус оказались равны:

$$R_{max} = 1,40 \text{ см}$$

$$\bar{R} = 3,87 \text{ см}$$

Во втором же случае:

$$R_{max} = 2,82 \text{ см}$$

$$\bar{R} = 4,37 \text{ см}$$

Из теоретических соображений следует, что радиус колец должен лежать в диапазоне:

$$8 \text{ см} \leq R \leq 13 \text{ см}$$

Однако все полученные выше значения лежат сильно левее этого диапазона, что говорит о том, что используемого критерия отбора недостаточно для получения достоверного результата, то есть следует использовать дополнительные критерии отбора, позволяющие исключить события с маленькими дугами (меньшими 180°), что предполагается сделать в последующих исследованиях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] Atwood W. B., Abdo A. A., Ackermann M. et al. The Large Area Telescope on the Fermi Gamma-ray Space Telescope Mission // *The Astrophysical Journal*. — 2009. — May. — Vol. 697, no. 2. — P. 1071–1102. — Access mode: <https://doi.org/10.1088/0004-637x/697/2/1071>.
- [2] Hinton J. The status of the HESS project // *New Astronomy Reviews*. — 2004. — Apr. — Vol. 48, no. 5-6. — P. 331–337. — Access mode: <https://doi.org/10.1016/j.newar.2003.12.004>.
- [3] Cortina J. Highlights of the MAGIC telescopes // *International Cosmic Ray Conference*. — Vol. 11 of *International Cosmic Ray Conference*. — 2011. — Jan. — P.147. — 1110.4747.
- [4] Perkins J. S., Maier G., The VERITAS Collaboration. VERITAS Telescope 1 Relocation: Details and Improvements // *arXiv e-prints*. — 2009. — Dec. — P. arXiv:0912.3841. — 0912.3841.
- [5] Acharya B., Actis M., Aghajani T. et al. Introducing the CTA concept // *Astroparticle Physics*. — 2013. — Mar. — Vol. 43. — P. 3–18. — Access mode: <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2013.01.007>.
- [6] Hassan T., Arrabito L., Bernlör K. et al. Second large scale Monte Carlo study for the Cherenkov Telescope Array // *34th International Cosmic Ray Conference (ICRC2015)*. — Vol. 34 of *International Cosmic Ray Conference*. — 2015. — Jul. — P. 971. — 1508.06075.