

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФФУЗНОГО ОТРАЖЕНИЯ СВЕТА ОТ ЗЕРКАЛА ДЕТЕКТОРА ТУС

А. Н. Бородин^{a, 1}, А. В. Блинов^a, А. А. Гринюк^a, Л. Г. Ткачёв^a

^a Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, 141985, Россия

Диффузное отражение света от поверхности зеркала флуоресцентного детектора может исказить интерпретацию данных. Поэтому необходимо оценить коэффициент диффузного отражения от поверхности главного зеркала детектора. В ходе работы был применен метод измерения диффузного отражения путем сравнения с тестовым объектом и измерен коэффициент диффузного отражения прототипа зеркала ТУС. Полученное значение коэффициента диффузного отражения $r_d = (0,41 \pm 0,19)\%$ будет использовано для коррекции методики интерпретации данных.

Diffuse light reflection from the surface of a fluorescent detector mirror can distort data interpretation. Therefore, it is necessary to estimate the diffuse reflection coefficient from the surface of the main detector mirror. In this work, a method of measuring diffuse reflection by comparing with a test object was applied, and the diffuse reflection coefficient of the TUS mirror prototype was measured. The obtained value of the diffuse reflection coefficient $r_d = (0.41 \pm 0.19)\%$ will be used to correct the data interpretation methodology.

PACS: 32.50.+d

ВВЕДЕНИЕ

Детектор ТУС [1] был первой экспериментальной установкой для измерения флуоресцентного и черенковского излучения ШАЛ с орбиты. Главной целью эксперимента было исследование космических лучей предельно высоких энергий (КЛПВЭ) с энергией $E > 70$ ЭэВ. В результате работы прибора на борту спутника «Ломоносов» опробована методика детектирования и найдено несколько событий, искомых кандидатов широких атмосферных ливней КЛПВЭ, а также получена информация о свечении ночной атмосферы в ультрафиолетовом диапазоне, что необходимо для успешной разработки орбитальных детекторов следующего поколения: КЛПВЭ, JEM-EUSO и РОЕММА.

Вместе с тем детектор ТУС зарегистрировал несколько десятков необычных событий, происхождение которых на сегодня неясно [2]. Возможная природа этих событий — диффузное отражение света, порождаемого вспышками молний или другими атмосферными явлениями, от задней стороны солнечных панелей и френелевского зеркала ТУС. В данной работе приведены методика измерения диффузного отражения света от зеркала ТУС, метод обработки результатов и измерен коэффициент диффузного отражения запасного модуля зеркала относительно образца с известным коэффициентом диффузного отражения.

¹E-mail: borodin@jinr.ru

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения коэффициента диффузного отражения запасного модуля зеркала ТУС проводились в темном помещении. На расстоянии, близком к радиусу кривизны зеркала, устанавливался источник расходящегося излучения. Источником служил светодиодный фонарь со встроенным стабилизатором тока. Изображение источника попадало в отверстие «черного тела». Между источником и его изображением устанавливался фотоаппарат. В поле зрения фотоаппарата попадало зеркало и неосвещенные участки, которые использовались для оценки уровня фона. После получения изображений зеркала с различными выдержками на место зеркала устанавливался лист белой бумаги с известным коэффициентом диффузного отражения, равным 95 %, и фотографировался с теми же выдержками. Это делалось для того, чтобы исключить влияние неравномерности освещения поверхности зеркала. Всего было сделано 11 фотографий для зеркала и листа белой бумаги с выдержками от 1/13 до 1 с. Схема измерений представлена на рис. 1.

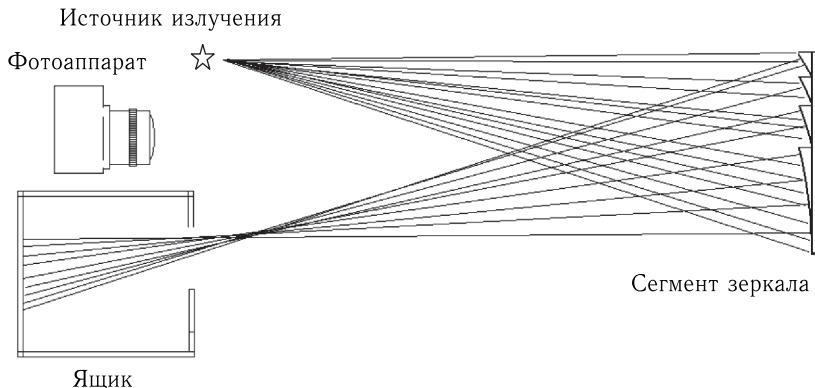


Рис. 1. Схема измерений диффузно-отраженного света

ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЯ

Изображение с фотоаппарата состоит из 3008×2000 пикселей, каждый пиксель содержит в себе значение интенсивности света определенных участков спектра — красного, зеленого, синего. Каждое значение изменяется от 0 до 255. Набором числовых значений цветовых каналов определяется каждая точка на этом изображении. Нужно отметить, что каждый пиксель видит площадку размером $0,5 \times 0,5$ мм на зеркале. В анализе коэффициента диффузного отражения использовались только пиксели, которые «видят» зеркало. В дальнейшем эти пиксели будут называться пикселями зеркала. Для изучения диффузного отражения рассматривалась только синяя составляющая изображения, так как она наиболее близка к спектральному диапазону детектора ТУС.

Для оценки коэффициента диффузного отражения зеркала необходимо было построить характеристическую кривую оптической системы фотоаппарата (рис. 7) [3].

С ее помощью можно выделить области передержек и недодержек, в которых зависимость интенсивности от времени выдержки нелинейная, а также можно выделить область линейной зависимости интенсивности, в которой влияние шумов минимально и отсутствуют области пересветки, т. е. полученное изображение будет с наибольшей точностью описывать поверхность зеркала.

Чтобы построить характеристическую кривую, необходимо найти опорное изображение, у которого все точки зеркала находятся внутри линейного участка динамического диапазона, т. е. у этого изображения отсутствуют точки в областях передержки и недодержки. Для построения характеристической кривой было выбрано изображение с выдержкой 0,5 с (рис. 2–5). На рис. 2 и 3 приведены исходные изображения зеркала и белого листа, на рис. 4 представлено двумерное распределение интенсивности света на зеркале. На рис. 5 представлена гистограмма распределения интенсивности синего света на зеркале по цветовой модели RGB.

Далее были выбраны все точки на изображении зеркала со значением интенсивности синего цвета 100 и наблюдалась зависимость изменения интенсивности этих точек на изображениях с разным временем выдержки (рис. 6). Как оказалось, эти точки не переходили в одно значение, а имели узкие быстроспадающие одногорбые распределения (такое поведение обусловлено шумами системы регистрации изображения фотоаппарата), стандартные отклонения которых отмечены на характеристической кривой. На линейном участке с выдержкой от 1/4 до 0,62 с максимальная ошибка характеристической кривой ± 10 относительных единиц интенсивности.

После определения опорного рисунка и построения характеристической кривой можно сразу найти коэффициент диффузного отражения зеркала. Алгоритм был следующим: сначала создавался двумерный массив точек, который содержал все пиксели



Рис. 2. Изображение зеркала с выдержкой 0,5 с



Рис. 3. Изображение белого листа с выдержкой 0,5 с

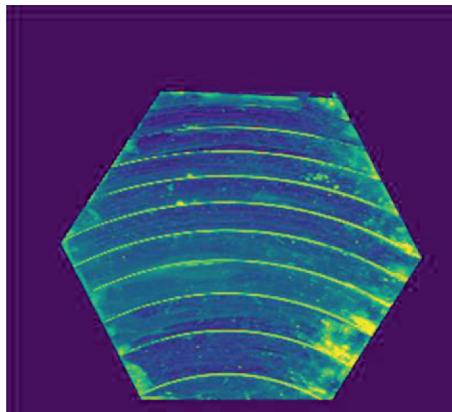


Рис. 4. Изображение зеркала в синем участке спектра

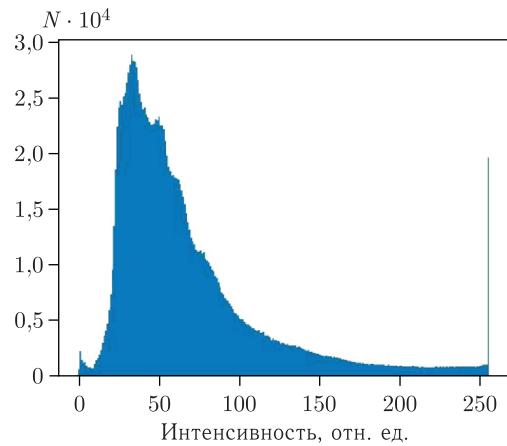


Рис. 5. Интенсивность синего участка спектра на зеркале по цветовой модели RGB

изображения, соответствующие зеркалу. В этом массиве хранилась информация о положении этих точек и их интенсивности в синем участке спектра по цветовой модели RGB. После выбиралась область на краю изображения 300×300 пикселей. В этом квадрате находилась темная область, которая использовалась для вычисления минимального фонового значения интенсивности. Найдя среднее значение интенсивности этих пикселей, мы его определили как минимальный фон оптической системы. Вычитая его из интенсивности каждого пикселя, мы получали истинное значение интенсивности пикселя. Этот же алгоритм применялся для изображений белого листа (см. рис. 3). Белый лист имеет известный коэффициент диффузного отражения $R = 0,95$, и он использовался для вычисления коэффициента диффузного отражения самого зеркала. Формула вычисления коэффициента диффузного отражения при обработке цифрового изображения, в соответствии с [4], выглядит следующим образом:

$$r_d = \frac{I_{\text{mirror}} - I_{\text{bg}}}{(I_{\text{paper}} - I_{\text{bg}}) \cdot 0,95},$$

где I_{mirror} — интенсивность света на зеркале; I_{paper} — интенсивность света на белом листе; I_{bg} — минимальный фон оптической системы фотоаппарата.

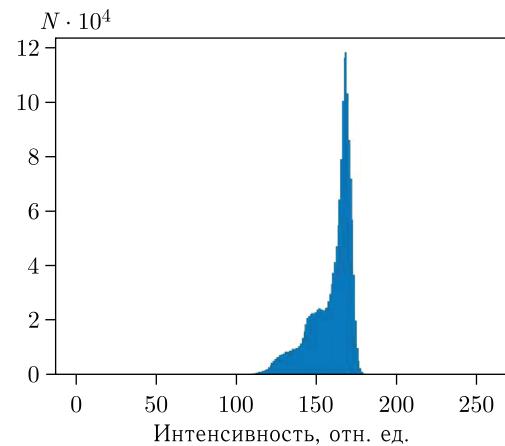


Рис. 6. Интенсивность синего участка спектра на листе белой бумаги по цветовой модели RGB

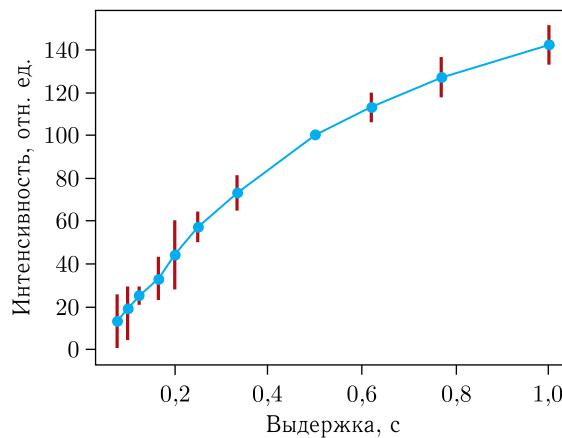


Рис. 7. Характеристическая кривая оптической системы фотоаппарата. По оси x отложено время выдержки при съемке изображения, по оси y — значения средней интенсивности света на изображениях зеркала с разной выдержкой

Для определения ошибки нашего метода мы должны создать таблицу перехода для каждого из изображений к опорному. Это было сделано следующим образом: на опорном изображении фиксировалась определенная интенсивность, к примеру 100, и на всем изображении находились координаты всех точек с этой интенсивностью, после строилось распределение интенсивности этих пикселей для изображения с другой выдержкой и у этого распределения находилось среднее значение. Эта операция проводилась для каждого значения интенсивности от 0 до 255 и каждого изображения. Таким образом у нас получалась таблица перехода к опорному изображению для каждого изображения с другим временем выдержки.

С помощью таблицы перехода для каждого из изображений был осуществлен переход к опорному изображению. Происходил он следующим образом: рассматривалась интенсивность каждого пикселя и, в соответствии с таблицей перехода (ее часть представлена в таблице), значение интенсивности пикселя заменялось на среднее, полученное ранее. К примеру, возьмем изображение с выдержкой 1/13 с. На нем

Таблица перехода к опорному изображению с минимальным значением интенсивности

Изначальная интенсивность на изображении	Преобразованная к опорному изображению интенсивность			
	Выдержка 1/13 с	Выдержка 1/10 с	Выдержка 1/8 с	Выдержка 1/6 с
0	0	0	0	0
1	7	6	4	3
2	22	16	12	10
3	34	26	18	14
4	40	32	24	17
5	44	35	27	20

у каждого пикселя со значением интенсивности 10 значение интенсивности будет заменено на 81 в соответствии с таблицей перехода к опорному изображению. Так как одной и той же интенсивности на преобразуемых изображениях могло соответствовать несколько значений интенсивности на опорном изображении в таблице перехода, было создано 2 набора массивов перехода — с минимальным и максимальным значением интенсивности по опорному изображению.

После всех этих преобразований были построены гистограммы распределения коэффициента диффузного отражения каждого пикселя зеркала для преобразованных изображений.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На основании построенных гистограмм распределений коэффициента диффузного отражения пикселей на преобразованных изображениях (рис. 8 и 9) коэффициент диффузного отражения зеркала по поверхности распределен неравномерно в диапазоне от $0,23$ до $0,5^{+0,1} \cdot 100\%$ на уровне половины высоты распределения, а среднее значение равно:

$$r_d = (0,41 \pm 0,19) \cdot 100\%.$$

Важно отметить, что был выполнен анализ влияния ребер френелевского зеркала и повреждений оптического покрытия. После учета пикселей, включающих эти зоны, был сделан вывод о том, что они не оказывают влияния на коэффициент диффузного отражения.

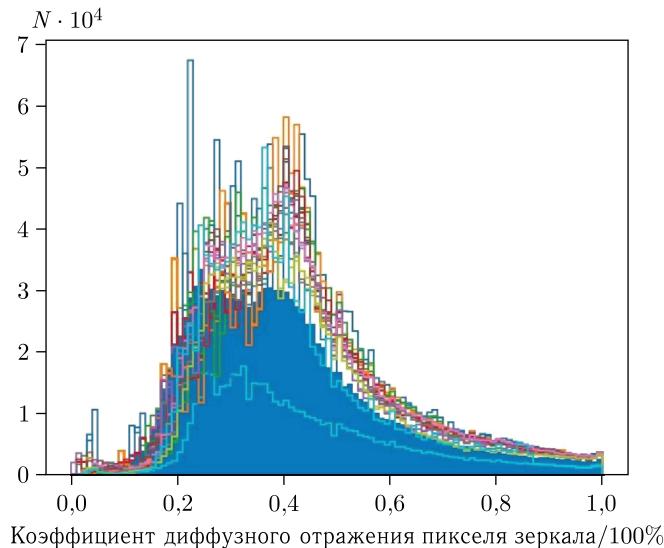


Рис. 8. Распределение коэффициента диффузно-отраженного света на зеркале. Залитая гистограмма — опорный рисунок, прозрачные — приведенные изображения

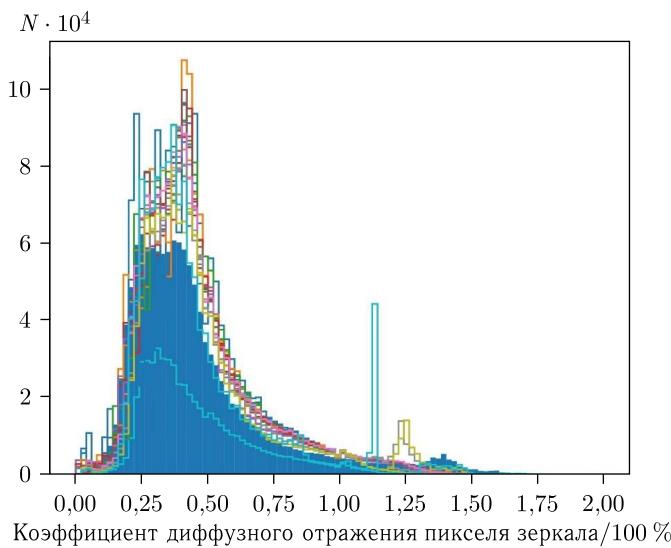


Рис. 9. Распределение коэффициента диффузно-отраженного света на зеркале. Залитая гистограмма — опорный рисунок, прозрачные — приведенные изображения. Коэффициент диффузного отражения больше 1 соответствует точкам, где присутствует часть зеркального отражения света

Финансирование. Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Объединенного института ядерных исследований. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Klimov P. A., Panasyuk M. I., Khrenov B. A., Garipov G. K., Kalmykov N. N., Petrov V. L., Sharakin S. A., Shirokov A. V., Yashin I. V., Zотов M. Y., Biktemerova S. V., Grinyuk A. A., Grebenyuk V. M., Lavrova M. V., Tkachev L. G., Tkachenko A. V., Park I. H., Lee J., Jeong S., Martinez O., Salazar H., Ponce E., Saprykin O. A., Botvinko A. A., Senkovsky A. N., Puchkov A. E. // Space Sci. Rev. 2017. V. 212. P. 1687–1703.
2. Lavrova M. V., Blinov A. V., Grinuyk A. A., Tkachev L. G. Analysis of Anomalous Events in TUS Data // Phys. At. Nucl. 2023. V. 86, No. 4. P. 510–516.
3. Коновалов Л. В. Характеристическая кривая. М.: МГИМО, 2007. 29 с.
4. ГОСТ 8.654-2016. Фотометрия. Термины и определения. Взамен ГОСТ 26148-84; введ. 2017-01-07. М.: Стандартинформ, 2016. 15 с.

Получено 27 сентября 2024 г.