

## ФОТОМЕТРИЧЕСКАЯ КАЛИБРОВКА ИНТЕРФЕРОМЕТРОВ ФАБРИ-ПЕРО НГК РАН ПО ЗВЕЗДАМ

А.Д. Шелков, М.Ф. Артамонов

<sup>1</sup>Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия, alshel@iszf.irk.ru

### NHC RAS FABRY-PEROT INTERFEROMETERS' PHOTOMETRIC CALIBRATION USING STARS

A.D. Shelkov, M.F. Artamonov

<sup>1</sup>Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, alshel@iszf.irk.ru

**Аннотация.** В данной работе представлен метод фотометрической калибровки интерферометров Фабри-Перо НГК РАН по звездам. Были проанализированы интерферограммы за 2023 – начало 2024 г. Проведен расчет количества энергии, пришедшей на входное окно интерферометра от 10 звезд. После подсчета интенсивности на матрице в отсчетах АЦП, был получен калибровочный коэффициент, применение которого к имеющимся данным по относительной интенсивности позволит перейти к абсолютным интенсивностям ночного свечения неба.

**Ключевые слова:** интерферометр Фабри-Перо, фотометрическая калибровка.

**Abstract.** This paper presents a photometric calibration method of the Fabry-Perot interferometers of the NHC RAS using stars. Interferograms from 2023 to early 2024 were analyzed. We calculated incident energy on interferometer's entry window from 10 stars. After acquiring intensity of star images in ADC counts, we derived a calibration coefficient. This coefficient can convert existing nightglow arbitrary intensity data into absolute intensities.

**Keywords:** Fabry-Perot interferometer, photometric calibration.

### ВВЕДЕНИЕ

Фотометрическая калибровка оптических инструментов нужна, чтобы перейти от неких абстрактных относительных единиц к абсолютным значениям энергии или потока излучения. Интерферометр Фабри-Перо (ИФП) фиксирует изображение интерферограмм с помощью ПЗС-матрицы. На выходе мы видим пространственное распределение отклика матрицы и усилителя на падающее излучение в относительных единицах АЦП. Такие данные позволяют точно рассчитывать температуру и скорость ветра нейтральной компоненты, но про интенсивность свечения можно говорить только относительно.

Чтобы получить абсолютные значения интенсивности, нужно использовать некий эталонный источник излучения. Это может быть специальный калибровочный источник или хорошо изученный естественный объект или явление, например, звезда. Звезды хорошо подходят на роль калибровочного источника по нескольким причинам:

1. Звезды, если они не являются переменными, являются очень стабильными во времени источниками излучения.

2. Положение звезд на небе меняется очень слабо в течение года. Это позволяет использовать звезды не только для фотометрической калибровки, но и для пространственной калибровки монтировки.

3. Многие звезды уже хорошо изучены и есть большой массив данных о них.

### РАСЧЕТ ЭНЕРГИИ ОТ ЗВЕЗД, ПРИШЕДШЕЙ НА ВХОДНОЕ ОКНО ИФП

Для получения информации об интенсивности свечения, необходимо провести фотометрическую калибровку интерферометров Фабри-Перо. Чтобы

не прерывать научную программу действующих инструментов, было решено провести калибровку по звездам используя архивные данные за 2023 и начало 2024 г. В рамках исследования использовались интерферограммы северной части неба, полученные на длине волны 630 нм.

Сперва, нужно выделить безлунные и безоблачные дни. Луна сильно повышает фоновую интенсивность, что не позволит выделить звезды. Для выделения безлунных дней использовалась утилита Mooncalc.org. Сильная облачность вносит шумы и повышает фон изображения за счет поглощения и рассеяния. Для оценки облачности использовались данные с цветной камеры Филин [Подлесный и др., 2022]. Камера направлена на север, поле зрения составляет 86 на 76 градусов. Программа обработки считает количество звезд в поле зрения — так можно оценить временные промежутки со слабой или отсутствующей облачностью.

Следующий этап — идентификация звезд. В рамках исследования использовались интерферограммы северной части неба, полученные на длине волны 630 нм. За период 2023–2024 гг. на интерферограммах было выявлено 10 звезд (табл. 1). Для этого использовалась программа Stellarium. После идентификации необходимо рассчитать количество энергии, пришедшей на входное окно интерферометра от звезды. Поверхностная спектральная плотность излучения рассчитывалась с помощью формулы Планка:

$$B(\lambda, T_{eff}) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\frac{e^{hc}}{kT_{eff}\lambda} - 1}$$

Таблица 1.  
Звезды, использованные для калибровки,  
и их параметры.

Звезда	$m$	$M$	$B - V$	Спектральный класс	$T_{eff}, K$	Расстояние, св. лет
HD 217382	4,7	-0,55	1,42	K4III	4045	365,65
HD 216446	4,75	-0,2	1,26	K3III	4371	319,14
HD 26659	5,45	0,63	0,85	G8III	5311	300,05
HD 26356	5,5	-1,11	0	B5V	10125	685,2
HD 4853	5,55	0,1	0,1	A4V	9027	268,22
HD 15036	6,65	0,09	1,36	K0	4017	669,73
HD 12918	6,45	0,78	0,95	K0	4960	443,75
HD 112014	5,8	1,63	0	A0	10125	222,18
HD 112028	5,3	0,46	0,04	A2	9443	303,4
HD 120565	5,9	0,59	0,98	G9III	4904	376,19

Для длины волны  $\lambda$  брался диапазон пропускающего красного фильтра интерферометра  $630 \pm 0,4$  нм. Эффективная температура  $T_{eff}$  звезд, где было возможно, бралась из базы данных Simbad [Wenger et al., 2000] Для звезд без измеренной  $T_{eff}$  она рассчитывалась с использованием показателя цвета  $B - V$  [Ballesteros, 2012]:

$$T_{eff} = 4600 \left( \frac{1}{0,92(B - V) + 1,7} + \frac{1}{0,92(B - V) + 0,62} \right).$$

Уравнение для потока энергии выглядит так:

$$\Phi = \int_{629,96}^{630,04} B(\lambda) d\lambda \int dA \int d\Omega.$$

Для вычисления потока энергии, приходящего от звезды на входное окно ИФП, нужно найти площадь излучающей поверхности и телесный угол:

$$A = 2\pi R^2, R = R_{Sun} \left( \frac{T_{Sun}}{T_{eff}} \right)^2 \cdot \sqrt{\frac{L}{L_{Sun}}}, \Omega = \frac{d^2}{A_{entry}}$$

Здесь  $R$  и  $R_{Sun}$  — радиусы рассматриваемой звезды и Солнца,  $L$  и  $L_{Sun}$  — их светимости,  $d$  — расстояние между ИФП и звездой,  $A_{entry}$  — площадь входного окна ИФП. Умножив получившийся поток на время экспозиции, получим количество энергии, пришедшей от звезды на входное окно ИФП.

## ПОЛУЧЕНИЕ КАЛИБРОВОЧНОГО КОЭФФИЦИЕНТА

Теперь, нужно определить, сколько энергии, в терминах отсчетов АЦП, попало на матрицу интерферометра. Изображение звезды на интерферограмме вытянуто из-за отсутствия гидирования и интерференции. Более того, на фоне звезды есть множество интерференционных колец, которые мешают подсчету интенсивности в изображении звезды. Чтобы компенсировать влияние колец, был реализован следующий алгоритм:

1) На изображении находится центр интерферограммы;

2) Вручную выделяется прямоугольная область, содержащая изображение звезды;

3) Вычисляется суммарная интенсивность внутри этой области;

4) Вычисляется суммарная интенсивность в трех прямоугольных областях, отраженных относительно вертикальной и горизонтальной осей интерферограммы и относительно центра;

5) Среднее значение интенсивности этих трех областей вычитается из первого значения.

Осталось лишь составить соотношение теоретически рассчитанного количества энергии и интенсивности на матрице:

$$Calibrationcoef = \frac{\Phi t_{exp}}{I_{cam}}.$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан алгоритм фотометрической калибровки астрономических интерферометров Фабри-Перо по звездам. Проведена фотометрическая калибровка Интерферометров Фабри-Перо НГК РАН по 10 звездам, попавшим в поле зрения инструмента в 2023–2024 гг. Средний калибровочный коэффициент равен  $25,5 \frac{\text{фотонов/с}}{\text{y.e.}}$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Подлесный С.В., Девятова Е.В., Саункин А.В., Васильев Р.В. Сопоставление методов определения облачного покрова над байкальской природной территорией в декабре 2020 г. // Солнечно-земная физика. 2022. Т. 8, № 4. С. 102–109.
- Ballesteros F.J. New insights into black bodies // Europhysics Lett. 2012. V. 97, N 3. 34008.
- Wenger M. The SIMBAD astronomical database. The CDS reference database for astronomical objects // Astronomy and Astrophys. Supplement Ser. 2000. V. 143. P. 9–22.