

# Болометрические Кривые Блеска и Параметры Взрыва Сверхъярких Сверхновых

Т. А. Семенихин <sup>1</sup>, М. В. Корнилов <sup>2</sup>, М. В. Пружинская <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, факультет

космических исследований, <sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Государственный астрономический институт им.П.К.Штернберга

## Введение

Объектом исследования являются сверхяркие сверхновые (СН) — объекты, чья абсолютная звездная величина в максимуме блеска  $M < -21^m$ , а полная излучаемая энергия  $E > 10^{51}$  эрг. Таким образом, сверхяркие СН как минимум в 10 раз ярче, чем типичные сверхновые типа Ia, используемые в качестве индикаторов космологических расстояний.

Цель работы состоит в получении болометрических кривых блеска сверхъярких сверхновых, используя данные Открытого каталога сверхновых звезд и векторные Гауссовы процессы. С помощью теоретического и аналитического моделирования из полученных болометрических кривых блеска будут извлечены параметры взрыва сверхновых, такие как энергия взрыва и масса образовавшихся радиоактивных элементов.

## Методы

Задача предполагает работу с данными Открытого каталога сверхновых звезд (ОКС) [1]. В каталоге содержатся фотометрические наблюдения (кривые блеска) сверхновых звезд в разных полосах пропускания.

Максимально точно удастся определить параметры предсверхновых и параметры взрыва, анализируя так называемые болометрические кривые блеска, которые показывают как поток от звезды, просуммированный по всему спектру излучения (по всем длинам волн), меняется со временем.

Представленные в каталоге ОКС многоцветные кривые блеска неоднородны по времени. Для получения квазиболометрической кривой блеска необходимо просуммировать потоки, измеренные в разных полосах. Поэтому имеющиеся кривые блеска нужно аппроксимировать. В данной задаче предлагается это сделать с помощью векторных Гауссовых процессов [2]. Векторные Гауссовы процессы позволяют скоррелировать между собой многоцветные кривые блеска объекта. Таким образом, становится возможным восстанавливать отсутствующие части кривой блеска в одной полосе пропускания по поведению кривых блеска в других полосах.

Далее, используя теоретические и аналитические модели, предполагается извлечь из болометрических кривых блеска информацию о параметрах предсверхновых и параметрах взрыва, что поможет лучше понять их астрофизическую природу.

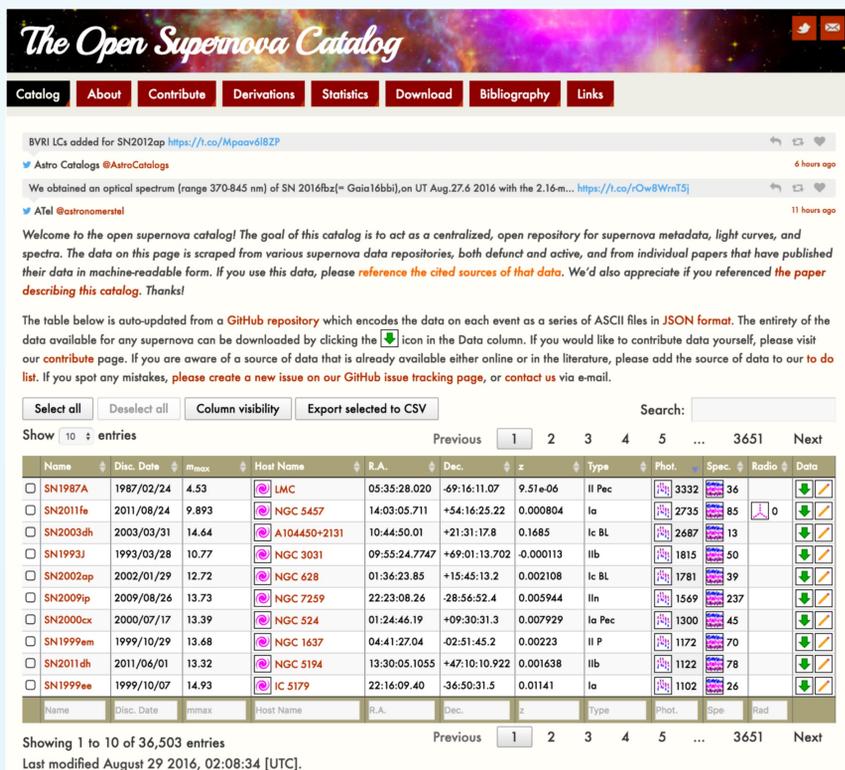


Рис. 1. Интерфейс главной страницы Открытого каталога сверхновых звезд.

## Гауссовы процессы

Гауссовский процесс — это совокупность случайных величин, индексированных временем, такая что любой конечный набор этих случайных величин имеет многомерное нормальное распределение, то есть любая конечная линейная комбинация из них нормально распределена. Распределение гауссовского процесса — это совместное распределение всех его случайных величин и, в силу чего, является распределением функций с непрерывной областью определения.

Ковариационные функции (ядра), которые использовались для аппроксимации кривых блеска:

- Radial-basis function (RBF) kernel  $k(x_i, x_j) = \exp\left(-\frac{d(x_i, x_j)^2}{2l^2}\right)$

- Matérn kernel (с параметром  $\nu = 1.5$ )  $k(x_i, x_j) = \left(1 + \frac{\sqrt{3}}{l}d(x_i, x_j)\right) \exp\left(-\frac{\sqrt{3}}{l}d(x_i, x_j)\right)$

- Rational quadratic kernel  $k(x_i, x_j) = \left(1 + \frac{d(x_i, x_j)^2}{2\alpha l^2}\right)^{-\alpha}$

- White kernel  $k(x_i, x_j) = \begin{cases} \text{noise level}, & \text{if } x_i = x_j \\ 0, & \text{else} \end{cases}$

Где  $d(\ )$  — евклидово расстояние, а параметры  $l$  и  $\alpha$  подбираются методом наибольшего правдоподобия.

## Аппроксимация по одной полосе

Кривые блеска интерполируются с помощью Гауссовых процессов только в одной фотометрической полосе, при этом для каждой кривой рассмотрены три ядра (RBF, Matern kernel и RationalQuadratic kernel). Для каждой сверхновой строится график с фотометрией, её ошибками и тремя интерполяциями (каждая соответствует своему ядру). Пример графика для сверхновой DES17C1cpv на рисунке 2.

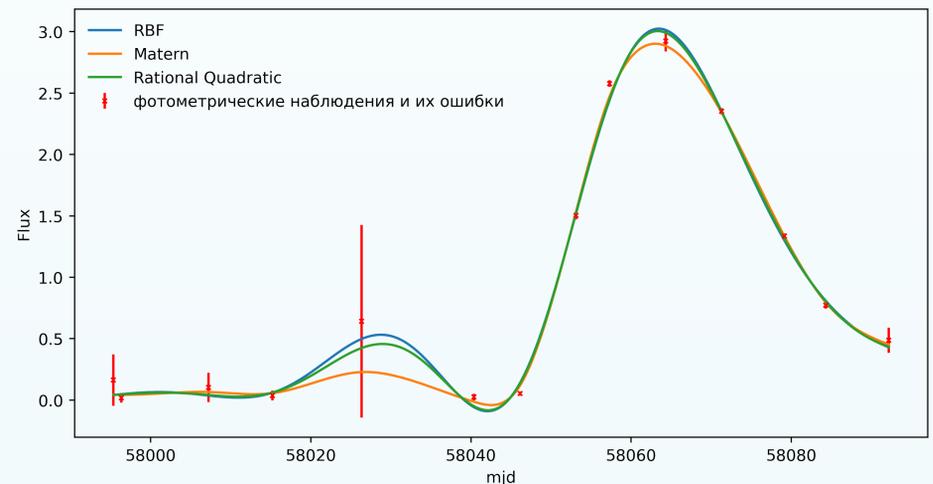


Рис. 2. Кривая блеска сверхновой DES17C1cpv и результат ее интерполяции Гауссовыми процессами с разными ядрами

## Аппроксимация по двум полосам

Аппроксимация проводится по двум фотометрическим полосам (g и r), для этого строится MultiStateKernel, который состоит из двух ядер — RBF и WhiteKernel. Пример графика для сверхновой DES17C1cpv на рисунке 3.

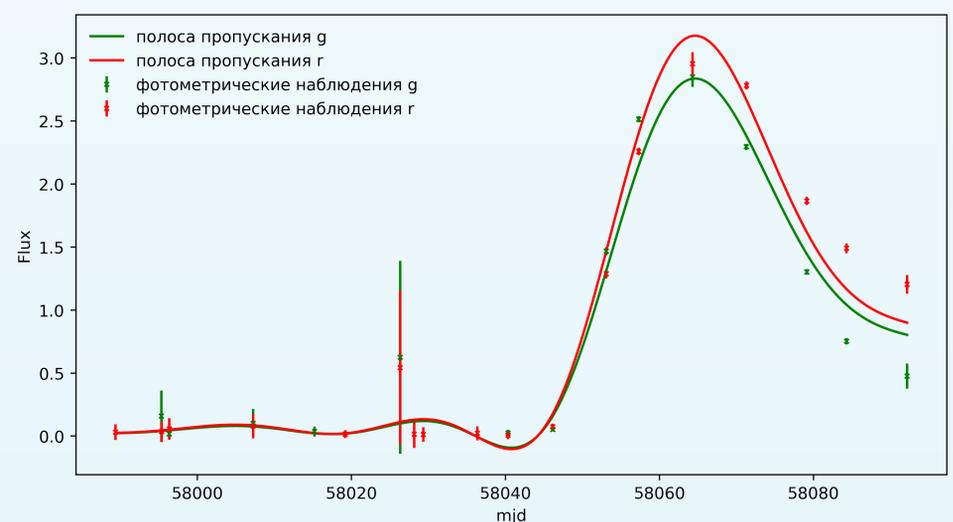


Рис. 3. Двухцветная кривая блеска сверхновой DES17C1cpv и результат ее интерполяции векторным Гауссовым процессом

## Вывод

Было проинтерполировано 100 одноцветных кривых блеска. Сравнивая значения этих кривых с тестовыми выборками, было получено, что Matern kernel лучше подходит для интерполяции в одной фотометрической полосе.

Следующим этапом работы будет сравнение различных ядер для интерполяции двухцветных кривых блеска.

## Ссылки

- [1] <https://sne.space/>
- [2] <https://gp.snad.space/>

## Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Национального центра научных исследований Франции в рамках научного проекта № 21-52-15024. Исследование выполнено при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета "Фундаментальные и прикладные исследования космоса"

## Контактная информация

- ofmafowo@gmail.com
- <https://github.com/Timofey-Semenihin/Gaussian-Processes>