

**РАСШИРЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛА SED FITTER  
ДЛЯ МОДЕЛЕЙ МОЛОДЫХ  
ЗВЕЗДНЫХ ОБЪЕКТОВ**

А. В. Дьяченко<sup>1</sup>, П. Боли, Э. Д. Кузнецов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Уральский федеральный университет*

К настоящему времени накоплено большое количество наблюдательных данных для молодых звездных объектов на разных длинах волн и широкое распространение получил метод изучения параметров протозвезд с помощью моделирования спектрального распределения энергии. Моделирование SED с помощью решения уравнения переноса излучения позволяет получить первичные оценки для широкого спектра звезд, но не все реализации данного метода обладают возможностью учитывать пространственные наблюдения объекта. В данной работе представлен расширенный функционал для пакета *SED Fitter* и моделей *Robitaille 2017*, позволяющий учитывать пространственно разрешенные наблюдения.

**DEVELPMENT OF ADDITIONAL FUNCTIONALITY  
FOR YOUNG STAR OBJECTS MODELS SED FITTER**

A. V. Dyachenko<sup>1</sup>, P. A. Boley, E. D. Kuznetsov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Ural Federal University*

A large amount of observational data has been accumulated for young stellar objects at different wavelengths, and the method of studying the parameters of protostars by modeling the spectral energy distribution has become widespread. Obtaining model SEDs by solving the radiative transfer equation allows one to obtain primary estimates for a wide range of stars, but not all implementations of this method are able to take into account spatial observations of the object. This paper presents extended functionality for the *SED Fitter* package and *Robitaille 2017* models, allowing for spatially resolved observations to be taken into account.

Стандартная система классификации молодых звездных объектов в областях звездообразования основана на форме спектрального распределения энергии (SED) в инфракрасном диапазоне и делит объекты на три класса [1]. На практике эта классификация проводится путем сравнения показателей цвета в трех и более фильтрах. Класс молодого звездного объекта часто отождествляется с его эволюционным статусом (чем больше класс, тем старше объект). Данное отождествление не является однозначным, так как на наблюдаемый класс спектрального распределения энергии влияет не только возраст молодого звездного объекта, но также его геометрия [2], что особо выражено в ближнем инфракрасном диапазоне, оптические свойства пыли и распределение вещества в окружающей оболочке [3]. Логическим продолжением схем классификации молодых звездных объектов на основе показателей цветов является моделирование спектрального распределения энергии, преимущественно при использовании наборов моделей переноса излучения [4]. Данный подход подвержен большой степени вырождения, так как совершенно разные конфигурации моделей могут иметь схожие спектральные распределения энергии.

Для снятия неопределенности, вызванной вырождением моделей спектрального распределения энергии, был разработан набор функций для фитирования моделей переноса

Пример результатов фитирования для объекта V921 Sco с учетом радиального профиля

Модели	P(D M) (относительный) %	Лучший $\chi^2$	Результат (относительный)
s-s-i	0.000	33 667.162	0
sp-s-i	1.096	125.105	13.273
sp-h-i	0.254	225.403	3.004
s-smi	0.000	148 817.226	0
sp-smi	0.044	215.293	0.952
sp-hmi	0.000	1 420.997	0
s-p-smi	0.000	41 867.072	0
s-p-hmi	0.000	40 839.589	0
s-pbsmi	0.000	9 887.987	0
s-pbhmi	0.000	1 965.949	0
s-u-smi	0.000	22 972.992	0
s-u-hmi	0.000	27 101.736	0
s-ubsmi	0.000	3 595.716	0
s-ubhmi	0.000	6 807.065	0
spu-smi	0.008	488.103	0.228
spu-hmi	0.000	2 248.993	0
spubsmi	0.016	201.241	0.464
spubhmi	0.002	188.610	0.076

излучения Robitaille 2017 [4], применимый к пространственно разрешенным наблюдениям. Преимущество данного метода заключается в том, что он позволяет фитировать сетки из десятков тысяч моделей к наблюдаемым распределениям интенсивности молодых звездных объектов с учетом пространственного распределения интенсивности излучения на каждой наблюдаемой длине волны.

В данной работе представлен набор функций `RADPROFfitter` [5], дополняющий функционал, представленный в оригинальном `SED Fitter`; `RADPROFfitter` дает возможность фитировать пространственно разрешенные наблюдательные данные молодых звездных объектов к моделям Robitaille 2017. Поддерживаются как изображения из обзоров WISE, MSX, AKARI, IRAS, так и пользовательские изображения. Для оценки результатов фитирования совместно с результатами, выдаваемыми `SED Fitter`, были добавлены байесовские статистические оценки по методу из работы [4]. В `RADPROFfitter` учтена компенсация разницы разрешений модельных и наблюдаемых изображений с помощью свертки реализованной алгоритмом быстрого преобразования Фурье из библиотеки `Scipy`. В экспериментальном режиме добавлена возможность фитирования интерферометрических данных в модуле `OIRTfitter`. Совместное использование `SED Fitter` и `RADPROFfitter` позволяет получать общую оценку принадлежности набора наблюдательных данных к конкретной модели/модельной сетке. В таблице приведен пример результатов фитирования для объекта V921 Sco с учетом радиального профиля. Полученные результаты указывают на принадлежность наиболее вероятной модели к сетке sp-s-i, в которой учитывается диск. Фитирование без учета радиального профиля, также приводит к модельной сетке sp-s-i, но другой модели с близкими по значениям параметрами. В контексте данного примера использование пространственно разрешенных наблюдений совместно с данными SED более четко проводит границу применимости для разных модельных сеток.

## Библиографические ссылки

- [1] *Adams F. C., Lada Ch. J., Shu F. H.* Spectral Evolution of Young Stellar Objects // *Astrophys. J.* — 1987. — Vol. 312. — P. 788.
- [2] *Robitaille Th. P., Whitney B. A., Indebetouw R. et al.* Interpreting Spectral Energy Distributions from Young Stellar Objects. I. A Grid of 200,000 YSO Model SEDs // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 2006. — Vol. 167, № 2. — P. 256–285. [astro-ph/0608234](#).
- [3] *Boley P. A., Kraus S., de Wit W.-J. et al.* A multi-wavelength interferometric study of the massive young stellar object IRAS 13481-6124 // *Astron. Astrophys.* — 2016. — Vol. 586. — P. A78. [1511.03195](#).
- [4] *Robitaille T. P.* A modular set of synthetic spectral energy distributions for young stellar objects // *Astron. Astrophys.* — 2017. — Vol. 600. — P. A11. [1703.05765](#).
- [5] *Dyachenko A., Boley P.* Radial Profile Fitter Software <https://github.com/avdyachenko/RADPROFfitter>. — 2022.