

Расчет спектра звезды с пылевой оболочкой

версия 0.1

Сафонов Б. С.*, Федотова А. Е.

26 августа 2024 г.

1 Введение

На различных стадиях эволюции в окрестностях звезд присутствует пыль. В случае молодых звезд это остатки протозвездного облака в форме протопланетного диска. Звезды главной последовательности окружены осколочными дисками, порожденными столкновениями между планетами и астероидами. В атмосферах звезд на поздних стадиях эволюции, вследствие низкой температуры и малой силы тяжести, складываются условия, благоприятные для конденсации пыли, образующей сферические оболочки.

Важным методом изучения пылевых оболочек является спектроскопия — наблюдение распределения энергии, излучаемой объектом, по длинам волн (Spectral Energy Distribution — SED)¹. Для получения надежных сведений о геометрии оболочки, распределения пылинок по размерам, химического состава пыли спектр необходимо регистрировать в широком диапазоне длин волн, обычно от 400 нм до 160 мкм. Электромагнитное излучение столь различных длин волн невозможно эффективно регистрировать с одним приемником. Обычно SED составляется по данным, полученных на нескольких приборах, оптимизированных для более узких диапазонов.

В видимом и ближнем ИК диапазоне применяется спектроскопия на наземных телескопах с использованием ПЗС и HgCdTe приемников, соответственно. Получение данных о спектре на длинах волн больше 5 мкм требует наблюдений из космоса. Важнейшие данные были получены космическими обсерваториями ISO, IRAS, Herschel, WISE, Akari. В некоторых случаях спектр продлевают в мм- и радиодиапазон, используя, например, данные ALMA.

Количественная интерпретация спектральных наблюдений выполняется в рамках некоторой модели источника и имеет своей целью получение оценок параметров этой модели. Обозначим наблюдения как вектор $\mathbf{D}$, а набор количественных параметров как вектор $\boldsymbol{\theta}$. Предположим что неопределенности оценки $\mathbf{D}$ распределены нормально и характеризуются матрицей ковариации $\mathbf{C}$. Тогда вероятность иметь $\boldsymbol{\theta}$ при наборе наблюдательных данных $\mathbf{D}$:

$$p(\mathbf{D}|\boldsymbol{\theta}) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^m \det(\mathbf{C})}} \exp\left(-\frac{1}{2}[\mathbf{R} - \mathbf{M}(\boldsymbol{\theta})]^T \mathbf{C}^{-1} [\mathbf{R} - \mathbf{M}(\boldsymbol{\theta})]\right). \quad (1)$$

Где $\mathbf{M}(\boldsymbol{\theta})$ — физическая модель, позволяющая для данной модели при данном наборе параметров $\boldsymbol{\theta}$ вычислить ожидаемые наблюдения.

Задача интерпретации сводится к нахождению максимума $p(\mathbf{D}|\boldsymbol{\theta})$ в пространстве параметров $\boldsymbol{\theta}$. Для вычисления (1) требуется инструмент решения прямой задачи — расчета спектра системы звезды и пылевой оболочки $\mathbf{M}(\boldsymbol{\theta})$. В некоторых случаях для оболочек простой геометрии и при принятии ряда упрощений для спектра звезды и поглощающих свойств пыли возможно получить явное выражение для спектра объекта.

Однако почти для всех практически важных задач получить вид спектра аналитически невозможно. В таких случаях для описания переноса излучения применяют метод Монте-Карло (Monte Carlo Radiation Transfer — MCRT). MCRT базируется на генерации и последующем распространении элементарных “пакетов” излучения, в дальнейшем условно называемых фотонами. Множество смоделированных фотонов, испытавших взаимодействие с веществом, используются для построения выборочного SED, по мере увеличения числа фотонов приближающегося к спектру объекта. Обычно рассматривается от 10^5 до 10^9 фотонов. Методом MCRT можно также вычислить распределение интенсивности по объекту, т.е. его изображение.

*safonov10@gmail.com, telegram: +79267543714

¹В дальнейшем мы будем использовать сокращение SED и слово спектр как синонимы

Цель работы: на примере расчета спектра системы звезды и пылевой оболочки ознакомиться с методом MCRT, осознать его преимущества и недостатки по сравнению с прямым аналитическим методом.

2 Теория

Интенсивность излучения, испускаемого АЧТ через единичную площадку, имеет размерность Дж/с/см³/стер и описывается формулой Планка:

$$B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1}, \quad (2)$$

где λ — длина волны излучения, T — температура АЧТ, $h = 6.626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — постоянная Планка, $c = 2.998 \cdot 10^{10}$ см/с — скорость света, $k = 1.3807 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана. Для получения спектра звезды без оболочки достаточно проинтегрировать (2) по телесному углу под которым видна фотосфера звезды.

При наличии оболочки необходимо учитывать поглощение излучения звезды в ней, собственное тепловое излучение оболочки и излучение звезды, рассеиваемое в оболочке. В данной задаче мы пренебрежем последним эффектом, будем учитывать лишь поглощение и излучение. Уравнение переноса излучения в этом случае предстанет в следующем виде:

$$\frac{dI_\lambda}{ds} = -\alpha_\lambda I_\lambda + j_\lambda. \quad (3)$$

Это уравнение описывает изменение интенсивности I_λ излучения при прохождении элементарного пути s . α_λ и j_λ — это коэффициенты поглощения и излучения.

В случае пыли α_λ определяется следующим образом:

$$\alpha_\lambda = \kappa_\lambda \rho, \quad (4)$$

где κ_λ — коэффициент непрозрачности, а ρ — средняя плотность вещества. κ_λ имеет размерность см²/г, т.е. по физическому смыслу это удельное сечение поглощения — эффективная поглощающая площадь единицы массы вещества. κ_λ определяется показателем преломления вещества пылинок, а следовательно зависит от их химического состава. Так, к примеру коэффициент непрозрачности пыли из SiC имеет широкий максимум на длине волны 11.4 мкм, т.е. на этой длине волны пыль поглощает и излучает более эффективно.

Также κ_λ сильно зависит от размеров пылинок. Когда размеры пылинок меньше длины волны для расчета κ_λ применяют Релеевское приближение. Для более крупных пылинок, имеющих форму шаров или эллипсоидов вычисление κ_λ может быть сделано в приближении Ми. Для пылинок произвольной формы применяются более сложные алгоритмы, например DDSCAT. Данные о непрозрачности пыли и ее удельном сечении рассеяния вместе составляют оптические свойства пыли. Для расчетов оптических свойств пыли широко применяется программа `optool` (Dominik et al., 2021).

Интеграл α_λ по некоторому пути называется оптической толщиной τ_λ . Если τ по некоторому пути равно 1, то излучение ослабляется в e раз.

Коэффициент излучения также определяется через κ_λ :

$$j_\lambda = \kappa_\lambda \rho B_\lambda(T_{\text{dust}}). \quad (5)$$

Литература по данному разделу: (Засов and Постнов, 2006) и (Bjorkman and Wood, 2001).

3 Моделирование переноса излучения методом Монте–Карло (Monte Carlo Radiation Transfer)

Перенос излучения является стохастическим процессом, свойства которого в принципе можно исследовать путем решения интегро–дифференциальных уравнений подобных (3). Однако сложность начальных условий делает получение конечных результатов в виде формул аналитически нерешаемой задачей. В качестве полумеры приходится прибегать к упрощениям, что вызывает систематические ошибки в предсказываемых результатах. В большом количестве практически важных

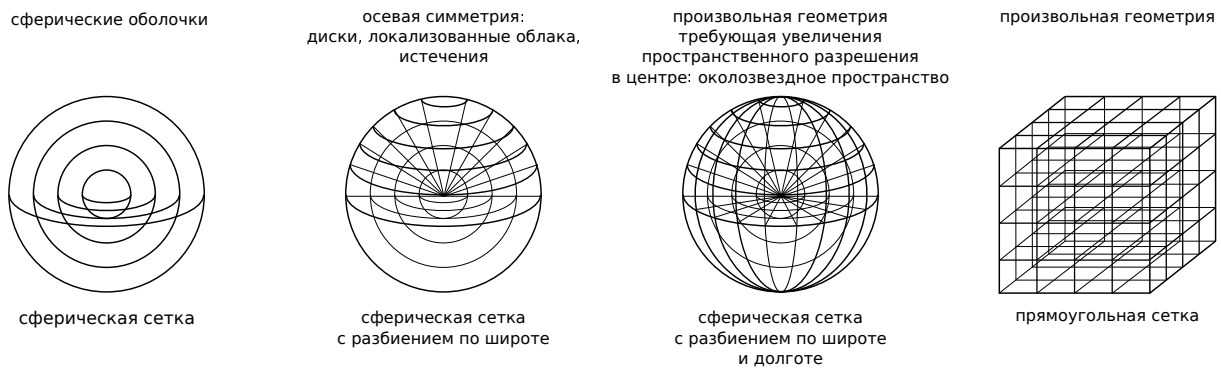


Рис. 1: Некоторые возможные разбиения пространства.

случаев эти отклонения становятся столь велики, что делают модель вовсе неадекватной реальной физической ситуации.

С появлением вычислительной техники был развит альтернативный подход — метод Монте-Карло, идея которого базируется на моделировании “из первых принципов” элементарных физических процессов, суммой которой является стохастический процесс. Исход каждого из элементарных процессов является случайным, накопление большого количества таких исходов дает выборочное распределение — аппроксимацию истинного распределения некоторой физической величины, ожидаемого для данного процесса. Моделирование элементарных процессов позволяет снять приближения, характерные для аналитического рассмотрения, таким образом снижая *систематическую* ошибку ценой возникновения ошибки *случайной*. Случайные ошибки могут быть снижены путем увеличения количества реализаций, т.е. увеличением времени вычислений или задействованной вычислительной мощности — относительно “дешевых” ресурсов. Увеличение выборки целесообразно до тех пор пока ошибки не станут сравнимы (или несколько меньшими) чем шум измерений.

Метод Монте-Карло часто применяется в физике элементарных частиц, в физике твердого тела, в молекулярной динамике. Монте-Карло используется для моделирования формирования изображения, искаженного атмосферной оптической турбулентностью. В астрофизическом контексте помимо переноса излучения интересным примером применения Монте-Карло является т.н. популяционный синтез.

Моделирование переноса излучения методом Монте-Карло (MCRT) предполагает разбиение пространства на ячейки. Возможны различные сетки разбиения, выбор определяется симметрией задачи — см. Рис. 1. Модель всегда описывает некоторую конечную область пространства, размер который должен быть выбран так, чтобы полностью охватывать область где плотность вещества значительно отличается от нуля. Шаг сетки должен быть выбран адекватным геометрии рассматриваемой оболочки, см. Рис. 2.

Работа алгоритма начинается с генерации фотона. Его начальные координаты выбираются случайным образом на фотосфере звезды. Направление распространения выбирается случайно так чтобы интенсивность была пропорциональна косинусу угла между вектором распространения и нормалью к данному элементарному участку фотосферы. Энергия фотона выбирается случайно на дискретной сетке по длинам волн согласно формуле Планка (2).

Алгоритм определяет какую в ячейку пространства попадает данный фотон. Затем происходит одно событие из трех. 1). Фотон преодолевает ячейку без изменений и переходит к следующей. 2). Фотон поглощается и вызывает нагрев данной ячейки. Нагретые ячейки сами становятся источниками фотонов, свойства которых определяются температурой и оптическими свойствами вещества ячейки. 3). Фотон рассеивается, его интенсивность, направление движения и состояние поляризации изменяется. Вероятности с которыми происходят эти события определяются оптическими свойствами вещества в данной ячейке модели и его плотностью.

Этот процесс продолжается до тех пор пока фотон не покидает пространство модели. Когда это случается его свойства: координаты, направление распространения, поляризация и энергия сохраняются в памяти. Наблюдаемые свойства объекта обновляются. Например, спектр объекта посчитанный методом Монте-Карло является по сути гистограммой энергий фотонов, покинувших пространство модели. Также можно воспринимать и изображение объекта, полученное методом Монте-Карло.

Далее алгоритм переходит к генерации очередного фотона. Этот процесс повторяется заданное количество итераций, обычно от 10^5 до 10^9 . Можно видеть что спектр, изображение или вообще

любой продукт моделирования MCRT является выборочным распределением, т.е. несет некоторый шум, который тем меньше чем больше фотонов было сгенерировано. Эффективное применение MCRT зависит от способности пользователя находить баланс точности решения и времени его получения. Это касается не только количества генерируемых фотонов, но и применяемой дискретизации пространства, энергии фотона, метода моделирования рассеяния и т.д.

4 Система учета моделей и наблюдений околозвездных оболочек webMCRT

4.1 Принципы

В данной задаче расчет спектра оболочки методом Монте-Карло предлагается выполнять в системе webMCRT. webMCRT — это многопользовательская система моделирования наблюдаемых проявлений пылевых оболочек звезд. Элементы функциональности webMCRT:

- формулировка задач моделирования,
- удаленное и распределенное выполнение задач моделирования,
- хранение наблюдений,
- сравнение результатов моделирования с наблюдениями.

Моделирование выполняется с помощью ПО расчета переноса излучения методом Монте-Карло RADMC-3D (Dullemond et al., 2012) и ПО расчета оптических свойств пыли optool (Dominik et al., 2021).

Хотя основным назначением webMCRT является интерпретация реальных наблюдений, она прекрасно подходит для вычисления SED тестового объекта, рассматриваемого в данной задаче. Архитектура веб-приложения дает webMCRT некоторые преимущества по сравнению с комбинациями кодов на FORTRAN и скриптов на python, применяемыми обычно для организации моделирования MCRT.

1. От пользователя не требуется знания языков программирования — снижается порог входа в мир MCRT.
2. Взаимодействовать с системой можно с различных устройств (в т.ч. смартфонов, планшетов и т.п.), используя различные браузеры и операционные системы, состояние системы является глобальным.
3. Формулировка задач моделирования выполняется в интерактивной форме, это быстрее и уменьшает вероятность ошибки.
4. Для просмотра/анализа результатов расчетов в систему встроены специальные графические интерфейсы.

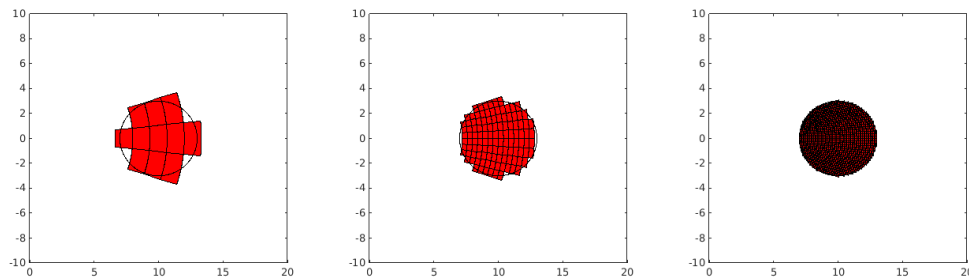


Рис. 2: Модель сферического облака локализованного в стороне от начала координат. Дискретизация сферической сеткой с разбиением по радиусу и широте. Слева: слишком грубый шаг, возможны систематические ошибки в оценке наблюдаемой характеристики, например SED. В центре: оптимальный шаг. Справа: слишком мелкий шаг, результирующий SED такой же как для случая в центре, но время вычислений значительно возрастает.

5. Обеспечена возможность совместной работы над моделями многих пользователей. Реализованы механизмы разграничения прав, предоставления доступа и отслеживания изменений, вносимых пользователями.
6. Вычисления выполняются удаленно на специальном сервере/серверах, доступная вычислительная мощность существенно превосходит таковую личного ноутбука.
7. Система допускает формирование прямых ссылок на модели, которые могут быть затем использованы в публикациях. Таким образом webMCRT может играть роль *репозитория/библиотеки* моделей.
8. Реализован дополнительный инструментарий количественной интерпретации наблюдений: поиск оптимальной модели на сетке в пространстве параметров (построение карт невязок) и методом Markov Chain Monte Carlo.
9. Возможно хранение и анализ разнородных наблюдений, например, спектров и изображений.

В целом мотивацией разработки системы было желание было получить что-то похожее на google doc, но для моделирования околозвездных оболочек.

4.2 Использование

4.2.1 Начало работы

Взаимодействие с системой осуществляется через web-интерфейс по адресу <https://circum.sai.msu.ru>. Чтобы получить полный доступ к функциональности системы нужно зарегистрироваться по ссылке. Нужно указывать реальные имя, фамилию и адрес электронной почты. После подтверждения аккаунта администратором можно будет авторизоваться в системе. В случае успешной авторизации заголовок сайта будет выглядеть как на Рис. 3 (если вы Петр Сидоров):



Рис. 3: Заголовок сайта webMCRT в случае успешной авторизации.

По нажатию на свое имя справа сверху вы попадете в личный кабинет, где можно будет поменять свои атрибуты и пароль. Также из личного кабинета выполняется очищение “корзины” — окончательное удаление сущностей отмеченных к удалению.

Система имеет две стартовые страницы: модели и наблюдения. *Модель (model)* является базовой и важнейшей концепцией в системе webMCRT, она представляет собой *шаблон* по которому создаются *экземпляры (instances)*. Используя аналогию с программированием, модель — это класс, а экземпляр — это переменная этого класса. Либо, с философской точки зрения (ref. Платон), есть идея стола (модель), а есть конкретный стол в кабинете директора (экземпляр).

На странице models вы будете видеть список доступных вам моделей в виде таблицы. Колонка name — это краткое название модели. owner — тот кто создал модель. created и modified — время создания и последнего изменения модели. primitives — геометрия распределения пыли в данной модели (см. ниже), dust materials — вещество пыли (см. ниже), radiation sources — источники излучения. Колонки instances и studies будут прокомментированы ниже. Чтобы создать новую модель нужно кликнуть по кнопке create new (см. Рис. 4)

name	owner	created	modified	primitives	dust materials	radiation sources	instances	studies
V CRB	Boris Safonov	2023-09-25	2023-12-28	sphere_power	c-suh;sic-peg	star, Aringer+ 2009:3000K	52	1

Рис. 4: Список моделей и кнопка создания новой модели “с нуля”.

4.2.2 Создание модели

По нажатию на create new откроется страница создания модели, состоящая из нескольких блоков, для удобства визуального восприятия имеющих разный цвет фона. В первом блоке нужно

указать название модели и дать ее краткое описание. Название должно быть кратким, емким и на английском языке, пробелы допускаются. Описание можно делать по-русски.

В следующем блоке — **access** — выполняется настройка прав доступа. Пользователи, которых вы там укажете, будут видеть вашу модель, и смогут вносить в неё изменения. К примеру, после того как вы будете уверены в том что модель удачная, вы сможете открыть руководителю задачи к ней доступ чтобы он проверил результаты. Либо вы можете захотеть сделать это и раньше, если у вас возникнут какие-то неразрешимые трудности. Также если снять галочку `private`, результаты вычисления связанные с данной моделью станут видимы всем, в т.ч. незарегистрированным пользователям. Это может быть нужно если вы публикуете статью и хотите сослаться в ней на конкретную модель в системе webMCRT. Название, описание модели и права доступа к ней можно редактировать после создания модели.

В блоке **spatial grid** настраивается разбиение пространства модели, о том из каких соображений это делать сказано в разделе 2.

Затем следует блок настройки параметров пыли **dust species**, Рис. 5. В модели может быть заведено произвольное количество пылевых составляющих (dust species). Пылевая составляющая характеризуется распределением пылинок по радиусам, их химическим составом, а также ей должно быть придано уникальное в пределах модели имя (на английском языке). Предусмотрено четыре варианта распределения пыли по радиусам:

1. **fixed** — пылинки фиксированного радиуса. Указывается радиус.
2. **powerlaw** — распределение по степенному закону:

$$dn \sim r^p dr. \quad (6)$$

Указываются минимальный, максимальный радиусы, степень в законе p , а также количество интервалов, на которое разбивается непрерывное распределение.

3. **lognormal** — распределение по логарифмически нормальному закону.

$$dn \sim \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(r/r_m)}{\sigma} \right)^2 \right]. \quad (7)$$

Указываются минимальный, максимальный радиусы, среднее значение радиуса r_m и параметр σ , характеризующий ширину распределения. Также нужно указать количество интервалов, на которое разбивается непрерывное распределение.

4. **bimodal** — бимодальное распределение — два сорта пылинок с фиксированными радиусами. Указываются радиусы и доли пыли по массе.

The screenshot shows the 'Dust species' configuration window. At the top, there is an 'Add' button. Below it, the 'Size distribution' is set to 'powerlaw' and the 'Name' is 'Mixture'. There is a 'Remove' button next to the name. The 'Min radius, mkm' is 0.01, 'Max radius, mkm' is 10.0, 'Power' is -2, and 'Number of bins' is 10. The 'Material' section has two rows: 'crystalline pyroxene' with a mass fraction of 0.15 and an unchecked 'Driven' checkbox, and 'iron' with a mass fraction of 0.85 and an unchecked 'Driven' checkbox. There are 'Add material', 'Remove material', and 'Add' buttons.

Рис. 5: Блок настройки параметров пыли. В данном случае заведена одна пылевая составляющая Mixture со степенным распределением пылинок по радиусу от 0.01 до 10 мкм, степень -2 , количество разбиений 10. Вещество является смесью кристаллического пироксена и железа в соотношении 0.15:0.85.

Также для пылевой составляющей необходимо определить вещество из которого сделаны ее пылинки. Вещество может быть смесью произвольного количества химических соединений, для каждого из которых нужно указать долю по массе. В системе webMCRT есть возможность выбирать из наиболее часто встречающихся в литературе соединений. Доля по массе будет принудительно перенормирована на 1. Если проставить галочку `driven` у какого-то соединения, то его доля будет определена так чтобы сумма массовой доли для всех остальных соединений равнялась единице (предпочтительный режим). Оптические свойства смеси химических веществ определяются по правилу Брюггемана, см. (Dominik et al., 2021).

В блоке **primitives**, Рис. 6 нужно указать закон по которому распределена плотность оболочки в околозвездном пространстве. Оболочка должна быть представлена в виде суммы простых геометрических форм — примитивов. Можно добавлять (кнопка `add`) и удалять (кнопка `remove`) примитивы. Ограничений на их количество нет.

Предусмотрены следующие виды примитивов:

1. **sphere_gauss** Плотность ρ падает в зависимости от расстояния до центра r по следующему закону:

$$\rho \sim \exp\left[-\frac{1}{2}(r/r_s)^2\right]. \quad (8)$$

Характеризуется внутренним и внешним радиусом, а также характерным масштабом падения плотности r_s .

2. **sphere_power** Сферическая оболочка со степенным падением плотности и вообще сфериче-

The screenshot shows the 'Primitives' management interface. It contains two sections, each for a different primitive type.

Primitive 1: sphere_power (envelope)

- Select type:** sphere_power
- Name:** envelope
- Dust species:** dust
- Mass determined by:** optical depth origin-observer
- Wavelength, mkm:** 0.5
- Optical depth:** 4.24
- Inner edge, AU:** 11
- Outer edge, AU:** 30000
- Power:** -2
- Position X, AU:** 0
- Position Y, AU:** 0
- Position Z, AU:** 0

Primitive 2: ppdisk (disk)

- Select type:** ppdisk
- Name:** disk
- Dust species:** dust
- Mass determined by:** optical depth origin-X+
- Wavelength, mkm:** 0.5
- Optical depth:** 10
- Inner edge, AU:** 11
- Outer edge, AU:** 30000
- Radial power:** 2
- Height power:** 1
- Scale height, AU:** 2
- Scale height ref rad, AU:** 10
- Position X, AU:** 0
- Position Y, AU:** 0
- Position Z, AU:** 0

Рис. 6: Блок управления примитивами. В данном случае заведено два примитива: сферическая оболочка и диск. Пыль присутствует в диапазоне расстояний 11–30000 а.е. от звезды, пылевая составляющая одна и та же – “dust”. Для сферической оболочки принят закон падения плотности обратно пропорциональный квадрату расстояния, ожидаемый для течения с постоянной скоростью и с постоянным темпом потери массы. Для диска экспонента падения плотности от радиуса $\alpha = 2$, параметр расширения диска к краям $\beta = 1$. Масса в обоих случаях определяется через оптическую толщину на длине волны 500 нм.

ские облака. Примитив первого выбора. Плотность зависит от расстояния до центра так:

$$\rho \sim r^q. \quad (9)$$

Характеризуется внутренним и внешним радиусом, а также степенью в законе падения плотности q .

3. **ppdisk** Классическая модель аккреционного диска в гидростатическом равновесии. Используется при моделировании протопланетных дисков (отсюда сокращение protoplanetary disk — ppdisk). Плотность зависит от координат так:

$$\rho_{\text{disk}} \sim r_{xy}^{-\alpha} \exp\left[-\frac{z^2}{2h^2(z)}\right], \quad (10)$$

$$h(z) = h_0 \left(\frac{r_{xy}}{r_0}\right)^\beta, \quad (11)$$

$$r_{xy} = \sqrt{x^2 + y^2}. \quad (12)$$

Здесь ось вращения диска направлена вдоль z . Параметр α задает скорость падения плотности с удалением от центра. Параметры β, h_0, r_0 — толщину диска.

4. **cone** Конус, применяется для описания осевых истечений, например, дискового ветра.
5. **torus** Равномерно заполненный веществом тор, применяется для описания кольцевых структур. Определяется радиусом направляющей окружности — major radius и радиусом образующей окружности — minor radius. Применяется для моделирования кольцевых структур.
6. **torus_gauss** Похоже на предыдущее, но более физично — плотность падает по мере удаления от центра направляющей окружности по нормальному закону.

Для каждого примитива можно указать смещение относительно начала координат по каждой из трех осей.

Кроме геометрических параметров должна быть также указана масса примитива. Есть два способа задания массы: прямой и через оптическую толщину. При задании массы через оптическую толщину нужно выбрать луч зрения и длину волны на которых будет вычисляться оптическая толща. Метод задания массы через оптическую толщину в большинстве случаев более предпочтителен, поскольку последняя имеет понятный физический смысл.

Наконец для каждого примитива нужно указать пылевую составляющую — пыль из которой он сделан и уникальное в пределах модели название. Если после добавления примитива были внесены какие-то изменения в пылевых составляющих, то чтобы обновился выпадающий список dust species в блоке primitives нужно нажать на кнопку refresh dust species.

В блоке **radiation sources**, Рис. 7 выполняется настройка источников излучения. Можно добавлять (add) и убирать (remove) источники, также без ограничений на количество. Для каждого

Рис. 7: Блок задания источников излучения. В данном случае заведена одна углеродная звезда радиусом $790 R_\odot$ и температурой 2400 K.

источника надо придумать уникальное имя. Нужно указать размеры, температуру/светимость, положение. Масса также указывается, но в данный момент это ни на что не влияет.

Спектр может быть выбран из трех вариантов:

1. АЧТ.
2. Атлас спектров холодных углеродных звезд (Aringer et al., 2009).
3. Атлас спектров звезд спектральных типов I–V (Pickles, 1998).

В следующем блоке **wavelength grid** настраивается разбиение длин волн фотонов. Затем приводятся параметры наблюдателя **observer**:

1. Расстояние в пк.
2. Наклонение — угол между лучом зрения OP и осью OZ .
3. Долгота — угол между плоскостью OPZ и OXZ .
4. Позиционный угол — угол между проекцией OZ на картинную плоскость и опорным направлением в картинной плоскости (которое обычно ориентировано вертикально).

Наконец, в последнем блоке **associated observations** можно выполнить ассоциирование модели с наблюдениями заведенными в систему. Об этом см. ниже раздел 4.2.4.

По нажатию на **create model** будет создана модель. Если какое-то из полей не прошло валидацию, будет выведено соответствующее сообщение. После создания модели некоторое очень ограниченное количество ее атрибутов может быть изменено, см. вторую колонку в таблице 1. Для этого выберите модель в списке моделей и нажмите кнопку **edit** вверху справа.

Некоторые количественные параметры доступны для редактирования при создании экземпляров, см. следующий подраздел и также таблицу 1. Есть также параметры которые вообще нельзя редактировать, чтобы их поменять нужно создавать новую модель.

Создавать модели можно как с нуля, так и как копии существующих. Чтобы скопировать модель, на стартовой странице выделите модель и нажмите **create as copy**.

Механизм удаления в системе стандартный двухступенчатый. Чтобы удалить модель и все ее экземпляры, выделите модель в списке и нажмите на кнопку **delete** слева внизу. Модель перестанет отображаться в списке, однако окончательно она не исчезает, она лишь “подготавливается” к удалению. Чтобы окончательно удалить модель нужно перейти в свой “личный кабинет”, нажав на свое имя справа вверху. Там будет кнопка окончательного удаления моделей подготовленных к удалению. Пока модель не удалена окончательно, можно отобразить ее в списке моделей прожав галочку “**show deleted**”, выделив модель и нажать **undelete**.

4.2.3 Создание экземпляров и выполнение расчетов

Для того чтобы выполнить расчет SED или изображений для модели нужно создать хотя бы один экземпляр модели. Операции с экземплярами выполняются на странице **instancebrowser**, чтобы туда перейти нужно выделить модель в **modelbrowser** и нажать на синее число в колонке **instances** (это число уже созданных экземпляров этой модели). Для создания экземпляра нажмите на кнопку **create new**. Откроется интерфейс создания экземпляра, см. Рис. 8. Необходимо дать экземпляру какое-то имя. Далее в таблице ниже можно поменять некоторые количественные параметры модели. Внизу нужно нажать на кнопку **create instance**. После создания экземпляра вы не сможете изменять в нем количественные параметры. Если все-таки понадобится что-то изменить, то нужно будет создать новый экземпляр.

После создания экземпляра вы будете возвращены на страницу со списком экземпляров. По кнопке **edit** можно редактировать описание экземпляра (оно выводится в колонке **notes**). Удаление происходит аналогично удалению моделей.

Чтобы запустить вычисления, выделите вновь созданный экземпляр и нажмите на **compute** в блоке SED. В открывшемся блоке установите параметры расчета, Рис. 9 (подробнее в подписи к рисунку) и нажмите ОК. Вычисления могут быть назначены для нескольких экземпляров одновременно, для этого их надо выделить через шифт.

Статус расчетов отображается в колонке SED в таблице экземпляров в виде символа. Крестик означает отсутствие данных, карандаш — вычисления назначены, молоток — вычисления выполняются, зеленая галочка — вычисления выполнены, восклицательный знак в треугольнике — произошла ошибка. Следует заметить что на данный момент в системе не предусмотрена отмена уже выполняющейся задачи моделирования, эта функциональность будет реализована позже.

Таблица 1: Редактирование атрибутов моделей и экземпляров. Галочка в ячейке означает что данный атрибут может быть отредактирован на данном этапе работы: при создании модели, при редактировании модели, при создании экземпляра.

параметр	созд. модели	редакт. модели	созд. экземпляра
название модели	✓	✓	
описание модели	✓	✓	
параметры доступа модели: список редакторов и открытый/закрытый	✓	✓	
тип координатной сетки: декартова/сферическая	✓		
параметры координатной сетки	✓		
количество пылевых компонент	✓		
тип распределения пыли по размерам в пылевом компоненте: фиксированный/степенной и т.п.	✓		
параметры распределения пыли по размерам	✓		✓
количество составляющих материала пыли	✓		
массовые доли составляющих материала пыли	✓		✓
количество примитивов	✓		
типы примитивов	✓		
параметры примитивов	✓		✓
количество источников излучения	✓		
типы источников излучения	✓		
параметры источников излучения	✓		✓
сетка по длинам волн	✓		
параметры наблюдателя: расстояние, направление	✓		✓
ассоциированные наблюдения	✓	✓	

Creation of instance for V CrB

Model by Fedoteva

Show details 1

Notes for this instance:

Instance description 2

Adjustable parameters

#entity	#name	#name	#value
dust species	dust	Radius 1, mkm	0.1 3
dust species	dust	Fraction 1	0.1
dust species	dust	Radius 2, mkm	0.5
dust species	dust	Fraction 2	0.9
dust species	dust	c-suh fraction	0.75
dust species	dust	sic-peg fraction	0.25

Рис. 8: Создание экземпляра. 1 — показать нередатируемые атрибуты. 2 — описание экземпляра (оно будет отображаться в таблице экзепляров. 3 — таблица с количественными параметрами. В таблице первая колонка тип сущности: пылевая составляющая, примитив, источник излучения, наблюдатель. Вторая — уникальное имя сущности. Третья — название параметра. Четвертая — значение параметра, его можно редактировать.

Для вычисления SED потребуются предварительно вычислить оптические параметры пыли. Со-

V CrB | instances | studies

create new create as copy duplicate edit create grid study create MCMC study

db_id	notes	opac	SED	images
93a24d	base	✓	✓	✓0.654 ✓0.654 ✓0.831
7015b3	base tau=0.5	✓	✓	✓0.654
c5edaa	inner_outer:	✓	✗	
c5edab	inner_outer:	✓	✗	
c5edac	inner_outer:	✓	✗	
c5edad	inner_outer:	✓	✗	
c5edae	inner_outer:	✓	✗	
c5edaf	inner_outer:	✓	✗	
c5edb0	inner_outer:	✓	✗	
c5edb1	inner_outer:	✓	✗	
c5edb2	inner_outer:	✓	✗	
c5edb3	inner_outer:	✓	✗	
c5edb4	inner_outer:	✓	✗	
c5edb5	inner_outer:	✓	✗	
c5edb6	inner_outer:	✓	✗	

Opacity compute results

Density results

Temperature results

SED 2 compute results

scattering mode 3 SED photons 10000 4 thermal photons 200000 5

correction origin: Select... target: Select...

6 star save temperature sloppy mode priority 9 x OK 7

Image compute results

Рис. 9: Назначение вычислений SED. 1 — экземпляр для которого будут проведены вычисления. 2 — кнопка по которой открывается блок назначения расчетов. 3 — режим обработки рассеяния. 4 — число фотонов для расчета SED. 5 — число фотонов для расчета теплового равновесия. 6 — добавлять ли спектр звезды к SED, 7 — запустить вычисления.

ответствующие расчеты будут назначены и выполнены автоматически, статус будет отображаться в колонке opac. Система выполняет кэширование оптических свойств пыли. Если свойства пыли некоторого экземпляра А не отличаются от свойств пыли другого экземпляра Б, и для последнего были вычислены оптические свойства пыли, то оптические свойства пыли экземпляра А не будут вычисляться отдельно, а будут взяты от экземпляра Б. Когда это происходит, в колонке opac отображается стрелочка вверх.

После того как вычисления будут выполнены посмотреть их результат можно нажав на кнопку results в блоке SED, рис. 10

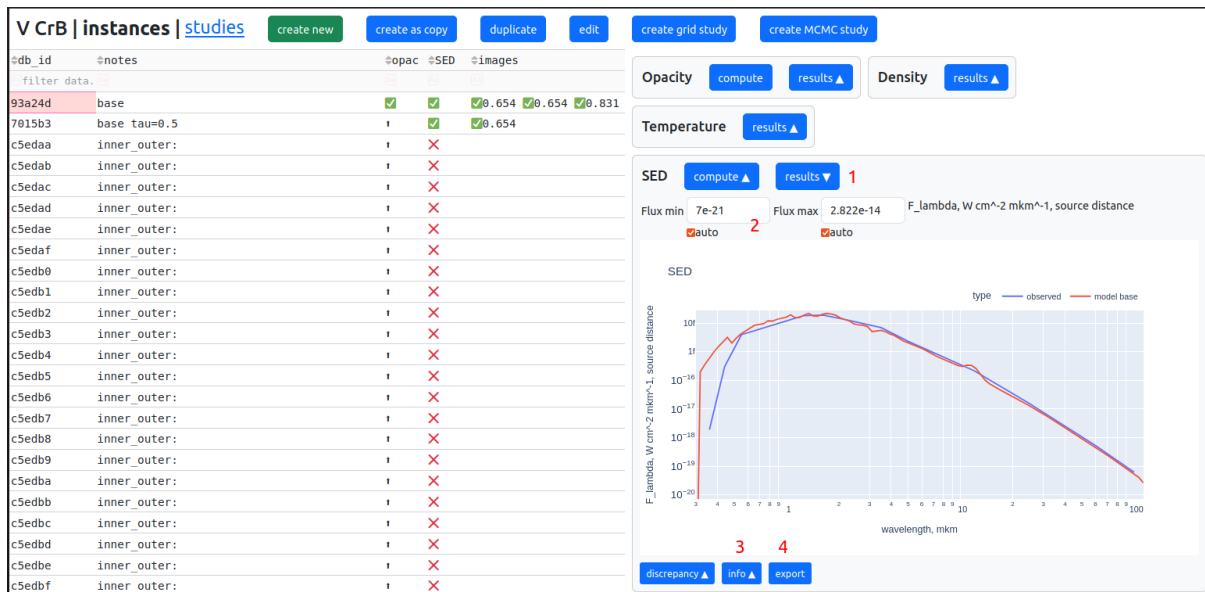


Рис. 10: Просмотр результатов вычислений SED. 1 — кнопка по которой открывается блок просмотра результатов. 2 — диапазон отображения потоков, нужно снять галочки auto если вы хотите указать их вручную. 3 — здесь можно посмотреть кто и когда назначил расчет, сколько времени он выполнялся и на каком сервере. 4 — экспорт в файл.

Для вычисления изображения нужно нажать compute в блоке Image, рис. 11. После ввода всех параметров нажать ОК. Статус вычисления будет отображаться в колонке images в таблице экземпляров, аналогично тому как это происходит при вычислениях SED. Можно одновременно выполнять вычисления для нескольких экземпляров и для нескольких длин волн. Чтобы посмотреть результаты вычислений нужно нажать на results в блоке Image, рис. 12.

Статическую ссылку на экземпляр модели можно сгенерировать следующим образом. Выделить

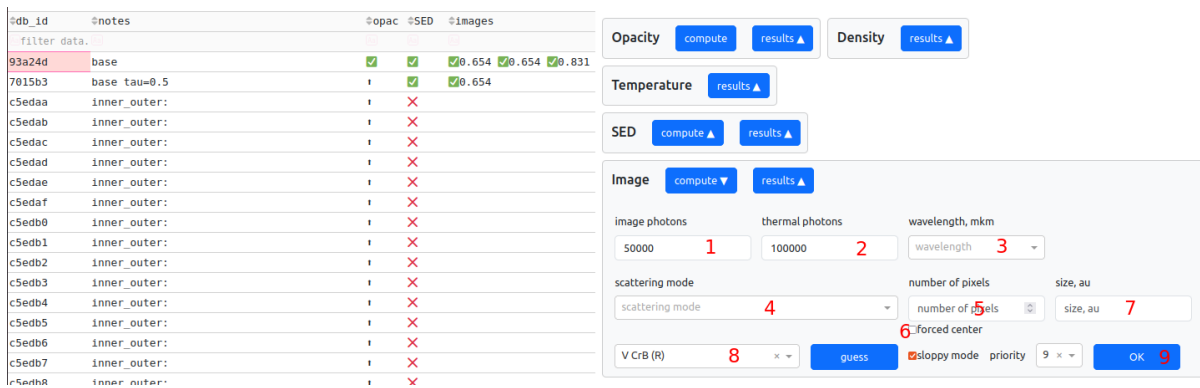


Рис. 11: Назначение вычисления изображения. 1 — количество фотонов, которые будут использованы для формирования изображения. 2 — количество фотонов для расчета теплового баланса. 3 — длина волны. 4 — режим расчета рассеяния. 5 — количество пикселей по одной координате в результирующем изображении, 6 — если количество пикселей четное, то звезда будет размещена в пикселе справа от центра массива. 7 — размер отображаемой области в а.е., 8 — здесь можно выбрать наблюдение ДПВ, ассоциированное с данной моделью, по нажатию на guess значения параметров будут заполнены автоматически. 9 — кнопка по которой запускаются вычисления.

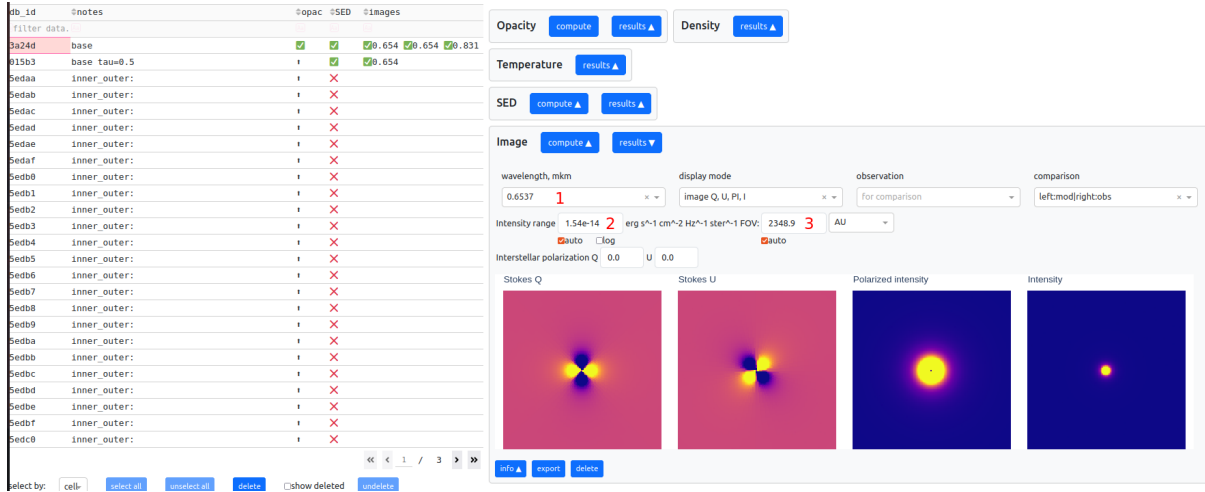


Рис. 12: Просмотр результатов вычислений изображения. 1 — выбор длины волны. 2 — диапазон отображения интенсивности, нужно снять галочку auto если вы хотите указать его вручную. 3 — отображаемая область пространства.

экземпляр, нажать на кнопку edit, в открывшемся окне сверху будет ссылка direct link — это и есть прямая статическая ссылка на экземпляр.

Функциональность страницы instancebrowser включает также: блок opacity — отображение оптических характеристик пыли, блок density — отображение сечения плотности модели, блок temperature — отображение карты/графика температуры в зависимости от положения в пространстве модели, блок image — назначение/отображение результатов расчетов изображения объекта. В данной задаче эта функциональность не используется, но можно изучить ее если есть интерес.

4.2.4 Сравнение с наблюдениями

Для просмотра наблюдений загруженных в систему нужно нажать на кнопку observations в верхнем меню. На данный момент система принимает только два вида наблюдений: SED и дифференциальная поляризационная видимость (DPV). Здесь мы будем рассматривать только SED. Значения колонок в таблице следующие. object — название объекта, band — фотометрическая полоса (для SED пропускается), type — вид SED/DPV, tags — класс объекта, может быть больше одного, instrument — инструмент, telescope — телескоп, owner — кто загрузил, uploaded — время загрузки, epoch — эпоха наблюдения. Если данное наблюдение было сконструировано из результатов полученных на разных телескопах и приборах, то в колонках instrument и telescope указывается

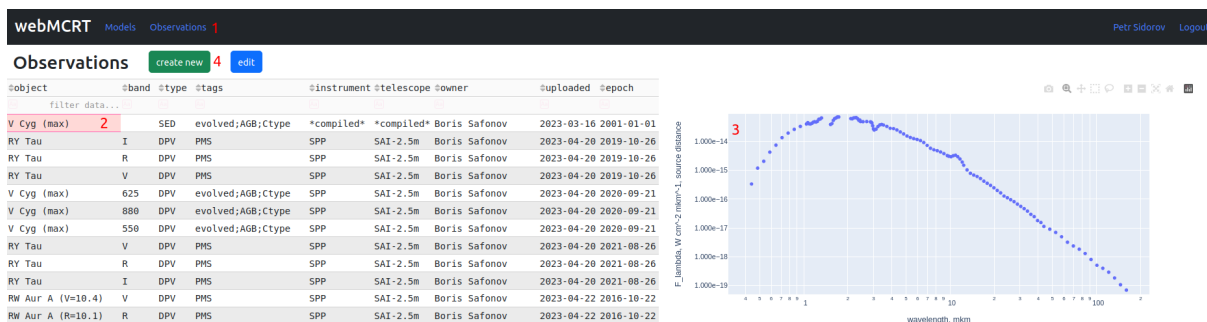


Рис. 13: Страница с наблюдениями, загруженными в систему. 1 — ссылка по которой она открывается. 2 — текущее отображаемое наблюдение. 3 — наблюдение (в данном случае SED). 4 — кнопка создания нового наблюдения.

compiled.

В данной задаче не предполагается работать с реальными наблюдениями. Однако спектр, вычисленный аналитически (см. задание 1 ниже), мы будем рассматривать как некое синтетическое наблюдение и его таки надо будет загрузить в систему для удобства последующего сравнения с SED, посчитанным MCRT.

Загрузка наблюдения выполняется путем нажатия на кнопку create new (отметка 4 на рис. 13). На открывшейся странице (Рис. 14) нужно придумать уникальное название объекта, а также ввести описание метода его генерации в поле description. Если наблюдение искусственное (а в нашем случае это так), то нужно поставить галочку simulated. В поле дата ввести произвольную дату. Сам SED загружается из файла, который должен состоять из двух колонок — длина волны и поток. Обратите внимание что нужно правильно выбрать единицы потока. В конце нужно нажать на кнопку Create observation.

После того как наблюдение создано вы сможете ассоциировать его с моделью. Войдите в режим редактирования модели и выберите наблюдение из списка в блоке observations. После того как это будет сделано наблюдение начнет отображаться в блоке результатов расчета SED на странице экземпляров (пример на Рис. 10).

Create observation

Object: Label: Epoch (UT):

☐ compiled ☒ simulated 1

Description:

Editors:

☐ private

Tags: Create new:

Wavelength/frequency units: 2 Flux units: 3 Source distance, pc:

Рис. 14: Страница с наблюдениями, загруженными в систему. 1 — галочка которую нужно поставить если наблюдение искусственное. 2 и 3 — единицы длины волны и потока (нужно указывать вручную, в зависимости от того какие единицы вы использовали при генерации SED).

4.2.5 Рассмотрение сеток параметров (grid studies)

Часто при поиске модели, описывающей наблюдение некоторого объекта, возникает необходимость рассмотрения семейства моделей, отличающихся друг от друга только значениями количественных параметров модели. В системе webMCRT предусмотрена возможность построения таких наборов, которые мы называем исследованиями на сетках параметров, или grid studies. Исследование на сетке создается в пределах одной модели и представляет собой совокупность экземпляров². Чтобы открыть список исследований для данной модели, выберите ее в списке моделей и нажмите на синее число в последней колонке studies (это число — количество имеющихся исследований).

Для создания нового исследования нажмите на кнопку create grid study. На открывшейся странице нужно ввести название исследования (на английском языке и по возможности краткое). Подробное описание можно ввести в поле description.

В таблице ниже можно выбрать ячейку в колонке value для параметра по которому будет выполняться сечение и в блоке add range справа указать значения, которые будет принимать параметр, см. Рис. 15. Сечение по параметру можно выполнять с равномерным шагом, либо прямо указав значения (выпадающее меню range type).

Creation of grid study for model (Copy of RW LMi Aringer New Bord)

Model description: Модель для максимума, считается верным расстояние в GAIA, и тогда светимость принимается равной 8561. Сетка длин волн нормальная. Температура пыли около 1200K

Show model details ▾

Study title:

title 1

Study description:

study description 2

Adjustable parameters

#entity	#name	#param	#value
	filter data...		
dust species	C&SiC	Min radius, mkm	0.005
dust species	C&SiC	Max radius, mkm	2.5
dust species	C&SiC	Power	-3.5
dust species	C&SiC	Number of bins	100
dust species	C&SiC	c-suh fraction	0.8
dust species	C&SiC	sic-peg fraction	0.2
primitive	1st Layer	Wavelength, mkm	0.55
primitive	1st Layer	Optical depth	10.75
primitive	1st Layer	Position X, AU	3 -300:100:301
primitive	1st Layer	Position Y, AU	0
primitive	1st Layer	Position Z, AU	0
primitive	1st Layer	Inner edge, AU	8
primitive	1st Layer	Outer edge, AU	800
primitive	1st Layer	Power	-2
primitive	2nd Layer	Wavelength, mkm	0.55
primitive	2nd Layer	Optical depth	0.825

Add range 4

Position X, AU

Range type: arange x ▾

-300 100 301

add clear

View ranges content:

Number of instances to generate: 7 5

Position X, AU: [-300, -200, -100, 0, 100, 200, 300]

Рис. 15: Страница создания исследования на сетке параметров. 1 — название исследования. 2 — описание исследования. 3 — выбор параметра по которому будет выполняться сечение. 4 — блок задания значений параметра, в данном случае положение облака 1st layers по оси OX будет принимать значения $-200, -100, 0, 100, 200$ а.е. 5 — сводка: полное количество создаваемых экземпляров и диапазоны параметров.

Параметров, по которым будет выполняться сечение, может быть больше одного, в такое исследование будут входить экземпляры со всеми возможными комбинациями указанных варьируемых параметров. В настоящее время количество экземпляров в исследовании ограничено 3000.

По нажатию на кнопку Create study будут созданы экземпляры составляющие данное исследование. Если исследование крупное, это может занять некоторое время. Далее вы будете возвращены на страницу с исследованиями. Выделив исследование справа можно увидеть информацию по нему. По нажатию на кнопку view instances справа сверху откроется страница instancebrowser, где будут представлены экземпляры составляющие данное исследование. Также в таблице появятся колонки, соответствующие тем параметрам, по которым выполняются сечения. Далее для сгенерированных

²Разделение модель–экземпляр было в значительной степени мотивировано желанием реализовать исследования на сетках.

экземпляров вычисления, например, SED могут быть проведены обычным способом (см. предыдущий раздел).

5 Порядок выполнения задачи

5.1 Параметры системы

В качестве тестового объекта мы рассмотрим звезду с пылевой оболочкой:

1. Звезда с температурой $T = 6000$ К, радиусом $R = 1.5R_{\odot}$, на расстоянии 100 пк от наблюдателя. Звезду моделировать как абсолютно черное тело (АЧТ).
2. Околосветная пыль образует сферический слой толщиной 1 а.е., и средним радиусом 10 а.е.. Химический состав пыли, распределение пылинок по радиусам, полную массу облака предоставляет руководитель задачи³. Также у руководителя нужно взять файл с оптическими параметрами пыли. Описание формата файла находится внутри него.

5.2 Задание 1. Аналитический расчет спектра

Используя формулы из раздела 2, получить выражение для потока от звезды с точки зрения наблюдателя, с учетом поглощения в пылевой оболочке. Звезду считать АЧТ. Записать уравнение теплового баланса для пыли в оболочке, учитывая излучательную способность пыли. Определить температуру пыли, градиентом температуры по оболочке пренебречь. Получить выражение для спектра теплового излучения пыли с учетом излучательной способности пыли. Полный спектр получить сложением спектра звезды после поглощения и оболочки. Самопоглощением, самонагревом оболочки пренебречь. Обосновать возможность этого пренебрежения. В ходе расчетов пренебречь рассеянием. Спектр представить в диапазоне длин волн от 0.1 до 200 мкм в единицах потока: Вт/см²/мкм.

Используя вводные данные и оптические свойства пыли, предоставленные руководителем задачи, построить графики: спектр звезды с поглощением, спектр оболочки, полный спектр. Для расчетов использовать любой предпочитаемый язык программирования.

5.3 Задание 2. Расчет спектра с помощью MCRT

Зарегистрироваться в системе webMCRT. Создать модель, создать экземпляр, выполнить вычисление спектра без учета рассеяния.

5.4 Задание 3. Сравнение спектров вычисленных аналитическим методом и MCRT

Загрузить спектр рассчитанный в задании 1 в систему как наблюдение. Ассоциировать это наблюдение с моделью, созданной в задании 2. Используя средства webMCRT сравнить спектр вычисленный аналитически и с помощью webMCRT.

5.5 Задание 4. Варьирование параметров пылевой оболочки

В этом задании выберите какой-нибудь из перечисленных ниже физических параметров.

1. Масса оболочки.
2. Радиус оболочки.
3. Температура фотосферы звезды.
4. Максимальный размер частиц.
5. Взять другой химический состав частиц.

Фиксируя остальные параметры, для 5–10 значений этого параметра вычислите вид спектра. Используйте функциональность grid study, раздел 4.2.5 (кроме вариаций хим. состава). Прокомментируйте изменения.

³Сафонов Б.С. safonov10@gmail.com, +79267543714

6 Представление результатов

1. Формула спектра объекта, полученная аналитически (задание 1). Температура пыли в оболочке. Оптическая толщина по оболочке на длине волны 500 нм. Полная светимость звезды и оболочки в светимостях Солнца.
2. Открыть доступ к модели в webMCRT руководителю задачи. Ссылка на экземпляр модели с рассчитанным спектром (задание 2). С моделью должно быть ассоциировано искусственное наблюдение, сгенерированное аналитически (задание 3). Спектры рассчитанные MCRT и аналитически должны хорошо совпадать (однако совпадение не будет полным). Опционально можно также сделать скриншот SED посчитанного MCRT и аналитически.
3. Ссылки на экземпляры модели с варьируемым параметром (задание 4). Прокомментировать изменение вида спектра.

Дополнительные результаты которые могут быть представлены по желанию: зависимость оптической толщины от длины волны.

6.1 Контрольные вопросы

Вопросы которые могут быть заданы при приемке результатов.

1. Что такое интенсивность, поток, излучательная способность, коэффициент непрозрачности.
2. Сравнить равновесную температуру пыли и температуру некоторой элементарной площадки имеющей свойства АЧТ и находящейся на том же расстоянии от звезды что и пыль. Прокомментировать.
3. Обсудить вид полученного спектра на качественном уровне.
4. Обсудить причины по которым спектр, рассчитанный методом MCRT, может отличаться от спектра, рассчитанного аналитически.

Список литературы

- B. Aringer, L. Girardi, W. Nowotny, P. Marigo, and M. T. Lederer. Synthetic photometry for carbon rich giants. I. Hydrostatic dust-free models. , 503(3):913–928, September 2009. doi: 10.1051/0004-6361/200911703.
- J. E. Bjorkman and Kenneth Wood. Radiative equilibrium and temperature correction in monte carlo radiation transfer. *The Astrophysical Journal*, 554(1):615, jun 2001. doi: 10.1086/321336. URL <https://dx.doi.org/10.1086/321336>.
- Carsten Dominik, Michiel Min, and Ryo Tazaki. OpTool: Command-line driven tool for creating complex dust opacities. Astrophysics Source Code Library, record ascl:2104.010, April 2021.
- C. P. Dullemond, A. Juhasz, A. Pohl, F. Sereshti, R. Shetty, T. Peters, B. Commercon, and M. Flock. RADMC-3D: A multi-purpose radiative transfer tool. Astrophysics Source Code Library, record ascl:1202.015, February 2012.
- A. J. Pickles. A Stellar Spectral Flux Library: 1150-25000 Å. , 110(749):863–878, July 1998. doi: 10.1086/316197.
- A. В. Засов and К. А. Постнов. *Общая астрофизика*. Фрязино, 2006. ISBN 5–85099–169–7.