

Расчет изображения пылевой оболочки в рассеянном свете

версия 0.1

Сафонов Б. С.,* Федотова А. Е.

26 августа 2024 г.

1 Введение

Одним из важных механизмов генерации излучения пылью в космическом пространстве является рассеяние. Как правило речь идет о рассеянии излучения звезд. При рассеянии излучение закономерно приобретает поляризацию. Действительно, движение зарядов в рассеивающих частицах, вызванное излучением, имеет значительную упорядоченность — оно происходит преимущественно в плоскости перпендикулярной направлению распространения рассеиваемого излучения. Заряды движущиеся с ускорением сами становятся источником электромагнитного излучения и, поскольку их движение упорядочено, то и колебания поля приобретают преимущественное направление. Рассеянное излучение приобретает поляризацию, см. Рис. 1, слева. Обычно возникает линейная поляризация, но возможна генерация и круговой поляризации при рассеянии на частицах специальной формы, либо в том случае если исходное излучение было уже поляризовано.

За счет рассеяния светят отражательные туманности, в которые погружены рассеянные скопления (см. Рис. 1, в центре). Такие туманности имеют размеры порядка единиц парсеков. Но часто пыль бывает сконцентрирована на гораздо меньших расстояниях от звезды — $10^{-1} - 10^2$ а.е., например в окрестностях молодых звезд (Рис. 1, правый), звезд на поздних стадиях эволюции. Рассеяние вместе с поглощением играет важную роль в динамике пыли в околозвездном пространстве. Также рассеяние на межзвездной пыли необходимо учитывать при моделировании и интерпретации спектров галактик.

Анализ рассеянного излучения дает важную информацию о распределении пыли в пространстве, химическом составе частиц, их размерах и форме. Измерение состояния поляризации рассеянного излучения, выполняемое методами поляриметрии, оказывается весьма ценным дополнением к измерениям полной интенсивности. Такой параметр, как поляризованная интенсивность — произведение доли поляризации на полную интенсивность — может быть измерен с точностью значительно превышающей точность измерения полной интенсивности. Эта особенность поляризационных измерений вытекает из их дифференциальной природы. Многие эффекты, искажающие обычные фотометрические измерения, могут быть в значительной степени или полностью подавлены методами

*safonov10@gmail.com, telegram:+79267543714



Рис. 1: Слева: схема поясняющая возникновение поляризации излучения при рассеянии. В центре: отражательная туманность в Плеядах. Справа: протопланетный диск AB Aur в рассеянном свете.

дифференциальной поляриметрии. К ним относятся: мерцания, вариации прозрачности, вариации чувствительности детектора.

Особенно актуальна дифференциальная поляриметрия становится в приложении к исследованием пылевых оболочек в ближайших окрестностях звезд. На малых угловых расстояниях от звезды ($0.05 - 2.0''$) прямое излучение звезды, размываемое оптической турбулентностью в земной атмосфере, оказывается основным источником шума. Для его подавления применяется адаптивная оптика и коронография, тем не менее именно использование дифференциальной поляриметрии в последние 5 – 10 лет обеспечило значительный прогресс в понимании структур в протопланетных дисках (подобных изображенному на Рис. 1, справа).

Таким образом, рассеянное излучение с одной стороны удобно и эффективно изучать с применением современных методов наблюдательной астрономии, а с другой стороны оно несет важную информацию об источнике. Интерпретация наблюдений рассеянного излучения предполагает наличие инструмента решения прямой задачи, т.е. метода вычисления распределения полного и поляризованного излучения в картинной плоскости. Такие вычисления могут быть сделаны аналитически. Однако, также как и в случае расчета спектра теплового излучения пыли¹, данная задача становится технически не решаемой из-за сложности вида граничных условий и оптических свойств пыли. 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 изображения, по мере увеличения числа фотонов приближающегося к изображению объекта.

Цель работы: для околозвездного облака простой геометрии, состоящего из пыли с известными параметрами, вычислить изображения в параметрах Стокса (см. ниже) аналитическим методом и методом Монте–Карло. В процессе ознакомиться с математическим описанием поляризованного излучения и его генерации за счет рассеяния. Осознать преимущества и недостатки метода Монте–Карло.

2 Теория

Интенсивность излучения, испускаемого АЧТ через единичную площадку, описывается формулой Планка:

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

где B_λ имеет размерность Дж/с/см³/стер, 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.

Излучение АЧТ является неполяризованным. Однако в общем случае электромагнитные волны поляризованы. Существуют различные способы характеризации частично поляризованного света. Часто встречается комбинация из четырех величин: интенсивность (либо поток в зависимости от задачи), доля поляризации p , угол поляризации ψ , угол, характеризующий круговую поляризацию χ . Угол поляризации отсчитывается против часовой стрелки от некоторого опорного направления. В астрономии в качестве такового направления обычно берется направление на северный полюс мира. Что касается угла χ , то $\chi = 0$ когда круговая поляризация отсутствует, $\chi = \pi/4$ когда свет имеет правую положительную круговую поляризацию и $\chi = -\pi/4$ — тоже, но поляризация левая.

В контексте данной задачи удобно будет использовать т.н. вектор Стокса $\mathbf{S} = (I, Q, U, V)^T$, элементы которого связаны с величинами I, p, ψ, χ следующим образом:

$$\begin{aligned} I &= I \\ Q &= pI \cos 2\psi \cos 2\chi \\ U &= pI \sin 2\psi \cos 2\chi \\ V &= pI \sin 2\chi \end{aligned} \quad (2)$$

Как можно видеть, элементы вектора \mathbf{S} имеют размерность интенсивности (потока). Также обратите внимание что вектор Стокса также задан в некоторой системе координат (поскольку его элементы зависят от ψ). При изменении опорного направления вообще говоря требуется трансформация вектора Стокса.

¹См. задачу практикума “Расчет спектра звезды с пылевой оболочкой”.

Вектор \mathbf{S} обладает свойством аддитивности, т.е. если сложить излучение от двух источников (некогерентно), то суммарный вектор Стокса будет равен сумме векторов Стокса, характеризующих излучение этих источников.

Преобразование состояния поляризации излучения некоторым оптическим элементом описывается уравнением:

$$\mathbf{S}_{\text{out}} = \mathbf{M}\mathbf{S}_{\text{in}}, \quad (3)$$

где \mathbf{M} — т.н. матрица Мюллера, имеющая размеры 4×4 . В оптическом эксперименте поляризация света может быть изменена линейным поляризатором, фазовой пластинкой и т.д. В астрофизических условиях любое рассеяние излучения изменяет его состояние поляризации — отражение от твердых и жидкых поверхностей, молекулярное рассеяние в атмосферах звезд и планет и, конечно же, рассеяние на пыли в околозвездном и межзвездном пространстве. Именно последний эффект и будет рассмотрен в данной задаче.

Уравнение переноса поляризованного излучения с учетом поглощения, излучения и рассеяния:

$$\frac{d}{ds} \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} = -\alpha_\lambda \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} j_\lambda \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \int \rho Z_\lambda(\theta) \begin{pmatrix} I'(\mathbf{k}') \\ Q'(\mathbf{k}') \\ U'(\mathbf{k}') \\ V'(\mathbf{k}') \end{pmatrix} d\Omega'. \quad (4)$$

Это уравнение описывает изменение вектора Стокса $\mathbf{S} = (I, Q, U, V)^T$ излучения, распространяющегося вдоль волнового вектора \mathbf{k} , при прохождении элементарного пути s , см. Рисунок 2. α_λ и j_λ — это коэффициенты поглощения и излучения. В данной задаче мы не будем рассматривать эффекты поглощения и излучения, ограничившись только рассеянием.

Третье слагаемое в правой части уравнения описывает рассеяние.

$$S = (I'(\mathbf{k}'), Q'(\mathbf{k}'), U'(\mathbf{k}'), V'(\mathbf{k}'))^T \quad (5)$$

— вектор Стокса *рассеиваемого* излучения, имеющего волновой вектор \mathbf{k}' . θ — угол рассеяния — угол между векторами \mathbf{k} и \mathbf{k}' . Интегрирование выполняется по телесному углу Ω' под которым видны источники излучения с рассеивающим объемом.

$Z_\lambda(\theta)$ — так называемая удельная матрица рассеяния. Матрица рассеяния, как и всякая другая матрица Мюллера, имеет размеры 4×4 . Каждый ее элемент является функцией длины волны, угла рассеяния, а также свойств рассеивающей среды, в случае пыли — химического состава, распределения по размерам и формы пылинок. Элементы матрицы Z имеют размерность $\text{см}^2/\text{г/стер}$. Матрица Z действует в системе координат, опорное направление которой задано плоскостью рассеяния (см. Рис. 2). ρ — плотность рассеивающего вещества.

Коэффициент непрозрачности κ и матрица рассеяния Z вместе составляют оптические свойства пыли. Когда размеры пылинок меньше длины волны для расчета их оптических свойств применяют Релеевское приближение. Для более крупных пылинок, имеющих форму шаров или эллипсоидов вычисление оптических свойств пыли может быть сделано в приближении Ми. Для пылинок произвольной формы применяются более сложные алгоритмы, например DDSCAT. Для расчетов оптических свойств пыли широко применяется программа optool (Dominik et al., 2021).

Литература по данному разделу: (Засов and Постнов, 2006) и (Peest, 2018).

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 (4). Однако сложность начальных условий делает получение конечных результатов в виде формул аналитически нерешиаемой задачей. В качестве полумеры приходится прибегать к упрощениям, что вызывает систематические ошибки в предсказываемых результатах. В большом количестве практически важных 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

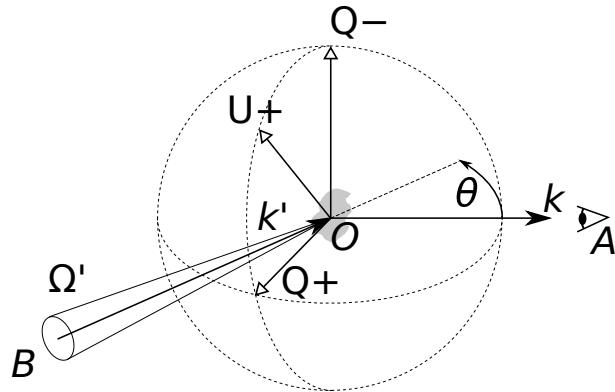


Рис. 2: Геометрия рассеяния на элементарном объеме O , наблюдатель в точке A . \mathbf{k}' и \mathbf{k} — волновые векторы рассеиваемого и рассеянного излучения. Ω' — единичный телесный угол под которым виден элемент источника B рассеиваемого излучения (по этому углу выполняется интегрирование в третьем слагаемом правой части уравнения (4)). θ — угол рассеяния. $Q+, U+, Q-$ показывают ориентацию системы координат в картинной плоскости в которой действует матрица рассеяния Z . Направление $Q+$ находится в плоскости рассеяния, заданной векторами \mathbf{k} и \mathbf{k}' .

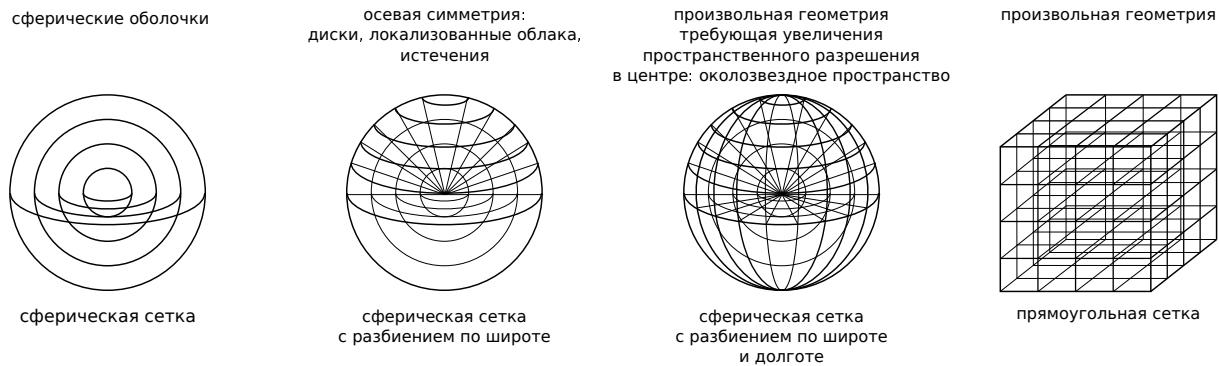


Рис. 3: Некоторые возможные разбиения пространства.

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 ошибка 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. 3. 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. 4.

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 (1).

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 по-считанный 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

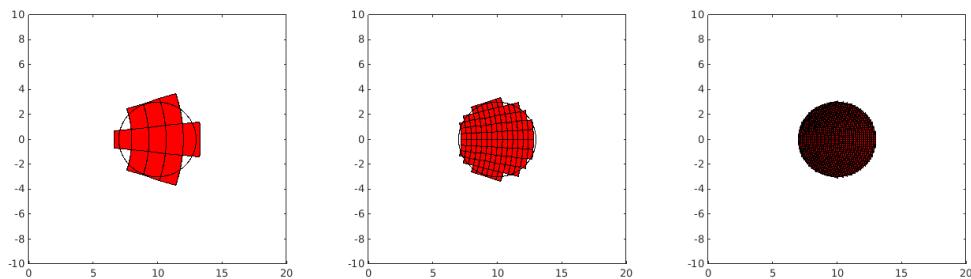


Рис. 4: Модель сферического облака локализованного в стороне от начала координат. Дискретизация сферической сеткой с разбиением по радиусу и широте. Слева: слишком грубый шаг, возможны систематические ошибки в оценке наблюдаемой характеристики, например SED. В центре: оптимальный шаг. Справа: слишком мелкий шаг, результирующий SED такой же как для случая в центре, но время вычислений значительно возрастает.

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.
5. Обеспечена возможность совместной работы над моделями многих пользователей. Реализован 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. 5 (если вы Петр Сидоров):

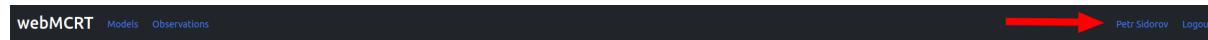


Рис. 5: Заголовок сайта webMCRT в случае успешной авторизации.

По нажатию на свое имя справа вверху 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 — вещества 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. 6)

Models		create new	create as copy	edit				
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-pegs	star, Aringer+ 2009:3000K	52	1
delete	<input type="checkbox"/> show deleted	undelete						

Рис. 6: 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. 7. 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 мимальный, максимальный радиусы, степень в законе p , а также количество интервалов, на которое разбивается непрерывное распределение.

Dust species			
Add			
Size distribution	Name		
powerlaw	<input type="text" value="Mixture"/>		
Min radius, mkm	Max radius, mkm	Power	Number of bins
0.01	10.0	-2	10
Material	Mass fraction	Driven	Add material
crystalline pyroxene	0.15	<input type="checkbox"/>	Remove material
iron	0.85	<input type="checkbox"/>	Remove material

Рис. 7: 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.

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.

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. 8 нужно указать закон по которому распределена плотность оболочки в околозвездном пространстве. Оболочка должна быть представлена в виде суммы простых

Primitives		
Add	Refresh dust species	
Select type	Name	Dust species
sphere_power	envelope	dust
Remove		
Mass determined by	Wavelength, mkm	Optical depth
optical depth origin-observer	0.5	4.24
Inner edge, AU	Outer edge, AU	Power
11	30000	-2
Position X, AU	Position Y, AU	Position Z, AU
0	0	0
Select type	Name	Dust species
ppdisk	disk	dust
Remove		
Mass determined by	Wavelength, mkm	Optical depth
optical depth origin-X+	0.5	10
Inner edge, AU	Outer edge, AU	Radial power
11	30000	2
Height power	Scale height, AU	Scale height ref rad, AU
1	2	10
Position X, AU	Position Y, AU	Position Z, AU
0	0	0

Рис. 8: 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.

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 сферические 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 толщу. При задании массы через оптическую толщу нужно выбрать луч зрения и длину волны на которых будет вычисляться оптическая толщца. Метод задания массы через оптическую толщу 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. 9 выполняется настройка источников излучения. Можно добавлять (add) и убирать (remove) источники, также без ограничений на количество. Для каждого 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 у 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. 10. 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

Рис. 9: Блок задания источников излучения. В данном случае заведена одна углеродная звезда радиусом $790 R_{\odot}$ и температурой 2400 К.

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	✓	✓	

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. 11 (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.

Для вычисления SED потребуются предварительно вычислить оптические параметры пыли. Соответствующие расчеты будут назначены и выполнены автоматически, статус будет отображаться в колонке орас. Система выполняет кэширование оптических свойств пыли. Если свойства пыли некоторого экземпляра А не отличаются от свойств пыли другого экземпляра Б, и для последнего

Creation of instance for V CrB

Model by Fedotova

Show details 1

Notes for this instance:

instance description 2

Adjustable parameters

#entity	#name	#name	#value
filter data...			
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-sun fraction	0.75
dust species	dust	sic-peg fraction	0.25

Рис. 10: Создание экземпляра. 1 — показать нередактируемые атрибуты. 2 — описание экземпляра (оно будет отображаться в таблице экземпляров). 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.

Рис. 11: 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.

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. 12

Для вычисления изображения нужно нажать compute в блоке Image, рис. 13. После ввода всех параметров нажать OK. 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. 14.

Статическую ссылку на экземпляр модели можно сгенерировать следующим образом. Выделить экземпляр, нажать на кнопку edit, в открывшемся окне вверху будет ссылка direct link — это и есть прямая статическая ссылка на экземпляра.

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 изучать 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 диф-

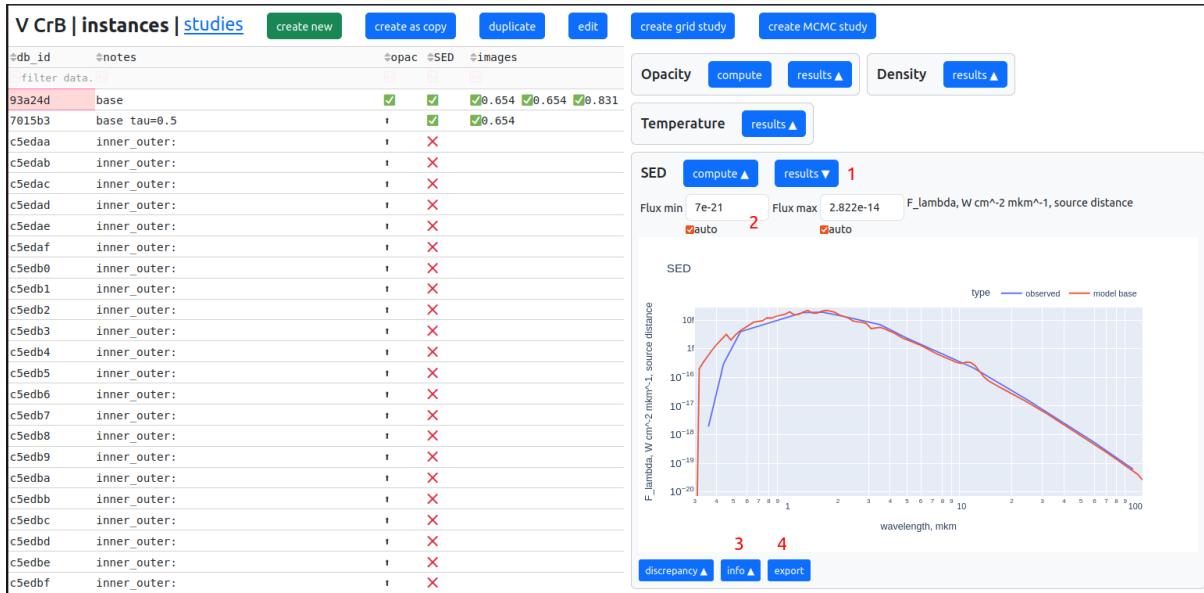


Рис. 12: Просмотр результатов вычислений SED. 1 — кнопка по которой открывается блок просмотра результатов. 2 — диапазон отображения потоков, нужно снять галочки auto если вы хотите указать их вручную. 3 — здесь можно посмотреть кто и когда назначил расчет, сколько времени он выполнялся и на каком сервере. 4 — экспорт в файл.

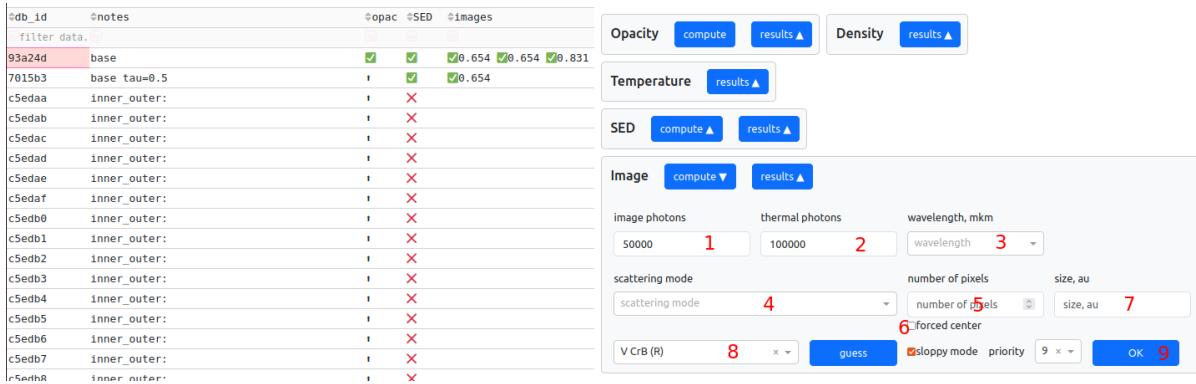


Рис. 13: Назначение вычисления изображения. 1 — количество фотонов, которые будут использованы для формирования изображения. 2 — количество фотонов для расчета теплового баланса. 3 — длина волн. 4 — режим расчета рассеяния. 5 — количество пикселей по одной координате в результирующем изображении, 6 — 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.

ференциальная поляризационная видность (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 *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. 15). На открывшейся странице (Рис. 16) нужно придумать уникальное название объекта, а также ввести

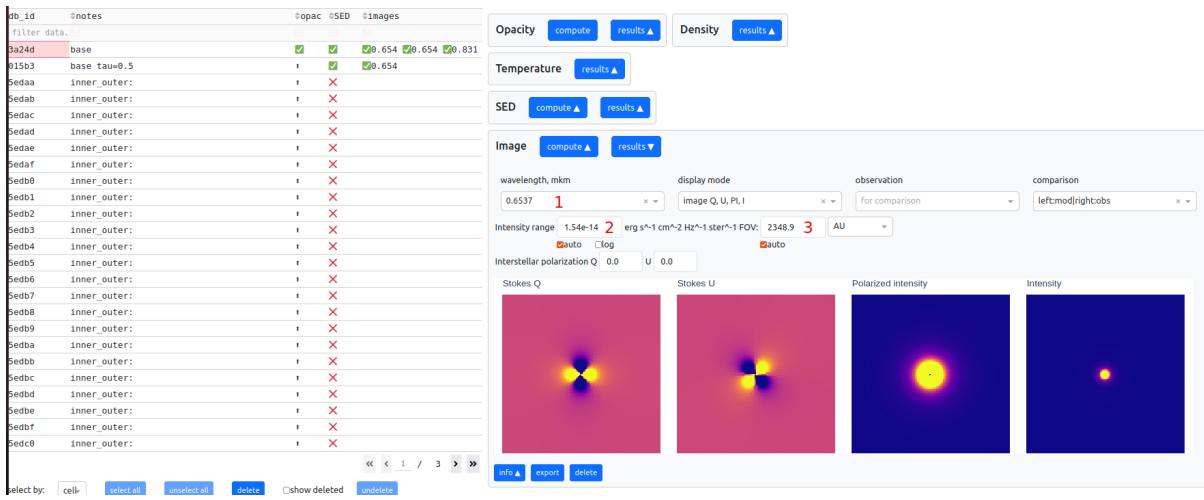


Рис. 14: Просмотр результатов вычислений изображения. 1 — выбор длины волны. 2 — диапазон отображения интенсивности, нужно снять галочку auto если вы хотите указать его вручную. 3 — отображаемая область пространства.

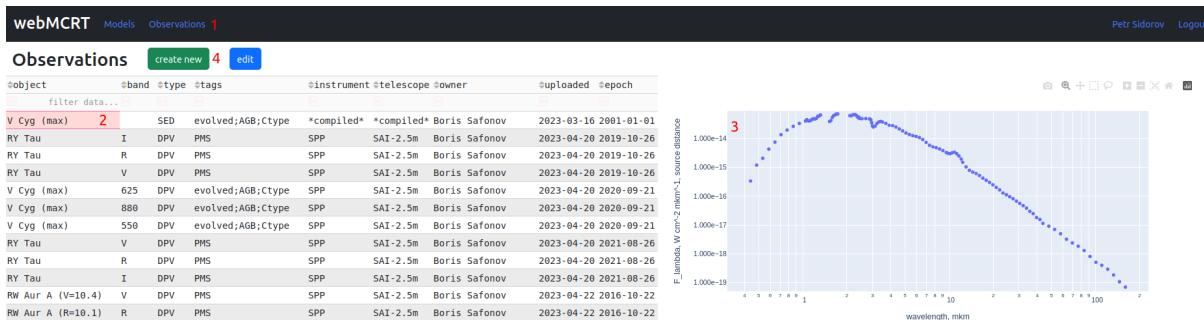


Рис. 15: Страница с наблюдениями, загруженными в систему. 1 — ссылка по которой она открывается. 2 — текущее отображаемое наблюдение. 3 — наблюдение (в данном случае SED). 4 — кнопка создания нового наблюдения.

описание метода его генерации в поле `description`. Если наблюдение искусственное (а в нашем случае это так), то нужно поставить галочку `simulated`. В поле `date` 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. 12).

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). Полное описание можно ввести в поле `description`.

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

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. 17. Сечение по параметру можно выполнять с равномерным шагом, либо прямо указав значения (выпадающее меню range type).

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 вверху откроется страница instancebrowser, где будут представлены экземпляры составляющие данное исследование. Также в таблице появятся колонки, соответствующие тем параметрам, по которым выполняются сечения. Далее для генерированных 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. Околозвездная 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 задачи ³. Также у руководителя нужно взять файл с оптическими параметрами пыли. Описание формата файла находится внутри него.

5.2 Задание 1. Аналитический расчет изображения оболочки

Используя формулы из раздела 2, вычислить распределение параметров Стокса I, Q, U по оболочке на длине волны 0.5 мкм, используя любой предпочтаемый язык программирования. Распределение построить на равномерной квадратной сетке, и таким образом получить изображение,

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

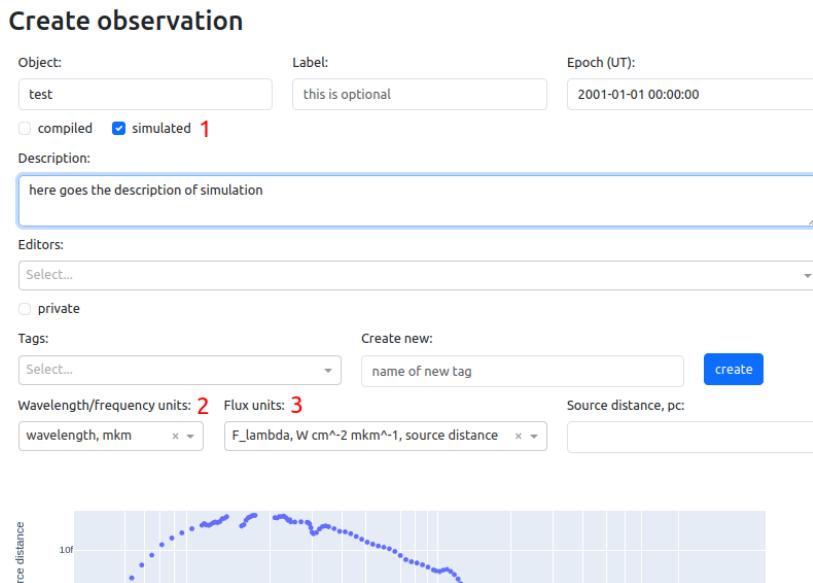


Рис. 16: Страница с наблюдениями, загруженными в систему. 1 — галочка которую нужно поставить если наблюдение искусственное. 2 и 3 — единицы длины волны и потока (нужно указывать вручную, в зависимости от того какие единицы вы использовали при генерации SED).

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 1200К

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-pegi 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:

orange

-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. 17: 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.

состоящее из “пикселей”. Матрицу рассеяния взять из файла, предоставленного руководителем задачи. Саморассеянием в оболочке пренебречь, другими словами учитывать только однократное рассеяние. Результат представить в единицах интенсивности Дж/с/см³/стер, опорное направление вектора Стокса $Q+$ — вверх.

5.3 Задание 2. Расчет изображения оболочки с помощью MCRT

Зарегистрироваться в системе webMCRT. Создать модель, создать экземпляр, выполнить вычисление изображения на длине волны 0.5 мкм (см. инструкцию в разделе 4).

5.4 Задание 3. Сравнение изображений вычисленный аналитическим методом и MCRT

Сравнение в данной задаче предлагается выполнять на локальной машине⁴. Открыть в webMCRT рассчитанное изображение оболочки. Экспортировать изображение в файл, нажав кнопку export. Формат результирующего файла следующий.

1. Размеры изображения в пикселях N .
2. Координатная сетка по горизонтальной оси, а.е., N строк.
3. Координатная сетка по вертикальной оси, а.е., N строк.
4. Изображение в параметре Стокса Q , опорное направление вертикальное, $N \times N$ массив развернут в вектор, занимающий N^2 строк. Единицы: эрг/с/см²/Гц/стер. Обратите внимание выдается интенсивность I_ν , а не I_λ .
5. Тоже, но в параметре Стокса U .

⁴В отличие от задачи SIMTHERM “Расчет спектра звезды с оболочкой”, где сравнение проводится в системе webMCRT.

6. Тоже, поляризованная интенсивность $\sqrt{Q^2 + U^2}$.

7. Тоже, но в параметре Стокса I .

Построить графики/изображения позволяющие количественно сравнить изображения, полученные в предыдущем задании аналитическим методом с изображениями, полученными методом MCRT.

5.5 Задание 4. Варьирование параметров пылевой оболочки

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

1. Масса оболочки.
2. Геометрическая толщина оболочки.
3. Длина волны на которой вычисляется изображение.
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.

6 Представление результатов

1. Изображение в параметрах Стокса I, Q, U , опорное направление вверх, единицы интенсивности (задание 1). Отношение полного потока от оболочки к полному потоку от звезды. Карта распределения доли, угла поляризации по оболочке.
2. Открыть доступ к модели в webMCRT руководителю задачи. Ссылка на экземпляр модели с рассчитанным изображением (задание 2).
3. Графики/изображения позволяющие количественно сравнить изображения, полученные аналитическим методом, с изображениями, полученными методом MCRT (задание 3).
4. Ссылки на экземпляры модели с варьируемым параметром (задание 4). Комментарии по изменениям.

Дополнительные результаты которые могут быть представлены по желанию: индиактриса рассеяния, зависимость доли поляризации от угла рассеяния, оптическая толщина оболочки.

6.1 Контрольные вопросы

Вопросы которые могут быть заданы при приемке результатов.

1. Что такое интенсивность, поток, оптические свойства пыли: матрицы рассеяния. Угол рассеяния.
2. Параметры, характеризующие поляризацию излучения, в т.ч. параметры Стокса.
3. Обсудить причины по которым изображение, рассчитанное методом MCRT, может отличаться от изображения, 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. *aap*, 503(3):913–928, September 2009. doi: 10.1051/0004-6361/200911703.

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.

Christian Peest. *Modeling the polarization of radiation by cosmic dust*. PhD thesis, Ghent University,
2018.

A. J. Pickles. A Stellar Spectral Flux Library: 1150–25000 Å. *pasp*, 110(749):863–878, July 1998. doi:
10.1086/316197.

A. B. Засов and K. A. Постнов. *Общая астрофизика*. Фрязино, 2006. ISBN 5–85099–169–7.