

Федеральное государственное бюджетное учреждение  
Государственный Научный Центр Российской Федерации  
Институт Теоретической и Экспериментальной Физики  
им. А.И. Алиханова

На правах рукописи  
УДК 524.352

Бакланов Пётр Валерьевич

Радиационно-гидродинамические  
модели сверхновых для целей  
космологии и нелТР эффекты

Специальность 01.04.02 — Теоретическая физика,  
01.03.02 — Астрофизика и звездная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2014

**УДК 524.352**

**Работа выполнена в ФГБУ «ГНЦ РФ ИТЭФ», г.Москва**

- Научный руководитель: доктор физико-математических наук  
Блинников Сергей Иванович,  
ФГБУ «ГНЦ РФ ИТЭФ»,  
ведущий научный сотрудник
- Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук  
Постнов Константин Александрович,  
Физический факультет  
МГУ имени М.В. Ломоносова,  
профессор кафедры астрофизики
- доктор физико-математических наук  
Фадеев Юрий Александрович,  
ФГБУН Институт астрономии  
Российской академии наук (ИНАСАН),  
ведущий научный сотрудник
- Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки  
Институт космических исследований  
Российской академии наук (ИКИ РАН)

Защита диссертации состоится 18 марта 2014 г. в 14<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д.201.002.01 в конференц-зале ИТЭФ по адресу: Москва, ул. Б.Черемушкинская, д.25

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУ «ГНЦ РФ ИТЭФ». Также диссертация и автореферат могут быть отправлены на e-mail по запросу на электронную почту: [petr.baklanov@itep.ru](mailto:petr.baklanov@itep.ru)

Автореферат разослан 17 февраля 2014 года.

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук

Васильев В.В.

# 1 Общая характеристика работы

## Актуальность темы

Сверхновая (SN) - финальный аккорд в эволюции звезды. Грандиозность вспышек сверхновых и потрясающая яркость явления позволяет наблюдать их на космологических расстояниях, использовать для измерения расстояний во Вселенной и при проверках космологических моделей.

Сверхновые типа Ia (SN Ia) видны до  $z \sim 1.7$ , а по спектрам отождествлены 3 SN IIp на  $z = 0.8, 2., 2.4$ . Благодаря SN Ia было открыто ускоренное расширение Вселенной. Этот результат можно интерпретировать как наличие в космосе “тёмной энергии”, которая приводит к гравитационному отталкиванию на космологических расстояниях. В фундаментальной физике установление реальности и свойств тёмной энергии и тёмной материи является одной из важнейших современных задач. В решении этой задачи сверхновые, видимые на космологических расстояниях, будут продолжать играть ключевую роль.

Предложено несколько методов использования сверхновых и их газовых остатков в космографии. Эти методы можно разделить на две группы: методы “стандартной свечи” и геометрические методы.

В методах “стандартной свечи” расстояние определяют из фотометрического соотношения, используя сверхновые с заведомо известной светимостью. Метод требует проведения калибровки “стандартной свечи” и получения расстояний до большого числа сверхновых, измеренных совсем другими, независимыми методами с привлечением лестницы космологических расстояний. Иначе, без набора большой статистики объектов с известным расстоянием, невозможно применять эти методы на практике. Поэтому в данной группе методов сверхновые используются как вторичные индикаторы расстояний (secondary distance indicators).

Когда-то считали, что SN Ia являются “стандартными свечами” в том смысле, что максимумы абсолютной светимости (т.е. световой мощности) в

разных вспышках одинаковы. Позже выяснилось, что это не так, но были предложены процедуры, позволяющие найти абсолютную светимость, т.е. произвести стандартизацию свечи.

Тем не менее остается много факторов, которые могут повлиять на результаты, полученные для космологии с помощью сверхновых типа Ia, например, межгалактическое поглощение, покраснение в родительских галактиках, изменение металличности прародителей SN и относительной роли различных предсверхновых с изменением возраста Вселенной. Другим возможным источником ошибок является неправильная классификация и примесь необычных событий типа SN Ia. Так, был открыт своеобразный класс SN Ia, подтип SN 2002cx сверхновых. Они слабые, но медленные, т.е. ведут себя противоположно соотношению Псковского-Филлипса (PP), которое используется для космологии, и согласно которому медленно спадающие SN Ia являются самыми яркими. Теперь представим себе, что число событий подтипа SN 2002cx растёт с космологическим красным смещением  $z$ . Тогда, опираясь на соотношение PP, которое установлено для близких SN Ia, т.е. при  $z = 0$ , мы получим, что сверхновые Ia при больших  $z$  в среднем кажутся *более слабыми*, следовательно, фотометрическое расстояние до них больше, чем при истинном значении  $\Omega_\Lambda$ . Таким образом, будет сделан ложный вклад в тёмную энергию.

Можно процитировать работу Конлей и др.(2011): *“Эволюцию абсолютной величины сверхновых Ia с красным смещением нельзя получить без детальной физической модели, поскольку она в принципе может имитировать любую космологию”*. Конечно, это не означает, что такие сверхновые нельзя использовать для надёжной космографии. Но следует развивать новые подходы к этой задаче.

Такие подходы можно обнаружить, если исследовать сверхновые других типов, связанные с коллапсом центрального ядра массивной звезды с толстой водородной оболочкой. Обилие водорода в оболочке сверхновой проявляется при наблюдениях в виде ярких линий H в спектре, и такие сверхновые классифицируются как SN II. Окончательный механизм взрыва коллапсирующих сверхновых еще далек от полного понимания учёными, но для расчётов моделей SN II это менее существенно, чем для SN Ia, так как толстая водородная оболочка SN II нивелирует многие детали взрыва.

При отсутствии плотной околозвёздной среды на кривых блеска SN II после максимума проявляется плато, на протяжении которого блеск остается

примерно постоянным, сменяемый выходом на хвост от радиоактивного распада элементов. При наличии плато на кривых блеска SN II, длительность которого может достигать до 150 дней, сверхновые относят к подтипу SN IIP. Это самый густонаселенный подтип среди всех SN.

В отличие от SN Ia, имеющих в качестве предсверхновой довольно однородный класс белых карликов, вариативность начальных конфигураций предсверхновых для SN IIP очень велика. Большое количество определяющих конфигурацию начальных параметров и их большой разброс значений по величине (на несколько порядков) приводит к огромному разнообразию кривых блеска SN IIP по форме и светимости. Впервые в работах Литвиновой, Надёжина была показана и выделена корреляционная зависимость между наблюдательными проявлениями сверхновой и базовыми параметрами предсверхновой. В качестве основных параметров предсверхновой были выделены радиус оболочки  $R_{env}$ , полная масса  $M_{tot}$ , масса радиоактивного никеля  $M_{^{56}\text{Ni}}$ , полное энергосодержание  $E_{tot}$ . Важным фактором служит химический состав и распределение элементов по оболочке сверхновой, особенно таких элементов, как  $^{56}\text{Ni}$ , определяющих светимость сверхновой.

Разброс в параметрах предсверхновых и зоопарк в кривых блеска SN IIP сильно усложняет процедуру стандартизации свечи. Тем не менее, были найдены некоторые корреляционные соотношения между отдельными наблюдаемыми величинами, позволяющие судить об абсолютной светимости сверхновой.

Методика стандартизации SN IIP (Standardized Candle Method, SCM), основанная на наблюдаемой корреляции между абсолютной светимостью сверхновой и скоростью расширения фотосферы, была предложена Хамуи и Пинто. Согласно найденной корреляции, более яркие сверхновые имеют большие скорости разлета. Метод был с энтузиазмом подхвачен наблюдателями, а позже, на основе радиационно-гидродинамического моделирования SN IIP, в работе Касена и др. было дано обоснование для полученной ранее эмпирической связи между светимостью и скоростью расширения оболочки. Другой метод, основанный на корреляции между энергией взрыва и массой синтезированного  $^{56}\text{Ni}$ , был предложен Надёжиным. С помощью этого метода Надёжин определил расстояние до SN 1999em, хорошо согласующееся с современным значением.

Однако, несмотря на все достижения в деле стандартизации свечи для SN IIP и в несомненной полезности таких методов, им сложно конкурировать

в качестве “свечи” с SN Ia, однородность которых заложена в сам класс предсверхновых SN Ia.

Важным достоинством SN IIP перед SN Ia является возможность применять для SN IIP геометрические методы определения расстояния, т.е. использовать их в качестве первичного индикатора расстояния (primary distance indicator). Первичность индикатора расстояния означает, что определение расстояния до него не требует предварительной калибровки стандартной свечи и опоры на лестницу космологических расстояний. Исторически идея этого метода была предложена Бааде для измерения расстояния до цефеид, и метод получил название “метод расширяющихся фотосфер” (EPM – Expanding Photosphere Method).

Возможность измерять расстояния прямым способом на космологических масштабах, простота идеи и отсутствие необходимости в сложных радиационно-гидродинамических расчётах для каждой сверхновой способствовало росту привлекательности данного метода. В 90-х годах методом EPM были получены расстояния до целого ряда SN IIP с последующим вычислением космологических величин, таких как постоянная Хаббла  $H$ . Метод EPM работал, был достигнут большой успех в его применении и ожидалось, что в скором времени с его помощью можно будет составить детальную космографию Вселенной.

В 1999 году вспыхнула SN 1999em. Она была достаточно близка и ярка, чтобы привлечь к себе внимание астрономов, став после SN 1987A второй по популярности SN IIP. Полученные подробные кривые блеска и детальные спектры позволили сразу двум группам учёных почти одновременно и независимо друг от друга вычислить расстояние до сверхновой методом EPM. Группа Хамуи получила значение  $8.2 \pm 0.6$  Мпк, а группа под руководством Леонарда значение  $7.5 \pm 0.5$  Мпк. EPM расстояния были близки друг другу и к тому же прекрасно совпадали со значением  $7.8 \pm 1.0$ , определённое методом точки верхнего обрыва ветви красных гигантов (TRGB – Tip of the Red-Giant Branch).

Однако в 2003 году были получены результаты, ставящие под сомнение EPM расстояния до SN 1999em, а значит, и точность работы метода EPM. Надёжин даёт до SN 1999em расстояние  $11.1 \pm 2.2$  Мпк, определённое по корреляции между энергией взрыва и массой синтезированного  $^{56}\text{Ni}$ . В том же году Леонард по цефеидам определяет расстояние  $11.7 \pm 1.0$  Мпк до родительской галактики NGC 1637, в которой вспыхнула SN 1999em. В сле-

дующем году Барон, используя метод воспроизведения спектров расширяющихся атмосфер (SEAM – Spectral-fitting Expanding Atmosphere Method) — улучшенный вариант метода ЕРМ, избегающий предположения о чернотельном характере спектра сверхновой, — определил расстояние до SN 1999em в  $12.5 \pm 1.8$  Мпк.

Разные методы давали расстояния в двух характерных масштабах: коротком и длинном. Для короткого масштаба значение расстояния до SN 1999em группировалось около 8 Мпк, а для длинного — около 12 Мпк. Причем расстояния по ЕРМ методу тоже разделились на две группы: одна половина ближе к короткому масштабу, а другая к длинному. Такой разлад в работе ЕРМ не позволял надеяться на надежную работу метода по определению расстояний во Вселенной. Необходимо было провести исследование возможных причин такого расхождения для метода ЕРМ. Это исследование является одной из задач настоящей диссертации.

Все ступени лестницы космологических расстояний, включая самые первые и близкие нам, нуждаются в постоянном тестировании и перепроверке. Хорошей иллюстрацией в необходимости такого постоянного тестирования может служить известная аномалия Hipparcos в определении расстояния до известного рассеянного скопления Плеяды в созвездии Тельца. Большинство методов определения расстояния до Плеяд давало  $D = 132 - 135$  пк, однако результат по измерению параллаксов звезд скопления со спутника Hipparcos дал неожиданно малое расстояние до Плеяд  $D = 118$  пк. Наиболее точный и прямой метод определения расстояний до звезд по измерению параллаксов звезд противоречил всем другим методам. В литературе это расхождение получило специальное название как аномалия расстояний до Плеяд. Только в 2012 году аномалия была, по-видимому, устранена в работе, утверждавшей, что Hipparcos для скоплений дает систематически заниженные расстояния. Совершенно очевидно, что, чем больше прямых способов измерять расстояния во Вселенной, тем выше будет точность лестницы космологических расстояний.

В диссертации развивается новый метод определения расстояния до сверхновых, принадлежащий как раз к прямым методам и не зависящий от лестницы космологических расстояний. Метод, предложенный Блинниковым С.И., Баклановым П.В., Поташовым М.Ш., Долговым А.Д., основан на наблюдении и определении линейных размеров расширяющейся плотной

оболочки (Dense Shell, DS) в SN II<sub>n</sub>. Играющая ключевую роль плотная оболочка дала название методу: “DSM” (аббревиатура от Dense Shell Method).

## **Цель работы**

Диссертация включает постановку и решение следующих задач, направленных на исследование сверхновых и методов определения расстояний:

1. Построение радиационно-гидродинамических моделей, хорошо воспроизводящих наблюдаемые кривые блеска и скорости разлета SN II<sub>P</sub> и SN II<sub>n</sub>.
2. Оценка влияния и предложение способа расчёта неЛТР эффектов в оболочках SN II.
3. Определение границ применимости метода ЕРМ и анализ возможных причин, приводящих к ошибкам метода, и уточнение расстояния до SN II<sub>P</sub>.
4. Формализация алгоритма расчёта расстояния до SN II<sub>n</sub> методом плотного слоя (DSM) и создание программы, способной по наблюдательным данным вычислить расстояние в рамках чернотельной модели.
5. Подтверждение в радиационно-гидродинамическом расчёте выполнения в SN II<sub>n</sub> условий для применения DSM.
6. Проверка работоспособности метода при сильных модельных ограничениях в виде условий ЛТР путем сравнения ЛТР модели с более точным неЛТР расчётом.
7. Получение расстояний до сверхновых новым методом DSM.

## **Научная новизна**

1. Разработан алгоритм решения уравнения состояния вещества и включения его в многогрупповой перенос излучения в предположении доминирования радиационных процессов над столкновительными.



2. На примере SN 1999em показана неточность корреляционных формул для фактора дилуции, приводящая к существенным ошибкам в EPM методе определения расстояний до SN IIP. Предложен способ более точного вычисления фактора дилуции путем радиационно-гидродинамического моделирования и использования каталога сверхновых.
3. В диссертации исследуется новый перспективный метод DSM, позволяющий прямым способом измерять расстояния до SN II<sub>n</sub>. Показано, что метод DSM даёт хорошие результаты для простой доступной наблюдателям чёрнотельной модели.
4. Методом DSM получены расстояния до сверхновых SN 2006gy, SN 2009ip и SN 2010jl. Полученные значения прекрасно согласуются с известными ранее расстояниями до родительских галактик, что подтверждает работоспособность метода.

## **Научная и практическая ценность работы**

Разработанные алгоритмы по учёту неЛТР эффектов при неравновесном взаимодействии излучения с веществом позволяют более корректно, чем в предыдущих работах, описать перенос излучения в сверхновых, что, в частности, позволяет проверять точность методов определения расстояний до SN II.

Разработанные программы можно применять для определения прямыми методами расстояний до сверхновых. Даны инструкции по использованию нового метода плотного слоя (DSM) на практике, и показан рабочий пример его применения.

## **Материалы и методы**

Наблюдательный материал (кривые блеска, спектры и другие данные для изучаемых SN II), а также модельные расчёты для SN Ia были взяты из статей, опубликованных в научных изданиях. Основным методом исследования, применявшимся для обоснования полученных результатов, было численное радиационно-гидродинамическое моделирование разлета газовых оболочек

предсверхновых в результате выделения энергии в околоцентральной области звезды.

Кроме того, исследовались методы для определения расстояний до SN II: метод расширяющихся фотосфер (ERM) и метод плотного слоя (DSM).

## Основные результаты, выносимые на защиту

1. В результате детальных расчётов получены значения параметров предсверхновой SN 1999em, значительно отличающиеся от значений, вычисленных по корреляционным формулам. Это говорит о том, что для получения параметров SN II необходимо моделировать кривые блеска во всех фильтрах, а также скорость на уровне фотосферы, перебирая большой набор модельных предсверхновых и добиваясь максимального согласия с наблюдениями.
2. Подтверждено, что в процессе эволюции взрыва над фотосферой сверхновых II типа возникают условия доминирования радиационных процессов над столкновительными. Разработан алгоритм решения уравнения состояния вещества в условиях неЛТР в предположении доминирования радиационных процессов над столкновительными.
3. В короткой и длинной шкале расстояний до SN 1999em определены параметры предсверхновой. Для короткой шкалы при  $D = 7.5$  Мпк предсверхновая имела начальный радиус  $R = 450R_{\odot}$ , полную массу  $M = 15M_{\odot}$ , энергию взрыва  $E = 7 \cdot 10^{50}$  эрг;  $UBV$ -потoki лучше согласуются с наблюдениями при низкой металличности предсверхновой  $Z = 0.004$ . Для длинной шкалы расстояний в  $D = 12$  Мпк требуется увеличить  $R, M, E$  предсверхновой до следующих значений:  $R = 1000R_{\odot}$ ,  $M = 18M_{\odot}$  и  $E = 1 \cdot 10^{51}$  эрг.
4. На основе модели SN 1999em проверены факторы дилуции, обычно применяемые в методе ERM и рассчитанные на основе корреляции между цветовой температурой и фактором дилуции. Подобно параметрам предсверхновых, корреляционные факторы дилуции значительно отличаются от более точных, полученных в результате детального моделирования. Фактор дилуции оказывается систематически больше корреляционных примерно на 25%, что непосредственно влияет на

оценку расстояния до сверхновой. Ясно, что для точного определения расстояния методом ЕРМ необходимо делать расчёт радиационно-гидродинамической модели для каждой исследуемой сверхновой.

5. Выполнено исследование пределов обнаружения SN IIP современными телескопами 8-метрового класса. Расчёты яркости сверхновой в фильтре  $B$  в эпоху выхода ударной волны показали, что современные телескопы с зеркалом  $\geq 8$  метров позволяют открывать и исследовать SN IIP на красном смещении  $z \sim 1$ .
6. В расчёт коэффициента непрозрачности добавлен неучтенный ранее эффект фотоионизации с внутренних атомных оболочек. Показано, что учет данного эффекта слегка сказывается на коротковолновой части спектра и наиболее существенен в первые дни развития сверхновой. Однако при свертке спектра с широкополосной фотометрией различия нивелируются и не влияют на кривые блеска SN II в фильтрах UBVR<sub>I</sub>, а значит, не вносят корректив в методы определения расстояний по сверхновым.
7. Автор формализовал и написал первую программную реализацию расчёта расстояний новым методом космографии DSM (Dense Shell Method), применив данный метод к SN 2006gy. В совместной работе с коллегами методом DSM получены расстояния до сверхновых SN 2006gy, SN 2009ip и SN 2010jl. Полученные значения прекрасно согласуются с известными ранее расстояниями до родительских галактик, что подтверждает работоспособность метода.
8. В основе метода DSM лежит идея о формировании истинной фотосферы в плотном слое и движении фотосферы вместе с этим слоем. Для простых оценок расстояний на основе наблюдательных данных в методе DSM используется чернотельное описание спектра, основанное на модели сверхновой в ЛТР приближении. Для проверки корректности использования такой модели была построена неЛТР модель с безударным уравнением состояния. Показано, что смещение плотного слоя по радиусу относительно ЛТР случая в такой модели невелико и не зависит от времени. Следовательно, это не сказывается на результатах DSM, для которого важно изменение радиуса слоя. Также учёт процессов неЛТР практически не изменяет светимость и температуру вещества в слое.

Отсюда сделан вывод, что метод DSM даёт хорошие результаты и для простой чернотельной модели.

### **Апробация работы**

Полученные в исследовании результаты докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах:

1. Расширенный семинар ИКИ “Актуальные направления исследований по астрофизике высоких энергий” (Москва, ИКИ, 05.2009).
2. Конференция “Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра” (Москва, ИКИ, 21-24 декабря 2009 г.).
3. Конференция “Particle Physics and Cosmology”, 22nd Rencontres de Blois (Blois, France, 15-20th July 2010).
4. Конференция “Новейшие методы исследования космических объектов” (Казань, КГУ, 7-10.10.2010).
5. Международное совещание “Heavy elements in galactic chemical evolution and NLTE effects” (Odessa, Ukraine, 31.08.2011).
6. Расширенный семинар ИКИ “Магнитоплазменные процессы в релятивистской астрофизике” (Москва, ИКИ, 01.2013).
7. Международное совещание “Heavy elements nucleosynthesis and galactic chemical evolution” (Moscow, ITCR, 09.09.2013).

### **Публикации автора**

По теме диссертации опубликовано 7 статей в научных рецензируемых журналах, входящих в список ВАК (см. стр. 18 в конце автореферата).

## Личный вклад автора

Автор внес определяющий вклад в работу по моделированию SN II и исследованию применимости EPM метода [1]. В работах с японскими коллегами [2–4] расчёты и графики были выполнены Томинагой Н. и Морией Т. на основе модификаций кода STELLA, разработанных автором.

Автор разработал и реализовал алгоритмы учёта неравновесного излучения в безударном приближении в уравнениях состояния и переноса излучения, а также способ расчёта непрозрачности при флюоресценции.

Автор создал первую программную реализацию вычисления расстояния методом DSM, показавшую работоспособность метода. Поташов М.Ш. переписал программу, существенно улучшив качество и точность работы метода, позволившие выполнить определение расстояний до трех сверхновых в работах [5–7] (в этих статьях вклад авторов равный). Обоснование для применения в Главе 4 безударного приближения выполнено с использованием кода LEVELS, разработанного Поташовым М.Ш.

Автор создал систему каталогов на серверах ИТЭФ и разработал веб-интерфейс для доступа к наблюдениям сверхновых и теоретическим расчётам. Совместно с Павлюком Н.Н.(ГАИШ) разработана программа автоматического фитирования кривых блеска сверхновых.

## Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и трех приложений. Полный объем диссертации составляет 104 страницы с 36 рисунками и 7 таблицами. Список литературы содержит 142 наименования.

## 2 Краткое содержание диссертации

Во **Введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, показаны трудности, возникающие при определении расстояний до SN II существующими методами, формулируются цели и ставятся задачи работы, оценивается научная новизна и практическая значимость представляемой работы. В конце введения кратко изложено содержание глав диссертации.

## Глава 1. Сверхновые

В главе 1 определяется астрономическая классификация сверхновых, и кратко дается описание возможных источников энерговыделения в сверхновых, вызывающих взрыв и разлет оболочки звезды. Приводятся аргументы о возможности сферизации взрыва в массивной оболочке, и обсуждаются некоторые численные способы расчёта эволюции оболочек сверхновых. Выполнено сравнение между численными схемами расчёта сверхновых методами Монте-Карло и методами прямого интегрирования системы уравнений. Приведен краткий обзор подобных расчётов, развиваемых в разных научных группах.

## Глава 2. Радиационно-гидродинамическая модель сверхновой и неЛТР эффекты

В Главе 2 представлена используемая в диссертации радиационно-гидродинамическая модель SN II, и выписаны уравнения, позволяющие рассчитывать эволюцию сверхновой для различных начальных конфигураций предсверхновых.

Далее проводится исследование условий выполнения и нарушения приближения Локального Термодинамического Равновесия (ЛТР). При найденных условиях обосновывается применимость модифицированного небулярного приближения для учета в уравнении состояния влияния неравновесного излучения (эффекты неЛТР), и разработан алгоритм по включению нового уравнения состояния в уравнения переноса излучения. На основе развитого аппарата были сделаны расчёты модели W7 (для сверхновых типа Ia), и выполнено сравнение с результатами независимой работы, использующей такое же приближение для описания неЛТР, но с совершенно другим решателем задачи переноса излучения (на основе Монте-Карло). Несмотря на полную автономность в разработке программных алгоритмов, сравнение результатов расчётов показало хорошее согласие друг с другом. Это позволяет доверять проводимым расчётам и использовать новое уравнение состояния, как это сделано в Главе 4.

В уравнение переноса излучения при расчёте непрозрачности добавлен неучтенный ранее эффект фотоионизации с внутренних атомных оболочек. Расчёт сечений фотоионизации выполнялся согласно аппроксимирующей процедуре Вернера. Для ионизации с внутренних атомных оболочек нужны

высокие температуры и высокоэнергичные фотоны. Такие условия в сверхновых достигаются на этапе начальной стадии прохождения ударной волны по оболочке. Было показано, что учет данного эффекта слегка сказывается на коротковолновой части спектра и наиболее существенен в первые дни после вспышки сверхновой. Однако при свертке спектра с широкополосной фотометрией различия нивелируются и не влияют на кривые блеска SN II в фильтрах UBVRI, а значит, не вносят корректив в методы определения расстояний по сверхновым.

### Глава 3. Метод расширяющихся фотосфер и SN IIP

В Главе 3 в результате радиационно-гидродинамического моделирования и подбора подходящей модели были получены значения параметров предсверхновой SN 1999em, значительно отличающиеся от значений, вычисленных ранее по корреляционным формулам. Это говорит о том, что при учете более богатой физики при расчётах сверхновых корреляционные формулы перестают выполняться, и для получения параметров SN IIP необходимо моделировать кривые блеска во всех фильтрах, а также скорости на уровне фотосферы, перебирая большой набор модельных предсверхновых и добиваясь максимального согласия с наблюдениями.

В короткой и длинной шкале расстояний до SN 1999em определены параметры предсверхновой. Для короткой шкалы при  $D = 7.5$  Мпк предсверхновая имела начальный радиус  $R = 450R_{\odot}$ , полную массу  $M = 15M_{\odot}$ , энергию взрыва  $E = 7 \times 10^{50}$  эрг; *UBV*-потoki лучше согласуются с наблюдениями при низкой металличности предсверхновой  $Z = 0.004$ . Для длинной шкалы расстояний в  $D = 12$  Мпк требуется увеличить  $R$ ,  $M$ ,  $E$  предсверхновой до следующих значений:  $R = 1000R_{\odot}$ ,  $M = 18M_{\odot}$  и  $E = 10^{51}$  эрг.

На основе модели SN 1999em проверены факторы диллюции, обычно применяемые в методе ЕРМ и рассчитанные на основе корреляции между цветовой температурой и фактором диллюции. Подобно параметрам предсверхновых, корреляционные факторы диллюции значительно отличаются от более точных, полученных в результате детального моделирования. Фактор диллюции оказывается систематически больше корреляционных примерно на 25%, что непосредственно влияет на оценку расстояния до сверхновой. Отсюда следует, что для точного определения расстояния методом ЕРМ необходимо делать расчёт радиационно-гидродинамической модели для каждой исследуемой сверхновой.

Для упрощения задачи по подбору подходящей модели для исследуемой SN IIP предлагается использовать заранее просчитанную сетку моделей SN IIP, доступную в каталоге по адресу <http://dau.itep.ru/sn/snview>. Каталог содержит инструмент, позволяющий в автоматическом режиме подобрать по наблюдавшейся кривой блеска подходящую модель.

Кроме того, выполнено исследование пределов обнаружения SN IIP современными телескопами. Для этого была построена модель для SNLS-04D2dc и выполнена оценка яркости сверхновой в фильтре В в момент выхода ударной волны. Расчёт показал, что современные телескопы с зеркалом  $\geq 8$  метров позволяют открывать и исследовать SN IIP на красном смещении  $z \sim 1$ .

## Глава 4. Метод плотного слоя и SN IIn

В Главе 4 исследуется наш новый метод определения расстояний по сверхновым, который, наряду с EPM и SEAM, принадлежит к группе методов, позволяющих использовать сверхновые как первичные индикаторы расстояний (primary distance indicators) без процедуры стандартизации свечи и нужды в лестнице космологических расстояний. В этом методе должны использоваться сверхновые типа IIn наивысшей светимости, которые в последние годы стали не только активно открывать, но и детально исследовать. Метод предлагается называть DSM (Dense Shell Method), так как светимость SN IIn обусловлена распространением тонкого плотного слоя в окружающей среде.

В основе метода DSM лежит построение радиационно-гидродинамической модели сверхновой. Формирование истинной фотосферы в плотном слое и движение фотосферы вместе с этим слоем может зависеть от типа выбранной модели. Для простых оценок расстояний на основе наблюдательных данных нами используется чернотельная модель на стадии роста светового потока сверхновой.

Для проверки корректности использования такой простой модели построена безударная неЛТП модель. Показано, что смещение плотного слоя по радиусу в такой модели невелико и не меняется со временем. Следовательно, оно не сказывается на результатах DSM, для которого важно изменение радиуса слоя. Также учёт процессов неЛТП практически не изменяет светимость и температуру вещества в слое. Поэтому сделан вывод, что метод DSM даёт хорошие результаты и для простой чернотельной модели на стадии роста светового потока сверхновой.



Обоснованность безударного (небулярного) приближения в наших условиях для неЛТР модели подтверждается оценкой малой значимости роли ударных процессов с помощью программного пакета LEVELS, который позволяет рассчитывать населенности уровней всех атомов и ионов в полной кинетической схеме, где поле излучения в линиях описывается в приближении Соболева.

Применяя метод DSM для сверхновых SN 2006gy, SN 2009ip и SN 2010jl, мы получили расстояния, прекрасно согласующиеся с известными ранее расстояниями до родительских галактик.

В **Заключении** изложены основные результаты, полученные в ходе работы, а также формулируются задачи для дальнейшего исследования.

## **Приложение А. Численный метод расчёта моделей сверхновых**

Это приложение дает краткий обзор алгоритмов, заложенных в программу STELLA и позволяющих рассчитывать эволюционные модели сверхновых. Блок-схема программы STELLA демонстрирует базовый алгоритм работы STELLA. Ключевым этапом в блок-схеме является цикл по времени, в котором происходит развитие эволюции сверхновой.

Во втором разделе приложения рассматривается численный метод Гира, позволяющий решить систему радиационно-гидродинамических уравнений, описывающих динамику сверхновой и подробно рассмотренных в Главе 2. Полученное решение позволяет продвинуться на один шаг по времени  $t = t + \delta t$  в главном цикле STELLA.

## **Приложение В. Каталог сверхновых**

В приложении В дано описание разработанной системы каталогов сверхновых, развернутых на базе серверов ИТЭФ. База данных каталога кривых блеска сверхновых, заполняемая сотрудниками ГАИШ, содержит данные о 4863 наблюдаемых сверхновых.

Создан каталог теоретических моделей сверхновых, рассчитанных для различных начальных конфигураций предсверхновых. Число теоретических моделей в каталоге составляет 36. Сетка моделей охватывает диапазон масс предсверхновых от  $5 M_{\odot}$  до  $18 M_{\odot}$ , радиусов предсверхновых от  $50 R_{\odot}$  до  $1000 R_{\odot}$ , энерговыделения при взрыве от  $5 \times 10^{50}$  эрг до  $2 \times 10^{51}$  эрг.

На сайте каталога сверхновых разрабатывается программа автоматического поиска ближайших теоретических кривых блеска для данной наблюдаемой кривой в случае, когда кривые рассматриваются в одной полосе. Предварительные тесты программы, выполненные на кривых блеска SN 1999em, SN 2008ax, SN 1993J, SN 1987A и SN 2008iy, показали хорошие результаты. Так, для SN 1999em алгоритм определил среди всех моделей наиболее подходящую как `cat_R500_M15_Ni004_E7`, что близко к нашему результату в Главе 3.

Адрес сайта <http://dau.itep.ru/sn/>.

## Приложение С. Флюоресценция

В приложении С дан анализ важного процесса перераспределения радиационной энергии по спектру, обусловленного флюоресценцией. Сейчас в наших расчётах этот эффект учитывается в очень грубом приближении через термализацию фотонов. Для учёта флюоресценции в уравнении переноса необходимо включить дополнительные члены, учитывающие переизлучение на отличной от исходной частоте:

$$\eta_\nu = \chi_{\text{scat}} J_\nu + \chi_{\text{abs}}^k B_{\nu_k} + \sum_{k'} \chi_{\text{fluor}}^{k',k} J_{\nu_{k'}} , \quad (1)$$

где  $\chi_{\text{fluor}}^{k',k}$  — непрозрачность, определяющая долю излучения, поглощенного в бине частоты  $k$  и переизлученного в бине  $k'$ .

В приложении показан способ вычисления  $\chi_{\text{fluor}}^{k',k}$ , и проведен расчёт для солнечного состава вещества. Построенная в осях  $k$  и  $k'$  диаграмма 1 отражает характер перераспределения излучения и наглядно демонстрирует известный эффект флюоресценции по переработке ультрафиолетового излучения в видимый и инфракрасный диапазоны длин волн.

Достигнутый результат позволит в будущем исключить грубое приближение о полной термализации фотонов и включить прямой расчёт эффектов флюоресценции в уравнения переноса излучения.

## Публикации автора по теме диссертации

1. Бакланов П. В., Блинников С. И., Павлюк Н. Н. Параметры классической сверхновой типа IIР SN 1999em // Письма в Астрон. Журнал. 2005. Т. 31. С. 429–441.

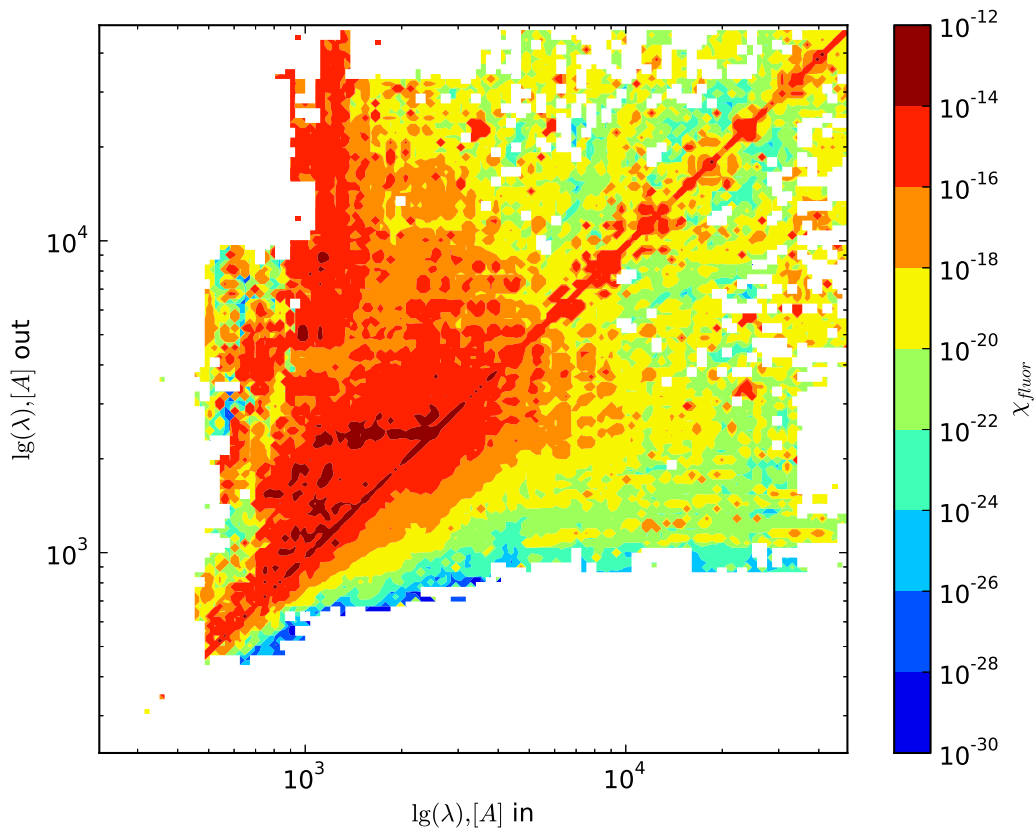


Рис. 1: Непрозрачность  $\chi_{\text{fluor}}^{k,k'}$  для солнечного состава при  $T = 5 \times 10^3 \text{K}$  и  $\rho = 10^{-12} \text{ г/см}^3$ . По оси абсцисс отложена длина волны для входящего бина по частоте  $k$ , по оси ординат – длина волны для исходящего бина по частоте  $k'$ , цветом кодируется значение  $\chi_{\text{fluor}}^{k,k'}$ .

2. Properties of Type II Plateau Supernova SNLS-04D2dc: Multicolor Light Curves of Shock Breakout and Plateau / N. Tominaga, S. Blinnikov, P. Baklanov [и др.] // *Astrophysical Journal Letters*. 2009. ноябрь. Т. 705. С. L10–L14.
3. Shock Breakout in Type II Plateau Supernovae: Prospects for High-Redshift Supernova Surveys / N. Tominaga, S. I. Blinnikov, P. Baklanov [и др.] // *Astrophysical Journal Supplement Series*. 2011. Т. 193. с. 20.
4. Synthetic light curves of shocked dense circumstellar shells / T. J. Moriya, S. I. Blinnikov, P. V. Baklanov [и др.] // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2013. Т. 430. С. 1402–1407.
5. Изучение сверхновых, важных для космологии / П. В. Бакланов, С. И. Блинников, М. Ш. Поташов [и др.] // *Письма в ЖЭТФ*. 2013. октябрь. Т. 98. С. 489–496.
6. Direct determination of the hubble parameter using type II<sub>n</sub> supernovae / S. Blinnikov, M. Potashov, P. Baklanov [и др.] // *Письма в ЖЭТФ*. 2012. октябрь. Т. 96. С. 167–171.
7. Direct distance measurements to SN 2009ip / M. Potashov, S. Blinnikov, P. Baklanov [и др.] // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2013. Т. 431. С. L98–L101.