

Федеральное Государственное Унитарное Предприятие
Государственный Научный Центр Российской Федерации
Институт Теоретической и Экспериментальной Физики
им. А.И.Алиханова

На правах рукописи

Толстов Алексей Геннадьевич

**Перенос излучения
при релятивистских скоростях выброса
в сверхновых и гамма-всплесках**

Специальности: 01.04.02 - Теоретическая физика,
01.03.02 - Астрофизика и звездная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2010 г.

УДК 524.35

Работа выполнена в ФГУП ГНЦ РФ Институт Теоретической и Экспериментальной Физики, г. Москва.

Научный руководитель: доктор физ.-мат. наук С. И. Блишников
(ГНЦ РФ ИТЭФ, г. Москва)

Официальные оппоненты: доктор физ.-мат. наук,
профессор К. А. Постнов
(ГАИШ МГУ, г. Москва)

доктор физ.-мат. наук Ю. А. Фадеев
(Институт Астрономии РАН, г. Москва)

Ведущая организация: СПбГУ, г. Санкт-Петербург

Защита состоится 13 апреля 2010 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д.201.002.01 в конференц-зале ГНЦ РФ ИТЭФ по адресу: г. Москва, ул. Б. Черёмушкинская, 25.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИТЭФ. Также диссертация и автореферат доступны по запросу через электронную почту tolstov@itep.ru

Автореферат разослан 12 марта 2010 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
кандидат физ.-мат. наук

В.В. Васильев

1. Общая характеристика работы

1.1. Актуальность темы

Природа до сих пор скрывает от нас детали механизмов, лежащих в основе кратковременного появления на небе звёзд исключительно большой светимости. Однако развитие астрономии в XX веке позволило не только наблюдать такие звёзды – сверхновые, но и регистрировать их в других галактиках, получать кривые блеска и спектры, классифицировать. Явление сверхновой в большинстве случаев должно начинаться яркой вспышкой, обусловленной выходом ударной волны на поверхность звезды после фазы коллапса или термоядерного взрыва. Детектирование таких вспышек может быть использовано для получения информации об особенностях взрыва и параметров предсверхновой, что необходимо для понимания механизмов, лежащих в основе этого явления.

Превращение кинетической энергии в фотонное излучение является общим свойством взрывных процессов, и именно излучение остаётся практически единственным источником информации о взрывных космических явлениях. Развитие вычислительной техники позволило на новом уровне проводить интерпретацию наблюдательных данных – спектров и кривых блеска. От этой интерпретации во многом зависит выяснение природы взрывающихся звёзд, которые до сих пор остаются не до конца изученными.

Одним из активно обсуждаемых остаётся сейчас вопрос о возможной связи сверхновых с другим не менее загадочным явлением в диапазоне гамма-излучения – гамма-всплесками. Результаты наблюдений выявили колоссальную энергетику гамма-всплесков, сравнимую порой с массой Солнца, позволили разработать теоретические модели ореолов (послесвечений) гамма-всплесков и, фактически, удалось приблизиться к пониманию этого явления, хотя механизм выделения такого большого количества энергии в малом объёме до сих пор до конца неизвестен. Одна из самых распро-

странённых моделей ореолов гамма-всплесков состоит в распространении релятивистской оболочки, замедляющейся внешней средой. Релятивистская ударная волна нагревает захваченное вещество, по мере того как оно поступает в оболочку, и приводит к ускорению частиц до ультрарелятивистских энергий. Рентгеновские и оптические ореолы гамма-всплесков в этих моделях связывают с тепловым (синхротронным) излучением релятивистских частиц на фронте “внешней” ударной волны, тормозящейся в околозвёздной или межзвёздной среде. Первично энергия гамма-всплеска может быть и электромагнитной и, по-видимому, распространяется в узком конусе (джете).

Эволюция джета и кривых блеска ореолов широко исследована в литературе, включая и боковое расширение джета, и ‘структурные’ джеты, и 3D численные модели динамики джета, и различные углы наблюдения. Но во всех работах перенос излучения не рассчитывается аккуратно, а основывается на простых допущениях, состоящих либо в рассмотрении степенных участков спектра, либо каких-либо других упрощающих предположениях о характеристиках поля излучения. Такое положение требует развития численных методов учёта многогруппового релятивистского переноса излучения.

Для аккуратного рассмотрения выхода ударной волны на поверхность предсверхновой также необходимо выполнение численных расчётов, в которых помимо гидродинамики должен рассматриваться и перенос излучения, а также учитываться ряд релятивистских эффектов. Так, например, в компактных предсверхновых типа Ib/c ударная волна может достигать около-световых скоростей. Изучение выхода ударной волны на поверхность предсверхновой приобретает особую актуальность в связи с детектированием этого явления аппаратом SWIFT для SN 2008D. Кроме того, обнаружены вспышки в эпоху выхода на поверхность красных сверхгигантов в сверхновых II типа SNLS-04D2dc и SNLS-06D1jd и световое эхо от ударной волны сверхновой Cas A. Свечение самых мощных сверхновых типа SN 2006gy успешнее всего объясняется в моделях, где радиативная ударная волна обеспечивает почти весь поток в течение многих месяцев. Появится также возможность получения новых данных, если на международной космической станции будет установлен детектор LOBSTER.

Из различных подходов для моделирования кривых блеска и спектров в эпоху выхода ударной волны на поверхность сверхновой наиболее полным является использование многогрупповой радиационной гидродинамики, в основе которого лежит моделирование переноса излучения. Численные работы до сих пор делались в очень грубых приближениях: например, использование постоянных эддингтоновских факторов, одnogрупповое (“серое”) приближение, неучёт эффекта расширения в непрозрачности. Более аккуратно физика переноса излучения включена в разработанный программный комплекс STELLA (Static Eddington-factor Low-velocity Level Approximation) (Блишников и др., 2000)¹, который успешно использовался для моделирования кривых блеска ряда сверхновых. Он основан на решении уравнений газовой динамики согласованно с переносом неравновесного излучения с учётом релятивистских поправок первого порядка по скорости. Этот метод хорошо применим для моделей сверхновых II типа, как, например, 1987A и 1993J и сверхновых типа Ia. Однако если ударная волна достигает релятивистских скоростей, то аккуратное моделирование требует решения уравнения переноса при произвольном Лоренц-факторе.

Разработка численного метода решения многогруппового релятивистского уравнения переноса и его применение к задачам расчёта кривых блеска и спектров орелов гамма-всплесков и к задачам расчёта кривых блеска и спектров в эпоху выхода на поверхность предсверхновой, по существу, являются основным содержанием данной диссертационной работы.

1.2. Цель работы

Общая цель работ, включённых в настоящую диссертацию — развитие теории взрывных процессов на поздних стадиях эволюции звёзд. К таким явлениям относятся, например, выход ударной волны на поверхность предсверхновой, разлёт вещества в результате случившегося гамма-всплеска и т.д.

На настоящий момент отсутствуют численные модели, позволяющие рассчитать сценарии, объясняющие вышеуказанные явления, поэтому актуальным становится построение упрощённых моделей для отдельных этапов сценария, способных передать основные свойства изучаемого явления и выявить основные параметры, влияющие на наблюдаемые следствия. При

¹Blinnikov S.I. et al. // *ApJ*, **532**, 1132, 2000.

моделировании этих явлений особенно необходим строгий учёт нестационарности процессов, к важнейшим из которых относится перенос излучения. Построение таких моделей, анализ получаемых результатов и сопоставление результатов с наблюдениями являются основной целью диссертации.

Цель первой части работы – построение численного метода для расчёта многогруппового переноса излучения в средах, движущихся с релятивистскими скоростями, и преобразование потоков излучения к системе отсчёта удалённого наблюдателя.

Цель второй части работы – адаптация и применение разработанного численного метода к расчёту спектров и кривых блеска орёолов гамма-всплесков в моделях со сферически-симметричной геометрией и геометрией джета.

Цель третьей части работы – адаптация и применение разработанного численного метода к расчёту спектров и кривых блеска в эпоху выхода ударной волны на поверхность предсверхновой в моделях типа Ib/c и SN1987A.

1.3. Научная новизна

1. Разработан численный метод расчёта многогруппового релятивистского переноса излучения и исследовано преобразование потоков излучения от сферически-симметричного источника, расширяющегося с релятивистскими скоростями, к системе отсчёта удалённого наблюдателя.

2. Рассчитаны кривые блеска и спектры орёолов гамма-всплесков для удалённого наблюдателя в стандартной модели файерболла с аналитически заданной гидродинамикой и решением задачи переноса излучения с применением разработанного численного метода расчёта переноса излучения.

3. Произведена адаптация разработанного численного метода к решению задач радиационной гидродинамики и рассчитаны кривые блеска для удалённого наблюдателя в эпоху выхода ударной волны на поверхность предсверхновой для моделей типа Ib/c и SN1987A. Таким образом, получена возможность уточнения формы кривых блеска и получения более надёжных данных для анализа результатов будущих космических экспериментов.

1.4. Научная и практическая ценность работы

Работа посвящена теоретической астрофизике с приложением к проблеме переноса излучения, поэтому основная ценность состоит в развитии

новых работоспособных методов расчёта многогруппового релятивистского переноса излучения для взрывных явлений в астрофизике. Расчёты вспышки в эпоху выхода ударной волны на поверхность предсверхновой важны для планируемых космических экспериментов.

В ходе работы создан комплекс программ для решения основной задачи (переноса излучения в релятивистской среде). В него входят программы:

расчёта сферически-симметричного нестационарного переноса в среде, движущейся с большим значением Лоренц-фактора с аналитически заданной гидродинамикой;

расчёта сферически-симметричного нестационарного переноса в среде, движущейся с большим значением Лоренц-фактора,

совместно с численным расчётом гидродинамики; расчёта преобразования потоков излучения к системе отсчёта наблюдателя с учётом запаздывания излучения, абберации и эффекта Доплера.

1.5. Материалы и методы

Основной наблюдательный материал, используемый в диссертации, это опубликованные данные о потоках послесвечений гамма-всплесков и сверхновых в стандартных фильтрах.

Основной метод исследования — построение аналитических и численных моделей явлений переноса излучения (перенос излучения в среде, движущейся с большим значением Лоренц-фактора; распространение излучения от источника к наблюдателю).

1.6. Основные результаты выносимые на защиту

1. Разработан численный метод RADA (Relativistic rADiation transfer Approximation) для решения уравнения переноса излучения в средах, движущихся с релятивистскими скоростями. Метод, основанный на методе характеристик, может быть применён к движению вещества со значением Лоренц-фактора, достигающим 1000; поэтому основным объектом приложения такого метода должны быть ранние фазы расширения оболочек звезд, где эффекты оптической толщины могут быть заметны.

2. Разработан метод расчёта потоков излучения при переходе от системы отсчёта сферически-симметричного источника излучения к системе отсчёта наблюдателя с учётом запаздывания, эффекта Доплера и абберации.

Исследовано влияние преобразования на наблюдаемые спектры и кривые блеска и выполнено сравнение с простейшими аналитическими преобразованиями, обычно используемыми в литературе. Обнаружено, что эффект запаздывания при релятивистском ускорении оболочки проявляется в виде скачков и изломов кривой блеска в точке наблюдения, что существенно для интерпретации наблюдаемых кривых блеска и спектров, например, в эпоху выхода ударной волны на поверхность предсверхновой.

3. Построена численная модель переноса излучения в сильной релятивистской сферически-симметричной ударной волне с аналитически заданной гидродинамикой. В модели рассматривается излучение от вещества за фронтом внешней ударной волны и используется аналитическое решение Блэндфорда и МакКи для описания вещества за фронтом, принимается во внимание реabsорбция синхротронного излучения. Рассчитаны спектры и кривые блеска от электронов со степенным энергетическим спектром в расширяющейся релятивистской ударной волне. Расчёт точно описывает спектры и кривые блеска ореолов в рамках данной модели, устраняя неоднозначность определения характеристических параметров и не используя последующих аппроксимаций. Поведение полученных результатов демонстрирует связь с наблюдаемыми ореолами, что даёт уверенность в возможности применения полученного метода к изучению ранних фаз формирования гамма-излучения (при столкновении 'внутренних' ударных волн).

4. Исследовано влияние геометрии джета на форму кривых блеска и спектры ореолов гамма-всплесков. Исследование основано на численном моделировании ореолов в сферически-симметричной геометрии с помощью геометрического "вырезания" конуса угла α_{lim} и параметризацией угла α_{obs} между осью джета и направлением на наблюдателя. Результаты показывают, что форма спектрального излучения, как при прямом взгляде на джет, так и боковом, часто не может быть аппроксимирована степенным законом, как это часто делается в литературе в полуаналитических расчетах. Поэтому численный расчёт при моделировании ореолов будет приводить к более надёжным интерпретациям явления.

5. Построены численные модели переноса излучения в эпоху выхода ударной волны на поверхность предсверхновых типа Ib/c и типа SN1987A. С помощью программного комплекса STELLA решаются уравнения радиа-

ционной гидродинамики совместно с уравнениями релятивистского переноса излучения, решаемыми программой RADA, и выполняется преобразование потоков в систему отчёта наблюдателя. В качестве начальных данных модели предсверхновой типа Ib/c используются распределения физических величин, полученные в исследованиях эволюции звезды типа Вольфа-Райс. Выбор модели обусловлен тем, что скорость выхода ударной волны в ней достигает значений $\beta \approx 0.6$, при которых релятивистские поправки к переносу излучения становятся значительными. Для расчётов вспышки SN 1987A используется модель предсверхновой, которая хорошо воспроизводит кривую блеска в первые месяцы.

6. Исследовано влияние учета решения релятивистского уравнения переноса излучения в сопутствующей системе координат и геометрических эффектов распространения излучения от сверхновых типа Ib/c и типа SN1987A на наблюдаемые кривые блеска и спектры. Проведённые расчёты моделей сравниваются с расчётами программного комплекса STELLA, учитывающим релятивистские поправки только первого порядка по скорости. Расчёт с использованием программы RADA приводит к изменениям значений наблюдаемых потоков излучения. Для вспышки сверхновой типа Ib/c спектр становится более жёстким, а сам поток более мощным. Помимо этого на кривой блеска появляется излом, обусловленный запаздыванием излучения при релятивистской скорости расширения оболочки звезды. Для модели предсверхновой типа SN1987A скорость движения внешних слоев на порядок меньше и вклад в расчёт алгоритма RADA проявляется, главным образом, в аккуратном учёте запаздывания излучения, что ведёт к уменьшению потока излучения в максимуме и к уширению пика кривой блеска.

7. Обсуждается возможность прогноза детектирования вспышек сверхновых в планируемых космических экспериментах для аппаратов LOBSTER и SWIFT с использованием разработанных методов расчёта выхода ударной волны на поверхность предсверхновой. Наблюдение вспышек сверхновых типа Ib/c и типа 1987A затруднено, поэтому оценка числа зарегистрированных вспышек важна для экспериментов, которые могут ответить на ряд вопросов теории эволюции звезд и теории гиперновых.

1.7. Апробация работы

Результаты работы представлялись на отечественных и международ-

ных конференциях – “Astronomy and beyond: astrophysics, cosmology, astrobiology” The 3th Gamov summer school (Одесса, Украина, 2002), Сессия Отделения ядерной физики Российской Академии Наук (Москва, ИТЭФ, 2002), “Numerical methods for multidimensional radiative transfer problems” (Germany, Heidelberg, 2003), INT Summer School (USA, Seattle, 2004), “20 лет Сверхновой SN 1987A” (Москва, ФИАН, 2007), “Physics of Neutron Stars” (Санкт-Петербург, ИЯИ, 2008), “Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра” (Москва, ИКИ РАН, 2009), а также докладывались на семинарах ИТЭФ (Москва), ИКИ РАН (Москва), Института Астрофизики М.Планка (МРА, Гархинг, Германия).

1.8. Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 3 глав, приложения, заключения и списка литературы. Полный объем диссертации 111 страница, включая 42 рисунка и 1 таблицу. Список литературы насчитывает 153 наименования.

2. Краткое содержание диссертации

В **главе 1** разрабатывается методика решения задачи переноса излучения в оболочках, движущихся с большим значением Лоренц-фактора, и выявляются особенности расчёта распространения излучения от сферически-симметричной расширяющейся с релятивистскими скоростями оболочки к удалённому наблюдателю.

В **параграфе 1.1** рассматривается процесс переноса излучения в рамках специальной теории относительности. Для построения моделей выхода ударной волны на поверхность предсверхновой и ореолов гамма-всплесков обсуждаются возможные пути решения уравнения переноса. В общем случае уравнения радиационной гидродинамики должны рассматриваться в рамках общей теории относительности, однако такой подход довольно громоздок и для изучения интересующих нас явлений порой излишен. Поэтому в нашем исследовании мы останавливаемся на решении уравнения переноса в духе специальной теории относительности. При распространении излучения от источника к наблюдателю важную роль играет численное преобразование потоков излучения при переходе от системы отсчёта сферически-симметричного источника излучения к системе отсчёта удалённого неподвижного наблюдателя с учётом запаздывания, эффекта Доплера и абсера-

ции. Основную роль здесь играет эффект запаздывания, связанный с тем, что излучение от ближних к наблюдателю областей расширяющейся оболочки приходит к наблюдателю раньше, чем от дальних.

В **параграфе 1.2** разрабатывается численный метод для решения многогруппового релятивистского уравнения переноса излучения в сферически-симметричном случае, приводятся ряд аналитических решений для тестирования полученного метода и обсуждаются ограничения области его применимости. Численный расчёт основан на хорошо известном методе характеристик и производится методом Рунге-Кутты четвёртого порядка точности с адаптивным шагом. Сравнение аналитических решений с расчётами, основанными на разработанном численном методе, показывает применимость численного метода к движениям вещества вплоть до значений Лоренц-фактора $\gamma \sim 1000$ с ошибкой менее 1%.

В **параграфе 1.3** рассматривается процесс распространения излучения от расширяющейся сферически-симметричной оболочки, как источника излучения, к удалённому наблюдателю с учётом эффекта запаздывания и выводится выражение для вычисления потока излучения в системе отсчёта наблюдателя. На ряде простых задач показано влияние релятивистской динамики оболочки и резких изменений интенсивности излучения ее поверхности на поток излучения в точке наблюдения.

В **параграфе 1.4** формулируются основные выводы и обсуждается возможное применение разработанного метода для моделирования взрывных процессов и расчёта кривых блеска и спектров. При расчётах кривых блеска и спектров особенно нетривиальные случаи эффекта запаздывания, проявляющиеся в виде скачков потока в точке наблюдения, наблюдаются в процессах, когда скорость вещества оболочки нарастает. Это относится как к постепенному нарастанию скорости оболочки, так и к резким изменениям.

В **главе 2** представлены результаты численных расчётов переноса излучения с угловой, временной и частотной зависимостью при релятивистском движении вещества в моделях ореолов гамма-всплесков сферически-симметричной геометрии и геометрии джета. В расчётах учитывается реabsорбция синхротронного излучения. Спектры и кривые блеска рассчитываются от электронов со степенным энергетическим спектром в расширяющейся релятивистской ударной волне и проводится сравнение с существующими

аналитическими оценками. Качественно обсуждается поведение оптических ореолов GRB 990510 и GRB 000301с.

В параграфе 2.1 формулируется задача о моделировании кривых блеска и спектров ореолов гамма-всплесков. В данной задаче не проводится гидродинамических расчётов, а рассматривается, главным образом, излучение от вещества за фронтом внешней ударной волны и используется аналитическое решение Блэндфора и МакКи² для описания вещества за фронтом, принимается во внимание реabsорбция синхротронного излучения.

В параграфе 2.2 на примере модели фэйрбола для гамма-всплесков рассчитываются спектры и кривые блеска от излучения вещества со степенным энергетическим спектром электронов в расширяющейся релятивистской ударной волне и проводятся сравнения с существующими аналитическими оценками. Численный расчёт спектров и кривых блеска ореолов основан на выборе ряда параметров. Это параметры, определяющие гидродинамику: энергия выделившаяся в результате процесса, приводящего к гамма-всплеску E_0 и плотность внешней среды n_1 . К параметрам, определяющих процесс излучения, относится доля внутренней энергии вещества, содержащаяся в магнитном поле ϵ_B ; доля внутренней энергии вещества, содержащаяся в электронах ϵ_e ; степенной показатель в энергетическом распределении электронов p . В качестве геометрического параметра добавляется фотометрическое расстояние до гамма-всплеска D .

Основной численный расчёт, выполненный в работе, базируется на распространённых в литературе значениях: $E_0 = 10^{53}$ эрг, $n_1 = 1 \text{ см}^{-3}$, $\epsilon_e = 0.5$, $\epsilon_B = 0.1$, $p = 2.5$, $D = 10^{27}$ см. Расчётные спектры и кривые блеска, представленные на рис. 1 и 2, демонстрируют хорошую согласованность с существующими в литературе теоретическими оценками, а при выделении части теоретической кривой блеска вблизи полос R и K “хроматическое” поведение характерно для оптических ореолов GRB 990510 и GRB 000301с.

В параграфе 2.3 производится переход от сферически-симметричной модели фэйрбола к геометрии джета с помощью введения дополнительных параметров: угла джета α_{lim} и угла α_{obs} между осью джета и направлением на наблюдателя. После чего рассчитываются кривые блеска и спектры ореолов и обсуждается их вид под влиянием усложнения геометрии источника

²Blandford R.D., McKee C.F. // Phys. Fluids, **19**, 1130, 1976.

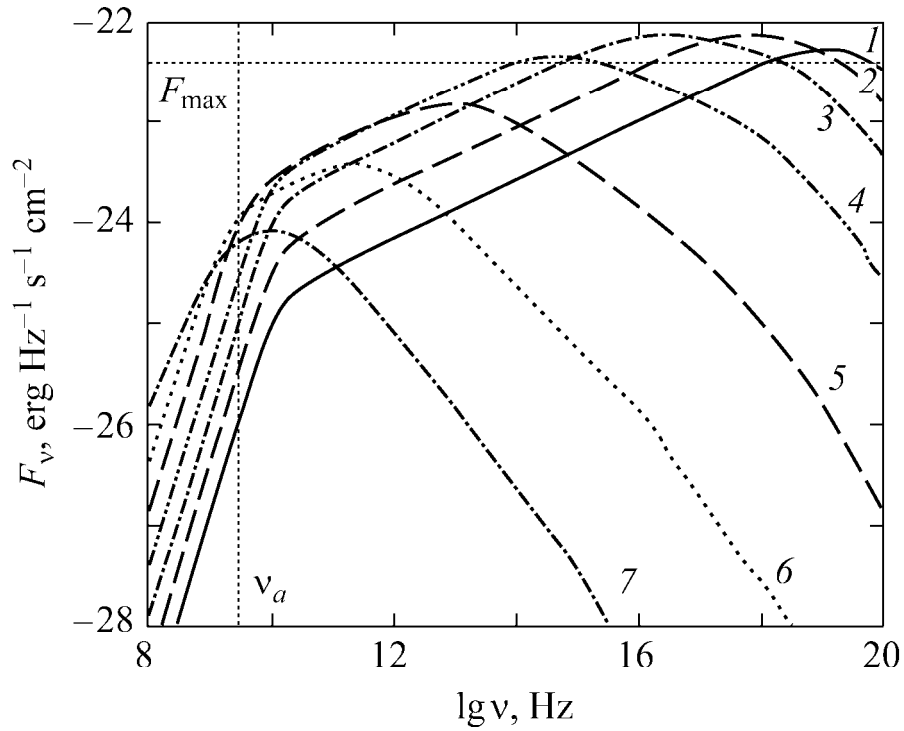


Рис. 1: Мгновенные спектры ореола в различные моменты времени $t = 10^N$ с, где N – число у кривой, F_m , ν_a – аналитические оценки потока и частоты самопоглощения в собственном времени источника

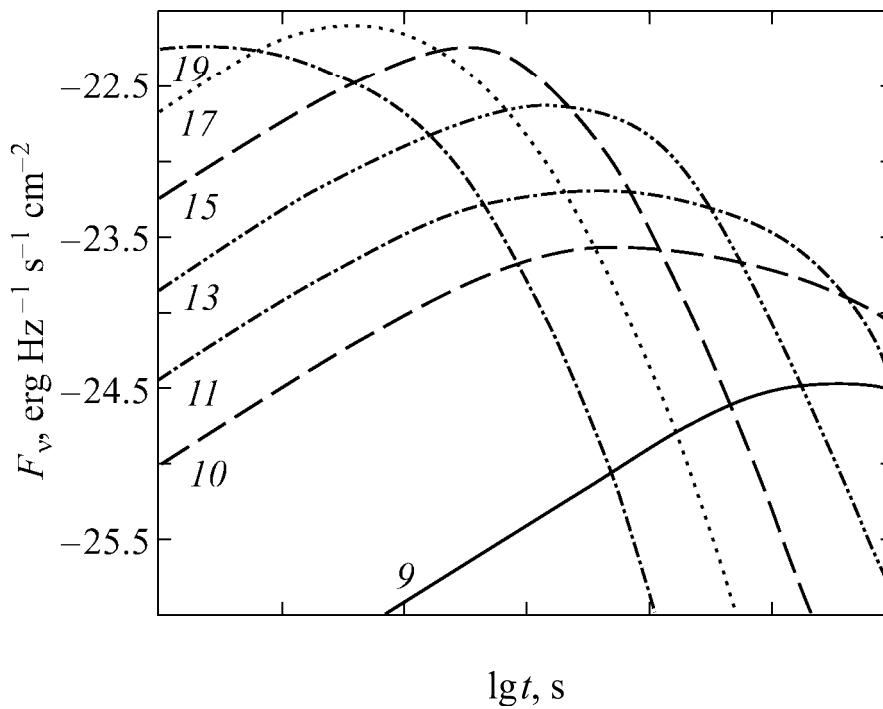


Рис. 2: Кривые блеска ореола при наборе частот $\nu = 10^N$ Гц, где N – число у кривой

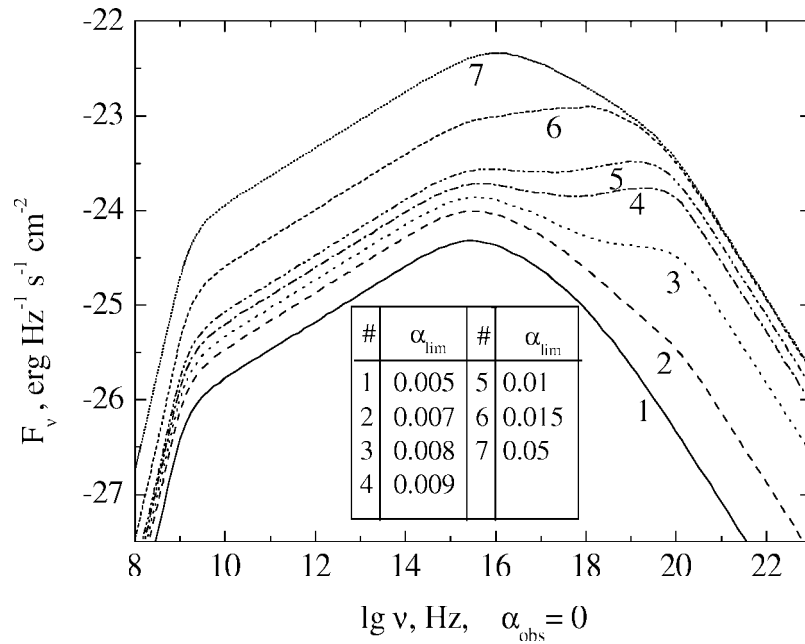


Рис. 3: Мгновенные спектры ореолов в момент наблюдения $t = 10^4$ сек при угле наблюдения $\alpha_{\text{obs}} = 0$ для набора значений угла джета α_{lim}

излучения. Существующие в литературе численные расчёты для подобных моделей основаны на некоторых предположениях об интенсивности на поверхности фронта ударной волны. Форма спектрального излучения обычно аппроксимирована степенным законом с изломами, соответствующими синхротропному излучению. Представленные результаты показывают, что спектры ореолов могут иметь некоторые особенности и их форма отличается от степенной как при прямом взгляде на джет (рис. 3), так и при боковом (рис. 4).

В параграфе 2.4 приводятся основные выводы моделирования ореолов гамма-всплесков, сравниваются различные модели и обсуждается соответствие рассчитанных кривых блеска и спектров ореолов наблюдательным данным. Проведённые расчёты точно описывают спектры и кривые блеска ореолов в рамках данной модели, устраняя неоднозначность определения характеристических параметров, широко применяемых в литературе, где значения характеристических частот в разных работах для одинаковых случаев отличаются иногда в 70 раз.

В главе 3 рассматриваются результаты численного моделирования

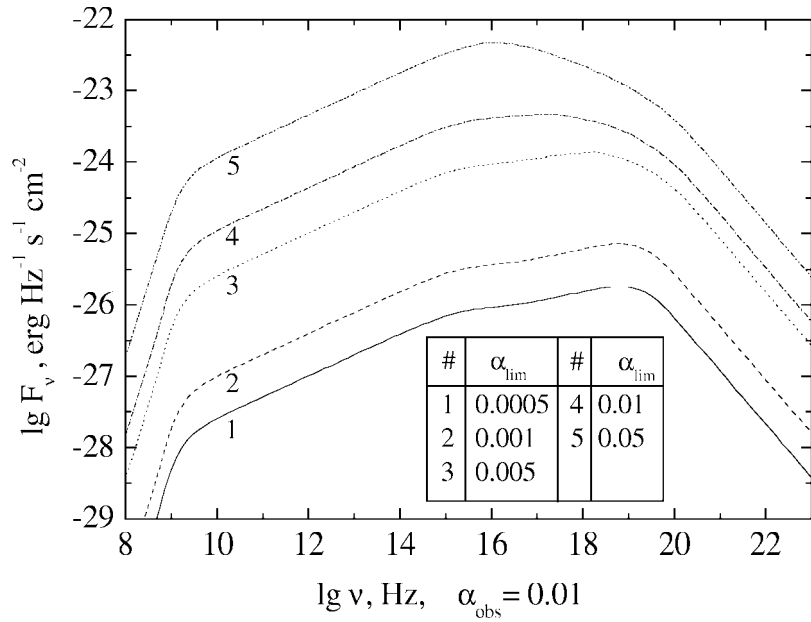


Рис. 4: Мгновенные спектры ореолов в момент наблюдения $t = 10^4$ сек при угле наблюдения $\alpha_{\text{obs}} = 0.01$ для набора значений угла джета α_{lim}

кривых блеска, спектров и влияния эффектов специальной теории относительности в эпоху выхода ударной волны на поверхность предсверхновой. Описан алгоритм программы RADA, используемой при моделировании и обсуждаются перспективы применения полученных результатов численного моделирования для анализа и интерпретации имеющихся и будущих данных космических обсерваторий SWIFT и LOBSTER.

В параграфе 3.1 описывается физико-математическая постановка задачи о выходе ударной волны, рассматривается гидродинамическая модель процесса и обсуждается возможность учёта в расчётах переноса излучения. В качестве одной из моделей предсверхновых в этой главе будет рассматриваться модель 7A, описанная Вусли и др. Выбор модели обусловлен тем, что скорость выхода ударной волны в ней достигает значений $\beta \approx 0.6$. При таких скоростях релятивистские поправки к переносу излучения становятся значительными и применение в расчёте релятивистского уравнения переноса представляет большой интерес. Для расчёта вспышки SN 1987A выбрана модель предсверхновой, построенная в Токийской группе³, хорошо воспро-

³Shigeyama T., Nomoto K. // ApJ, **360**, 242, 1990.

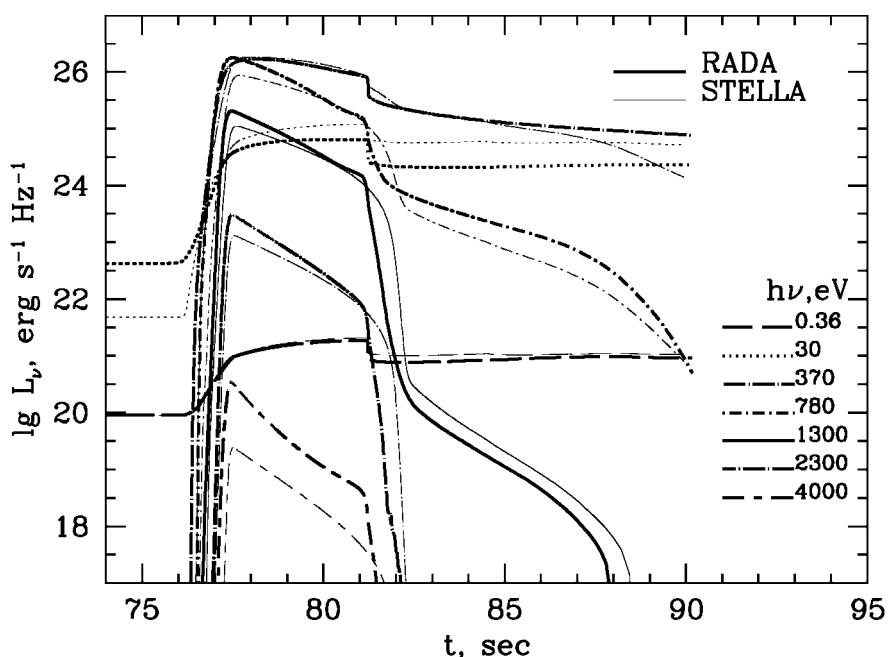


Рис. 5: Сравнение монохроматических кривых блеска в эпоху выхода ударной волны в системе отсчёта наблюдателя для модели предсверхновой типа Ib/c. Между 81-й и 82-й секундами наблюдается излом (резкий спад) кривой блеска, обусловленный релятивистским эффектом запаздывания. Тонкая линия – расчёт STELLA с учётом эффекта запаздывания, жирная – RADA

изводящая кривую блеска в первые месяцы. Для расчёта всплеск выхода ударной волны используется программный комплекс STELLA, модифицированный методом расчёта переноса излучения RADA.

В параграфе 3.2 описан численный алгоритм программы RADA адаптированный для совместного решения релятивистского уравнения переноса сопутствующей системе координат с гидродинамическими уравнениями на разностной сетке. Рассматриваются начальные и граничные условия задачи, приведён алгоритм решения интегро-дифференциального уравнения переноса и расчёта интенсивности излучения с использованием ряда аналитических решений уравнения переноса внутри сетки, описывается метод учёта всех источников непрозрачности в движущейся среде используемый программным комплексом STELLA.

В параграфе 3.3 приводятся результаты расчёта кривых блеска и спектров для моделей предсверхновых типа Ib/c и SN1987A.

На рис. 5 и 6 представлены результаты сравнения расчетов кривых

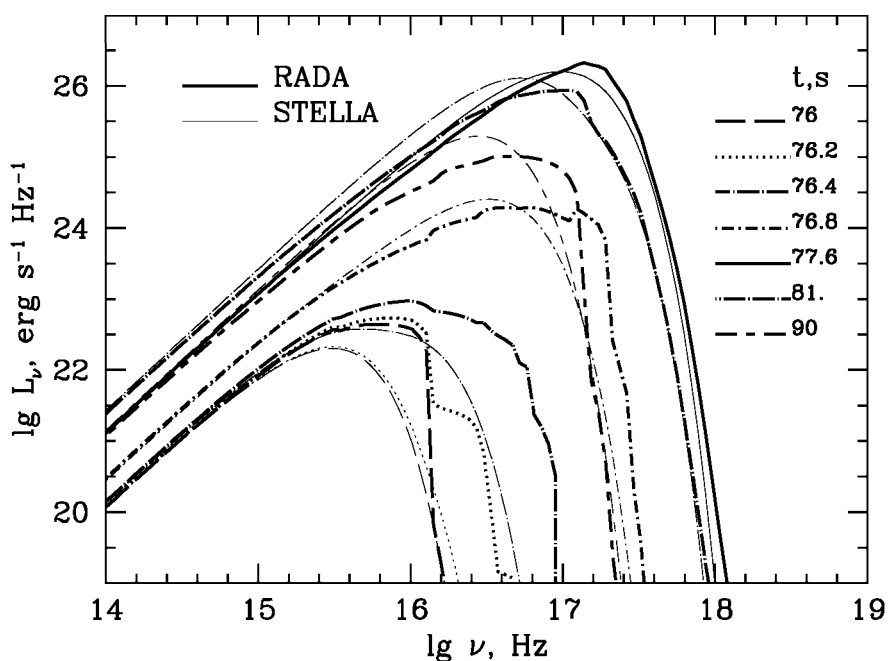


Рис. 6: Сравнение мгновенных спектров для различных моментов времени t в эпоху выхода ударной волны в системе отсчёта наблюдателя для модели предсверхновой типа Ib/c. Тонкая линия — расчёт STELLA с учётом эффекта запаздывания, жирная — RADA, одинаковая штриховка линий соответствует одинаковым моментам времени t

блеска и спектров модели 7A. Из расчётных данных видно, что учёт эффекта запаздывания, а также строгий учёт релятивистского переноса излучения влияют на форму кривой блеска, делая спектр более жёстким, а сам поток более мощным. Помимо этого на кривой блеска появляется излом (резкий спад), связанный с тем, что внешние слои звезды после вспышки начинают двигаться и вследствие большой скорости движения могут геометрически затмить излучение вспышки от края звезды для некоторых моментов времени в удалённой точке наблюдения. На рис. 7 представлено сравнение расчётов болометрических кривых блеска модели 14E1shba⁴ предсверхновой SN1987A. В отличие от рассмотренной выше модели предсверхновой типа Ib/c, скорость движения внешних слоев здесь на порядок меньше и вклад в расчёт алгоритма RADA проявляется главным образом в аккуратном учёте запаздывания излучения, что ведёт к уменьшению потока излучения в максимуме и к уширению пика кривой блеска.

В параграфе 3.4 формулируются основные выводы и обсуждается

⁴Blinnikov S.I. et al. // ApJ, **532**, 1132, 2000.

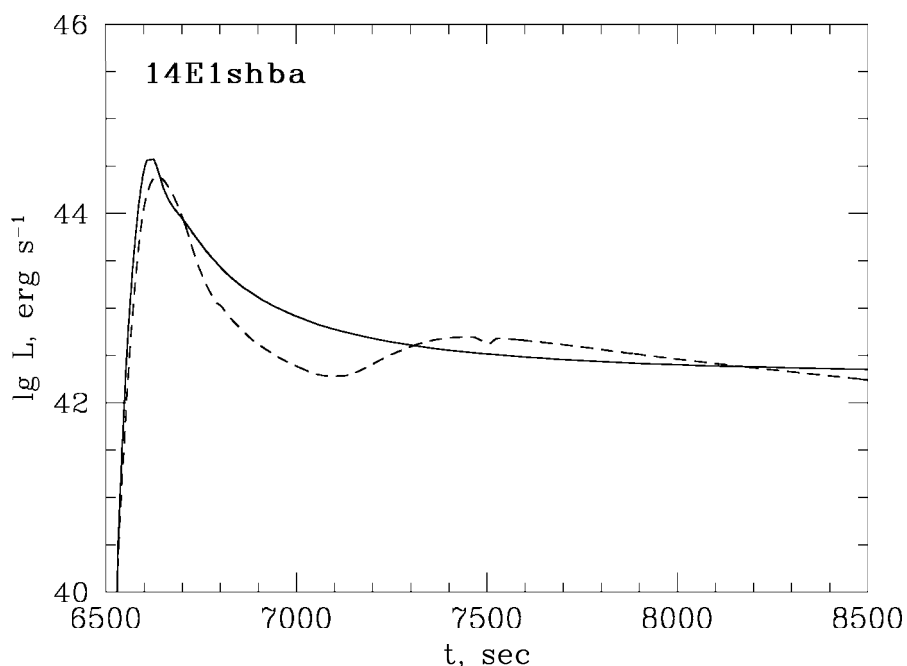


Рис. 7: Сравнение болометрических кривых блеска в эпоху выхода ударной волны в системе отсчёта наблюдателя для модели предсверхновой типа SN1987A. Сплошная линия – расчёт STELLA, штриховая – RADA

возможность использования полученных данных для интерпретации существующих и будущих экспериментов по детектированию вспышек. Одним из таких экспериментов является проект LOBSTER. Характеристики аппарата способствуют в большей степени обнаружению вспышек от предсверхновых, являющихся красными и голубыми гигантами. Для звезд Вольфа-Райе оценка по детектированию⁵, даёт значение в несколько вспышек в год с максимального расстояния 50 Мпк. Для событий в нашей галактике спектр вспышки будет вполне разрешимым и проведённый расчёт модели 7A, уточнённый релятивистскими эффектами, может быть использован для последующей оценки наблюдательных данных. Также, согласно оценкам, от 50 до 600 сверхновых типа II может быть зарегистрировано аппаратом LOBSTER за 3 года наблюдений в пределах 250 Мпк. Эти оценки получены ранее Блишниковым и др. на основе нескольких численных расчётов программного комплекса STELLA путём простого масштабирования параметров. Для их уточнения можно использовать развитые нами теоретические методы мо-

⁵Calzavara A.J., Matzner C.D. // MNRAS, **351**, 694, 2004.

дслирования.

В **приложении** приводится вывод и обсуждаются особенности релятивистского уравнения переноса в сопутствующей системе координат, основанные на работах Михаласа; приводится автономное решение Блэндфорда и МакКи, описывающее распространение релятивистской ударной волны вследствие сильного взрыва в однородной среде с его подробным выводом и обсуждением области его применимости. Также в приложении описывается основной алгоритм решения уравнений радиационной гидродинамики, используемый в программном комплексе STELLA.

В **заключении** приводятся основные результаты диссертации и на их основе обсуждаются вопросы будущих теоретических исследований и экспериментальных наблюдений.

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю, Сергею Ивановичу Блишникову за постановку задач, постоянное внимание и помощь в работе.

Публикации автора по теме диссертации

1. Tolstov A.G., Blinnikov S.I. // Spectra of Gamma-Ray Burst Afterglows. - 2002, A&AT, vol. 22, Issue 6, p. 807-808
2. Толстов А.Г., Блишников С.И. // Спектры и кривые блеска ореолов гамма-всплесков. - 2003, Письма в АЖ, т. 29, №6, с. 403-411
3. Tolstov A.G. // The influence of jet geometry on light curves and spectra of GRB. - 2005, A&A, v. 434, p. 623-627
4. Толстов А.Г. // Моделирование многогруппового релятивистского переноса излучения для ударных волн в сверхновых. - 2010, Письма в АЖ, т. 36, №2, с. 118-124