РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ

На правах рукописи

УДК 524.7-732

СОКОЛОВ Владимир Владимирович

ОТОЖДЕСТВЛЕНИЕ ГАММА-ВСПЛЕСКОВ: ОПТИЧЕСКИЕ ТРАНЗИЕНТЫ И РОДИТЕЛЬСКИЕ ГАЛАКТИКИ

(01. 03. 02 – астрофизика, радиоастрономия)

Д И С С Е Р Т А Ц И Я
на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Нижний Архыз – 2002

Оглавление

Глава 1

Введение и обзор текущих исследований

1.1. Актуальность отождествления гамма-всплесков и цель работы

Космические гамма-всплески (Gamma-Ray Bursts, GRB) — яркие короткие, от долей секунды до сотен секунд, *вспышки* мягкого гамма-излучения с полными потоками ("fluences") от $\sim 10^{-7}$ эрг см$^{-2}$ до 10^{-3} эрг см$^{-2}$. С такими потоками эти события регистрируются со средним темпом ≈ 0.8 всплесков в сутки (Fishman et al. 1994), кривые блеска часто показывают сложную/многопиковую структуру с переменностью на временах до десятков миллисекунд, энергетические спектры с максимумом до ~ 1 МэВ (Schaefer et al. 1994, Лучков, Митрофанов, Розенталь 1996), но излучение вспышки наблюдается и в рентгеновском диапазоне $2-30$ кэВ (Amati et al. 2002). До 1997 г. вся информация об этих событиях получалась только из наблюдений на всенаправленных гамма-детекторах, установленных на космических платформах. Задача *отождествления источников всплесков* во всех других диапазонах спектра и установления шкалы расстояний до них стала *актуальной* сразу же, как только стало понятно их космическое происхождение.

В течение 30 лет со времени открытия всплесков в 1965-1967 гг. (Прилуцкий, Розенталь, Усов 1975) точная и быстрая локализация этих событий на небе, а тем более оптические и другие отождествления наземными и космическими обсерваториями были трудной проблемой. Тем не менее за это время около 200 гамма-всплесков были все-таки грубо локализованы на небе. Многое было уже известно об этом явлении и до запуска в 1991 г. знаменитой специализированной космической гамма-обсерватории им. А.

Комптона (CGRO) с прибором BATSE (Burst And Transient Search Experiment). Но до 1997 г. гамма-всплески наблюдались только в гамма-диапазоне с помощью нескольких детекторов на околоземных орбитах, на космических станциях серии "Венера" и на других (см. в обзорах: Прилуцкий, Розенталь, Усов 1975, Розенталь, Усов, Эстулин 1983, Мазец и Голенецкий 1987 и ссылки там же). Никакой надежной информации о расстояниях до источников не было, поскольку лучшие локализации этих транзиентных событий с помощью международной сети космических аппаратов IPN (InterPlanetary Network) достигали нескольких квадратных минут дуги и определение такого бокса ошибок происходило достаточно медленно, чтобы успеть организовать оптические наблюдения с Земли с целью найти соответствующий источнику всплеска тоже транзиентный (быстро слабеющий) оптический объект или какой-либо соответствующий гамма-всплеску оптический компаньон ("counterpart"). Из-за полного незнания расстояния до источника всплеска, выделяемая за время всплеска полная энергия в различных теоретических сценариях явления гамма-всплеска различалась на 20 порядков, что делало природу источников совершенно неопределенной (Лучков, Митрофанов, Розенталь 1996) и еще более затрудняло их поиск в других диапазонах длин волн. Оставалось только делать глубокие снимки наименьших по площади боксов и искать какие-то пекулярные объекты в них, исходя из той или иной (галактической или внегалактической) более-менее разумной физической гипотезы/модели, объясняющей возможную популяцию этих странных объектов в оптике.

Наземные наблюдения с целью отождествления источников всплесков в других диапазонах почти не проводились до запуска на орбиту в 1991 г. гамма-обсерватории CGRO (Meegan et al. 1992, Fishman et al. 1994). В предлагаемой диссертационной работе показано как была поставлена и как решалась задача по *оптическому отождествлению гамма-всплесков* на 6-метровом телескопе САО РАН, начиная с 1993 г., когда источники всплесков исследовались только в одном диапазоне, и после 1997 г., когда гамма-всплески были отождествлены сначала в рентгене, а потом в оптике и в радиодиапазоне. Постановка задачи по отождествлению гамма-всплесков уточнялась в процессе накопления новой информации, начиная с 1993 г. и особенно с весны 1997 г., когда отождествление в рентгене и в оптике наконец-то произошло. Конкретные задачи, выполнявшиеся на различных этапах работы в процессе наблюдений и затем при интерпретации данных в рамках международных программ 1997-2001 гг., перечислены в разделе "Содержание работы" для каждой из глав диссертации.

Целью работы является выяснение природы источников космических гамма-всплесков путем исследования *кандидатов* для оптического отождествления источников всплесков в транзиентном (оптические транзиентые источники) и в спокойном (родительские галактики) состоянии, *определение места источников гамма-всплесков среди других астрофизических объектов.* Более конкретно, с 1997 г. главной целью стало выяснение того, *какие объекты являются прародителями источников гамма-всплесков* (см. также Табл. 1 на стр. 23).

1.1.1. Содержание работы

Здесь кратко изложено содержание работы по главам. (Во введении к каждой главе описан общий план ее построения.)

1. *В Главе 1* сказано об актуальности отождествления гамма-всплесков и о главных целях диссертационной работы. Во второй части этой (вводной главы) на конкретных примерах показано, что такое отождествление гамма-всплесков, приведен обзор исследований по теме, начиная с самых первых попыток отождествления, в том числе включая и обзор результатов наблюдений на БТА по программе "Отождествление гамма-всплесков" до весны 2000 г.

Хотя наиболее существенную часть информации об источниках космических гамма-всплесков мы получили, начиная с весны 1997-го года, когда были открыты рентгеновское, оптическое и радио послесвечения (afterglow), в Гл. 1 представлен краткий обзор состояния проблемы не только в период бурного прогресса в этой области 1997-2000 гг., но будет упомянуто также развитие событий связанных с проблемой отождествления до весны 1997 г. Тем более, что работа по теме диссертации (подготовка первой наблюдательной заявки) была начата в 1993 г. осенью, задолго до первых отождествлений гамма-всплесков в оптике. Соответственно, этот обзор проблемы тесно связан с тем, что удалось понять здесь, в САО, в связи с загадкой происхождения источников гамма-всплесков, выполняя конкретную наблюдательную программу на БТА. К тому же все, что делалось на 6-метровом телескопе, начиная с наблюдений в 1994 г., делалось с самого начала в тесном сотрудничестве с ведущими группами как у нас в России, так и за рубежом. Здесь рассказано об отождествлении гамма-всплесков в САО: участие в кооперативных международных программах, мониторинг нескольких (GRB 970508, GRB 980519, GRB 980613, GRB 990123, GRB 991208) оптических транзиентов, обнаружение и фотометрия нескольких родительских галактик, получение данных по 4-полосной фотометрии родительских галактик гамма-всплесков. Описан первый в САО спектр оптического транзиента гамма-всплеска GRB 991208, по которому было сделано определение z. Показана Таблица (блок-схема) 1.1 основных задач, решаемых по этой программе и в диссертации. (Кроме того, небольшие обзоры новых исследований, так или иначе связанных с проблемой GRB, есть еще и в каждой главе.)

2. *В Главе 2* речь идет об исследованиях IPN бокса ошибок ("архивного") гамма-всплеска GRB 790613, целью которых была наблюдательная проверка галактической гипотезы происхождения коротких гамма-всплесков. Описана методика поиска голубого звездообразного объекта типа аккрецирующей изолированной нейтронной звезды в окрестностях Солнца. Сделана оценка расстояния или нижней границы для расстояния до компактного объекта — возможного источника гамма-всплеска. Проведена "регистрация" всех оптических источников (до предела около $25^m - 26^m$), полученных на БТА CCD-изображений, и отбор всех "подозрительных" по цвету объектов в области локализации GRB 790613. Описана *методика* фотометрии слабых объектов.

Та же цель — отработка методики отождествления и фотометрическое исследование слабых звездообразных объектов — преследовалась и в параллельной наблюдательной программе В. Г. Курта (АКЦ ФИАН совместно с САО) отождествления и наблюдений изолированных нейтронных звезд-пульсаров. Для этого на БТА была сделана $BVRI$ ПЗС фотометрия пульсаров: PSR B0656 +14, PSR 0809+74, PSR B0950+08, J0633+1746 (Geminga). В частности, на БТА, по положению VLA- радиоисточника для PSR B0656 +14, был отождествлен (разд. 2.5.1) звездообразный объект 25^m, для него были определены потоки в B, V, R и I полосах. Это позволило с учетом UV-наблюдений на HST говорить о возможности более сложной, чем Релей-Джинс, преимущественно нетепловой природе излучения в UV и в оптической областях спектра компактных объектов. То есть спектр искомых пекулярных звездообразных объектов в оптике, как и для PSR B0656 +14, может представлять собой сумму тепловой и нетепловой компоненты — степенной спектр с наклоном ≈ -1. В разделе 2.5.2 исследован сам оптический компаньон PSR B0656 +14 и протяженные и звездообразные объекты его ближайшей окрестности.

3. *В Главе 3:* С весны 1997 г. актуальными стали совместные наземно-космические (follow-up) наблюдения оптических транзиентов. Цель — успеть отнаблюдать только что обнаруженный и быстро слабеющий в рентгенов-

ском, в оптическом или в радио диапазонах транзиентный источник — послесвечение гамма-всплеска. На БТА детально, в нескольких фотометрических полосах исследовать изменения его блеска со временем — установить законы падения блеска, получить спектральные (цветовые) характеристики оптического транзиента (OT GRB) и исследовать их эволюцию со временем. Установить спектральные и временные корреляции с переменностью этого объекта (afterglow) в других диапазонах: в радио, в NIR, в NFI/BeppoSAX рентгене. В главе 3 детально описана вся процедура фотометрических follow-up наблюдений и первичной интерпретации данных применительно к OT GRB 970508 в яркой фазе (май-август 1997 г.), по которому в САО удалось получить наибольшее количество $BVRI$ фотометрических измерений блеска.

4. *В Главе 4* главной целью является анализ полученных данных об оптическом объекте –"остатке" гамма-всплеска в спокойном состоянии. То есть здесь исследована родительская галактика всплеска GRB 970508 и проведено сравнение показателей цвета для этой галактики с цветами других галактик. В результате для родительской галактики GRB 970508 получены данные о ее хаббловском типе и светимости. Проведено сравнение ее $BVRI$-спектра с ультрафиолетовыми спектрами галактик локальной Вселенной. Сделана оценка центральной поверхностной яркости и размеров этой галактики. Проведен анализ полученных фотометрических данных по ближайшим соседям этой GRB-галактики с целью уточнения расстояния до нее и установления степени пекулярности/непекулярности родительской галактики.

5. *В Главе 5:* Уже начиная с 1997 г., еще до возникновения в 1998-99 гг. астрономии гамма-всплесков, нашей специальной целью стало получение однородной выборки фотометрических данных (желательно на одном и том же инструменте) с тем, чтобы начать накопление статистики по родительским галактикам и ответить на вопросы, особенно актуальные до 99-го г.: 1) В каких галактиках это явление (гамма-всплеск) наблюдается чаще всего? 2) Действительно ли существует какой-то особый класс "GRB-галактик"? 3) Установить надежно, привлекая данные спектроскопии, где — в старых ли эллиптических или в спиральных галактиках со звездообразованием — гамма-всплески наблюдаются чаще? 4) Слияние нейтронных звезд или массивное звездообразование и его следствие — коллапс массивного ядра звезды — ответственны за *механизм* всплеска? 5) Если гамма-всплески все-таки связаны со звездообразованием и с эволюцией массивных звезд, то насколько темп звездообразования в родительских галактиках от-

личен от темпа звездообразования у всех остальных галактик с тем же z? 6) Сколько "GRB-галактик" приходится на квадратный градус небесной сферы и чем же эти галактики отличаются от других таких же далеких галактик или от (слабых) галактик "поля"? В 5-й главе в той или иной мере затронуты и обсуждены все эти вопросы. Учтено внутреннее поглощение в родительских галактиках и применен метод популяционного синтеза при интерпретации наблюдательных данных.

6. *В Главе 6* основной целью является попытка ответить на вопросы, которые оказались на переднем плане исследований в результате работы по родительским галактикам и особенно (в последнее время) в результате наблюдательного прогресса по отождествлению гамма-всплесков (+ рентгеновские спектры в первые часы/секунды). По-видимому, для решения трудной проблемы механизма гамма-всплеска, существенно было сначала выяснить, *какие же звездные объекты могли бы быть прародителями источников GRB?* Если наблюдаемый на Земле гамма-всплеск — это действительно результат эволюции массивной звезды в далекой галактике, то тогда как связаны источники гамма-всплесков со взрывами сверхновых звезд (СН)? Какие типы СН — тоже результат эволюции массивных звезд ("Гиперновая", Ib/c, II) — могут "начинаться" с гамма-всплеска, поскольку выбор типа СН связан с тем, на какой стадии эволюции массивной звезды может наблюдаться это явление? Каковы истинная энергетика гамма-всплеска и какой все-таки угол коллимации гамма-лучей ("beaming") во время мощной гамма-вспышки, возможно возникающей при коллапсе (релятивистском, скорее всего) компактного ядра массивной звезды? Как и чем ускоряются джеты, сопровождающие гамма-всплеск аксиально-симметричные выбросы вещества? В 6-й главе проведена интерпретация фотометрического эффекта покраснения ОТ GRB 970508 как эффекта, возможно прямо связанного с вкладом вспышки СН в наблюдаемые потоки от транзиента через несколько недель после всплеска.

7. *В Главе 7* (в Заключении) сформулированы **основные положения, выносимые на защиту**, сделана попытка подвести некоторый общий итог к 2002 г. и сказано о возможных перспективах продолжения работы по теме.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из вводной главы, пяти основных глав, заключения, списка цитируемой литературы из 318 наименований; содержит 260 страниц текста, в том числе 58 рисунков и 27 таблиц.

1.1.2. Новизна и практическая ценность

В диссертационной работе впервые последовательно изложена методика оптического отождествления гамма-всплесков, начиная с первых попыток (1994-1996 гг.) поисков слабых объектов в больших (IPN) боксах ошибок локализации и заканчивая успешными наблюдениями оптических транзиентных источников, связанных с гамма-всплесками и исследованиями их родительских галактик (в 1997–2000 гг.).

1. Впервые проведено исследование в трех (B, V, R) фотометрических полосах области локализации короткого гамма-всплеска GRB 790613 до $B = 26.2$, $V = 25.7$, $R = 25.6$, и в рамках галактической модели получены ограничения по расстояниям до предполагаемого объекта — источника этого всплеска (Гл. 2, разд. 2.3, 2.4).

2. Впервые для PSR B0656+14 были определены потоки в фотометрических полосах B, R и I. С учетом результатов наблюдений в UV-диапазоне на космическом телескопе им. Э. Хаббла (HST) это позволило уверенно говорить о преимущественно нетепловой природе излучения в оптической области спектра этой изолированной нейтронной звезды вплоть до ~ 8000Å. Впервые исследованы слабые объекты в окрестностях PSR B0656+14. (Гл. 2, разд. 2.5, 2.6.)

3. В результате наблюдений ("follow-up" = энергичного преследования) слабеющего Оптического Транзиента (ОТ) GRB 970508 впервые для таких объектов был получен самый большой набор данных в 4 стандартных (BVR_cI_c) фотометрических полосах и, т. о., была впервые исследована *эволюция непрерывного спектра* оптического источника, связанного с гамма-всплеском. Проведены наиболее точные измерения блеска в 4 фотометрических полосах в фазе максимальной яркости и (в частности) в максимуме блеска этого ОТ GRB (май 10.77 UT). Обнаружено экспоненциальное падение блеска источника сразу после максимума во всех $BVRI$-полосах, наблюдавшееся в течение примерно 3 суток. С использованием оригинальных данных определен наклон непрерывного спектра этого объекта. Только по этим данным был определен и усредненный степенной закон падения блеска в фотометрической полосе R после максимума блеска в течение 86 дней. (Гл. 3.)

4. Новыми являются все результаты исследования родительской галактики гамма-всплеска GRB 970508: вывод об отсутствии вклада какого-либо переменного источника в наблюдаемые потоки этой галактики через 200 дней после всплеска, исследование широкополосного $BVRI$-спектра (или

цветов) галактики, сравнение со средним распределением энергии в континууме для галактик различных хаббловских типов, определение абсолютной величины, сравнение (BVR_cI_c) распределения энергии в спектре галактики GRB 970508 с ультрафиолетовыми спектрами близких по светимостям галактик со вспышкой звездообразования локальной Вселенной, оценка линейных размеров этой галактики, оценка величины ее центральной поверхностной яркости, исследование $BVRI$-спектров 3 близких объектов в поле, оценка светимости и размеров (гало) для ближайшей галактики в поле галактики GRB 970508 и объяснение дополнительного (абсорбционного) красного смещения $z = 0.767$. (Гл. 4.)

5. По $BVRI$-фотометрическим наблюдениям 6 GRB-галактик на одном телескопе и в одной и той же стандартной фотометрической системе впервые был получен самый большой набор данных по 4-полосной фотометрии родительских галактик гамма-всплесков. По этим данным изучены цвета этих галактик, подтверждена связь гамма-всплесков с массивным звездообразованием. Для 5 родительских галактик было впервые учтено внутреннее поглощение. Определены K-поправки и $M_{B_{rest}}$ абсолютные величины 6 галактик. Все результаты и выводы по родительским галактикам являются новыми и оригинальными (ссылки см. в Гл. 5).

6. Новыми являются результаты исследования эффекта покраснения ОТ GRB 970508 на 36-й день после всплеска. Наблюдения этого эффекта в фотометрической полосе I_c по отношению к поведению ОТ в B, V, R_c проводились только на 6-метровом телескопе САО РАН. В результате был найден эффект "red bump" или "плечо" на кривой блеска в этой полосе, указывающий на связь гамма-всплеска со вспышкой СН, что наблюдается сейчас уже во многих (более 7) ОТ GRB. Это был один из первых случаев наблюдения такого эффекта. Он впервые был найден *в специально проведенных* 8 сетах наблюдений ОТ GRB 970508 (в июне, июле, августе, ноябре 1997 г.), когда на БТА проводились *измерения показателей цвета* $B - I_c$, $V - I_c$, $R_c - I_c$ ОТ, вплоть до наблюдения вклада в потоки и показателей цвета "чистой" галактики в 1998 г. (См. ссылки в главах 3, 4 и 6.)

7. На 6-метровом телескопе были впервые исследованы "GRB-поля" до глубины 26^m и слабее, с ошибкой в оценке блеска не хуже, чем $0.2^m - 0.3^m$. Этот опыт фотометрии слабых объектов использовался на 10-метровом телескопе Keck II в наблюдениях родительских галактик гамма-всплесков и при исследовании изолированных нейтронных звезд-пульсаров на других больших телескопах, например на 8.2-метровом телескопе Subaru. Результаты исследований в 3 полосах бокса ошибок "классического" короткого

гамма-всплеска GRB 790613 могут быть использованы в новых наблюдательных программах по отождествлению коротких всплесков, природа которых до сих пор не ясна. Опыт работы по поиску слабых объектов с пекулярными цветами (см. в Гл.2) используется в программах поиска ОТ гамма-всплесков (Gorosabel et al. 2001).

8. Практически ценным может быть опыт участия в международных программах отождествления гамма-всплесков в результате (follow-up) наблюдений быстро слабеющих транзиентных источников (см. в разделе 1.2.2 и в Гл. 3). Полученная на БТА фотометрическая информация помогала корректировать постановку спектральных и фотометрических задач на других телескопах (Keck II, HST, VLT и других). В *контексте проблемы отождествления* гамма-всплесков (follow-up наблюдения ОТ и родительских галактик) показано, что широкополосная фотометрия в нескольких полосах (BVR_cI_c) — практически удобный, хоть и требующий специальных условий наблюдений, метод достижения главной цели — быстрой оценки блеска и цвета ОТ GRB, определения типа слабой ($22^m - 26^m$) галактики с достаточно гладким спектром (в оптике при $z \sim 1$ в основном наблюдается только мощный UV-континуум далеких галактик со звездообразованием).

9. Предложена оригинальная *методика* определения внутреннего поглощения в далеких галактиках по их $BVRI$-фотометрии. Фотометрия родительских галактик гамма-всплесков показала, что $BVRI$-распределение энергии в их спектрах хорошо аппроксимируется спектрами близких галактик (в локальной Вселенной) со вспышкой звездообразования, что было использовано при оценках поглощения в галактиках в *первом приближении.* Затем к родительским галактикам гамма-всплесков был применен метод популяционного синтеза, позволивший точнее (во *втором приближении*) определить поглощение в них (см. Гл. 5).

1.1.3. Апробация результатов

Результаты работы по теме диссертации неоднократно докладывались на астрофизических семинарах в САО, АКЦ ФИАН, ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН, Кафедры Астрофизики СПбГУ, ежегодных конференциях в Пущино (1997, 1999, 2000, 2001), посвященных актуальным проблемам астрофизики. Доклады были сделаны также на: IAU Colloquium No.151 "Flares and Flashes" (Декабрь 1994, Зоненберг, Германия), 29th ESLAB Symposium "Towards the Source of Gamma-Ray Bursts" (Апрель 1995, Нордвайк, Нидерланды), 3rd Huntsville Symposium "Gamma-Ray Bursts" (Октябрь 1995, Хантсвилл, США), Общемосковском семинаре астрофизиков (ОСА) — Коллоквиум по проблеме гамма-всплесков (23 Мая 1997, ГАИШ, Москва), Fourth Huntsville Gamma-Ray Burst Symposium (Сентябрь 1997,Хантсвилл, США), 1st Workshop "Gamma-Ray Bursts in the Afterglow Era" (Ноябрь 1998, Рим), Коллоквиуме "Гамма-всплески и связанные с ними явления" (13 Ноября 1998, ГАИШ, Москва), 19th Texas Symposium "Relativistic Astrophysics and Cosmology" (Декабрь 1998, Париж), Colloquium on Physics of Neutron Stars (Май 1999, ФТИ им. А.Ф.Иоффе, С-т Петербург), Конференции по 2-D спектроскопии в САО (Декабрь 1999, Н.Архыз, САО), Joint European and National Astronomical Meeting "JENAM-2000" (Июнь 2000, Москва), 2nd Workshop on "Gamma-Ray Bursts in the Afterglow Era" (Октябрь 2000, Рим), Коллоквиуме "Космичекие взрывы 2000: от Большого Взрыва до гамма-всплесков" (24 ноября 2000, ГАИШ, Москва), Conference on Physics of Neutron Stars (Июнь 2001, ФТИ, С-т Петербург). Результаты работы по теме диссертации вошли в список важнейших достижений САО РАН в 1994, 1996-1998, 2000, 2001 гг. По теме диссертации опубликовано 35 научных работ.

Личный вклад автора: Автору принадлежит постановка задачи по поиску на БТА оптических объектов, возможно связанных с гамма-всплесками, и последующее формулирование всех целей наблюдательных программ на различных этапах работы по теме, начиная с 1993 г. Автор принимал участие в наблюдениях по своей программе отождествления гамма-всплесков ("архивные" GRB-боксы, пульсары, follow-up наблюдения ОТ GRB и галактик). Автору принадлежит постановка всех задач по обработке и интерпретации полученных данных. Автор принимал участие в реализации этих задач, начиная от стадии оформления наблюдательных заявок на БТА и до написания статей по результатам работы. Автору принадлежит идея накопления информации по фотометрии родительских галактик гамма-всплесков для как можно большего числа таких объектов (переход к астрономии GRB), а также идея сравнения $BVRI$-спектров родительских галактик с ультрафиолетовыми спектрами локальных галактик и затем (второе приближение) с рассчитанными спектрами галактик в методе оценки внутреннего поглощения. Автору принадлежит постановка задачи по моделированию и учету внутреннего поглощения в родительских галактиках гамма-всплесков.

1.2. Обзор исследований по проблеме отождествления

Этой проблеме посвящено довольно много обзоров (см., например, цитированные выше обзоры + Лучков, Митрофанов и Розенталь 1996; Постнов 1999 и новейшие обзоры: Djorgovski et al. 2001, 2001a; Castro-Tirado 2001a) и, кажется, нет необходимости описывать здесь еще раз во многом драматическую и противоречивую историю открытия и исследования этого интереснейшего явления в астрономии. Поэтому в этом разделе сделан обзор в основном только по теме диссертации, касающейся одной из существенных составляющих всей проблемы гамма-всплесков — их *оптическому отождествлению*, теме, которая стала особенно "горячей" в астрофизике с 1997 г., когда начал свою работу на орбите Земли знаменитый спутник BeppoSAX (Boella et al. 1997). Текущие исследования в настоящее время, когда возникла *астрономия гамма-всплесков*, можно проиллюстрировать Таблицей (схемой) 1.1 Фактически согласно этой логике такие исследования проводились с 1997 г., начиная с первых отождествлений гамма-всплесков в оптике. Однако попытки отождествить гамма-всплеск были и раньше, когда это явление ("всплеск") наблюдалось в основном только как спонтанное повышение фона мягкого гамма-излучения регистрируемого *гамма-детектором*, а не каким-либо астрономическим инструментом, например телескопом (в любом другом диапазоне электромагнитного спектра) или рентгеновской камерой широкого поля, например, как WFC/BeppoSAX. К такой логической схеме (как блок-схема в Табл. 1.1) надо было еще прийти, поэтому здесь сначала изложена история проблемы *оптического отождествления* гамма-всплесков, начиная с исследований в огромных ($> 10\ arcmin^2$) боксах ошибок их локализации на небе.

Таким образом, ниже идет речь о том, как происходила процедура отождествления и что это значит — "отождествление гамма-всплесков"? Как это предполагалось делать и делалось до 1997 г. и как это на самом деле делается сейчас? Главная цель автора здесь — убедительно показать, что это действительно отождествление гамма-всплесков, несмотря на то, что постоянно наблюдаемого (persistent source) на гамма-телескопах источника мягкого гамма-излучения, например, как в случае PSR B0656+14, Geminga и других гамма-пульсаров, от источников "классических" всплесков пока не найдено. Здесь обоснован *выбор метода* исследований на 6-метровом телескопе. В частности, частично отражено и настоящее состояние текущих исследований в САО на момент написания этой диссертационной работы. Т. о., ниже будет сказано о поисках пекулярных объектов в огромных "GRB-боксах", об отождествлении изолированных нейтронных звезд, о возникновении первых международных проектов отождествления GRB, и, наконец в разделе 1.2.2, сказано об отождествлении гамма-всплесков в эру BeppoSAX и об участии САО РАН в этой программе.

1.2.1. Что это значит — отождествить гамма-всплеск?

Первое официальное сообщение о гамма-всплесках (Klebesadel, Strong, and Olson 1973) относится к 1973 г., хотя они начали регистрироваться на спутниках "Вела" (и на других) с 1965 г. как кратковременные повышения скорости счета детекторов γ-лучей ("всплески"). Таким образом, космические гамма-всплески (как с тех пор их определяют) — это яркие вспышки гамма излучения ("события") со случайной локализацией на небе и с длительностями от долей секунд до сотен секунд. Самые яркие всплески достигают проинтегрированных по времени вспышки потоков $\sim 10^{-3}$ эрг см$^{-2}$. При этом основное энерговыделение происходит в полосе $0.1 - 1$ Мэв, хотя сейчас (с 1997 г. на BeppoSAX) всплески регистрируют уже и в рентгене.

Еще в начале 90-х многие исследователи исходили из того, что это единая популяция источников (см. ссылки в цитированных обзорах), хотя уже тогда было известно, что все гамма-всплески явно делятся на длинные и короткие события. Что особенно запутывало ситуацию с расстояниями до источников всплесков, так это то, что до 1993 г. вместе с "классическими" (т. е. неповторяющимися) гамма-всплесками с помощью одних и тех же моделей анализировались и рекуррентные источники всплесков, например GBS0526-66 (Мазец и Голенецкий 1987), которые позже (примерно с 1995 г.) выделились в особый класс мягких повторяющихся всплесков (так называемые Soft Gamma-Ray Repeaters, SGRs). Эти рекуррентные всплески показывают характерные признаки нейтронных звезд (пульсирующая компонента потока, локализация в остатках вспышек сверхновых) в нашей Галактике и в Большом Магеллановом Облаке. Не удивительно, что до начала осознания того факта, что по крайней мере эти источники представляют собой какой-то отдельный класс галактических источников, огромной популярностью пользовалась именно галактическая гипотеза происхождения всех (или большинства) гамма-всплесков.

Работа по программе поиска оптики от источников гамма-всплесков началась в САО в 1993 г. (Осенью этого года была удовлетворена первая заявка в КТШТ, а в начале 1994 г. были проведены первые наблюдения на БТА.) Главной целью этой программы было найти оптические объекты, связанные со "старыми/архивными" гамма-всплесками, выбирая для исследования наименьшие ($\sim 1\ arcmin^2$) боксы ошибок их локализации на небе. Тогда довольно популярным представлением об источниках было представление об одиночных (изолированных) нейтронных звездах, на поверхности которых происходят мощные взрывы (Woosley, Wallace 1982, Розенталь, Усов, Эстулин 1983). Теперь, после рентгеновских, оптических, инфракрасных и радио отождествлений старые представления обо всей популяции источников гамма-всплесков сильно пересмотрены и считается, что может быть только короткие гамма-всплески действительно связаны с компактными объектами в нашей Галактике (Bisnovatyi-Kogan 2001, Cline et al. 2001). Но наблюдательные усилия по программам отождествления до 1997 г. оказались все-таки не бесполезными, поскольку основной их смысл свелся к тому же, что делали тогда и все другие группы — в тот период времени отрабатывались *методики поиска и исследования* слабых источников в самых разных диапазонах электромагнитного спектра. Именно так и надо понимать первые попытки поисков *голубых звездообразных объектов* в больших "архивных" GRB-боксах, которые были предприняты и на БТА до 1997 г.

О попытках оптического отождествления до весны 1997 г. (до эры BeppoSAX):
Поиски оптики, связанной с гамма-всплесками, с самого начала предпринимались в трех направлениях: 1) поиск каких-либо пекулярных объектов в боксе ошибок через несколько месяцев и лет после вспышки–гамма-всплеска (*"quiet counterparts"*); 2) поиск оптических вспышек в боксах ошибок локализации по архивным оптическим данным (*"flaring counterparts"*); 3) поиск оптики от источников либо в момент вспышки, либо сразу (follow-up) после детектирования всплеска (*"fading counterparts"*).

Первой попыткой оптического исследования области локализации гамма-всплеска была работа Chevalier et al. (1981), в которой еще фотографическим путем изучался бокс ошибок одного из всплесков до $23.5^m - 24^m$. Поиску оптических кандидатов для отождествления в нескольких областях локализации гамма-всплесков были посвящены работы Ricker et al. (1986) и Harrison et al. (1994). Следующим шагом по поиску оптических кандидатов был обзор Vrba et al. (1995) на 1-м телескопах еще семи (IPN) боксов, в котором была сделана многополосная CCD фотометрия со средним пределом обнаружения около 24^m. Т. о., наши наблюдения на БТА областей локализации (Sokolov et al. 1994, 1994a, 1995, 1996, 1997; Соколов и др. 1996) были продолжением поисков первого направления — поиск пекулярных (по цветам) объктов типа *"quiet counterparts"*. Постановка задачи, методика и результаты такого поиска подробно описаны во 2-й главе для (IPN) бокса ошибок локализации короткого гамма-всплеска GRB 790613.

Поиск оптических вспышек (*"flaring counterparts"*) в областях локализации всплесков с помощью архивных данных исходит из того, что гамма-всплески могут быть рекуррентными событиями, по крайней мере, на шкале ~ 10 лет, и в момент всплеска часть энергии излучается в оптическом диапазоне. Результатом такого поиска по архивным фотопластинкам различных обсерваторий стало обнаружение более чем 50-ти переменных объектов внутри и вблизи областей локализаций гамма-всплесков. Например, оптические вспышки в областях локализации трех гамма-всплесков были обнаружены с помощью архивных фотопластинок (Schaefer et al. 1984, Schaefer 1984). Большинство из этих объектов действительно представляют собой какие-то реальные вспышки (см. в обзорах Borovicka et al. 1992, Hudec et al. 1990). Некоторые из них были включены и в нашу программу наблюдений, в частности, объект "ОТ 1959 Москаленко" в области локализации гамма-всплеска GBS 791101, которая (область) была исследована на 6-метровом телескопе в июне 1994 г. в BVR-полосах (Zharykov, Kopylov, Sokolov 1995). В этом случае вблизи положения возможного переменного источника ОТ 1959, указанного Moskalenko et al. (1989), был найден объект $V = 23.43$ с пекулярными цветами ($B-V = 0.9, V-R = 1.10$). Возможно, что этот объект и является кандидатом для отождествления оптической вспышки 1959 года, но связь его с гамма-всплеском GBS 791101 остается проблематичной.

Наша группа принимала участие во всех вариантах поисков и отождествления гамма-всплесков. Приоритетами наблюдательных программ на БТА того времени по отождествлению гамма-всплесков и пульсаров были: *отработка методики* глубоких многоцветных фотометрических CCD-наблюдений, отбор и анализ слабых (слабее $23^m - 24^m$) объектов по показателям цвета ($B-V$, $V-R$, $R-I$) и профилям (фотометрическим разрезам), оценка собственных движений звездообразных объектов, подсчеты числа объектов вплоть до фотометрического предела, анализ переменности, изучение/отождествление пекулярных объектов, найденных в боксах ошибок локализации гамма-всплесков. В итоге (до весны 1997 г.) были исследованы области локализации таких гамма-всплесков: GRB 790613, GRB 791101 (ОТ Москаленко), GRB 930131 (ОТ McNamara & Harrison), GRB 910601 (ROSAT # 30), GRB 790418, GRB 790326b. Результаты наблюдений опубликованы, наблюдательный материал записан на CD.

В (COMPTEL/IPN) боксе ошибок локализации GRB 910601 мы пытались отождествить рентгеновский источник ROSAT # 30. В поле этого источника были найдены 18 очень красных ($B-V>1.9$) звезд ($V\approx 22$), но надежных кандидатов для отождествления ROSAT # 30 мы пока не обнаружили (McNamara et al. 1995). Исследование области локализации длинного гамма-всплеска (с возможной аннигиляционной e^-e^+ линией в спектре) GRB 790418 было первым в САО опытом (B,V) фотометрии с построенем "мозаики" из CCD-изображений с глубиной до $\approx 24^m$, покрывающей поле всего бокса (Sokolov et al. 1994). В параллельной наблюдательной программе по отождествлению в оптике ближайших нейтронных звезд были проведены $BVRI$ наблюдения PSR B0656+14. Об отождествлении пульсара и исследовании этой изолированной нейтронной звезды более подробно сказано в Гл.2. Многополосная фотометрия изолированной нейтронной звезды Geminga (J0633+1746) была также сделана на БТА в рамках программы (Kurt et al. 2000, 2001) исследования $BVRI$-спектров и отождествления слабых объектов.

Третье направление или стратегия (*"fading counterparts"*) поисков оптики, связанной с гамма-всплесками, впоследствии оказалась самой выигрышной. Но отработка *методики* такого (follow-up) поиска ярких оптических вспышек сразу после всплеска началась задолго до ее успешной реализации в 1997 г. В настоящее время такой поиск осуществляется в ходе глобального эксперимента с участием большого количества обсерваторий Земли. Для этого были созданы несколько международных сетей, по которым быстро передаются полученные с космических детекторов координаты гамма-всплеска после его локализации. Наземные обсерватории также быстро обмениваются полученной в ходе своих наблюдений информацией. В число таких международных сетей входили BATSE/COMPTEL/NMSU Rapid Response Network (McNamara et al. 1995) (18 оптических и 4 радио обсерватории), BACODINE (Barthelmy et al. 1995) (21 группа, 8 оптических, 4 радио, 6 гамма-детекторов на космических платформах). Наша группа принимает участие во всех этих программах с самого начала их работы. В частности, одна из первых попыток (еще до "Эры BeppoSAX") follow-up оптических наблюдений была предпринята McNamara & Harrison (1994) после всплеска GRB 930131, детектированного γ- обсерваторией CGRO. Через 12 часов после гамма-всплеска в боксе ошибок (COMPTEL) локализации был найден новый объект с $V\approx 19.8$ на NMSU BMO 24 in. телескопе (61 см). Этот объект находился довольно далеко ($\approx 1^o$) от IPN трека и новых экспозиций авторы не сделали. Мы смогли начать свои (созаявители

B. McNamara & T. Harrison) наблюдения на БТА только в следующий сезон ($\delta \approx -09^o$), в феврале и в апреле 1994 г. В том месте, где наблюдался предполагаемый ОТ GRB, не было найдено ничего ярче $V \approx 25.5$.

Эра BeppoSAX ("Afterglow Era") и астрономия γ-всплесков:
Еще в обзоре Мазеца и Голенецкого (1987) было отмечено, что гамма-всплески по своей длительности делятся на два класса событий — короткие и длинные. Это деление на два разных класса было потом подтверждено на большей статистике всплесков во время миссии CGRO/BATSE (Koveliotou et al. 1993). Короткие всплески (от 0.1 до 1 с) и длинные (от 3 до 100 с) составляют примерно 25% и 75% соответственно от полной выборки каталога и скорее всего связаны с двумя разными типами источников. Короткие всплески оказываются и более жесткими по своим спектрам, чем длинные (Tavani 1998). (Исследованию бокса ошибок локализации типичного короткого и жесткого гамма-вплеска посвящена 2-я глава.)

В конце концов именно длинные (и мягкие) космические гамма-всплески были выбраны командой BeppoSAX для поисков транзиентов (или послесвечения) в других диапазонах. Если в гамма-диапазоне с помощью классического метода космической триангуляции быстрая (т.е. *одновременно* со всплеском) локализация направления на источник всплеска на небе с точностью хотя бы до нескольких угловых минут невозможна, то надо взяться сначала за события, которые могут дать достаточно много мягких рентгеновских квантов. То есть можно выбрать гамма-всплески с длинными рентгеновскими "хвостами" в их спектрах. Как выяснилось впоследствии, как раз длинные (они же и мягкие — много рентгена) гамма-всплески лучше всего для этого подходят. Ведь никого не убедить в правильности отождествления, пока гамма-всплеск не будет обнаружен и локализован *на телескопах*, пусть даже и на таких плохих по угловому разрешению (несколько угловых минут), как 2 широкоугольные рентгеновские камеры WFC, установленные на борту итало-голландского спутника SAX (SAX — итальянский акроним "X-ray Astronomy Satellite"). В результате успешные рентгеновские, оптические, а потом и все другие отождествления длинных гамма-всплесков были сделаны в 1997-99 гг. в основном с помощью этого сравнительно недорогого спутника. Этот аппарат обеспечил не только локализацию гамма-всплесков с точностью до угловых минут, но на этой космической обсерватории также были сделаны уникальные измерения спектров гамма-всплесков в широкой полосе частот от 2 до 700 кэВ (Piro et al. 1999, Frontera et al. 2000, Amati et al. 2002).

Как с помощью BeppoSAX практически происходило отождествление в оптике будет более подробно сказано в следующем разделе (включая и конкретные GRB). Здесь же коротко об обнаружении послесвечения гамма-всплесков в рентгене — основная идея–схема метода отождествления. (В частности, наши, совместные с командой BeppoSAX наблюдения на БТА полностью зависели от качества и быстроты выполнения всех процедур такого отождествления.) Авторы идеи — Итальянское Космическое Агенство (ASI) при участии Голландского Космического Агенства (NIVR) (Boella et al. 1997). После запуска (30 апреля 1996 г.) новое название спутника BeppoSAX (в честь итальянского физика Giuseppe Occhialini). Основная задача миссии — спектроскопия и переменность во времени галактических и внегалактических рентгеновских источников. Основная аппаратура для исследования космических гамма-всплесков (главная рабочая "пара"): всенаправленный гамма-детектор GRBM (40-700 кэВ) + рентгеновский телескоп WFC (кодирующая маска, 2-26 кэВ). Вернее, два телескопа — две широкоугольных рентгеновких камеры WFC, сканирующие небо с полем зрения около $40^o \times 40^o$. Основная задача этих двух камер — мониторинг $\sim 5\%$ неба с целью найти и определить положение (не хуже 3 угловых минут) новых транзиентных рентгеновских источников, попавших в ее поле зрения. Если одновременно с появлением такого нового рентгеновского источника в поле зрения одной из камер WFC срабатывает и гамма-детектор GRBM, начинается процедура уточнения координат этого источника, анализ и сравнение его кривых блеска в рентгене (2-26 кэВ) и в гамма-диапазоне (40-700 кэВ) , в некоторых случаях анализируется и спектр во всем диапазоне — от 2 до 700 кэВ (Frontera et al. 2000, Amati et al. 2002). Позже (через 6-8 часов — время переориентации всей платформы), после уточнения координат WFC-источника (~ 3 arcsec), найденного рентгеновской камерой, начинается поиск в "WFC-боксе" рентгеновского послесвечения ("afterglow") гамма-всплеска с помощью двух узконаправленных (NFI) телескопов-спектрометров с полем зрения в пределах одного градуса и с угловым разрешением 1 arcmin.: NFI — LECS $(0.5 - 2$ кэВ), MECS $(2 - 10$ кэВ). Дальше, после обнаружения слабеющего — с характерным временем часы-дни — рентгеновского источника, начинается работа в оптике и в других диапазонах (IR, радио) — "follow-up" поиски, обнаружение, мониторинг оптического и других послесвечений/транзиентов, получение спектров (измерение z) и исследование галактик, связанных с гамма-всплеском. Начиная с первого удачного случая отождествления гамма-всплеска GRB 970228 (Groot et al. 1997a, Van Paradijs et al. 1997, Galama et al. 1997a,b), примерно этой схемы отождествления все и придерживаются. Хотя в некоторых случаях удавалось на больших и средних телескопах находить оптику по данным одной только камеры WFC или даже в рентгеновском боксе спутника RXTE.

С весны 1997 г. основной целью наблюдательной программы на БТА стало исследование реальных астрономических объектов, которые могли бы быть связаны с источниками гамма-всплесков. Вместе со всеми (с использованием и наших собственных наблюдений) мы пришли к выводу, что галактики, в которых наблюдается послесвечение всплесков (в оптике, IR, радио), — это обычные (для красных смещений около или > 1) далекие галактики, хотя и с энергичным звездообразованием (или вспышкой звездообразования). А исследование кривых блеска оптических транзиентов гамма-всплесков в совместных наблюдательных программах и результаты рентгеновских наблюдений на BeppoSAX и на новой рентгеновской обсерватории Chandra убедили многих, что объектами, связанными с источниками гамма-всплесков, вероятнее всего могут быть массивные звезды на конечной стадии их эволюции. Таким образом, основной вопрос, который в конце концов обсуждается в этом тексте и который вытекает из осознания результатов исследований периода 1997-2000 гг. первых отождествлений гамма-всплесков в других диапазонах, таков: какие объекты могли бы быть прародителями гамма-всплесков? ("Still, what are the progenitors of Gamma-Ray Bursts?") Сейчас ответ на этот вопрос уже для многих очевиден — 30-летний спор завершается в пользу коллапса вращающегося ядра массивной звезды, хотя тут же возникают новые проблемы и новые (или отложенные ранее "до лучших времен") сомнения...

Таким образом, в 1997-99 гг. отождествление (длинных – по крайней мере) гамма-всплесков произошло. Накоплено достаточно данных, чтобы говорить об астрономии гамма-всплесков, хотя данных все еще недостаточно, чтобы окончательно понять сам механизм всплеска. Как было и до 1996 г. (а точнее до публикаций обзоров BATSE в 1992 г.), мы уже имеем и наиболее популярную модель, объясняющую послесвечение гамма-всплесков в других диапазонах (см. ссылки в обзоре Постнова 1999). Правда физика (или механизм) всплеска так и остаются непонятыми — это уже самые нижние разделы Таблицы (схемы) 1.1. Но теперь наблюдений значительно больше, чем было до 1997 г., когда источники всплесков не наблюдались нигде, кроме гамма-диапазона, и можно было еще говорить о слиянии нейтронных звезд и т.д. (см. обзор Лучкова, Митрофанова и Розенталя 1996). Теперь, когда закончилась миссия CGRO/BATSE и только что закончилась (30-го апреля 2002 г.) результативнейшая работа по отождествлению всплесков на знаменитом спутнике-обсерватории BeppoSAX, можно попытаться подвести некоторые итоги этого периода.

В частности, после возникновения астрономии гамма-всплесков многое стало выглядеть совершенно иначе, чем это было еще в "эру BATSE" и до нее. Сейчас, после отождествления в других диапазонах, можно попытаться дать более точные (более современные, чем в обзорах до 1997 г.) определения и самому явлению GRB и тому, что такое его *отождествление*. Итак, "гамма-всплесками" сейчас фактически называют *вспышки рентгеновского и гамма-излучения* с энергией фотонов $2-30$ кэВ ("полужесткий BeppoSAX/WFC-рентген") и до 700 кэВ (мягкий гамма-диапазон) и более. Длительность таких вспышек/всплесков — от долей до нескольких сотен секунд. Временные профили сложные, с переменностью до миллисекунд. Положения источников на небе локализуются в совершенно случайных направлениях. Самый чувствительный (в диапазоне энергий 30-500 кэВ) детектор BATSE на американском спутнике-обсерватории CGRO был способен регистрировать гамма-всплески на уровне $\sim 10^{-7}$ эрг см$^{-2}$. Максимальные значения полных (т.е. проинтегрированных по всему времени всплеска = fluence) потоков S (обозначение, которое использовано в обзоре Мазеца и Голенецкого 1987 г.) $10^{-4}-10^{-3}$ эрг см$^{-2}$. В этих пределах ($10^{-7}-10^{-3}$ эрг см$^{-2}$) полных потоков BATSE регистрировал события с темпом примерно 0.8 раза в сутки. Точнее, именно слабые всплески с $S=10^{-7}-10^{-6}$ эрг см$^{-2}$ регистрировались так часто. Мощные события (такие как GRB 990123 с $S \sim 10^{-4}$ эрг см$^{-2}$) происходят значительно реже — раз в несколько месяцев, а регистрируются еще реже — раз в год или два.

После отождествления "длинных" гамма-всплесков в оптике и в других диапазонах возникла астрономия гамма-всплесков и все решаемые сейчас задачи можно представить в виде такой Таблицы-схемы (см. Табл. 1.1). Хотя природа "центрального двигателя" или "триггера" гамма-всплесков все еще является предметом горячих споров (и еще долго будет являться), сейчас уже хорошо установлено, что все длинные гамма-всплески (или по крайней мере большинство из них) возникают в далеких галактиках с продолжающимся интенсивным звездообразованием.

Таблица 1.1. **Астрономия гамма-всплесков на БТА:** цель программы — *пролить свет на проблему прародителей, изучая ОТ и родительские галактики гамма-всплесков.*

Наблюдения оптических транзиентов (ОТ) гамма-всплесков и их родительских галактик

(BVR_cI_c) фотометрия и спектроскопия оптического послесвечения на различных стадиях — многополосные кривые блеска	(BVR_cI_c) фотометрия и спектроскопия галактик, статистика — набор наблюдательных данных по свойствам этих галактик
Исследование особенностей в поведении кривых блеска оптичекого послесвечения, определение расстояний (красных смещений z), изучение спектральных особенностей и их эволюции	Определение параметров родительских галактик: (BVR_cI_c)-спектры, светимости, морфология, внутреннее поглощение, скорость звездообразования — моделирование спектров
Связь "GRB/SN" — признаки СН в кривых блеска и в спектрах ОТ ↔	**Установление связи "гамма-всплески — массивное звездообразование"**

Отличаются ли родительские галактики от галактик "поля"? Какие объекты могли бы быть прародителями гамма-всплесков? Какой механизм обеспечивает оптическое послесвечение?

Теоретические модели гамма-всплесков, рентгеновского, оптического и радио послесвечения

1.2.2. Follow-up наблюдения оптических транзиентов и родительских галактик в САО РАН

Таблица 1.1 основных задач "наблюдений энергичного преследования" ("follow-up observations") — блок-схема, отражающая логику исследований, которая была сформулирована в процессе выполнения наблюдательной программы на 6-метровом телескопе в 1999 г., отражает современное направление и цели текущих исследований по проблеме оптических транзиентов, родительских галактик и вообще по проблеме источников космических гамма-всплесков (по крайней мере по состоянию дел к лету 2002 г). Эта же схема представляет теперь и основные задачи, которые решались в процессе работы по теме диссертации. Здесь видно и *что такое оптическое отождествление* гамма-всплесков, и видно *как* (метод) и для чего проводился мониторинг транзиентов, связанных с ними.

Разумеется, не все и не всегда полностью удавалось сделать следуя этой блок-схеме только в САО (в основном из-за погоды). Но, по крайней мере, эта схема отражает основные идеи, которых мы придерживались при исследовании оптики от гамма-всплесков, сотрудничая с другими группами. В частности, сейчас уже многие авторы проводят многоцветную фотометрию ОТ, как это обычно делается при исследовании СН. Применяя этот метод на БТА, удалось наблюдать интересные явления в поведении ОТ GRB 970508. То же самое делают сейчас и при наблюдениях родительских галактик, учитывая тот факт, что достаточно много спектров таких слабых объектов получить труднее, чем провести фотометрические наблюдения в 2 – 4-х полосах. Мы сразу начали копить информацию по таким "$BVRI$-спектрам", отработав методику при исследовании "старых" IPN/GRB-боксов и пульсаров. В конце концов именно такая логика исследований помогла выяснить существенное для проблемы GRB обстоятельство (см. в Гл. 6), что GRB-галактики это не пекулярные объекты и они ничем не отличаются от большинства таких же слабых галактик ("поля").

Наблюдения энергичного преследования рентгеновских, оптических (а потом NIR и радио) транзиентов стали наконец успешными, когда (с начала 1997 г.) с помощью широкоугольных рентгеновских камер (WFCs, Jager et al. 1995), установленных на борту рентгеновской/гамма обсерватории BeppoSAX (Piro et al. 1995), стало возможным *быстро* (до 6-8 часов) и довольно точно (до 3-х угловых минут) определять направление на источник γ-всплеска (Costa et al. 1997a,b, In 't Zand et al. 1997, Heise et al. 1997a). Как оказалось, положения рентгеновских транзиентов (afterglow), определяемые с такой скоростью и точностью, являются необходимой частью успешных поисков транзиентов (см. также Takeshima et al. 1997 и Smith et al. 1997) в других диапазонах.

Самые первые наблюдения рентгеновского послесвечения начались с гамма-всплеска GRB 970111 (TOO NFI наблюдения через 16 часов после гамма-всплеска, Frontera et al. 2000), но тогда еще недостаточно хорошо работала система быстрого оповещения и полностью свободный обмен наблюдательной информацией во всех диапазонах удалось организовать лишь к весне 1997 г. Поэтому новая фаза в решении проблемы отождествления началась фактически с гамма-всплеска GRB 970228. Детектирование слабеющего оптического кандидата внутри BeppoSAX/WFC-бокса для этого γ-всплеска обеспечило по существу первую точную (до угл. секунды) локализацию OT GRB (Groot et al. 1997a, Van Paradijs et al. 1997, Galama et al. 1997a,b). А затем совпадение OT со слабым протяженным объектом (Groot et al. 1997b, Metzger et al. 1997a, Sahu et al. 1997a), который, по-видимому, являлся (тогда еще не было понятно что это) родительской галактикой, что предполагало космологическое расстояние до источника γ-всплеска. Второй оптический транзиент (OT) был найден для GRB 970508 (Bond 1997). Измерение его красного смещения $z \geq 0.835$ (вернее его наименьшего значения по линиям поглощения в спектре OT: Metzger et al. 1997b) уже с неизбежностью устанавливало космологическую шкалу расстояний для источников (длинных) γ-всплесков.

Работа по организации follow-up наблюдений с САО (непосредственно с командой BeppoSAX) началась сразу же после первого успешного отождествления в оптике по методу BeppoSAX гамма-всплеска 28 февраля 1977 г. группами Энрико Коста и Луиджи Пиро. В марте этого года был заключен договор с командой BeppoSAX (с Л. Пиро и с Э. Коста) о включении группы САО РАН в глобальный эксперимент по отождествлению и мониторингу новых оптических транзиентов на основе информации получаемой со спутника BeppoSAX. Первые успешные наблюдения по этой программе начались в мае с участия в отождествлении 2-го гамма-всплеска GRB 970508. Это были и первые многополосные наблюдения оптического послесвечения гамма-всплеска, проведенные на одном и том же телескопе. Они подробно изложены в главе 3, здесь же (во вводной главе) речь идет о результатах совместных работ *по всей follow-up-программе* отождествления длинных гамма-всплесков. Результаты по отождествлению GRB 970508 в САО были доложены в IAU циркулярах (Kopylov, Sokolov, Zharikov et al. 1997a,b). О первичной интерпретации наблюдений мая-августа 97-го было доложено осенью от имени всех групп, принимавших участие в наблюдениях (Sokolov et al. 1998). Ниже дан комментарий к каждой IAUC и GCN (от GRB Coordinates Network) телеграмме и к аналогичным сообщениям наблюдательских групп, с которыми мы сотрудничали в отождествлении гамма-всплесков. Все цитируемые далее электронные циркуляры GRB OBSERVATION REPORT GCN с иллюстрациями (прямыми изображениями, кривыми блеска и т.д.) можно найти на сайте Иоганна Грайнера (Jochen Greiner, http://www.aip.de/˜ jcg/grbgen.html) — участника совместных follow-up программ от AIP (Potsdam).

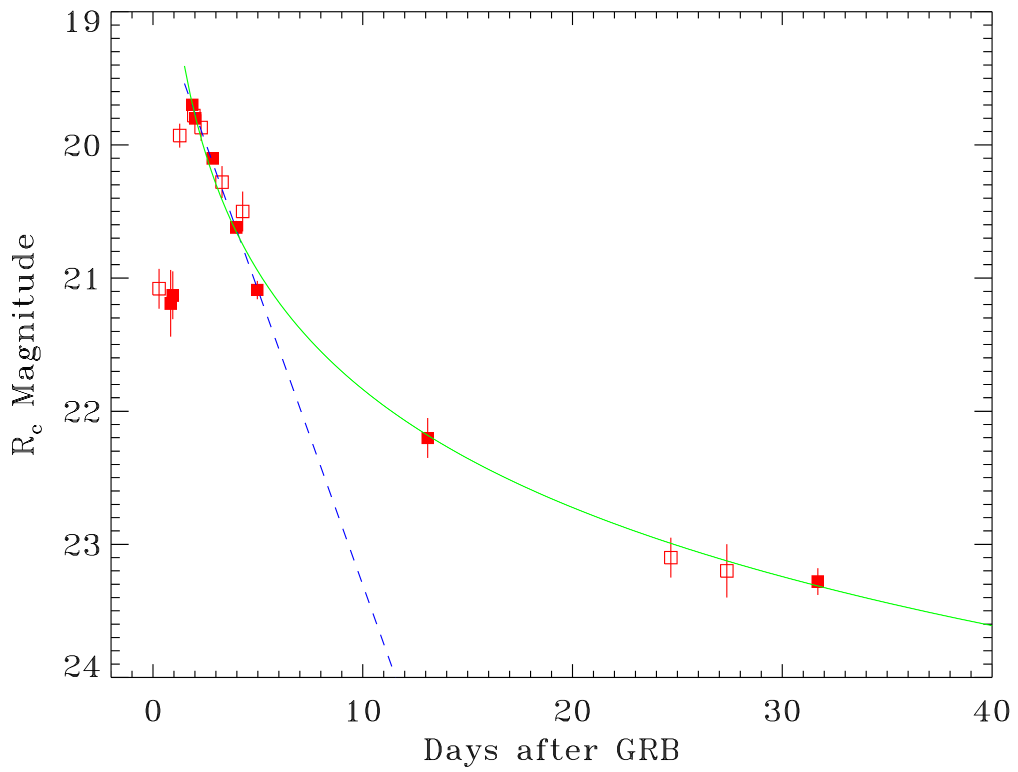


Рис. 1.1. Первые результаты follow-up-наблюдений — лето 1997 г. R_c кривая блеска оптического кандидата для отождествления γ-всплеска GRB 970508, первые 40 суток после всплеска. Закрашенными квадратами показаны данные, полученные в САО РАН (Sokolov et al. 1998). Открытые квадраты — известные к тому времени самые точные данные других авторов: Паломар (Djorgovski et al., 1997; трансформировано к R_c по $R_c = r - 0.34 + A_r$), Хаббловский телескоп (Fruchter et al., 1997), Keck II (Metzger et al., 1997; трансформировано из используемой авторами системы Шефера к стандартной фотометрической системе). Прямая прерывистая линия соответствует экспоненциальному падению блеска после максимума, сплошной линией показан степенной закон падения блеска объекта.

γ-всплеск GRB 970508:
Первые многополосные B, V, R_c, I_c наблюдения переменного объекта Бонда (Bond 1997) были получены на 1-метровом и 6-метровом телескопах САО с мая 9.75 (UT) по май 13.88 (UT). Во время этих наблюдений объект увеличил свой блеск с $R_c = 21.1$ (May 9.89 UT) до $R_c = 19.7$ (May 10.77 UT), а затем начал быстро слабеть (см. Рис. 1.1), и это было заметно в ту же ночь 10/11 мая. (Как впоследствии выяснилось, увеличение блеска на 2-й день было фактически единственным случаем такого немонотонного поведения кривой блеска ОТ среди более чем 20-ти известных к настоящему времени кривых блеска ОТ GRB, об этом более подробно см. в 6-й главе.) По данным наблюдений 10 и 12 мая широкополосный BVR_cI_c спектр сразу после этого максимума приближенно соответствовал некоторому степенному закону со спектральным индексом около -1.5. Дальнейшие, до июня 1997 г., наблюдения переменного объекта Бонда на БТА показали (IAUC 6671), что объект продолжает слабеть, приближенно следуя степенному закону уменьшения блеска с показателем около -1.1 в R-полосе. Первые результаты follow-up-наблюдений лета 1997 г. (наши данные и данные других авторов) в R_c-полосе показаны на Рис. 1.1. Уже по этим первым наблюдениям было отмечено тогда лучшее согласие мониторинга этого объекта в 4-х полосах экспоненциальному (а не степенному) падению блеска транзиентного источника сразу же после максимума, т. е в первые 3-4 ночи.

До августа 1997 г. наблюдения в B, V, R_c и I_c фильтрах (в то время, как остальные наблюдатели отслеживали изменения блеска ОТ GRB 970508 только в R-фильтре) были продолжены и был обнаружен эффект покраснения транзиента или красное "плечо" (red "bump") на кривой блеска в I_c-полосе. Заметные уклонения от некоторого среднего степенного закона падения блеска ОТ стали наблюдаться уже через месяц после всплеска во всех 4-х полосах. Но самый сильный эффект был виден в I_c-фильтре: различие между относительно гладким степенным падением блеска, которому приблизительно следовал поток в R_c-полосе в последнюю дату наблюдений в августе 1997 г. (Aug. 03.989 UT) уже достигало примерно 1.3^m для I_c-полосы. (Эффект подробно описан в двух главах: в главе 3, где эти наблюдения сравнены с другими диапазонами, об интерпретации этого эффекта идет речь в 6-й главе.) Фактически это был первый случай, когда СН, возможно сопровождающая гамма-всплеск, проявила себя в явном фотометрическом $BVRI$ эффекте покраснения ОТ. *Измерения показателей цвета $B - I_c$, $V - I_c$, $R_c - I_c$ ОТ* были проведены в нескольких сетах 4-полосных наблюдений с мая по август 1997 г. Доклад об этом был сделан через год в ноябре 1998 г. на 1-м совещании по гамма-всплескам в Риме, когда на БТА уже наблюдалась только родительская галактика GRB 970508. К этому времени уже было открыто знаменитое "совпадение" ("possible association") GRB 980425 и SN 1998bw (Galama et al. 1998c), но какая-либо связь GRB/SN воспринималась тогда еще довольно скептически (см. в Трудах этого совещания: A&A, 138, No.3, 1999 in "GRB/SN connection"). То, что эффект в $BVRI$ кривой блеска ОТ GRB 970508 действительно может быть связан со СН, было наконец признано, но после того, как такие же явления были обнаружены в последнее время уже в нескольких (в семи) случаях (Bloom et al. 2002).

Далее наблюдения оптического "остатка" гамма-всплеска GRB 970508 были продолжены на 6-метровом телескопе САО РАН все в тех же стандартных B, V, R_c, I_c полосах в октябре-декабре 1997 г. и в январе 1998 г. Результаты наблюдений были опубликованы в GCN GRB OBSERVATION REPORT #31. Объект к этому времени ослабел настолько, что уже можно было говорить о наблюдениях родительской галактики. Во всяком случае, вклад в наблюдаемые потоки от галактики к январю 1998 г. мог быть определяющим. Наблюдения на космическом телескопе Хаббла были проведены в июне 1997 г. (Pian et al. 1998), где были оценены угловые размеры галактики-подложки под ОТ (underlying host galaxy). В первой оценке параметров этой слабой родительской галактики были использованы результаты BVR_cI_c фотометрии мая-августа 1997 г. (Sokolov et al. 1998), данные только что проведенных наблюдений на телескопе Keck-II (Bloom et al. 1998, GCN #30) и на WHT (Castro-Tirado et al. IAUC 6848), а также данные, *приведенные к стандартным* R_c и B фотометрическим полосам, полученные другими авторами (Pedersen et al. 1997, astro-ph/9710322; Garsia et al. 1997, astro-ph/9710346; Galama et al. 1998, astro-ph/9802160). Тогда величины BVR_cI_c родительской галактики были получены с учетом вклада ОТ с помощью простейшей двухкомпонентной модели падения блеска — "степенной закон для ОТ + галактика"). Предполагаемые звездные величины галактики: $I_c = 24.13 \pm 0.28$, $R_c = 25.55 \pm 0.19$, $V = 25.80 \pm 0.14$, $B = 26.68 \pm 0.14$ (Zharykov et al. 1998). Эти ("фитированные" — полученные с помощью модели) величины постоянного источника и малый угловой размер (Pian et al. 1998) протяженного источника-подложки под ОТ были интерпретированы тогда как соответствующие некоторой эллиптической карликовой галактике с абсолютной величиной $M_B = -16.76 \pm 0.14$ при $z = 0.835$ (Metzger et al. 1997c). Это была наша первая попытка оценить абсолютную величину родительской галактики GRB 970508. Более корректно и с учетом более поздних наблюдений (уже без вклада ОТ) оценка M_B сделана в статье Sokolov et al. (1999) и описана в главе 4.

Уже при отождествлении GRB 970508 стали выделяться два главных и *разных по методике наблюдений* направления: мониторинг ОТ и исследование галактик (см. Табл. 1.1). Иногда больше информации по оптическому *отождествлению* гамма-всплесков (например, по измерению z) удавалось получить, исследуя постоянный по блеску источник — родительскую галактику, поскольку follow-up наблюдения самого ОТ по разным причинам не всегда оказывались удачными. Один из примеров такого отождествления рассмотрен ниже. До гамма-всплеска GRB 980613 уже в шести случаях (из 11-ти) были обнаружены соответствующие ОТ. В follow-up наблюдениях трех ОТ (GRB 971214, GRB 980329, GRB 980519) мы не смогли принять участие из-за погоды, но фотометрия родительских галактик на БТА для GRB 980519 и GRB 971214 была проведена позже.

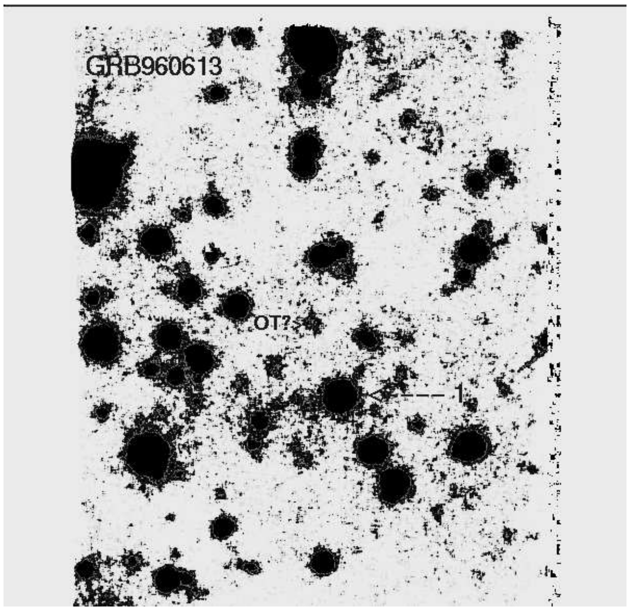


Рис. 1.2. Оптическое отождествление GRB 980613 на БТА. Наблюдения 20/21 июня 1998, когда вклад ОТ был еще заметным. Указана звезда 1 (U1575-03105992), относительно которой проводилась фотометрия. Север внизу, восток справа.

γ-всплеск GRB 980613:

Гамма-всплеск GRB 980613 был вторым после GRB 970508 событием, когда мы (SAO RAS GRB follow-up team) снова смогли принять участие в "преследовании" ОТ GRB (Sokolov et al. GCN#118). Этот γ-всплеск был зарегистрирован 13 июня 1998 г. с помощью BeppoSAX/WFC2, обеспечившим бокс ошибок локализации с радиусом 4 arcmin (Piro, Costa et al. 1998, IAUC 6938, 6939, GCN #99). Срочные наблюдения (TOO) на ВерpoSAX/NFI(MECS) начались через 9 часов (13.56 UT), когда был обнаружен слабеющий рентгеновский источник (рентгеновский транзиент) с локализацией, соответствующей радиусу бокса ошибок $\approx 50''$. После нескольких неудачных попыток исследования WFC и NFI боксов ошибок (Isaac Newton Telescope on LaPalma, 3.5-m CAHA telescope at the German-Spanish Calar Alto Observatory, Palomar 60" telescope, MDM Observatory 2.4m telescope, APO 3.5m telescope) только на 2.5-метровом NOT (Nordic Optical Telescope) J. Hjorth с сотрудниками наконец нашли (июнь 13.9 UT) оптический транзиент (GCN #109) — слабый звездообразный объект с $R = 22.9 \pm 0.2$ при сравнении с CCD-изображением, полученным до того же предела 17.9 июня UT, на котором этот объект уже не обнаруживался из-за быстрого падения блеска. Локализация источника согласовалась с боксами ошибок BeppoSAX/WFC2 и BeppoSAX/NFI(MECS). Затем был доклад о наблюдениях на телескопе Keck-II (UT 1998 June 16.3) в полосе R родительской галактики — некоторого протяженного объекта в $1.5 - 2$ arcsec около положения точечного объекта (OT GRB). Полный блеск (OT + галактика) был тогда равен $R \approx 23.3$ (Djorgovski et al. GCN #114, #117).

OT GRB 980613 был обнаружен в наблюдениях на БТА 20/21 июня 1998 г (20.858 UT). Первый результат участия САО в в наблюдениях (энергичного преследования) OT GRB 980613 показан на Рис. 1.2. Эти кооперативные наблюдения состоялись через 7.3 суток после события, когда было сделано 6 экспозиций в полосе R_c и был обнаружен источник, указанный Hjorth et al. В первых наблюдениях поля GRB 980613 на БТА условия были нефотометрическими и с плохим качеством изображения (seeing около $3.0''$). Полное время экспозиции было 3600 с. Для калибровок использована звезда U1575-03105992 из GCN #109 (Hjorth et al.), а также мы использовали фотометрию звезды 4_r в WFC-боксе, сделанную на Palomar 60" из GCN #105 (Odewahn et al.), предполагая связь с их r-полосой в виде $r - R_c = 0.35$. Предварительная фотометрия объекта J. Hjorth в полосе, близкой к Cousins R_c-фильтру, привела к оценке блеска $R_c = 23.17 \pm 0.08$ (в июне 20.858 UT для суммы — OT плюс родительская галактика). Хотя результат не согласуется с верхним формальным (10σ) пределом $R > 24.0$, полученным Hjorth et al. (GCN #109) 17.9088 июня UT, но оценка блеска близка к той, что получили Djorgovski et al. на Keck-II 16.3 июня UT ($R = 23.3 \pm 0.3$) для суммы OT+галактика. С учетом большого вклада родительской галактики в полный поток от объекта после 16 июня, темп падения блеска самого OT примерно соответствует степенному закону с показателем -1.0, что уже наблюдалось и в других случаях OT GRB. Таким образом, можно было предположить, что в наблюдениях на БТА галактика уже дает основной вклад в поток.

По исследованиям этого поля позже было сообщение Halpern et al. (MDM /Columbia) в GCN # 134 с результатами: $R = 22.96 \pm 0.09$ (June 14.24 UT), $I = 22.53 \pm 0.09$ (June 14.20 UT), $I = 22.83 \pm 0.15$ (June 15.19 UT), но оно относилось к UT-дате, близкой к той, что была у J. Hjorth et al. (GCN No.109), когда он обнаружил OT. Более поздние (чем на БТА) наблюдения этого OT автору неизвестны. Наблюдений самого OT GRB 980613 было мало для этого всплеска, значительно меньше, чем в случае OT GRB 970508, который был 21^m в момент обнаружения и 19.7^m в максимуме блеска. OT GRB 980613 был слабым с самого начала — около 23^m уже через 17 часов после обнаружения. Как потом стало ясно, наблюдения на БТА 20/21 июня оказались самыми поздними наблюдениями оптического компаньона GRB 980613, когда вклад OT GRB мог быть еще заметным. Летом 1998 г. это был еще только 7-й всплеск, отождествленный в оптике, и было еще очень мало информации по кривым блеска OT GRB в оптике. Поэтому любые более-менее удачные follow-up наблюдения, иногда не в очень хороших для фотометрии условиях, помогали провести следующую серию попыток более корректно и оправдать затраты наблюдательного времени на больших телескопах, особенно в условиях срочного прерывания текущих программ.

Значительно больший (чем мониторинг OT GRB) вклад в астрономию γ-всплесков дали исследования родительской галактики этого всплеска. Первые (еще "плохие") наблюдения 20/21 июня поля GRB 980613 помогли провести на БТА в следующем месяце 23/24 июля 1998 г. специальные наблюдения галактики в стандартных BVR_c-полосах при гораздо лучших фотометрических условиях и при seeing $1.3''$-$1.5''$. Они дали такие результаты: $B = 24.77 \pm 0.25$, $V = 23.94 \pm 0.21$, $R_c = 23.58 \pm 0.10$ (исправлено за галактическое поглощение с $A_V = 0.28$). Все более поздние наблюдения в оптике для γ-всплеска GRB 980613 уже можно относить только к его родительской галактике. В декабре (17 Dec 1998 UT) на Keck-I были проведены измерения спектра галактики (Djorgovski et al. GCN #189), измерено $z = 1.0964 \pm 0.0003$, найдены характерные признаки (эмиссия [O II] 3727Å) галактики со звездообразованием. Хотя интерпретация этого спектра была еще достаточно осторожной и с оговорками (это было еще только 4-е измерение z), но уже тогда можно было определенно сказать, что и спектр и морфология этой очень голубой галактики (или взаимодействующих галактик?) типичны для галактик со звездообразованием при таких значениях z. Эти результаты были получены уже после успешного иссле-

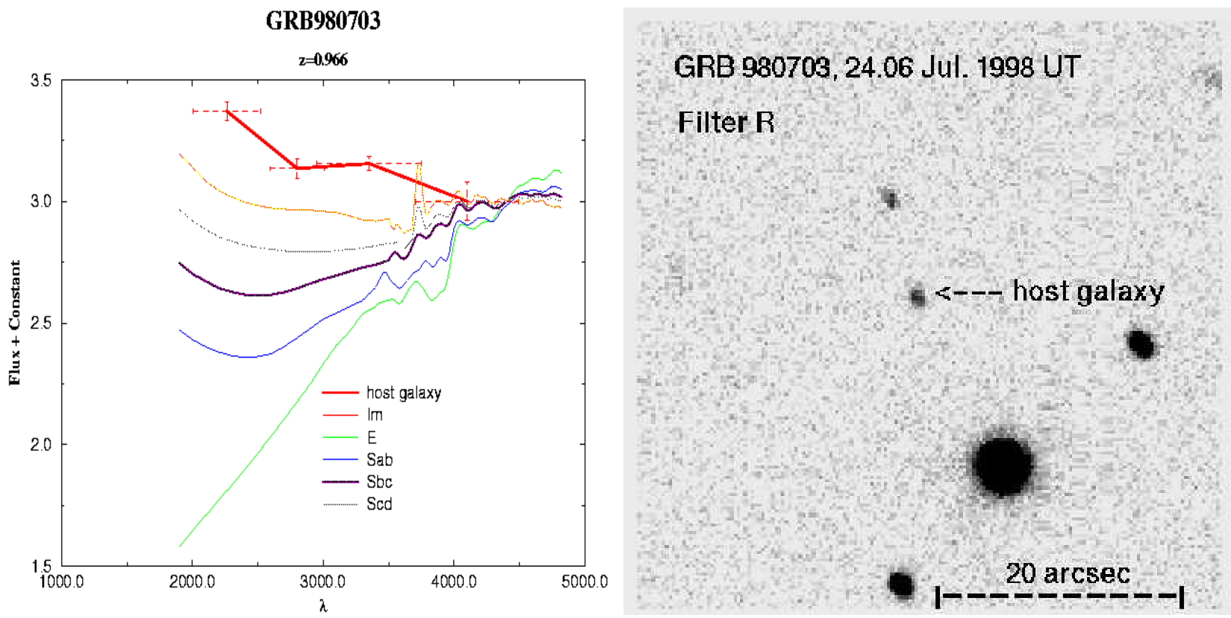


Рис. 1.3. Многоцветная фотометрия и изображение в R_c-фильтре поля родительской галактики γ-всплеска GRB 980703 по наблюдениям на БТА в июле 1998. Показано сравнение полученного по BVR_cI_c-потокам распределения энергии (с учетом сдвига в ультрафиолетовую область спектра для $z = 0.966$) этой галактики с распределениями энергий в спектрах галактик различных хаббловских типов. Все спектры показаны в шкале "Flux + Constant" с произвольной (по оси потоков) постоянной: $\log(F_\lambda) = \log F_\lambda(obs) + C$, где потоки измерены в эрг см$^{-2}$ с$^{-1}$ Å^{-1} и λ в Å. Полуширины каждого фильтра для его λ_{eff} с учетом сдвига влево для $z = 0.966$ обозначены пунктирными горизонтальными отрезками с барами.

дования самого далекого (в 1998 г.) гамма-всплеска GRB 971214 и его галактики (Kulkarni et al. 1998a). Продолжение исследований родительской галактики GRB 980613 изложено в работе Djorgovski et al. (2000) и в нашей Sokolov et al. (2001), о HST/STIS наблюдениях см. в GCN #777 (Holland et al.). Таким образом, быстро ослабевший ОТ (что подтверждено и оценками блеска 20/21 июня 1998 г., Рис. 1.2) и фотометрические данные, полученные Djorgovski et al. (GCN #189) в декабре на Keck-I, позволяют считать, что через месяц после γ-всплеска GRB 980613 (23/24 июля 1998 г.) на БТА наблюдалась "чистая" родительская галактика, т. е. уже без какого-либо вклада ОТ. Более подробно об этих наблюдениях и об их интерпретации сказано в 5-й главе.

γ-всплеск GRB 980703:
Тогда же, в июле 1998 г. (24.01 UT) на БТА была проведена многоцветная (BVR_cI_c) фотометрия родительской галактики γ-всплеска GRB 980703 (Sokolov et al. GCN #147). Используя результаты наблюдений на Keck-II (Djorgovski et al. GCN #137, #139) уже отождествленных в оптическом и

в радио диапазонах транзиентов, для предполагаемой родительской галактики GRB 980703 были получены 4 экспозиции: B (480 sec), V (420 sec), R_c (300 sec) и I_c (360 sec). И в этом случае ОТ GRB ослабел очень быстро и уже через 20 суток после всплеска можно было говорить о наблюдениях галактики с минимальным вкладом транзиентного источника. На CCD-изображениях был уверенно обнаружен протяженный объект во всех 4-х BVR_cI_c полосах — родительскую галактику γ-всплеска, совпавшую с положениями рентгеновского, оптического и радио транзиентов. Одно из изображений в R_c фильтре показано на Рис. 1.3. Условия наблюдений были фотометрическими с размером изображения (seeing) $1.15''$. Фотометрические калибровки выполнены по звездам PG2336+004 и PG2331+055 из каталога Ландольта. Фотометрия родительской галактики GRB 980703 сделана в апертуре диаметром $4''$. Результаты: $B = 23.04 \pm 0.09$, $V = 23.02 \pm 0.10$, $R_c = 22.43 \pm 0.08$, $I_c = 22.10 \pm 0.18$. Это соответствует результатам спектральных наблюдений на Keck-II (Djorgovski et al. GCN #137) — галактика опять оказалась очень голубой по показателям цвета, что соответствует галактике со звездообразованием. На Рис. 1.3 показано сравнение полученного по BVR_cI_c-потокам распределения энергии (с учетом сдвига в ультрафиолетовую область спектра при $z = 0.966$) для этой галактики с распределениями энергий в спектрах галактик различных хаббловских типов. Как правило, *все* родительские галактики γ-всплесков, отождествленные тогда и позже (с $R > 22$), почти всегда, когда удавалось провести такие наблюдения, детектируются либо во всем оптическом диапазоне (от B до I полосы), либо хотя бы в одной из полос для очень слабых объектов. Для z порядка и больше 1 наблюдаемый оптический диапазон соответствует далекой ультрафиолетовой части непрерывного спектра этих галактик, определяемой областями звездообразования. Уже одно это может быть *наблюдательным признаком*, явно указывающим на молодые галактики со звездообразованием. В главе 5 результаты фотометрии родительской галактики GRB 980703 сравниваются с результатами ее спектроскопии на LRIS/Kesk II и с результатами моделирования распределения энергии учитывающими эффекты звездообразования и внутреннего поглощения в самой галактике. В 1998 г. это была *самая яркая* из родительских галактик.

γ-всплеск GRB 980519:
Гамма-всплеск GRB 980519 был отождествлен (как и GRB 980703) во всех диапазонах — рентген, оптика, радио. Очень крутое падение блеска в оптике (степенное с показателем ≈ -2) Halpern et al. 1999) не позволило принять участие в "преследовании" и отождествлении ОТ этого всплес-

ка на БТА. Но здесь мы первыми доложили о том, что наблюдаем самую слабую в 1998 г. родительскую галактику $\approx 26^m$ (Sokolov et al. #148). Ее красное смещение не измерено до сих пор. Как выяснилось из более поздних результатов оптических отождествлений γ-всплесков, родительские галактики могут быть более слабыми и еще более далекими объектами, чем самая далекая в 1998 г. родительская галактика GRB 971214 ($z = 3.418$) с $V = 25.38 \pm 0.3$ и $R_c = 25.65 \pm 0.3$ по измерениям блеска в июле 1998 г. На БТА (июль 1998 г., 23.85 UT и 24.96 UT) в R_c полосе был получено CCD-изображение поля ОТ γ-всплеска GRB 980519 (Jaunsen et al. GCN #78). Полное время наблюдений 9600 с, с экспозициями по 600 с. Условия были фотометрическими со средним изображением $1.20''$. Слабый протяженный источник ясно виден (Рис. 1.4) в том месте, где ранее находили ОТ всплеска GRB 980519. Из-за слабости объекта ($R_c = 26.05 \pm 0.22$) нельзя было ничего сказать о его переменности по результатам наблюдений двух ночей, если допустить какой-то вклад ОТ. В пределах ошибок величина объекта была одной и той же. Фотометрия этого объекта сделана в апертуре с диаметром $2.5''$по сумме наблюдений за 2 ночи. Для фотометрических калибровок использованы вторичные фотометрические стандарты из GCN #96 (Henden et al.). Если исходить из времени оптических наблюдений GRB 980519 ОТ на телескопах Keck и (5 м) Palomar (Gal et al. GCN #88, тоже в R полосе), то предполагаемый темп степенного падения блеска ОТ соответствует показателю -1.98 (Djorgovski et al. GCN #79), что позволяет считать, что вклад ОТ уже был необнаружимым к эпохе наблюдений на БТА. Т. о., мы заключили, что ОТ давно не дает заметного вклада в поток и наблюдаемый протяженный объект — родительская галактика GRB 980519 — может быть самой слабой из всех наблюдаемых родительских галактик γ-всплесков к тому моменту. На Рис. 1.4 показано суммарное изображение в фильтре R_c и указаны вторичные стандарты в поле GRB 980519 — звезды A, B и E из GCN #96 (Henden et al.). В следующем (после GCN #148) электронном циркуляре были доложены (Bloom et al. GCN #149) результаты наблюдений на Keck-II/LRIS, проведенных 18 июля 1998 г. (18.516 UT), подтверждающих существование слабого объекта с $R_c = 26.1 \pm 0.3$, найденного на БТА в том же месте, где обнаруживался ранее ОТ GRB 980519 (Jaunsen et al. GCN #78). Морфология этой галактики была позже исследована на HST (Jaunsen et al. 2002).

γ-всплеск GRB 990123:

В циркуляре GCN #209 (Sokolov et al.) было доложено о follow-up наблюдениях ОТ γ-всплеска GRB 990123. Это также были кооперативные наблюдения до сих пор самого мощного из всех γ-всплесков. Энерговыделение $\sim 10^{54}$ эрг заставило всех думать, что γ-всплеск должен быть связан с каким-то неизотропным излучением источника. К тому же это был тот случай, когда оптическая вспышка наблюдалась почти одновременно с γ-всплеском (Akerlof et al. GCN #205, Castro-Tirado et al. astro-ph/0206201). На БТА CCD-снимок области локализации всплеска был получен в R-фильтре GRB 990123 24 января 1999 г. (24.076 UT), через 16.04 часов после γ-всплеска. Хотя условия наблюдений были плохими, при 15-минутной экспозиции удалось обнаружить объект, совпадающий с положением (относительно ярких звезд поля) оптического кандидата для отождествления GRB, предложенного в GCN #201 (Odewahn et al.). Используя звезду 1 из GCN #204 (Zhu и Zhang) и звезду 2 из того же GCN #204, удалось сделать также оценки звездной величины объекта: $19^m.6 \pm 0.2$ и $19^m.9 \pm 0.2$ соответственно. Эти величины включают еще вклад (около $0^m.25$) от родительской галактики $R = 21.3$ (Odewahn et al. GCN #201). Беря среднее от этих двух оценок и учитывая возможный вклад галактики, мы получили для ОТ $R = 19.9 \pm 0.2$, что согласовалось со степенным падением блеска с показателем степени -1.5, который был предложен Bloom et al. (GCN #208). Эти данные были использованы в сводке всех результатов по GRB 990123 при получении полного представления о поведении этого ОТ GRB со временем (Sari & Piran 1999).

γ-всплеск GRB 991208:
Мы приняли участие, совместно с А. Кастро-Тирадо (INTA, Madrid and IAA, Granada) и другими наблюдателями, в кооперативных follow-up наблюдениях ОТ яркого ($S \sim 10^{-4}$ эрг см$^{-2}$; Hurley et al, GCN #450) γ-всплеска GRB 991208. В этих наблюдениях впервые на БТА удалось получить *спектр* транзиента (GCN #461 и #475) и одновременно измерить блеск ОТ на 1-метровом телескопе САО. Один спектр с временем накопления 2700 с и второй с накоплением 4500 с для ОТ, найденного A. Castro-Tirado et al. (GCN #452), были получены С. Н. Додоновым в ночи 13 и 14 декабря 1999 г. Условия наблюдений в первую ночь 13 декабря были плохими, с изображениями около $3''$при средней прозрачности неба и, т. о., первый спектр следует считать лишь оценкой возможностей аппаратуры.

В ночь 14/15 декабря наблюдательные условия были значительно лучшими, изображения около $1.5''$(при зенитном расстоянии 60^o) и при хорошей прозрачности. Таким образом, во вторую ночь удалось получить спектр с гораздо лучшим отношением сигнал/шум (S/N), чем в первую. Наблюдения были выполнены (в кооперации с сотрудниками Лаборатории

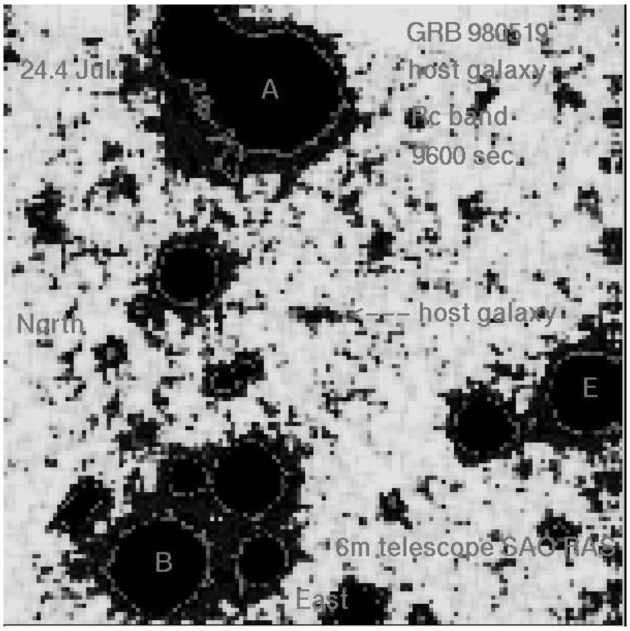


Рис. 1.4. Отождествление GRB 980519 на БТА. Самая слабая (в центре рис.) из родительских галактик γ-всплесков к тому моменту (июль 1998 г.) с $R_c = 26.05 \pm 0.22$. Показано суммарное изображение в фильтре R_c и указаны вторичные стандарты в поле GRB 980519 — звезды A ($R = 17.914$), B ($R = 19.318$) и E ($R = 19.998$) из GCN #96 (Henden et al.)

спектроскопии и фотометрии внегалактических объектов САО) с интергальным полевым спектрографом MPFS (Multi Pupil Fiber Spectrograph) с решеткой 300 lines/mm при спектральном разрешении около 5 Å/пиксел на 6000Å в эффективном интервале длин волн от 4100Å до 9200Å. Для калибровки потоков были использованы два спектрофотометрических стандарта HZ44 и BD+75d325 (Oke et al. 1995). Оба спектра показали голубой континуум, а второй (с лучшим отношением S/N для 14.14 Dec 1999 UT) — возможно две эмиссионные линии. Более подробный анализ (В. Л. Афанасьев и С. Н. Додонов) показал присутствие эмиссионных линий на $\lambda =$ 6350Å, 8550Å и 8470Å, с наиболее вероятным отождествлением этих эмиссий как: [OII] 3727Å, [OIII] 4959, 5007Å , при космологическом красном смещении $z = 0.707 \pm 0.002$. Мы предположили, что такие сильные эмиссии могут принадлежать только родительской галактике ОТ (Рис. 1.5). Это был редкий случай, когда на спектр довольно яркого ($21^m.6$ величины) ОТ наложились *сильные* эмиссии спектра родительской галактики (об этом более подробно см. в главе 5). Группа follow-up наблюдений оптических транзиентов γ-всплесков на телескопе Keck II подтвердила этот результат (Djorgovski et al. 1999, GCN #481). Они перекалибровали и сложили свои спектры, полученные на Keck-II/LRIS для ОТ GRB 991208 в ночи 14 и 15 декабря 1999 г. Сумма спектров с улучшенным S/N действительно показала существование (при их дисперсии 2.47Å/пиксел) эмиссионных линий на наблюдаемых длинах волн 6356Å, 8454Å, и 8545Å, уже доложенных нами в GCN #475. Интерпретация этих эмиссий как [O II] 3727Å и [O III] 4959Å, 5007Å, привела к величине $z = 0.7055 \pm 0.0005$.

В эту же вторую ночь 14 декабря, одновременно со спектроскопическими наблюдениямина БТА поле OT GRB 991208 было исследовано на 1-метровом телескопе САО (Zeiss-1000) с CCD-фотометром в R_c (Cousins) фотометрической полосе. Две 10-минутные экспозиции были получены при воздушной массе около 1.6 и в хороших фотометрических условиях. Оценка блеска для OT GRB 991208 на Zeiss-1000 дала $R_c = 21.6 \pm 0.3$ (Dec 14.14 UT). Для фотометрической калибровки использовались стандарты из каталога Ландольта. Эти данные (и данные более поздних наших наблюдений 31 марта 2000 г) использованы в совместной статье Castro-Tirado et al. (2001b), где кривая блеска этого транзиента проанализирована более подробно. Более детальный анализ спектра (Рис. 1.5) потом выявил присутствие линии H_β в спектре (подробно об интерпретации эмиссионного спектра родительской галактики см. в главе 5).

Специальные BVR_cI_c фотометрические наблюдения родительской галактики γ-всплеска GRB 991208 были проведены на БТА 31 марта 2000 г. На CCD-кадре в месте, совпадающем с положением OT в декабре, была обнаружена слабая галактика с величинами: $B = 25.18 \pm 0.16$, $V = 24.63 \pm 0.16$, $R_c = 24.36 \pm 0.15$ и $I_c = 23.70 \pm 0.28$. Эти результаты были опубликованы в нашей работе по интерпретации кривой блеска OT GRB 991208 в четырех фотометрических полосах (Castro-Tirado et al. 2001b), целью которой был поиск проявлений сверхновой. Затем фотометрические наблюдения галактики GRB 991208 с использованием полученных в САО фотометрических данных (в том числе и для подготовки заявки-задания) были продолжены позже на космическом телескопе Хаббла (HST) в совместной программе исследований морфологии этого объекта.

Прямые снимки с БТА и HST поля родительской галактики GRB 991208 приведены на Рис. 1.6. Результаты наблюдений и обработки опубликованы в совместном циркуляре (Fruchter et al. 2000, GCN #872). Наблюдения HST/STIS/50CCD этого поля состоялись 3 августа 2000 г. или приблизительно через 8 месяцев после всплеска. Полное время экспозиции 5210 с в спектральном интервале, близком к стандартной полосе V (50CCD). В положении, где раньше наблюдался OT, найдена очень компактная галактика с величиной $V = 24.6 \pm 0.15$ (в ошибку вошли неопределенности калибро-

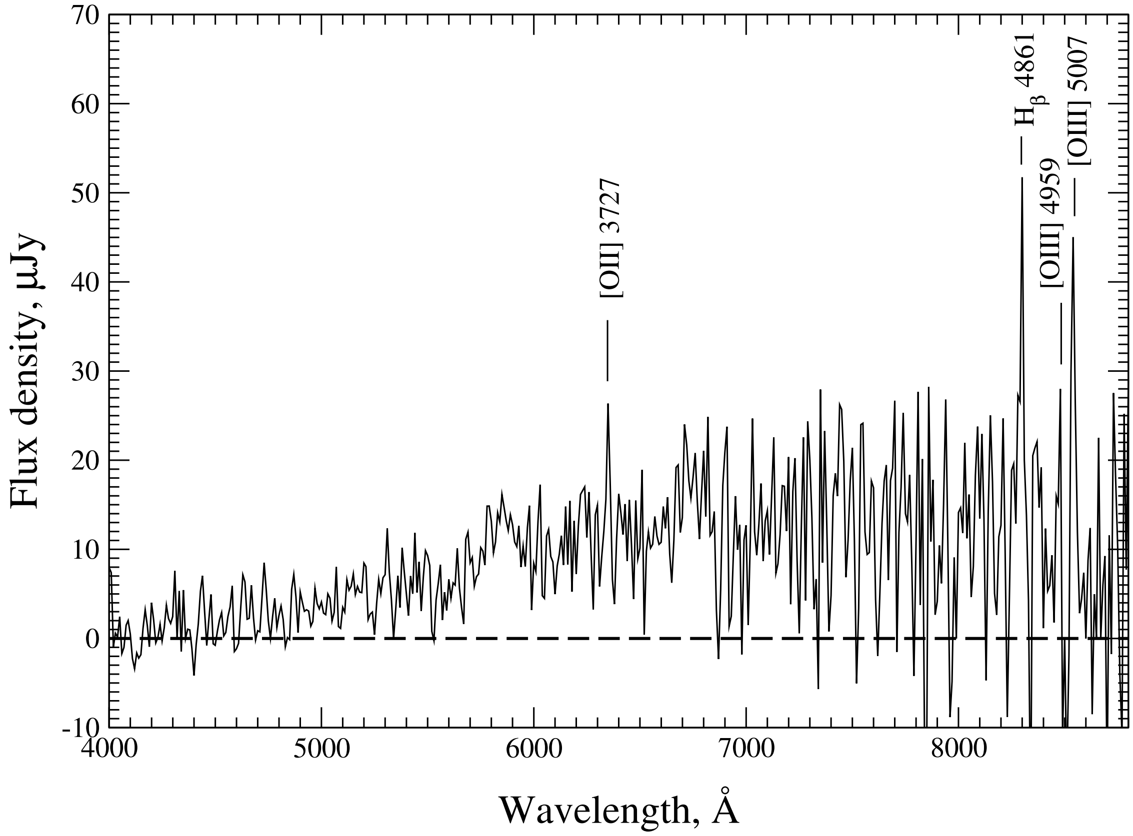
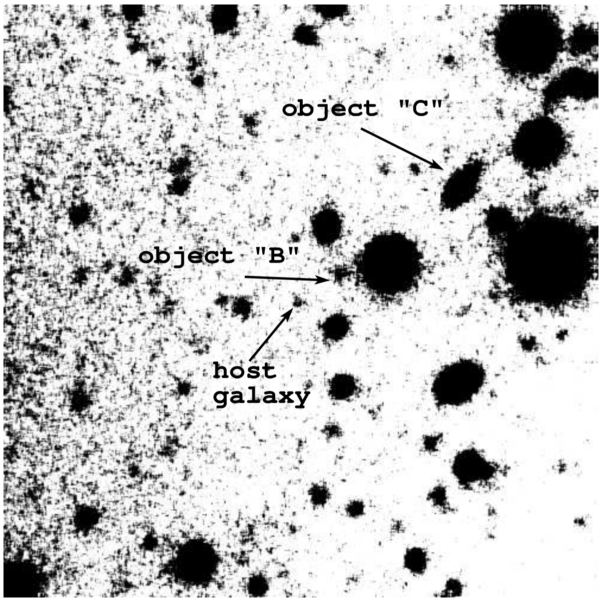


Рис. 1.5. Спектр оптического транзиента γ-всплеска GRB 991208, полученный в follow-up наблюдениях 14 декабря 1999 г с MPFS на 6-метровом телескопе.

вок широкой STIS/50CCD-полосы). Фрагмент поля GRB 991208 $3'' \times 3''$ с этой галактикой (*очень похожей* по морфологии на галактику GRB 970508) изображен на Рис. 1.7. Астрометрическое положение транзиента указано кружком. Полуширина объекта на половине максимума (FWHM) около 0."095. Оценка полуширины ядра галактики дает меньше, чем 0."06. Сравнение HST-изображения с изображениями ОТ, полученными на Земле (Castro-Tirado et al. 2001b, Castro-Tirado et al. 1999, GCN #452), показывает, что положение ОТ сдвинуто относительно центра родительской галактики менее чем на 0."1 ($< 1\sigma$ погрешности в относительных положениях). Здесь прямо видно, что ОТ наверняка находится в *самой яркой* части этой компактной галактики. А небольшая эллиптичность, замеченная еще в наземных наблюдениях (на Keck-II, Bloom et al. GCN #764), может быть объяснена присутствием более слабого объекта (Рис. 1.7) в 1" от родительской галактики. Пока не ясно, физическая ли это пара или просто проекция. В 5-й главе с использованием всех полученых наблюдательных данных для этой галактики оценены ее светимость, внутреннее поглощение и темп звездообразования (Sokolov et al, 2001a).



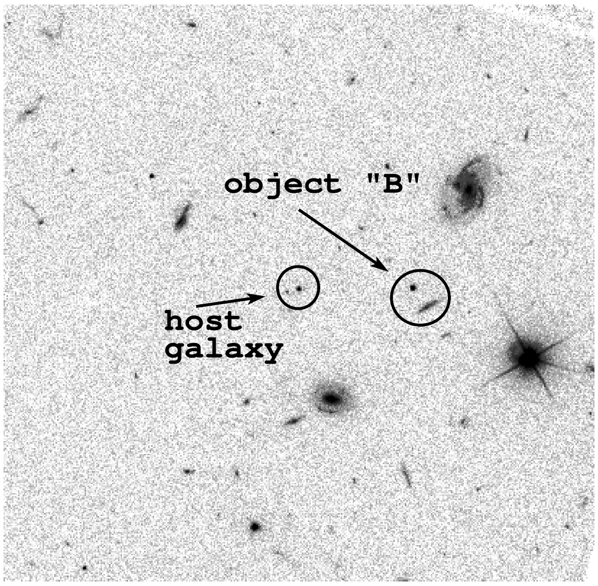


Рис. 1.6. CCD-изображение $2.5' \times 2.5'$ поля родительской галактики GRB 991208 (V-фильтр) на БТА и $40'' \times 40''$ STIS CCD изображение его центральной части, полученное 3 августа 2000 г на Хаббловском телескопе (N – вверх, E – влево).

С учетом результатов совместных follow-up наблюдений с другими группами в 1997-2000 гг. *отождествление гамма-всплесков в оптическом диапазоне* таким образом значит, что в большом ($> 1'$) боксе ошибок слабеющего с характерным темпом рентгеновского источника, обнаруживаемого в области локализации гамма-всплеска, надо найти оптический источник — ОТ гамма-всплеска, тоже слабеющий после максимума ($20^m - 22^m$) *с характерным темпом* уменьшения блеска на временах дни/недели ($\sim t^{-1}$ и быстрее). Как правило, такое отождествление завершается, когда в месте, которое соответствует астрометрическому положению ОТ, транзиентного IR источника или положению радиотранзиента, находится слабый ($> 21^m$) протяженный голубой объект — родительская галактика гамма-всплеска. И всегда такая галактика оказывается галактикой с признаками (цвета, спектры и морфология) вспышки звездообразования.

Т. о., во этой (вводной) главе сделан *обзор по отождествлению в оптике*, с учетом результатов, полученных как в САО (до весны 2000 г.), так и по результатам других групп, с которыми было налажено сотрудничество. Мы принимали участие в исследовании почти всех открытых к 2000 г. на северном небе оптических объектов, связанных в γ-всплесками, и на основании результатов этих наблюдений были сформулированы главные вопросы (см. нижний уровень Табл. 1.1), на которые можно было ответить, используя полученные (в том числе и в САО РАН) данные, а также

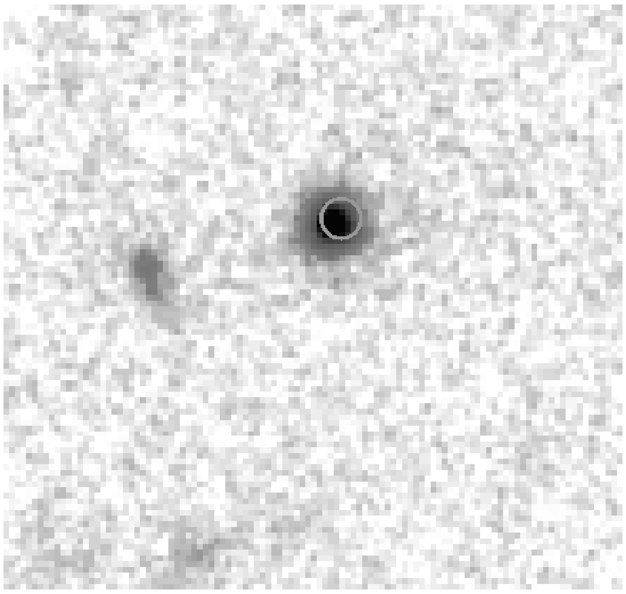


Рис. 1.7. Родительская галактика γ-всплеска GRB 991208. Фрагмент размером $3'' \times 3''$ HST/STIS/50CCD-поля GRB 991208, показанного на Рис. 1.6. Положение, которое занимал оптический транзиент в декабре 1999 г., указано кружком. (N – вверх, E – влево)

была сформулирована основная цель диссертационной работы — пролить свет на проблему прародителей, изучая ОТ и связанные с ними галактики.

В следующей главе более подробно сказано о методике фотометрии слабых объектов и о начальном периоде отождествления (до эры BeppoSAX). В последующих главах речь идет о наблюдениях и об интерпретации собранных данных по ОТ GRB и по родительским галактикам в согласии со схемой Табл. 1.1. Во введении к каждой из глав и в обсуждении их результатов упомянуты и самые новые (вплоть до 2002 г.) исследования по каждой из конкретных задач, решаемых в диссертации.

Все GCN циркуляры, появляющиеся в реальном времени, можно найти на сайте GCN-системы:
`http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3_archive.html`
GCN-телеграммы или GCN-система (GRB Coordinares Network) специально была создана (Barthelmy et al. 1995, 1996) для быстрого оповещения о новых гамма-всплесках и о результатах follow-up наблюдений во всех диапазонах. На том же сайте можно найти и весь архив системы BACODINE (BATSE COordinares DIstribution Network). Кроме того, все цитируемые выше и далее GCN-циркуляры с иллюстрациями, координатами объектов, прямыми изображениями, кривыми блеска и другой информацией, взятой

из авторских сайтов (в том числе и из нашего:
`http://www.sao.ru/~sokolov/GRB/GRB1.html`), можно найти и на специализированном сайте Иоганна Грайнера (Jochen Greiner):
`http://www.aip.de/~jcg/grbgen.html`
Здесь собрана информация обо всех более-менее удачных follow-up наблюдениях и их первичной интерпретации, начиная с самых первых отождествлений весны 1997 г.

Результаты диссертации изложены в публикациях:

1. V. V. Sokolov, A. I. Kopylov, S. V. Zharikov, "Optical studies of gamma-ray burst field GRB 790418 at the 6-m telescope", Bull. Spec. Astrophys. Obs., 1994, 38: 46-57

2. V. V. Sokolov, A. I. Kopylov, V. G. Kurt, S. V.Zharikov, "The Deep Search for Optical Counterparts of Gamma-ray Bursters at the 6-meter Telescope", Lecture Notes in Physics, in Proc. IAU Coll. 151, "Flares and Flashes", Sonnenberg-Germany, Dec. 5-9, 1994, eds.: J. Greiner et al., Springer, 389-392

3. V. V. Sokolov, A. I. Kopylov, S. V.Zharikov, V. G. Kurt, Berezin A. V., "The search and investigation of weak blue star-like objects in small GRB error boxes", Astrophys. and Space Sci., 231: 343-346, 1995

4. S.V.Zharikov, A.I. Kopylov, V.V. Sokolov, "The investigation of Moskalenko's 1959 Optical Transient field inside GRB 791101 error box", Astrophys. and Space Sci., 231: 347-350, 1995

5. B.J.McNamara, T.V.Harrison, C.I.Williams, R.M.Wagner, V. V, Sokolov, A. I. Kopylov, S.V.Zharikov, "X-ray and optical observations of the COMPTEL error box for GRB 910601", Astronomical Journal, 110: 232-237, 1995

6. Kurt, V. G., Komberg, B. V, Sokolov, V. V., Zharykov, S. V., "Optical Observations of the Nearby Isolated Pulsar PSR 0656+14 at the SAO 6-meter Telescope", 1997a, Astrophysics and Space Science (A&SS), v. 252, Issue 1/2, p. 451-460.

7. Kurt V.G., Komberg B.V., Sokolov V.V., Zharikov S.V., Pavlov G.G., "Optical Observations of the PSR 0656+14" 1997b, IAU Circ. 6533

8. Соколов В.В., Курт В.Г., Копылов А.И., Жариков С.В. и Березин А.В., "Поиск слабых голубых звездообразных объектов в центральной части области локализации гамма-всплеска 13 июня 1979 года", Письма в АЖ, 22/8: 563-570, 1996

9. V. V. Sokolov, A. I. Kopylov, V. G. Kurt, S. V.Zharikov, Berezin A.V., "The Deepest Optical Investigation of The GRB 790613 Error Box", in proc.

of 3th Huntsville Symp. on GRB, AIP, 697-701, 1996

10. V. V. Sokolov, A. I. Kopylov, V. G. Kurt, S. V.Zharikov, Berezin A.V., "Deep photometric study of the region of the gamma-ray burst localization of June 13, 1979". Bull. Spec. Astrophys. Obs., 1997, 43, 5-17

11. Kurt, V.G., Sokolov V.V., Zharikov S.V., Pavlov G.G., Komberg B.V., "BVRI observations of PSR B0656+14 with the 6-meter telescope", 1998, A&A, 333, 547-556.

12. A. I. Kopylov, V. V. Sokolov, S. V. Zharikov, M. Feroci, E. Palazzi, "GRB 970508: Optical multicolor observations", IAU Circulars No. 6663 and No. 6671, 1997 May 16

13. S. V. Zharikov, V. V. Sokolov, and Yu. V. Baryshev, "GRB 970508 SAO RAS optical observations", 1998, GRB OBSERVATION REPORT GCN # 31,

14. V. Sokolov, S. Zharikov, L. Piro, E. Costa, L. Nicastro and E. Palazzi "GRB 980613, optical observations", 1998, GCN #118

15. V. Sokolov, S. Zharikov, I. Panchenko, "GRB 980703, Host galaxy multicolor photometry", 1998, GCN #147

16. V. Sokolov, S. Zharikov, E. Palazzi, L. Nicastro, "GRB 980519, Optical observation", 1998, GCN #148

17. V. V. Sokolov, A. I. Kopylov, S. V. Zharikov, "Оптическое отождествление гамма-барстеров/ The GRB follow-up observations", Отчет САО – 1997 – SAO Report, Специальная Астрофизическая Обсерватория РАН, 1998, стр. 52, 61

18. V. Sokolov, S. Zharikov, L. Nicastro, M. Feroci, E. Palazzi, "GRB990123, Optical observation", 1999, GCN #209

19. V. V. Sokolov, S. V. Zharikov, "Исследование γ-всплесков/ Investigation of γ-bursts", Отчет САО – 1998 – SAO Report, Специальная Астрофизическая Обсерватория РАН, 1999, стр. 23 - 25

20. S. Dodonov, V. Afanasiev, V. Sokolov, V. Komarova, T. Fatkhullin, A. Moiseev., 1999, "GRB 991208 SAO RAS follow-up observations", GCN #461

21. S.N. Dodonov, V.L. Afanasiev, V.V. Sokolov, A.V. Moiseev, and A. Castro-Tirado., 1999, "GRB 991208 SAO-RAS Spectroscopy", GCN #475

22. A. Fruchter, P. Vreeswijk, V. Sokolov, A. Casto-Tirado, 2000, "GRB 991208: HST Imaging of the Host Galaxy", GCN #872

23. V.V. Sokolov , A.I. Kopylov , S.V. Zharikov, E. Costa, M. Feroci, L. Nicastro, and E. Palazzi, "Multicolor photometry of the GRB 970508 optical

remnant Gamma Ray Burst", 4th Huntsville Symposium AIP Conf. Proc. 428, pp. 525-529 (AIP, New York, 1997) (astro-ph/9709093)

24. V.V. Sokolov , A.I. Kopylov , S.V. Zharikov, M. Feroci, L. Nicastro, E. Palazzi. "BVR_cI_c photometry of GRB970508 optical remaint: May-August, 1997", (astro-ph/9802341) 1998 Astron. & Astrophys., 334, 117-123

25. Zharikov S.V., Sokolov V.V., Baryshev Yu. V., BVR_cI_c light curves of GRB970508 optical remnant and colors of underlying host galaxy, 1998, Astron. & Astrophys., 337, 356-362

26. V. V. Sokolov, S. V. Zharikov, Yu. V. Baryshev, M. O. Hanski, K. Nilsson, P. Teerikorpi, L. Nicastro, E. Palazzi, "Properties of the host galaxy of the gamma-ray burst 970508 and local star-forming galaxy", 1999, Astron. & Astrophys., 344, 43-50

27. Zharikov S.V., Sokolov V.V., "BVR_cI_c light curves of GRB970508 optical remnant and magnitudes of underlying host galaxy", 1999, Astron. & Astrophys. Suppl. Ser. 138, 485-486

28. Sokolov V.V., Fatkhullin T.A., Komarova V.N.. "BVR_cI_c photometry of GRB 980703 and GRB 990123 host galaxies", 2000, Bulletin SAO RAS, v.49, 14-19 (astro-ph/0001357)

29. V. V. Sokolov, T. A. Fatkhullin, V. N. Komarova, "The multiband photometry of GRB host galaxies", in book of "Abstracts of JENAM-2000", 2000, p. 191 (astro-ph/0006207)

30. V. V. Sokolov, "The optical afterglow of GRB970508 revisited: another case for GRB-Supernova connection", Abstracts of JENAM-2000, 2000, p. 190

31. Piro L., et al. (Sokolov V.), "Observation of X-ray lines from a Gamma-Ray Burst (GRB991216): Evedence of moving ejecta from the progenitor." 2000, Science, 290, 955-958

32. Kurt, V. G., Komarova, V. N., Fatkhullin T. A., Sokolov, V. V., Koptsevich A. V., Shibanov, Yu. A., "Photometric study of fields of nearby pulsars with the 6 m telescope", 2000, Bull. Spec. Astrophys. Obs. 49, 5-13

33. Sokolov V.V. "Evidence for a Supernova in the I_c Band Light Curve of the Optical Transient of GRB 970508", Доклад на Римском совещании (ноябрь 2000, Рим, 2-nd Workshop, GRB in the afterglow era, astro-ph/0102492) Costa E., Frontera F., Hjorth J. (eds.), 2001, Gamma-Ray Bursts in the Afterglow Era, ESO Astrophysics Symposia Series, Springer-Verlag, Heidelberg, pp. 132-134 (SN underlying GRB9708508).

34. Sokolov V.V., Fatkhullin T.A., Komarova V.N. et al. "The Multiband

Photometry of GRB Host Galaxies: Comparison with the Spectral Energy Distributions of Nearby Galaxies and Theoretical Modeling", Доклад на Римском совещании (ноябрь 2000, Рим, 2-nd Workshop, GRB in the afterglow era, astro-ph/0102493) Costa E., Frontera F., Hjorth J. (eds.), 2001, Gamma-Ray Bursts in the Afterglow Era, ESO Astrophysics Symposia Series, Springer-Verlag, Heidelberg, pp. 238-240 (multicolor photometry of hosts)

35. Koptsevich A. V., Pavlov G. G., Zharykov, S. V., Sokolov, V. V., Shibanov, Yu. A., Kurt V. G., "Optical photometry of the PSR B0656+14 and its neighborhood", 2001, A&A, 370, 1004-1016

36. Sokolov V.V., Fatkhullin T.A., Komarova V.N. et al. "Астрономия γ-всплесков на 6-м телескопе/ Astronomy of the γ-bursts with the 6 m telescope", Отчет САО – 1999-2000 – SAO Report, Специальная Астрофизическая Обсерватория РАН, 2001, стр. 38,39

37. Castro-Tirado A., Sokolov V.V., Gorosabel J., et al., "The extraordinarily bright optical afterglow of GRB 991208 and its host galaxy", 2001, A&A, 370, 398-406

38. Sokolov V.V., Fatkhullin T.A., Castro-Tirado A.J. et al., "Host galaxies of gamma-ray bursts: Spectral energy distributions and internal extinction", 2001, A&A, 372, 438-455

39. Sokolov V.V. "On the gamma-ray burst progenitors", Conf. on Physics of Neutron Stars, Ioffe Physico-Technical Institute, June 2001, St. Petersburg, in abstract book, p.40 (astro-ph/0106435)

40. Fatkhullin T.A. and Sokolov V.V. "The modeling of spectra of GRB host galaxies", Conf. on Physics of Neutron Stars, Ioffe Physico-Technical Institute, June 2001, St. Petersburg, in abstract book, p.19 (astro-ph/0106435)

41. Sokolov V.V., "On the GRB progenitors: possible consequences for supernovae connection with gamma-ray bursts", 2001, Bulletin SAO RAS, v. 51, pp.38-47 (см. е-препринт astro-ph/0107399).

42. Sokolov V.V. & Fatkhullin T.A. "Modeling of GRB host galaxy spectra", 2001, Bulletin SAO RAS, v. 51, pp.48-60

Глава 2

Фотометрия слабых объектов в области локализации гамма-всплеска и изолированные нейтронные звезды

2.1. Введение

Диссертационная работа посвящена в основном наблюдательным тестам и осторожной интерпретации наблюдательных данных, поскольку с γ-всплесками уже не раз бывало так, что "надежные" теоретические выводы полностью пересматривались под давлением новых фактов, которые не могла предсказать ни одна из предложенных теоретических схем. В частности, до 1997 г. целью исследования бокса ошибок короткого GRB 970613 и других "архивных" локализаций космических γ-всплесков была наблюдательная проверка галактической гипотезы происхождения источников γ-всплесков. Соответственно этому, конкретными задачами были: поиск голубого звездообразного объекта типа аккрецирующей старой нейтронной (или кварковой) звезды в окрестностях Солнца, оценка расстояния или нижней границы расстояния до компактного объекта — возможного источника γ-всплеска, "регистрация" всех оптических источников до предела (около $25^m - 26^m$) полученных на БТА CCD-изображений, отбор всех "подозрительных" по цвету объектов в областях локализаций γ-всплесков.

Начиная с работ Mazets & Golenetskii (1981) и Mazets et al. (1981), уже более 20-ти лет известно, что по своим длительностям космические γ-всплески явно разделяются на две категории: *короткие* γ-всплески (≈ 0.2 с) составляют примерно 25% от полного числа и длинные γ-всплески (в среднем ≈ 20 с) — остальные 75%. А из работ Мазеца и Голенецкого (1987), Dezalay et al. (1992), Hurley (1992) и Kouveliotou et al. (1993) следовало, что короткие γ-всплески характеризуются более жесткими спектрами, чем длинные. Короткие всплески имеют явно отличное от длинных распределение "число всплесков/их интенсивность" — аналог зависимости logN-logS (Tavani 1998), они не показывают дефицита числа всплесков при малых интенсивностях — эффект, который явно присутствует в таких же распределениях для длинных γ-всплесков. (До начала "эры BeppoSAX" это был основной аргумент в пользу космологического происхождения длинных γ-всплесков.) Таким образом, короткие γ-всплески могут представлять собой отдельный класс явлений, так как их характерные особенности настолько отличают их от длинных всплесков, что заставляют предполагать и их разное происхождение (Mazets and Golenetskii 1981).

Если учитывать транзиенты во всех диапазонах (рентгеновском, радиодиапазоне, оптическом), то отождествленных длинных γ-всплесков наберется уже более 30-ти. Но что касается коротких γ-всплесков, то еще ни в одном случае какое-либо надежное отождествление проведено не было. (Пока не было обнаружено и "долгоживущего" радиотранзиента – см. astro-ph/0107188, 0110215.) Так до сих пор это и остается загадкой — где находятся источники этих всплесков? И до сих пор все еще можно думать, как и до эры BeppoSAX, что источники коротких и жестких всплесков могут находиться в Галактике (см. например у Tavani 1998).

Галактическая гипотеза когда-то была основной и "под нее" была сформулирована наша наблюдательная программа на БТА. Поскольку эта гипотеза до сих пор остается не отвергнутой, наблюдательные ограничения, полученные нами для одного из самых типичных коротких всплесков, могут оказаться полезными в новых наблюдательных программах. Тем более, что к проблеме происхождения коротких γ-всплесков сейчас возвращаются на новом уровне, с учетом нового опыта, накопленного в эпоху успешных отождествлений длинных γ-всплесков, и исследователи продолжают приводить аргументы в пользу галактического происхождения коротких γ-всплесков (Bisnovatyi-Kogan 2001, Cline 1999, 2001).

С другой стороны, сам *метод* поиска пекулярных объектов с помощью диаграмм "цвет-цвет", который подробно описан в этой главе, может быть вообще полезен при поисках пекулярных по цветам ОТ γ-всплесков (и длинных и коротких). До начала эры BeppoSAX диаграммы "цвет-цвет" уже применялись для исследования глубоких снимков с целью обнаружения объектов с пекулярными цветами в "старых" боксах ошибок локализации источника γ-всплеска. Если вероятность найти такой объект в малом боксе оказывалась малой, то объект считался потенциально связанным с

γ-всплеском. Примеры поиска таких объектов, как внегалактических (квазары, активные ядра: Vrba et al. 1995, Luginbuhl et al. 1995), так и галактических (одиночные нейтронные звезды: Sokolov et al. 1995, 1996, 1997, Соколов и др. 1996; вспыхивающие звезды: Gorosabel & Castro-Tirado 1998; белые карлики: Motch, Hudec & Christian 1990; новые, Zharykov, Kopylov & Sokolov 1995). Двуцветные диаграммы и сейчас применяются, но уже для обнаружения пекулярного по цвету оптического транзиента длинных GRB (Gorosabel et al., 2001). Здесь может оказаться полезным опыт, накопленный при исследовании GRB-боксов и оптических компаньонов пульсаров (Kurt et al. 1997a, 1997b).

В САО были получены самые глубокие CCD-изображения бокса ошибок *короткого* γ-всплеска, а центральная его часть исследована до предельной для того времени глубины. Теперь уже известно, что если источники всплесков — это внегалактические объекты, то родительские галактики должны иметь наблюдаемые величины больше предела Паломарского Обзора Неба. А если это все-таки галактические источники, все еще возможные кандидаты для коротких всплесков, то самыми вероятными из них могут быть старые нейтронные звезды — тоже очень слабые объекты. С 1994 г. на БТА начался поиск таких объектов в GRB-боксах и исследовались уже отождествленные в оптике изолированные нейтронные звезды.

Итак, здесь, на примере наиболее тщательно изученной в оптике площадки — области локализации γ-всплеска 13 июня 1979 года (GRB 790613) — сказано об основных принципах отбора *слабых* ($> 23^m$) голубых звездообразных объектов или о *методике поиска* объектов с пекулярным спектром. В частности, имеются ввиду показатели цвета в оптике, соответствующие тепловому ("чернотельному") спектру объекта. О методике *отождествления и исследования* слабых объектов с необычными показателями цвета сказано в разделе 2.5, где идет речь об оптике изолированных нейтронных звезд и, в частности, об отождествлении PSR B0656+14 и исследовании объектов в его поле.

В разделах 2.2 и 2.3 поиск оптических источников, возможно связанных с короткими γ-всплесками, рассматривается прежде всего как тест для прямой проверки их галактического происхождения. Хотя, разумеется, не исключается и внегалактическое объяснение коротких всплесков, особенно после успешного отождествления длинных γ-всплесков. Но очевидно, что глубокие оптические наблюдения с учетом наблюдений в рентгеновском диапазоне могли бы уменьшить число теоретических вариантов, объясняющих короткие всплески, по крайней мере, для некоторого выбранного класса галактических моделей, активно обсуждавшихся в литературе (Boer et al. 1993, Greiner et al. 1995, Hartmann, 1994) в 90-ые годы, еще до эры BeppoSAX.

Формулируя ниже постановку наблюдательной задачи на 6-метровом телескопе, автор здесь имеет в виду прежде всего одиночные компактные объекты типа нейтронных звезд, которые остыли до температур $\approx 10^5 K$ и ниже. Аналогичные соображения уже использовались в литертуре при интерпретации результатов глубоких фотометрических исследований некоторых γ-боксов (Hartmann et al. 1989, Motch et al. 1990). В конце концов в любой из галактических моделей для источников γ-всплесков (Kouveliotou et al. 1993), в которых сделаны попытки учета новых данных, можно ставить вопрос о поиске *ближайших* объектов в других диапазонах. В частности, это могут быть и объекты низкой светимости с близким к чернотельному распределением в B, V, R полосах. Используя в основном только предположение о компактности предполагаемого потенциального источника γ-всплеска и то, что количество таких объектов в окрестностях Солнца во всяком случае должно быть не меньше, чем это допускают оценки количества "старых" изолированных нейтронных звезд, используя также данные наблюдений в мягком рентгеновском диапазоне, в разделе 2.2 показано, какие ограничения по расстояниям до таких объектов могут дать прямые оптические наблюдения. Надо отметить здесь, что одиночные (или изолированные) нейтронные звезды (пульсары Геминга, PSR 0656+14) с относительно низкими температурами поверхности, а иногда и с Релей-Джинсовским (как у RX J1856.5-3754, Walters & Matthews 1997) поведением потоков в оптике и расположенные довольно близко от Солнца, уже наблюдались (Halpern & Tytler 1988, Caraveo et al. 1994) как слабые объекты $25^m - 25^m.5$ (см. также в новых обзорах Treves et al. 2000, van Kerkwijk & Kulkarni, 2001).

На примере одного из наиболее мощных γ-всплесков — короткого события GRB 790613, локализованного с помощью сразу нескольких космических детекторов с наилучшей (на северном небе) точностью (Barat et al. 1984; $\approx 0.7\ arcmin^2$), бокс ошибок локализации которого уже довольно хорошо был изучен в рентгеновском (см. в Greiner et al. 1995 и в ROSAT X-ray Images, 1994a) и в оптическом диапазонах (Ricker et al. 1986, Vrba et al. 1995, Harrison et al. 1994), — дополняя эти данные результатами глубоких оптических наблюдений, показано, что объект типа голубого оптического кандидата для RX J1856.5-3754 можно пытаться обнаружить, исследуя бокс ошибок γ-всплеска и его окрестности в трех стандартных фильтрах — B, V, R. В разделах 2.3.1, 2.3.2 и 2.3.3 изложена методика фотометрического поиска таких "чернотельных" (по распределению потоков в BVR) объектов в γ-боксе, а в разделе 2.3.4 приведены ограничения на величину собственных движений в поле GRB 790613 и дан общий обзор всех наблюдаемых объектов этой площадки. В разделе 2.4 сказано, что результаты глубоких оптических наблюдений в этом боксе с учетом рентгеновских данных все еще позволяют "спрятать" довольно много холодных (с $T < 10^5 K$) одиночных компактных объектов вблизи Солнца.

Поскольку диссертация посвящена отождествлению слабых объектов, то в разделе 2.5 речь идет о наблюдениях, о методике анализа фотометрических данных, об отождествлении и о широкополосном $BVRI$-спектре одной из близких к Солнцу изолированных нейтронных звезд PSR 0656+14 с $B \approx 25$ — пример слабого объекта с пекулярным, но нетепловым спектром в оптике. Исследованы также и ближайшие объекты в поле PSR 0656+14. В разделе 2.6 приведены результаты фотометрических исследований пульсара по данным с 6-метрового телескопа.

2.2. Предварительные модельные оценки — показатели цвета, температуры, расстояния

Предположим, что потенциальные источники коротких γ-всплесков могут оказаться среди объектов, составляющих скрытую массу Галактики. Для окрестностей Солнца, которые нас будут в основном интересовать здесь, вклад в общую плотность вещества (предел Оорта, выведенный из наблюдаемых скоростей звезд по координате z) для неизвестных объектов был определен и составляет примерно 38% (по данным Lacarrieu, 1971). Мы предполагали еще, что искомые объекты могут быть довольно старыми. В частности, скорости их могут быть близкими к скоростям наиболее старых нейтронных звезд Галактики. Мы исходили из того, что полное число таких объектов, которые могут проявлять себя в оптике и в мягком рентгене, ограничено сверху плотностью скрытой массы, которая дает локальную (вблизи Солнца) плотность компактных объектов с массой $1.4 M_{\odot}$, равную 0.0357 пк$^{-3}$ (если это действительно объекты с массой $1.4 M_{\odot}$). Соответственно, снизу число таких объектов можно было бы ограничить количеством всех нейтронных звезд, которые могли бы находиться в окрестностях Солнца (Paczyński, 1990).

Но, по-видимому, одни только старые нейтронные звезды (ONS) не мо-

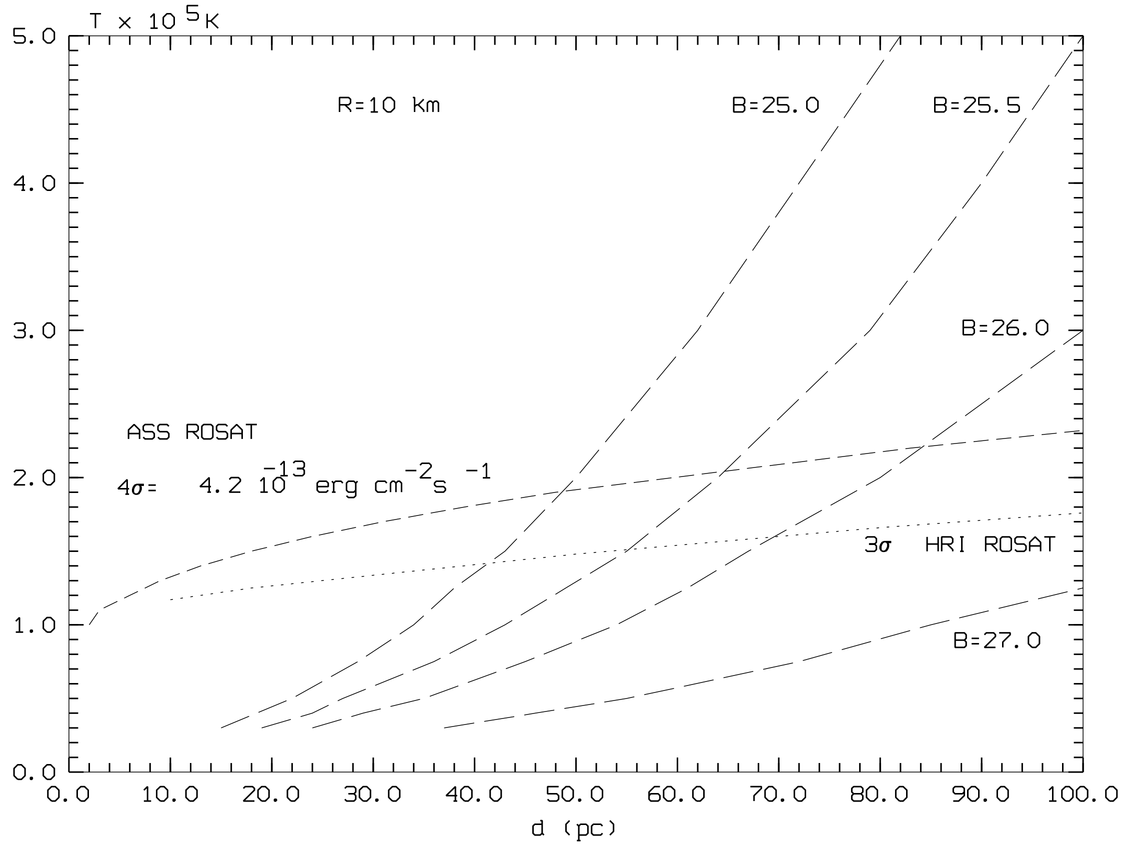


Рис. 2.1. Пределы на величину температуры T_{bb} излучения с поверхности объекта с R=10 км, в зависимости от расстояния. Прерывистая линия соответствует потоку 4.2×10^{-13} эрг $\cdot$ см$^{-2}$ $\cdot$ с$^{-1}$ при заданной T_{bb} и расстоянии в полосе 0.1-2.4 кэВ (см. текст). Пунктирная линия — 3σ - предел обнаружения при времени накопления сигнала 13168 с от точечного источника с чернотельным спектром в том же диапазоне энергий для HRI-детектора спутника ROSAT *в направлении на источник* GRB 790613 (Boer et al. 1993a, ROSAT Guest Observer Program, 1994a,b). Прерывистыми линиями указаны возможные пределы, соответствующие оптическим наблюдениям для чернотельного излучения такого источника в B - полосе.

гут быть потенциальными источниками всех коротких γ-всплесков в основном из-за небольшого числа ONS в Галактике, что требует повторных γ-всплесков при наблюдающемся среднем темпе регистрируемых событий в сутки (Fishman et al. 1994). Если исходить из популяции $N_{tot} \sim 10^9$ галактических нейтронных звезд, родившихся в диске Галактики с распределением скоростей, наблюдаемым у радиопульсаров (конечно, часть из них уйдет в Гало — см. статьи Popov et al. 2000, Popov & Prokhorov 2000), то пространственная плотность предполагаемых источников коротких γ-всплесков должна быть не ниже $n_{ONS} \sim 0.001(N_{tot}/10^9)$ пк$^{-3}$ — плотности одиночных нейтронных звезд, если следовать оценкам Paczyński (1990) для возможной средней плотности старых нейтронных звезд в плоскости

Галактики недалеко от Солнца.

Для радиуса и массы объекта — предполагаемого потенциального компактного источника (короткого) γ-всплеска — мы будем использовать соответственно $R = 10$ км и $M = 1.4 M_{\odot}$, поскольку мы предполагаем некоторый устойчивый объект или устойчивую конфигурацию, по крайней мере, по своим гравитационным свойствам, близкую к стандартной нейтронной звезде. Ниже все оценки относятся именно к этим параметрам, хотя, конечно надо иметь в виду, что радиусы и массы наблюдающихся нейтронных звезд-пульсаров сами определены с некоторым разбросом значений. Более того, радиусы, массы, температура поверхности — параметры, определяющие уравнение состояния этих объектов. Наиболее точное определение этих величин в конце концов является основной целью исследования изолированных нейтронных звезд — и молодых, и старых. Чтобы оценить количественно ожидаемые оптические свойства этих объектов, мы должны будем выбрать какую-то конечную температуру тепловой эмиссии от всей поверхности такого компактного объекта.

Ограничение на температуру T_{bb} всей поверхности компактного объекта для аналогичной модели — "холодная" одиночная нейтронная звезда как потенциальный источник γ-всплеска — в связи с глубокими рентгеновскими (EXOSAT) наблюдениями γ-боксов было использовано при интерпретации оптических данных по предполагаемым кандидатам в гамма-боксе GRB 790325b (Hartmann et al. 1989, Moth et al. 1990). Существует целая серия работ, ограничивающих температуру поверхности нейтронной звезды по наблюдениям не только со спутников EINSTEIN и EXOSAT (Pizzichini et al. 1986, Boer et al. 1988, Boer et al. 1991), но и по более современным данным в мягком рентгене ROSAT (Boer et al. 1993, см. также ссылки в Boer et al. 1993, Greiner et al. 1995).

Здесь использованы результаты наблюдений в мягком рентгеновском диапазоне ($0.1 - 2.4$ кэВ) спутника ROSAT с этой же целью — ограничить сверху значение T_{bb} , чтобы потом, используя оптические наблюдения γ-бокса GRB 790613, в свою очередь ограничить снизу расстояния до предполагаемых потенциальных кандидатов. Таким образом, это некоторое развитие ставшего уже почти стандартным метода поиска изолированных нейтронных звезд в окрестностях Солнца. На Рис. 2.1 приведены соответствующие пределы на величину температуры (черного тела) T_{bb} излучения с поверхности компактного объекта с $R = 10$ км в зависимости от расстояния до него. Источник чернотельного излучения с $R = 10$ км может быть обнаружен в рентгене или/и в оптике, если для заданной температуры и расстояния до него он оказывается левее и/или выше соответствующей кривой на Рис. 2.1. На этом же рисунке для выбранных выше M и R компактного объекта показаны результаты наблюдений на спутнике ROSAT с большим временем экспозиции 13168 с. (HRI ROSAT, 1994b) в направлении бокса ошибок γ-всплеска GRB 970613. А из данных обзора неба в диапазоне энергий $0.1 - 2.4$ кэВ, полученных с помощью того же спутника ROSAT (ROSAT All-Sky Survey или ASS ROSAT), мы использовали некоторый средний по всему обзору поток (при среднем времени экспозиции 500 с) — $F_x \approx 4.2 \cdot 10^{-13}$ эрг $\cdot$ см$^{-2} \cdot$ с$^{-1}$, что примерно соответствует 4σ уровню. (В частности, на этом уровне обнаружения сигнала в ASS ROSAT были исследованы 5 рентгеновских источников, найденных рядом или внутри малых гамма-боксов Boer et al. 1993.)

Если исходить из такого (как на Рис. 2.1) ограничения по рентгеновскому потоку, то при $T_{bb} > 200000K$ для пространственной плотности старых изолированных аккрецирующих нейтронных звезд 0.001 пк$^{-3}$ в обзоре ROSAT ASS должно быть заметное количество — около 30 до 20 пк около Солнца — ярких ($\sim 4 \cdot 10^{-12}$ эрг $\cdot$ см$^{-2} \cdot$ с$^{-1}$) рентгеновских источников, которые были бы уже давно отождествлены. Но неотождествленных и уже отождествленных в оптике по всему небу ярких рентгеновских источников мало — это было известно уже к 1996 г. Возможные объяснения этого факта — либо бóльшая, чем оценивали раньше, средняя скорость этих объектов (старых аккрецирующих нейтронных звезд), либо слишком медленная эволюция (затухание) магнитного поля — и то и другое уменьшает аккрецию на поверхность и вклад аккреционной светимости этих старых объектов (Treves et al. 2000). Правда, этот вклад может быть и больше для некоторой части медленно движущихся нейтронных звезд, оставшихся вблизи плоскости Галактики — это обсуждается в литературе (Popov et al. 2000). Но так или иначе, из отсутствия большого количества рентгеновских совпадений с малыми γ-боксами (Greiner et al. 1995) можно ожидать, что если и существуют такие объекты в Природе и они как-то связаны с короткими γ-всплесками, то температура их, согласно Рис. 2.1, должна быть не выше, чем $1 - 2 \cdot 10^5$ K.

При таких температурах даже при максимально допустимой плотности компактных объектов вблизи Солнца 0.0357 пк$^{-3}$, следующей из оценок плотности скрытого вещества в окрестностях Солнца (Lacarrieu 1971), в ROSAT ASS можно ожидать очень малое число соответствующих точечных рентгеновских источников с типичными потоками $> 5 \cdot 10^{-13}$ эрг $\cdot$ см$^{-2} \cdot$ с$^{-1}$. В то же время, как это видно из Рис. 2.1, соответствующие компактные объекты с температурами от 50000K и до 150000K будут видны как объекты не слабее 25.5 звездной величины в полосе B на расстояниях от 30 до 50 пк. Таким образом, в окрестностях Солнца речь может идти о поиске в оптике слабых голубых объектов с показателями цвета: $U - B \sim -1.0, B - V \sim< -0.3$ и $V - R \sim< 0.1$. На всей небесной сфере они могут встречаться с частотой до $\sim 0.5 \cdot$ град$^{-2}$ (для $B < 25.5$), если их температуры $\sim 10^5$ K. В то же время в обзоре неба в мягком рентгеновском диапазоне такие источники будут или слабыми (если $T_{bb} \approx 2 \cdot 10^5 K$) или настолько слабыми (при $T_{bb} \approx 10^5 K$), что обнаружить их можно только при наблюдениях с большими временами накопления в этой же полосе частот (см. Рис. 2.1). То, что все-таки какой-то источник был найден в ROSAT ASS при исследовании 40-ка малых гамма-боксов с суммарной площадью ~ 3.1 град$^{-2}$ (Greiner et al. 1995), не противоречит сказанному выше и может говорить о том, что температура этих объектов $< 2 \cdot 10^5$ K.) Фактически это же подтверждает и отождествленная в оптике изолированная нейтронная звезда RX J1856.5–3764 (Walters & Matthews 1997).

Некоторый вклад в полную болометрическую светимость может дать аккреция из межзвездной среды на одиночный компактный объект, движущийся со скоростью v (Bondi & Hoyle, 1944). При вычислении темпа аккреции $\dot{M} \sim n_{ISM} \cdot v^{-3}$ для заданной плотности межзвездной среды n_{ISM} (число атомов водорода в см^3) можно считать, что скорости наших гипотетических объектов близки к скоростям, реально наблюдающимся у радиопульсаров, по крайней мере, у наиболее старых из них (Lyne & Lorimer, 1994). Если приближенно считать, что в окрестностях Солнца n_{ISM} в среднем около ~ 0.07 H см$^{-3}$, то при $T_{bb} \approx 10^5 K$ соответствующий вклад ($\dot{M} \cdot G \cdot M \cdot R^{-1}$) в полную болометрическую светимость составит только несколько процентов для $v >$ 200 км $\cdot$ с$^{-1}$. Правда, этот вклад может быть и больше для самых медленных нейтронных звезд.

Очевидно, что из-за предполагаемой низкой светимости ONS можно пытаться искать такие объекты только в ближайших окрестностях Солнца. Это относится не только к оптике, но и к мягкому рентгену, сильно чувствительному к неоднородностям в распределении межзвездной среды (Paresce 1984). То есть, если иметь в виду данные о межзвездной среде недалеко (≈ 250 пк) от Солнца, а также поглощение излучения не только в мягком рентгеновском, но и в далеком ультрафиолетовом диапазонах (Welsh et al. 1994), то тогда в оптике действительно речь может идти только об объектах, расположенных совсем близко. Отсюда следует, что и наши модельные оценки относятся к ближайшему Космосу, где, в частности, расстояния до объектов определяются только их средней пространственой плотностью (~ 0.001 пк$^{-3}$), если счить ее в сфере с радиусом около 100 пк примерно постоянной. Таким образом, прежде всего с точки зрения наблюдений, нас здесь интересует локальная ситуация с источниками γ-всплесков или те короткие яркие и мощные события, для которых справедлив "закон $-3/2$" в распределении LogN/LogP (Fishman et al. 1994, Tavani 1998). Здесь используется минимум модельных предположений, относящихся к "большим галактическим моделям", обсуждавшимся когда-то (Hartmann, 1994, 1994a). Таким образом, речь может идти здесь только о ближайших объектах — возможных потенциальных источниках коротких γ-всплесков.

Гамма-всплеск GRB 790613 как раз относится к одному из таких мощных и коротких (≈ 48 мс) событий, которые одновременно наблюдались с помощью нескольких космических аппаратов: Венера-12 (SIGNE), Венера-11 (KONUS), Пионер-Венера, ISEE 3 (Mazets et al. 1981, Barat et al. 1984). Размер области локализации события на небе около 0.7 $arcmin^2$. Для поисков в оптике мы использовали всю симметричную область локализации (γ-бокс), результат пересечения трех полос ошибок кругов триангуляции на небесной сфере с общей площадью $\approx 1.6 arcmin^2$. При энергиях фотонов 100 — 2000 кэВ потоки составляли ≈ 0.1 фотонов $\cdot$ см$^{-2}\cdot$ с$^{-1}\cdot$ кэВ. При этом бóльшая часть энергии γ-всплеска выделилась на частоте аннигиляционного излучения за время около 0.05 с (Welsh et al. 1994, Atteia et al. 1987). Можно надеяться, что предполагаемый компактный объект, который мог бы быть связан с этим γ-всплеском, является одним из самых близких объектов, возможно переживших какой-то взрыв на своей поверхности.

Конечно, приведенные выше оценки носят только предварительный, ориентировочный характер. Самое главное для наблюдений в оптическом диапазоне — звездные величины и показатели цвета, по которым искали до 1997 г. голубые звездообразные объекты в областях локализации γ-всплесков. В следующем разделе, используя вышесказанное, на примере события GRB 790613 показано, как можно ставить наблюдательную задачу поиска таких "холодных" компактных объектов в условиях, когда оптические поиски слабых источников приходится вести, исследуя довольно большие площадки на небе.

2.3. Бокс ошибок локализации короткого гамма-всплеска 13 Июня 1979 г. (GRB 790613)

2.3.1. Наблюдательные данные и их анализ – о методике поиска.

Наблюдения гамма-бокса GRB 790613/GBS 1412+79 были сделаны с помощью охлаждаемой ПЗС/CCD матрицы 580×520 пикселов в первичном фокусе 6-метрового телескопа, что соответствует площадке с размерами 120"×80" на небе ("CCD-кадр"). ПЗС-матрица имела прямоугольные пикселы 24×18 мкм, которые обеспечивали угловое разрешение 0".205×0".154 на пиксел. Наблюдения проводились в фотометрической системе Cousins в BVR фильтрах. Обычно времена экспозиции были 600 с, 500 с или 400 с соответственно в каждом из BVR фильтров, бóльшие времена экспозиции приводили к росту числа космических частиц, так как в среднем за 10 минут их регистрировалось до 30-ти. В итоге, при наблюдениях площадки с боксом ошибок локализации γ-всплеска GRB 790613 удалось получить $\approx$ 5.7 часов экспозиции или полного времени открытого затвора. Атмосферные условия были стабильные во время наблюдательных сетов с изображениями 1.1" - 1.7". Первые наблюдения этого бокса состоялись 13/14 апреля 1994 г. в B и V фильтрах (Sokolov et al. 1994), когда были сделаны и первые попытки обнаружить голубые звездообразные "кандидаты" по критерию $B - V < 0$. Дополнительно в фильтре R были проведены наблюдения 2/3 июня 1994 г. (Но ПЗС/CCD находилась не в "стандартной моде", и нам пришлось использовать эти данные только в качестве некоторой фотометрической привязки относительно ярких звезд в R фильтре по всей "мозаике" из CCD-кадров, полученной нами позже.) Последующие наблюдения в трех (BVR) фильтрах для центральной части бокса ошибок локализации GRB 790613, где были выбраны несколько голубых ($B - V < 0$) объектов, были проведены 29/30 декабря 1994 г. и для всей площадки снова в апреле (24/25) 1995 г.

Координаты центра исследуемого поля: $\alpha(1950) = 14^h 12^m 12^s.8$; $\delta(1950) = +78^o 54' 13''.8$. В отличие от других исследователей бокса ошибок этого γ-всплеска, выбиравших для фотометрии только его северную часть (локализация по 4-м аппаратам), мы выбрали его симметричным — это результат пересечения трех самых узких полос (3 аппарата) спутниковой триангуляции, так как симметрия бокса ошибок может соответствовать более надежной локализации всплеска. Таким образом, полная площадь на небе этого симметричного бокса около 1.5 arcmin^2.

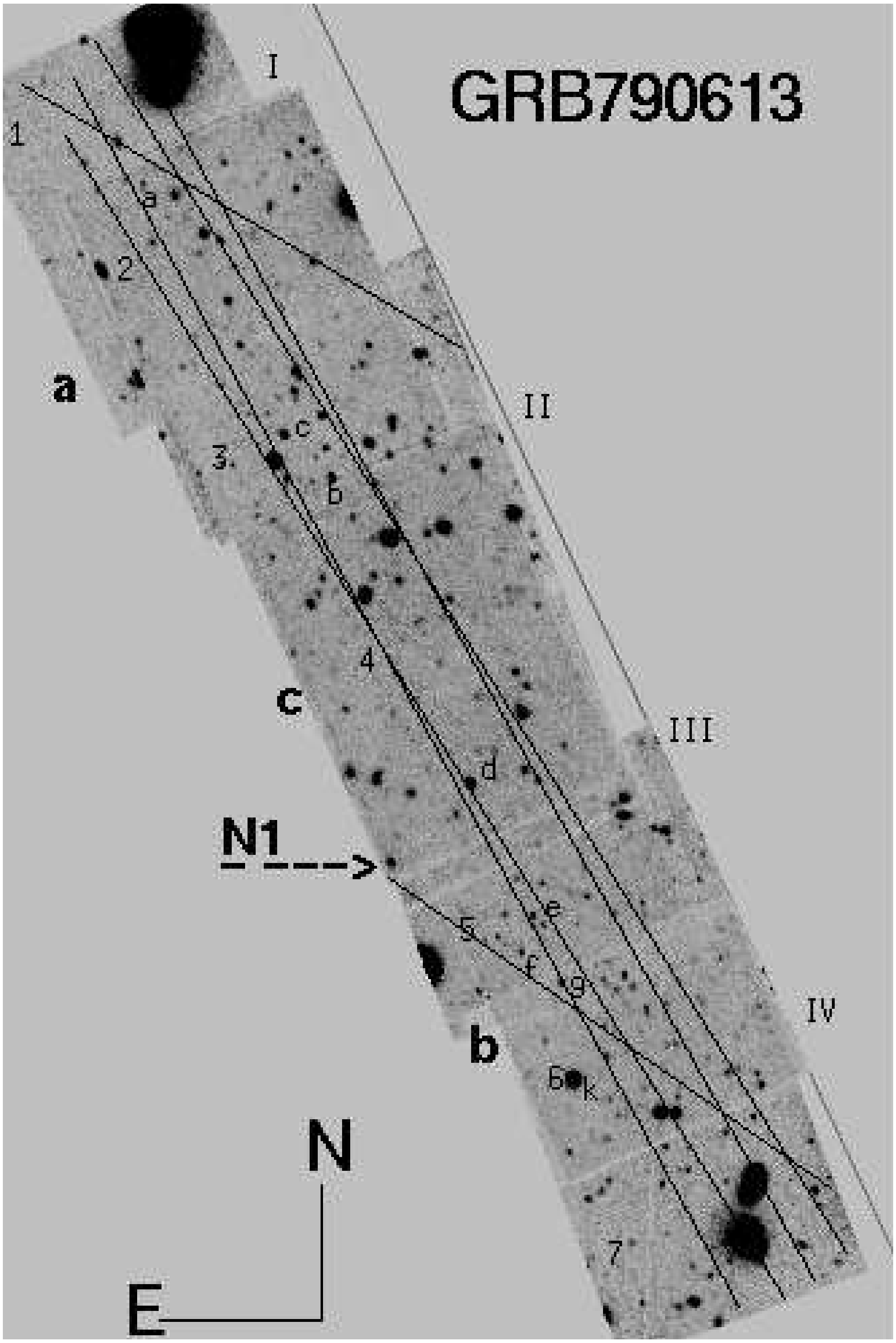


Рис. 2.2. "Мозаика" из CCD-кадров на небе с боксом ошибок локализации GRB 790613. Бокс соответствует данным Barat et al. (1984). Римские цифры и жирные латинские буквы соответствуют колонке III в журнале наблюдений. Прописные буквы указывают вторичные фотометрические стандарты по всему полю. Цифрами указаны области с соответствующими Табл. 2.2 фотометрическими пределами. Номер 1 — звездообразный объект с $B = 23.03$, $B - V = 0.03$, $V - R = 0.1$.

Таблица 2.1. Журнал наблюдений (см. Рис. 2.2 и описание в тексте).

I	II	III	IV	V	VI
13.04.94					
23:13	I B	600	1.7	22.71	35.1
23:55	II B	600	1.45	22.67	35.5
00:25	III B	600	1.31	22.65	36.0
00:51	IV B	600	1.11	22.58	37.0
23:02	I V	600	1.47	21.83	35.7
23:33	II V	600	1.40	21.82	35.2
00:14	III V	600	1.14	21.79	35.8
00:39	IV V	600	1.08	21.72	36.4
2.06.94					
19:12	I R	600	1.70		36.5
19:32	II R	600	1.63		37.1
19:51	III R	600	1.83		37.5
20:13	IV R	600	2.14		38.0
29.12.94					
02:18	c B	500	1.59	22.70	37.9
02:45	c B	500	1.63	22.66	37.1
03:14	c B	500	1.56	22.11	36.3
02:27	c V	500	1.47	21.81	37.6
02:54	c V	500	1.59	21.71	36.7
03:23	c V	500	1.77	21.10	36.3
02:36	c R	400	1.41	20.54	37.3
03:03	c R	400	1.37	20.38	36.5
03:32	c R	400	1.61	19.52	35.9
24.04.95					
22:03	a B	600	1.40	22.82	35.1
22:14	a V	600	1.29	22.03	35.1
22:36	a V	600	1.12	22.04	35.2
22:24	a R	600	1.24	21.02	35.1
22:47	a R	500	1.20	20.98	35.3
22:56	a R	500	1.26	20.98	35.4
23:21	b B	600	1.18	22.89	35.7
23:32	b V	600	1.28	22.10	36.0
23:52	b V	600	1.14	22.08	36.5
23:42	b R	600	1.25	20.88	36.2
00:04	b R	500	1.14	20.94	36.7
00:13	b R	500	1.05	20.81	37.0
01:14	c B	600	1.30	22.62	39.0
00:30	c V	600	1.20	21.50	38.8
00:55	c R	600	1.18	20.63	38.0
00:41	c R	600	1.14	20.60	38.5

Журнал наблюдений поля GRB 790613 приводится в Табл. 2.1: здесь в колонке I — UT дата наблюдений, II — номер CCD-кадра и фильтр (см. на Рис.2.2), III — время экспозиции, IV — размеры изображений, V — яркость ночного неба с квадратной угловой секунды, VI — зенитное расстояние. Мозаика CCD-кадров на небе, "накрывающая" 99%-ый бокс ошибок локализации GRB 790613, полученная во время этих наблюдений, показана на Рис.2.2. Римские цифры и латинские буквы (жирный шрифт) соответствуют числам и буквам колонки III журнала наблюдений. Маленькие буквы стоят около семи вторичных фотометрических стандаров по всей мозаике из CCD-кадров. Цифры/номера соответствуют областям с фотометрическими пределами, указанными в Табл 2.2.

Все наблюдательные ПЗС/CCD-данные, полученные на 6-метровом телескопе по этой площадке, как кадры с исследуемыми объектами, так и калибровочные кадры, записаны на оптические компакт-диски и магнитные жесткие диски носители информации. Архив хранится в виде стандартных FITS (Flexible Image Transport System) файлов. (Архивация данных в стандартном FITS-формате позволяет работать с ними в любом широко используемом пакете обработки астрономических данных, например, MIDAS, IRAF, IDL.)

2.3.2. Редукция данных и фотометрия

Поскольку при наблюдениях этого поля основной целью было изучение довольно слабых объектов ($> 23^m$ и вблизи предела детектирования) и это был тогда первый наиболее глубокий снимок гамма-бокса, ниже будут описаны основные моменты процедур обработки и фотометрии этого Deep Field на БТА. Опыт работы с такими слабыми и предельно слабыми объектами, накопленный при фотометрии этого поля, потом часто использовался и при исследовании полей других γ-всплесков, и при изучении родительских галактик всплесков в совместных программах уже в "эру BeppoSAX", и при формулировании основных выводов по родительским галактикам (в главах 4, 5 и 6).

Стандартная обработка данных включала обычную процедуру первичной редукции данных: вычитание "bias", деление на "плоское поле", удаление космических частиц, учет дефектов ПЗС/CCD, переход от прямоугольных элементов к квадратным (для данной CCD), переход в единую систему координат для построения общей для всех CCD-кадров мозаики. Вся обработка проводилась с помощью программ из пакета ESO-MIDAS.

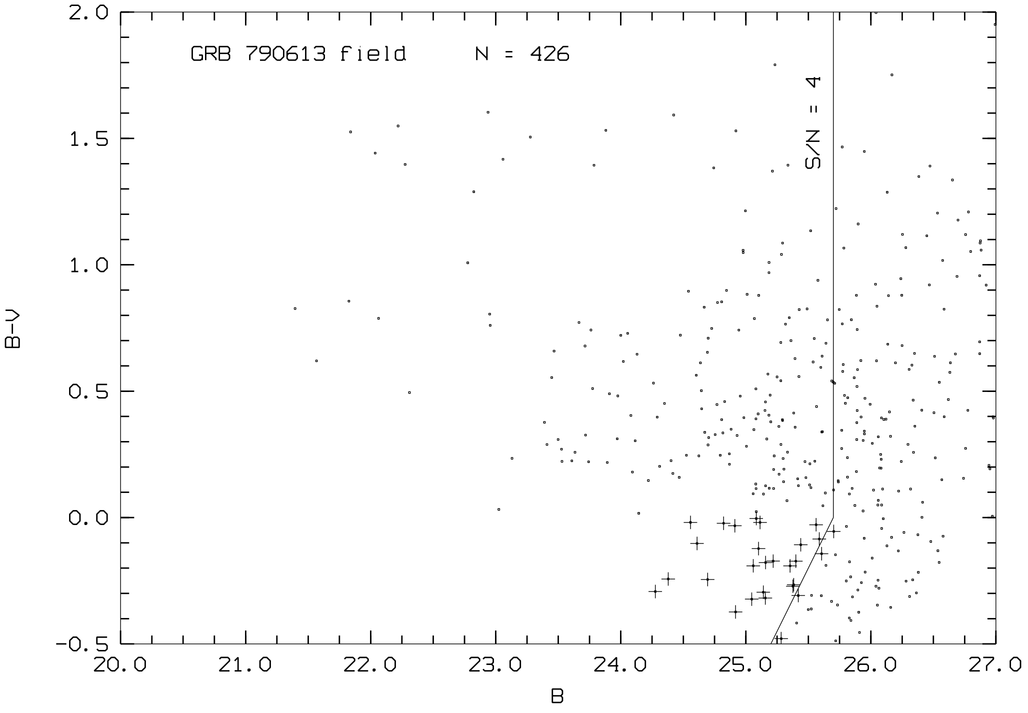


Рис. 2.3. Диаграмма "$B - V$ vs. B" показана для всех объектов, детектируемых в пределах мозаики (Рис.2.2) из CCD-кадров ($N = 426, B \leq 27$) для поля γ-всплеска GRB 790613. Крестами отмечены все объекты с $B - V \ < \ 0$ и $S/N \geq 4$. Ломаная линия соответствует "практическому фотометрическому пределу" ($S/N \approx 4$).

Таблица 2.2. Фотометрические пределы в 7-ми областях, отмеченных цифрами на Рис.2.3.

Номер области на Рис.2.3	B	V	R
1,7	24.7	24.7	—
2.,3,5,6	25.7	25.7	25.6
4	26.2	25.8	25.6

Фотометрический стандарт — звезда MS 1443+63 B — наблюдалась каждую ночь до и после наблюдений поля GRB 790613. Эта же звезда использовалась для калибровки вторичных стандартов — звезд внутри CCD-мозаики. Были использованы 7 звезд (вторичных стандартов) для калибровок разных CCD-кадров одной ночи и полученных в разные ночи. Полное число всех объектов, регистрируемых до 27^m по всей мозаике в фильтре B составило 426. Полученные CCD-кадры (или CCD-изображения), редуцированные и приведенные к единой системе координат, были просуммированы в каждом из фильтров. Фотометрия была проведена для всех 426 измеряемых (в том числе и на уровне ниже $S/N = 3$) объектов внутри всей мозаики (см. Рис. 2.3). Но для дальнейшего анализа были использованы лишь объекты с отношением "Сигнал/Шум" $S/N \geq 4$. Отношение $S/N = 4$ соответствует ошибке измерений $\approx 0.25^m$ в звездной величине объекта, что дает соответствующую ошибку в показателях цвета 0.35^m. Последнее делает невозможной селекцию более слабых объектов по их цветам. На Рис. 2.3 этому соответствует ломаная линия — так наз. "практический фотометрический предел" ($S/N \approx 4$).

Фотометрическая процедура состояла из трех стадий:

1. Так как мы были заинтересованы прежде всего в голубых ($B-V < 0$) объектах, то по CCD-изображениям, полученным в фильтре B, с помощью программы MIDAS/INVENTORY (для сглаживания изображений гауссианой) сначала были получены координаты всех детектируемых объектов ("B-каталог") по всей CCD-мозаике.

2. Затем по координатам, полученным в стадии B-каталога, была проведена апертурная фотометрия CCD-мозаики для всех трех фильтров BVR.

3. На третьем шаге/стадии полученные величины были исправлены за конечную апертуру и атмосферную экстинкцию при данном зенитном расстоянии и затем они (величины) были редуцированы к стандартной фотометрической Cousins системе.

Результаты фотометрии показаны на Рис. 2.3, 2.4, и 2.5. Крестами отмечены 31 объект на Рис. 2.3 и 2.4 с $B-V < 0$ and $S/N > 4$. Фотометрические пределы (определенные как $S/N = 4$) по всей CCD-мозаике даны в Табл. 2.2.

Отношение S/N вычислялось для каждого обекта: $\frac{S}{N} = \frac{F_{star}}{\sqrt{F_{star}+F_{sky}}}$, где

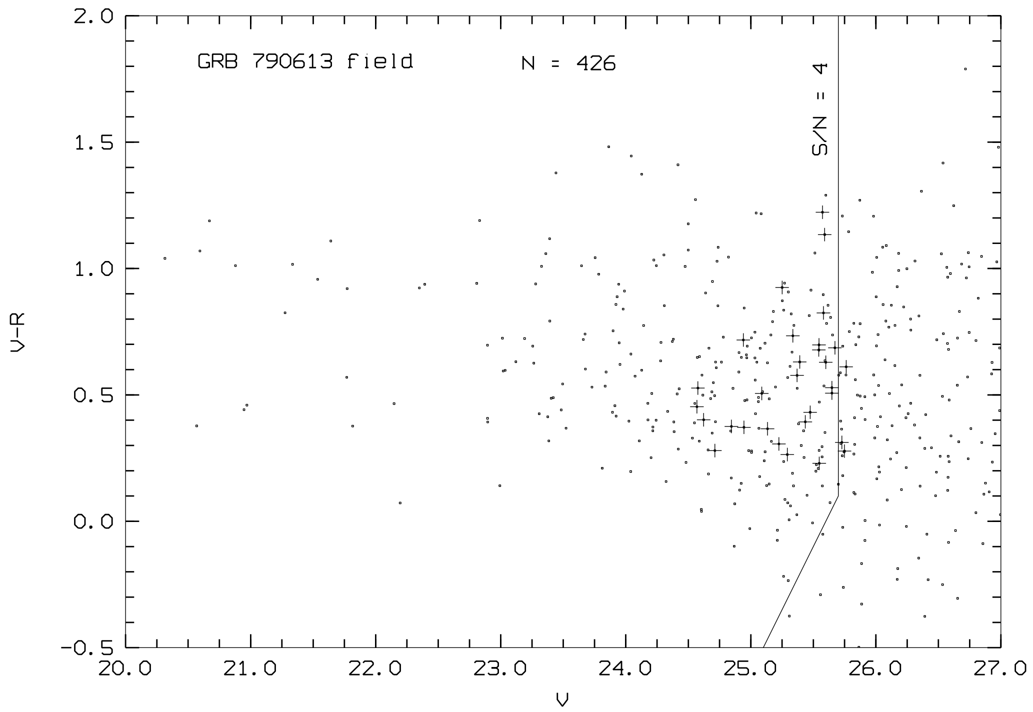


Рис. 2.4. Диаграмма "$V - R$ vs. V" показана для всех детектируемых объектов ($N = 426, B \leq 27$) поля GRB 790613. Кресты — те же 31 объект с $B - V < 0$ и $S/N > 4$, что и на Рис. 2.3. Ломаная линия — "практический фотометрический предел".

F_{star} — поток от объекта при данной апертуре, F_{sky} — фон неба при той же апертуре.

Фотометрические ошибки вычислялись следующим образом:

1. Если было проведено только одно измерение, то его ошибка вычислялась с использованием Пуассоновской статистики для накопленных квантов: $\sigma_{mag} = \sqrt{\sigma^2_{star} + \sigma^2_{sky}}$, где $\sigma_{star} = \sqrt{F_{star}}$, $\sigma_{sky} = \sqrt{F_{sky}}$.

2. Если мы имели несколько измерений, то вдобавок вычислялась и $\sigma_{mag} = \sqrt{\frac{\sum_i^n (mag_{sr} - mag_i)^2}{n-1}}$. Соответственно, ошибки показателей цвета определялись как: $\sigma_{(B-V)} = \sqrt{\sigma^2_B + \sigma^2_V}$, $\sigma_{(V-R)} = \sqrt{\sigma^2_V + \sigma^2_R}$. Эти ошибки измерений показателей цвета для нескольких объектов, цветовые индексы которых ближе всего оказываются к показателям цвета предполагаемых чернотельных объектов, показаны на Рис. 2.5.

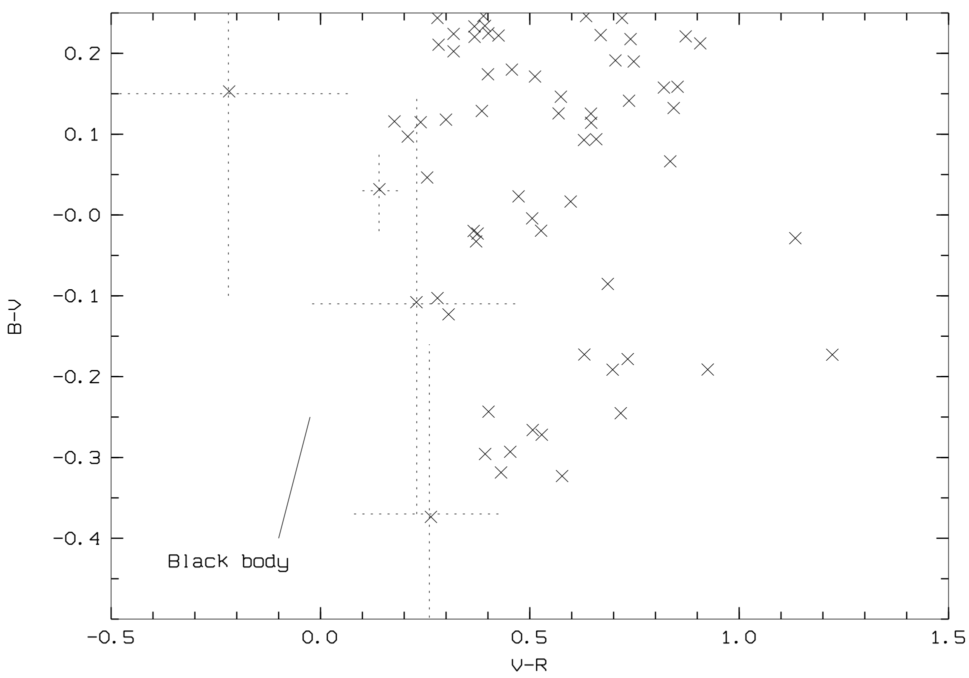


Рис. 2.5. Двуцветная "$(B-V)/(V-R)$" диаграмма для наиболее голубых по показателю $B-V$ ($B-V < 0.25$) объектов с отношением $S/N > 4$. Линией отмечено место, где могли бы находиться объекты с 30000 K $< T_{bb} <$ 100000 K. Для ближайших к этой области объектов поля GRB 790613 указаны ошибки определения их показателей цвета.

2.3.3. Поиск голубых звездообразных объектов в поле GRB 790613

Поиск объекта, похожего на нейтронную звезду с поверхностной температурой (черного тела) $T_{bb} \approx 10^5$ K, как возможного потенциального источника γ-всплеска в случае, если короткие γ-всплески имеют локальное, галактическое происхождение, была главной целью исследования поля GRB 790613. Предполагалось, что эти источники должны были наблюдаться как слабые ($V > 23^m$) голубые звездообразные объекты с $B-V \approx -0.37$ и $V-R \lesssim -0.1$ и они же могли бы быть мягкими рентгеновскими источниками.

Именно поэтому первым шагом в отборе предполагаемых “кандидатов” здесь был выбор объектов с показателями цвета $B-V < 0$ (см. Рис. 2.3). Наблюдения в R фильтре (*второе приближение*) позволяют выбрать среди таких “кандидатов” лишь те, которые останутся ниже линии $V-R = 0$. На Рис. 2.4 хорошо видно как, объекты с $B-V \leq 0$ (кресты) “рассыпаются” по диаграмме $(V-R)/V$. Последующая проверка голубых по показателю $B-V$ объектов с помощью критерия $V-R < 0$ резко уменьшает большое число таких “кандидатов” с ожидавшимся для них чернотельным (“звездным”) или Релей-Джинсовским распределением потоков в фильтрах B, V, R даже без тщательного анализа их профилей (звездный/протяженный) с целью выяснения звездообразности или протяженности (как у галактик) в распределении яркости объекта.

Как видно из Рис. 2.3 и 2.4 и из Табл 2.2, пределы, для которых уровень S/N, больше чем 4 для каждого из фильтров $B,\ V,\ R$ в среднем по всей мозаике, равны соответственно $B = 25.7,\ V = 25.7$ и $R = 25.6$. Из сказанного выше следует, что почти все явно голубые по $B - V$ объекты, изученные до $B \approx 25.2$ (см. Рис. 2.3), оказываются слишком красными по показателю цвета $V - R$, чтобы отнести их явно (то есть при $S/N > 4$) к объектам с чернотельным (Релей-Джинсовским) распределением $B,\ V,\ R$ потоков. Таким образом, по этим данным никакого оптического компаньона всплеска с подходящими показателями цвета $B - V$ и $V - R$ (для $S/N > 4$) и *с величинами*, соответствующими Рис. 2.1, найдено не было.

Рентгеновские наблюдения на ROSAT/HRI поля γ-всплеска GRB 790613 с большим временем накопления 13168 с тоже не привели к обнаружению какого-либо объекта в этом боксе ошибок и показали, что температура черного тела для таких объектов должна быть меньше чем, 150000 K, если такими объектами были бы нейтронные звезды на расстоянии меньше 100 пк (ROSAT X–ray Images, 1994a; ROSAT Guest Observer Program, 1994b). Результаты наших оптических наблюдений (тоже с большим временем накопления) вместе с данными ROSAT могли бы быть интерпретированы как указывающие на отсутствие одиночного компактного объекта с $R = 10$ км и с $T_{bb} \approx 10^5$ K вплоть до расстояний в этом направлении ≈ 40 пк, что следует из Рис. 2.1. Соответственно этому и энергия γ-всплеска GRB 790613 должна быть выше, чем $(4 - 9.5) \cdot 10^{35}$ эрг, если бы действительно источником этого всплеска был бы галактический объект на таком или на бóльшем расстоянии. Из того же Рис. 2.1 следует, что такой объект мог бы оказаться ближе, но только если его температура $T_{bb} \lesssim 10^5$ K.

2.3.4. Оценки собственного движения и некоторые интересные объекты в поле GRB 790613

Предполагается, что близкие объекты — старые изолированные нейтронные звезды — могут иметь значительные собственные движения. Например, при пространственной скорости $\approx$ 200 км/с и расстоянии 100 пк можно ожидать для таких объектов собственное движение до 0.4 arcsec/год. И если изолированные нейтронные звезды (INS) все-таки имеют нетепловые спектры в оптике (как, например, у пульсара PSR B0656+14 — см. в

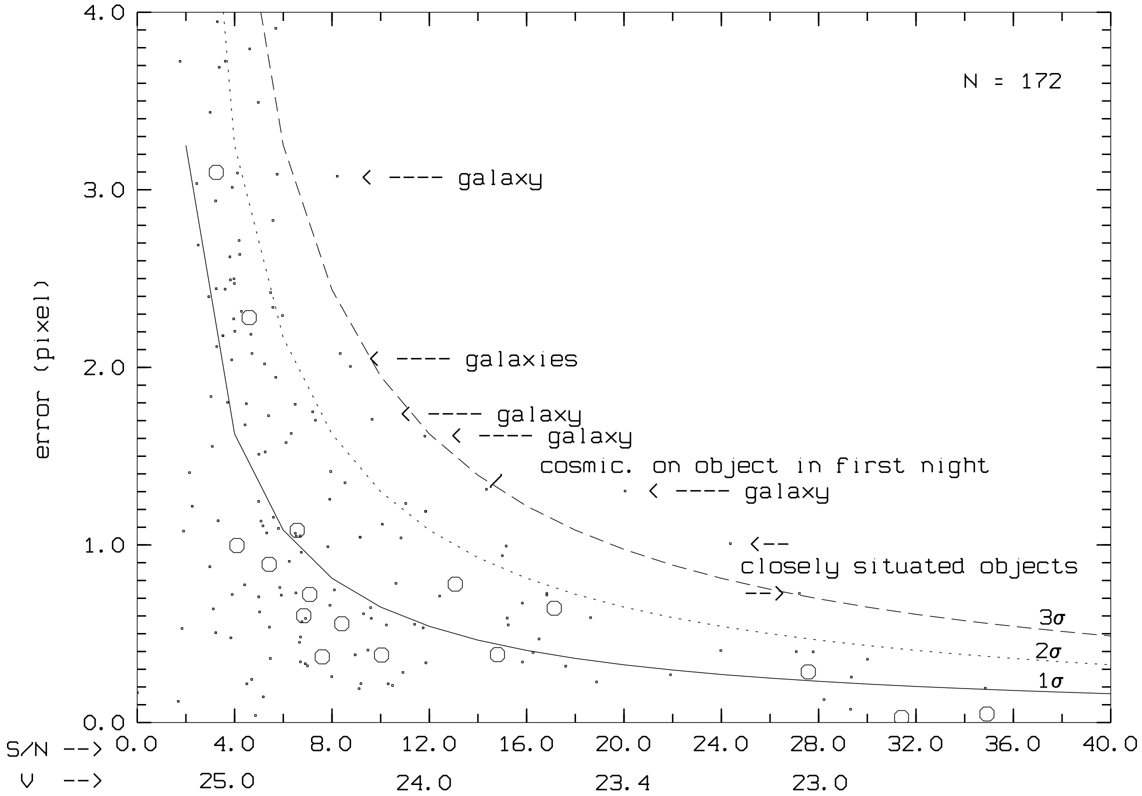


Рис. 2.6. Точками указан разброс (в пикселах) положений объектов слабее 23 зв.вел. в поле GRB 790613. Различие в положениях было измерено по гауссовой сумме B и V CCD-изображений поля для эпох: 13/14 апрель 1994 г. и 24/25 апрель 1995 г. Кружками указаны измерения положений объектов, сделанные в течение одной ночи. Линии соответствуют 1σ, 2σ, 3σ средней ошибки определения положения. 1пиксел = $0''.205$. Ось с S/N соответствует отношению S/N для гауссовой суммы B и V CCD-изображений в апреле 1994 г.

разделе 2.6), то такой объект может быть потерян в нашем анализе среди большого числа слабых объектов при поисках только по цветовым критериям описанным выше, если расчитывать только на отрицательные $B-V$. В принципе, собственное движение тоже дает возможность найти такой объект среди объектов с высокими пространственными скоростями, поэтому верхние оценки величин собственного движения в поле GRB 790613 приведены в этом разделе. Процедура измерений собственных движений объектов по нашим данным для этого поля была следующей:

Все CCD-изображения были приведены к одной системе координат с помощью ярких звездообразных объектов с нормальными звездными показателями цвета. Так как эти объекты по зв. величинам лежат в области 20-21^m, то они и являются скорее всего звездами на расстояниях в несколько кпс и, соответственно, могут служить хорошими реперами для не-

Таблица 2.3. Фотометрия ярких галактик группы.

Number of galaxy (Fig.2.7)	B	V	R	B-V	V-R
1.	21.39	20.42	19.65	0.97	0.76
2.	21.44	20.35	20.03	1.08	0.32
3.	20.84	19.86	19.54	0.97	0.32
4.	22.03	21.00	20.53	1.02	0.47
5.	22.13	20.82	20.27	1.31	0.55
6.	22.60	21.64	21.23	0.96	0.40

подвижной системы отсчета. Ближайшие к нам объекты должны иметь звездные профили, поэтому, чтобы определить положение всех объектов в неподвижной системе отсчета, была использована аппроксимация профилей всех слабых объектов поля гауссовой функцией. Соответственно, положение объекта будет определяться некоторым эффективным "центром масс" такой гауссовой подгонки профиля.

Таким образом, здесь оценивается собственное движение объектов в поле за год как различие в их координатах (в пикселах на ПЗС-мозаике) для двух эпох: апрель 1994 г. и апрель 1995 г. Разумеется, для галактических объектов (со строго звездным профилем) различие положений в таком методе оценок должно объясняться как раз собственным движением. А для внегалактических объектов это различие будет определяться только точностью аппроксимации их профилей гауссовой функцией. Для определения стандартной ошибки в таком определении положения объекта аналогичные измерения с гауссовой подгонкой профилей были сделаны для тех же объектов по различным CCD-кадрам, полученным в одну и ту же ночь.

Верхняя оценка собственного движения таким образом была сделана для объектов $V \leq 25$. Результаты измерений представлены на Рис. 2.6. Вплоть до $V \approx 25$ объекты с возможным собственным движением большим, чем 3σ-уклонение от среднего положения, не найдены по нашим данным. Заметно уклоняются внегалактические объекты с заведомо негауссовым профилем. Объекты с частицами ("cosmic") и близко расположенные к нам объекты показывают среднюю ошибку своего положения между 2σ и 3σ.

Некоторые интересные объекты были найдены внутри и рядом с боксом ошибок локализации γ-всплеска GRB 790613. Первый из них (обозначен **N1** на Рис. 2.2) — явно звездообразный объект с $B = 23.03$, $B - V = 0.05$ and

$V - R = 0.1$. Он расположен за пределами бокса на расстоянии около $30''$ от его границы. Этот объект имеет показатели цвета, близкие к чернотельным, т.е. соответствующие близким к Релей-Джинсовскому распределению BVR-потоков для температуры $T_{bb} \approx 17000$ K. Допустив, что именно этот объект может быть объектом типа нейтронной звезды, по его блеску можно оценить расстояние — менее 10 пк от Солнца. Тогда он мог бы иметь и заметное собственное движение ($> 1''.0$ в год). Но из предыдущих оценок следует, что этот объект имеет собственное движение менее чем $0''.1$ в год. Поэтому можно думать, что звездообразный объект с такими цветами либо QSO, либо объект гало — горячий субкарлик или белый карлик на расстоянии около 3 кпс. Имеет ли действительно этот объект, найденный нами на центральном CCD-кадре мозаики (Рис. 2.2), какое-либо отношение к короткому γ-всплеску GRB 790613, так и остается не выясненным до сих пор. Напомню, что тогда, еще до первых оптических отождествлений γ-всплесков и их родительских галактик, любые пекулярные внегалактические объекты считались одними из наиболее вероятных кандидатов в оптические компаньоны источников всплесков, во всяком случае иногда в окрестностях боксов локализации некоторых γ-всплесков действительно находили объекты с похожими на наш **N1** параметрами (Moth et al. 1990, Vrba et al. 1994, McNamara and Harrison. 1994).

Предполагая возможность и каких-то внегалактических объектов в качестве родительских для источников всплесков, мы обратили внимание и на группу галактик, которая была найдена в проекции на северную часть бокса с помощью подсчетов галактик на всей CCD-мозаике. На Рис. 2.9 показан избыток ярких галактик при подсчетах галактик в двух соседних областях ("frames") мозаики II и III (см. журнал Табл. 2.1 и Рис. 2.2). Размер этой группы галактик около $120''$. Он получен на основании подсчетов (Рис. 2.8) числа галактик вплоть до $\approx 24.5^m$ в узких полосках с размерами $80'' \times 10''$, ориентированных вдоль всей мозаики. Если считать, что массы галактик пропорциональны их величинам, то для координат центра масс всей группы можно получить $\alpha(1950) = 14^h12^m16^s.7$, $\delta(1950) = 78^o55'02''.0$. Этот центр масс обозначен крестом на Рис. 2.7. Красное смещение для группы $z \approx 0.3$ можно получить из величин и цветов галактик, используя K-поправку, взятую из статьи (Frei & Gunn, 1994). Номера в Табл. 2.3 соответствуют номерам галактик на Рис. 2.7.

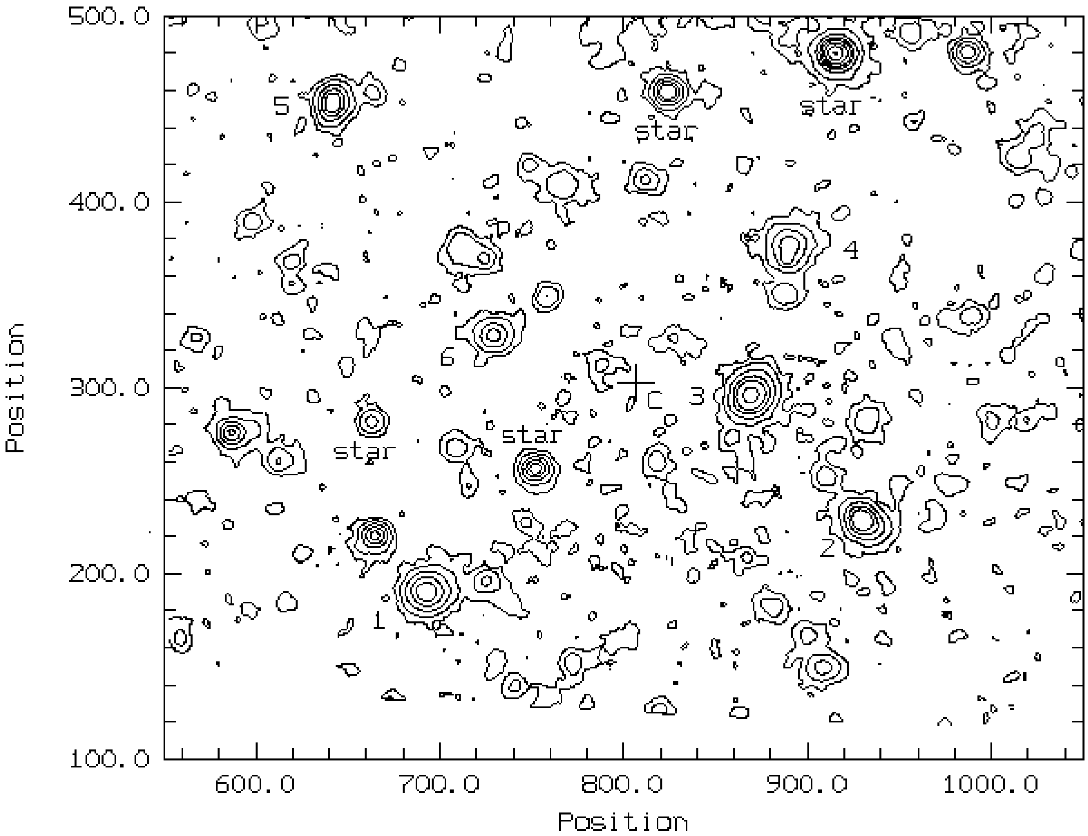


Рис. 2.7. Изображение в изофотах для группы галактик в области локализации гамма-всплеска GRB 790613. Числа соответствуют номерам Табл. 2.3 с фотометрическими данными для этих галактик. Крест и буква С указывают положение центра масс этой группы.

2.4. Результаты исследования области локализации γ-всплеска GRB 790613

Для пределов, достигнутых отдельно в каждом из трех фильтров в оптических наблюдениях, в частности, для центральной части (см. Табл. 2.2, Пл. 4) γ-бокса GRB 790613, мы имеем соответственно: $B = 26.2, V = 25.8$ и $R = 25.6$ ($S/N > 4$). Для остальной части площадки (мозаики из ПЗС-кадров), покрывающий этот γ-бокс, такие пределы несколько ниже — примерно 25.7 зв. величины во всех фильтрах. Если фотометрическим пределом, при котором еще можно по нашим данным классифицировать сразу по двум показателям цвета голубой объект с $B-V \approx -0.3, V-R > -0.1$ (как для оптического кандидата RX J1856.6–3754), считать величину $B \approx 25.2$, то из рентгеновского 3σ-предела (пунктирная линия на Рис. 2.1) для глубоких наблюдений этого же бокса с HRI ROSAT видно, что в данном случае одиночный компактный объект, возможно, связанный с этим всплеском, может быть расположен довольно близко, если температура его поверхнос-

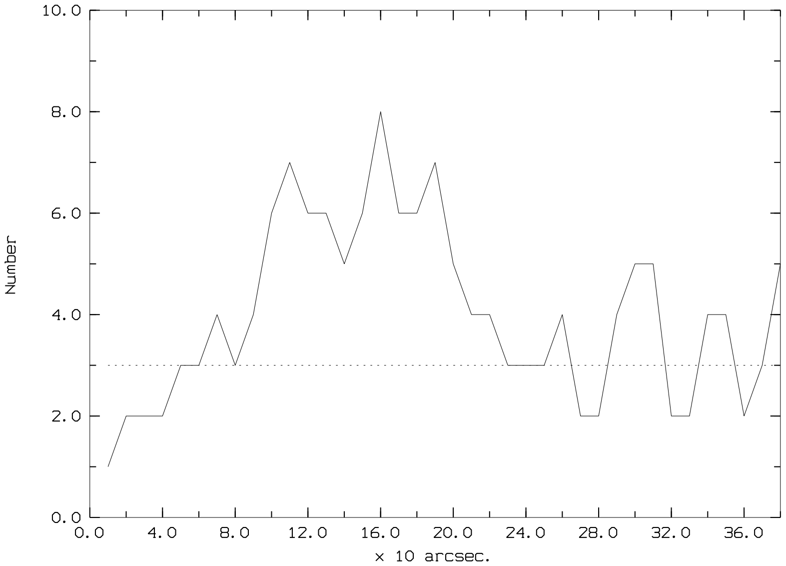


Рис. 2.8. Оценка размера (120″) группы галактик: размер получен с использованием подсчетов галактик до $V \approx 24.5$ в узких полосках 80×10 *arcsec* вдоль всей мозаики из CCD-кадров, по оси y отложено число галактик в каждой полоске, шаг по оси x соответствует 10 *arcsec*.

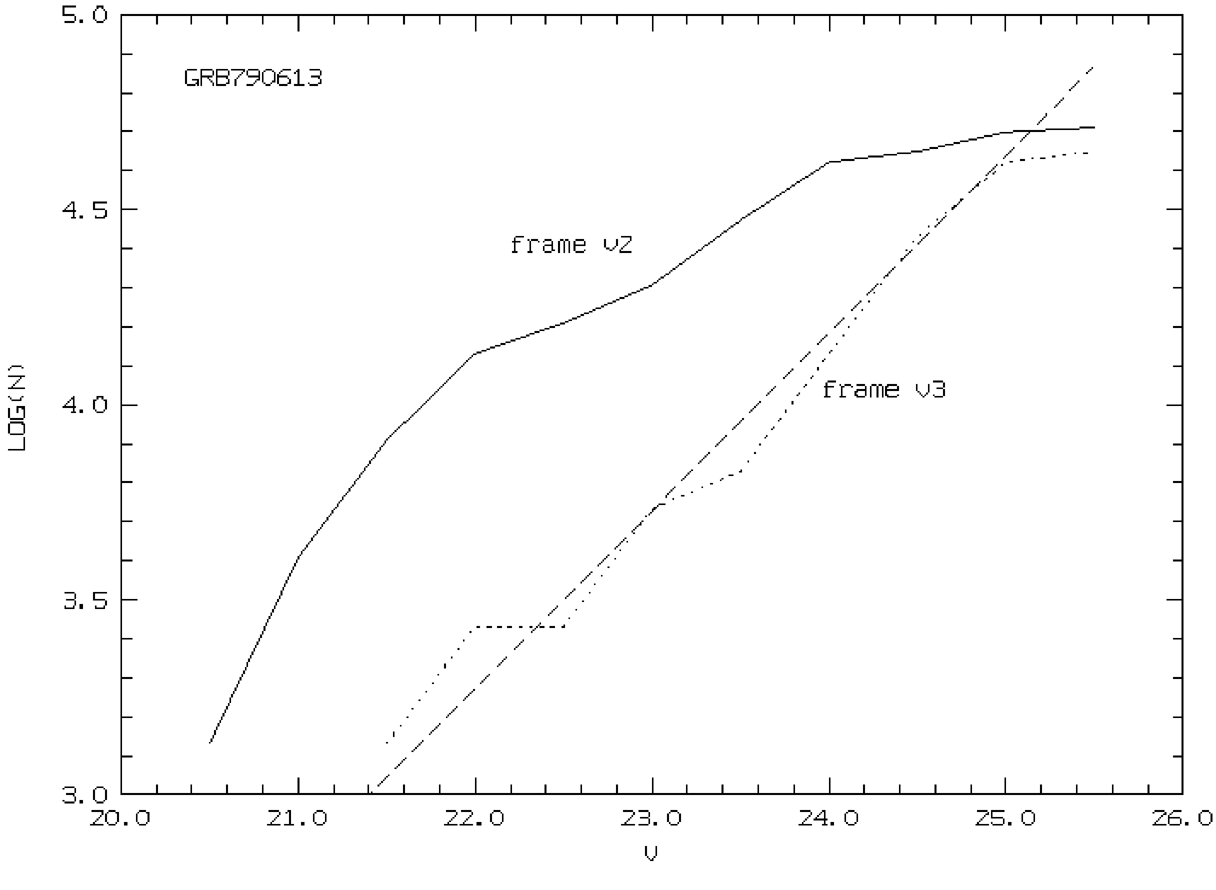


Рис. 2.9. Подсчеты галактик в двух соседних областях — "frames": "frame V2" соответствует области II V в журнале наблюдений (Табл. 2.1), а "frame V3" соответствует III V, Log(N) — логарифм числа галактик на квадратный градус и на звездную величину.

ти T_{bb} около 10^5K. В оптике этот объект мог бы быть на уровне до $\approx 27^m$. Таким образом, наши *прямые* оптические наблюдения поля GRB 790613, с учетом рентгеновских данных, все еще не исключают возможности обнаружить такой "холодный" объект при еще более глубоких оптических наблюдениях этого γ-бокса (см. так же у Greiner et al. 1995).

Вообще же, если исходить из некоторого среднего предела ROSAT ASS (прерывистая линия на Рис. 2.2) по всему небу, то все такие источники или, по крайней мере, самые близкие из них можно помещать на расстояниях $\sim$ 50 пк и дальше, меняя пространственную плотность соответствующих им гипотетических холодных ($T_{bb} <\ 1.5 \times 10^5K$) компактных объектов от некоторой *максимальной* плотности 0.0357 пк$^{-3}$, имея в виду в качестве неизвестных объектов (Lacarrieu 1971) объекты с массой $1.4M_{\odot}$, и до некоторой *минимальной* пространственной плотности, близкой к плотности старых нейтронных звезд в окрестностях Солнца (Paczyński 1990). Излучение таких холодных компактных объектов может быть ослаблено в мягком рентгеновском диапазоне потому, что для него непрозрачными становятся близко расположенные с Солнцу стенки так называемого "локального пузыря" ("Local Bubble", Paresce 1984). (Расчеты поглощения мягкого рентгена для теплового излучения одиночных нейтронных звезд есть у Helfand et al. (1980) и аналогичные расчеты для полосы 0.1-2.4 кэВ в статье Boer et al. 1993.) По этой же причине таких объектов должно быть мало в EUE и RASAT WFC обзорах неба (Welsh et al. 1994).

Разумеется, все сказанное о поисках кандидата для отождествления GRB в этой площадке неба справедливо, если слабый объект не оказывается слишком близко к яркому объекту. В данном случае только $\approx 6\%$ всей исследуемой площадки оказывается недоступной для нашего анализа из-за этого фактора, так как площадка находится довольно высоко над плоскостью Галактики ($b = 38^o$). Таким образом, наблюдения γ-бокса GRB 790613 в трех фильтрах позволяют надеяться на 94% "чистку" всего изучаемого поля для объектов, похожих по цветам на оптический кандидат для отождествления RX J1856.6–3754 — ближайшей нейтронной звезды. И, как уже было отмечено выше, при выбранном способе отбора объектов в основном по цветам, могут быть "пропущены" такие объекты, как Geminga (Halpern & Tytler, 1988) и PSR 0656+14 (Caraveo et al. 1994).

Таким образом, результаты поисков холодного компактного объекта типа нейтронной звезды внутри и в окрестностях всего бокса ошибок короткого γ-всплеска GRB 790613 (до 25.7^m во всех фильтрах) и в его центральной части (до величин: $B = 26.2, V = 25.7$ и $R = 25.6$) позволяют сделать следующие выводы:

1. Отсутствие голубых объектов по $B - V$ и $V - R$ показателям цвета во всем поле CCD-мозаики (Рис. 2.2) и вблизи центра GRB-бокса (до $B = 25.2$) можно интерпретировать как отсутствие компактного объекта без какой-либо плотной для оптики оболочки (т. е. с “голой” поверхностью) горячее $\approx$ 150000 K, по крайней мере, до $\approx$ 50 пк в этом направлении.

2. Оптические наблюдения дополняют оценку температуры предполагаемых одиночных компактных объектов в окрестностях Солнца, которую можно сделать, интерпретируя результаты поисков точечных рентгеновских источников в диапазоне $0.1 - 2.4$ кэВ. Результаты наблюдений этого гамма-бокса пока не запрещают существование в окрестностях Солнца (т. е. в сфере с радиусом $\lesssim 50$ пк) до $\approx 2 \cdot 10^4$ "холодных" ($T_{bb} \lesssim 10^5$ K) компактных объектов, некоторые из которых могли бы быть связаны с ближайшими источниками коротких γ-всплесков. Соответственно, более низкие значения предполагаемой пространственной плотности в окрестностях Солнца ($\lesssim 0.001$/пк^3) при некоторой заданной наблюдаемой средней частоте коротких γ-всплесков "отодвигают" ближайший источник всплеска на расстояние до 130 пк (или до $B \approx 27$).

3. При заданном темпе наблюдаемых в эксперименте BATSE (и ярких, и слабых) γ-всплесков < 0.8/сутки (Fishman et al. 1994) автоматически оказывается, что *одни только* старые нейтронные звезды, родившиеся согласно стандартному сценарию (Paczyński 1990), не могут быть источниками всех γ-всплесков — и коротких, и длинных, особенно если считать, как это иногда допускалось до 1997 года, что все источники всплесков находятся в окрестностях Солнца. Длинные γ-всплески уже отождествлены с внегалактическими объектами. Следовательно, сейчас можно говорить лишь *о некоторой части* коротких (< 100 мс) и ярких всплесков, обнаруживаемых с гораздо меньшей (чем 0.8 раз в сутки) частотой, источники которых могли бы быть все-таки связаны со старыми изолированными аккрецирующими нейтронными звездами.

Вопрос о глобальном распределении источников коротких всплесков в Галактике, который становится существенным для слабых γ-всплесков (Fishman et al. 1994), здесь не рассматривается, поскольку имеются в виду в основном только наиболее мощные всплески и, соответственно, *самые близкие* к нам источники, возможно связанные и с наиболее близкими компактными объектами. Открыт вопрос о повторяемости (рекуррентности) коротких всплесков — ясно только то, что их время рекуррентности может быть больше времени наблюдений γ-всплесков вообще, и в частности оно напрямую связано с предполагаемым механизмом коротких γ-всплесков (Hartmann 1994, 1994a, Bisnovatyi-Kogan 1999), который здесь тоже не обсуждается.

Детально рассмотренная в предыдущих разделах этой главы методика может быть использована при поисках и отождествлении ближайших изолированных нейтронных звезд — тоже слабых и предельно слабых объектов в оптике. Об исследованиях такого объекта идет речь в следующем разделе. Методика и результаты исследования слабых протяженных внегалактических объектов (фотометрия, показатели цвета, подсчеты и проч.) в поле GRB 790613 были использованы и при отождествлении оптических транзиентов, и при изучении родительских галактик длинных γ-всплесков в главах 3-5.

2.5. Оптика изолированной нейтронной звезды: наблюдения поля PSR B0656+14

Исследование (отождествление) изолированной нейтроной звезды-пульсара PSR B0656+14 упоминается здесь не только потому, что это тоже довольно слабый объект в оптике и методика фотометрии применялась в этом случае та же, что и при исследовании γ-боксов. Методика исследования таких объектов, как предельно слабых источников с пекулярными спектрами, действительно оказалась применимой, когда наконец были открыты оптические транзиенты (послесвечение) длинных γ-всплесков. Но кроме того (и это связано с предыдущим исследованием γ-всплесков в рамках галактической гипотезы), движущим мотивом сначала было то, что мы надеялись изучить такой компактный объект, который мог бы дать требуемое Релей-Джинсовское поведение $BVRI$-спектра. Но все оказалось сложнее, хотя опыт работы со слабыми звездообразными и протяженными объектами в поле PSR B0656+14 потом был использован при отождествлении как транзиентов, так и родительских галактик γ-всплесков.

Выполнение совместной (АКЦ ФИАН и САО) программы исследований оптики изолированных нейтронных звезд–пульсаров на 6-метровом телескопе началось в 1994 г. одновременно с исследованием боксов ошибок локализации γ-всплесков. Эта программа проводилась с самого начала с использованием новых данных с космического телескопа им. Хаббла (в сотрудничестве с Penn. State University, USA). К тому времени (до 1994 г.) оптическое излучение было обнаружено у $\sim 1\%$ из ~ 750 известных тогда радиопульсаров (Bignami & Caraveo 1996). В частности, уже было доложено об обнаружении соответствующих оптических компаньонов (counterparts) для пульсаров довольно разных возрастов: от очень молодого PSR B0531+21 (пульсар в Крабе) до старых PSR B1929+10 и B0950+08 (Pavlov, Stringfellow & Cordova 1996a). Специальный интерес среди этих объектов представляют так называемые "средневозрастные" ($\tau \sim 10^5 - 10^6$ лет) "мягкие" рентгеновские пульсары PSR B0656+14, J0633+1746 (Geminga) и B1055–52, хорошо исследованные с помощью рентгеновских обсерваторий $ROSAT$ и $ASCA$. Предполагается, что их тепловое рентгеновское излучение образуется либо прямо на поверхности компактного объекта, либо должно возникать где-то близко у самой поверхности нейтронных звезд. Таким образом, исследование этого излучения дает возможность определить температуры поверхности нейтронных хвезд (NS) различного возраста и сравнить их с различными теоретическими моделями остывания нейтронной звезды, чтобы в конце концов наложить ограничения на свойства сверхплотной материи в ее недрах. (e. g., Pavlov et al. 1995). Так как температура поверхности, так же как и другие параметры излучающих слоев, могут быть измерены гораздо более точно, если поверхностная радиация также наблюдается в оптической и в ультрафиолетовой областях спектра (Pavlov et al. 1996b), то исследование оптического и UV-излучения этих объектов становится потенциально очень важным фактором, дополняющим рентгеновскую информацию по изолированным нейтронным звездам.

В последующих разделах будут представлены результаты многоцветных ($BVRI$) CCD-фотометрических наблюдений и оптического отождествления на БТА средневозрастного пульсара PSR B0656+14 ($\tau = P/2\dot{P} = 1.1{\times}10^5$ лет). Оптический компаньон этого радиопульсара ко времени начала наших наблюдений был только что найден (Caraveo et al. 1994a) на NTT и 3.6-метровом телескопах ESO в V полосе как слабый объект ($V \sim 25$) на 3σ-уровне. Его наблюдал и Pavlov et al. (1996a) на Faint Object Camera (FOC), установленной на космическом телескопе Хаббла (HST) в специальном широком ультрафиолетовом фильтре F130LP ($\lambda\lambda = 2310 - 4530$ Å). Они подтвердили отождествление пульсара на очень высоком уровне достоверности ($S/N = 52$ в ультрафиолете), и это означало, что наблюдаемая радиация на этих частотах уже главным образом нетепловая, вероятнее всего (как они заключили), она магнитосферного происхождения. Хотя этими наблюдениями нельзя было исключить и некоторый вклад тепловой компоненты излучения, возникающей на поверхности нейтронной звезды, т.е. там же, где возникает и мягкое рентгеновское излучение. (Все определяется точностью оценки температуры поверхности по рентгеновским данным.) Поэтому, чтобы "отделить" эту тепловую компоненту и понять природу нетепловой радиации, поток от объекта должен быть измерен в нескольких частотных полосах, перекрывающих как можно больший спектральный диапазон.

Mignani, Caraveo & Bignami (1997) повторили наблюдения PSR B0656+14 в оптике на HST Planetary Camera (PC) в фильтре F555W и подтвердили свою оценку V величины с бо́льшей точностью: $V = 25.1 \pm 0.1$. Очевидно, что нужны были наблюдения и с другими (красными) фильтрами, чтобы определить форму спектра в этой области от оптического компаньона пульсара. Т. о., работа на 6-метровом телескопе была включена в совместную программу исследований изолированных нейтронных звезд, в которой началось изучение красной области спектра для PSR B0656+14. Кроме этого в программу широкополосной CCD-фотометрии слабых объектов на БТА были включены и известные (к тому времени) ближайшие пульсары Северного неба (Kurt et al. 2000).

В наших первых наблюдениях оптического компаньона PSR B0656+14 (январь 1996) в B, V и R фильтрах (Kurt et al. 1997a) были получены оценки блеска для этого объекта в V-полосе и впервые в B и R фотометрических полосах, подтвердившие нетепловой спектр в этой области. Тем не менее, из-за плохих погодных условий во время этих наблюдений потоки были измерены с большими ошибками, особенно в фильтре R. Наилучшие (по тем первым наблюдениям) потоки с уровнем достоверности не хуже 3σ приведены на Рис. 2.10 вместе с интерпретацией этих данных. Фрагмент сглаженного изображения поля этого пульсара по наблюдениям 25/26 января 1996 г. в фильтре B показан на Рис. 2.11. Это было первое отождествление этой изолированной нейтронной звезды на БТА, при котором, не в лучших тогда погодных условиях, удалось измерить поток от объекта только благодаря существенному вкладу нетепловой компоненты в его спектре.

Следующие наблюдения этого же объекта были проведены в ноябре 1996 г. и они были более успешными потому, что удалось измерить потоки в 4-х фотометрических $BVRI$ полосах (Kurt et al. 1997b, 1998). Ниже будут описаны эти наблюдения и их обработка. Затем будут обсуждены свойства

Таблица 2.4. Наблюдения поля PSR B0656+14 11/12 ноября 1996 г.

time UT	exp. ID	exposure (sec)	seeing (arcsec)	Z (deg)	backgr. (mag/ arcsec^2)
22:37	B 1	600	1.64	40.63	22.41
22:49	V 1	600	1.56	39.00	21.60
23:01	R 1	600	1.42	37.43	20.70
23:11	I 1	300	1.31	35.95	19.39
23:18	I 2	300	1.36	35.17	19.34
23:25	B 2	600	1.69	34.42	22.39
23:36	V 2	600	1.42	33.21	21.61
23:47	R 2	600	1.31	32.13	20.80
23:59	I 3	300	1.42	31.22	19.52
00:06	I 4	300	1.33	30.76	19.47
00:12	I 5	300	1.26	30.39	19.45
00:19	B 3	600	1.67	30.06	22.34
00:30	V 3	600	1.31	29.65	21.52
00:42	R 3	600	1.45	29.43	20.64
01:13	R*4	600	1.45	29.88	20.64
01:25	I 6	300	1.37	30.42	19.29
01:31	I 7	300	1.40	30.50	19.32
01:41	I 8	300	1.30	31.57	19.41
01:48	B 4	600	1.75	32.10	22.27
01:59	V 4	600	1.61	33.18	21.41
02:11	R 5	600	1.51	34.39	20.57
02:22	R 6	600	1.53	35.74	20.53
02:34	I 9	300	1.51	37.20	19.22
02:41	I 10	300	1.53	38.05	19.05
02:47	I 11	300	1.51	38.95	18.75

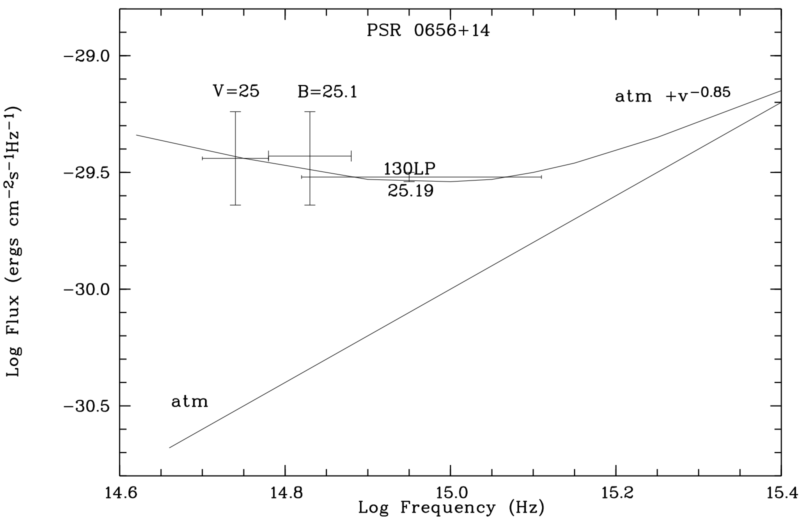


Рис. 2.10. На рисунке показано "B-соединение" фотометрических данных внеатмосферных (Pavlov et al. 1996a) и наземных наблюдений PSR 0656+14, известных к сентябрю 1996 г. Широкий интервал (полуширина фильтра — ошибка измерения потока), обозначенный как "130LP/25.19", показывает логарифм спектральной плотности потока/поток, измеренный с фильтром HST F130LP (UV + U+B), который кроме внеатмосферного UV пропускает также и "наземные" U,B оптические кванты. Крест (полуширина фильтра и ошибки наблюдений), обозначенный как "$B = 25.1$", показывает результат фотометрических измерений блеска оптического кандидата PSR 0656+14 в Cousins B-фильтре, сделанных на БТА 25/26 января 1996 г. Крест с обозначением "$V = 25$" показывает результат, полученный NTT (Caraveo et al. 1994,1994b). Интерпретация: линия, обозначенная как "$\nu^{-0.85} + atm$", показывает аппроксимацию UV+оптических данных (HST + наземные наблюдения) по этим 3 спектральным точкам. В аппроксимации участвует также и прямая линия (обозначенная "atm"), которая показывает отдельно модельный Релей-Джинсовский тепловой спектр для эффективной температуры $T = 530000$ К поверхности нейтронной звезды на расстоянии $d = 280$ пк.

и происхождение оптического спектра PSR B0656+14.

2.5.1. Наблюдения PSR B0656+14 в ноябре 1996 г., отождествление и фотометрия

Фотометрические наблюдения PSR B0656+14 11/12 ноября (так же, как и в январе) 1996 г. были выполнены с помощью CCD-фотометра установленного в Первичном Фокусе БТА: ПЗС "Electron ISD017A" с форматом 520×580 ("zoomed") пикселов, соответствующим полю зрения $2'.38 \times 2'.66$ и с размером пиксела на небе $0''.274 \times 0''.274$. Наблюдения были выполнены с фильтрами близкими к B, V, R и I в стандартной фотометрической

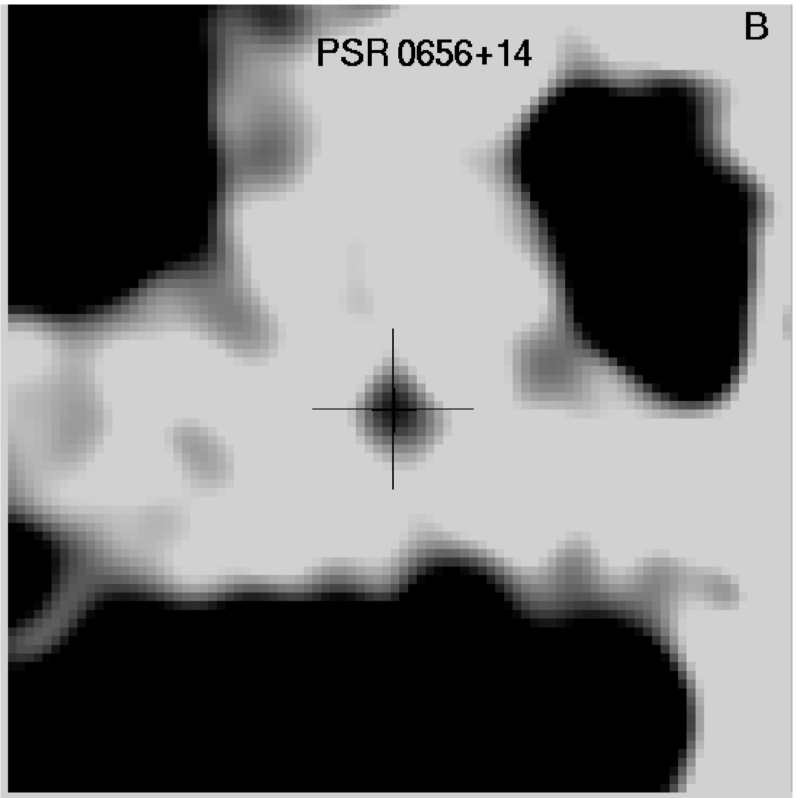


Рис. 2.11. Наблюдения 25/26 января 1996 г. Первое отождествление изолированной нейтронной звезды PSR B0656+14 на БТА — фрагмент $25'' \times 25''$ изображения поля пульсара в фильтре B, полученного с эффективным временем накопления 700 с. Объект, совпадающий с положением радиопульсара PSR B0656+14 (отмечено крестом), имеет величину в фильтре B около 25.1.

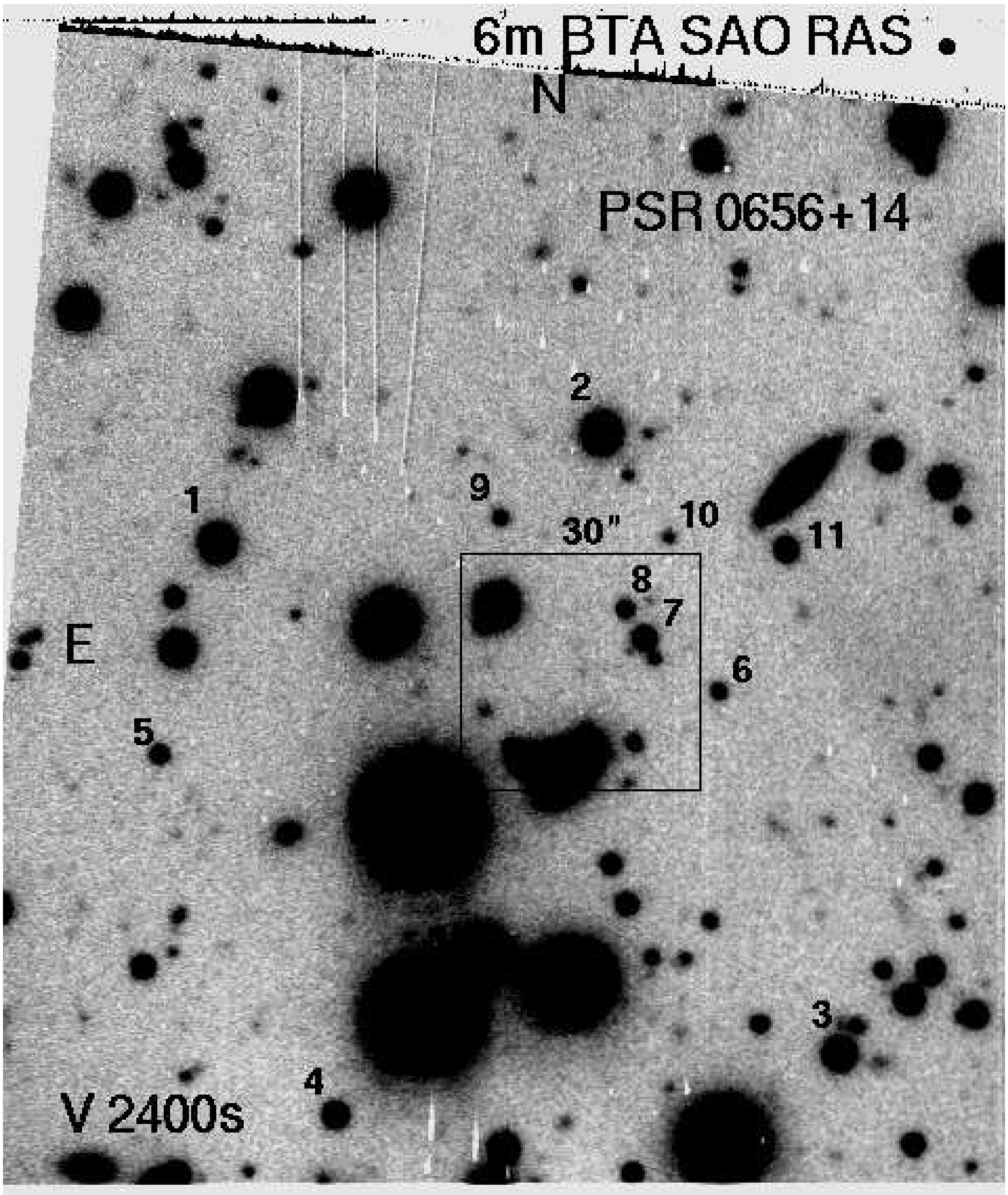


Рис. 2.12. Наблюдения 11/12 ноября 1996 г. CCD-изображение поля PSR B0656+14 в V-фильтре, полученное с временем накопления 2400 с. Центр фрагмента с размерами $30'' \times 30''$ совпадает с положением пульсара. Номерами обозначены звезды, величины которых даны в Табл 2.6.

Таблица 2.5. Координаты объектов в поле PSR B0656+14.

No.	α_{1950}	δ_{1950}	относит. координаты (arcsec)	расстояние от PSR (arcsec)
1	06:57:00.97	14:18:51.5		
2	06:56:57.62	14:19:05.1		
3	06:56:55.63	14:17:43.6		
4	06:57:00.02	14:17:36.6		
5	06:57:01.51	14:18:24.1		
6	06:56:56.63	14:18:31.3		
o1,PSR	06:56:57.84	14:18:34.2	206.5; 203.0	0.0
o2	06:56:57.75	14:18:36.2	207.5; 204.3	1.7
o3	06:56:57.87	14:18:37.4	206.1; 207.1	4.1
o4	06:56:57.47	14:18:34.7	212.0; 204.0	5.1
o5	06:56:57.58	14:18:34.7	209.5; 204.0	3.1

(Cousins) системе. В Таблице 2.4 даны основные параметры условий наблюдения: (1-я колонка) время начала каждой экспозиции, (2-я колонка) фильтр и номер экспозиции, (3-я) время экспозиции, (4-я) размер изображения, (5-я) зенитное расстояние Z, (6-я колонка) фон неба в звездных величинах на arcsec^2. Стандартная процедура первичной редукции данных включала вычитание электронного смещения (“bias”), деление на плоское поле (“flat-fielding”), удаление космических частиц. Данные были обработаны с использованием все того же пакета MIDAS. Были обработаны почти все полученные CCD-кадры (экспозиции), за исключением R*4, где след от космической частицы оказался в непосредственной близости от положения пульсара. На Рис. 2.12 показано поле вокруг PSR B0656+14 — сумма всех 4 экспозиций в фильтре V.

Отождествление. Согласно Thompson and Cordova (1994) VLA-положение этого пульсара такое: $\alpha_{1950} = 06^h\ 56^m\ 57^s.942$; $\delta_{1950} = 14°18'33''.80$ (эпоха 1992.98). Формальная точность радиоположения ($0''.09$ и $0''.03$ для α и δ соответственно) не включают возможные систематические ошибки, которые могут достигать $\sim 0''.2$ (Pavlov et al. 1996a). С учетом собственного движения пульсара: $\mu_\alpha = +0.73 \pm 20$ и $\mu_\delta = -26 \pm 13$ milliarcsec год$^{-1}$ (Pavlov et al. 1996a), ожидаемое положение пульсара на эпоху наших наблюдений (1996.86) такое: $\alpha_{1950} = 06^h\ 56^m\ 57^s.96(\pm 0^s.02)$, $\delta_{1950} = 14°18'33''.7(\pm 0''.2)$.

Положение оптического кандидата относительно ближайших ярких звезд, найденное с использованием *HST* Guige Star Catalog (GSC), было представлено Caraveo et. al. (1994b). Астрометрическая привязка наших данных

Таблица 2.6. Звездные величины 11 звезд вокруг пульсара.

	B ($\lambda_{\text{eff}} = 4448$ Å, FWHM=1008 Å)	V ($\lambda_{\text{eff}} = 5505$ Å, FWHM=827 Å)	R ($\lambda_{\text{eff}} = 6588$ Å, FWHM=1568 Å)	I ($\lambda_{\text{eff}} = 8060$ Å, FWHM=1542 Å)
1	19.35 ± 0.01	18.31 ± 0.01	17.72 ± 0.01	17.17 ± 0.01
2	18.71 ± 0.01	18.02 ± 0.01	17.66 ± 0.01	17.32 ± 0.01
3	19.90 ± 0.01	18.69 ± 0.01	17.96 ± 0.01	17.36 ± 0.01
4	20.94 ± 0.02	19.84 ± 0.01	19.19 ± 0.01	18.64 ± 0.01
5	22.61 ± 0.02	21.31 ± 0.01	20.54 ± 0.01	19.93 ± 0.01
6	22.70 ± 0.03	21.96 ± 0.02	21.52 ± 0.01	21.12 ± 0.02
7	21.99 ± 0.03	20.31 ± 0.02	19.13 ± 0.01	17.74 ± 0.02
8	23.08 ± 0.03	21.52 ± 0.02	20.50 ± 0.01	19.53 ± 0.02
9	23.58 ± 0.03	22.06 ± 0.02	21.24 ± 0.01	20.44 ± 0.02
10	24.52 ± 0.03	22.88 ± 0.02	21.92 ± 0.01	21.08 ± 0.02
11	21.38 ± 0.03	20.40 ± 0.02	19.89 ± 0.01	19.39 ± 0.02

основана на координатах звезд поля вокруг пульсара, взятых из Digitized Sky Servey (номинальная точность $\sim 1''$). В Таблице 2.5 приведены координаты этих ярких звезд (обозначенных номерами от 1 до 6 на Рис. 2.12), координаты оптического кандидата для отождествления пульсара (обозначен o1,PSR) и четырех слабых объектов (o2, o3, o4, o5) в $\sim 5''$ окрестности вокруг пульсара. Для этих объектов, координаты которых соответствуют шкалам, изображенным на рисунках Рис. 2.14, 2.15, 2.17, указаны и расстояния их от положения пульсара.

Фотометрические привязки были выполнены по наблюдениям стандартных звезд из каталога Ландольта (Landolt 1992): 112822, GD71, RU 149 (8 звезд) и звезды 2015 из (Weis 1991). Фотометрические условия оставались стабильными в течение всей ночи с незначительным увеличением поглощения в голубой части спектра к концу наблюдений. Для коэффициентов экстинкции мы использовали средние для САО величины: $k_b = 0.34$, $k_v = 0.21$, $k_r = 0.15$, $k_i = 0.10$ (в звездных величинах). По наблюдениям звезд-стандартов были выведены уравнения перехода от инструментальной системы (величины $b,\ v,\ r,\ i$) к Cousins системе (величины $B,\ V,\ R,\ I$):

$$\begin{aligned} B - b &= 26.14 + 0.16(b - v) \\ V - v &= 26.30 - 0.11(b - v) \\ R - r &= 26.62 - 0.02(v - r) \\ I - i &= 25.77 + 0.07(r - i)\ . \end{aligned} \tag{2.1}$$

Звездные величины в инструментальной системе вычислялись как (напри-

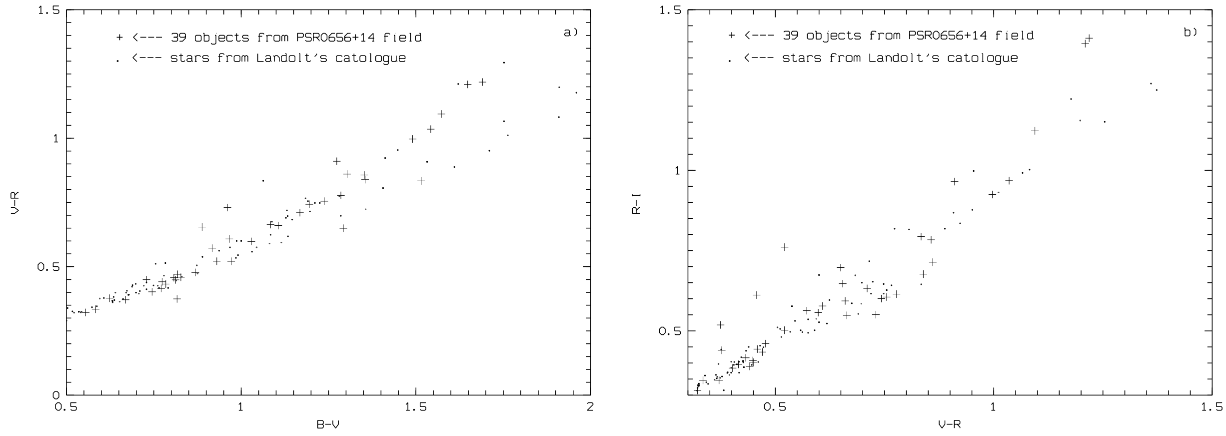


Рис. 2.13. Диаграммы "$V - R$ vs. $B - V$" и "$R - I$ vs. $V - R$" для 39 звезд в поле PSR B0656+14. Крестиками показаны показатели цвета для объектов в поле пульсара, а точками изображены звезды из каталога Ландольта.

мер, для фильтра B) $b = -2.5\log(F_b/t_{\rm exp}) - \Delta_a m_b - k_b/\cos Z$ и так же (v, r, i) для других фильтров, где F (F_b, F_v, F_r, F_i) поток от объекта в отсчетах (DN) при данной апертуре, $t_{\rm exp}$ время экспозиции, $\Delta_a m$ — поправка за конечную апертуру (получается из измерений Point Spread Function [PSF] для ярких звезд), $k/\cos Z$ — поправка за атмосферную экстинкцию. Ошибки числовых коэффициентов в переходных (к стандартной системе $BVRI$) уравнениях (2.1) не превышают ± 0.01. Ошибки измерения потоков от объекта в звездных величинах могут быть определены по измерениям отношения "сигна/шум" (S/N):

$$\Delta m = -2.5\log(1 \pm \frac{1}{S/N}), \frac{S}{N} = \frac{F\sqrt{Gain}}{\sqrt{F + Sky \times N_{\rm pix}}}\ , \qquad (2.2)$$

где $N_{\rm pix}$ — число пикселов в выбранной апертуре, Sky — величина локального фона неба в отсчетах (DN) на пиксел. Мы использовали $Gain = 2.3e^-/\mathrm{DN}$ — число фотонов на один отсчет в пикселе. Шум считывания нашего CCD был $\sim 8e^-$, или $4 - 5$ DN (отсчетов) — он был пренебрежимо малым в наших наблюдениях.

Используя эти уравнения (2.1 и 2.2), мы сначала определили величины 11 относительно ярких (для кандидата PSR B0656+14) звезд в поле пульсара. (Индивидуальные изображения поля были просуммированы для каждого фильтра.) Тем самым мы создали систему т. н. "вторичных стандартов" в поле слабого объекта — кандидата в оптический компаньон для PSR, зв. величины и показатели цвета которого мы хотели измерить наиболее корректно. (Эта система "стандартов в поле" потом использовалась в этой (Kurt et al. 2000) и в других программах (Shearer et al. 1997) и до

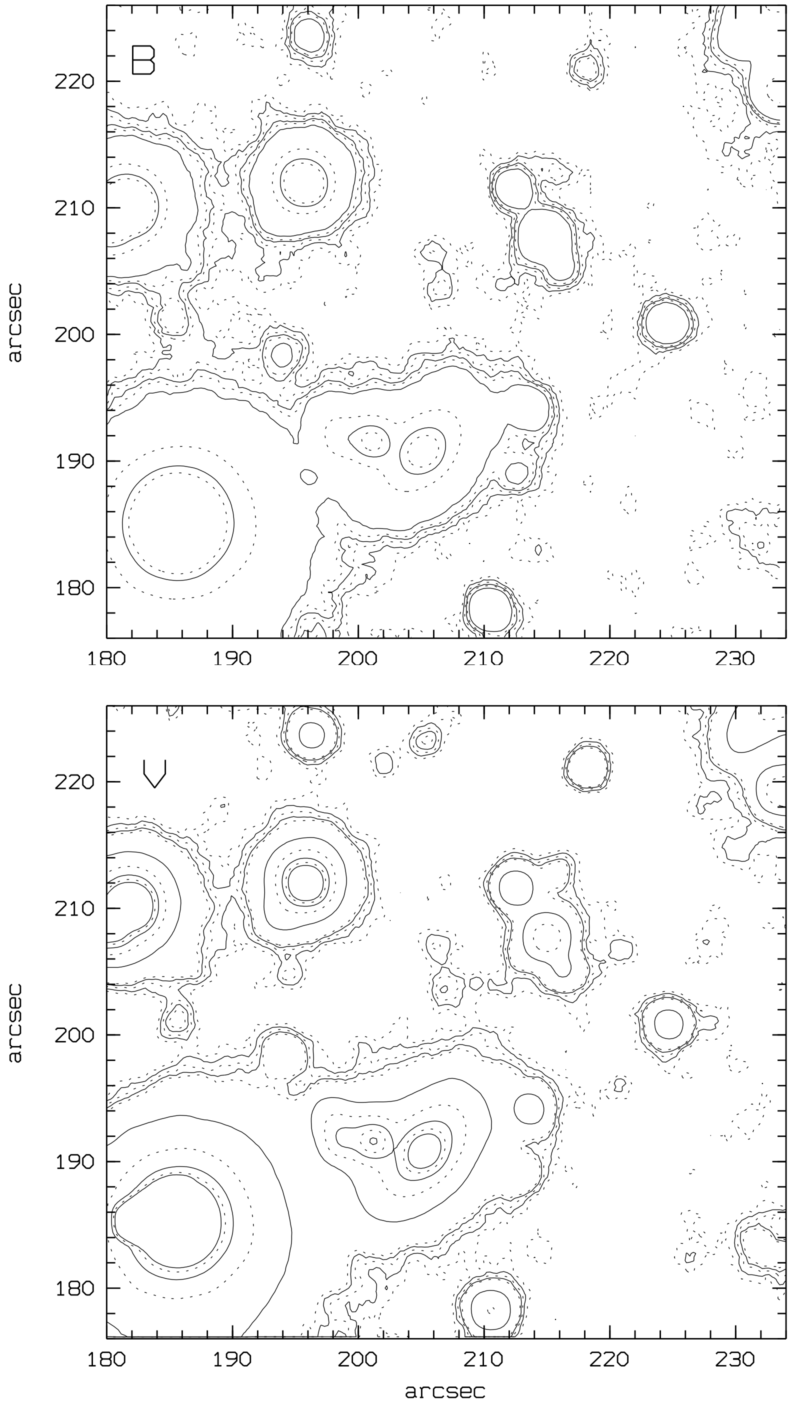


Рис. 2.14. Изображения в изофотах окрестностей пульсара PSR B0656+14 в B и V фильтрах. Размер каждого фрагмента $50'' \times 54''$. На осях нанесены шкалы (в arcsec) относительного положения объектов.

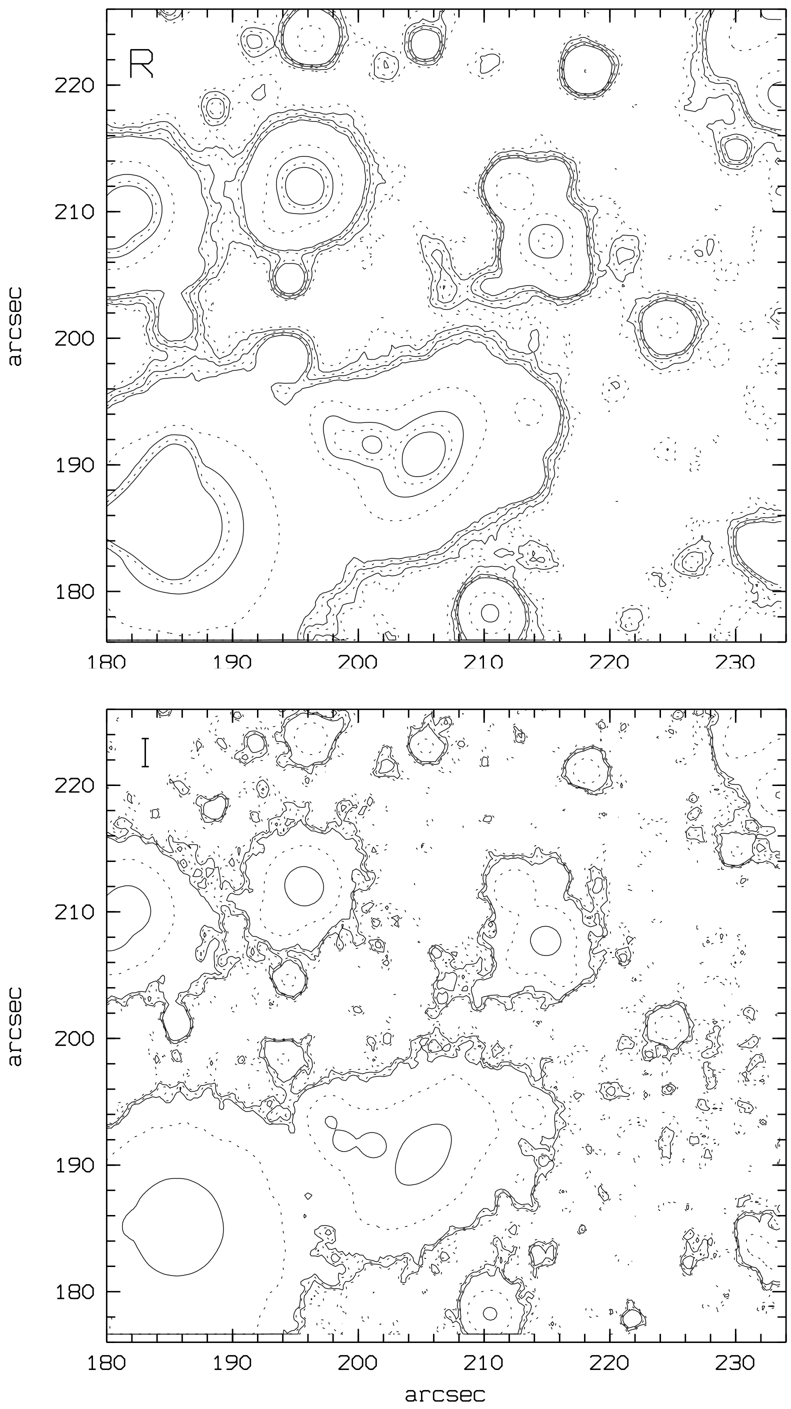


Рис. 2.15. Изофотные изображения окрестностей PSR B0656+14 в фильтрах R и I с относительным положением объектов в arcsec, как и на Рис. 2.14.

сих пор используется на других телескопах, например, на Subaru, при исследовании пульсара PSR B0950+08 и его окрестностей: astro-ph/0206229.) Звездные величины в четырех $BVRI$ стандартных полосах для 11 звезд (они обозначены номерами от 1 до 11 на Рис. 2.2) вместе с эффективными длинами волн и полуширинами фильтров даны в Табл. 2.6. Кроме того, на Рис. 2.13 показано сравнение с показателями цвета звезд из каталога Ландольта показателей цвета для 39 звездообразных объектов, профотометрированных в поле PSR с величинами от $V = 17.5$ до $V = 22.5$. Это сделано прежде всего для того, чтобы точнее оценить влияние поглощения в этом направлении. Диаграммы "цвет-цвет" показали близкое распределение по цветам наших объектов в поле и ландольтовских стандартов, что свидетельствует как о низком поглощении в Галактике в направлении на PSR B0656+14, так и (попутно) об отсутствии систематических сдвигов использованной нами на БТА фотометрической системы.

2.5.2. Оптический компаньон PSR B0656+14 и объекты в его ближайшей окрестности

Изображения в изофотах окрестностей пульсара во всех 4-х фильтрах, полученные по сглаженным (с окном 3×3 pixels) CCD-кадрам, показаны на Рис. 2.14 и 2.15. Первые пять изофот снизу (т.е. начиная с самых низких яркостей) соответствуют следующим величинам над фоном неба: $Sky + n\sqrt{Sky/N_{\rm pix}}$, с $n = 1,\ 2,\ 3,\ 4,\ 5$, где $N_{\rm pix} = 28$ соответствует диаметру апертуры 6 пикселов ($1\overset{''}{.}6$), а величина Sky — фон около пульсара. Шкала изофот для больших яркостей произвольная, они приведены здесь, чтобы показать положение более ярких деталей на изображении поля. В пределах $\approx 5''$ вблизи положения пульсара детектируются в общей сложности до 5-ти каких-то объектов (Рис. 2.14, 2.15 и 2.16), так или иначе наблюдаемых в разных $BVRI$-полосах. Положение одного из них (“o1,PSR” в Таблице 2.5 и на схеме Рис. 2.17) совпадает в пределах ошибок астрометрической привязки с радиоположением пульсара и, таким образом, этот объект является наиболее вероятным кандидатом для оптического отождествления PSR B0656+14 по наблюдениям на БТА. Ближайший к нему объект “o2” обнаруживаемый только в фильтре I, лежит на расстоянии $\approx 2''$, на северо-запад от пульсара. Так как объекты в этой ближайшей окрестности ($\approx 5''$) не видны одновременно в $BVRI$ фильтрах, для удобства их положения приведены здесь на отдельной схеме, на Рис. 2.17.

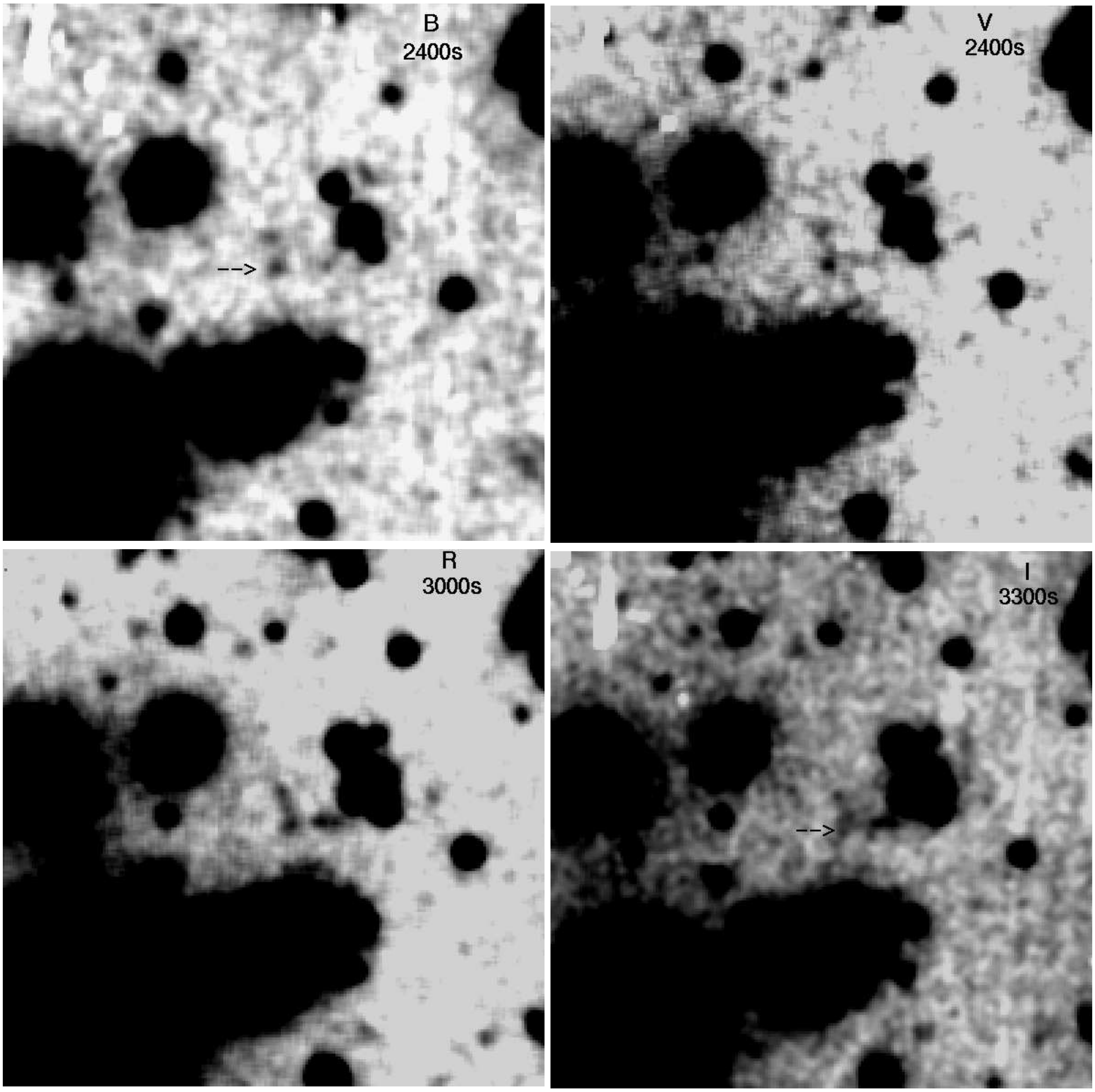


Рис. 2.16. Окрестности пульсара PSR B0656+14 в каждом из *B, V, R, I* фильтров. Размер каждого фрагмента $54'' \times 54''$. Оптический кандидат пульсара ("o1,PSR", Рис. 2.17) показан стрелками на *B* и *I* изображениях. Ближайший объект ("o2" на Рис. 2.17) расположен на расстоянии $\approx 2''$ на северо-запад от пульсара.

Таблица 2.7. Фотометрия для оптического кандидата PSR B0656+14.

filter	$Sky/t_{\rm exp}$ (DN/pix/s)	R_a (pix)	$N_{\rm pix}$	S/N	$-2.5\log(F/t_{\rm exp})$	Δ_am	$k/\cos Z$	$m_{\rm ins}$	$m_{\rm cous}$	Flux (μJy)
		3	28	5.6	$+0.13$	1.01				
B	2.465	4	50	6.1	-0.24	0.63	0.43	-1.30	$24.85(+0.19, -0.16)$	0.46 ± 0.08
		5	79	6.1	-0.42	0.41				
		3	28	6.6	-0.29	0.84				
V	6.429	4	50	6.7	-0.58	0.51	0.26	-1.35	$24.90(+0.16, -0.14)$	0.40 ± 0.06
		5	79	7.1	-0.73	0.33				
		3	28	7.9	-1.11	0.81				
R	18.207	4	50	9.8	-1.34	0.48	0.19	-2.09	$24.52(+0.12, -0.11)$	0.47 ± 0.06
		5	79	9.3	-1.60	0.30				
		3	28	4.6	-1.02	0.81				
I	29.922	4	50	4.2	-1.42	0.49	0.12	-1.95	$23.81(+0.27, -0.21)$	0.71 ± 0.16
		5	79	4.1	-1.67	0.31				

Фотометрия оптического кандидата для отождествления пульсара (Таблица 2.7) была проведена для апертур с разными радиусами R_a для выбора оптимального значения S/N. Объект "o2", блеск которого в фильтре I сравним с блеском самого кандидата для отождествления пульсара, начинает влиять на его фотометрию при радиусе апертуры $R_a \approx 4$ или более пикселов (т.е. около или более $1''$). Кроме того, влиянию соседних протяженных объектов на фотометрию оптического компаньона PSR B0656+14 было посвящено специальное исследование, см. Koptsevich et al. 2001. Большинство обозначений Табл. 2.7 были уже описаны выше. Колонки $m_{\rm ins}$ и $m_{\rm cous}$ — инструментальные величины и зв. величины в системе Cousins соответственно. В последней колонке этой таблицы приведены потоки от оптического компаньона PSR B0656+14 (или спектральные плотности потоков) в μЯн 1μЯн $= 10^{-29}$ эрг см$^{-2}$с$^{-1}$ Гц$^{-1}$, полученные из Cousins звездных величин с помощью данных по αLyr (Fukigita et al. 1995).

Теперь об объектах в ближайшей окрестности пульсара. Координаты пяти объектов в пределах $< 5''$ от ожидаемого положения пульсара (см. Рис. 2.16 и 2.17) представлены в Табл. 2.5. Объект "o1,PSR", распределение яркости (профиль) для которого соответствует распределению яркости, характерному для точечного источника, является единственным наиболее вероятным кандидатом для *оптического отождествления пульсара на основании его астрометрического положения и фотометрии.*

Объект "o3" детектируется на всех наших *B,V,R,I* CCD-изображениях так же, как и на изофотных картах Fig. 2 из статьи Caraveo et al. (1994a). Он был также обнаружен как слабый протяженный объект на изображениях, полученных на Хаббловском телескопе HST в ультрафиолете, в полосе F130LP (Pavlov et al. 1996a). Он обнаруживался даже по данным наших первых наблюдений 25/26 января 1996 г. в фильтре B (см. Рис. 2.11) как некоторое слабое повышение уровня фона севернее оптического кандидата PSR B0656+14 — как раз в том же самом положении относительно пульсара, что и на HST и потом на БТА. Таким образом, присутствие этого слабого и скорее всего протяженного объекта на расстоянии $\simeq 4''$ на север от пульсара было надежно установлено на 3-х инструментах. Объект "o4" также был сначала обнаружен на ESO-3.6m и NTT телескопах в V фильтре (Caraveo et al. 1994a), хотя трудно провести различие между объектами "o4" и "o5" ввиду их явной протяженности. Эти объекты находятся за пределами поля зрения $7''\!.4 \times 7''\!.4$ в изображениях, полученных с Камерой Слабых Объектов (FOC) на HST и представленных группой Pavlov et al. (1996a). Объект "o2" — ближайший к пульсару — надежно детектируется лишь в

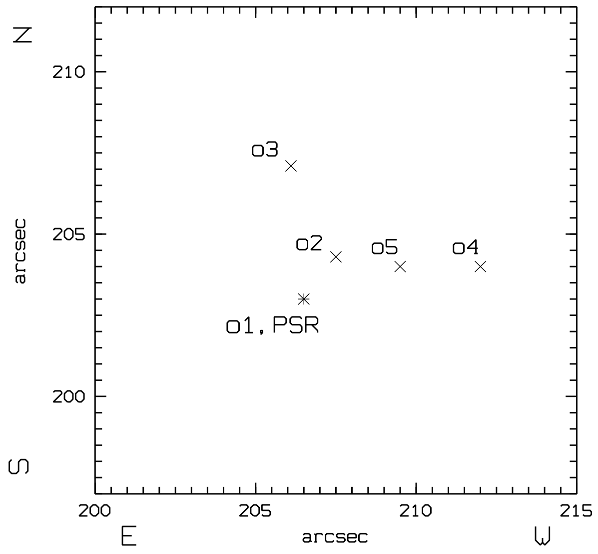


Рис. 2.17. Относительное положение всех пяти слабых объектов в ближайшей окрестности PSR B0656+14, наблюдаемых в разных фильтрах B, V, R, I (см. Рис. 2.16). Координаты всех объектов даны в Табл. 2.5, а их звездные величины приведены в Табл. 2.8. Относительное положение (в *arcsec*) этих же объектов соответствует их изофотным изображениям на Рис. 2.14 и 2.15.

фильтре I. В других фильтрах в этом месте обнаруживается только незначительное повышение фона. Мы предположили, что объект "o2" не виден на HST FOC-изображении из-за того, что он слишком красный для ультрафиолетовой полосы F130LP.

В Таблице 2.8 приведены оценки звездных величин этих объектов. Эти оценки были сделаны главным образом для того, чтобы показать, что и величины и расстояния этих объектов от "o1,PSR" (Табл. 2.5) позволяют предполагать некоторое влияние этих протяженных близко расположенных

Таблица 2.8. Звездные величины объектов вокруг PSR B0656+14.

object	B	V	R	I
o2	-	-	-	23.83 (+0.2 1;-0.19)
o3	25.0 ±0.2	25.4 ±0.4	24.63 (+0.15;-0.13)	23.93 (+0.2 4;-0.20)
o4	25.5 ±0.35	25.5 ±0.5	24.59 (+0.21;-0.17)	23.50 (+0.12 ;-0.10)
o5	-	-	24.35 (+0.14;-0.12)	23.54 (+0.20;- 0.17)

объектов на измеренные значения B, V, R величин оптического компаньона пульсара. Например, при определении зв. величины в фильтре I при радиусе апертуры фотометрирования в 3 пиксела (или для диаметра апертуры $1''\!.6$) для оптического компаньона пульсара можно было ожидать заметный вклад в полный поток "o1,PSR" от ближайшего объекта "o2". Но наши измерения показали, что такой вклад может быть на уровне нескольких процентов (около 3%) и это все еще не превышает ошибки наших измерений (см. Табл. 2.7), хотя и может внести некоторый систематический сдвиг в оценку потока для "o1,PSR".

Более обстоятельное изучение влияния вклада от соседних *протяженных* объектов на фотометрию оптического кандидата "o1,PSR" было проведено в нашем специальном исследовании (Koptsevich et al. 2001) с учетом данных в ИК диапазоне, полученных на телескопе Хаббла. Там было показано, что такой систематический вклад (особенно в фильтре I) влияет на наклон нетепловой компоненты спектра объекта. Однако описание результатов интерпретации фотометрических наблюдений в оптическом, в UV, в ИК и в других диапазонах для PSR B0656+14 в задачу автора здесь не входит, поскольку, как показало дальнейшее развитие ситуации с отождествлением γ-всплесков (в след. главу), исследование изолированных нейтронных звезд пока оказалось вне основной темы — отождествление "классических" γ-всплесков. (О продолжении исследований по этой программе см., например, в тех же статьях Kurt et al. 2000, 2001; Koptsevich et al. 2001.) В заключение этого раздела можно отметить, что поиски признаков поверхности компактных объектов в оптике и уточнение их главных параметров (температур, радиусов, расстояний) становятся все более актуальными при исследованиях близких изолированных нейтронных звезд — направление, которое возникло почти одновременно и развивалось параллельно с исследованиями как "классических" γ-всплесков (коротких и длинных), так и мягких повторяющихся всплесков (SGR).

2.6. Результаты $BVRI$ ПЗС фотометрии пульсара PSR B0656+14.

1. В рамках программы исследования изолированных нейтронных звезд на 6-метровом телескопе были проведены наблюдения средневозрастного (middle-aged) радиопульсара B0656+14. Получены изображения в четырех ($BVRI$) фотометрических полосах и измерены следующие

звездные величины оптического компаньона пульсара: $B = 24.85 \pm 0.19$, $V = 24.90 \pm 0.16$, $R = 24.52 \pm 0.12$, $I = 23.81 \pm 0.27$.

2. Отождествление пульсара было выполнено на основании его астрометрического положения и фотометрии. Для этого звездообразного объекта, совпадающего с положением VLA-радиоисточника, впервые были определены потоки в B, R и I полосах, что позволило (с учетом UV-наблюдений на HST) уверенно говорить о преимущественно нетепловой природе излучения в UV и в оптической области спектра этой изолированной нейтронной звезды вплоть до ~ 8000Å.

3. Исследованы протяженные объекты в окрестностях пульсара ($\simeq 5''$). Впервые для них были получены оценки блеска в 4-х фотометрических полосах.

4. Благодаря исследованию этого (и других) пульсаров, был получен практический методический опыт не только поисков, как это было при работе с γ-боксами, но и *исследования* слабых ($\sim 25^m$) объектов — протяженных и звездных.

Глава 3

Оптический транзиент длинного гамма-всплеска GRB 970508 в яркой фазе

В этой главе представлены наблюдательные результаты в основном по яркой фазе переменности оптического транзиента (ОТ), связанного с γ-всплеском GRB 970508, и частично обсуждена переменность этого объекта после этой фазы, но еще без учета в наблюдаемые потоки существенного вклада от родительской галактики. Наблюдения родительской галактики и их интерпретация описаны в следующей главе.

3.1. Введение: контекст, обзор самых ранних наблюдений ОТ GRB 970508 в одной полосе R, вторая вспышка

С момента их открытия в 1969 (Klebesadel et al. 1973) и до весны 1997 г. основной проблемой в понимании явления космических γ-всплесков было отсутствие каких-либо надежных кандидатов для отождествления источников всплесков (в спокойном или в транзиентном состоянии) в каких-то других длинах волн, кроме самих гамма-лучей. Следствием этого была полная неопределенность в расстояниях до источников всплесков. Ситуация резко изменилась после детектирования 28 февраля 1997 г. γ-всплеска (Costa et al. 1997a) с помощью итало-голландского спутника BeppoSAX (Boella et al. 1997). Благодаря отработанной в 1996 г. и в начале 1997 г. методике быстрой и довольно точной локализации γ-всплесков этим аппаратом (до нескольких угл. минут), которые обеспечивались совместными возможностями и γ-детектора (Gamma-Ray Burst Monitor, GRBM) и двух широкоугольных рентгеновских камер (WFC) установленных на борту BeppoSAX, впервые в истории проблемы γ-всплесков удалось наблюдать первое рентгеновское (Costa et al. 1997b), а затем и первое оптическое (van Paradijs et al. 1997) послесвечения (afterglow) источника γ-всплеска.

Тем не менее, как это было понято позднее, оптические данные по первому в истории оптическому послесвечению γ-всплеска (GRB 970228) были получены на различных инструментах и в различных фотометрических условиях, а также относились к различным фотометрическим системам и полосам. Кроме очень популярной у всех наблюдателей в первое время исследований ОТ γ-всплесков R-полосы, яркость оптического источника в других фильтрах определялась в самые разные времена наблюдений и лишь несколько надежных оценок блеска (а не верхние пределы!) удалось успеть сделать, когда объект был еще достаточно ярким. В конце концов, это привело к неопределенностям и в интерпретации оптических наблюдений первого ОТ GRB 970228 (см. примеры у Sahu et al. 1997, Galama et al. 1997 и в Proceedings of the 4^{th} Huntsville GRB Symposium). Но, по крайней мере, одно стало ясно после события GRB 970228: переменный оптический источник, связанный с γ-всплеском, можно наблюдать в течение довольно длительного периода времени, от одного до нескольких дней в достаточно яркой фазе с величинами $V < 22$, или около этого значения. Теперь это обстоятельство учитывается в программах поиска новых ОТ с помощью большого числа телескопов с большим полем зрения.

К концу 1997 г. оптическое послесвечение (afterglow) γ-всплесков надежно наблюдалось в трех случаях: GRB 970228, GRB 970508 и GRB 971214. Хотя первый и третий оптические транзиентные источники (OTs) не наблюдались в САО близко к их максимуму яркости, для второго ОТ, связанного с GRB 970508, детектированного и локализованного все той же командой BeppoSAX (Costa et al. 1997b, Piro et al. 1998), существенные данные по оптике, помогающие выяснить общие наблюдательные особенности (или признаки) оптических "остатков" γ-всплесков, удалось получить в САО на 1-м и 6-метровом телескопах. Второй γ-всплеск GRB 970508 с оптическим послесвечением был найден в очень удобном для длительных наблюдений месте северного неба в созвездии Жирафа. Большое склонение $\approx +79^\circ$ позволило наблюдать в САО этот объект все лето 97-го при зенитных расстояниях меньше, чем 57°. Первые результаты фотометрии ОТ GRB 970508 были показаны на 4-м Хантсвиллском симпозиуме по γ-всплескам (Sokolov et al. 1997) и о них уже говорилось в первой главе.

В этой главе представлены результаты BVR_cI_c фотометрии с мая по август 1997 г. Здесь в основном идет речь о результатах CCD-фотометрии в фазе максимального блеска источника, когда наблюдалось (как потом стало понятно после наблюдений других afterglow) довольно редкое для всех оптических транзиентов γ-всплесков явление — явная немонотонность в поведении кривой блеска ОТ. Или, по сути дела, это была *еще одна вспышка* в оптике ($\approx 19.7^m$) на вторые сутки после самого γ-всплеска, если первой вспышкой считать объект $\approx 21^m$, наблюдавшийся в первые часы после всплеска. Для ОТ GRB 970508 было впервые измерено красное смещение (Metzger et al. 1997) и получен непрерывный спектр объекта, для него было впервые обнаружено радиоизлучение (Frail et al. 1997). То есть для этого уникального всплеска совместными усилиями многих групп наблюдателей и благодаря свободному и быстрому обмену наблюдательной информацией удалось получить почти полный набор наблюдательных данных во всех диапазонах: в гамма и рентгеновском диапазонах (BeppoSAX), в оптическом, NIR (Pian et al. 1998) и радиодиапазоне. Особое внимание посвящено здесь обсуждению результатов сравнения наших BVR_cI_c кривых блеска вблизи максимума с данными в рентгеновском диапазоне и того, что наблюдалось затем (после максимума) в NIR и в радио диапазоне вплоть до 87 дня после γ-всплеска.

Однако в начале дано общее представление о результатах наблюдений в оптике для этого объекта, полученнных и другими наблюдателями. Тем более, что упомянутый выше быстрый обмен информацией в составе коллаборации с командой BeppoSAX и с другими группами, позволил всем желающим оперативно использовать и наши данные наблюдений. Редуцированная, т.е. приведенная к одной фотометрической полосе, кривая блеска в R_c-фильтре, включающая все данные, полученные по этому объекту в САО и другими наблюдателями, за (примерно) этот же период времени, начиная почти с момента детектирования GRB 970508, собраны в статье Т. Галамы и др. (Galama et al. 1998). В этой статье используются данные и из нашего доклада (Sokolov et al. 1997), как результаты фотометрии транзиента, так и наши вторичные стандарты. Они использованы Т. Галамой для редукции всех данных в одну систему. Наблюдения приведены здесь на Рис. 3.1 как результаты обзора фотометрических данных для одной полосы R, полученных с мая по август 1997 г., т.е. до того, как становится существенным вклад родительской галактики (которому посвящена глава 4).

Приводя обзор фотометрии в одной полосе на Рис. 3.1 в этом вводном разделе, хотелось бы специально обратить внимание и на самую первую фазу наблюдений этого уникального транзиента в оптике — такое не наблюдалось с тех пор еще ни в одном из более чем 25-ти случаев ОТ γ-всплесков. Имеется в виду медленное падение блеска (до 2-го максимума) или "плато" на кривой блеска, которое успели зафиксировать другие наблюдатели. Это медленное падение блеска очень напоминает падение блеска у некоторых ОТ GRB сразу же после всплеска, но в этих случаях такое падение сменяется через дни еще более быстрым уменьшением блеска, а не *вторым максимумом*. (Этот момент в поведении ОТ может быть существенным при интерпретации данных по GRB 970508 в 6-й главе.) На Рис. 3.1 хорошо видно сначала небольшое падение ($\approx 0.5^m$) блеска источника в первые несколько часов (от 3 до 7 часов) после γ-всплеска или от первого максимума в оптике, а затем резкий подъем на кривой блеска, еще один максимум на вторые сутки после γ-всплеска. Можно сказать только, что минимум блеска в оптике лежит где-то между 7-м и 21-м часами после γ-всплеска GRB 970508 (Рис. 3.1), когда объект наблюдался только в рентгене (Piro et al. 1998). Обычно же для всех остальных, отождествленных в оптике γ-всплесков, найденные послесвечения **всегда** оказываются в максимуме и потом монотонно слабеют. И лишь этот ОТ, хорошо изученный в четырех диапазонах, показал явно странное, отличающее его от других, пекулярное поведение. Поэтому здесь иногда транзиент, обнаруженный в первые 3 часа 5 мин, сразу же после самой первой рентгеновской BeppoSAX/WFC-вспышки (длительностью ≈ 30 с), будет называться *первой вспышкой* как и у всех "нормальных" ОТ, а максимум через 2 суток (Май 10.77 UT) — *второй вспышкой*. Этим подчеркивается пекулярность этого случая ОТ GRB. (Вопрос о том, почему этот второй случай обнаруженного ОТ γ-всплеска оказался пекулярным, обсуждается в конце 6-й главы.)

Итак, основные параметры второго (отождествленного в оптике) гамма-всплеска, наблюдательный и идейный контекст наших исследований ОТ GRB 970508 весной и летом 1997 г. или общая последовательность событий:

Детектор γ-всплесков GRBM (Gamma-Ray Burst Monitor) на борту спутника BeppoSAX (BeppoSAX/GRBM) 8 мая 1997 г (May 8.904 UT) вместе с двумя рентгеновскими камерами широкого поля WFC (Wide Field Cameras) зарегистрировал γ-всплеск умеренной яркости (Costa et al. 1997c), длившийся примерно 15 с. Проинтегрированные по времени всплеска потоки (fluences/экспозиции), записанные с GRBM (40-700 keV) и WFC (2-26 keV), были $(1.8 \pm 0.3)\ \times 10^{-6}$ эрг см$^{-2}$ и $(0.7 \pm 0.1)\ \times 10^{-6}$ эрг см$^{-2}$ соответственно (Piro et al. 1997a). Этот всплеск также был зафиксирован на специализированной платформе CGRO/BATSE (Kouveliotou et al. 1997) в диапазоне 20-1000 keV с полным потоком (fluence) $(3.1 \pm 0.2) \times 10^{-6}$ эрг см$^{-2}$ и потоком в максимуме (peak flux density) $(1.66 \pm 0.06) \times 10^{-7}$ эрг см$^{-2}$ с$^{-1}$ (50-300 keV) . По результатам оптических наблюдений WFC бокса ошибок (Heise et al. 1997b) 9 и 10 мая был найден (Bond 1997) переменный объект, который показал увеличение яркости на $\approx 1^m$ в полосе V. Проведенные группой Л.Пиро (Piro et al. 1997b) через ≈ 8.8 часа после γ-всплеска NFI (Narrow Field Instrument) наблюдения на спутнике BeppoSAX (BeppoSAX/NFI) позволили уверенно обнаружить новый рентгеновский транзиентный источник, положение которого совпало с положением транзиента в оптике. Наблюдения на Хаббловском телескопе (2 июня 1997 г.) показали, что никакого протяженного объекта, похожего на родительскую галактику, к тому времени еще нельзя было ассоциировать с этим оптическим кандидатом для отождествления γ-всплеска (Fruchter et al. 1997, Sahu et al. 1997b, Pian et al. 1997). Natarajan et al. (1997) тогда показывали, что γ-всплеск GRB 970508 возник либо внутри очень компактной галактики, либо его источник находится (в "пустоте") на большом расстоянии от своей родительской галактики ($> 25h_{70}^{-1}$ kpc). Таков был контекст, особенно если вспомнить, что ничего еще не было известно о родительских галактиках и очень популярным тогда был сценарий слияния нейтронных звезд.

3.2. Поиск и отождествление оптического компаньона GRB 970508, многополосная BVR_cI_c фотометрия

Первое сообщение от группы BeppoSAX/WFC (телефонный звонок Элианы Палацци из Технологического института Болоньи) о детектировании на спутнике BeppoSAX нового γ-всплеска, достиг САО только через 3.5 часа, т.е. во второй половине ночи 8/9 мая, после самого события GRB 970508 (Май 9.05 UT). До рассвета 9 мая мы не успели организовать наблюдения и поэтому (follow-up) наблюдения начались в САО на Zeiss-1000 только в следующую ночь (Май 9.74 UT). Уточненный командой BeppoSAX/WFC к вечеру 9 мая бокс ошибок с размерами $5'$ был полностью покрыт "мозаикой" из 29 CCD-кадров на Zeiss-1000 в R_c-фильтре с экспозициями 300 и 600 с. Телескоп Zeiss-1000 был оснащен CCD/ПЗС фотометром ISD015A, 520×580 пикселов, что соответствует полю зрения $2.'0 \times 3.'6$. Изображения, полученные в этих наблюдениях на Zeiss-1000, были затем сравнены с со-

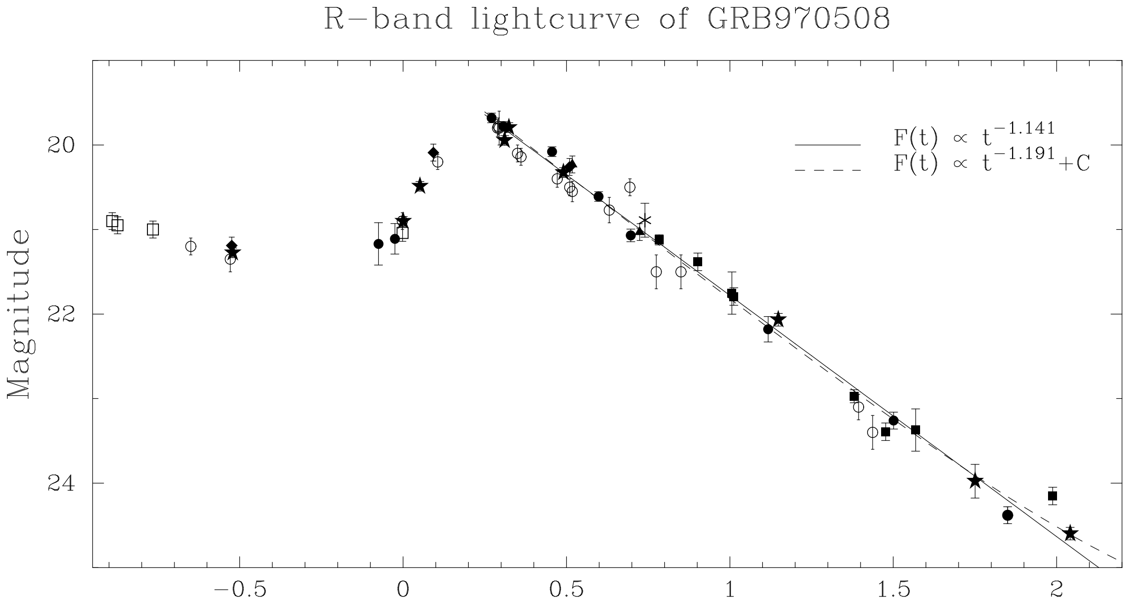


Рис. 3.1. Сводная кривая блеска в одной фотометрической полосе из статьи Титуса Галамы и др. (Galama et al. 1998), построенная по данным разных авторов, включая и данные наших первых публикаций (Sokolov et al. 1997; *закрашенные кружки*). Наблюдения в разных фотометрических системах приведены к стандартной фотометрической R-полосе с использованием наших вторичных звезд-стандартов из Табл. 3.2. Значения звездных величин *в самом максимуме блеска* (•) и вблизи него, полученные на БТА, соответствуют наименьшим ст. ошибкам измерений (см. также Рис. 3.4). Далее по кривой блеска (после максимума) также использованы опубликованные к тому времени наблюдения САО. В редуцированной к R_c-полосе кривой блеска ОТ GRB 970508, для дифференциальной (это все закрашенные символы) фотометрии, также использующей и наши вторичные стандарты (точнее звезды-стандарты в поле объекта 1, 2 и 4 из нашей Табл. 3.2), были использованы данные из: Galama et al. (1998; *закрашенные звезды*), Pedersen et al. (1997; *закрашенные квадраты*), Garcia et al. (1997; *закрашенные треугольники*), Schaefer et al. (1997; *закрашенные ромбы*) и Chevalier et al. (1997; *косой крест* ×). Открытыми кружками (○) представлены результаты недифференциальной фотометрии (т.е. без использования стандартов поля) из: Djorgovski et al. (1997), Castro-Tirado et al. (1998), Mignoli et al. (1997), Kelemen (1997), Fruchter et al. (1997) и Metzger et al. (1997c). Четыре открытых квадрата представляют данные наблюдений в широком фильтре R, полученные Холгером Педерсеном и его группой (Pedersen et al. 1997), в том числе и результаты самых близких к моменту всплеска наблюдений, проведенных уже через 3 часа и 5 минут после γ-всплеска. Сплошной линией показана подгонка степенным законом с показателем $\alpha = -1.141 \pm 0.014$, сделанная по наиболее точным данным, использующим вторичные стандарты в поле (т.е. по всем закрытым символам после максимума). Прерывистой линией показана подгонка этих же данных степенным законом плюс некоторая константа: $F_R = F_{R_0} t^{\alpha} + C$, где $\alpha = -1.191 \pm 0.024$. Константа C соответствует величине $R_c = 26.09 \pm 0.36$ (об этом более подробно будет сказано в следующей главе).

ответствующими полями Паломарского Обзора Неба (Digitized Sky Survey, DSS). В результате предварительного анализа этого поля никакого нового яркого объекта до предела DSS сначала обнаружено не было.

К следующей наблюдательной ночи 10/11 мая нам были доступны еще раз уточненные координаты круга/бокса ошибок локализации с помощью BeppoSAX/WFC широкоугольной рентгеновской камеры: $\alpha_{2000} = 06^h53^m28^s$; $\delta_{2000} = +79^o17'.4$, с радиусом бокса ошибок $3'$ (99%-ный уровень достоверности). Фотометрические наблюдения поля γ-всплеска GRB 970508 были продолжены уже на 6-метровом телескопе. На БТА был использован CCD-фотометр установленный в Первичном Фокусе ("Electron ISD017A" CCD, формат 1040×1160 пикселов, поле зрения $2.'38 \times 2.'66$). В этих наблюдениях была применена т.н. "binning mode", т. е. использовался эффективный "пиксел" 2×2, так что каждый из 520×580 (zoomed) пикселов (далее просто пиксел) имел угловой размер на небе $0.''274 \times 0.''274$. Был использован $Gain = 2.3e^-$/DN. Шум считывания нашего CCD был около $8e^-$, или $4 - 5$ DN (отсчетов).

Первое CCD-изображение на БТА было получено 10 мая (Май 10.76 UT) и переменный объект был открыт (наблюдатель А.И.Копылов) путем сравнения с CCD-изображениями, полученными на 1-метровом телескопе в предыдущую ночь. Яркость объекта с момента наблюдений на Zeiss-1000 (Май 9.85 UT) к началу наблюдений на БТА (Май 10.76 UT) сильно возросла, примерно на 1.5^m, — очень редкое (как потом выяснилось) явление для оптического послесвечения γ-всплеска. Это обстоятельство помогло нам найти новый объект в BeppoSAX/WFC боксе ошибок только по данным, полученным в САО за 12 часов до официального сообщения H.Bond (Bond 1997), который первым доложил об открытии этого объекта как возможного оптического компаньона GRB 970508. Как проходили наблюдения в САО (журнал наблюдений) в первую неделю после γ-всплеска, показано в Табл. 3.1. Времена экспозиций в секундах указаны для каждого фильтра.

Наблюдения были проведены с фильтрами, близко соответствующими (closely matching) стандартной BVR_cI_c Johnson-Kron-Cousins фотометрической системе. Данные были обработаны с использованием все того же пакета ESO-MIDAS. Стандартная процедура первичной редукции данных включала вычитание электронного смещения ("bias"), деление на плоское поле ("flat-fielding"), удаление космических частиц. Фотометрические условия оставались стабильными в течении двух ночей мая 13/14 и 21/22. Четыре ярких звезды (Рис. 3.2) в поле GRB 970508 были использованы как вторичные фотометрические стандарты (стандарты в поле). Величины

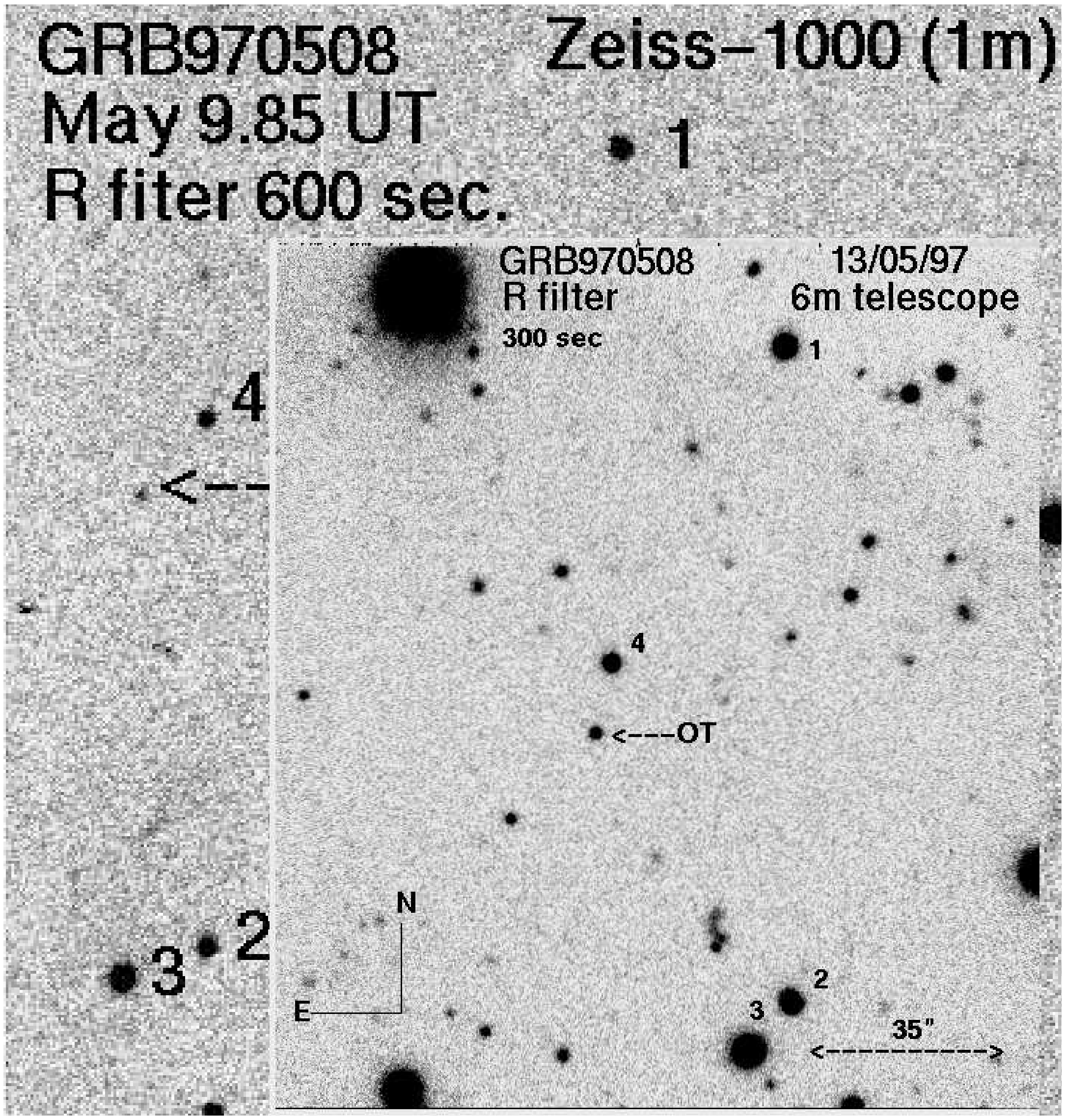


Рис. 3.2. Прямые снимки на двух телескопах САО – до и после максимума блеска ОТ GRB 970508. Изображена часть поля около оптического источника (он указан стрелкой около звезды 4) — оптического "остатка" γ-всплеска GRB 970508, полученного на 1-метровом телескопе САО за сутки до максимума его блеска в R_c-полосе. А также показано одно из изображений звездного поля этого транзиента, полученное на 6-метровом телескопе через 4 ночи после максимума в том же R_c-фильтре. Блеск объекта на обоих изображениях примерно одинаков — $R_c \approx 21.1$ (см. Рис.3.3). Номерами указаны звезды — вторичные фотометрические стандарты.

Таблица 3.1. Первая неделя наблюдений оптического остатка GRB9 70508

night	UT (May)	telescope	B	V	R_c	I_c
09/10	09.75	1-m			300	
-	09.85	-			600	
10/11	10.77	6-m	300	200	100	300
-	10.93	-	300	200	100	300
11/12	11.76	-	450	300	150	450
12/13	12.87	-	450	600	150	900
13/14	13.88	-	1200	600	450	450

этих звезд были определены в ночь 13/14 мая в хороших фотометрических условиях с использованием стандартных звезд в поле PG1657+078 каталога Ландольта (Landolt 1992). Ошибки нуль-пунктов лучше, чем 0.05^m. Координаты и величины вторичных фотометрических стандартов даны в Табл. 3.2. Данные этой таблицы были использованы и другими наблюдателями, в частности, Т. Галамой (Galama et al. 1998) при калибровке своих наблюдений и при редукции наблюдений других авторов в других системах к стандартной R_c-полосе (см. Рис. 3.1). Наши R_c-величины для звезд 2, 3, 4 на $0.20^m \pm 0.01$ выше, чем величины измеренные Б.Шефером и др. (Schaefer et al. 1997). Применение аналогичных фотометрических процедур в Johnson-Kron-Cousins-системе BVR_cI_c, используемой в САО, детально описано в предыдущей главе и в статье Курт и др. (Kurt et al. 1998).

Таблица 3.2. Вторичные фотометрические стандарты в поле ОТ GRB970508

#	α_{2000}	δ_{2000}	B	V	R_c	I_c
1	06:53:37.19	79:17:30.7	20.44	19.14	18.31	17 .53
2	06:53:36.30	79:15:30.0	19.93	19.17	18.71	18 .27
3	06:53:39.23	79:15:21.1	17.94	17.40	17.06	16 .71
4	06:53:48.50	79:16:32.7	21.93	20.43	19.49	18 .53

3.3. BVR_cI_c-кривая блеска — фаза максимального блеска и последующее его падение

Из Рис. 3.1, приведенного в статье Галамы и др. (Galama et al. 1998), видно, что ОТ GRB 970508 в максимуме блеска и вблизи него наблюдался на БТА с наибольшей точностью. Здесь *фаза максимального блеска источника* определяется как период времени, когда блеск оптического объ-

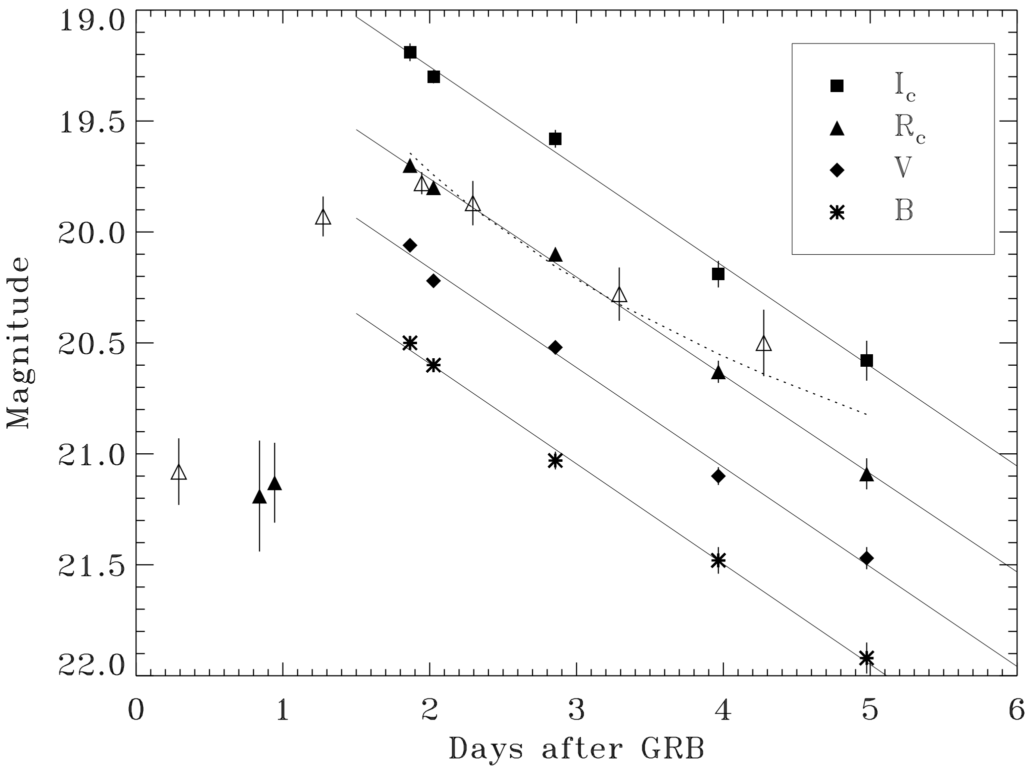


Рис. 3.3. Кривые блеска в 4-х фотометрических BVR_cI_c полосах (только БТА) оптического компаньона в первые 5 суток после гамма-всплеска GRB 970508 в максимуме и вблизи максимума блеска ОТ. Показаны наблюдаемые звездные величины и ошибки определения величин объекта, полученные в САО (закрашенные символы) и (открытые треугольники) другими авторами в Лойано (Mignoli M. et al. 1997, $t-t_0 = 1.95$) и на Паломаре (Djorgovski et al. 1997, данные трансформированы к $R_c = r-0.34+A_r$). Прямыми линиями показано уменьшение блеска в каждой из фотометрических полос, соответствующее наилучшей подгонке данных экспоненциальным с ($\chi_n^2 = 0.97$) законом (3.1). Для сравнения (пунктиром) показана наилучшая подгонка степенным (с $\chi_n^2 = 4.5$) законом падения блеска после максимума по всем (нашим и чужим) данным в R_c-полосе.

екта увеличился до этого максимума и затем начал падать до $V \approx 21.5$ и $R_c \approx 21.1$. Это примерно соответствует первой неделе наблюдений после всплеска, когда оптический источник все еще можно было наблюдать на многих телескопах — больших и не очень больших (ссылки см. в статье Galama et al. 1998). Результаты наблюдений, проведенных в эти ночи в САО, на Паломаре и в Италии (в Лойано), показаны на Рис. 3.3. Конечно, гораздо больше (см. Рис. 3.1) наблюдений в этот период было сделано и на других телескопах, но эти наблюдения, как уже говорилось, проводились в разных фотометрических системах и иногда с худшей точностью фотометрических измерений и привязок. Поэтому здесь оставлены только те данные, которые получены в стандартных фотометрических полосах

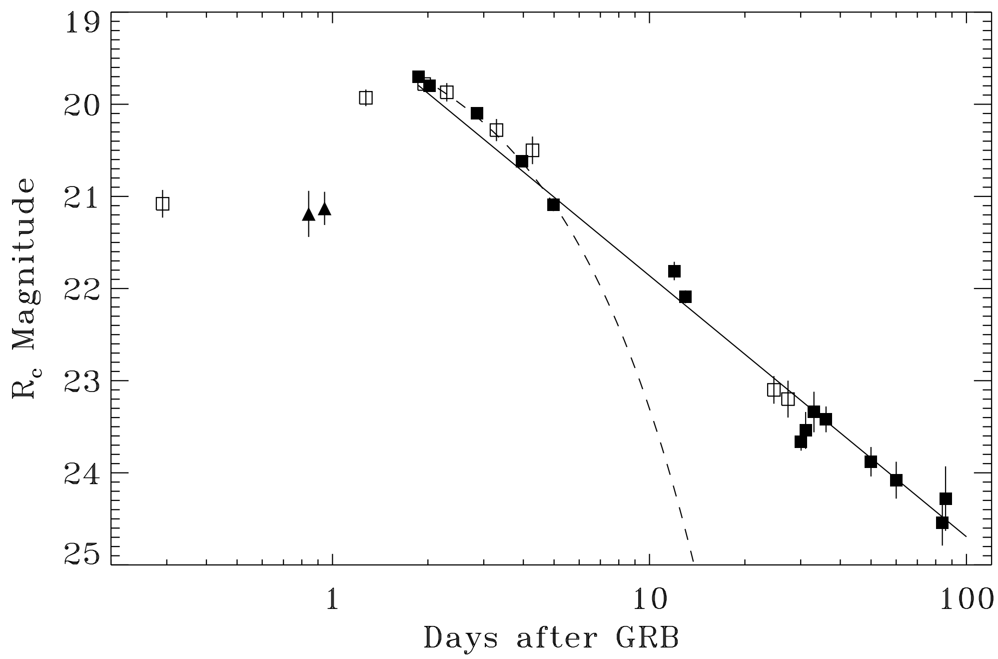


Рис. 3.4. R_c-кривая блеска оптического компаньона GRB 970508 в течение $\approx$ 84 дней после γ-всплеска по данным САО (закрашенные фигуры), Паломар (Djorgovski et al. 1997), Лойано (Mignoli et al. 1997), HST (Fruchter et al. 1997), Keck II (Metzger et al. 1997) — открытые квадраты. Данные нестандартной фотометрической системы Б.Шефера и др. (Schaefer et al. 1997) трансформированы в нашу. Здесь прерывистая линия соответсвует экспоненциальному падению блеска (3.1) источника в первые дни после максимума (см. Рис. 3.3). Средний степенной ход $F \propto t^{-1.171(\pm 0.012)}$ уменьшения блеска после того же максимума вплоть до $t - t_0 = 83.94$ изображен сплошной прямой линией.

(или легко к ним приводятся) с наилучшей точностью, чтобы не потерять тонкие эффекты в изменениях блеска транзиента в этот период. Непосредственно перед максимумом блеска были оставлены только результаты наблюдений на Zeiss-1000, тоже в стандартной фотометрической системе (в R_c-фильтре). (В общем, данных одного нашего 1-м телескопа, которые приводятся на Рис. 3.3 и 3.4, достаточно, чтобы увидеть предел по звездной величине $\sim 21^m$, после которого при уменьшении блеска источника такие наблюдения становятся все менее точными и менее полезными, особенно для измерений показателей цвета объекта.) Наблюдаемые звездные величины в стандартной Джонсон-Крон-Козинц BVR_cI_c фотометрической системе с соответствующими ошибками измерений блеска оптического компаньона GRB 970508, которые удалось провести в САО в мае-августе 1997 г. на БТА и 1-метровом телескопах, показаны в Табл. 3.3.

Дата (UT) регистрации события GRB 970508 детектором BeppoSAX/ GRBM (trigger time) t_0 = May 8.904 UT. Поведение оптического объекта можно характеризовать следующими свойствами:

1. С момента первых наблюдений в оптике (Pedersen et al. 1998) блеск объекта в первые несколько часов либо медленно падал (Galama et al. 1998), либо оставался постоянным (т.е. наблюдалось "плато") на уровне $R_c \approx 21$ (Рис. 3.1). Во всяком случае, если опираться на наблюдения, проведенные в стандартной R_c-полосе, начиная с момента $t - t_0 = 0.226$ и до $t - t_0 = 0.944$ блеск объекта в фильтре R_c (см. Рис. 3.3 и Рис. 3.4) в пределах ошибок почти не менялся (Castro-Tirado et al. 1997; Djorgovski et al. 1997) и степенного падения блеска ($\sim t^{-1}$ и быстрее), характерного для большинства потом обнаруженных оптических транзиентов других γ-всплесков, в первые сутки после всплеска GRB 970508 не было.
2. Более того, совершенно неожиданно (и это до сих пор не объясняет ни одна теория), начиная с момента $t - t_0 = 0.944$ и до $t - t_0 = 1.866$, блеск в полосе R_c возрос на 1.5 величины (Рис. 3.4). Если использовать данные с 1-метрового телескопа САО и наблюдения на Паломаре (Djorgovski et al. 1997), скорость роста блеска в это время ("второй вспышки") составляла 0.06 зв. величины в час.
3. Где-то вблизи момента $t - t_0 = 1.866$ блеск объекта в фильтре R_c был максимальным — $R_c = 19.70 \pm 0.03$. Наиболее точная фотометрия вблизи этого максимума была проведена в САО, т. е. мы можем утверждать, что это самый большой поток от оптического транзиента γ-всплеска GRB 970508, измеренный в R_c-полосе (см. Рис. 3.1). Кроме того (и только на БТА) поток в максимуме был измерен так же точно еще в трех полосах

(см. Табл. 3.3 и Рис. 3.3). И только с этого момента (May 10.77 UT) блеск объекта начал уменьшаться.
4. И с учетом наиболее точных данных, полученных в САО сразу в 4-х стандартных фотометрических полосах (всего 20 отдельных оценок блеска) в течение первых 3-х дней после этой (второй) вспышки или после максимума блеска при $t-t_0 = 1.866$, это падение блеска лучше всего соответствует не степенному, а экспоненциальному закону. То есть звездная величина в каждом из фильтров менялась по закону:

$$\begin{aligned} B &= 19.689(\pm0.036) + 0.452(\pm0.014)(t-t_0) \\ V &= 19.264(\pm0.053) + 0.449(\pm0.020)(t-t_0) \\ R_c &= 18.874(\pm0.029) + 0.443(\pm0.011)(t-t_0) \\ I_c &= 18.355(\pm0.050) + 0.450(\pm0.019)(t-t_0). \end{aligned} \tag{3.1}$$

Какой-либо степенной закон хуже соответствует уменьшению яркости объекта, если судить по наиболее точным данным, полученным на БТА и других телескопах после максимума. Например, R_c-наблюдения дают $\chi^2_n = 0.97$ для экспоненциальной "подгонки" данных, в то время как для степенного закона мы имеем: $\chi^2_n = 4.5$. При этом мы использовали все наиболее точные и легко трансформируемые в стандартную систему R_c данные с момента $t-t_0 = 1.866$ до $t-t_0 = 4.976$ (10.77 UT – 13.88 UT): САО, Лойано и Паломар (см. Рис. 3.3 и 3.4).

Такое синхронное падение блеска во всех 4-х полосах позволило нам утверждать, что несколько дней после максимума спектр объекта или, точнее, распределение энергии в спектре оставалось близким к степенному $F_\nu \propto \nu^{-1.2}$, так как оптический объект в это время имел такие наблюдаемые показатели цвета:

$$(B-V) = 0.43, \quad (V-R_c) = 0.39, \quad (R_c-I_c) = 0.52.$$

Учитывая галактическое поглощение в этом направлении $E(B-V) = 0.03$, получаем:

$$F_\nu \propto \nu^{-1.10\pm0.08}, \tag{3.2}$$

для наклона спектра и соответствующих ("непокрасненных") показателей:

$$(B-V)_0 = 0.40, \quad (V-R_c)_0 = 0.37, \quad (R_c-I_c)_0 = 0.50.$$

Этот же наклон непрерывного спектра ОТ GRB 970508 был найден и по спектральным наблюдениям около максимума блеска транзиента (Metzger et al. 1997a). Таким образом, наши данные подтверждают это (Sokolov et al. 1997) и позволяют утверждать, что, по крайней мере, в течение 3-х ночей после максимума распределение энергии в спектре оставалось таким же, какое получили M. Metzger с сотрудниками, т.е таким же, как и в максимуме блеска ОТ. По сути дела, это утверждение, или спектр (3.2), полученный по всем 4-м ночам, — лишь другая формулировка экспоненциального закона падения блеска (3.1), наблюдавшегося во всех фотометрических полосах в течение 4-х суток, начиная с максимума блеска.

Примерно на четвертые сутки после максимума, или после этой новой оптической вспышки (если *первой* вспышкой считать послесвечение через несколько часов после самого γ-всплеска), падение блеска по экспоненте замедлилось и через 10 дней после максимума (а не сразу после всплеска), по крайней мере, в трех BVR_c полосах вплоть до $\approx$ 85-го дня после регистрации гамма-всплеска (а для I_c полосы до $\approx$ 36-го дня) кривые блеска могут быть описаны усредненными по всем нашим данным соотношениями,

$$\begin{aligned} B &= 19.713(\pm0.139) + 3.000(\pm0.048) \times \log(t - t_0) \\ V &= 19.323(\pm0.135) + 2.860(\pm0.046) \times \log(t - t_0) \\ R_c &= 18.865(\pm0.092) + 2.927(\pm0.031) \times \log(t - t_0) \\ I_c &= 18.313(\pm0.151) + 2.961(\pm0.066) \times \log(t - t_0), \end{aligned} \tag{3.3}$$

для звездных величин в каждом из фильтров. Каждая из этих кривых "начинается" (или определена) с момента максимума $t - t_0 = 1.866$ блеска и соответствует наилучшей аппроксимации данных (с учетом ошибок наблюдений) степенным законом изменения потоков в каждом из фильтров с показателями:

$$\begin{aligned} \alpha_B &= -1.200(\pm0.019) \\ \alpha_V &= -1.144(\pm0.018) \\ \alpha_{R_c} &= -1.171(\pm0.012) \\ \alpha_{I_c} &= -1.184(\pm0.026). \end{aligned} \tag{3.4}$$

Разумеется, на таких временах на общем (среднем) степенном законе тонкий эффект изменения блеска в первые несколько дней (уменьшение по экспоненте в яркой фазе ОТ) уже мало сказывается. (Хотя именно эти, самые точные наблюдения в яркой фазе "тянут" к показателю $\alpha_{R_c} = -1.171 \pm 0.012$.) На Рис. 3.4 показан этот усредненный ход уменьшения звездной величины объекта со временем в R_c полосе ($F \propto t^{-1.171\pm0.012}$), начиная с момента максимума и вплоть до 84-го дня после всплеска. Здесь надо отметить существенную разницу в наблюдаемых потоках от объекта (19.7 – 21-я зв. величины), когда наблюдался экспоненциальный закон в яркой фазе, и (22 – 24.5 зв. величина) когда основную роль играет степенной закон, но уже для в десятки раз более слабого источника.

Что касается I_c-фильтра, то, начиная с $\approx$ 36-го дня после всплеска, объект не показал дальнейшего "гладкого" падения блеска, как, например, в полосе R_c. В этот период и вплоть до $t - t_0 = 87.085$ его зв. величина явно стабилизировалась на уровне $I_c = 23.07$ — новый эффект, который был обнаружен нами и доложен на 1-м Римском совещании в 1998 г. и интерпретации которого посвящена Глава 6. На Рис. 3.5.а приводятся все кривые блеска BVR_cI_c вплоть до $t - t_0 = 87.085$, построенные по данным Табл. 3.3.

3.4. Сравнение BVR_cI_c кривых блеска в оптическом и в рентгеновском диапазонах вблизи фазы максимума

Данные многополосных наблюдений, полученные в САО в мае-августе 1997-го по переменности ОТ GRB 970508, можно разделить на четыре разных по времени периода:
1) быстрый рост яркости источника на временной шкале около одного дня;
2) экспоненциальное падение яркости в течение примерно 4-х суток с одним и тем же наклоном степенного спектра;
3) дальнейшее падение яркости источника происходит, скорее всего, по степенному закону;
4) тем не менее, начиная примерно с 36-го дня после гамма-всплеска объект уже не показывает дальнейшего падения яркости в I_c фильтре — после 87 суток отклонение от среднего степенного закона (3.3) достигает уже ≈ 1 зв. величины.

Как видно из Рис. 3.4, одни только наши наблюдения на БТА сразу после максимума могут быть приближенно описаны одним и тем же степенным законом падения яркости ОТ в R_c. Но в фазе максимального блеска объекта, когда все потоки измерялись с наименьшими ошибками, мы явно видим одни и те же отклонения во всех 4-х полосах (4 параллельные линии на Рис. 3.3 и прерывистая линия на Рис 3.4) от некоторого "среднего" степенного закона $F \propto t^{-1.171\pm0.012}$ с одним и тем же показателем $\alpha_{R_c} = -1.171(\pm0.012)$ из набора (3.3). На этот факт обращали уже внимание и другие наблюдатели (Garsia et al. 1997): уменьшение яркости ОТ после максимума не может быть хорошо описано одним только степенным законом. (Не говоря уже о том, что, начиная с первых часов наблюдений (Рис. 3.1), вообще никакого степенного падения блеска $\sim t^{-1}$ у этого ОТ не было из-за увеличения потока на второй день.)

Но, пожалуй, самой интересной является корреляция этих уклонений от "стандартного" степенного хода с рентгеновскими наблюдениями в это же время, т. е. в фазе максимального блеска в оптике. Хотя уклонения от гладкого степенного закона начались еще до начала наблюдений в САО. Как отмечено в статье (Piro et al. 1998), уже примерно через 30 секунд после самого γ-всплеска поток рентгеновского послесвечения GRB 970508 начал было уменьшаться согласно степенному закону с показателем -1.1 ± 0.1. Но примерно через 16.6 часов после всплеска уменьшение рентгеновского потока замедлилось и временно́е поведение рентгеновского транзиента было аналогично оптическому в течение первых часов после гамма-всплеска по наблюдениям (Pedersen et al. 1998). К сожалению, мы не наблюдали в это время, до начала "второй вспышки" в оптике. Здесь можно отметить только, со ссылками на Pedersen et al. (1998) и на Galama et al. (1998), что в первые 8 часов после всплеска и может быть позже, до начала наших наблюдений в САО (см. Рис. 3.1, 3.3 и 3.4), оптический поток либо не менялся вообще ("плато" до максимума), либо медленно падал — явно не по степенному закону с показателем -1.1 ± 0.1.

И начало второй вспышки в оптике и отмеченные нами выше особенности BVR_cI_c кривых блеска немедленно после максимума (May 10.77 UT) также явно коррелируют с особенностями ("вторая" — длинная рентгеновская вспышка) изменений рентгеновского потока, которые отмечали авторы: Л.Пиро с сотрудниками (Piro et al. 1998). (О спектральных рентгеновских наблюдениях перед началом вспышки в оптике, проведенных этой же группой будет еще сказано в 6-й главе.) На Рис. 3.5 BVR_cI_c кривые блеска, полученные в САО, представлены одновременно с радионаблюдениями на 8.46 GHz (Frail et al. 1997) и с рентгеновскими наблюдениями (BeppoSAX/NFIs, Piro et al. 1998). Последние соответствуют периоду, когда в оптике наблюдения никто не проводил, и близки по времени к началу подъема блеска в оптике. По крайней мере, два точных NFI наблюдения произошли уже во время наших наблюдений на БТА яркой фазы транзиента в оптике или во время второй вспышки ОТ GRB 970508. По-видимому, наиболее интригующим моментом этих рентгеновских BeppoSAX/NFIs наблюдений было резкое падение рентгеновского потока и затем его последующий быстрый рост — минимум, который наблюдался детально и довольно точно в диапазоне 2–10 keV прибором MECS на борту BeppoSAX. Но, к сожалению, никаких одновременных с этим минимумом в рентгене оптических наблюдений, и как раз в этот период, никто не вел (во всяком случае нам они не известны). Наблюдения в САО начались через ≈ 3 часа, когда итальянские коллеги уже закончили свой сеанс связи со спутником, т.е. примерно через 6 часов после минимума потока в рентгене. В этот момент уже начался (или продолжался?) рост потока в оптике (Рис. 3.5(a)). (Конечно, можно предположить, что до этого поток в оптике был еще меньше, и настоящий оптический минимум просто совпадает с рентгеновским, но подлинный минимум был пропущен наблюдателями в оптике...)

Таким образом, авторы (Piro et al. 1998) отмечают, что в рентгеновском диапазоне поведение наблюдаемого потока (строго говоря, с момента самого γ-всплеска) не следует степенному закону. Степенной закон с показателем -1.1 ± 0.1 — он изображен пунктирной линией на Рис. 3.6(c) — это линия, проведенная по средним потокам от первой короткой (**до** 100с) рентгеновской WFC-вспышки (обычно наблюдаемой одновременно с γ-всплеском) до второй — длинной, которая длилась несколько суток. Между этими вспышками на временах $\sim 10^3$ с на BeppoSAX/WFC в двух наблюдениях с большими экспозициями рентгеновский источник *не наблюдался* на уровне потоков в десятки раз бóльших, чем наблюдалось во второй вспышке, уже в сеансе BeppoSAX/NFI наблюдений. И надо отметить, что все эти "небольшие" колебания потоков в этой (по сути дела) второй вспышке рентгена относительно (грубой) аппроксимации наблюдений степенным законом с -1.1 ± 0.1 наблюдались в довольно яркой фазе переменности рентгеновского транзиента, когда выделяющаяся в послесвечении γ-всплеска энергия была очень большой, и может быть, значительно бóльшей, чем за все последующее время наблюдений транзиентного (слабеющего) источника. В рентгеновском диапазоне это *отклонение* от степенного закона, длящееся около 4-х дней (см. Рис. 3.6(c)), может содержать в себе около 30% энергии, выделившейся вообще за все время наблюдения рентгеновского послесвечения (“afterglow") γ-всплеска. Это составляет примерно 10% всей энергии самого всплеска GRB 970508.

Почти одновременно с этим отклонением (или вспышкой в рентгене) наблюдается увеличение блеска транзиента и в оптике, что отличает кривую блеска послесвечения GRB 970508 от кривых блеска почти всех других ОТ γ-всплесков. Он стал даже ярче, чем был в первые 3 часа после γ-всплеска (Рис 3.1). После максимума оптический источник тоже ослабевает не по степенному закону, а по экспоненте; у нас значительно больше наблюдений этого периода, чем в рентгене — 20 во всех фильтрах, см. Рис. 3.5(a). Все это может служить аргументом в пользу общего происхождения и рентгеновских и оптических событий или особенностей в поведении кривых блеска примерно через сутки после всплеска. Учитывая отношение рентгеновского и оптического потоков вблизи оптического максимума, можно сказать, что более чем 16% энергии γ-всплеска GRB 970508 могло выделяться во время этой второй вспышки транзиента одновременно в рентгене и в оптике.

Таким образом, можно думать, что энергетика всего послесвечения γ-всплеска не определяется только простым "спокойным" высвечиванием по степенному закону какого-то одного и того же источника (например фаербола), начиная от момента всплеска. В оптике для OT GRB 970508 вообще этот закон может относится только к в 10-тки раз более слабому объекту, чем он был в яркой фазе вблизи максимума. Законы уменьшения потоков послесвечения вдоль всей кривой блеска наверняка были разные. Наблюдения прямо указывают на некоторую собственную вспышечную активность источника послесвечения в первые дни после GRB с энергией, сравнимой с энергетикой самого γ-всплеска, но выделяющейся на временной шкале в 10000 раз более длинной, чем длительность основного события — γ-вспышки.

3.5. Сравнение кривых блеска в оптическом, радио и в NIR диапазонах после фазы максимума

Теперь мы сравним поведение оптического и радио транзиентов, когда на VLA/VLBI в области локализации γ-всплеска GRB 970508 впервые был найден переменный радиоисточник (Frail et al. 1997; Taylor et al. 1997) и были открыты знаменитые мерцания (“twinkling") радиопотока, какие обычно наблюдаются у пульсаров на межзвездной среде Галактики. Это явление прямо указывало на очень маленькие угловые размеры или на точечность ($\approx 3\mu as$) объекта. На Рис. 3.5(b) мы привели результаты наблюдений только в полосе 8.46 GHz, хотя мониторинг этого объекта проводился еще на двух частотах, 4.86 GHz и 1.43 GHz (Frail et al. 1997).

При сравнении оптического и радио поведения источника после *фазы максимального блеска* немедленно обращает на себя внимание уменьшение амплитуды мерцаний точечного радиоисточника. Амплитуда мерцаний

Таблица 3.3. Результаты фотометрии OT GRB 970508 в САО — первые 86 дней после γ-всплеска

UT	$t - t_0$	B	V	R_c	I_c
9.75 May	0.841			21.19 ± 0.25	
9.85	0.944			21.13 ± 0.18	
10.77	1.866	20.50 ± 0.03	20.06 ± 0.03	19.70 ± 0.03	19.19 ± 0.04
10.93	2.026	20.60 ± 0.03	20.22 ± 0.03	19.80 ± 0.03	19.30 ± 0.03
11.76	2.856	21.03 ± 0.04	20.52 ± 0.03	20.10 ± 0.03	19.58 ± 0.04
12.87	3.966	21.48 ± 0.06	21.10 ± 0.04	20.63 ± 0.05	20.19 ± 0.06
13.88	4.976	21.92 ± 0.07	21.47 ± 0.05	21.09 ± 0.07	20.58 ± 0.09
20.795	11.891		22.10 ± 0.18		
20.875	11.971			21.81 ± 0.10	
20.970	12.066				21.27 ± 0.13
21.892	12.988	23.12 ± 0.35		22.09 ± 0.07	
21.908	13.004		22.18 ± 0.14		
21.942	13.038				21.96 ± 0.13
07.917 Jun.	30.085			23.66 ± 0.10	
08.964	31.060	24.65 ± 0.25			
08.980	31.075		23.84 ± 0.24		
08.991	31.087			23.54 ± 0.20	
10.928	33.024			23.34 ± 0.22	
10.940	33.036		24.08 ± 0.25		
10.945	33.041				23.09 ± 0.35
13.954	36.050	24.62 ± 0.14			
13.966	36.061			23.42 ± 0.14	
13.992	36.088				23.30 ± 0.35
27.865	49.961	24.50 ± 0.22			
27.873	49.969		24.17 ± 0.16		
27.893	49.989			23.88 ± 0.16	
27.910	50.006				23.05 ± 0.14
07.946 Jul.	60.042	25.07 ± 0.21	24.62 ± 0.25	24.08 ± 0.20	
07.961	60.057				23.10 ± 0.15
31.843	83.940			24.54 ± 0.25	
31.857	83.952		24.60 ± 0.24		
31.862	83.958				23.08 ± 0.23
02.807 Aug.	85.902			24.28 ± 0.35	
02.825	85.920		24.59 ± 0.25		
02.855	85.950	25.32 ± 0.25			
03.989	87.085				23.04 ± 0.14

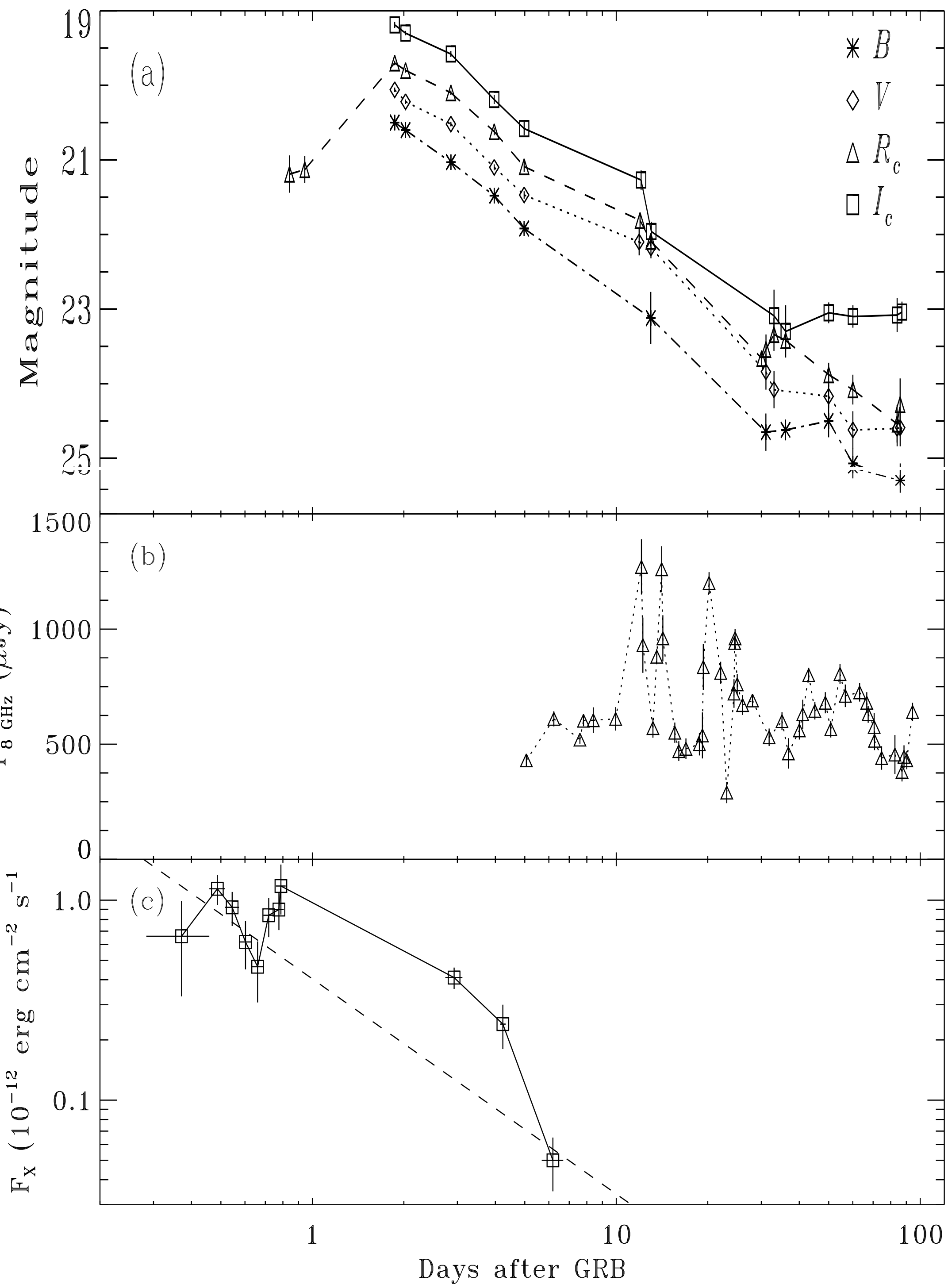


Рис. 3.5. Кривые блеска послесвечения GRB 970508 в оптическом, радио и в рентгеновском диапазонах: (a) оптические данные в BVR_cI_c полосах по наблюдениям в САО из Табл. 3.3 (86 суток после γ-всплеска); (b) данные радионаблюдений VLA/VLBA 8.46 GHz (Frail et al. 1997); (c) рентгеновские NFI-наблюдения в диапазоне 2–10 keV (BeppoSAX MECS) группы Луиджи Пиро (Piro et al. 1998). Экстраполяция данных законом $t^{-1.1}$ изображена штриховой линией.

уменьшается примерно в то же время ($\approx 30-40$-е сутки), когда и блеск ОТ в фильтре I_c начинает стабилизироваться примерно на 23^m или когда кривая блеска в фильтре I_c явно "уходит" от некоторого среднего степенного убывания блеска $F \propto t^{-1.171 \pm 0.012}$ ("закон R_c полосы"), который еще прослеживается в фильтре R_c и дальше. Радиопотоки в двух полосах VLA/VLBI 8.46 GHz и VLA 4.86 GHz (см. Figure 1, Frail et al. 1997) действительно показывают тенденцию к стабилизации и она видна примерно в то же время, что и замедление падения блеска, которое мы наблюдали в полосе I_c ($\approx$ 8000 Å). Это "радио плато" длилось примерно до 65-70-х суток после γ-всплеска, а затем поток уменьшился на обоих частотах до ≈ 0.4 mJy к 87-му дню после всплеска. Поток же в полосе 1.43 GHz (см. ту же Figure 1 у Frail et al. 1997) все время, начиная первых наблюдений (7 дней после всплеска), медленно рос и достиг примерно того же уровня к 80-му дню. Таким образом, несмотря на резкие вариации потоков в начале наблюдений ("twinkling"), примерно через месяц после всплеска радиоисточник заметно стабилизировался, что (уменьшение амплитуды и исчезновение эффекта мерцаний) можно интерпретировать и как увеличение угловых/линейных размеров излучающего объекта. (К этому моменту мы еще вернемся в 6-й главе, когда будем сравнивать кривые блеска ОТ γ-всплесков с кривыми блеска сверхновых в разных диапазонах.)

Далее надо заметить, что HST/NICMOS измерения потока (Pian et al. 1998) H полосе ($\approx$ 1.60 мкм) 2-го июня 1997 г., т.е. на 26-е сутки после всплеска, дали 6.2 ± 1.5 μJy, а не 3 ± 1 μJy, как ожидалось, если бы поток от транзиента действительно падал по степенному закону R_c-полосы. Это отклонение от ожидавшегося среднего степенного закона во всех полосах, в том числе и в этой HST/NICMOS H полосе F160W, тоже близко по времени к явному замедлению падения блеска источника в фильтре I_c на Рис. 3.5(a) и близко к началу затухания мерцаний точечного радио источника.

Этот эффект тогда (к концу 1997-го) легко было истолковать как появление признаков родительской галактики гамма-всплеска. Холгер Педерсен с соавторами (Pedersen et al. 1998) были первыми, кто доложил о начинающихся отклонениях от усредненного степенного закона, но это уклонение от "стандартного" закона в R-полосе обнаруживалось значительно позднее, лишь на 96-е сутки после всплеска. (Оно изображено на сводном графике наблюдений в одной R-полосе на Рис. 3.1. Эти авторы измерили $R = 24.28 \pm 0.10$, что дает уклонение от степенного падения блеска в $\approx 0.6^m$. Истинное значение R_c-величины для родительской галактики по нашим наблюдениям оказалось еще больше — см. в Гл.4.) Возвращаясь к эффекту стабилизации потока от OT GRB 970508 в фильтре I_c на 30-е сутки после γ-всплеска, надо подчеркнуть, что из упомянутых выше прямых наблюдений в полосах R и H (Pian et al. 1998) с высоким угловым разрешением на телескопе Хаббла (2 июня 1997 г.) можно было видеть, что объект остается наверняка все еще точечным на 26-е сутки после всплеска. Протяженной подложки в это время все еще нет, то есть явно вклад галактики очень мал и не может еще заметно влиять на кривую блеска. При FWHM $= 0''.15$ для точечного объекта на HST возможный вклад в общий поток (OT + галактика) от "лежащей под транзиентом" какой-нибудь компактной галактики ("an underlying galaxy") можно было оценить, хотя бы сверху, на тот момент как $R \geq 25.4$. Тогда и замедление темпа падения потока в HST/NICMOS/H полосе, и наблюдаемое нами "уплощение" кривой блеска в фильтре I_c через 36 дней после гамма-всплеска с $I_c = 23.07$ можно было бы пытаться интерпретировать, все-таки, как детектирование такой галактики и в этих лучах. Но тогда это был бы какой-то очень красный компактный объект для измеренного (Metzger et al. 1997a) красного смещения $z = 0.835$. Поэтому мы удержались от соблазна доложить о такой "галактике" осенью 1997 г. Истинной R_c-величине "чистой" родительской галактики GRB 970508 специально посвящена Глава 4. Здесь же мы отметим стабилизацию потоков в красных (I_c и H) лучах от OT GRB 970508 на 26-30-е сутки после γ-всплеска, вернувшись к интерпретации этого эффекта в Главе 6.

С другой стороны, вообще, с самого начала и до времени появления этого "плато" такое многоволновое (рентгеновское, оптическое, NIR и радио) поведение источника скорее можно было бы объяснить какими-то внутренними особенностями самого транзиента — переменного объекта, связанного с источником всплеска GRB 970508 , чем предполагать вклад в наблюдаемые потоки от его родительской галактики через 30 дней. Уже тогда, в конце 1997-го, можно было думать (Sokolov et al. 1998), что это явление (γ-всплеск) как-то связано с массивным звездным объектом. Например, уже тогда можно было предположить, что мы наблюдаем в оптике формирование джето-подобной структуры, связанной с активностью массивного звездного компактного объекта, то есть самого *гамма-барстера*. Возможность объяснения наблюдательных данных внутренними свойствами самого источника в моделях асимметричных релятивистских джетов тогда начала обсуждаться некоторыми исследователями (Dar 1997, Paczyn'ski 1997), а сейчас это, пожалуй, самая популярная модель/сценарий для "длинных" γ-всплесков.

Попытке последовательной интерпретации многоволнового поведения транзиента, связанного с γ-всплеском GRB 970508, и полученной только на БТА BVR_cI_c уникальной (до сих пор) кривой блеска со второй вспышкой в оптике посвящена почти вся 6-я глава. Здесь же можно подчеркнуть, что до сих пор еще только у одного γ-всплеска GRB 000301c наблюдалось аналогичное падение блеска его послесвечения — со слабой "второй вспышкой" или, а точнее, с остановкой/"плато" на третьи сутки. Более подробно об этих явлениях и о других кривых блеска см. в Гл.6.

3.6. Заключение и выводы этой главы

Переменный оптический источник, ассоциируемый с GRB 970508, наблюдался в яркой фазе на 1-метровом и 6-метровом телескопах САО с 9-го мая до 4 августа 1997 г. В САО был получен самый большой набор данных по этому объекту и не только в одном фильтре R — наблюдения проводились сразу в 4-х стандартных фотометрических полосах BVR_cI_c. Этот источник удалось отнаблюдать до максимума, в максимуме (два BVR_cI_c-наблюдения на БТА) и непосредственно после него — в яркой фазе изменения блеска — т.е. проследить все детали уникальной "второй вспышки" послесвечения этого γ-всплеска. Затем эти детали временны́х изменений блеска в BVR_cI_c полосах были сравнены с наблюдениями в рентгеновском диапазоне. Подтверждена вспышечная активность объекта, которая была обнаружена (Piro et al. 1998) в рентгене в первую неделю после γ-всплеска. Дальнейшие систематические наблюдения объекта в четырех полосах и, в частности, мониторинг объекта в фильтре I_c (измерение показателей $B-I_c, V-I_c, R-I_c$) проводились только на БТА. Таким образом, удалось обнаружить и обратить внимание (Sokolov et al. 1998) на тот факт, что вначале точечный (по VLA, VLBI наблюдениям) объект в тот момент, когда “twinkling-эффект" пропадает, начинает отклоняться от среднего степенного закона падения блеска $F \propto t^{-1.171(\pm 0.012)}$. Такое поведение явно видно на длине волны ≈ 8000 Å приблизительно через 36 дней после γ-всплеска — объект становится все более красным. Примерно в то же время начало некоторого периода стабилизации блеска в полосе I_c подтверждается и наблюдениями в ближайшем инфракрасном (HST/NIR) диапазоне.

Учитывая все многоволновое поведение послесвечения GRB 970508 за 86 суток с момента γ-всплеска наиболее вероятно принять, что вспышечная активность и последующее замедление темпа падения блеска оптического звездообразного источника объясняются какими-то внутренними свойствами самого объекта. Но в качестве альтернативы тогда (в августе 97-го) не было исключено, что в кривой блеска уже наблюдается проявление карликовой родительской галактики-подложки с $I_c \approx 23.1$. Чтобы наверняка убедиться в отсутствии заметной переменности любого возможного постоянного источника, только дальнейший мониторинг этого “спокойного состояния" оптического "остатка" GRB 970508 мог бы дать окончательное решение этой загадки. О более поздних наблюдениях и об исследовании настоящей родительской галактики этого γ-всплеска пойдет речь в следующей главе.

Выводы :

Исследованы изменения блеска в первые дни в яркой фазе OT GRB 970508 и в последующие сутки (с мая по август 1997 г.) в четырех ($BVRI$) фотометрических полосах. Обнаружено неожиданное и до сих пор окончательно не понятое увеличение блеска объекта от $R_c = 21.19 \pm 0.25$ (Май 9.75 UT) до $R_c = 19.70 \pm 0.03$ (Май 10.77 UT). Обнаружено экспоненциальное падение блеска после этого максимума во всех $BVRI$-полосах в течение 4-х суток. Определен показатель -1.10 ± 0.08 степенного спектра в эти дни, подтвеждающий возможно синхротронный механизм высвечивания OT. Только по данным полученным на БТА определен усредненный степенной закон падения блеска в R-полосе $F \propto t^{-1.171(\pm 0.012)}$ в течение 86 дней после максимума блеска OT. Проведено сравнение оптических и рентгеновских данных, подтверждающих активность источника в первую неделю после GRB 970508 — вторую вспышку afterglow с энергетикой более 0.16 от энергии γ-всплеска.

Глава 4

Исследование родительской галактики гамма-всплеска GRB 970508

Здесь рассмотрены свойства (фотометрия, размеры, распределение энергии в спектре) этой галактики и сравнены со свойствами близких галактик со звездообразованием в локальной Вселенной. Исследованы также $BVRI$-спектры, оценены светимости и размеры трех ближайших галактик в поле галактики GRB 970508.

4.1. Введение

К моменту самых поздних (в августе 98-го) наблюдений на БТА оптического объекта, связанного с гамма-всплеском GRB 970508, было найдено уже 8 компаньонов (counterparts) гамма-всплесков в оптике. И все они были обнаружены после детектирования одновременно с самим гамма-всплеском (BeppoSAX/GRBM) и рентгеновского события (рентгеновского "хвоста" гамма-всплеска) с помощью двух широкоугольных рентгеновских камер WFC, установленных на борту итало-голландской космической обсерватории BeppoSAX. Таким образом, в 1997-98 гг. в оптическом диапазоне были отождествлены следующие гамма-всплески: GRB 970228 (Groot et al. 1997; Van Paradijs et al. 1997), GRB 970508 (Bond 1997), GRB 971214 (Halpern et al. 1997), GRB 980326 (Groot et al. 1998; Eichelberger et al. 1998), GRB 980329 (Djorgovski et al. 1998), GRB 980519 (Jaunsen et al. 1998), GRB 980613 (Hjorth et al. 1998), GRB 980703 (Frail at al. 1998; Zapatero-Osorio et al. 1998). Для гамма-всплеска GRB 980425 в качестве оптического кандидата для его отождествления была предложена (Galama et al. 1998a,b) довольно яркая сверхновая, но связь между этой сверхновой типа Ib и гамма-всплеском GRB 980425 была сразу же подвергнута сомнению наблюдателями (Pian et al. 1998). Да и до сих пор этот случай "совпадения" гамма-всплеска и сверхновой по времени (?), но не по положению на небе не считается надежным аргументом в пользу связи гамма-всплесков и сверхновых. (Хотя такая связь действительно может быть, веские аргументы в пользу такой связи есть и будут приведены в гл. 6.) Но более существенным для понимания этого явления и для возникновения астрономии гамма-всплесков явилось то, что почти во всех случаях уверенного оптического (а иногда и радио) отождествления уже можно было говорить об обнаружении галактики, лежащей под слабеющим точечным оптическим объектом (Hogg & Fruchter 1999) — родительской галактики или ("underlying host galaxy").

Хотя о попытках других авторов через 96 суток "увидеть" вклад в фотометрию ОТ родительской галактики GRB 970508 уже говорилось в предыдущей главе, эта глава посвящена детальному анализу и интерпретации наших новых и самых поздних BVR_cI_c фотометрических данных по ОТ GRB 970508, действительно относящихся к, в основном уже к"чистой", т.е. без вклада ОТ, родительской галактике этого γ-всплеска. Мы предположили, что более надежная оценка вклада галактики на всех стадиях кривой блеска ОТ может быть сделана на основе информации о распределении энергии в спектре этой галактики-подложки. Новые BVR_cI_c наблюдения оптического объекта, связанного с гамма-всплеском GRB 970508, проводились в ноябре 1997 г. и были продолжены в январе, июле и августе 1998 г. Наблюдения на БТА теперь ставились с главной целью проследить, насколько постоянным остается слабый ($R_c \approx 25$) объект — "подложка" под оптическим транзиентом — вплоть до 470-го дня после гамма-всплеска. То есть вплоть до того момента, когда вклад ОТ оказывается уже сравнимым или даже меньшим, чем ошибки определения звездных величин объекта во всех четырех BVR_cI_c фотометрических полосах. Результаты этих наблюдений действительно показали, что оптический компаньон гамма-всплеска изменил свой блеск очень мало, начиная с ноября 1997 г., и это позволило определить видимую звездную величину родительской галактики. Здесь мы сравним BVR_cI_c-спектр (или цвета) родительской галактики всплеска GRB 970508 с распределением энергии в непрерывных спектрах у нормальных галактик различных хаббловских типов и затем расширим такое сравнение, включая и локальные галактики со звездообразованием. Последнее позволит наиболее корректно оценить линейные размеры этой галактики, используя известные к тому времени результаты прямых наблюдений родительской галактики γ-всплеска GRB 970508, полученные на космическом телескопе Хаббла (Fruchter et al. 1998). Предварительные результа-

Таблица 4.1. Результаты наблюдений в 1997-98 гг. (t_o = 8.904 Май 1997 UT).

UT Дата	$t - t_o$ (дни)	Фильтр	Зв.величина
09.00 Oct. 1997	154.12	R_c	24.30 ± 0.20
09.00 Nov.	185.12	V	25.10 ± 0.17
09.00 Nov.	185.12	R_c	24.70 ± 0.15
25.00 Nov.	201.09	V	25.50 ± 0.35
25.00 Nov.	201.09	I_c	23.90 ± 0.14
25.00 Nov.	201.16	R_c	24.70 ± 0.14
01.00 Dec. 1997	206.01	B	25.75 ± 0.30
24.87 Jan. 1998	260.96	R_c	24.96 ± 0.17
24.87 Jan.	260.96	V	25.44 ± 0.25
22.99 Jul.	440.08	R_c	24.90 ± 0.16
23.95 Jul.	441.05	B	25.80 ± 0.30
23.95 Jul.	441.05	V	25.25 ± 0.22
23.95 Jul.	441.05	I_c	24.07 ± 0.25
21.74 Aug.	469.84	B	25.77 ± 0.19
21.74 Aug 1998	469.84	R_c	24.99 ± 0.17

ты исследования родительской галактики были опубликованы (Zharikov, Sokolov, and Baryshev, 1998), и затем параметры родительской галактики GRB 970508 были уточнены с использованием результатов более поздних наблюдений (Sokolov et al. 1999).

4.2. Самые поздние BVR_cI_c наблюдения оптического компаньона γ-всплеска GRB970508 — родительская галактика

Таблица 4.1 представляет результаты наблюдений на 6-метровом телескопе САО в октябре (R_c-фильтр), ноябре (I_c-фильтр) и в декабре 1997 (B-фильтр), в январе, июле и августе 1998-го (BVR_cI_c фильтры). Все наблюдения, как и в мае-августе 1997-го (в яркой фазе ОТ), проводились в одной и той же стандартной фотометрической системе. О первичной обработке данных и о стандартной фотометрической процедуре детально было сказано во 2-й главе и в наших статьях (Sokolov et al. 1998, Kurt et al. 1998). (Наблюдения в B-фильтре в декабре 1997 г. и в B, R_c фильтрах в августе 1998-го были проведены А. И. Копыловым.)

Насколько известно автору, более поздних наблюдений, чем те, что были проведены в САО для оптического объекта, связанного с γ-всплеском

GRB 970508, никто потом не проводил. В 1998 г. мы первыми доложили, что видим только родительскую галактику, уже без вклада в BVR_cI_c потоки от переменного объекта (OT GRB 970508). Сейчас это, наверное, не очень актуально (в конце концов, главное — это конечный результат), но тогда, чтобы сказать об этом уверенно, нужно было тщательно проверить все возможности. Соответственно, ниже будут проанализированы 3 случая: **(1)** — предполагается, что в своих последних наблюдениях мы уже измерили BVR_cI_c-потоки от "чистой" галактики, **(2)** — предполагается, что какой-то вклад от OT все еще может быть, и этот вклад в последние BVR_cI_c-потоки учитывается по некоторым "независимым" степенным законам (следующим из наиболее популярных тогда теорий/сценариев послесвечения γ-всплесков), **(3)** — вклад от OT учитывается по некоторому одному среднему ("стандартному") степенному закону.

Эти три варианта надо было рассмотреть, поскольку тогда (в 1998-м) нельзя было уверенно считать, что переменный объект в оптике, связанный с источником γ-всплеска, не может светить так долго и не может быть так долго ярче своей родительской галактики. (Хотя вариант возможной пекулярной сверхновой учитывался нами с самого начала.) Строго говоря, не зная ничего об объектах-прародителях γ-всплесков мы и не могли сказать точно, когда же перестанет менять свой блеск оптический объект, связанный с источником γ-всплеска: через год, два? К тому же тогда (конец 97-го, начало 1998 гг.) все еще обсуждалась идея связи γ-всплесков с активностью ядер галактик (в т.ч. говорили о возможности связать оптику всплесков с объектами типа BL Lac). И хотя идея связи γ-всплесков со сверхновыми не была еще столь популярной, надо было учитывать, что излучение некоторых сверхновых II типа может наблюдаться очень долго (ссылки см. в 6-й гл.). Кроме того, странное поведение объекта в фильтре I_c (см. предыдущую главу), в котором с самого начала только в САО проводился мониторинг OT GRB 970508, заставило нас провести такое исследование, т. е. проверить все возможные варианты. Ведь наиболее точно сказать о типе галактики, что и было главной целью этой работы, можно было только на основе наиболее надежной информации о распределении энергии в ее спектре, получаемой из наших же наблюдений.

Итак, если BVR_cI_c величины оптического компаньона GRB 970508 действительно не менялись в течение этих последних 9-ти месяцев, то тогда можно считать, что мы наблюдаем "чистую" родительскую галактику для этого γ-всплеска, то есть уже без вклада, связанного с ним (с γ-всплеском) OT GRB 970508. Соответствующие такому заключению звездные величины и потоки даны в Таблице 4.2, случай **(1)**.

С другой стороны, величины объекта, может быть, все еще слабо менялись (почти в пределах ошибок наблюдений) и все еще можно было описывать уменьшение вклада ОТ в общие BVR_cI_c-потоки некоторыми степенными законами примерно в течение года после γ-всплеска. В этом случае потоки от галактики в период наших наблюдений 1997-98 гг. и особенно в его начале (см. Табл. 4.1) могут еще как-то соответствовать "подгонкам" (аппроксимациям) наблюдаемых BVR_cI_c кривых блеска некоторой двухкомпонентной моделью. То есть они (для каждого из фильтров) могут быть суммой вклада в поток от ОТ GRB 970508, который уменьшается согласно некоторому степенному закону, соответствующему теоретическим моделям, плюс постоянный поток F_c от самой родительской галактики. Такую модель падения блеска тогда представляли формулой: $F = F_o \times t^\alpha + F_c$. (Эта модель полностью игнорирует вспышку в оптике на второй день после всплеска, о которой шла речь в предыдущей главе.) Модельная кривая блеска соответствует некоторому "теоретическому" потоку F_o в момент γ-всплеска $t_o = 8.904$, который наверняка не наблюдался как раз в случае ОТ GRB 970508 Строго говоря, он не наблюдался ни для одного из найденных до сегодняшнего дня оптических транзиентов других γ-всплесков. Но эту простейшую модель (только один степенной закон!), особенно для поздних стадий падения блеска транзиентов, тогда (в 97-99-м) часто использовали при интерпретации наблюдений. Хотя сейчас уже многим понятно, что это только некоторое нулевое, грубое приближение и послесвечение γ-всплесков описывается более сложной зависимостью, учитывающей вклады от бо́льшего числа источников и некоторую асимметрию взрыва (а не только суммой: фаербол + галактика, об этом в гл.6).

Чтобы исследовать возможную переменность такого слабого источника, мы должны исключить влияние любых систематических сдвигов в наблюдательных данных из-за различных фотометрических систем на различных инструментах. Поэтому методике апертурной фотометрии слабых ($S/N \approx 5$) объектов было уделено много внимания выше, в том числе и в предыдущей главе, где на Рис. 3.1 приводились редуцированные из разных фотометрических систем данные. О проблемах, связанных с такой редукцией, более подробно сказано и в цитированной статье Т. Галамы (Galama 1998). Именно поэтому для своих модельных подгонок данных по критерию χ^2 (Табл. 4.2) мы в конце концов решили использовать только собственные результаты наблюдений на 6-метровом телескопе (с 10.77 Май 1977 UT до 21.74 Август 1988 UT). В том, что систематические ошибки при переходе

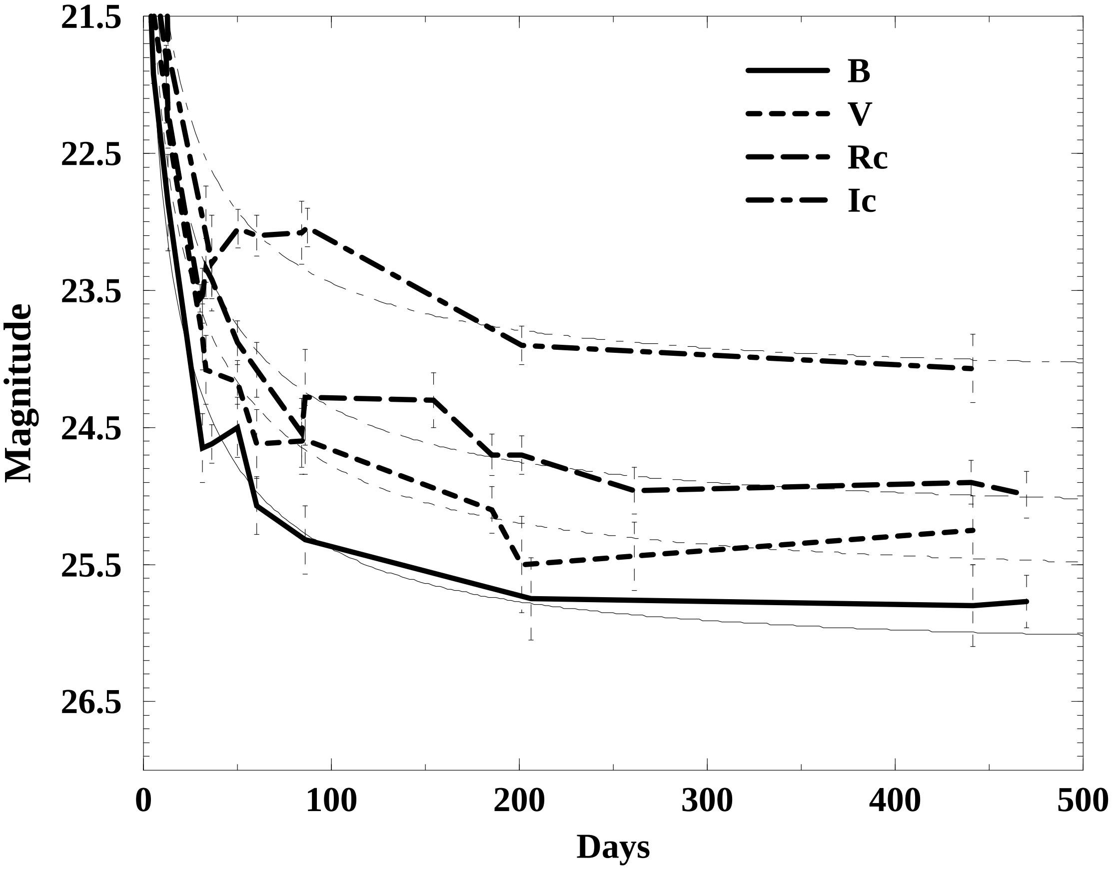


Рис. 4.1. BVR_cI_c кривые блеска ОТ + родительская галактика до $\simeq$ 470-го дня после γ-всплеска GRB 970508. Четыре независимых BVR_cI_c модельных кривых ($F = F_o \times t^\alpha + F_c$), выбранных по критерию χ^2 с различными α, изображены гладкими тонкими линиями. Ломанными толстыми линиями соединены данные наблюдений в каждом фильтре.

к стандартной фотометрической системе могут быть существенными при исследовании слабых объектов, мы убедились сами, попытавшись учесть чужие данные, полученные R_c и B фильтрах (Zharikov et al. 1998). Таким образом, четыре независимые BVR_cI_c модельные подгонки по χ^2 с различными наклонами (Рис. 4.1) дают значения постоянных потоков F_c и наблюдаемых величин родительской галактики в каждом фильтре — см. Табл. 4.2, случай **(2)**.

Случай **(3)** в той же Табл. 4.2 соответствует модели с некоторым средним показателем $<\alpha>= -1.25 \pm 0.05$ степенного падения блеска ОТ. Это случай одного и того же степенного закона *для всех фильтров*. (Фактически только этот вариант и предсказывался теорией, ссылки в 6-й главе.)

Здесь также даны значения величин и потоков постоянного источника (галактики) и для такого способа учета влияния ОТ ("OT contamination") в самые последние даты наблюдений.

На Рис. 4.2 распределения энергии — BVR_cI_c-спектры — родительской галактики представлены для этих трех случаев: BVR_cI_c-потоки по самым последним наблюдениям и два варианта BVR_cI_c-потоков галактики для модельных χ^2-подгонок. В случае **(2)** или **(3)** мы имеем дело не с наблюдаемыми, а с некоторыми теоретическими BVR_cI_c-величинами и потоками, соответствующими времени t, стремящемуся к бесконечности. Как видно из Табл. 4.1, зв. величины объекта в каждом из фильтров остаются почти постоянными с ноября 1997 г. по август 1998 г. (на Рис. 4.1 начиная с 200-го дня) перед самыми последними наблюдениями: BVR_cI_c-величины, полученные в этих наблюдениях, и соответствующие им потоки можно рассматривать как верхние оценки для блеска и распределения энергии родительской галактики (спектр **1** на Рис. 4.2). Тем не менее, если все-таки допустить некоторое падение блеска в этот период из-за какого-то (хоть и небольшого) вклада ОТ, то можно считать, что мы имеем нижние оценки яркостей и распределения энергии галактики, полученные из модельных χ^2-подгонок по наблюдениям в каждом фильтре (спектр **2** на Рис. 4.2). На том же Рис. 4.2 эти широкополосные спектры для родительской галактики γ-всплеска GRB 970508 сравниваются с типичными распределениями энергии в ультрафиолете (Pence 1976) галактик различных хаббловских типов. Наши BVR_cI_c-спектры нормализованы по величине потока в I_c-полосе, но ошибки наблюдений в этом фильтре позволяют нормализовать все и по потоку в фильтре R_c. Таким образом, оказывается, что все рассмотренные нами варианты в пределах ошибок наблюдений (и χ^2-подгонок по ним) уже дают одинаковые распределения энергии/цветов объекта, соответствующие галактике с хаббловским типом (во всяком случае) не раннее, чем Sbc.

Для интерпретации в следующих разделах главы был выбран BVR_cI_c-спектр и величины родительской галактики, соответствующие варианту **(2)** в Таблице 4.2, хотя два других случая (так же, как и ошибки наблюдений) мы будем иметь в виду при сравнении результатов фотометрии родительской галактики со спектрами локальных галактик.

Таблица 4.2. BVR_cI_c-величины и потоки родительской галактики γ-всплеска GRB970508. **(1)** Последние наблюдения из Таблицы 4.1. **(2)** Величины и потоки, учитывающие возможный вклад ОТ согласно χ^2-подгонкам наблюдений с моделью: $F = F_o \times t^\alpha + F_c$. **(3)** То же самое для некоторого среднего $< \alpha >= -1.25 \pm 0.05$. Использовалась вся фотометрия оптического компаньона, полученная на БТА (Sokolov et al. 1999).

Фильтр	Зв. величина	log $F_{\lambda,obs}$ $\left(\frac{\text{erg}}{\text{cm}^2 \text{ s Å}}\right)$	χ^2 (d.o.f)
(1)			
B	25.77 ± 0.19	-18.52 ± 0.07	
V	25.25 ± 0.22	-18.54 ± 0.09	
R_c	24.99 ± 0.17	-18.66 ± 0.07	
I_c	24.07 ± 0.25	-18.58 ± 0.10	
(2)			
B ($\alpha = -1.32 \pm 0.05$)	25.99 ± 0.11	-18.60 ± 0.05	14.2/11
V ($\alpha = -1.24 \pm 0.07$)	25.65 ± 0.17	-18.70 ± 0.07	36.6/14
R_c ($\alpha = -1.25 \pm 0.04$)	25.16 ± 0.09	-18.73 ± 0.04	52.7/19
I_c ($\alpha = -1.18 \pm 0.07$)	24.17 ± 0.28	-18.62 ± 0.11	44.3/12
(3)			
B	26.15 ± 0.16	-18.67 ± 0.06	18.9/12
V	25.61 ± 0.16	-18.69 ± 0.07	36.1/15
R_c	25.16 ± 0.09	-18.73 ± 0.04	52.7/18
I_c	23.99 ± 0.25	-18.55 ± 0.10	47.1/13

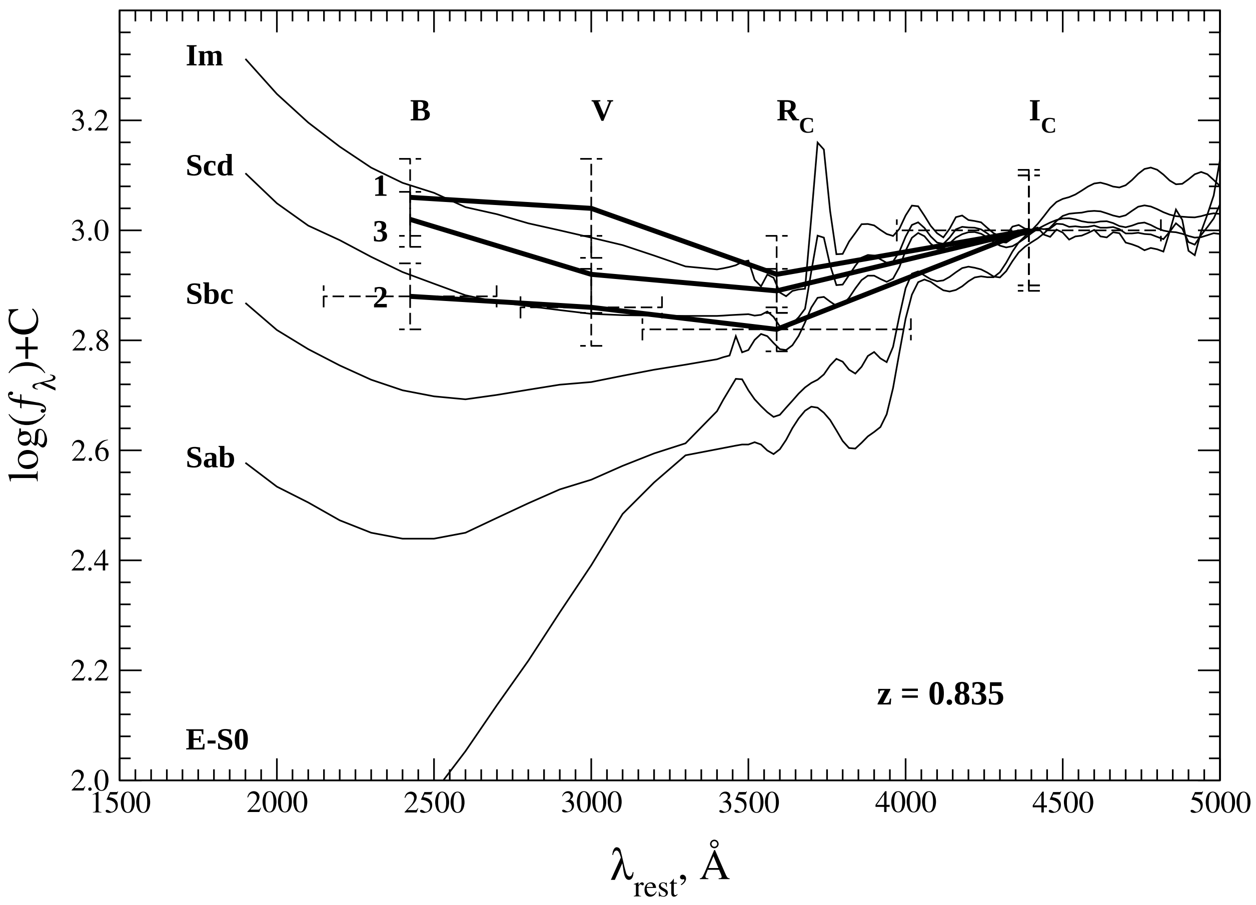


Рис. 4.2. Широкополосный спектр (или распределение цветов) родительской галактики GRB 970508 с учетом сдвига наблюдаемых BVR_cI_c-полос в синюю сторону, "назад", в систему покоя галактики с $z = 0.835$, и сравнение этого спектра с типичными распределениями энергии для галактик различных хаббловских типов в ультрафиолете. Номера 1, 2, 3 соответствуют трем случаям, рассмотренным в Табл. 4.2. Для наилучшего согласия эти спектры были сдвинуты по оси ординат с помощью произвольных констант: $\log(\mathrm{F}_\lambda) = \log\mathrm{F}_\lambda(\mathrm{obs}){+}\mathrm{C}$, где F_λ в эрг см$^{-2}$ с$^{-1}$ Å^{-1} и λ в Å. Полуширины (FWHM) каждого фильтра для его λ_{eff}, с учетом сдвига влево для $z = 0.835$, обозначены пунктирными горизонтальными отрезками с барами.

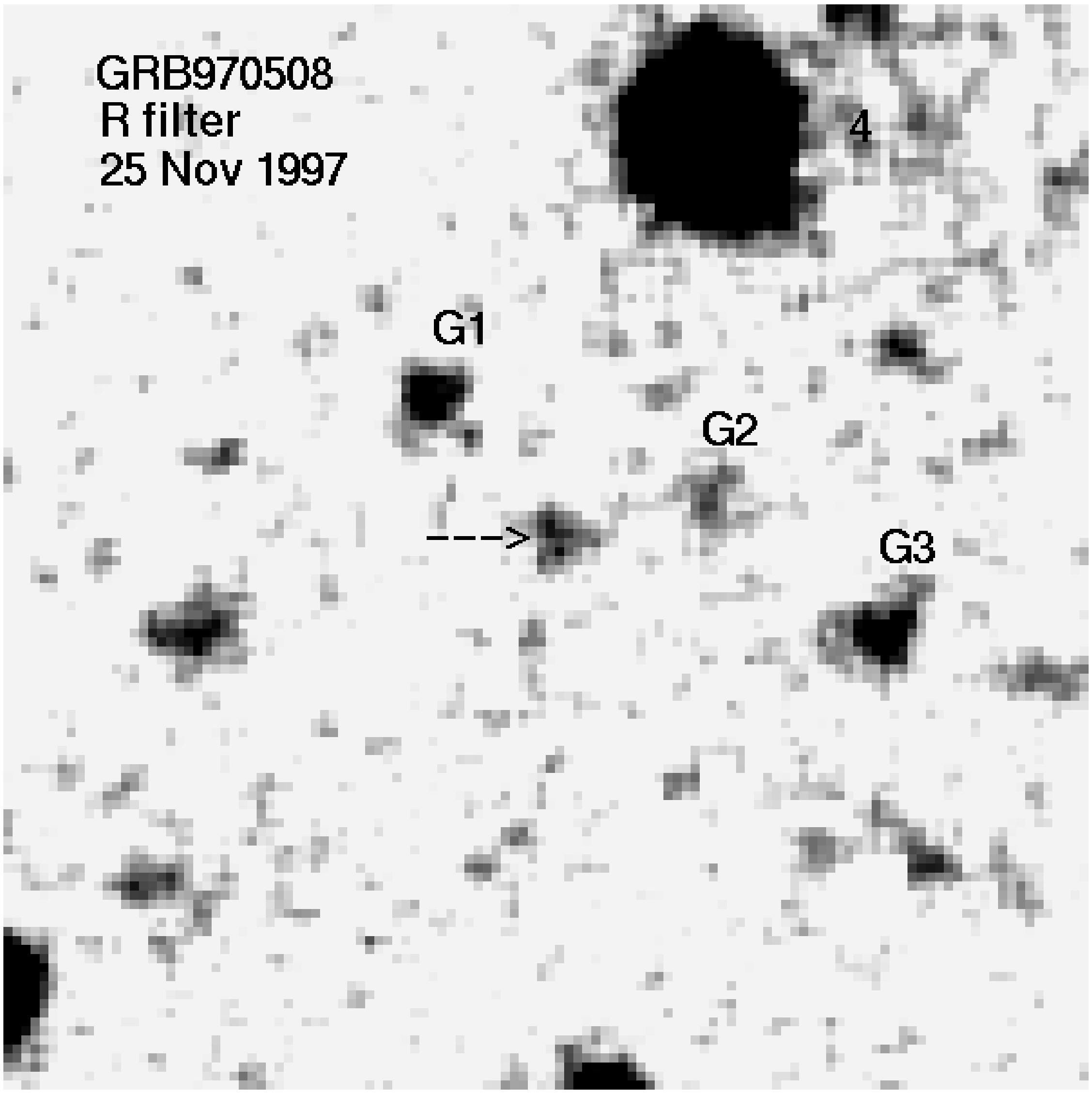


Рис. 4.3. Объекты вблизи родительской галактики GRB 970508: CCD/R_c-изображение с размерами $33'' \times 33''$, Север – вверх, Восток – справа. Стрелкой указана родительская галактика γ-всплеска, G1, G2, G3 — ближайшие к ней галактики. Галактика G2 находится в $\approx 4''$ от галактики GRB 970508. Получено на БТА 25 ноября 1997 г.

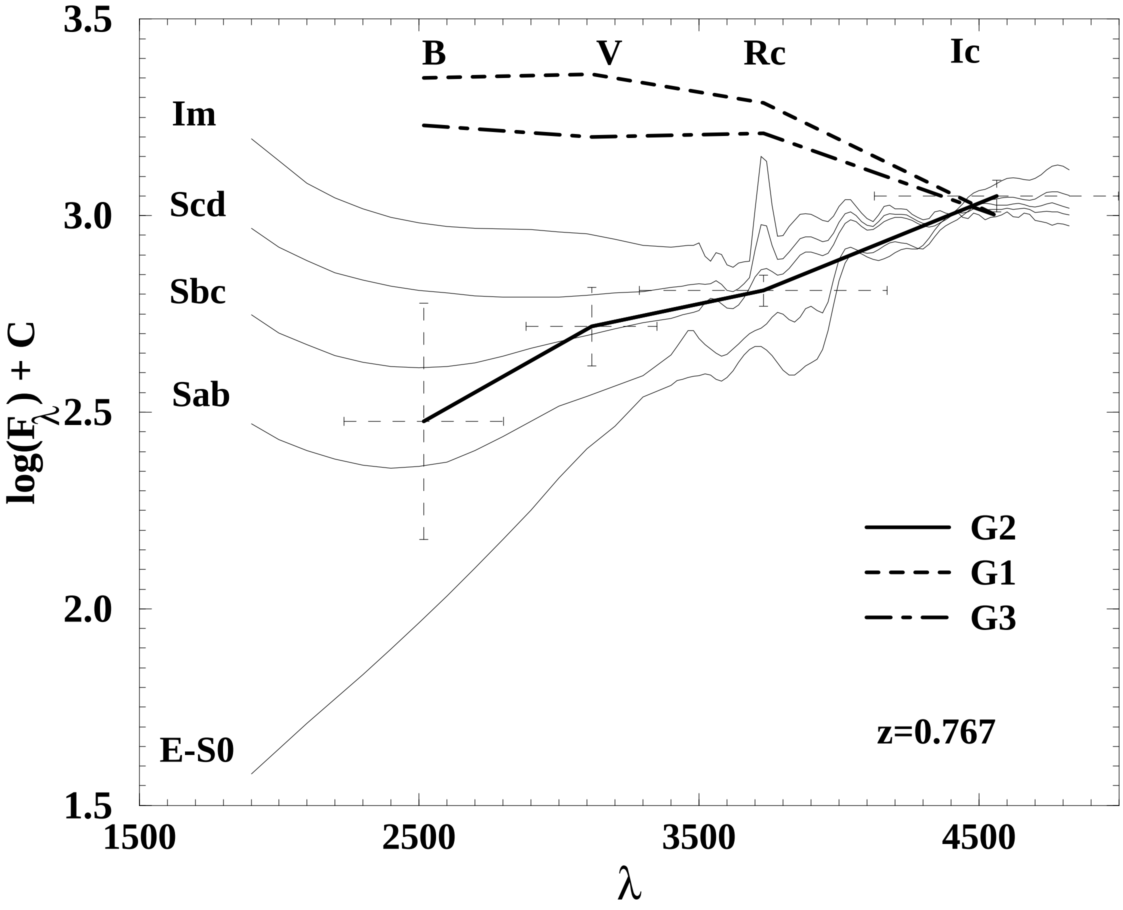


Рис. 4.4. Сравнение широкополосных спектров, или распределений цветов из Табл. 4.3, ближайшей (к родительской) галактики G2 и двух других (G1, G3) галактик в системе покоя с $z = 0.767$, с типичными ультрафиолетовыми континуумами галактик разных хаббловских типов. См. также подпись к Рис. 4.2.

Таблица 4.3. Величины и цвета галактик поля GRB 970508

Object	B	V	R_c	I_c	$B-V$	$V-R_c$	R_c-I_c
G1	25.22 ± 0.12	24.61 ± 0.07	24.23 ± 0.05	24.21 ± 0.16	0.61 ± 0.14	0.38 ± 0.09	0.02 ± 0.17
G2	>26.7	26.1 ± 0.25	25.31 ± 0.12	23.73 ± 0.08	>0.6	0.79 ± 0.25	1.58 ± 0.14
G3	25.29 ± 0.13	24.79 ± 0.08	24.20 ± 0.04	23.99 ± 0.09	0.50 ± 0.15	0.59 ± 0.09	0.20 ± 0.10

4.3. Объекты поля родительской галактики GRB 970508

Как уже говорилось выше, первые спектральные наблюдения OT GRB 970508 были выполнены на 10-метровом Keck-II телескопе 11 мая 1997 г. (Metzger at al. 1997a). В этих наблюдениях были обнаружены две системы абсорбционных линий: 1) с $z = 0.835$ для элементов Fe II, Mg II and Mg I, 2) с $z = 0.767$ для дублета Mg II. Такие абсорбционные линии обычно обнаруживают в спектрах далеких квазаров и их связывают с галактиками, оказавшимися на луче зрения QSO. Потом новые оптические follow-up наблюдения — прямые снимки поля, и спектроскопия родительской галактики — были сделаны на Keck-II в июне, в ноябре 1997 г. и затем еще в феврале 1998 г. В спектре была обнаружена эмиссионная линия [O II], соответствующая $z = 0.835$. Слабая галактика, совпадающая с положением оптического транзиента GRB 970508, вероятнее всего и должна быть ответственной за эту эмиссию (Metzger et al. 1997b, Bloom et al. 1998). Но вторая система абсорбций все-таки оставалась необъясненной.

Прямое изображение поля галактики с высоким разрешением было получено к этому времени и на HST/STIS (Pian at al. 1997). Поэтому мы решили исследовать ближайшие к OT GRB 970508 три объекта — галактики, чтобы сравнить свойства (фотометрию, цвета) родительской галактики γ-всплеска с ее ближайшими соседями. (Тогда очень актуальным был вопрос: насколько пекулярными могут быть галактики, в которых есть такие пекулярные объекты, как источники γ-всплесков?) На Рис.4.3 показана часть глубокого снимка (R_c-image) поля GRB 980508, полученного в полосе R_c на БТА 25 ноября 1997 г. Стрелкой указана сама родительская галактика GRB 970508, три ближайшие к ней галактики обозначены как: G1, G2 и G3.

Наблюдаемые величины и цвета галактик G1, G2, G3 приведены в Табл. 4.3. Фотометрия этих объектов была получена с использованием суммы всех снимков поля GRB 970508, отобранных по наилучшим размерам изображения ("seeing") — лучше, чем $1.8''$. Фотометрическая калибровка использует те же вторичные фотометрические стандарты, что и для ОТ в предыдущей главе (Sokolov et al. 1998). Полные времена экспозиции в каждом из фильтров были: 4800 с (B), 14200 с (V), 13950 с (R_c), 10800 с (I_c). Близкие по величинам галактики G1, G3 — голубые, с похожими распределениями энергии в спектрах, что, по-видимому, указывает и на близкие значения их z. Галактика G2 заметно более красная $R_c - I_c = 1.58 \pm 0.14$. Именно эта галактика, находящаяся на расстоянии более 4 угловых секунд от родительской галактики GRB 970508, может быть причиной второй системы абсорбционных линий с красным смещением 0.767, которые наблюдались (Metzger et al. 1997a) в мощном континууме ОТ в момент его максимального блеска. Галактики G1 и G3, как уже было сказано, очень голубые, что соответствует z, по-видимому, больше, чем 1. Красное смещение может быть в интервале 1.5 – 2.5. Для этой области z в видимую область спектра не попадают яркие оптические лиии, по которым космологическое красное смещение определяется у далеких галактик. Поэтому не удивительно, что по наблюдениям на 10-м телескопе Keck-II (Bloom et al. 1998) спектр галактики G1 оказался голубым континуумом без заметных спектральных особенностей. На Рис. 4.4 показаны соответствующие "широкополосные" BVR_cI_c-спектры, полученные на БТА для этих двух (G1 и G3) галактик и галактики G2, сдвинутые в фиолетовую сторону для $z = 0.767$. На рисунке изображены все те же распределения энергии в ультрафиолете для галактик различных хаббловских типов.

Таким образом, ближайшая к родительской галактике GRB 970508 слабая галактика G2 имеет похожее, с учетом ошибок в определении BVR_cI_c-потоков, распределение энергии, соответствующее спиральным галактикам. Она может лежать на проекционном расстоянии 30-40 kpc от луча зрения для родительской галактики и, возможно, луч зрения проходит через протяженное (газовое) гало вокруг галактики G2 (с $z = 0.767$), что и явилось причиной появления дополнительной системы абсорбционных линий в степенном спектре вспышки (ОТ GRB 970508), наблюдавшейся (Metzger et al. 1997) в еще более далекой (с $z = 0.835$) родительской галактике. Но что более существенно для выяснения природы источников γ-всплесков, так это то, что галактики поля на Рис.4.3, это такие же голубые галактики, как и сама родительская галактика GRB 970508, и они все вполне могут быть отнесены к галактикам с "массивным" звездообразованием. (Более детально этот тезис будет развит в гл. 5.)

4.4. Абсолютные величины родительской галактики γ-всплеска GRB 970508

Для того, чтобы сравнить свойства родительской галактики со свойствами близких к нам галактик локальной Вселенной, необходимо иметь для нее оценки абсолютной звездной величины, линейных размеров и распределение энергии в ее спектре. Для получения абсолютной величины и оценок размеров надо выбрать какую-то космологическую модель и для данного z определить К-поправку, поскольку оценки собственных физических параметров внегалактических объектов с красными смещениями, блзкими к 1 (и больше), могут быть чувствительными к выбранной космологической модели. Таким образом, для исследования родительских галактик длинных γ-всплесков и для корректного сравнения их свойств со свойствами уже изученных объектов ("стандартов") в локальной Вселенной становится существенным выбор трех главных параметров Фридмановской модели: H_0 — постоянная Хаббла, Ω_m — параметр плотности материи, Ω_Λ — параметр, связанный с выбором значения космологической постоянной (или Λ члена).

Значение постоянной Хаббла может лежать в пределах 50 – 70 km s^{-1} Mpc^{-1} (Theureau et al. 1997). Здесь и в дальнейшем мы выбрали $H_0 = 60$ km s^{-1} Mpc^{-1} . Величины Ω_m и Ω_Λ определяются наблюдательно менее надежно. Но в то время активно начавшаяся работа по космологическому "$m-z$" тесту со сверхновыми Ia типа при красных смещениях около 1 (Garnavich et al. 1998) заставила нас учесть эту новую информацию наряду со шкалой "стандартной" инфляционной модели, так же, как и учесть шкалу (светимостей, расстояний, размеров и т. д.) пустой Вселенной с космологической константой. Здесь мы приведем некоторые математические соотношения из обзоров по космологическим моделям (см. например Baryshev et al. 1994), которые будут потом использоваться в этой и в следующей главах, где сравнение параметров родительских галактик γ-всплесков со свойствами локальных галактик потребует численного моделирования. Для учета влияния выбора космологических моделей и учитывая разброс Ω_m и Ω_Λ, следующий из наблюдений, мы рассмотрели три плоские Фридмановские модели с предельными значениями этих параметров (три предельных случая):

$$H_0 = 60 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1},\ \Omega_m = 1,\ \Omega_\Lambda = 0 \quad \text{(A)}$$

$$H_0 = 60 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1},\ \Omega_m = 0,\ \Omega_\Lambda = 0 \quad \text{(B)}$$

$$H_0 = 60 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1},\ \Omega_m = 0,\ \Omega_\Lambda = 1 \quad \text{(C)}$$

Для всех моделей справедливо соотношение (или нормировка констант) $\Omega_m + \Omega_\Lambda + \Omega_k = 1$, где $\Omega_m = \rho_0 8\pi G/3H_0^2$, $\Omega_\Lambda = \Lambda c^2/3H_0^2$ и $\Omega_k = -kc^2/R_0^2 H_0^2$. Здесь ρ, Λ, k и R — плотность, космологическая постоянная, кривизна и радиус кривизны соответственно, "0" обозначает настоящую эпоху.

В дальнейшем мы будем использовать только наблюдаемые величины, используя космологические модели как некоторые правила, задающие связь расстояний, угловых и линейных размеров объекта с измеренным красным смещением. Абсолютная величина $M_{(i)}$ любого источника в каком-то из конкретных фильтров (i) определяется из соотношения

$$M_{(i)} = m_{(i)} - K_{(i)}(z) - 5\log(R_{lum}/\text{Mpc}) - 25, \qquad (4.1)$$

где $m_{(i)}$ — наблюдаемая величина объекта в i-той фотометрической полосе/фильтре, $K_{(i)}(z)$ — K-поправка, вычисленная для заданного красного смещения z галактики и с использованием распределения энергии в спектре в ее собственной системе (т.е. при $z = 0$), R_{lum} — "фотометрическое" расстояние до объекта. Для определения размеров галактик используется величина R_{p} — так называемое собственно метрическое расстояние до объекта при заданном z. R_{lum} и R_{p} связаны соотношением: $R_{\text{lum}} = R_{\text{p}}(1+z)$. Собственно метрические расстояния в каждой из моделей (A, B, C) определяются формулами: $R_p = R_H \frac{2(z-\sqrt{1+z}+1)}{1+z}$ для модели A, $R_p = R_H \frac{z(1+0.5z)}{1+z}$ для модели B. Здесь $R_H = c/H_0$ — величина хаббловского радиуса Вселенной. Самое простое соотношение $R_p = R_H\, z = zc/H_0$ получается для наиболее близкой к реалистичной (см. ниже) модели C — пустая Вселенная, определяемая только (или в основном только) космологической постоянной или космологическим Λ-членом в уравнениях Эйнштейна. Линейный размер объекта l, имеющего наблюдаемый угловой размер θ, определяется соотношением

$$l = \theta R_{\text{p}}/(1+z) \qquad (4.2)$$

Для $z = 0.835$ из уравнения (4.1) линейные размеры, нормализованные к углу $\theta = 1''$: $l \approx (\theta/1'')6.9$ кпк для модели A, $l \approx (\theta/1'')8.5$ кпк для модели B, и $l \approx (\theta/1'')11.1$ кпк для модели C. Детальное обсуждение линейных размеров родительской галактики GRB 970508 дано в разделе 6.4, после обсуждения распределения энергии в ее спектре и сравнения его со спектрами локальных галактик, что может ограничить как возможный тип родительской галактики, так и ее размеры.

Для вычисления собственных параметров родительской галактики γ-всплеска мы приняли BVR_cI_c величины, которые соответствуют случаю 2

(Табл. 4.2) с минимальным (если он еще был к тому времени) или вообще с отсутствием какого бы то ни было вклада от ОТ в наблюдаемые потоки. Наблюдаемая центральная или эффективная длина волны для каждого фильтра $\lambda_{\rm obs} = \lambda_{\rm eff}$ для нашей фотометрической системы равна соответственно: $\lambda_B = 4448$ Å, $\lambda_V = 5505$ Å, $\lambda_R = 6588$ Å, $\lambda_I = 8060$ Å. (Соответствующие полуширины FWHM фильтров равны: $\Delta\lambda_B = 1008$ Å, $\Delta\lambda_V = 827$ Å, $\Delta\lambda_R = 1568$ Å, $\Delta\lambda_I = 1542$ Å). Полезным совпадением является то, что при $z = 0.835$ при наблюдаемой длине волны фильтра R_c (или просто в фильтре R_c) мы видим излучение, соответствующее полосе $U_{\rm rest}$ ($\lambda_U = 3652$ Å) в собственной системе отсчета галактики. Соответственно и в фильтре I_c при этом z мы наблюдаем излучение из полосы $B_{\rm rest}$ ($\lambda_B = 4448$ Å).

Простым сдвигом от $\lambda_{\rm obs}$ к $\lambda_{\rm emit} = \lambda_{\rm obs}/(1+z)$ на диаграмме "$\log(F(\lambda_{\rm obs}))$ vs. $\lambda_{\rm obs}$" мы получаем 4 точки в спектральном распределении энергии галактики, соответствующие ее далекой ультрафиолетовой части спектра в ее собственной системе отсчета, что позволяет нам сравнивать эти потоки с известными спектральными распределениями энергии, измеренными для галактик локальной Вселенной (см. также Рис. 4.2 и 4.4).

K-поправку в (4.1) можно вычислить, пользуясь стандартной формулой (Oke & Sandage 1968):

$$K_{(i)}(z) = 2.5\log(1+z) + 2.5\log\frac{\int_0^\infty F_\lambda S_{(i)}(\lambda){\rm d}\lambda}{\int_0^\infty F_{\lambda/(1+z)} S_{(i)}(\lambda){\rm d}\lambda}. \tag{4.3}$$

Здесь F_λ — распределение энергии в спектре при $z = 0$, т. е. в системе покоя галактики, $F_{\lambda/(1+z)}$ — наблюдаемое распределение энергии, $S_{(i)}(\lambda)$ — кривая пропускания фотометра в фильтре (i). Строго говоря, для корректного вычисления K-поправки надо заранее знать правильное распределение энергии в спектре изучаемой галактики в ее системе покоя. Такие вычисления (с учетом подстановки спектров F_λ и $F_{\lambda/(1+z)}$ и интегрирования с $S_{(i)}(\lambda)$) будут проведены в след. главе. Там для каждой родительской галактики будет подобран ее аналог (по спектру) из галактик локальной Вселенной. А сейчас для первой родительской галактики γ-всплеска GRB 970508 (в первом приближении, то есть до решения вопроса, какой же спектр F_λ считать правильным) мы учтем то, что, как было сказано выше, эффективная длина волны I_c-полосы для $z = 0.835$ как раз соответствует (или близка) эффективной длине волны фотометрической полосы $B_{\rm rest}$. Это позволяет для грубой оценки K-поправки при вычислении абсолютной B-величины сделать замену *сверток* спектров с кривыми пропускания в (4.3) на значения измеренных потоков в фильтрах $\approx 2.5\log(F_{I_{\rm obs}}/F_{B_{\rm obs}})$.

Вычисление, в том числе и с учетом ошибки, которую может внести такое упрощение, дает

$$K_B = +0.6 \pm 0.3.$$

Таким образом, абсолютные $B_{\rm rest}$ величины, согласно (4.1) с учетом K-поправки +0.6 для $z = 0.835$ и для трех космологических моделей, т. е. для каждого варианта $R_{\rm lum} = R_{\rm p}(1+z)$, равны: $M_{B_{\rm rest}} = -18.0 \pm 0.3$ для модели A, $M_{B_{\rm rest}} = -18.5 \pm 0.3$ для модели B и $M_{B_{\rm rest}} = -19.0 \pm 0.3$ для модели C (Sokolov et al. 1999). То есть разброс значений с учетом космологического члена (для модели C) и без него (модель A) может достигать одной звездной величины в оценке светимостей. Соответственно и учет K-поправки, и выбор определенной космологической модели могут стать существенными при сравнении светимостей родительских галактик со "стандартными" галактиками локальной Вселенной.

Мы также оценили значение K-поправки для галактики G2 для $z = 0.767$, она оказалась равной $K_B \approx 2.1$. (Строго говоря, мы имеем лишь верхний предел для оценки ее потока в B, см. Рис. 4.4.) Это позволяет нам получить для $M_{B_{\rm rest}} \lesssim -18.4,\ -18.9,\ -19.4$ для космологических моделей A, B и C соответственно. Следуя работе Natarajan et al. (1997) мы можем сейчас точнее вычислить нижний предел для радиуса $R_{\max}$ газового гало галактики G2, которое может проявиться в спектре как система абсорбций Mg II: $R_{\max} \gtrsim 38$, 42 и 46 kpc (модели A, B и C). Угловое расстояние между галактикой GRB 970508 и G2 около $4''$, что соответствует линейному уклонению от луча зрения в 29 кпк, 35 кпк и 45 кпк (A,B,C варианты, формула 4.2). И, таким образом, мы можем заключить, что эта галактика действительно может быть ответственной за наблюдавшуюся в спектре ОТ GRB 970508 абсорбционную линию Mg II с $z = 0.767$ (Metzger et al. 1997a).

4.5. Сравнение с ультрафиолетовыми спектрами локальных галактик

На Рис. 4.2 показано сравнение BVR_cI_c-спектра родительской галактики γ-всплеска GRB 970508 с распределением энергии в ультрафиолете для нормальных галактик различных хаббловских типов. Хотя трудно указать точно, с каким отдельным хаббловским типом совпадает наблюдаемое распределение потоков, тем не менее для родительской галактики GRB 970508 по нашим данным можно надежно исключить все ранние типы галактик, начиная с E до Sbc. Здесь мы расширили такое сравнение для GRB 970508, чтобы включить в него локальные галактики со звездообразованием.

Рис. 4.5 и 4.6 показывают сравнение между распределением потоков в континууме для галактики GRB 970508 (спектр сдвинут в ее систему покоя) и непрерывными спектрами некоторых галактик со звездообразованием, выбранных из ультрафиолетового атласа Kinney et al. (1993) с известными абсолютными величинами M_B. Мы ограничили свой поиск интервалом абсолютных величин $-21 < M_B < -17$ и искали спектры, которые имеют сходство с наблюдаемым широкополосным спектром родительской галактики GRB 970508. Для этой задачи мы использовали таблицы McQuade et al. (1995) и Storchi-Bergmann et al. (1995), которые приводят список потоков в континууме для выбранных длин волн в интервале 1355 – 7525 Å. Каталожные потоки обозначены открытыми квадратами на Рис. 4.5 и 4.6. Потоки разных галактик были взяты в шкале с произвольным сдвигом, и гладкие линии соединяют точки для лучшего сравнения с наблюдаемыми точками. Наблюдаемые потоки взяты с соответствующими барами ошибок, для галактического поглощения взято $A_V = 0.08$ (Djorgovski et al. 1997; Sokolov et al. 1998)). Мы проверили, что изменение галактического поглощения от низкого значения 0.01 к величине 0.15 несущественно изменяет спектр.

Все галактики на Рис. 4.5 и 4.6 показывают также довольно сильные эмиссионные линии, наиболее заметные из которых на $\lambda = 3727$ Å [O II], $\lambda = 4861$ Å H_β, $\lambda = 4959,\ 5007$ Å [O III] и $\lambda = 6563$ Å H_α, что связано со звездообразовательной активностью в этих галактиках. Из этих сильных линий лишь $\lambda = 3727$ Å [O II] попадает в область наблюдаемого нами континуума в районе R_c-полосы для галактики GRB 970508.

Мы заключили, что лучше всего соответствуют наблюдаемому спектру родительской галактики γ-всплеска спектры таких галактик из выбранного интервала светимостей: голубая компактная карликовая галактика NGC1510, H II галактика со звездообразованием NGC7793 и голубая компактная галактика Mrk 1267. Абсолютная B-величина галактики NGC7793 (-18.0), которая имеет хаббловский тип Scd, практически та же, что получается у нас для галактики GRB 970508. Голубая компактная галактика Mrk 1267 оказывается значительно более яркой (-20.8) и ее хаббловский тип хорошо не определен. Все "подгонки" спектров на Рис. 4.5 и 4.6 еще не учитывают абсолютные потоки. Фактически это сравнение только по форме спектра или по цветам. В следующей главе такое сравнение будет учитывать и светимость галактики (абсолютные BVR_cI_c потоки) при моделировании распределений энергии галактик со звездообразованием.

Таблица 4.4. Параметры галактик, выбранных из каталога LEDA и используемых в сравнении их ультрафиолетовых спектров с BVR_cI_c-спектром родительской галактики γ-всплеска GRB 970508. Расстояния r (с дисперсиями σ_r) вычислены с использованием лучевых скоростей, исправленных to Virgo infall ($H_0 = 60$ km s^{-1}Mpc^{-1}), исключая NGC1705 (O'Connell etal. 1994) и NGC7793 (Puche & Carignan 1988). B_{T} — наблюдаемые B-величины, $\log d_{25}$ — логарифмы 25 B-mag/arcsec^2 угловых изофотных диаметров галактик в единицах 0.1 arcmin, D_{25} — линейные 25 B-mag/arcsec^2 изофотные диаметры с соответствующими дисперсиями $\sigma_{D_{25}}$.

PGC/LEDA id.	Alt. id.	Type	$\log d_{25}$	B_{T}	D_{25} (kpc)	$\sigma_{D_{25}}$ (kpc)	M_B	σ_{M_B}	r (Mpc)	σ_r (Mpc)
PGC 0014375	NGC 1510	S0	1.429	13.51	9.37	10.12	-16.77	.63	11.41	.14
PGC 0016282	NGC 1705	E-S0	1.270	12.76	2.71	1.11	-15.73	.87	5.0[1]	2.0[1]
PGC 0029366	NGC 3125	E	1.047	13.47	5.59	.85	-17.38	.31	14.81	1.51
PGC 0032672	MK 1267		.644	14.16	12.31	1.74	-20.75	.59	96.04	.72
PGC 0073049	NGC 7793	Scd	1.982	9.70	9.43	1.44	-17.95	.24	3.38[2]	.30[2]

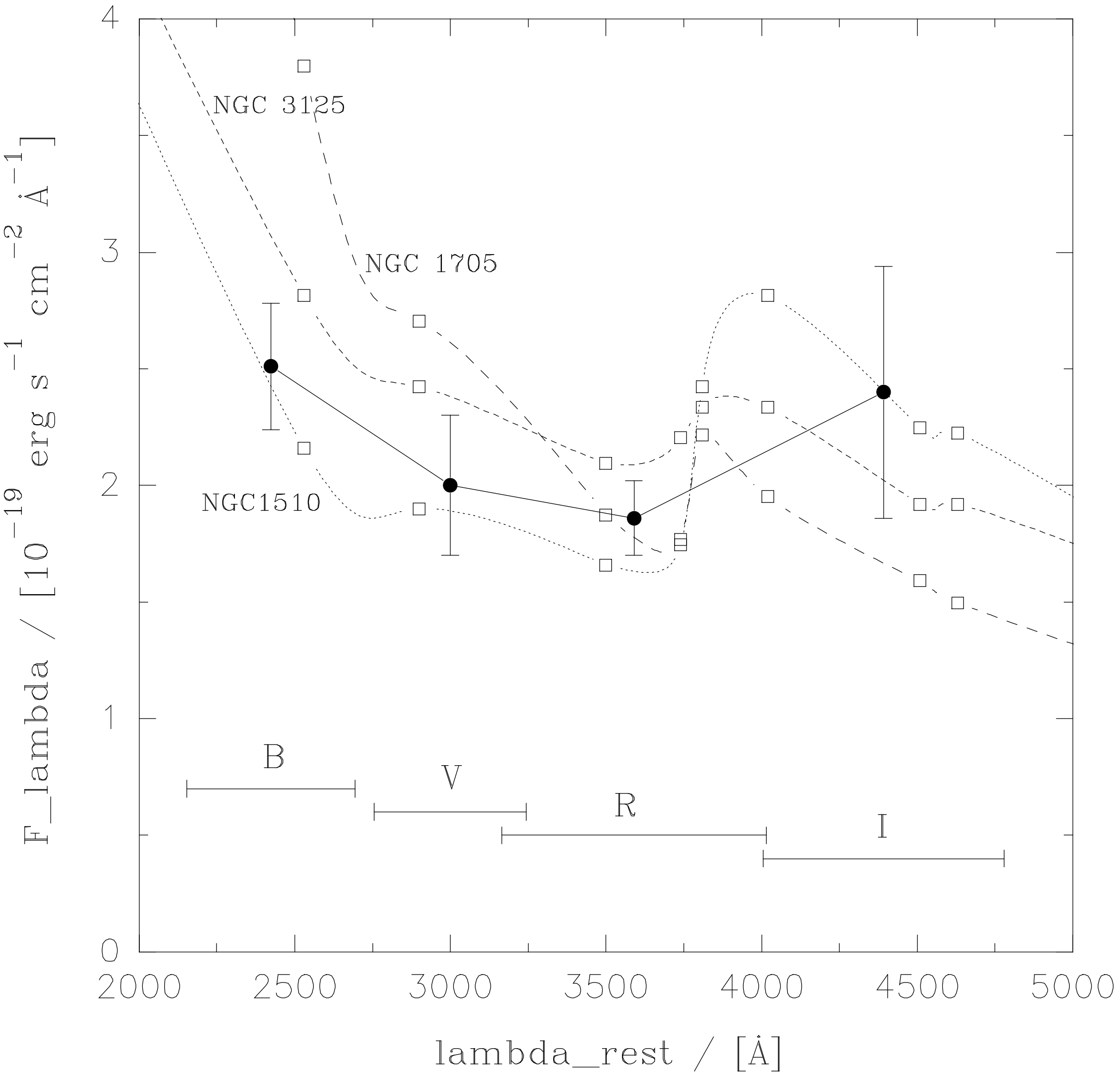


Рис. 4.5. Сравнение широкополосного BVR_cI_c-спектра родительской галактики GRB 970508 с непрерывным спектром F_λ некоторых голубых компактных карликовых галактик из атласа Kinney et al. (1993). Потоки, взятые из Таблицы 4.2 (вариант (2)), изображены в произвольной шкале для наилучшей подгонки спектров (аналогично тому, что сделано на Рис. 4.2). Фотометрические полосы B, V, R_c, I_c были сдвинуты в систему покоя родительской галактики (от $z = 0.835$ к $z = 0$) GRB 970508. Заполненные кружки с барами соответствуют наблюденным потокам галактики GRB 970508, а гладкие кривые, проведенные через открытые квадраты, соответствуют непрерывным спектрам локальных галактик-"стандартов".

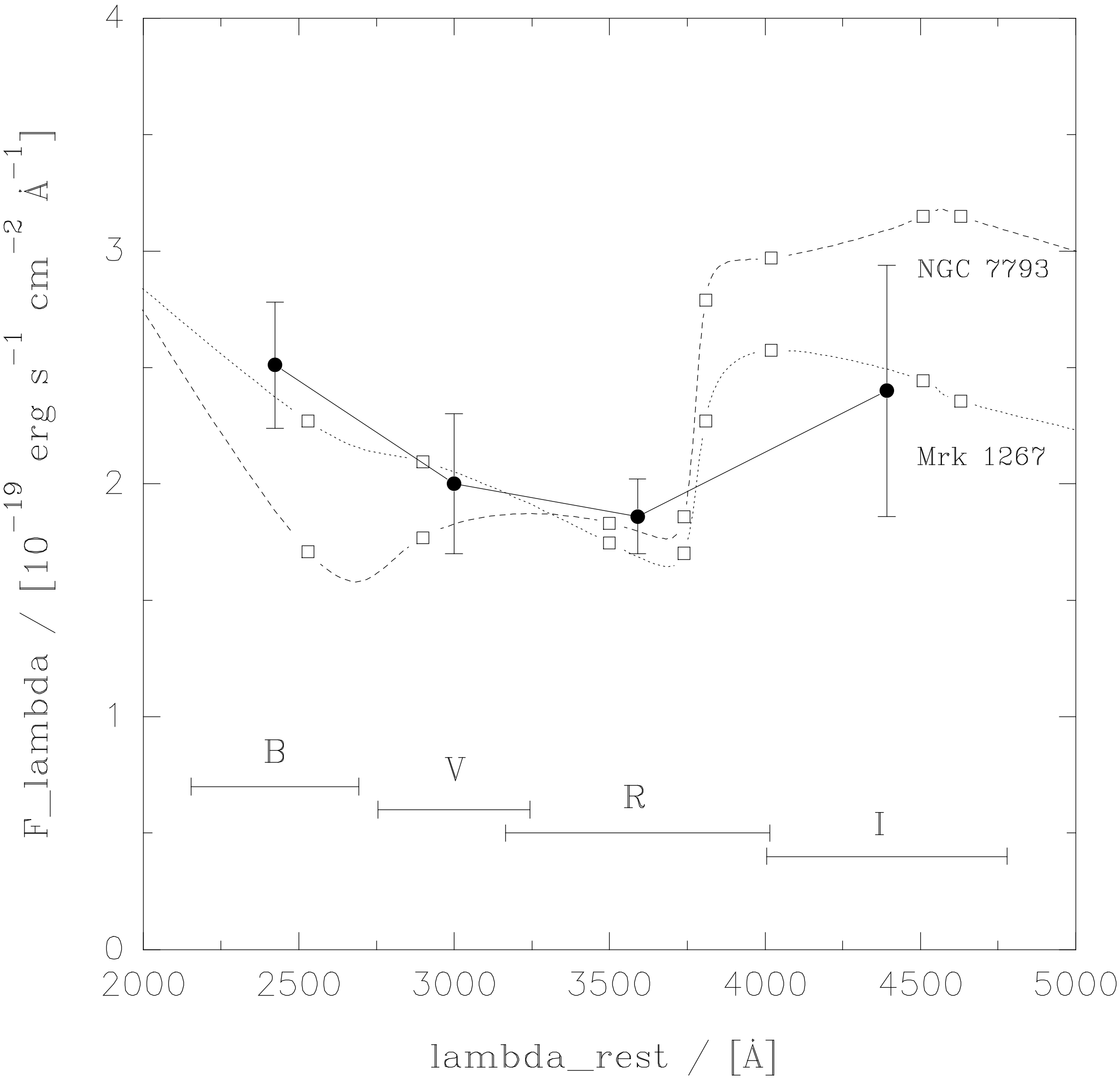


Рис. 4.6. Такое же, как и на Рис. 4.5, сравнение широкополосного спектра родительской галактики GRB 970508 с непрерывным спектром F_λ голубой компактной галактики Mrk 1267 и спектром Scd H II галактики NGC7793. Галактика NGC7793 со звездообразованием наиболее близка к родительской галактике GRB 970508 и по светимости.

4.6. Размеры родительской галактики GRB 970508 и ее центральная поверхностная яркость

Присутствие в спектре ОТ GRB 970508 характерных для областей звездообразования линий, таких как Mg II, Mg I и Fe II (Metzger et al. 1997a), наличие в спектре родительской галактики эмиссионной линии $\lambda = 3727$ Å [O II] (Metzger et al. 1997b, Bloom et al., 1998) и близость наблюдаемого распределения энергии в спектре галактики GRB 970508 к непрерывному спектру типичной Scd галактики побудили нас к тому, чтобы в общем исследовать вопрос о связи родительской галактики γ-всплеска со всем классом позднего типа спиральных и иррегулярных галактик. Первый шаг в таком исследовании состоит в том, что бы сравнить свойства родительской галактики со свойствами галактик в локальной Вселенной, которые хорошо изучены и могут служить некими "стандартами" при исследовании галактик на $z \sim 1$. Это и было сделано в предыдущем параграфе. Второй шаг в таком исследовании состоит в том, чтобы выяснить возможные отклонения в свойствах родительской галактики γ-всплеска от свойств популяции локальных галактик (нормальных, со вспышкой звездообразования, иррегулярных) вследствие эффектов ли эволюции, а может быть, просто эффекта селекции — ведь это γ-всплеск "выбирает" галактику. То есть мы хотели бы понять, насколько родительскую галактику γ-всплеска можно было считать пекулярной?

Исследования локальной функции светимости галактик типов Sd - Sm - Irr (см., например, Binggeli et al. 1988) указывает на то, что эти галактики формируют некоторый подкласс среди всех галактик с изломом (или "коленом") в функции светимости около $M_B \approx -18, -19$. Таким образом, оказывается, что светимость родительской галактики GRB 970508 приблизительно соответствует колену локальной функции светимости этих объектов $L^*_{\rm late}$. Хотя, как уже было сказано, в данном случае галактика и вообще все родительские галактики отбирались не по каким-либо оптическим признакам, а по присутствию в них источника γ-всплеска. Такая светимость нашей галактики ($M_B \approx -18, -19$) может объяснить, почему галактики большей светимости (overluminous) не доминируют среди уже найденных родительских галактик (см. ссылки в параграфе 4.1 на стр. 115) — это могут быть типичные Sd - Sm - Irr галактики с некоторой "средней" светимостью.

Для того, чтобы провести дальнейшее сравнение между родительской галактикой GRB 970508 и локальными галактиками, в частности, для того, чтобы использовать отношение "M_B vs. $\log D_{25}$" между абсолютной величиной галактики и ее линейными размерами, мы использовали базу данных/каталог LEDA (Lyon-Meudon Extragalactic database http://www-obs.univ-lyon1.fr/leda/), в котором приводятся имеющиеся на данный момент списки основных астрофизических параметров более чем 165 000 галактик. Эти данные собраны из опубликованных обзоров по галактикам и дополнены данными наблюдений для отдельных объектов. Параметры галактик были редуцированы в общую систему (de Vaucouleurs et al. 1991) и исправлены за инструментальную/наблюдательную неполноту (Paturel et al. 1997). Взятые из LEDA параметры галактик, используемых для сравнения их UV спектров на Рис. 4.5 и 4.6 с BVR_cI_c спектром галактики GRB 970508, показаны в Table 4.4.

Рисунок 4.7 показывает соотношения/диаграммы "M_B vs. $\log D_{25}$" для четырех подвыборок галактик из LEDA: Sbc-Sc, Scd-Sd, Sm и Irr типов. Для разных типов галактик имеется хорошо известная связь, приближенно следующая зависимости $M \approx 5 \log D +$ const, что ожидается от дисков различных диаметров с некоторой постоянной средней поверхностной яркостью. Абсолютные величины LEDA-галактик M_B и их линейные размеры D_{25} были вычислены из формул: $M_B = B_{\mathrm{T}} - 5 \cdot \log \frac{v}{H_0} - 25$, $D_{25} = \frac{\pi}{108} \frac{v}{H_0} \cdot 10^{\log d_{25}}$, где B_{T} — полная наблюдаемая B-величина галактики, $\log d_{25}$ — логарифм 25 B-mag/arcsec^2 изофотального диаметра в единицах 0.1 arcmin и v — лучевые скорости в km s^{-1}. Параметры взяты из каталога LEDA, при этом изофотальные диаметры были скорректированы с учетом наклона диска и галактического поглощения, а в лучевых скоростях учтено падение на Virgo.

Горизонтальными пунктирными линиями на Рис. 4.7 отмечена область допустимых значений M_B для родительской галактики GRB 970508, вычисленных в предыдущем параграфе для моделей A, B и C. Для того, чтобы вывести ограничения для линейного размера D_{25} (вертикальные пунктирные линии на Рис. 4.7), мы использовали результат, полученный Э. Фрухтером по наблюдениям на хаббловском телескопе (Fruchter et al. 1998): родительская галактика GRB 970508 может быть описана экспоненциальным диском с некоторым характерным масштабным параметром (scale length) r_0 около 0.07 *arcsec*.

Для модели диска с экспоненциальным распределением поверхностной яркости от центра галактики к ее периферии существует простое соотно-

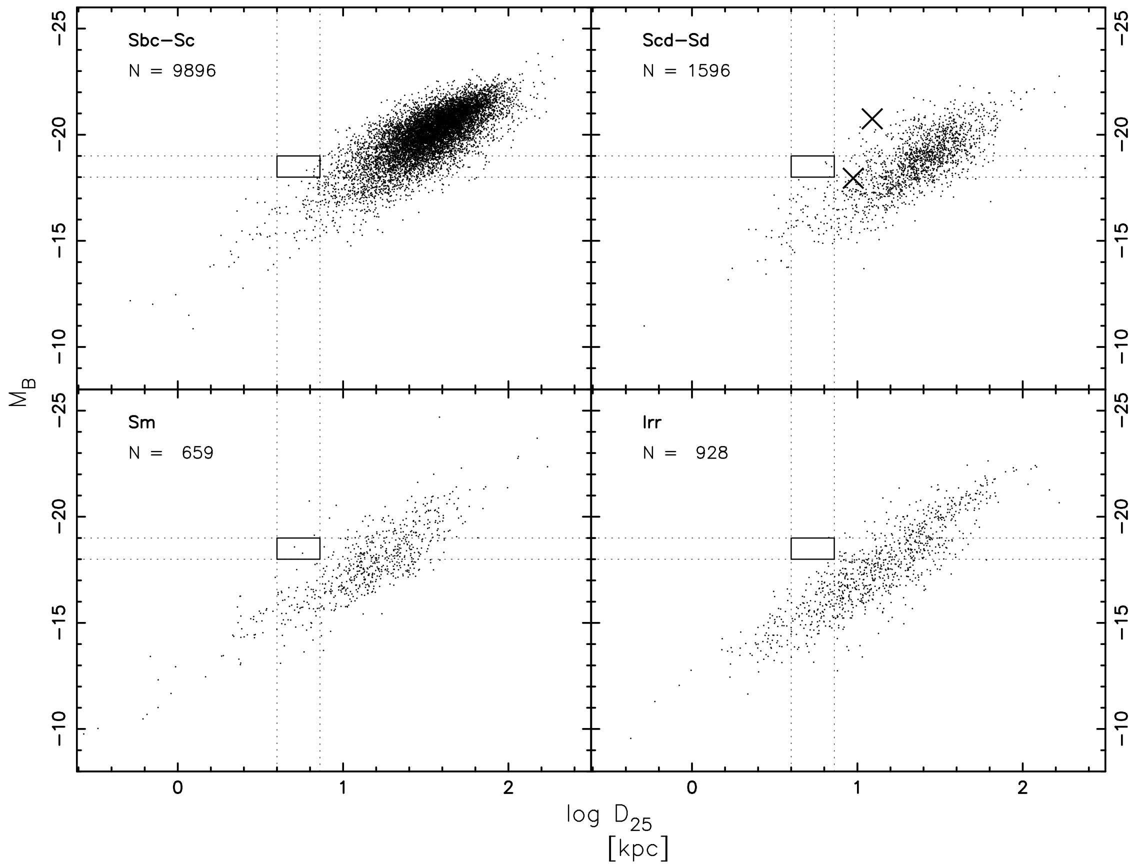


Рис. 4.7. Диаграммы "абсолютная величина M_B vs. линейный диаметр $\log D_{25}$" для галактик типов Sbc-Sc, Scd-Sd, Sm и Irr, выбранных из каталога LEDA. Пунктирными линиями и прямоугольниками ограничена область абсолютных величин и диаметров ($-19.0 < M_B < -18.0$ и 4 кпк $< D_{25} <$ 7 кпк), которую может занимать родительская галактика GRB 970508 на этих диаграммах. Косыми крестами обозначено положение двух галактик, пекулярной галактики Mrk 1267 и Scd галактики NGC 7793 из Table 4.4, наиболее близких к родительской галактике γ-всплеска GRB 970508 по своим светимостям и по распределениям энергии в их спектрах (см. Рис. 4.6).

шение
$$25 - \mu_0 = \frac{r_{25}}{r_0} 2.5 \log(e)$$

между центральной поверхностной яркостью μ_0, r_{25} (в $arcsec$) изофотальным угловым радиусом (соответствующим изофоте с яркостью 25^m с $arcsec^2$) и характерным размером r_0 (r_{25}/r_0) экспоненциального распределения яркости. Если для такого (модельного) экспоненциального диска выбрать в качестве наблюдаемой центральной поверхностной яркости величину $\mu_0 = 20.4$ mag/arcsec^2, то тогда отношение r_{25}/r_0 будет равно 4.24. Для характерного размера экспоненты $r_0 = 0.07$ (Fruchter et al. 1998) соответствующий угловой диаметр $2\,r_{25}$ оказывается равным ~ 0.6 $arcsec$. Для такого μ_0 (20.4 mag/arcsec^2) угловой размер родительской галактики GRB 970508, соответствующий изофоте с 25 mag/arcsec^2, находится в хорошем согласии с верхним пределом ~ 0.4 arcsec, следующим из наблюдательных оценок размеров этой галактики еще по первым HST/NICMOS наблюдениям (Pian at al. 1997). Для углового диаметра $2\,r_{25} = 0.6 arcsec$ линейный диаметр D_{25} должен находиться (из (4.2)) в пределах ~ 4 – 7 кпк для A, B, C космологических моделей и допустимая область значений D_{25} изображена вертикальными пунктирными линиями на Рис. 4.7.

Таким образом, родительская галактика γ-всплеска GRB 970508 оказывается в области голубых компактных галактик с повышенными центральными поверхностными яркостями. Другими словами, наша галактика может оказаться на той же линии Рис. 4.7 (Scd–Sd) $M_B \approx -5 \log D_{25} +$ const, где находится голубая компактная галактика Mrk 1267 с непрерывным спектром в UV, изображенным на Рис. 4.6. И этот спектр хорошо согласуется с BVR_cI_c-распределением потоков родительской галактики γ-всплеска. Еще раз к обсуждению высокого значения μ_0 мы вернемся в конце следующей главы.

4.7. Обсуждение результатов и основные выводы главы

Таким образом, самые последние наблюдения оптического компаньона γ-всплеска GRB 970508 позволили нам считать, что через 470 дней после всплеска наблюдаемые BVR_cI_c потоки могут быть уже отнесены только к родительской галактике γ-всплеска. Какой-либо вклад в потоки и в кривую блеска от переменного объекта связанного с γ-всплеском уже меньше, чем ошибки наблюдений. Это позволило вычислить собственные параметры родительской галактики GRB 970508 и сделать первый шаг в исследовании ее свойств, сравнивая их со свойствами уже изученных галактик в локальной Вселенной.

Но для больших $z \sim 1$, характерных для длинных γ-всплесков, и, в частности для $z = 0.835$ вычисление абсолютных величин и диаметров галактик для сравнения их со светимостями и размерами локальных галактик зависит от конкретного выбора космологической модели. Неопределенность в параметрах космологической модели может привести к неопределенности до одной звездной величины в M_B галактики и изменить ее диаметр на $\sim 50\%$. Используя данные своих наблюдений, мы вычислили K-поправки для галактики GRB 970508 и ближайшей к ней галактики поля G2, которые составили 0.6 и 2.1 соответственно, что увеличивает их светимости согласно (4.1) (отодвигая их от карликовых галактик). И относительное положение на небе, и $BVRI$-спектр, и светимость этой, самой близкой из трех (G1, G2, G3), галактики G2 в поле родительской галактики GRB 970508 позволяют считать, что именно ее протяженное газовое гало́, оказавшееся на луче зрения, и привело к возникновению еще одной системы абсорбций с $z = 0.767$ в спектре ОТ GRB 970508 11 мая 1997 г.

Еще до учета влияния других факторов (в частности, внутреннего поглощения) на светимость и спектр, можно уверенно сказать, что основные физические свойства родительской галактики GRB 970508 соответвуют галактике позднего типа. Но при $M_B \approx -18.0$, -19.0 (в зависимости от выбора космологической модели) эта галактика оказывается явно меньшей светимости, чем локальные галактики со светимостями, соответствующими колену ($M^*_{\rm gen} \approx -20.8$) в общей (шехтеровской) функции светимости галактик. Но это все-таки общее распределение по светимостям, куда входят все типы локальных галактик — от ранних эллиптических до самых поздних спиральных и иррегулярных галактик со звездообразованием. Тем не менее, как было показано Binggeli et al. (1988), функция светимости существенно зависит и от типа галактики, и от ее окружения (галактиками поля или галактиками в скоплении). В частности, для галактик Sd + Sm + Irr колено функции светимости соответствует $M^*_{\rm late} \approx -18$ и, следовательно, найденная родительская галактика GRB 970508 приблизительно соответствует средней светимости или колену локальной функции светимости $M^*_{\rm late}$ для галактик позднего типа. Она должна быть ближе по светимости к более ярким галактикам этого типа. В терминах классификации Binggeli (1994) родительская галактика принадлежит к его "Последовательности 3" и оказывается лежащей довольно далеко от границы между нормальными и карликовыми галактиками, традиционно соответствующей светимости около $M_B = -16$.

Но в любом случае спектральные распределения нормальных галактик типов более ранних, чем Sbc, надежно исключены для родительской галактики GRB 970508. Сравнение спектрального распределения родительской галактики с локальными галактиками со вспышкой звездообразования и с близкими к родительской галактике GRB 970508 светимостями показало, что наилучшее согласие распределений энергии в спектрах получается для H II Scd галактики NGC7793 и для голубой компактной галактики Mrk 1267. Положение родительской галактики на "M_B vs. $\log D_{25}$" диаграмме для локальных галактик позднего типа из каталога LEDA и анализ углового диаметра ее диска с использованием характерного радиуса экспоненты ≈ 0.07 *arcsec* из оценок Fruchter et al. (1998) приводит к довольно высокому значению центральной поверхностной яркости $\mu_0 \approx 20.4$ mag/arcsec^2 у этого объекта. Последнее, вместе с близостью распределения энергии в ультрафиолете для Mrk 1267, позволило нам заключить, что родительскую галактику γ-всплеска GRB 970508 можно отнести к классу голубых компактных галактик. (Тогда, в 1998 г. не исключалась возможная пекулярность GRB-галактик.) Но, пожалуй, самый надежный вывод 1998 г., который следовал из наблюдения в спектре абсорбционных линий Mg II, Mg I и Fe II, наличия эмиссионной линии [O II] в спектре "чистой" галактики, из ее цветов и из высокой центральной поверхностной яркости: все факты согласуются с процессами бурного (вспышечного) звездообразования, наблюдаемыми нами в родительской галактике γ-всплеска GRB 970508 при $z \sim 1$.

Таким образом, основные итоги этой главы состоят в следующем:

1. Наблюдения поля GRB 970508 на 6-метровом телескопе САО РАН в июле-августе 1998 г. показали, что оптический компаньон γ-всплеска не менял блеск уже с ноября 1997 г. Здесь приведены все данные о поведении BVR_cI_c-кривых блеска вплоть до 470 дня после даты наблюдения этого γ-всплеска. После $\simeq 200$ дня падение блеска ОТ согласно какому-либо степенному закону закончилось и вклад в наблюдаемые BVR_cI_c-потоки от оптического компаньена GRB 970508 уже дает только родительская галактика.

2. Полученное после этого времени распределение потоков BVR_cI_c (широкополосный спектр) родительской галактики без вклада ОТ был

сравнен с типичными непрерывными спектрами галактик разных хаббловских типов — спектральные распределения энергии в спектрах нормальных галактик более ранних, чем Sbc, исключаются как возможные для галактики GRB 970508.

3. Для $H_0 = 60$ км с$^{-1}$ Мпк$^{-1}$ и трех плоских Фридмановских моделей с параметрами плотности вещества и космологической постоянной $(\Omega_m, \Omega_\Lambda) = (1{,}0); (0{,}0); (0{,}1)$ получены абсолютные величины родительской галактики $M_{B_{rest}}$: -18.0 ± 0.3, -18.5 ± 0.3 и -19.0 ± 0.3 соответственно. Абсолютная B-величина ≈ -18.5 соответствует светимости $L_B \approx 0.1 L^*_{\rm gen}$, где $L^*_{\rm gen}$ — колено общей локальной (Шехтера) функции светимости. Тем не менее, отмечено, что светимость родительской галактики γ-всплеска приближенно соответствует локальной функции светимости $L_B \approx L^*_{\rm late}$ для галактик поздних типов Sd-Sm-Irr (Binggeli et al. 1988).

4. Сравнение BVR_cI_c-распределения энергии в спектре галактики GRB 970508, с ультрафиолетовыми спектрами близких по светимостям локальных галактик со вспышкой звездообразования соответствует наилучшим подгонкам (аппроксимациям) спектрами Scd H II галактики со звездообразованием NGC7793 ($M_B \approx -18$), и голубой компактной галактики Mrk 1267. Положение родительской галактики на диаграмме "M_B vs. $\log D_{25}$", для локальных галактик позднего типа из каталога LEDA позволяет отнести родительскую галактику GRB 970508 и к классу голубых компактных галактик.

5. Исследованы $BVRI$-спектры и светимости 3-х ближайших галактик в поле галактики GRB 970508: относительное положение, $BVRI$-спектр и светимость галактики G2 позволяют считать, что ее газовое гало́ на луче зрения привело к возникновению системы абсорбций с $z = 0.767$ в спектре OT GRB 970508.

Глава 5

Фотометрия и спектроскопия родительских галактик других гамма-всплесков

Из сказанного в Главе 4 до конца не ясно, насколько пекулярной может быть родительская галактика γ-всплеска GRB 970508, наверняка наблюдаемая в период бурного (вспышечного) звездообразования. Поэтому здесь будет предпринято исследование накопленной к 1999 г. фотометрической и спектроскопической выборки родительских галактик γ-всплесков. Здесь учтен еще один важный фактор — влияние на наблюдаемые спектр и светимость родительских галактик внутреннего поглощения пылью и газом в самой галактике.

В этой главе поставлены и решены следующие задачи:

1. Для родительских галактик γ-всплесков учтено влияние эффектов внутреннего поглощения на оценки темпа звездообразования, светимостей, масс и возрастов галактик.

2. Для оценок физических параметров этих галактик с бурным звездообразованием впервые для родительских галактик γ-всплесков применен метод численного моделирования распределений энергии в наблюдаемых спектрах, ультрафиолетовая часть которых определяется светом молодых массивных звезд.

3. Показано, что результаты фотометрических и спектральных наблюдений на 6-метровом телескопе подтверждают и уточняют связь γ-всплесков с массивным звездообразованием.

4. Сформулирован вывод, что по распределению энергии в спектрах родительские галактики не отличаются от нормальных (непекулярных) галактик с такими же величинами и красными смещениями.

5.1. Введение

К осени 2000 г. (ко 2-му совещанию по γ-всплескам в Риме) уже более чем в 20 случаях удавалось обнаружить оптическое послесвечение (переменный источник, ОТ) так называемых длинных γ-всплесков, а в 17 случаях были определены и координаты радиотранзиента (см. на сайте И. Грайнера: `http://www.aip.de/~jcg/grbgen.html`). Почти во всех случаях в пределах угловой секунды от положения транзиента удавалось найти и очень слабые галактики (Bloom et al. 2000a) с R величинами от $\approx$22 и до $\approx$28. И всегда, когда координаты ОТ и (особенно) радиоисточника определялись точно, оказывалось, что транзиенты (и оптические, и радио), как правило, проецируются именно на яркую компоненту изображения галактики. В частности, для родительской галактики GRB 970508 и ОТ, и радиотранзиент оказываются почти точно в ее центральной части с максимальной поверхностной яркостью.

В некоторых случаях родительские галактики были очень слабыми, почти на пределе обнаружения телескопа. Например, родительская галактика γ-всплеска GRB 000301C оказалась слабее $V \approx 28.5$ (Fruchter et al. 2000, тогда не было полной уверенности, что обнаружена именно родительская галактика, см. также Fruchter and Vreeswijk 2001). К концу 2000 г. было уже определено 14 красных смещений, значения которых находились в пределах от $z = 0.4$ до $z = 4.5$ (Castro-Tirado 2001a). В Табл. 5.1 представлены некоторые итоги (к осени 2000 г.) по наблюдательным данным, относящимся к родительским галактикам γ-всплесков. Указаны даты наблюдений, фильтры и телескопы, на которых получена фотометрия. В самой правой колонке "spectrum" приведена информация о виде спектра, по которому было определено z и ссылки: "emission host" соответствует эмиссионному спектру одной только родительской галактики, "emission host + OT" — спектр галактики с вкладом ОТ в континуум, "absorption host +OT" — абсорбционный спектр галактики с континуумом ОТ. Наблюдаемые звездные величины всех галактик исправлены за галактическое поглощение в направлении объекта. В Табл. 5.2 приводятся соответствующие величины покраснения галактик в каждой из фотометрических полос, цитируемых в Табл. 5.1. На Рис. 5.1 представлена хаббловская диаграмма "R-величина vs. z" по этим данным для 14 родительских галактик.

В результате накопления данных по астрономии γ-всплесков росло подозрение (или все больше укреплялась уверенность), что явление γ-всплеска возникает во время коллапса массивных звезд. Общие соображения на этот

Таблица 5.1. Фотометрия 14 родительских (host) галактик с известными z

Host	Date UT	Band	Dereddened magnitude	spectrum
GRB 970228	01.35 Sep. 1998	B (VLT-UT1)	> 25.11	emission host (z=0.6950±0.0003)
	04.71 Sep. 1997	V (HST/STIS)	25.04 ± 0.20	(Bloom et al. 2000)
	04.71 Sep.	R_c (HST/STIS)	24.68 ± 0.20	
	04.71 Sep.	I_c (HST/STIS)	24.38 ± 0.20	
GRB 971214	24.85 Jul. 1998	V (BTA)	25.38 ± 0.3	emission host+OT (z=3.418±0.010)
	24.84 Jul.	R_c (BTA)	25.65 ± 0.3	(Kulkarni et al. 1998)
GRB 970508	21.74 Aug. 1998	B (BTA)	25.77 ± 0.19	emission host+OT (z=0.8349pm0.0003)
	23.95 Jul. 1998	V (BTA)	25.25 ± 0.22	emission host
	21.74 Aug.	R_c (BTA)	24.99 ± 0.17	(Metzger et al. 1997,
	23.95 Jul.	I_c (BTA)	24.07 ± 0.25	Bloom et al. 1998b)
GRB 980613	24.80 Jul. 1998	B (BTA)	24.77 ± 0.25	emission host+OT (z=1.0964±0.0003)
	24.82 Jul.	V (BTA)	23.94 ± 0.21	(Djorgovski et al. GCN #189)
	23.00 Jul.	R_c (BTA)	23.58 ± 0.1	
GRB 980703	24.05 Jul. 1998	B (BTA)	23.15 ± 0.12	emission host+OT (z=0.9662±0.0002)
	24.06 Jul.	V (BTA)	22.66 ± 0.10	emission host
	24.06 Jul.	R_c (BTA)	22.30 ± 0.08	(Djorgovski et al. 1998)
	24.07 Jul.	I_c (BTA)	22.17 ± 0.18	
GRB 990123	8.85 Jul. 1999	B (BTA)	24.90 ± 0.16	absorption host+OT (z=1.6)
	8.86 Jul.	V (BTA)	24.47 ± 0.13	(Kelson et al. 1999;
	8.84 Jul.	R_c (BTA)	24.47 ± 0.14	Hjorth et al. 1999)
	8.87 Jul.	I_c (BTA)	24.06 ± 0.3	
GRB 990510	29 Apr. 2000	V (HST/STIS)	27.8 ± 0.5	absorbtion host+OT (z=1.6187±0.0015) (Vreeswijk et al. 2000b)
GRB 990712	29 Aug. 1999	V (HST/STIS)	22.40 ± 0.04	emission host+OT (z=0.4337±0.0004)
	29 Aug. 1999	R (HST/STIS)	21.72 ± 0.06	(Hjorth et al. 2000; Vreesvijk et al 2000)
GRB 991208	31.90 March 2000	B (BTA)	25.18 ± 0.16	emission host+OT
	31.84 March	V (BTA)	24.63 ± 0.16	(z=0.7063±0.0017)
	31.96 March	R_c (BTA)	24.36 ± 0.15	(Dodonov et al. 1999, GCN #475)
	31.87 March	I_c (BTA)	23.70 ± 0.28	
	04.21 April	I_c (NOT)	23.28 ± 0.20	
GRB 991216	17.6 Apr. 2000	R (HST/STIS)	25.4 ± 0.2	absorption host+OT (z=1.02) (Vreeswijk et al. 1999, GCN #496)
GRB 000131	5.03 March 2000	R (VLT)	> 25.6	absorption host+OT (z=4.500±0.015)
	5.02 March	I (VLT)	> 24.7	(Andersen et al. 2000)
GRB 000301C	19 April 2000	V (HST/STIS)	> 28.3	absorpsion host+OT (z=2.0335±0.0003)
	19 April	R (HST/STIS)	> 27.8	(Smette et al. 2000, GCN #603; S. M. Castro et al. 2000, GCN #605)
GRB 000418	4.17 June 2000	R (HST/STIS)	23.8 ± 0.2	emission host+OT (z=1.11854±0.0007) (Bloom et al. 2000, GCN #661)
GRB 000926	27 October 2000	R (NOT/ALFOSC)	23.8 ± 0.2	absorption host+OT (z=2.066) (Fynbo et al. 2000, GCN #807)

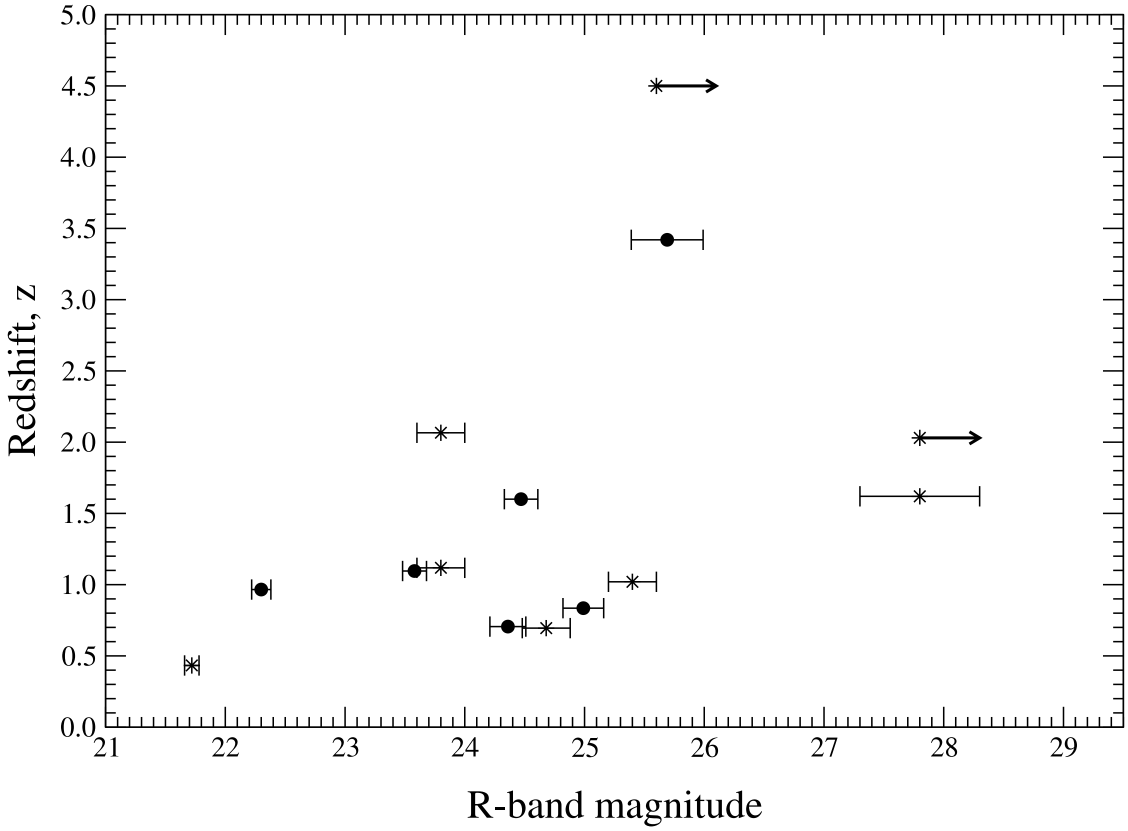


Рис. 5.1. Наблюдаемые R величины галактик и их красные смещения, известные к октябрю 2000 г. (Все зв. величины в полосе R исправлены за галактическое поглощение.) Значения R величин из Табл. 5.3 (полученные на БТА) обозначены заполненными кружками. Звезды соответствуют результатам фотометрии других авторов (см. также Табл. 5.3): Galama et al. (2000) для родительской галактики GRB 970228; Fruchter et al. (1999a); Bloom (1999) для родительской галактики GRB 990510; Hjorth et al. (2000) для галактики GRB 990712; Vreeswijk et al. (2000a) для галактики GRB 991216; Andersen et al. (2000) для оценки верхнего предела на блеск самой далекой родительской галактики GRB 000131 с $z = 4.500$; Fruchter et al. (2000) для верхнего предела блеска самой слабой из родительских галактики GRB 000301C с $R > 27.8$ и $z = 2.0335$; Metzger et al. (2000) для родительской галактики GRB 000418; Fynbo et al. (2000b) для галактики GRB 000926. В случае родительской галактики всплеска GRB 990510 были доложены результаты измерений блеска в V-полосе (Bloom 1999), но используя показатель цвета $(V - R) = 0.0$ галактики GRB 990123 с тем же z (см. Табл. 5.1) и фактически воспользовавшись близостью распределений энергии родительских галактик, мы перешли от V к R величине. Верхний предел для блеска галактики GRB 000301C — величина оптического транзиента, найденного Fruchter et al. (2000) 19 апреля 2000 г. (см. также Fruchter and Vreeswijk 2001).

счет были высказаны в это время разными авторами: см. Paczyński (1999), MacFadyen & Woosley (1999) и ссылки в этих публикациях. Все родительские галактики длинных γ-всплесков оказались довольно голубыми объектами, похожими по цветам на галактику GRB 970508 (см. Гл. 4, Sokolov et al. 1999, Fruchter et al. 2001), как и ожидается, если всплески действительно связаны со звездообразованием. Как уже было сказано выше, положения ОТ и радиотранзиентов, соответствующих длинным γ-всплескам, корелируют с яркими областями галактик (Bloom et al. 2000a), что плохо согласуется со сценариями, в которых γ-всплески возникают из-за слияния нейтронных звезд в ТДС — существовавшая ранее (и очень популярная до 1999 г.) теория возникновения γ-всплесков (Lattimer & Schramm 1974, Paczyński 1986). К тому же, опубликованные к этому времени результаты наблюдений спектров рентгеновских транзиентов γ-всплесков обнаружили наличие в них линий железа, как в поглощении (Amati et al. 2000), так и в эмиссии (Piro et al. 2000), в связи с чем были высказаны соображения, что γ-всплески непосредственно должны быть связаны с эволюцией и взрывом массивной звезды как сверхновой. Т. о., если в предыдущей главе вывод о звездообразовании был сделан, в основном, по фотометрическим данным для одной галактики, то сейчас мы будем говорить уже об астрономии γ-всплесков и об усилении этого вывода на основе исследования целого набора данных по таким объектам.

Сейчас очевидно, что изучение свойств родительских галактик γ- всплесков помогает нашему пониманию и природы их звездных прародителей, и пониманию того, когда и какой амплитуды эффекты для транзиентов можно ожидать в оптике и в других диапазонах. Ведь если γ-всплески действительно ассоциируются с активным звездообразованием в галактиках, то мы должны учитывать то, что излучение (звезд) этих галактик и излучение ОТ должны существенно поглощаться внутри них самих, т. е. в областях звездообразования из-за наличия в них пыли и газа. Действительно, чтобы объяснить отношение бальмеровских линий в спектрах родительской галактики GRB 980703 (Djorgovski et al. 1998) и GRB 990712 (Vreeswijk et al. 2000b) требуется учет значительного поглощения. Обратим внимание на тот факт, что в случае галактики GRB 990712 внутреннее поглощение оценивается в $A_{\rm V} = 3.4^{+2.4}_{-1.7}$ зв. величины (Vreeswijk et al. 2000b). Анализ показателей цвета оптического послесвечения (или ОТ) для случаев ОТ GRB 980703 и ОТ GRB 000418 тоже показывает, что поглощение на луче зрения внутри родительской галактики действительно может быть большим (Castro-Tirado et al. 1999, Klose et al. 2000 и ссылки там). Таким образом, очень существенно учитывать влияние внутреннего поглощения при интерпретации наблюдений по ОТ, а также для оценок такого важного параметра галактики, как средний темп звездообразования в ней (star formation rate/SFR). (От среднего SFR к установлению связи "γ-всплески/массивное звездообразование" и, т.о., к установлению связи "GRB/SN" — см. Таблицу-схему 1.1.) С учетом внутреннего поглощения можно точнее оценить темпы массивного звездообразования и сравнить их затем с темпами звездообразования в других галактиках. Это поможет ответить на главные вопросы (той же Таблицы-схемы 1.1): насколько родительские галактики γ-всплесков отличаются от таких же галактик, на таких же z, и какова же на самом деле частота всплесков в среднем на галактику ?

Конкретно в этой главе одной из целей было определение эффектов влияния внутреннего поглощения на такие ее параметры, как светимость и SFR — средний темп звездообразования. Мы используем наши собственные фотометрические наблюдательные данные (и спектры) по родительским галактикам, полученные на 6-метровом телескопе САО РАН в течение периода времени 1998–2000 гг., и другие доступные (в 2000 г.) данные (Bloom et al. 1998b, Djorgovski et al. 1998). Здесь нами применен популяционный синтез (моделирование распределений энергии в спектрах, SED-ов) для двух родительских галактик GRB 970508 и GRB 980703. При этом были использованы наши наблюдательные данные по $BVR_{\rm c}I_{\rm c}$-фотометрии и опубликованные данные инфракрасных наблюдений (NIR) Pian et al. (1998) и Bloom et al. (1998a), чтобы создать сетку теоретических шаблонных спектров (SED-ов) для более точной оценки (среднего) покраснения в родительских галактиках.

В разделе 5.2 мы сравнили широкополосные $BVR_{\rm c}I_{\rm c}$ спектры (или распределения BVR_cI_c потоков) с непрерывными спектрами родительских галактик GRB 970508 (Bloom et al. 1998b) и GRB 980703 (Djorgovski et al. 1998). Сравнение широкополосной фотометрии со спектроскопией показало (для двух галактик: самая слабая и самая яркая), насколько информативным является такой метод сбора информации (см. Табл. 5.1) для этих галактик с относительно гладкими спектрами при $z \sim 1$. Получить хороший спектр таких слабых объектов оказалось гораздо тяжелее (а иногда и просто невозможно при $R > 26$), чем точно измерить потоки в 4-х полосах.

Используя сравнение наших $BVR_{\rm c}I_{\rm c}$ данных с шаблонными SED-ами локальных галактик со звездообразованием с различными значениями внутреннего поглощения, мы грубо оценили среднее внутреннее поглощение в родительских галактиках (в некотором *первом приближении*). В отличие от того, что было в предыдущей главе, здесь мы уверенно сравниваем распределение цветов родительских галактик с распределениями энергии в спектрах локальных галактик уже только одного, определенного типа — галактик со вспышкой звездообразования. Результаты приведены в 5.4. Такое сравнение позволяет нам и более корректно (чем в предыдущей главе) определить K-поправки для выборки родительских галактик. В частности, были использованы шаблонные распределения энергии в спектрах (SED-ы локальных галактик со звездообразованием) для вычисления K-поправки, чтобы определить затем и абсолютные величины родительских галактик разными методами.

В разделе 5.5 описаны основные моменты теоретического моделирования спектров галактик со вспышкой звездообразования. Это моделирование позволяет нам (во *втором приближении*) сделать более точные оценки среднего внутреннего поглощения, используя определение поглощения в первом приближении из раздела 5.3. Результаты сравнения теоретических шаблонов (спектров) с наблюдаемыми распределениями BVR_cI_c потоков и инфракрасными потоками родительских галактик GRB 970508 и GRB 980703 (с существенно различными светимостями) были использованы для оценок некоторых эффектов внутреннего поглощения в родительских галактиках γ-всплесков. Таким образом, для родительской галактики GRB 970508 мы здесь имеем всестороннее исследование, учитывающее все известные данные наблюдений (по цветам, спектрам и морфологии галактики). В разделе 5.6 были сделаны оценки средних SFR для родительской галактики GRB 991208 с использованием разных методов, в том числе и по эмиссионному спектру, полученному на БТА. Окончательное обсуждение всех результатов по галактикам дано в разделе 5.7 и их краткая формулировка в разделе 5.8. Здесь обсуждены все предыдущие выводы о связи γ-всплесков с массивным звездообразованием в родительских галактиках и сформулирован вывод о неизбежности сценариев с массивным звездообразованием для решения проблемы прародителей γ-всплесков.

5.2. Сравнение BVR_cI_c-фотометрии и спектров родительских галактик

Наблюдения родительских галактик γ-всплесков были проведены в июле-августе 1998, июле 1999 и в марте 2000 гг. Журнал наблюдений приводится в Табл. 5.3. Был использован CCD/ПЗС фотометр, установленный

Таблица 5.2. Межзвездное поглощение в направлении родительских галактик

Host	A_B	A_V	A_R	A_I
GRB 970228	0.97	0.73	0.54	0.35
GRB 970508	0.12	0.09	0.07	0.04
GRB 971214	0.07	0.05	0.04	0.02
GRB 980613	0.36	0.28	0.22	0.13
GRB 980703	0.25	0.19	0.14	0.09
GRB 990123	0.07	0.05	0.04	0.02
GRB 990510		0.7		
GRB 990712		0.11	0.08	
GRB 991208	0.07	0.05	0.04	0.02
GRB 991216			1.48	
GRB 000131		0.13	0.08	
GRB 000301C		0.16	0.12	
GRB 000418			0.09	
GRB 000926			0.06	

в первичном фокусе 6-метрового телескопа САО РАН. Всюду использовалась стандартная (Johnson-Kron-Cousins) фотометрическая BVR_cI_c система. Фотометрические калибровки были выполнены по стандартным звездам каталога Ландольта (Landolt 1992). Все данные были обработаны стандартным образом (подробно описанным в предыдущих главах). Фотометрия родительских галактик проводилась в круглой апертуре одного и того же размера во всех полосах. Выбор апертуры (2–3") определялся в зависимости от качества изображения (seeing) и угловых размеров каждой галактики. Для первичной обработки данных и для фотометрии был использован пакет ESO-MIDAS[1] . В таблице 5.3 показаны результаты нашей фотометрии для родительских галактик с измерениями потоков в более чем двух фильтрах. Для трансформирования звездных величин (они указаны в Табл. 5.1) в спектральные плотности потоков в каждом фильтре мы использовали соответствующие нуль-пункты из Fukugita et al. (1995). Все плотности потоков в Табл. 5.3 исправлены за галактическое поглощение. Во всех случаях в Табл. 5.3 мы используем только те результаты своих фотометрических BVR_cI_c наблюдений, для которых вклад переменного оптического источника (OT) в непрерывный спектр галактики считается достаточно малым, чтобы можно было им пренебречь.

Спектроскопия родительских галактик из известного тогда списка (в Табл. 5.1) проводилась, когда еще был довольно значительным вклад OT в их потоки (см. колонку “spectrum"). В некоторых случаях (как, напри-

[1]MIDAS (Munich Image Data Analysis System) — распространяется и поддерживается ESO http://www.eso.org/progects/esomidas/

Таблица 5.3. Фотометрические BVR_cI_c наблюдения 6-ти родительских галактик γ-всплесков.

Host	Date UT	Band	Exp. (s)	Seeing	flux density, μJy
GRB 971214	24.85 Jul. 1998	V	600	$1''.2$	$0.25^{+0.08}_{-0.06}$
	24.84 Jul.	R_c	600	$1''.2$	$0.17^{+0.05}_{-0.04}$
GRB 970508	21.74 Aug. 1998	B	4200	$1''.3$	$0.20^{+0.04}_{-0.03}$
	23.95 Jul. 1998	V	2000	$1''.3$	$0.28^{+0.07}_{-0.05}$
	21.74 Aug.	R_c	3000	$1''.3$	$0.30^{+0.05}_{-0.04}$
	23.95 Jul.	I_c	2000	$1''.3$	$0.56^{+0.15}_{-0.11}$
GRB 980613	24.80 Jul. 1998	B	700	$1''.3$	$0.50^{+0.13}_{-0.10}$
	24.82 Jul.	V	600	$1''.3$	$0.95^{+0.20}_{-0.17}$
	23.00 Jul.	R_c	1800	$1''.5$	$1.12^{+0.11}_{-0.10}$
GRB 980703	24.05 Jul. 1998	B	480	$1''.3$	$2.19^{+0.25}_{-0.23}$
	24.06 Jul.	V	320	$1''.2$	$3.09^{+0.30}_{-0.27}$
	24.06 Jul.	R_c	300	$1''.2$	$3.63^{+0.26}_{-0.24}$
	24.07 Jul.	I_c	360	$1''.2$	$3.31^{+0.58}_{-0.49}$
GRB 990123	8.85 Jul. 1999	B	600	$1''.5$	$0.44^{+0.06}_{-0.06}$
	8.86 Jul.	V	600	$1''.3$	$0.59^{+0.07}_{-0.07}$
	8.84 Jul.	R_c	600	$1''.1$	$0.48^{+0.07}_{-0.06}$
	8.87 Jul.	I_c	600	$1''.3$	$0.56^{+0.18}_{-0.13}$
GRB 991208	31.90 March 2000	B	1795	$3''.0$	$0.32^{+0.05}_{-0.04}$
	31.84 March	V	1490	$2''.1$	$0.48^{+0.08}_{-0.07}$
	31.96 March	R_c	1260	$2''.1$	$0.52^{+0.08}_{-0.07}$
	31.87 March	I_c	360	$2''.6$	$0.77^{+0.23}_{-0.18}$
	04.21 April*	I_c	3800	$1''.2$	$1.17^{+0.24}_{-0.20}$

* The observations were obtained with the 2.5-m NOT (Castro-Tirado et al. 2001b)

мер, для GRB 990123) тогда был получен только абсорбционный спектр, по которому измерялось z. Для чисто эмиссионного спектра галактики существует область красных смещений, в которой нет характерных сильных линий [O II] 3727Å, [O III] 4959,5007Å и Бальмеровских линий, по которым z и определяется. В этом случае из абсорбционного спектра мы получаем (строго говоря) лишь нижний предел для красного смещения и это вносит дополнительную неопределенность в оценку параметров родительской галактики. Важным параметром, который будет использован в дальнейшем, является светимость в линии, если она обнаруживается в эмиссионном спектре галактики. Когда же такая линия/линии есть в спектре, возможно, что вклад ОТ в континуум может изменить потоки (или эквивалентные ширины) эмиссий в случае, если ОТ еще достаточно яркий. Тем не менее, в Табл. 5.1 есть два случая (достаточно) чистых галактических спектров: GRB 970508 (Bloom et al. 1998b) и GRB 980703 (Djorgovski et al. 1998), которые позволили нам предпринять теоретическое моделирование распределения энергии в непрерывном спектре (SED-ов) этих галактик, воспользовавшись их спектрами и нашей $BVR_{c}I_{c}$ фотометрией (в разделе 5.5). На примере этих двух спектров мы покажем, что $BVR_{c}I_{c}$ широкополосный "спектр" (или распределение потоков) хорошо представляет непрерывные спектры родительских галактик γ-всплесков (без достаточно широких эмиссий в UV этих обыкновенных галактик со звездообразованием). Более того, при отсутствии спектров галактик (чистых, без вклада ОТ) $BVR_{c}I_{c}$ фотометрия остается единственным инструментом классификации/изучения SED-ов этих слабых объектов и сравнения их с SED-ами соседних галактик при больших z.

Как можно видеть из сравнения результатов нашей широкополосной $BVR_{c}I_{c}$ фотометрии со спектрофотометрией этих двух галактик — слабой GRB 970508 и самой яркой GRB 980703 (см. Рис. 5.2 и Рис. 5.3), наши фотометрические точки находятся в отличном согласии с непрерывными спектрами родительских галактик. Очевидно, что ошибки $BVR_{c}I_{c}$ фотометрии могут быть (и есть) значительно меньше, чем ошибки представления/проведения непрерывного спектра по шумовой дорожке в спектрах. По крайней мере это, сразу видно для такого слабого объекта, как галактика GRB 970508, которая имеет типичную для родительских галактик наблюдаемую звездную величину. Фактически на Рис. 5.2 мы имеем истинное положение точек некоего "континуума" в спектре этого (слабого) объекта для эффективных длин волн каждого из фильтров. Таким образом, мы можем считать, что наши широкополосные спектры (или распределения потоков)

$BVR_{c}I_{c}$ аппроксимируют распределения энергии в спектрах (SED-ы галактик) достаточно хорошо. По крайней мере, это справедливо в тех случаях, когда в спектре этих галактик наверняка не должно быть широких эмиссионных деталей. А это как раз и выполняется в случае чистых спектров (в UV-диапазоне в системе покоя) родительских галактик γ-всплесков — слабой GRB 970508 ($z = 0.835$) и яркой GRB 980703 ($z = 0.966$).

Кроме того, Рис. 5.3 (верхняя и нижняя панели) показывают эволюцию со временем вклада OT в красной области спектра галактики GRB 980703. Как мы можем видеть из спектра, полученного Djorgovski et al. (1998) для *двух эпох: 07 Июль 1998 UT и 19 Июль 1998 UT,* центральные интенсивности Бальмеровских линий Hγ и Hδ остаются близкими к константе во время этих наблюдений. Такой эффект мог бы возникнуть, если бы транзиент (OT) находился в H II области (или был бы виден сквозь такую область), которая поглощает континуум транзиента *на луче зрения* и на частотах бальмеровских линий, куда "попадают" и постоянные бальмеровские эмиссии всей галактики. Это могло быть аргументом в пользу прямой связи между γ-всплесками и областями звездообразования в галактиках, где массивные O и B звезды ионизуют межзвездную среду. Ассоциация с H II областями предполагает, что длинные γ-всплески могут быть тесно связаны именно с массивным звездообразованием в галактиках и, соответственно, со взрывами сверхновых, которые начинаются с коллапса массивных ядер звезд, как, например, сверхновые типа Ib (Bartunov et al. 1994).

Таким образом, сравнение фотометрии и спектрофотометрии показывает, что широкополосная BVR_cI_c фотометрия остается полезным инструментом изучения и классификации родительских галактик γ-всплесков, особенно учитывая то, что невозможно получить спектр для каждой такой галактики (см. Табл. 5.1). Действительно, как выяснилось при накоплении информации по родительским галактикам, спектроскопия протяженных объектов 25-26 величины и слабее, является нетривиальной задачей даже для телескопов класса 8-10 м. (Одна из причин — рост фона неба, который начинает доминировать в спектре при длинных экспозициях, необходимых для достижения хорошего уровня отношения S/N.)

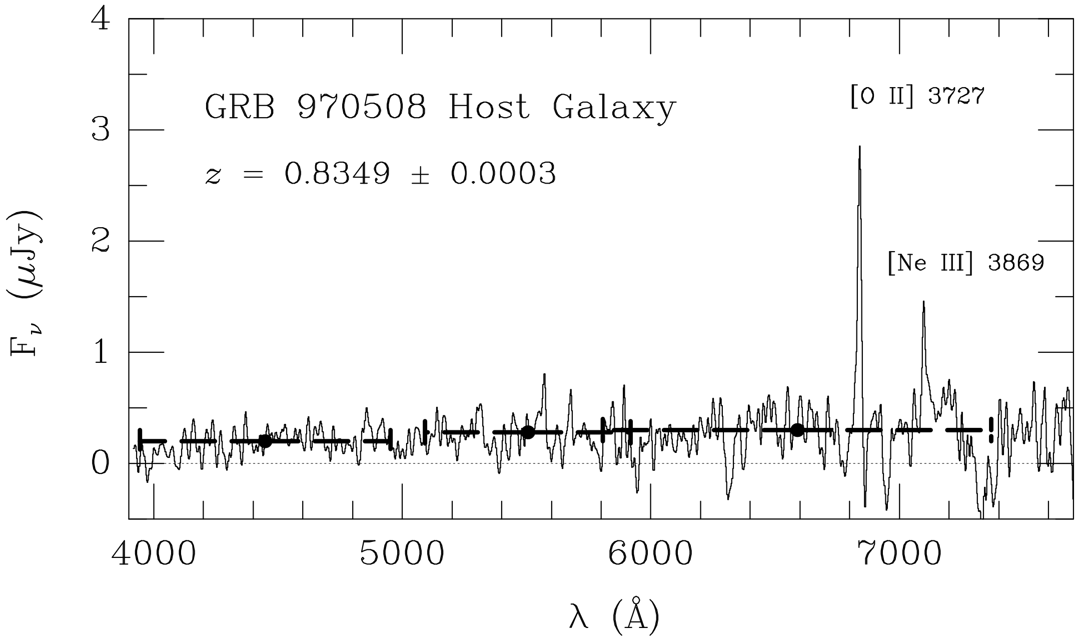


Рис. 5.2. Сравнение BVR_c фотометрии родительской галактики GRB 970508 со спектром, полученным Bloom et al. (1998b). Полуширины каждой из фотометрических полос указаны горизонтальными прерывистыми линиями с барами. Размеры фотометрических точек для каждой эффективной длины волны фильтра, соответствуют ошибкам измерения BVR_c потоков.

5.3. Распределения энергии в спектрах локальных галактик со вспышкой звездообразования и сравнение с BVR_cI_c спектрами родительских галактик, оценки абсолютных величин

Как уже было сказано во Введении (раздел 5.1), основной целью здесь является определение таких параметров, как светимости и величины внутреннего поглощения для выборки родительских галактик γ-всплесков из Табл. 5.1. Для того, чтобы оценить поглощение (reddening) в этих галактиках *в первом приближении*, мы использовали спектры локальных галактик со вспышкой звездообразования и с известными для них значениями избытков цвета (colour excess) $E(B-V)$. Сравнение нашей фотометрии с такими "шаблонными" распределениями энергии в непрерывных спектрах (с SED-ами) этих галактик позволит нам корректно определить K-поправку и светимости родительских галактик. Разумеется, мы и здесь сначала (как для галактики GRB 970508 и для галактик в ее поле, см. в гл. 4) сравнили нашу широкополосную BVR_cI_c фотометрию (или $BVRI$-спектры) со

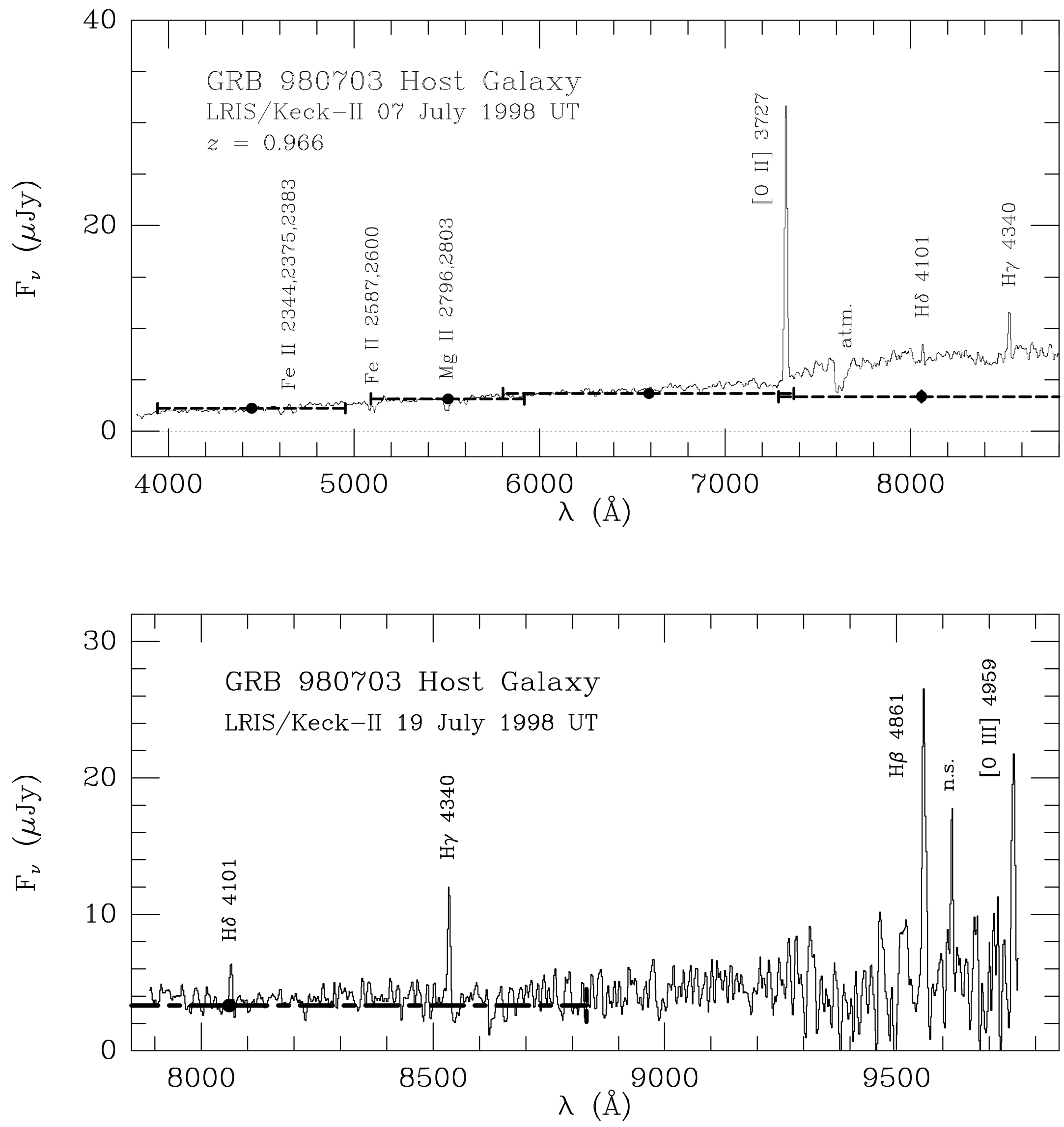


Рис. 5.3. Сравнение BVR_cI_c фотометрии со спектрофотометрией Djorgovski et al. (1998) галактики GRB 980703. Размеры фотометрических точек соответствуют ошибкам измерения BVR_cI_c потоков. Горизонтальными линиями показаны полуширины фильтров. Спектры получены для двух эпох. 7 Июля 1998 UT (верхняя панель), когда был еще заметен вклад OT в красной области (R и I фильтры), и 19 Июля (нижняя панель) получена красная часть спектра уже без вклада OT. Наша BVR_cI_c follow-up фотометрия, подтверждающая, что вклада OT в I полосе действительно нет, была получена еще позже — 24 Июля 1998 UT.

средними спектрами галактик различных Хаббловских типов от E-S0 до Im (см. Рис. 1.3 в Гл. 1; Sokolov et al. 1999, 2000) и снова убедились в том, что наши данные хорошо согласуются со средними спектрами голубых галактик поздних хаббловских типов с активным звездообразованием (starburst galaxies). *По определению* такими галактиками считаются галактики с сильным UV континуумом (что делает их голубыми по наблюдаемым показателям цвета) и это галактики с сильными небулярными эмиссионными линиями, ассоциируемыми со звездообразовательной активностью или со вспышкой звездообразования в галактике. То есть это галактики со вспышкой (массивного) звездообразования, переживающие стадию формирования (эволюции и коллапса) массивных звезд. Последнее может быть прямо связано с γ-всплесками и с их массивными прародителями.

Для сравнения с нашими широкополосными $BVRI$ спектрами мы воспользовались некоторыми усредненными SED-ами (распределениями энергии в спектрах) спектральных групп S1, S2, S3, S4, S5, S6 локальных галактик со вспышкой звездообразования из Calzetti et al. (1994). Спектры локальных галактик со вспышкой звездообразования в этом наборе были сгруппированы согласно увеличивающейся величине избытка цвета $E(B-V)$: от S1 с $E(B-V) = 0.05$ зв.величины до S6 с $E(B-V) = 0.7$ зв.вел. В работе Calzetti et al. (1994) были получены величины избытков цвета для отдельных групп локальных галактик со звездообразованием: $E(B-V) < 0.10$ для S1, $0.11 < E(B-V) < 0.21$ для S2, $0.25 < E(B-V) < 0.35$ для S3, $0.39 < E(B-V) < 0.50$ для S4, $0.51 < E(B-V) < 0.60$ для S5 и $0.61 < E(B-V) < 0.70$ для S6 (см. Таблицу 3 в работе Calzetti et al. (1994)). Надо сказать, что эти SED-ы не являются наблюдаемыми спектрами каких-то реальных галактик (с определенными светимостями и т. д.). Они представляют собой некоторые шаблоны спектров, которые были сделаны с использованием реальных (хорошо изученных) спектров локальных галактик со вспышкой звездообразования, наблюдаемых вплоть до $z \sim 0.03$ (Connoly et al. 1995).

Потоки этих шаблонных SED-ов были проинтегрированы (свернуты) с кривыми чувствительности BVR_cI_c фильтров (были использованы кривые для фильтров из Bessel 1990) и выведенные величины были затем сравнены/подогнаны по χ^2 к нашим наблюдаемым потокам. Для каждого SED-а вычислялся $\chi^2 = \sum_i \left(\frac{f_{\mathrm{host},i} - k \cdot f_{\mathrm{template},i}}{\sigma_{f_{\mathrm{host},i}}}\right)^2$. Здесь i нумерует фильтры (BVR_cI_c), $f_{\mathrm{host},i}$ — поток от исследуемой галактики в фильтре i, $f_{\mathrm{template},i}$ — свернутый с кривой чувствительности фильтра i и соответствующий эффективной длине волны фильтра i поток для спектрального шаблона (SED-а),

$\sigma_{f_{\mathrm{host},i}}$ — ошибка измерения потока исследуемой галактики в фильтре i, k — нормировочный коэффициент (общий сдвиг шаблонного SED-а). Результаты сравнения (оценок A_V) приведены в Табл. 5.4. Последняя колонка, обозначенная "$\chi^2/d.o.f.$, задает величину χ^2, деленную на степень свободы.

Рисунки 5.4, 5.5, 5.6 и 5.7 демонстрируют наилучшие подгонки/сравнения (с минимальным $\chi^2/d.o.f$) спектров локальных галактик со вспышкой звездообразования и наших широкополосных спектров родительских галактик γ-всплесков. Главный результат сравнений (fittings) спектров этой главы — оценка среднего межзвездного поглощения в галактиках с $z \sim 1$ (в первом приближении). Надо заметить, что реальный спектр галактики GRB 970508 не имеет никаких особенностей на 3200Å как в шаблонном спектре S5 на Рис. 5.4 (Connoly et al. 1995). Эта "эмиссия" могла возникнуть и при "склеивании" спектров реальных галактик. (Тем не менее, оценка вклада такой эмиссии, если бы она действительно была в реальном спектре, все еще пренебрежимо мало изменяет $BVRI$ спектр.) Эта же методика оценки среднего внутреннего A_V применялась для родительской галактики GRB 980613 ($\chi^2 = 1.22/2$) только с BVR_c потоками из Табл. 5.3. Конечно, результаты зависят и от того, какой закон поглощения (см. Рис. 5.8) выбирается (об этом будет еще сказано). Эти оценки A_V не учитывают еще один важный параметр — эмиссионный спектр галактики (наблюдаемые потоки в эмиссиях). Правда в некоторых случаях такой информации нет, как, например, для родительской галактики GRB 990123 с $z = 1.6$, когда в оптическом диапазоне нет ни одной эмиссионной линии (см. Рис. 5.7), по которой и определяется z. Тем не менее, нашим методом удается по подгонке BVR_cI_c спектра к самому "прозрачному" шаблону S1 (см. Табл. 5.4; $\chi^2 = 2.29/3$) оценить сверху (малое, несмотря на общий рост поглощения за 3000Å см. Рис. 5.8) среднее поглощение в этой знаменитой иррегулярной галактике с яркой оптической вспышкой, наблюдавшейся (один раз) одновременно с γ-всплеском (Akerlof et al. 1999).

Недостатки и достоинства такой методики оценки среднего поглощения в галактиках с $z \sim 1$ станут понятнее, когда мы перейдем ко второму приближению и учтем всю доступную информацию. Надо отметить здесь сразу же, что в случае родительской галактики GRB 980703 шаблонный спектр S2 довольно грубо фитирует (аппроксимирует) наши $BVR_\mathrm{c}I_\mathrm{c}$ данные наблюдений (Рис. 5.6). Но, как будет показано в разделе 5.5, результаты грубой оценки среднего A_V по этим сравнениям с шаблонными спектрами из Табл. 5.4 устоят, и позволят нам провести более точный фиттинг

Таблица 5.4. Результаты оценок A_V по локальным starburst галактикам

Голактика	Шаблон	$E(B-V)$	$A^*_{\rm V}$	$\chi^2/d.o.f.$
GRB 970508	S5	0.51–0.60	1.5–1.86	0.64/3
GRB 980613	S6	0.61–0.70	1.8–2.17	1.22/2
GRB 980703	S2	0.11–0.21	0.3–0.65	7.67/3
GRB 990123	S1	<0.10	<0.31	2.29/3
GRB 991208	S5	0.51–0.60	1.5–1.86	0.99/3

* Величины соответствуют галактическому (Milky Way) закону поглощения (Cardelli et al. 1989).

наблюдательных данных во *втором приближении* с помощью методов моделирования спектров галактик.

5.4. Абсолютные величины родительских галактик γ-всплесков

Большой интерес представляет сравнение светимостей родительских галактик γ-всплесков со светимостями типичных галактик L_*, соответствующих “колену" функции светимости локальных галактик. Этот вопрос уже обсуждался в предыдущей главе для галактики GRB 970508. Используя наилучшим образом подобранные (фитированные по χ^2) SED-ы локальных галактик со вспышкой звездообразования из раздела 5.3, мы здесь сделаем оценки наблюдаемых (голубых) светимостей L_B для 5-ти родительских галактик γ-всплесков. Теперь мы будем в основном использовать плоскую Фридмановскую космологическую модель с $\Omega_{\rm M} = 0.3$ и $\Omega_\Lambda = 0.7$, которую принято считать некоторой "стандартной" моделью к 2000 г. (см., например, в de Bernardis et al. 2000). И здесь для постоянной Хаббла мы выберем H_0=60 km s^{-1} Mpc^{-1}. Но для того, чтобы оценить влияние ошибок в определении космологических параметров, мы будем приводить оценки M_B, иногда используя три предельных случая плоских ($\Omega_{\rm k} = 0$) моделей: A (60,1,0), B (60,0,0) и C (60,0,1), с (H_0,$\Omega_{\rm M}$,Ω_Λ), где “0" обозначает настоящую эпоху.

Согласно нашему выбору спектральных типов родительских галактик (S5, S6, S2, S1 и S5 из Табл. 5.4) можно теперь точнее вычислить K-поправку. Определение K-поправки согласно Oke & Sandage (1968) соответствует формуле (4.3), где $F_\lambda = F(\lambda)$ — SED в системе покоя галактики (т. е. при $z = 0$), $F_{\lambda/(1+z)} = F(\lambda/(1+z))$ — плотности потоков наблюдаемого SED-a (при z не равном 0), $S_i(\lambda)$ — кривая пропускания системы в

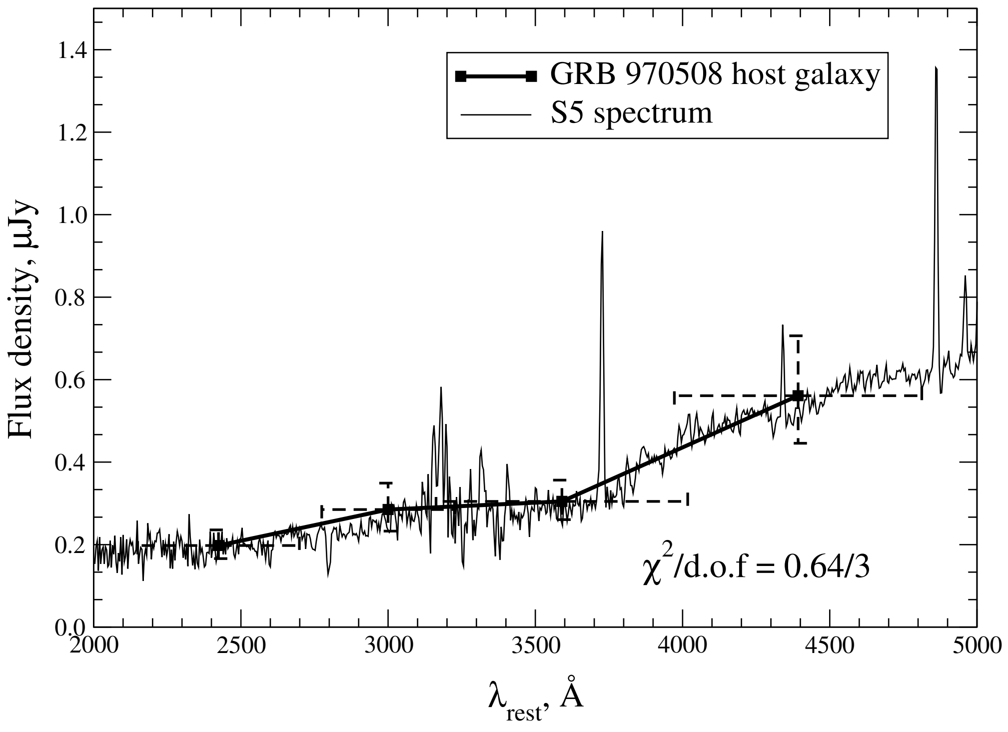


Рис. 5.4. Наилучшая подгонка (аппроксимация) широкополосного BVR_cI_c-спектра родительской галактики GRB 970508 (сдвинуто в систему покоя для $z = 0.835$) ультрафиолетовым спектром starburst шаблона S5 (см. Connoly et al. 1995). Поток от галактики-шаблона S5 был приведен к шкале потоков родительской галактики из Табл. 5.3 (т.е. к одному и тому же расстоянию). С учетом z ширины каждого из фильтров (FWHM) уменьшены и изображены для каждого $\lambda_{\rm eff}$ (в системе покоя GRB 970508) прерывистыми горизонтальными линиями с барами. На основании сравнения только с непрерывными спектрами starburst шаблонов, среднее межвездное поглощение света A_V внутри галактики GRB 970508 может быть в пределах 1.5–1.86.

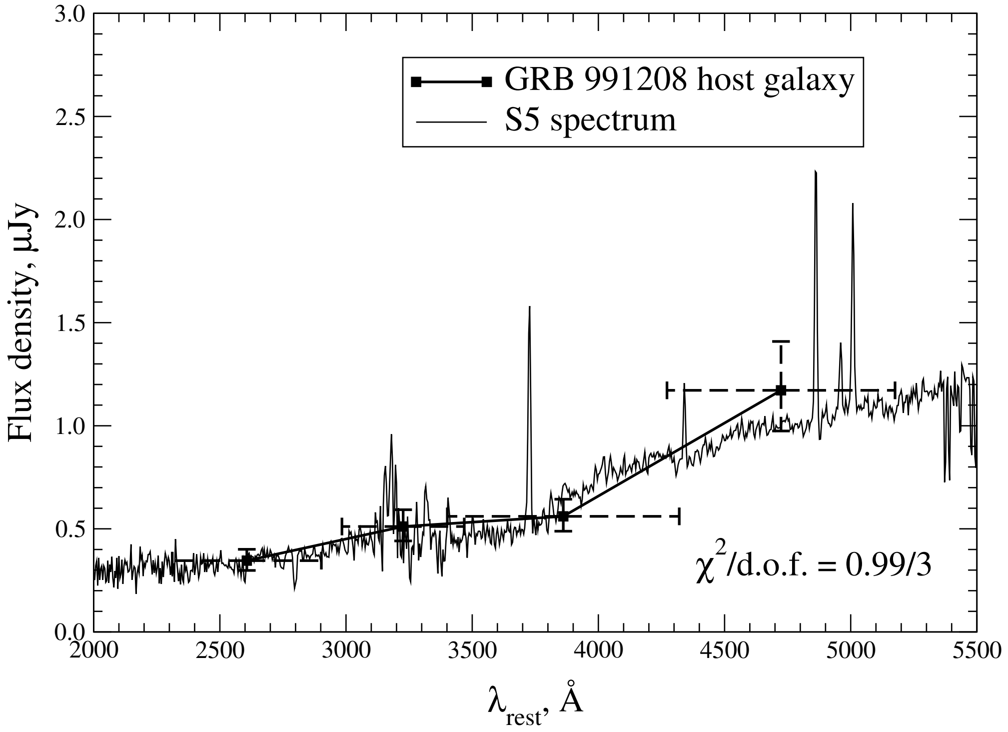


Рис. 5.5. Сравнение широкополосного спектра галактики GRB 991208 в ее системе отсчета ($z = 0.7063$) с SED-ом starburst-шаблона S5. Внутри галактики GRB 991208 среднее A_V может быть в пределах 1.5–1.86.

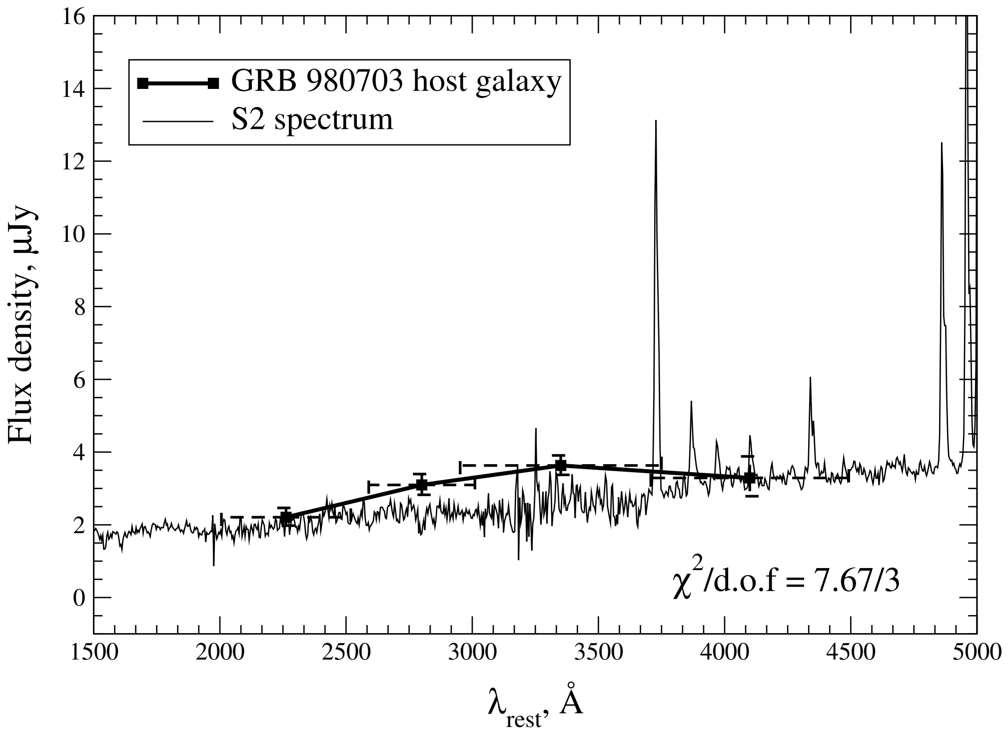


Рис. 5.6. Сравнение широкополосного спектра галактики GRB 980703 в ее системе отсчета ($z = 0.966$) с SED-ом starburst-шаблона S2. Внутри галактики GRB 980703 среднее A_V может быть в пределах 0.3–0.65.

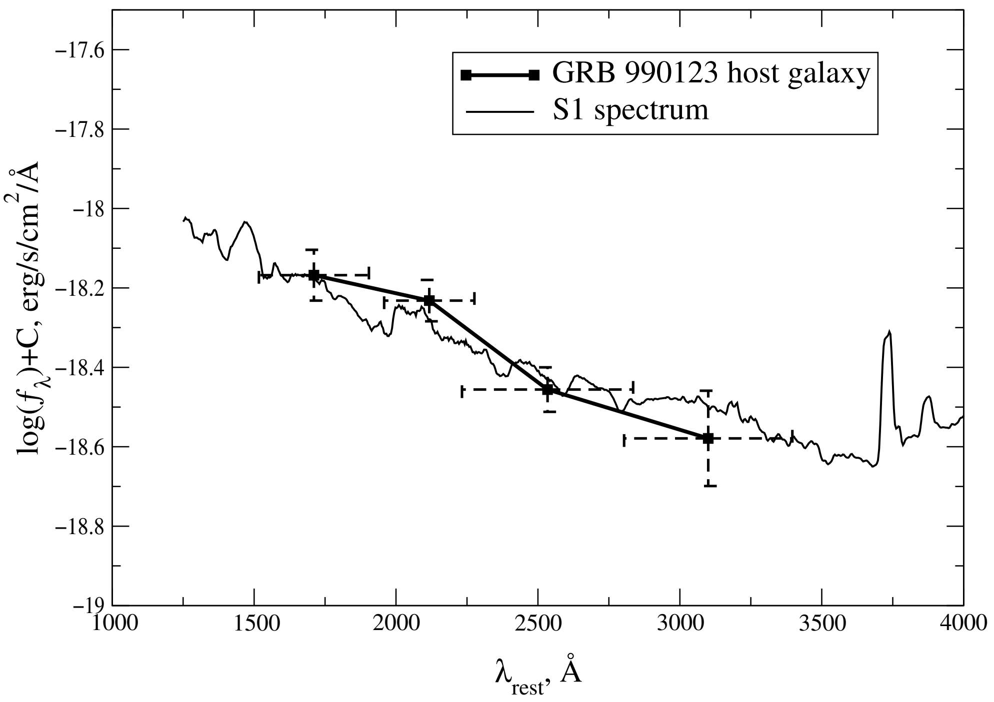


Рис. 5.7. Сравнение BVR_cI_c фотометрии родительской галактики GRB 990123 (с учетом сдвига с $z = 1.6$ в ее систему покоя) с шаблонным спектром S1 локальной галактики со вспышкой звездообразования. Плотности потоков (в эрг·с$^{-1}$см$^{-2}$Å^{-1}) шаблона сдвинуты с помощью $\log F_\lambda = \log F_{\lambda,S1} + C$ в шкалу наблюдаемых потоков галактики GRB 990123.

фильтре i.

Используя свертки $\int F(\lambda)S_i(\lambda)d\lambda$ и $\int F(\lambda/(1+z))S_i(\lambda)d\lambda$ с шаблонными (S5, S6, S2, S1) спектрами локальных (starburst) галактик из Calzetti et al. (1994), мы вычислили K-поправку в B-полосе для 5-ти родительских галактик с BVR_cI_c фотометрией, полученной на БТА. Результаты сведены в Табл. 5.5. Это позволяет теперь вычислить и абсолютные величины этих далеких галактик. Для наблюдаемых значений B-величин из Табл. 5.3 и вычисленных K-поправок абсолютные величины (4.1) показаны в той же Табл. 5.5. Типичные ошибки, которые могут быть при определении K-поправки таким способом, указаны для двух родительских галактик GRB 970508 и GRB 991208 (с одинаковыми шаблонами S5, см. Табл. 5.4). В ошибку определения $M_{\mathrm{B_{rest}}}$ (при выбранной космологической модели) надо включить еще и ошибку измерений потоков в B-полосе из Табл. 5.1. Абсолютные величины представлены для упомянутой выше космологической модели с $\Omega_{\mathrm{M}} = 0.3$ и $\Omega_\Lambda = 0.7$ (колонка $M_{\mathrm{B_{rest}}}$) и для предельных случаев — (A), (B) и (C). Эти числа отражают возможную неопределенность (максимальный разброс) в значениях $M_{\mathrm{B_{rest}}}$ из-за неточного знания космологических параметров, или неточностей в определении космологической шкалы расстояний.

Таблица 5.5. K-поправки и абсолютные величины 5-ти родительских галактик γвсплесков.

Host	K_{B}-correction	Absolute magnitudes			
		$M_{\mathrm{B_{rest}}}$	(A)	(B)	(C)
GRB 970508	0.44 ± 0.10	-18.62	-18.08	-18.53	-19.09
	0.51 ± 0.32	-18.69			
	0.0	-19.88			
GRB 980613	0.85	-20.76	-20.14	-20.72	-21.38
GRB 980703	-0.01	-21.27	-20.60	-21.12	-21.73
GRB 990123	0.13	-20.93	-20.20	-21.02	-21.82
GRB 991208	0.46 ± 0.10	-18.79	-18.29	-18.68	-19.18
	0.21 ± 0.31	-18.54			
	0.0	-19.81			

Для родительских галактик GRB 970508 ($z = 0.835$) и GRB 991208 (z=0.7063) мы даем две оценки K_{B}. Так как I_{c}-полоса при этих z примерно соответствует B-полосе в системе покоя этих галактик, то мы можем (как и в 4-й главе для галактики GRB 970508) сделать оценку K-поправки для B-величины предположив, что второй член в формуле (4.3) $\approx 2.5\ \log(F_{\mathrm{I_{obs}}}/F_{\mathrm{B_{obs}}})$, здесь $F_{\mathrm{I_{obs}}}$ и $F_{\mathrm{B_{obs}}}$ — наблюдаемые потоки (а не плотности потоков) в фильтрах I_c и B_c. (Хотя надо помнить, что полуширины и нуль-пункты потоков этих фильтров разные, что вносит ошибку в такую оценку.) Таким образом, получено $K_{\rm B} = 0.51 \pm 0.32$ и $K_{\rm B} = 0.21 \pm 0.31$ для галактик GRB 970508 и GRB 991208 соответственно. Третий вариант определения $M_{\rm B_{rest}}$ соответствует полному неучету K-поправки, $K_{\rm B}$= 0.0.

Таблица 5.5 показывает неопределенности в светимостях (до одной звездной величины) из-за разных космологических моделей. Фактически это наибольший допустимый разброс $M_{\rm B_{rest}}$ из-за задания параметров H_0, $\Omega_{\rm M}$, Ω_Λ, которые сами определяются/задаются со своими ошибками. С учетом этих оговорок, мы будем использовать далее абсолютные величины родительских галактик γ-всплесков $M_{\rm B_{rest}}$ для ставшей наиболее популярной сейчас (и наиболее реалистичной) плоской Фридмановской космологической модели с H_0=60 km s^{-1} Mpc^{-1}, $\Omega_{\rm M}$=0.3 и Ω_Λ=0.7. Для этой модели абсолютные величины приведены в итоговой Табл. 5.11. Для получения абсолютных потоков мы далее используем эту космологическую шкалу расстояний и эти светимости для теоретического моделирования спектров родительских галактик.

Заметим еще, что в разделе 5.3 наилучшая $BVR_{\rm c}I_{\rm c}$-подгонка была получена с использованием одного и того же (starburst) шаблона S5 для двух родительских галактик GRB 970508 и GRB 991208 (Рис. 5.4 и 5.5). Это означает прежде всего, что обе галактики, согласно описанному выше способу оценки внутреннего поглощения, должны иметь близкие значения собственного *среднего* межзвездного поглощения A_V (см. Табл 5.4 и в разделе. 5.6). И, как видно из Табл. 5.5, обе эти галактики имеют фактически одну и ту же абсолютную величину $M_{\rm B_{rest}}$. Более того, эти галактики по наблюдениям на Хаббловском телескопе показывают одну и ту же морфологию (см. Рис. 1.7 и рисунки в работах Fruchter et al. 1998, 1999b, 2000). Можно предположить, что и размеры этих галактик очень близки, и центральная поверхностная яркость μ_0 у галактики GRB 991208 такая же, как и у GRB 970508. Заметим также, что и положения ОТ в обоих случаях оказались близкими к яркому центру этих объектов. Эти интересные совпадения будут еще упомянуты в следующем разделе при моделировании и дальнейшей интерпретации непрерывного и эмиссионного спектров галактик.

5.5. Моделирование распределений энергии в спектрах родительских галактик

Чтобы оценить эффекты внутреннего поглощения, мы предприняли теоретическое моделирование распределений энергии в непрерывных спектрах двух родительских галактик GRB 970508 и GRB 980703. Для этих двух галактик уже были получены спектры (Рис. 5.2 и 5.3), BVR_cI_c фотометрия и имелись данные наблюдений в ближнем инфракрасном (NIR) диапазоне. Для высказывания каких-то общих выводов по родительским галактикам, по-видимому, может быть важным и то, что это галактики с существенно разными светимостями — одна с наименьшей (GRB 970508), а другая с близкой к наибольшей (GRB 980703) светимостью (Табл. 5.5 и Табл. 5.11) из известной в 2000 г. выборки родительских галактик γ-всплесков. Используя методы популяционного синтеза, мы рассчитали сетку модельных (теоретических) шаблонных спектров для этих двух родительских галактик, чтобы оценить среднее внутреннее поглощение для них *во втором приближении.*

5.5.1. Учет внутреннего поглощения и моделирование вспышки звездообразования

Для численного моделирования мы использовали пакет программ PEGASE (**P**rojet d'**É**tude des **GA**laxies par **S**ynthèse **É**volutive), созданный Fioc & Rocca-Volmerange (1997), информацию о котором можно найти на авторском сайте `ftp://ftp.iap.fr/pub/from_users/fioc/PEGASE/PEGASE.2/`). В качестве начальной функции масс (НФМ) была выбрана НФМ Сольпитера с нижним и верхним пределами масс звезд $0.1\,\mathrm{M}_\odot$ and $120\,\mathrm{M}_\odot$ соответственно. При вычислениях мы использовали два значения металличности $Z_\odot$ and $0.1Z_\odot$, а также два сценария звездообразования — простейшая мгновенная вспышка и более сложная экспоненциально затухающая вспышка звездообразования. Так как пакет PEGASE вычисляет распределения энергии (SED-ы) в спектрах галактик при $z = 0$, то есть представляет результаты счета в монохроматических светимостях, мы использовали космологическую шкалу расстояний с параметрами H_0=60 km s^{-1} Mpc^{-1}, Ω_M=0.3 и Ω_Λ=0.7 для трансформирования монохроматических светимостей в наблюдаемые потоки.

Результаты сравнения широкополосных BVR_cI_c спектров родительских галактик GRB 970508, GRB 980703, GRB 980613, GRB 990123, GRB 991208 с соответствующими ультрафиолетовыми спектрами локальных галактик со вспышкой звездообразования позволяют нам считать, что в родительских галактиках γ-всплесков среднее внутреннее поглощение должно быть значительным в наблюдаемой части спектра этих галактик с $z \sim 1$. Чтобы точнее оценить влияние этого важного фактора мы использовали два известных закона поглощения: Cardelli et al. (1989) и Calzetti et al. (2000). Эти законы отличаются по форме кривых $k(\lambda)$ и по параметризации этих кривых $R_{\rm V} \equiv A_{\rm V}/E(B-V)$ с $R_{\rm V} = 4.05$ для закона Calzetti et al. и $R_{\rm V} = 3.1$ для закона Cardelli et al, где $k(\lambda) = A_\lambda/E(B-V)$. Ввиду важности их для дальнейшего, мы приводим оба этих закона на Рис. 5.8 для демонстрации возможных различий в поглощении как раз в ультрафиолетовой (наблюдаемой при $z \sim 1$) части спектра. Кривая поглошения $k(\lambda)$ по Cardelli et al. представляет покраснение такое же, как в Галактике (MW), тогда как (гладкий) закон Calzetti et al. (2000) был выведен эмпирически, из выборки интегральных спектров близких (локальных) галактик со вспышкой звездообразования (starburst galaxies, SB). Для простоты мы выбираем модель пылевого экрана (dust-screen) со следующим соотношением для учета покраснения по всему спектру: $F_{\rm obs}(\lambda) = F_{\rm int}(\lambda)10^{-0.4A_\lambda}$, где $F_{\rm obs}(\lambda)$ и $F_{\rm int}(\lambda)$ есть наблюдаемый и внутренний спектры (плотности потоков), а $A_\lambda = k(\lambda)E(B-V)$ — поглощение на длине волны λ.

Для вычисления теоретических шаблонных SED-ов мы использовали 2-хкомпонентную модель спектра: первая компонента описывает как раз вспышку звездообразования — это вспышечная (“burst") компонента, вторая компонента описывает некоторое более старое звездное население — "старая" компонента (“old" component). Обе эти компоненты дают соответствующие вклады в непрерывный спектр, что создает в совокупности наблюдаемое распределение энергии в спектре галактики.

Очевидно, вспышечная (“burst") компонента ответственна за эмиссионные линии и небулярный континуум. По этой причине мы (по крайней мере, приближенно) фиксируем параметры вспышечной компоненты, используя светимость в запрещенных эмиссиях иона кислорода O II и подгоняя (фитируя) их к наблюдаемым потокам с учетом того или другого законов покраснения спектров. При моделировании мы использовали наблюдаемые потоки в эмиссионной линии O II (см. на Рис. 5.1 и 5.3.) из Bloom et al. (1998b) и Djorgovski et al. (1998): $(2.98 \pm 0.22) \cdot 10^{-17}\,{\rm erg\,s^{-1}\,cm^{-2}}$ и $(30.4 \pm 3) \cdot 10^{-17}\,{\rm erg\,s^{-1}\,cm^{-2}}$ для родительских галактик GRB 970508 и GRB 980703 соответственно. Мы оценили вклад эмиссионных линий (и не только [O II]) в спектрах родительских галактик GRB 970508 и GRB 980703 в BVR_cI_c величины и нашли, что он пренебрежимо мал при наших точностях измерения потоков. Выбор одних лишь запрещенных линий для подгонки, позволяет нам избежать учета эффектов вклада звездных абсорбций в светимость эмиссионных линий, например, в Бальмеровских линиях.

Чтобы увидеть, что только длящаяся короткое время вспышка звездообразования (вспышечная компонента) определяет эмиссионный спектр галактики, интересно на простом примере проследить спектральную эволюцию этой вспышки со временем. Результаты такого демонстрационного счета с пакетом PEGASE для модельной вспышки с $1\,M_\odot$ приведены на Рис. 5.9. Здесь видно, что небулярная эмиссия (эмиссионные линии плюс континуум) мгновенной вспышки звездообразования доминирует вплоть до ≈ 10 Myr, а потом остается только абсорбционный спектр старой компоненты звездного населения галактики. Задавая параметры вспышки звездообразования (например ее массу, сценарий вспышки, металличность) мы можем определить возраст и массу более старого звездного населения ("старую" компоненту) по подгонкам теоретических потоков к наблюдаемым BVR_cI_c потокам. Разумеется, мы учитываем вклад в непрерывный BVR_cI_c спектр и от вспышечной компоненты.

И, последнее, мы учитываем поглощение света несерым экраном $k(\lambda)$ для одной только вспышечной компоненты модели в двух сценариях звездообразования — как для *мгновенной вспышки*, так и для *экспоненциально затухающего* звездообразования. Именно в областях звездообразования поглощение выше, чем в среднем по всей галактике, и избытки цвета $E(B-V)$, выведенные из эмиссионных Бальмеровских линий, относятся ко всем H II областям галактики со вспышкой звездообразования (Calzetti et al. 1994). (Есть еще поглощение *на луче зрения* для ОТ, о котором уже шла речь в разделе 5.2 при обсуждении спектра галактики GRB 980703 на Рис. 5.3.)

5.5.2. Родительская галактика гамма-всплеска GRB 970508

Как было показано в разделе 5.3, широкополосный BVR_cI_c спектр родительской галактики GRB 970508 хорошо аппроксимируется шаблонным SED-ом локальной галактики со вспышкой звездообразования S5, а наши фотометрические точки находятся в хорошем согласии с непрерывным спектром этой галактики на Рис. 5.2. Таким образом, мы можем определить (оценить) избыток цвета $E(B-V) = 0.5 - 0.60$, определяя эту родительскую галактику как галактику, отнесенную к группе (starburst)

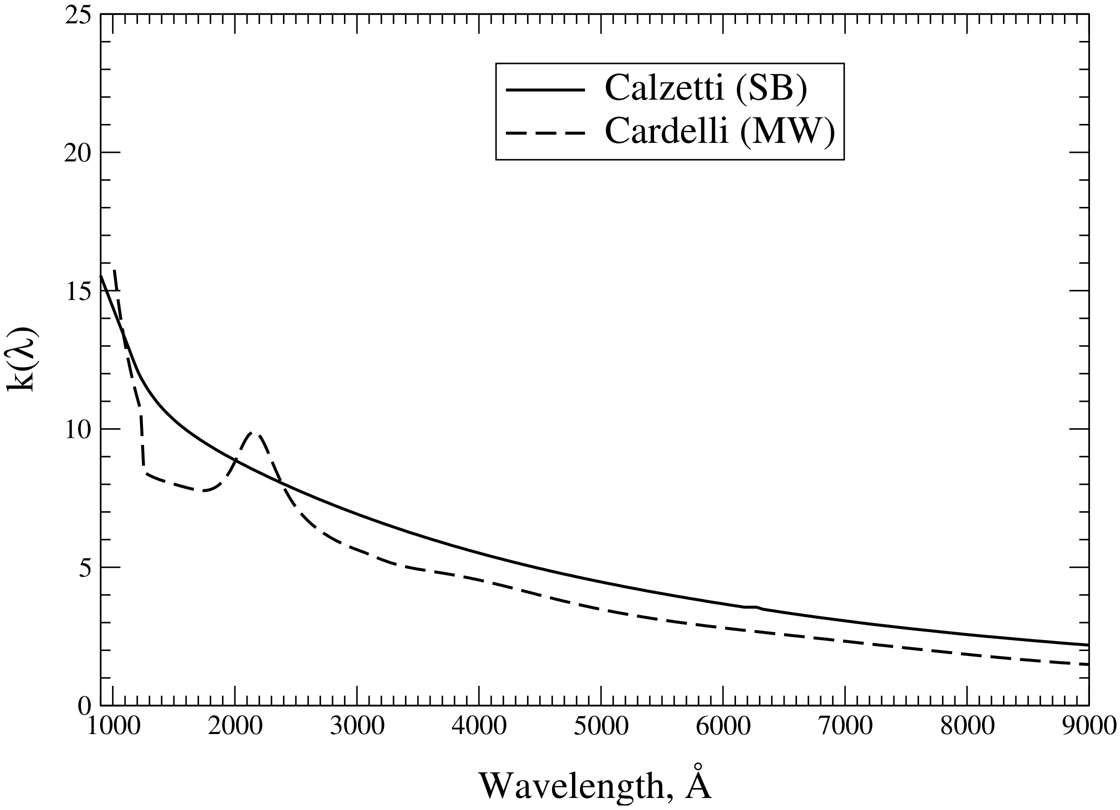


Рис. 5.8. Кривые поглощения $k(\lambda)$, соответствующие законам покраснения Cardelli et al. (1989) (SB) и Calzetti et al. (2000) (MW). Немонотонный закон поглощения Cardelli et al. представляет такое же покраснение, как и в Галактике. Гладкий закон Calzetti et al. был выведен эмпирически по выборке спектров локальных галактик со вспышкой звездообразования.

галактик S5. Это позволяет определить величину A_{V}, задавшись тем или другим законом поглощения $k(\lambda)$. Для $E(B-V) = 0.5 - 0.60$ мы получаем $A_{\mathrm{V}} = 2.0 - 2.43$, если принять SB-закон $k(\lambda)$ из Calzetti et al. (2000), или $A_{\mathrm{V}} = 1.5 - 1.86$, если для этой галактики справедливо такое же поведение $k(\lambda)$ в ультрафиолете (MW-закон), какое наблюдается и в нашей Галактике (Cardelli et al. 1989).

Сначала мы предприняли теоретическое моделирование, выбрав гладкий SB-закон поглощения, характерный для локальных (starburst) галактик со вспышкой звездообразования. Мы использовали два сценария звездообразования: *мгновенная вспышка* (inst. SF) и *экспоненциально затухающее* (exp. SF) звездообразование, проведя расчеты для двух металличностей: $Z_{\odot}$ и $0.1Z_{\odot}$. На Рис. 5.10 и Рис. 5.11 представлены результаты моделирования для поглощения по Calzetti et al. и двух (inst. SF и exp. SF) сценариев звездообразования. Чтобы ограничить выбор моделей, кроме своих $BVR_{\mathrm{c}}I_{\mathrm{c}}$ данных мы использовали данные (HST/NICMOS) наблюдений в

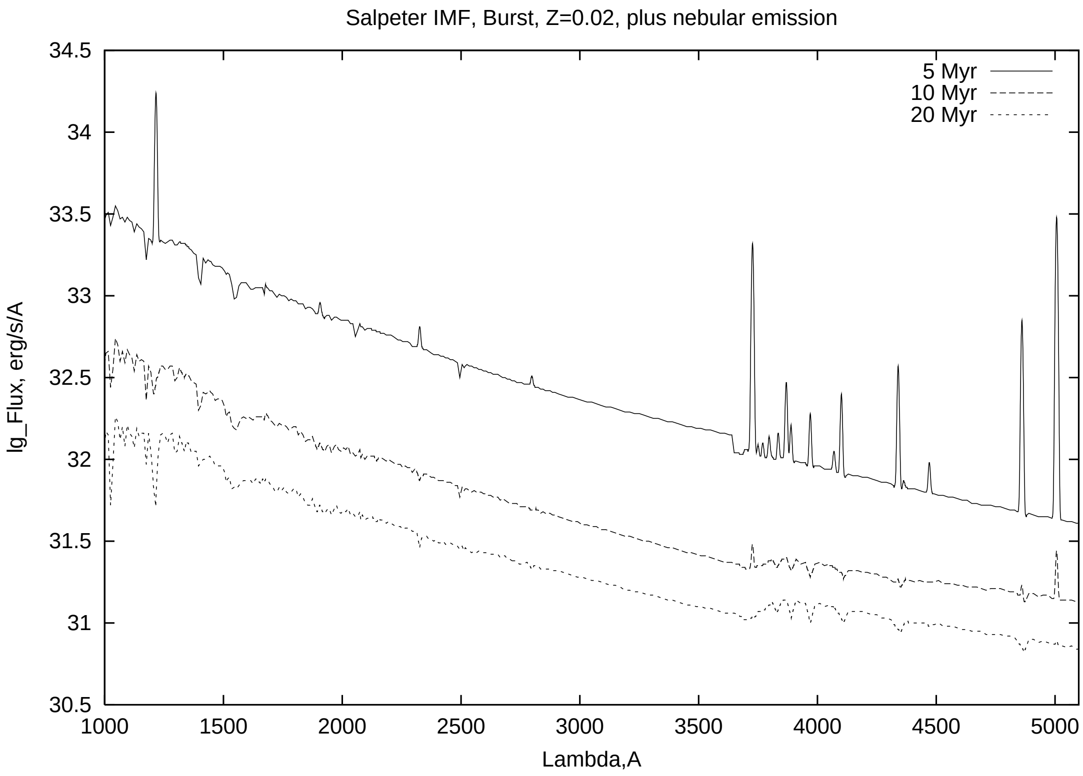


Рис. 5.9. Спектральная эволюция (мгновенной) вспышки звездообразования (с массой $1\,\mathrm{M}_\odot$) для 5, 10 и 15 **Myr** после нее. Модельный монохроматический поток задан здесь в единицах erg/s/Å/$\mathrm{M}_\odot$.

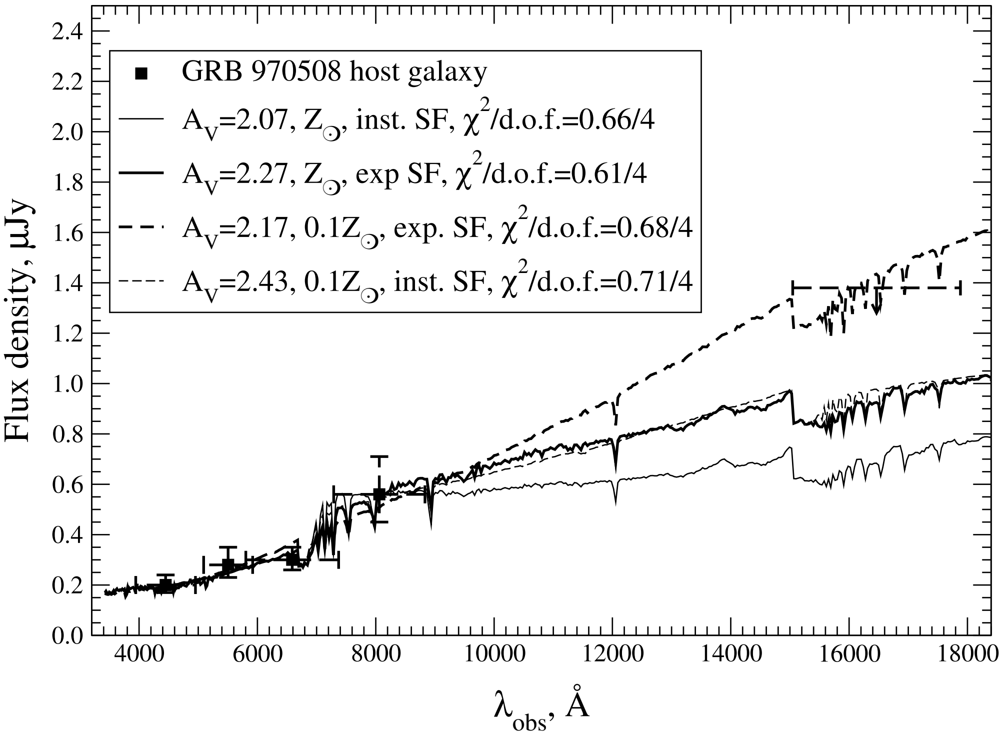


Рис. 5.10. Наилучшая подгонка теоретическими SED-ами BVR_cI_c фотометрии родительской галактики GRB 970508 для SB-закона внутреннего поглощения из Calzetti et al. (2000). Указан также верхний предел (HST/NICMOS) наблюдений в H-полосе по данным Pian et al. (1998). Все показано в шкале наблюдаемых длин волн.

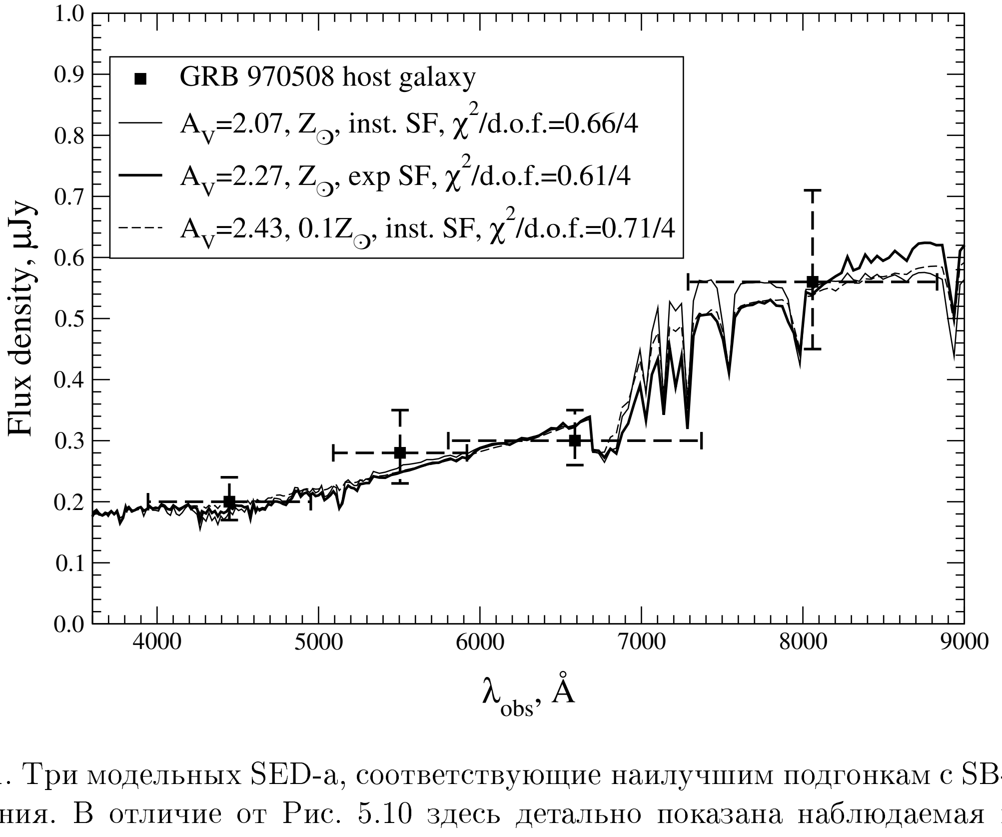


Рис. 5.11. Три модельных SED-а, соответствующие наилучшим подгонкам с SB-законом поглощения. В отличие от Рис. 5.10 здесь детально показана наблюдаемая в оптике часть спектра.

Таблица 5.6. Параметры моделей, соответствующих теоретическим шаблонным SED-ам с минимальными χ^2 для галактики GRB 970508 при внутреннем поглощении по Calzetti et al. (2000) с SB-законом*.

scen. SF	old component Age, Gyr	Mass, $M_\odot$	burst component Age, Myr	Mass, $M_\odot$	metallicity	[O II] model flux**	χ^2_{min}/d.o.f.	A_V
inst.	0.14	$3.16 \cdot 10^9$	1	$5.62 \cdot 10^7$	$Z_\odot$	$2.98 \cdot 10^{-17}$	0.66/4	2.07
SF	0.08	$1.00 \cdot 10^8$	4	$1.78 \cdot 10^8$	$0.1Z_\odot$	$2.92 \cdot 10^{-17}$	0.71/4	2.43
exp.	1.2 ($\tau = 500$Myr)	$1.00 \cdot 10^9$	3 ($\tau = 300$Myr)	$5.62 \cdot 10^9$	$Z_\odot$	$2.61 \cdot 10^{-17}$	0.61/4	2.27
SF	0 ($\tau = 400$Myr)	$1.00 \cdot 10^9$	80 ($\tau = 400$Myr)	$5.62 \cdot 10^9$	$0.1Z_\odot$	$2.96 \cdot 10^{-17}$	0.68/4	2.17

* Параметры были получены фитированием теории к BVR_cI_c и к наблюдаемому потоку $(2.98 \pm 0.22) \cdot 10^{-17}\,\mathrm{erg\,s^{-1}\,cm^{-2}}$ в эмисии [O II] 3727Å.

** Поток в линии [O II] 3727Å, полученный при моделировании (в единицах $\mathrm{erg\,s^{-1}\,cm^{-2}}$).

H-полосе — верхний предел из Pian et al. (1998) указан на Рис. 5.10. Параметры модели, соответствующие наилучшим подгонкам теоретическими шаблонными SED-ами (с минимумом χ^2), даны в Табл. 5.6. В этой таблице первая колонка указывает сценарий звездообразования (inst. SF и exp. SF), вторая и третья колонки указывают возраст и массу "старой" компоненты (см. раздел 5.5.1), в 4-й и 5-й колонках указаны те же самые параметры вспышечной компоненты моделей. Для экспоненциального сценария звездообразования в таблице даны также и величины τ — времени, за которое темп звездообразования уменьшается в e раз. В 6-й колонке даны металличности, при которых считался соответствующий теоретический шаблон, в 7-й колонке приведены модельные величины, уже "пропущенных" через экран $k(\lambda)$ потоков в эмиссионной линии [O II]3727Å. Минимальные χ^2, соответствующие наилучшим подгонкам моделей к наблюдаемым потокам, приведены в 8-й колонке. И в последней колонке приведены величины A_V, при которых получаются такие значения χ^2.

Как было сказано в разделе 5.5.1, мы провели теоретическое моделирование для MW-закона внутреннего поглощения по Cardelli et al. (1989). Мы снова рассмотрели два сценария вспышечного звездообразования (inst. SF и exp. SF) для двух значений металличностей $Z_\odot$ и $0.1Z_\odot$. Теоретические шаблонные SED-ы с минимальными уклонениями χ^2 показаны на Рис. 5.12, и более подробно только BVR_cI_c диапазон показан на Рис. 5.13. Соответствующие этим спектрам параметры теоретических моделей суммированы в Табл. 5.7. Организация этой таблицы такая же, как и Табл. 5.6.

Важно здесь заметить, что мы получали величины χ^2 для подгонок спектров (для MW-закона) и за пределами области значений A_V из Табл. 5.4, полученные фиттингом "реального" S5 шаблона, и нашли, что наилучшая подгонка теоретическими шаблонами тоже соответствует величинам A_V, лежащим в этой же S5-области. Хотя надо сказать, что результаты модели-

Таблица 5.7. Параметры моделей, соответствующих теоретическим шаблонным SED-ам с минимальными χ^2 для галактики GRB 970508, при внутреннем поглощении по Cardelli et al. (1989) с MW-законом.

scen. SF	old component Age, Gyr	Mass, $M_\odot$	burst component Age, Myr	Mass, $M_\odot$	metallicity	[O II] model flux*	$\chi^2_{\rm min}$/d.o.f.	A_V
inst.	0.08	$1.78 \cdot 10^8$	0	$3.16 \cdot 10^7$	$Z_\odot$	$3.01 \cdot 10^{-17}$	1.06/4	1.6
SF	0.16	$3.16 \cdot 10^8$	0	$3.16 \cdot 10^7$	$0.1Z_\odot$	$3.00 \cdot 10^{-17}$	0.66/4	1.6
exp.	1.0 ($\tau = 400$Myr)	$1.00 \cdot 10^9$	0 ($\tau = 10$Myr)	$3.16 \cdot 10^8$	$Z_\odot$	$3.01 \cdot 10^{-17}$	0.64/4	1.6
SF	1.2 ($\tau = 450$Myr)	$1.00 \cdot 10^9$	0 ($\tau = 10$Myr)	$3.16 \cdot 10^8$	$0.1Z_\odot$	$3.00 \cdot 10^{-17}$	1.05/4	1.6

* Поток в линии [O II] 3727Å, полученный при моделировании (в единицах erg $\rm s^{-1}\,cm^{-2}$).

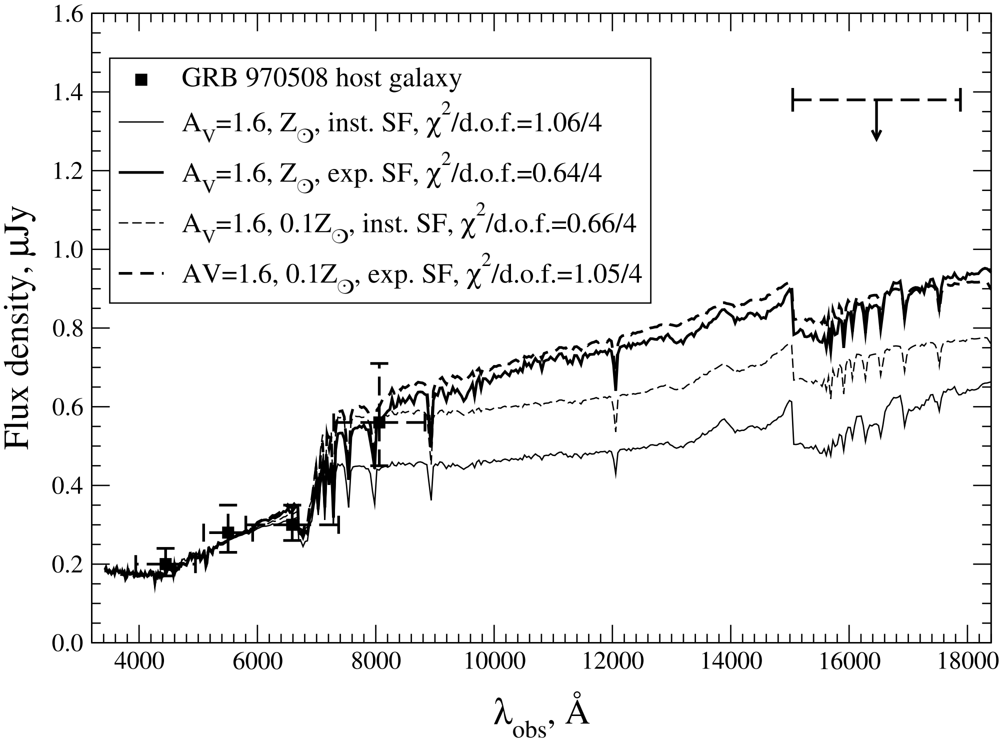


Рис. 5.12. Наилучшая подгонка теоретическими SED-ами BVR_cI_c фотометрии родительской галактики GRB 970508 для MW-закона $k(\lambda)$ внутреннего поглощения из Cardelli et al. (1989). Указан верхний предел (HST/NICMOS) наблюдений в H-полосе по данным Pian et al. Спектр показан в шкале наблюдаемых длин волн.

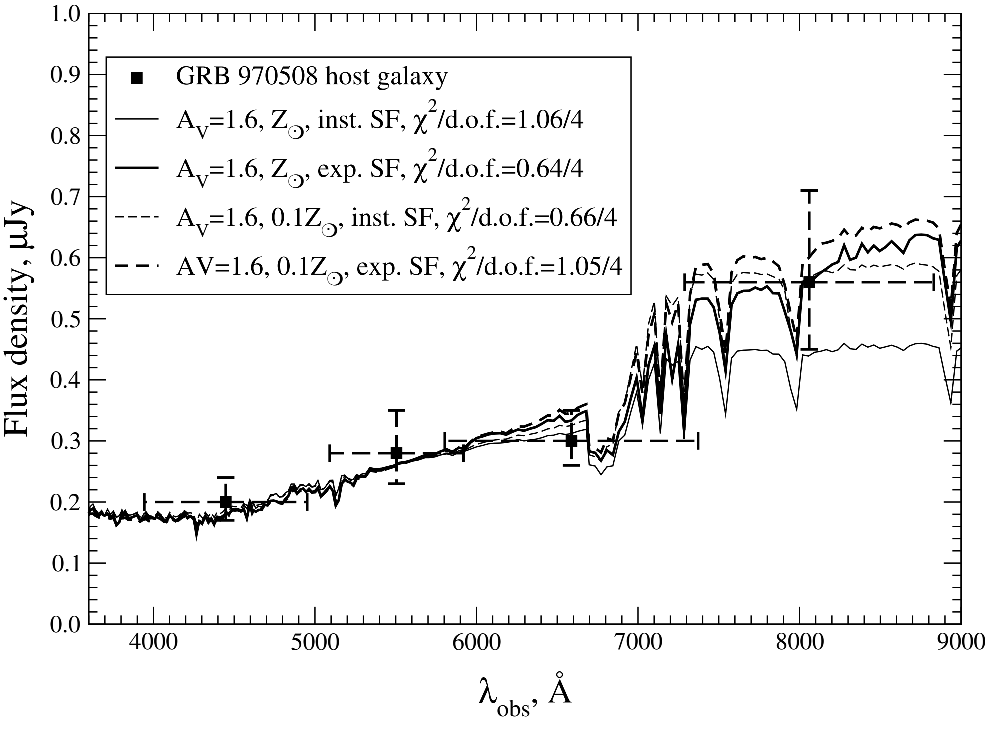


Рис. 5.13. Те же (что и на 5.12) модельные SED-ы, соответствующие наилучшим подгонкам с MW-законом поглощения в галактике GRB 970508. Детально показана наблюдаемая в оптике часть спектра.

рования (с имеющимися у нас данными наблюдений) оставляют неопределенным выбор закона поглощения для этой галактики. Из всех подходящих моделей на Рис. 5.10 можно видеть только один теоретический шаблон с металличностью $0.1Z_{\odot}$ и экспоненциально затухающей вспышкой для SB-закона, который не согласуется с верхним пределом потока в H-полосе и может быть сразу отвергнут. Более детальный анализ результатов моделирования спектров будет дан в разделе 5.7.

5.5.3. Родительская галактика гамма-всплеска GRB 980703

Сравнение нашей широкополосной $BVR_{\rm c}I_{\rm c}$ фотометрии со спектрами, полученными в две эпохи (см. Рис. 5.3), показало, что 7 июля 1998 UT вклад оптического транзиента (ОТ) в континуум вблизи эмиссионной линии [O II] 3727Å был уже незначительным и мы можем считать, что светимость в эмиссии [O II], с учетом ошибок оценки потока в ней, почти не содержит вклада (в подложку) из-за ОТ. Более того, из наблюдений 19 июля 1998 UT следует, что спектры родительской галактики GRB 980703 уже не содержат никакого вклада в потоки ОТ. Таким образом, несмотря на то, что фотометрические наблюдения были проведены через ~ 20 дней после γ-всплеска, мы можем считать, что наш широкополосный $BVR_{\rm c}I_{\rm c}$ спектр (см. Рис. 5.3, нижняя панель) уже точно соответствует непрерывному спектру родительской галактики без какого-либо вклада ОТ. Чтобы окончательно убедиться, что спектр родительской галактики "чист", мы провели 14 октября 1998 UT наблюдения этой галактики на БТА с мультизрачковым спектрографом MPFS при спектральном разрешении 5.1Å/pix, при изображении (seeing) 1.5" – 2" и для времени накопления 3 часа. Эти наблюдения показали отсутствие вклада какого-либо переменного объекта в спектр галактики и через 3 месяца после всплеска при хорошем согласии потоков с нашими предыдущими $VR_{\rm c}I_{\rm c}$ наблюдениями. Наконец, наблюдения в V и R полосах, проведенные Holland et al. (2001) на CAHA/CAFOS 2.2-м телескопе значительно позже наших (551 дней после всплеска), дали $V = 22.81 \pm 12$ и $R = 22.41 \pm 10$, что в пределах ошибок (см. Табл. 5.1) не отличается от наших V и R_c потоков. Небольшая разница (0.15 и 0.11 зв.вел.) объясняется скорее разными апертурами фотометрии (2" на БТА и 1".5 на CAHA 2.2-м), чем вкладом ОТ.

Как было показано выше (см. Табл. 5.4), родительская галактика GRB 980703 попадает в группу S2 локальных галактик со вспышкой звездообразования со средним $E(B-V) = 0.11 - 0.21$. По избытку цвета можно вычислить $A_{\rm V} = 0.4 - 0.85$ для SB-закона поглощения согласно Calzetti et al. (2000) и $A_{\rm V} = 0.3-0.65$ (как в Табл. 5.4) для MW-поглощения по Cardelli et al. (1989), что находится в согласии с величиной 0.3 ± 0.3, полученной Djorgovski et al. (1998), исходя из отношения Бальмеровских линий.

Мы предприняли теоретическое моделирование, используя сначала простейший сценарий *мгновенной вспышки* звездообразования с солнечной металличностью. Были получены следующие параметры, соответствующие наилучшей подгонке по потокам $BVR_{\rm c}I_{\rm c}$: возраст вспышечной (“burst") компоненты модели есть 3.0 Myr и ее масса $1.78 \cdot 10^8\,{\rm M}_\odot$, а для "старой" компоненты модели (для старого звездного населения) возраст и масса 2.5 Gyr и $1.78 \cdot 10^{10}\,{\rm M}_\odot$ соответственно. На Рис. 5.14 показаны результаты моделирования. Надо заметить, что наши $BVR_{\rm c}I_{\rm c}$ данные лучше подгоняются теоретическим спектром, чем шаблонным спектром S2 локальной галактики со вспышкой звездообразования из раздела 5.3 (см. Рис. 5.6). При этом из двух вариантов вычислений для MW и SB-законов поглощения следует, что распределение $BVR_{\rm c}I_{\rm c}$ потоков лучше описывается именно немонотонным MW-законом $k(\lambda)$ по Cardelli et al., нежели гладким в UV диапазоне SB-законом поглощения Calzetti et al. (Для этого закона наименьший $\chi^2_{\rm min}$/d.o.f. равен 17.16/4.)

При z=0.966 эффективная длина волны фильтра B (λ = 4448Å) соответствует λ = 2260Å в системе покоя галактики GRB 980703, то есть оказывается близко к центру ($\lambda \approx$ 2200Å) широкой полосы поглощения ("горба") в MW-законе $k(\lambda)$ Cardelli et al. (см. Рис. 5.8). Это позволяет нам сразу же выбрать определенный закон поглощения в ультрафиолетовой области спектра для этой родительской галактики. Таким образом, на Рис. 5.17 MW-закон проявляется как дефицит наблюдаемого потока в полосе B, соответствующий широкой (~FWHM фильтра B) полосе поглощения на $\lambda \approx$ 2200Å (в системе покоя галактики).

Кроме нашей фотометрии, мы провели также теоретическое моделирование с использованием доступных данных в инфракрасном диапазоне Bloom et al. (1998a), которые доложили результаты JHK фотометрии поля GRB 980703. Наблюдения были проведены с Keck/NIRC 7 августа 1998 UT, то есть позже, чем наши $BVR_{\rm c}I_{\rm c}$ наблюдения. Отсюда мы можем предположить, что эти JHK величины относятся уже к самой родительской галактике с пренебрежимо малым вкладом ОТ. На Рис. 5.15 изображены теоретические SED-ы, учитывающие эти инфракрасные наблюдения. Здесь использованы нуль-пункты JHK полос из Bessel & Brett (1998). Параметры моделей, соответствующих SED-ам с наименьшими $\chi^2_{\rm min}$/d.o.f., представлены в Табл. 5.8. Для сравнения на Рис. 5.14 показаны результаты моделирования с использованием только наших оптических BVR_cI_c данных (параметры моделей приводились выше). Как можно видеть из сравнения модельных результатов для BVR_cI_c и BVR_cI_cJHK подгонок (см. Рис. 5.15), мы должны стремиться использовать доступные IR данные при таком моделировании, если хотим сделать более точными оценки массы и возраста "старой" компоненты. Действительно, JHK полосы ($\lambda_{\rm eff} = 12370, 16464, 22105$ ÅÅ соответственно) соответствуют красной и IR области спектра в оптике в системе отсчета самой галактики при $z = 0.966$ где свет старого звездного населения доминирует и вклад вспышечной (“burst") компоненты (или молодых звезд) уже мал.

Максимум вклада от вспышечной компоненты модели лежит как раз в UV части спектра, которая при $z \sim 1$ соответствует наблюдениям в BVR_cI_c полосах. Из Рис. 5.14 и Рис. 5.15 видно, что фактически моделирование с учетом NIR не меняет ультрафиолетовую часть SED-а. Соответственно можно ожидать, что оценки общего темпа звездообразования SFR (и, в частности, массивного SFR) не сильно изменятся от того, насколько точно учитывается распределение энергии в инфракрасном диапазоне. В Табл. 5.8 приведены конечные результаты моделирования с учетом JHK фотометрии для родительской галактики GRB 980703.

Следуя нашему методу, мы предприняли теоретическое моделирование как для простейшей мгновенной вспышки звездообразования, так и для более сложного сценария *экспоненциального затухания* вспышки при двух металличностях $Z_\odot$ и $0.1Z_\odot$. Четыре варианта результатов моделирования представлены на Рис. 5.16, а параметры моделей, соответствующих этим шаблонным SED-ам с минимальными $\chi^2_{\rm min}$/d.o.f., даны в Табл. 5.8. Везде мы использовали BVR_cI_c и JHK данные вместе с наблюдаемым потоком в эмиссии [O II]3727Å (d.o.f. = 7). На Рис. 5.17 отдельно представлена ультрафиолетовая (в системе покоя галактики) часть спектра, наблюдаемая в BVR_cI_c полосах с параметрами только 2-х вариантов SED-ов, соответствующих самым маленьким $\chi^2_{\rm min}$/d.o.f.

Организация Табл. 5.8 такая же, как Табл. 5.6 и Табл. 5.7. Так же, как и в случае моделирования спектра родительской галактики GRB 970508, мы моделировали SED-ы для значений среднего поглощения $A_{\rm V}$ внутри и за пределами области, задаваемой реальным шаблоном S2 из Табл. 5.4. И как в предыдущем случае, мы нашли, что наилучшие теоретические шаблонные спектры (с минимальными $\chi^2_{\rm min}$/d.o.f.) во всех случаях попадают в эту S2-область (0.3 – 0.65).

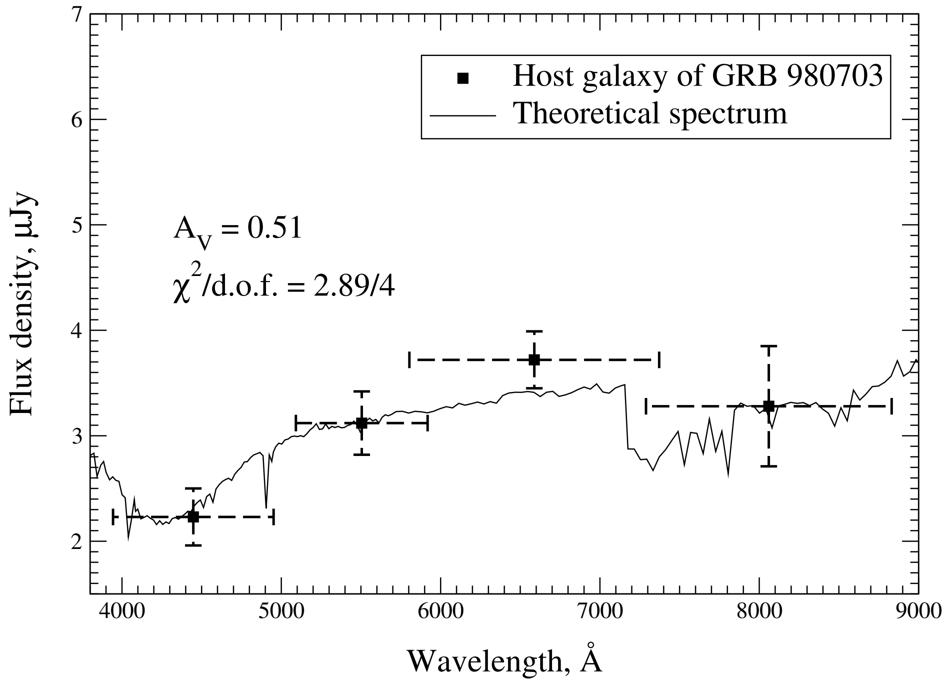


Рис. 5.14. Подгонка модельного SED-а только к BVR_cI_c фотометрии (без JHK) для галактики GRB 980703 в предположении, что справедлив MW-закон для $k(\lambda)$. Указаны наблюдаемые длины волн.

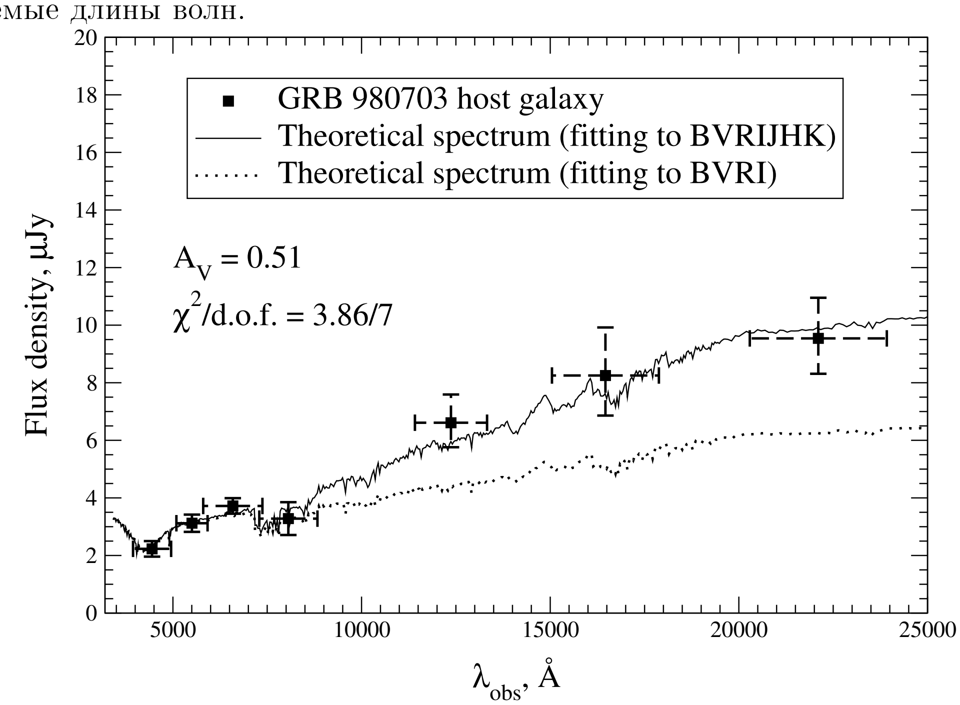


Рис. 5.15. Подгонка модельного SED-а к BVR_cI_c и JHK данным для галактики GRB 980703. Пунктиром показано, как пройдет модельный SED с Рис. 5.14, не учитывающий данные JHK Bloom et al. (1998a).

Как видно из Рис. 5.16, независимо от выбора сценария вспышки звездообразования, все шаблонные SED-ы с минимумом χ^2 получаются при близких/одинаковых значениях параметра экрана $A_{\rm V}$. Тем не менее, наилучшие подгонки наблюдаемого спектра получаются для SED-ов с солнечным химсоставом для экспоненциального и мгновенного сценариев вспышки при $A_{\rm V}$=0.64 и 0.51 (см. Рис 5.17). А наименьшие ($\chi^2_{\rm min}$/d.o.f.= 1.78/7) уклонения от наблюдаемых $BVR_{\rm c}I_{\rm c}JHK$ потоков (плюс поток в линии [O II]3727Å) получается для теоретического спектра, соответствующего галактике с экспоненциальной вспышкой звездообразования и возрастом несколько миллиардов лет (см. Табл. 5.8). Таким образом, можно выбрать этот вариант SED-а с $A_{\rm V} = 0.64$ для вычисления темпа звездообразования (SFR).

Но оказывается, что выбор определенного закона покраснения более важен для определения $A_{\rm V}$, чем выбор сценария вспышки. По крайней мере, это так в случае родительской галактики γ-всплеска GRB 980703. Как было уже отмечено выше, для этой галактики (с $z > 0.9$) мы имеем возможность сделать выбор внутреннего закона $k(\lambda)$ поглощения (в среднем по галактике), используя наши данные по $BVR_{\rm c}I_{\rm c}$ фотометрии. Действительно, как видно из Рис. 5.17, на длине волны B полосы наблюдается некоторый дефицит потока на уровне $\sim 3\sigma$ по отношению к R_c полосе. Если эту разницу потоков интерпретировать как наличие плосы поглощения на 2200Å в используемом (при расчете SED-в на Рис. 5.17) MW-законе поглощения, то можно прямо из рисунка оценить дефицит потока в B полосе по сравнению с потоком в R_c полосе. Этот дефицит потока в B равен 40% – 50% (для параметра экрана $A_{\rm V} = 0.51 - 0.64$ см. Рис. 5.17),что реально и наблюдается в нашем широкополосном $BVR_{\rm c}I_{\rm c}$ спектре.

Параметры двух родительских галактик γ-всплесков (GRB 970508 и GRB 980703) с учетом модельного анализа даны в таблице 5.9 и будут обсуждены более детально в разделе 6.5.

Таблица 5.8. К Рис. 5.16: параметры моделей, соответствующих 4-м теоретическим SED-ам с минимальными χ^2 для родительской галактики GRB 980703*

scen. SF	old component Age, Gyr	Mass, $M_\odot$	burst component Age, Myr	Mass, $M_\odot$	metallicity	[O II] model flux**	$\chi^2_{\rm min}$/d.o.f.	$A_{\rm V}$
inst.	3	$3.16 \cdot 10^{10}$	3	$1.78 \cdot 10^8$	$Z_\odot$	$27.8 \cdot 10^{-17}$	3.86/7	0.51
SF	1.8	$1.78 \cdot 10^{10}$	4	$1.78 \cdot 10^8$	$0.1 Z_\odot$	$27.4 \cdot 10^{-17}$	15.19/7	0.45
exp.	6 ($\tau = 350$Myr)	$3.16 \cdot 10^{10}$	16 ($\tau = 150$Myr)	$5.62 \cdot 10^9$	$Z_\odot$	$30.7 \cdot 10^{-17}$	1.78/7	0.64
SF	13 ($\tau = 50$Myr)	$3.16 \cdot 10^{10}$	40 ($\tau = 500$Myr)	$1.00 \cdot 10^{10}$	$0.1 Z_\odot$	$31.5 \cdot 10^{-17}$	4.10/7	0.45

* Параметры получены фиттингом $BVR_{\rm c}I_{\rm c}JHK$ данных плюс наблюдаемый поток в эмиссии [O II] $(30.4 \pm 3) \cdot 10^{-17}\,{\rm erg\,s^{-1}\,cm^{-2}}$ по Djorgovski et al. (1998).
** Теоретический поток в эмиссии [O II] в единицах erg $\rm s^{-1}\,cm^{-2}$.

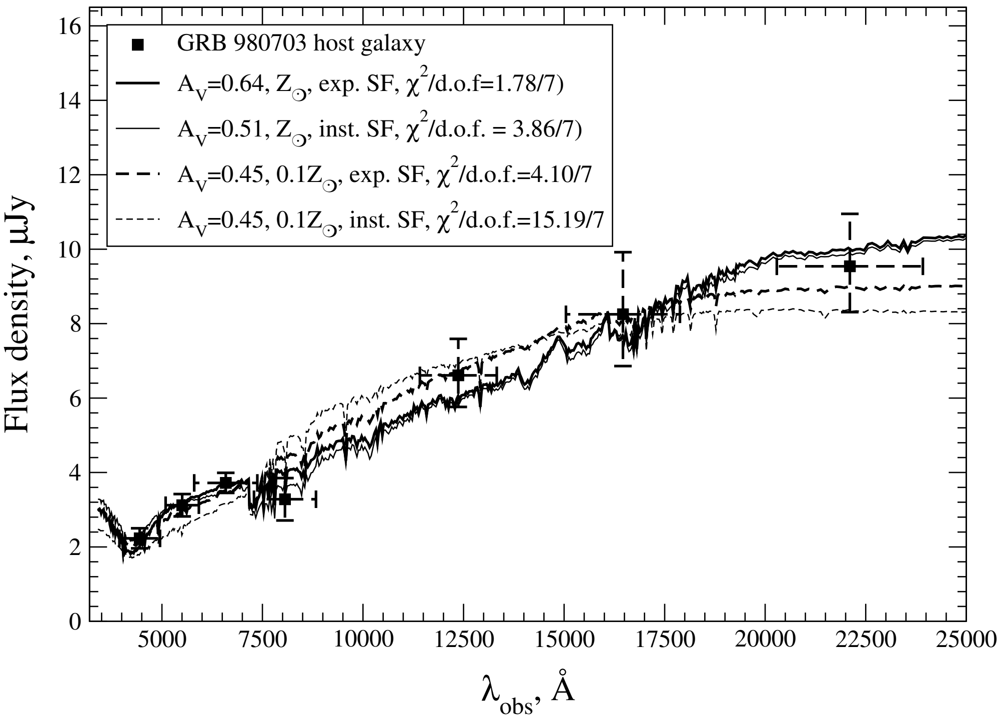


Рис. 5.16. Родительская галактика GRB 980703. Четыре варианта шаблонных SED-ов с минимальными $\chi^2_{\min}$/d.o.f. для MW-закона поглощения $k(\lambda)$. Использованы $BVR_{\rm c}I_{\rm c}$ и JHK данные вместе с наблюдаемым потоком в эмиссии [O II]3727Å (d.o.f. = 7).

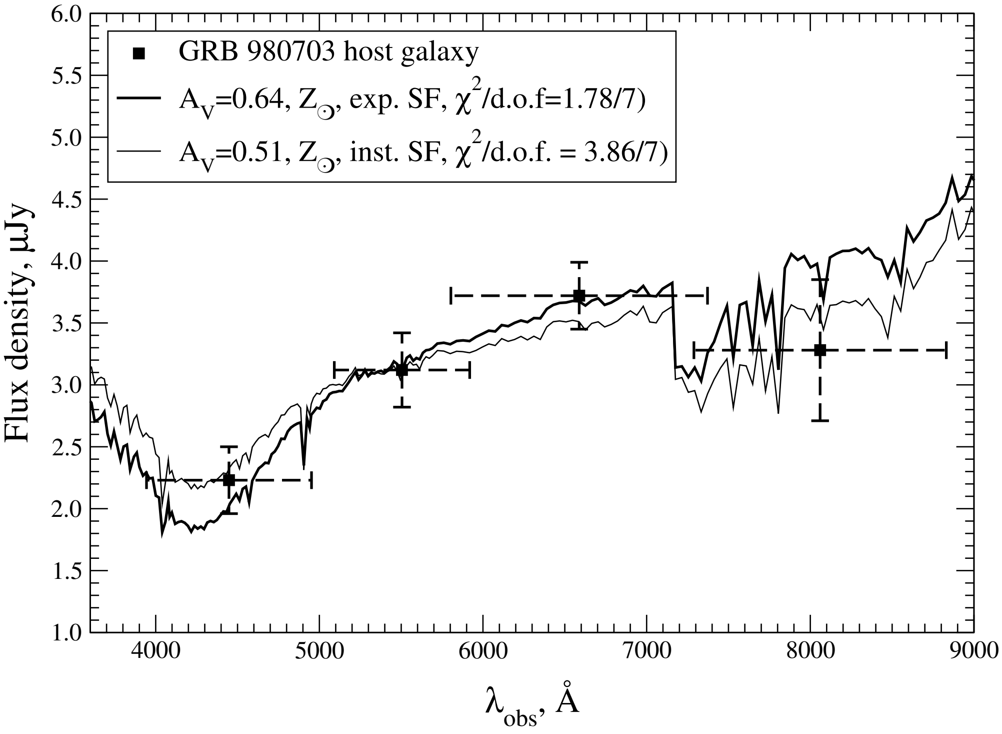


Рис. 5.17. Родительская галактика GRB 980703. Отдельно представлена ультрафиолетовая (в системе покоя галактики) часть спектра, наблюдаемая при $z = 0.966$ в $BVR_{\rm c}I_{\rm c}$ полосах, с параметрами только 2-х вариантов SED-ов, соответствующих самым маленьким $\chi^2_{\min}$/d.o.f., изображенным на Рис. 5.16.

Таблица 5.9. Выбранные параметры моделей и оценки SFR для двух родительских галактик.

Host	scenario	metallicity	Total mass	Age	A_V	observed SFR*	corrected SFR
GRB 970508	inst. SF	$0.1Z_\odot$	$3.48 \cdot 10^8$	160 Myr	1.6	$\geq 1.4\,M_\odot\,yr^{-1}$	$14\,M_\odot\,yr^{-1}$
GRB 970508	inst. SF	$0.1Z_\odot$	$2.78 \cdot 10^8$	80 Myr	2.43	$\geq 1.4\,M_\odot\,yr^{-1}$	$35.6\,M_\odot\,yr^{-1}$
GRB 980703	exp. SF	$Z_\odot$	$3.72 \cdot 10^{10}$	6 Gyr	0.64	$\geq 10\,M_\odot\,yr^{-1}$	$20\,M_\odot\,yr^{-1}$

* Наблюдаемый SFR был пересчитан для космологической модели с H_0=60 km·sec^{-1}·Mpc^{-1}, Ω_M=0.3 и Ω_Λ=0.7. по данным из Bloom et al. (1998b) и Djorgovski et al. (1998).

5.6. Оценки темпа звездообразования в родительской галактике γ-всплеска GRB 991208

В декабре 1999 г. (13 и 14-го) на 6-метровом телескопе САО РАН был получен спектр оптического компаньона GRB 991208 (он был уже показан на Рис. 1.5). В спектре были отождествлены 4 эмиссионных линии: [O II] 3727Å, Hβ 4861Å, [O III] 4959Å, 5007Å при красном смещении $z = 0.7063 \pm 0.0017$ (Dodonov et al. 1999). Найденные линии позволили нам оценить темп звездообразования (SFR), используя потоки в эмиссиях [O II] и Hβ. Табл. 5.10 представляет потоки в линиях и соответствующие SFR. Для оценок среднего SFR были использованы способы оценки предложенные Kennicutt (1998) по эмиссии [O II] и Pettini et al. (1998) по Hβ.

Более чем через 3 месяца после всплеска 31 марта 2000 г. на БТА были получены BVR_cI_c фотометрические данные для одной только родительской галактики, которые позволили нам оценить SFR некоторым независимым способом. Интерполированием между B и V полосами мы получили величину потока в непрерывном спектре на длине волны 2800Å в системе покоя галактики. Соответствующая спектральная плотность потока (см. также Рис. 5.5) равна 0.38 ± 0.09 μJy. Далее, полученные по критерию Madau et al. (1998) оценки SFR сведены в Табл. 5.10 для двух вариантов начальной функции масс (IMF).

Как видно из Табл. 5.10, есть существенная разница между оценками SFR, не учитывающими и учитывающими внутреннее поглощение. Для получения величины поглощения A_V мы здесь можем воспользоваться результатами раздела 5.3. (Устойчивость этих оценок теперь подтверждена и прямым моделированием SED-ов галактик GRB 970508 и GRB 980703.) Сравнение с распределением энергии реальных локальных галактик со

Таблица 5.10. Оценки темпа звездообразования (SFR) для галактики GRB 991208.

Line	Flux $10^{-16} \cdot \frac{erg}{cm^2 s}$	observed SFR $M_\odot\,yr^{-1}$	corrected SFR, $M_\odot\,yr^{-1}$ (SB, $A_V \geq 2.07$)	corrected SFR, $M_\odot\,yr^{-1}$ (MW, $A_V \geq 1.58$)
[O II] 3727Å	1.79±0.22	7.6±2.4	≥118	≥71
Hβ 4861Å	3.84±0.33	28.7±1.0	≥249	≥156
	UV	**continuum**	**on 31 March 2000**	
2800Å Salpeter IMF	0.38±0.09 μJy	1.46±0.34	≥44	≥24
2800Å Scalo IMF	0.38±0.09 μJy	2.26±0.54	≥68	≥38

вспышкой звездообразования показало, что широкополосный BVR_cI_c спектр родительской галактики GRB 991208 (очень похожей на GRB 970508 — см. конец разд. 5.3) наилучшим образом фитируется средним распределением энергии спектральной группы S5 галактик со звездообразованием. Для SED-а группы S5 избыток цвета $E(B-V)$ есть 0.51–0.60. Это соответствует в V полосе (в системе покоя галактики) поглощению A_V=2.25±0.18 и A_V=1.72±0.14 для SB и MW законов поглощения $k(\lambda)$ в родительской галактике.

Есть еще один независимый способ оценки SFR. Верхний предел для отношения Hγ/H β≤0.39 из спектра OT GRB 991208 (Рис. 1.5), что соответствует A_V ≥1.3 по Whitford (1958). Этот нижний предел согласуется с пределом, полученным по методу сравнения с реальным шаблоном S5. Здесь мы приняли, что теоретическая (неискаженная поглощением) величина отношения Hγ/Hβ равна 0.469±0.009.

В Табл. 5.10 (в последних двух колонках) даются величины SFR, исправленные за внутреннее поглощение, если мы примем нижние пределы для A_V=2.07 и A_V=1.58 для SB и MW законов поглощения $k(\lambda)$ соответственно, полученные по S5 подгонке. Эти величины выше на фактор ∼ 2, чем SFR полученные, Vreeswijk et al. (2000b) для одной из родительских галактик GRB 990712. И, как видно из Табл. 5.10, разница оценок SFR с учетом и без учета поглощения действительно должна быть.

Но и разные способы оценок полного SFR могут давать разные величины SFR — это тоже видно из Табл. 5.10. Во-первых, оценки SFR по светимости в [O II] λ3727 довольно чувствительны к плотности среды, где эти эмиссии формируются. Во-вторых, интенсивность небулярных эмиссий чувствительна к наличию более массивных звезд в областях звездообразования. Таким образом, эти оценки SFR дают "текущий" темп звездообразования для среднего временного интервала в несколько миллионов лет. (То есть в эмиссиях мы видим момент вспышки — см. Рис. 5.9.) С другой стороны, характерное время усреднения для оценок SFR по UV континууму порядка

10^8 лет. Так что сравнивая различные методы оценок, мы можем проследить историю звездообразования в галактике и из наших оценок, исправленных за поглощение SFR, мы можем заключить, что, вероятнее всего, родительская галактика GRB 991208 с сильными эмиссионными линиями (наблюдавшимися уже через 5 дней после всплеска) находится близко к пику вспышки энергичного звездообразования.

5.7. Обсуждение результатов: поглощение в галактиках, темпы звездообразования и светимости галактик

Таким образом, мы выполнили моделирование распределений энергии в спектрах (SED-ах) для родительских галактик γ-всплесков из нашего списка с самой малой (GRB 970508) и с самой большой (GRB 980703) светимостями (см. Табл. 5.11). Нашей основной целью было оценить влияние эффектов внутреннего поглощения в родительских галактиках. Как было сказано в разделе 5.5, эта задача решается в двух приближениях. Сначала (в первом приближении) была определена область значений $A_{\rm V}$ методом сравнения наблюдаемых широкополосных $BVR_{\rm c}I_{\rm c}$ спектров родительских галактик с шаблонными спектрами локальных галактик со вспышкой звездообразования (с известными значениями $E(B-V)$). Во втором приближении мы предприняли теоретическое моделирование спектров или вычисление теоретических шаблонов спектров, которое позволило (с учетом потока в эмисии [O II] 3727Å) для определенного закона поглощения в галактике выбрать величину $A_{\rm V}$ из найденного в 1-м приближении интервала значений.

Наиболее подходящие модели, хорошо описывающие наблюдения для этих двух родительских галактик с определенными $A_{\rm V}$, представлены в Табл. 5.9. Предел снизу для SFR ($>1\,{\rm M}_\odot\,{\rm yr}^{-1}$) из светимости в эмиссионной линии [O II] 3727Å в спектре галактики GRB 970508 был получен Bloom et al. (1998b). В Табл. 5.9 мы привели этот предел к шкале космологической модели H_0=60 km$\cdot$sec$^{-1}\cdot$Mpc^{-1}, $\Omega_{\rm M}$=0.3 и Ω_Λ=0.7 (SFR$\geq$ $1.4\,{\rm M}_\odot\,{\rm yr}^{-1}$), а затем исправили SFR для выбранного $A_{\rm V}=1.6$. Точно так же и для галактики GRB 980703. Предел для SFR, который получили Djorgovski et al. (1998) по светимости в линии H_β и по потоку на 2800Å в UV континууме ($>7\,{\rm M}_\odot\,{\rm yr}^{-1}$), мы привели к "стандартной" космологической модели ($\geq 10\,{\rm M}_\odot\,{\rm yr}^{-1}$), а затем уточнили это значение для нашего $A_{\rm V}=0.64$.

Ниже будет обоснован выбор именно этих моделей (в Табл. 5.9) с определенными A_V и обсуждены результаты всей главы в целом.

Родительская галактика GRB 970508. Как было отмечено в разделе 5.5.2, в случае галактики GRB 970508 остается некоторая неопределенность в выборе закона $k(\lambda)$. В первом приближении мы выбрали области значений $A_{\rm V}$ для двух типов внутреннего поглощения: $A_{\rm V} = 2.0 - 2.43$ для гладкого в UV SB-закона и $A_{\rm V} = 1.5 - 1.86$ для MW-закона внутреннего поглощения $k(\lambda)$. Второе приближение — моделирование спектров было предпринято для двух этих вариантов поглощения и минимальный χ^2 для подгонки к наблюдаемому $BVR_{\rm c}I_{\rm c}$ (плюс линия [O II] 3727Å) в обоих случаях оказывался внутри этих интервалов для $A_{\rm V}$. Мы нашли, что для MW-закона поглощения величина $A_{\rm V}$ не зависит от выбора сценария звездообразования и металличности, тогда как для SB-закона Calzetti et al. (для бóльшего поглощения) такая зависимость ясно видна.

Как можно видеть из Табл. 5.6 (бóльшее в среднем $A_{\rm V}$), в некоторых случаях минимум χ^2 соответствует моделям с массой вспышечной компоненты того же порядка, что и масса старой компоненты или даже с большей массой. Кажется, что такие варианты маловероятны для реальных галактик. Ясно, что необходимо очень большое количество газа в галактике, чтобы началось формирование такой массивной звездной популяции. Как видно из таблиц, для объяснения наблюдаемого спектра начальная масса газа должна превышать полную массу галактики в таких моделях в несколько раз, что действительно кажется маловероятным. Но с другой стороны, эта ситуация может, быть имеет, место в случае первичных галактик, то есть галактик, в которых происходит первая вспышка звездообразования. Можно иметь ввиду и такую возможность, но наблюдения не подтверждают (массовое) формирование первичных галактик на z=0.835 в любом случае.

Все варианты счета наиболее близких по спектру к реальной галактике GRB 970508 моделей указывают на молодую галактику в стадии вспышки звездообразования. Модели с мгновенной вспышкой: с металличностью $Z_\odot$ и $A_{\rm V} = 2.07$, или с $0.1 Z_\odot$ и с $A_{\rm V} = 2.43$ из Табл. 5.6 могут, по-видимому, использоваться для оценки максимального поглощения (и SFR) в этой галактике, если взять SB-закон $k(\lambda)$. А результаты счета с тем же сценарием (с мгновенной вспышкой) для двух металличностей с меньшим средним поглощением $A_{\rm V} = 1.6$ из Табл. 5.7 можно выбрать как некоторую нижнюю оценку поголощения и SFR в галактике, если принять MW-поглощение. Если возвратиться к возрастам старых компонент модели, то можно заметить, что все теоретические шаблонные SED-ы соответствуют молодым галактикам, что, в свою очередь, ведет к заключению о выборе (из всех имеющихся вариантов с малыми χ^2) в пользу варианта с более низкой металличностью, чем солнечная. Из этого рассмотрения следует, что SED из Табл. 5.7 со следующими параметрами: мгновенной вспышкой звездообразования, металличностью $0.1Z_{\odot}$, $A_{\rm V} = 1.6$ для MW-закона поглощения, — наиболее приемлемая модель. Параметры галактики для такого варианта поглощения и соответствующие неисправленные (наблюдаемые) и исправленные за поглощение полные SFR приведены в Табл. 5.9. Хотя не исключается и другой ("максимальный") вариант модели для этой галактики из Табл. 5.6 с такой же металличностью, с примерно такой же (полной) массой и вспышкой звездообразования, произошедшей (или начавшейся) 4 миллиона лет назад, и с наибольшим поглощением $A_{\rm V} = 2.43$. Эта модель тоже включена в Табл. 5.9: для такого варианта SFR достигает $35.6\,{\rm M}_{\odot}\,{\rm yr}^{-1}$. Таким образом, из-за неопределенности с выбором закона поглощения для этой галактики, SFR для нее может быть от $14\,{\rm M}_{\odot}\,{\rm yr}^{-1}$ до $35.6\,{\rm M}_{\odot}\,{\rm yr}^{-1}$ (в "момент" наблюдений). В принципе, не исключаются и другие варианты моделей из Табл. 5.6 со значениями SFR из этого интервала.

Теперь мы снова вернемся к оценкам центральной поверхностной яркости и размеров этой галактики, которые были сделаны в конце 4-й главы, поскольку наше исследование родительской галактики GRB 970508 было бы неполным, если бы мы не упомянули здесь последние результаты исследования ее морфологии. Здесь мы еще раз уточним положение этой галактики на диаграмме "абсолютная величина M_B vs. линейный диаметр $\log D_{25}$" для (локальных) галактик типов Sbc-Sc, Scd-Sd, Sm и Irr, выбранных из каталога LEDA (на Рис. 4.7 в разделе 4.6). Как было показано в статье Fruchter et al. (2000a), посвященной специальному исследованию распределения поверхностной яркости, галактика GRB 970508 наилучшим образом представляется моделью диска с экспоненциальным распределением поверхностной яркости от ее центра. Был уточнен характерный/масштабный параметр (или характерный радиус) экспоненциального диска r_0, который после коррекции за HST/STIS PSF равен $0''\!.046 \pm 0.006$. Используя соотношение $25 - \mu_0 = \frac{r_{25}}{r_0} 2.5 \log(e)$ между центральной поверхностной яркостью μ_0, изофотальным угловым (в arcsec) радиусом r_{25} на 25 mag/arcsec^2 (соответствующим изофоте с поверхностной яркостью 25 mag/arcsec^2) и масштабным параметром диска r_0, зная r_{25}, можно оценить μ_0.

Величину изофотального углового радиуса r_{25} можно получить прямо из Fig. 2 в работе Frucher et al. (2000a), $r_{25} \approx 0''\!.25$. Тогда μ_0 должна быть около 19.1 mag/arcsec^2 (в полосе близкой, к стандартной V). Теперь можно проверить положение родительской галактики GRB 970508 на диаграмме "$M_{\rm B}$ vs. линейный размер $\log D_{25}$" (Рис. 4.7). Для выбранной космологической модели с H_0=60 km·sec^{-1}·Mpc^{-1}, $\Omega_{\rm M}$=0.3 и Ω_Λ=0.7 мы получили $M_{\rm B} = -18.6$ (см. Табл. 5.11) и соответствующее $\log D_{25} = 0.65$ ($D_{25} = 4.46$ kpc). С такими параметрами галактика оказывается внутри областей (связанных с неопределенностями в оценках как $M_{\rm B}$, так и $\log D_{25}$), обозначенных на Рис. 4.7 прямоугольниками, которые мы получили на основании предварительных результатов Fruchter et al. (1998) в 4-й главе. Таким образом, из анализа центральной поверхностной яркости следует, что она значительно выше для галактики GRB 970508, чем для аналогичных локальных галактик (кроме галактик Mrk), что наверняка связано с более энергичным вспышечным звездообразованием в ней. Тем не менее, надо заметить, что анализ поверхностной яркости был сделан для объекта размером одного порядка с FWHM of HST/STIS PSF. Отсюда и неопределенность в точной оценке центральной поверхностной яркости этой галактики. Поэтому в качестве нижней оценки надо все-таки иметь ввиду μ_0 =20.4 mag/arcsec^2 из разд. 4.6.

Кроме высокой поверхностной яркости из высокого отношения потоков в эмиссионных линиях [NeIII]/[OII]$= 0.44 \pm 0.05$ в спектре этой галактики следует, что можно предположить в ней короткоживущую популяцию массивных и горячих звезд (Bloom et al., 1998b) . Все это вместе согласуется и с результатами нашего моделирования наблюдаемого $BVR_{\rm c}I_{\rm c}$ спектра, подтверждая то, что родительская галактика GRB 970508 — это действительно молодая галактика с активным (вспышечным) звездообразованием. А учет величины внутреннего поглощения позволяет точнее вычислить исправленное значение полного SFR, увеличивая его в десятки раз (см. Табл. 5.9.) по сравнению с неисправленными данными.

Родительская галактика GRB 980703. Как было показано в разделе 5.5.3, в случае родительской галактики GRB 980703 наблюдательные данные дают возможность сразу выбрать определенный закон поглощения $k(\lambda)$, такой же, как и в нашей Галактике (Cardelli et al. 1989). Таким образом, во втором приближении мы исследовали лишь одну область для $A_{\rm V} = 0.3 - 0.65$ mag, которая была выбрана по шаблонному спектру локальной галактики типа S2 (см. Табл. 5.4). Как можно видеть из Рис. 5.16, теоретические шаблоны с металличностью $0.1Z_\odot$ систематически отклоняются от наблюдаемых $BVR_{\rm c}I_{\rm c}JHK$ потоков, особенно в $BVR_{\rm c}I_{\rm c}$ полосах и потом в K-полосе. Таким образом, варианты с низким содержанием металлов можно дальше не рассматривать. А тот факт, что $BVR_{\rm c}I_{\rm c}JHK$ данные наилучшим образом описывают модели с солнечной металличностью, естественно объясняется возрастом старой компоненты звездного населения галактики. Действительно, период времени порядка 6 Gyr уже достаточен, чтобы обогатить межзвездную среду тяжелыми элементами. Более того, существование широкой полосы (см. Рис. 5.8) поглощения графита на длине волны 2200Å (в системе покоя галактики, см. Рис. 5.17) снова согласуется с солнечной металличностью (необходимое условие образования графитовой пыли). Таким образом, наиболее приемлемые параметры родительской галактики GRB 980703, соответствующие наименьшему значению χ^2/d.o.f.= 1.78/7 уклонений теоретического от наблюдаемого спектра BVR_cI_cJHK (плюс поток в эмиссии [O II] 3727Å), приводятся в Табл. 5.9.

Как и для родительской галактики GRB 970508, если внутреннее поглощение известно, мы можем оценить SFR с учетом этого фактора. Как следовало из работы Djorgovski et al. (1998), нижний предел для полного SFR в галактике GRB 980703 около $7\,\mathrm{M_\odot\,yr^{-1}}$, который был получен из светимости в H_β эмиссии и по потоку на 2800Å в UV континууме. Здесь мы, используя MW-закон поглощения по Cardelli et al. (1989), для $A_\mathrm{V} = 0.64$ получили полный SFR около $20\,\mathrm{M_\odot\,yr^{-1}}$ в "стандартной" космологической шкале. (С учетом космологической модели используемой в статье Djorgovski et al. (1998) это соответствует SFR $\approx 14\,\mathrm{M_\odot\,yr^{-1}}$.)

Но нужно отметить, что данные радионаблюдений галактики GRB 980703 на 1.43, 4.86 и 8.46 GHz, полученные позже на VLA, показали значительно бóльшую величину полного (от $0.1\mathrm{M_\odot}$ до $100\mathrm{M_\odot}$) SFR. Как было показано Berger et al. (2001), полный SFR достигает $\approx 500\,\mathrm{M_\odot\,yr^{-1}}$. Для того, чтобы согласовать значения SFR, полученные из оптических и радиоданных, требуется поглощение около $A_\mathrm{V} \sim 4.5$ (Berger et al., 2001) в системе отсчета галактики, что значительно выше, чем было получено нами $A_\mathrm{V} = 0.64$. Как замечают авторы (Berger et al., 2001) в связи с нашими результатами, оптика не отслеживает звездообразование в галактике в его полном объеме. Это просто означает, что есть скрытые (с $A_\mathrm{V} \sim 4.5$) сильным поглощением пыли и газа компактные области звездообразования, которые себя никак в оптике не проявляют, зато могут переизлучать UV массивных звезд в другие диапазоны. (О скрытом звездообразовании см. ниже.) Т. о., величина поглощения по всей галактике может сильно варьировать. Близкая к центру галактики (с наибольшей поверхностной яркостью) область звездообразования имеет наибольшее поглощение, а периферия галактики может быть более прозрачна. Поэтому в любом случае мы измеряем поглощение, усредненное по всему изображению галактики. Компактные, сильно запыленные области звездообразования с очень высоким $A_{\rm V} = 4.5$ просто не дают никакого вклада в оптический спектр, они наблюдаются в других диапазонах. И естественно, что выбор MW-закона поглощения $k(\lambda)$ (Рис. 5.8) с широкой полосой поглощения графита на длине волны 2200Å (Рис. 5.17), которая проявляется в наблюдаемом нами дефиците потока фильтре B, согласуется и с солнечной металличностью и с наблюдением в радиодиапазоне этой галактики области скрытого сильным поглощением (пыль, газ) звездообразования.

Кроме того, в оценках SFR GRB 980703 (Djorgovski et al. 1998) в Табл. 5.9 был использован критерий Madau et al. (1998) для определения полного темпа звездообразования по потоку на 2800Å, исправленному за среднее $A_{\rm V}$. Но, как сейчас ясно, этот поток должен быть уменьшен (в фильтре V) еще и присутствием широкой полосы поглощения (графитовой пылью?), что приводит к заниженной оценке SFR. К тому же, как видно из результатов оценок SFR разными способами для галактики GRB 991208 (Табл. 5.10) в разделе 5.6, критерий Madau et al. дает сам по себе заниженную в несколько раз среднюю оценку SFR, которая не соответствует "мгновенному" значению темпа звездообразования (из-за вклада в UV континуум излучения маломассивных A звезд). Т. о., как видно из расчетов SFR для галактики GRB 991208 (Табл. 5.10), такие высокие величины SFR, какие наблюдаются в галактике GRB 980703, могут быть получены не только из радионаблюдений. Потоки в эмиссионных линиях в спектре родительской галактики GRB 991208 соответствуют исправленному за поглощение SFR в $100 - 200\,{\rm M}_{\odot}\,{\rm yr}^{-1}$ или даже выше. И в случае родительской галактики GRB 990712 определенный по линиям эмиссионного спектра и исправленный за внутреннее поглощение SFR оказался довольно высоким, около $60\,{\rm M}_{\odot}\,{\rm yr}^{-1}$ (Vreeswijk et al. 2001).

Завершая обсуждение результатов исследования параметров родительской галактики GRB 980703, мы, так же как и для родительской галактики GRB 970508, приведем здесь результаты анализа поверхностной яркости и для этой галактики. Как было получено Holland et al. (2001) по итогам обработки HST/STIS данных, фотометрический профиль этой галактики наилучшим образом фитируется экспоненциальным диском с характерным размером (радиусом) $r_0 = 0\farcs22$ и центральной поверхностной яркостью $\mu_0 \approx 20.4$ mag/arcsec^2. Вычитание подгонки с эллиптическими изофотами показало, что для этой галактики остается некоторая иррегулярность. А в целом, из анализа поверхностной яркости и морфологии Holland et al. (2001) можно заключить, что родительская галактика γ-всплеска GRB

980703 представляет собой типичный пример галактики со звездообразованием, подобную таким же далеким ($z \sim 1$) галактикам, которые обычно находят на глубоких Хаббловских снимках (Hubble Deep Field). Что же касается сравнения с локальными галактиками, то оказывается, что положение этой галактики с самой большой светимостью (из Табл. 5.11) $M_B = -21.3$ на диаграмме "абсолютная величина M_B vs. линейный диаметр $\log D_{25}$" для (локальных) галактик типов Sbc-Sc, Scd-Sd, Sm и Irr, выбранных из каталога LEDA (на Рис. 4.7 в разделе 4.6), оказывается близким к положению Mrk 1267 при диаметре соответствующем изофоте с поверхностной яркостью 25 mag/arcsec^2, $D_{25} \approx 16.6$ kpc для галактики GRB 980703.

Общие результаты моделирования. Суммируя результаты моделирования спектров двух галактик, мы подчеркнем здесь, что из-за большого космологического красного смещения наша BVR_cI_c фотометрия родительских галактик γ-всплесков покрывает только ультрафиолетовую/голубую часть спектра этих объектов. Для более точного моделирования, как было показано на примере родительской галактики GRB 980703, необходимы данные UV (в системе галактики) и IR наблюдений (плюс радионаблюдения), что представляет нетривиальную задачу для этих объектов с низкими наблюдаемыми потоками. И тем не менее, как было показано выше, наши BVR_cI_c фотометрические точки находятся в прекрасном согласии со спектрами родительских галактик и это позволяет считать, что наше моделирование во многом достаточно, чтобы описать основные черты звездообразования в этих галактиках. Именно далекий UV диапазон этих галактик становится все более чувствительным к массивному звездообразованию. Кроме того нужно сказать, что спектральный диапазон BVR_cI_c (в системе отсчета, где галактика покоится) еще и очень чувствителен к особенностям в законе внутреннего поглощения (пылью и газом). И, как было показано в разделе 5.5.3, при подходящем z возможно даже отличить разные законы $k(\lambda)$.

В нашем методе моделирования были выбраны самые простые сценарии звездообразования. Конечно, реальные сценарии могут быть значительно разнообразнее. Например, в работе Glazebrook et al. (1999) из анализа отношения потока в UV диапазоне к потоку в эмиссионной линии H_α показано, что история вспышечного звездообразования галактики может иметь некоторую повторяющуюся форму ("пилы"). Наш же упрощенный сценарий с одной вспышкой может привести к переоценке возраста и массы старого звездного населения. Вдобавок есть еще некоторая неопределенность в задании IMF (начальной функции масс), хотя точная форма звездной

IMF в галактиках со вспышкой звездообразования — открытый вопрос. По-видимому, для проблемы звезд-прародителей γ-всплесков очень важно знать верхний предел масс звезд в IMF, поскольку очевидно, что далекая UV ультрафиолетовая часть спектра, которую мы моделируем, сильно зависит от точного выбора этого предела. (Мы взяли значение верхнего предела равным $120M_{\odot}$.) И, как уже было отмечено выше (в том числе и в разд. 5.5.3), при моделировании очень существенно иметь IR данные для более уверенной оценки вклада старого звездного населения в результирующий теоретический SED.

Поглощение в галактиках, "темные" γ-всплески и скрытое звездообразование. Одно интересное следствие нашего моделирования с учетом внутреннего поглощения может быть связано с проблемой так называемых "темных" γ-всплесков ("dark" GRBs). Из примерно 30-ти γ-всплесков с рентгеновским послесвечением, обнаруженных с помощью спутника BeppoSAX, $60 \pm 15\%$ не имеют оптических послесвечений (или OT) и их отсутствие нельзя объяснить ни неблагоприятными наблюдательными условиями, ни задержкой с началом оптических наблюдений (Lazzati et al. 2001; см. также Fynbo et al. 2001). Как это подробно обсуждено в статье Ramirez-Ruiz et al. (2001), случаи отсутствия детектирования оптического послесвечения могут быть объяснены двумя модами звездообразования. Первая мода — это звездообразование в галактиках, ярких в далеком инфракрасном и в субмиллиметровом диапазонах, а вторая мода звездообразования — это галактики, которые показывают сильный UV континуум. Первая мода (массивного) звездообразования связана с очень большим внутренним поглощением (например, как в мощном центральном источнике такой галактики, как Arp 220 с A_V больше чем, 30 зв. величин), которое приводит к переизлучению ультрафиолета массивных звезд в далекую инфракрасную и субмиллиметровую области спектра. Предполагается, что и галактики с большими z, которые обнаруживаются в субмиллиметровом диапазоне, должны иметь свойства, подобные локальным галактикам типа Arp 220. Это так называемые ULIG/ULIRG галактики (UltraLuminous InfraRed Galaxies), которые светят в основном только в инфракрасном диапазоне. Из-за высокого значения внутреннего поглощения в сильно запыленных областях звездообразования таких галактик оптическое послесвечение γ-всплесков в них, если прародителями всплесков являются массивные звезды, может быть надежно скрыто окружающей звезды-прародители средой и мы не будем видеть OT в оптике.

Выше было показано, что среднее внутреннее поглощение обсуждаемых здесь родительских галактик γ-всплесков большое ($A_V \sim 2$ mag в наших моделях или $A_V \sim 3$ по оценкам Vreeswijk et al., 2001), но не такое огромное как, в ULIRG галактиках. Все обсуждаемые галактики из Табл. 5.1 (с учетом $z \sim 1$) имеют сильный UV континуум, благодаря чему они хорошо обнаруживаются в оптике при экспозициях не больше часа. По-видимому, родительские галактики, в которых оптические транзиенты были найдены, относятся к галактикам второй моды звездообразования в них. Тем более очень интересно, что в одной из наших галактик GRB 980703 был впервые найден нетранзиентный радиоисточник. Используя корелляцию между радиосветимостью и светимостью в далеком инфракрасном диапазоне (FIR) для галактик со звездообразованием, Berger et al. (2001) нашли, что ее FIR светимость должна быть $L_{\rm FIR} \approx 3 \times 10^{12} L_{\odot}$. Это позволяет по этой светимости отнести родительскую галактику GRB 980703 к категории ULIG галактик, но со стороны слабых в функции светимости таких объектов. Можно предположить, что эта галактика переходного типа между яркими в UV и настоящими ULIG галактиками. Главное, что $L_{\rm FIR}$ галактики GRB 980703 объясняется как раз массивным звездообразованием (звезд с массами более $5M_{\odot}$) и с темпом $\approx 90\,M_{\odot}\,{\rm yr}^{-1}$ (Berger et al. 2001) в компактной области вблизи центра этой галактики, где наблюдается этот VLA радиоисточник и куда проецировалось положение OT γ-всплеска. Таким образом, из обсуждения оценок SFR с учетом скрытого звездообразования должен следовать не просто вывод об исправленных за поглощение темпах полного SFR, бóльших, чем без учета A_V. Самое главное, что это могут быть галактики с повышенным темпом SFR именно *массивного звездообразования.* К тому же есть явная связь между γ-всплесками и H II областями (Ahn 2000, о таком эффекте сказано и в разд. 5.3), родительскую галактику GRB 990712 прямо относят к H II галактикам (Vreeswijk et al. 2000b), что снова указывает на связь между γ-всплесками и массивным звездообразованием. А отсюда уже недалеко и до уверенного (главного) вывода, что именно массивные звезды являются прародителями длинных γ-всплесков. (Прямые аргументы в пользу такого вывода будут приведены в 6-й главе.)

Средняя/типичная светимость L_* родительских галактик. Для восьми родительских галакик в Табл. 5.1 мы имели достаточно наблюдательных данных для более-менее корректных оценок абсолютных голубых B величин в их собственных (где $z = 0$) системах отсчета (Табл. 5.11). Чтобы окончательно выяснить, чем же отличаются родительские галактики от других, надо сравнить полученные светимости галактик из Табл. 5.11 с L_*, где L_* соответствует светимости типичной галактики вблизи "колена" локальной функции светимости. Как и в статье Pian et al. (1998), мы приняли, что галактика с L_* имеет $M_{\mathrm{B}_*} \approx -21$. (Это соответствует тому, что мы брали в предыдущей главе: $M^*_{\mathrm{gen}} \approx -20.8$ для общей — Шехтеровской функции светимости локальных галактик.) В Табл. 5.11 для космологической модели с H_0=60 km·sec^{-1}·Mpc^{-1}, Ω_{M}=0.3 и Ω_Λ=0.7 мы взяли наши данные из Табл. 5.5 и в этой же шкале представили результаты оценок $M_{\mathrm{B}_{\mathrm{rest}}}$ других авторов. Наши определения $M_{\mathrm{B}_{\mathrm{rest}}}$ имеют типичные ошибки 0.1 – 0.2 зв. величины (для выбранной космологии, см. Табл. 5.5), неопределенности оценок $M_{\mathrm{B}_{\mathrm{rest}}}$ у других авторов могут достигать от 0.3 до 0.4 зв.вел., что связано как с переходом от одной к другой (к "стандартной") космологической шкале расстояний, так и с корректным учетом K-поправки — это подробно обсуждалось в разд. 5.4.

Таблица 5.11. Наблюдаемые и абсолютные звездные величины родительских галактик.

Host	набл. вел. R	абс. вел. $M_{\mathrm{B}_{\mathrm{rest}}}$	ссылки
GRB 970228	24.6±0.2	-18.6	R: Galama et al. (2000)
			$M_{\mathrm{B}_{\mathrm{rest}}}$: Bloom et al. (2000b)
GRB 970508	24.99±0.17	-18.6	этот текст
GRB 971214	25.69±0.3	-21.1	R: этот текст
			$M_{\mathrm{B}_{\mathrm{rest}}}$: Kulkarni et al. (1998)
GRB 980613	23.58±0.1	-20.8	этот текст
GRB 980703	22.30±0.08	-21.3	этот текст
GRB 990123	24.47±0.14	-20.9	этот текст
GRB 990712	21.80±0.06	-19.9	Hjorth et al. (2000)
GRB 991208	24.36±0.15	-18.8	этот текст

Кроме того, что величины $M_{\mathrm{B}_{\mathrm{rest}}}$, опубликованные другими авторами, были пересчитаны в нашу космологическую шкалу (что уже вносит свою ошибку, см. Табл. 5.5), эти значения голубых обсолютных величин были получены еще и разными способами. Bloom et al. (2000b) вычислили абсолютную величину из наблюдаемого континуума в системе покоя галактики. Kulkarni et al. (1998) использовали предположение, что спектр родительской галактики можно приближенно представить $F_\nu \propto \nu^{-0.7}$ и, экстраполируя наблюдаемую R величину, перейти к B. То есть они вычислили $M_{\mathrm{B}_{\mathrm{rest}}}$ фактически тоже по (предполагаемому) континууму родительской галактики. В случае родительской галактики GRB 990712 $M_{\mathrm{B}_{\mathrm{rest}}}$ была выведена Hjorth et al. (2000) в предположении, что для $z = 0.434$ наблюдаемый поток в полосе R приближенно эквивалентен потоку в B-полосе в системе отсчета самой галактики. Заметим, что наши оценки были сделаны с использованием спектров реальных галактик со вспышкой звездообразования при вычислении K-поправки в разделе 5.4.

Недавно обсуждавшийся в литературе эффект (Pian et al. 1998, Sokolov et al. 2001 и ссылки в этих статьях) состоял в том, что при сравнении M_{B_*} и $M_{\mathrm{B}_{\mathrm{rest}}}$ из Табл. 5.11 можно было заключить, что светимости родительских галактик GRB 970228, GRB 970508 и GRB 991208 равны $\sim 0.1 \cdot L_*$, а родительские галактики γ-всплесков GRB 980613, GRB 980703 и GRB 990123 имеют светимости близкие к L_*. По крайней мере, кажется, что светимости этих GRB-галактик наверняка не лежат выше "колена" локальной функции светимости галактик. Этот эффект легко объяснить поглощением, которое неизбежно присутствует в галактиках с энергичным звездообразованием.

Здесь было показано, что внутреннее поглощение в родительских галактиках γ-всплесков может быть значительным. И сравнение с локальными SED-ами галактик со звездообразованием, и наше моделирование спектров демонстрируют влияние покраснения этих объектов в голубой (ультрафиолетовой) области их (rest frame) спектра. С учетом результатов моделирования, оценки внутреннего поглощения в собственной (rest-frame) полосе B родительских галактик GRB 970508 и GRB 980703 приводят к экранированию потоков в этой полосе $A_{\mathrm{B}} = 2.14$ и $A_{\mathrm{B}} = 0.86$ зв. величины соответственно. Тогда "исправленные" абсолютные величины для этих галактик будут равны $M_{\mathrm{B}_{\mathrm{rest}}} \approx -20.7$ и $M_{\mathrm{B}_{\mathrm{rest}}} \approx -22.0$ соответственно и поправка на внутреннее экранирование может "увеличить" светимости этих галактик до ~ 1 зв.величины, поднимая ее над типичным значением $M_{\mathrm{B}_*} \approx -20.8$ (для локальных галактик). Таким образом, наблюдательный факт пониженной светимости родительских галактик ("underluminous-эффект" ~ 0.1 L_*) по сравнению со средней светимостью локальных галактик просто связан с ослаблением (внутренним экранированием) потоков в UV и в оптике пылью и газом в областях звездообразования этих галактик. А это в свою очередь значит, что звездообразование в них идет в целом более энергично, чем в близких (локальных) галактиках.

Но на самом деле, как мы отмечали (Sokolov et al. 1999) в разд. 4.7, никакого "underluminous-эффекта" может и не быть, если сразу сравнивать светимости этих галактик, но не с Шехтеровской функцией светимости *всех* локальных галактик, а иметь дело *только* с функцией светимости локальных галактик со звездообразованием. Величина M_{B_*} (или M^*_{gen}) все-таки соответствует общему распределению по светимостям, куда входят все типы (локальных) галактик — от ранних эллиптических до самых поздних спиральных и иррегулярных галактик со звездообразованием. С другой стороны (по Binggeli et al. 1988), функция светимости существенно зависит от типа галактики. Как уже отмечалось выше, в частности, для галактик Sd + Sm + Irr колено функции светимости соответствует $M^*_{\rm late} \approx -18$, откуда следует, что светимость самой слабой в Табл. 5.11 родительской галактики (GRB 970228, GRB 970508) уже оказывается не ниже средней светимости, она оказывается даже выше колена локальной функции светимости $M^*_{\rm late}$ для галактик позднего типа. Остальные галактики из Табл. 5.11 оказываются еще ярче и настоящий эффект может как раз состоять в том, что светимости родительских галактик в целом лежат выше (до $\sim 10 \times L^*_{\rm late}$ и больше) светимостей близких галактик со звездообразованием. Таким образом, уже из такого сравнения может следовать, что поскольку вообще *все* (или почти все) далекие галактики показывают более энергичное звездообразование, чем локальные, то и наши родительские галактики γ-всплесков здесь не являются исключением. Действительно, как следует из результатов исследования эволюции звездообразования Glazebrook et al. (1999) (см. также Blain & Natarajan 2000), средний темп звездообразования на $z = 1$ составляет $\sim 20-60\,{\rm M}_{\odot}\,{\rm yr}^{-1}$, что согласуется с нашими индивидуальными оценками SFR для родительских галактик γ-всплесков.

Интересно еще сравнить наши $M_{\rm B_{rest}}$ величины из Табл. 5.11 с результатами недавней работы Fried et al. (2001) по изучению светимостей далеких галактик, т.е. сравнить *далекие с далекими* же галактиками. Эти авторы представили свои результаты по обзору CADIS, которые включают исследование функции светимости и получение среднiих (типичных) светимостей галактик различных типов в зависимости от космологического красного смещения z (см., в частности, их Табл. 2). Они представили свои данные в космологической шкале с $H_0 = 100\,{\rm km\,s^{-1}\,Mpc^{-1}}$, $\Omega_\Lambda = 0.7$ и $\Omega_{\rm M} = 0.3$. Чтобы трансформировать величины M^* (средние светимости галактик *со вспышкой звездообразования*) из Табл. 2 статьи Fried et al. (2001) в нашу космологическую шкалу (с $H_0 = 60\,{\rm km\,s^{-1}\,Mpc^{-1}}$), мы использовали соотношение $M_{100} = M_{60} + 1.1$. Тогда M^* увеличиваются и равны: $M^* \approx -20.1 \pm 0.2$ зв.вел. для красных смещений $0.3 < z < 0.5$, $M^* \approx -21.5 \pm 0.3$ зв.вел. для $0.5 < z < 0.75$ и $M^* \approx -21.0 \pm 0.2$ зв.вел. для $0.75 < z < 1.04$. Сравнение с абсолютными величинами из нашего набора в Табл. 5.11 показывает, что $M_{\rm B_{rest}}$ родительских галактик GRB 990712, GRB 980613 и GRB 980703 соответствует M^* из статьи Fried et al. (2001). В то время, как для слабых (с $R > 24$) галактик GRB 970228, GRB 970508 и GRB 991208 $M_{\rm B_{rest}}$ много ниже, чем M^*. Надо обратить внимание, что и величины I (в Табл. 5.1) этих галактик на 1 зв.величину больше предела полноты выборки обзора CADIS по наблюдаемой величине ($I_{815} = 23.0$, Fried et al. 2001). А красные смещения других двух родительских галактик из нашей Табл. 5.11 вообще оказываются за пределом по z для всего обзора CADIS. Т. о., по крайней мере для трех родительских галактик из нашей выборки (GRB 990712 ($z = 0.43$), GRB 980613 ($z = 1.09$), GRB 980703 ($z = 0.96$), наблюдаемые величины и z которых согласуются с пределами обзора CADIS по полноте и по z) подтверждается вывод о том, что для своих z родительские галактики γ-всплесков оказываются среди таких же галактик с типичными для галактик с энергичным звездообразованием абсолютными величинами.

То есть по результатам нашего исследования, с учетом результатов исследования далеких галактик другими авторами, можно сделать вывод, что родительские галактики γ-всплесков по сути дела ничем не отличаются от других галактик с близкими значениями z: ни по цветам, ни по спектрам, ни по скоростям звездообразования, ни по светимостям, ни по поверхностной яркости. То есть это такие же галактики ("рядовые" для своих z), которые составляют основу выборок всех глубоких обзоров слабых объектов. На Рис. 6.4 мы представляем (все время обновляемую на нашем сайте) Хаббловскую диаграмму "зв.величина R от z" для всех родительских галактик γ-всплесков с известными оценками z (и верхними пределами по R) на фоне результатов процедуры *фотометрического* измерения z, примененной к Hubble Deep Field группой Fernández-Soto et al., (1999). С учетом эффектов наблюдательной селекции — уменьшение числа измеренных *спектроскопических* z после $z \approx 1.2$, большинство значений z родительских галактик в основном получены по спектрам более ярких галактик (до R около 26) и виден рост ошибки измерения блеска галактик с величиной — распределение родительских галактик γ-всплесков хорошо следует Хаббловскому ходу для всех остальных "нормальных" (непекулярных) галактик глубокого обзора.

5.8. Выводы

Основные результаты этой главы можно перечислить в следующих пунктах.

(i) В первом приближении для оценки величины внутреннего поглощения A_V в родительских галактиках γ-всплесков (GRB 970508, GRB 980613, GRB 980703, GRB 990123, GRB 991208) был применен метод сравнения их широкополосных BVR_cI_c спектров с шаблонными спектрами (SED-ами) локальных галактик со вспышкой звездообразования. С помощью локальных (starburst) SED-ов были получены K-поправки и абсолютные $M_{B_{rest}}$ величины этих галактик. Во втором приближении для галактик GRB 970508 и GRB 980703 (с наименьшей и с наибольшей светимостями) с помощью методов численного моделирования спектров были уточнены значения $A_{\rm V}$ и оценены физические параметры галактик: массы, возрасты, типы вспышек звездообразования, металличность, закон поглощения $k(\lambda)$ в ультрафиолете, SFR.

(ii) Показано, что внутреннее поглощение (пыль, газ) в родительских галактиках может быть значительным, достигая $A_{\rm V} \sim 2$ зв. величины и больше. Т. о., важно учитывать влияние эффектов покраснения в оценках темпов звездообразования в этих галактиках. Родительские галактики γ-всплесков показывают высокие значения SFR, от десятков до сотен солнечных масс в год, если исправить наблюдаемые потоки (в континууме и в линиях) за внутренее поглощение в галактике.

(iii) Две родительские галактики (GRB 970508 и GRB 991208) с близкими светимостями ($M_{B_{rest}} \approx -18.7$) и морфологией имеют и близкие распределения энергии в непрерывном спектре, которые фитируются одним и тем же шаблонным спектром (S5) локальной галактики со вспышкой звездообразования, что означает очень близкое внутреннее поглощение в случае двух этих галактик. Для обеих из них SFR оказался большим, но для родительской галактики GRB 991208 значение SFR — одно из самых высоких (более чем 150–200 $M_{\odot}\,{\rm yr}^{-1}$) из известных SFR родительских галактик. Судя по потокам в эмиссионных линиях, мы наблюдаем эту галактику вблизи максимума вспышки звездообразования.

(iv) В случае родительской галактики наибольшей ($M_{B_{rest}} = -21.3$) светимости GRB 980703 ($z = 0.966$) спектр и наблюдаемый дефицит потока в B полосе может быть объяснен (при солнечной металличности) избытком внутреннего поглощения около 2200Å (широкая полоса графита), который характерен для законов поглощения $k(\lambda)$ внутри галактик, подобных нашей. Наличие графитовой пыли соответствует солнечной металличности, возрасту (определяемым по моделям), большой светимости и наличию (по данным в радиодиапазоне) в этой галактике скрытых пылью областей звездообразования.

(v) Связь γ-всплесков с H II областями, высокие значения поверхностной яркости родительских галактик $\mu_0 = (19.1$—$20.4)$ mag/arcsec^2, большие SFR и скрытое звездообразование в них, повышенные до $\sim 10 \times L^*_{\rm late}$ и больше светимости этих галактик по сравнению с локальными галактиками поздних хаббловских типов — все это сильные аргументы в пользу массивного звездообразования в этих галактиках. Таким образом, можно считать, что длинные γ-всплески могут иметь непосредственную связь с энергичным *массивным* звездообразованием, наблюдаемым в их родительских галактиках.

(vi) Индивидуальные оценки SFR показывают, что темп звездообразования в этих галактиках соответствует общей эволюции (росту) среднего космологического SFR с ростом z. Родительские галактики γ-всплесков по сути дела ничем не отличаются от других галактик с близкими значениями z: ни по скоростям звездообразования, ни по цветам, ни по спектрам, ни по светимостям, ни по поверхностной яркости. Это такие же галактики ("рядовые" для своих z), которые составляют основу выборок всех глубоких обзоров слабых объектов и хорошо следуют Хаббловской зависимости "наблюдаемая величина vs. z" для основной части (непекулярных) галактик глубоких обзоров.

(vii) В результате наших исследований было еще раз показано, что многополосная BVR_cI_c фотометрия — довольно простой метод быстрой оценки типа галактики (с достаточно гладким спектром) 22 – 26-й звездной величины, поскольку в оптике при z около 1 (и больше) в основном наблюдается только мощный UV-континуум далеких галактик со звездообразованием.

Глава 6

Прародители источников гамма-всплесков

6.1. Введение (гамма-всплески и сверхновые)

Несмотря на огромный прогресс последних лет в накоплении и интерпретации наблюдательных данных во всех диапазонах, природа источников γ-всплесков все еще остается предметом активного обсуждения. Но явно растет консенсус относительно того, что источники всплесков действительно связаны с массивными звездными прародителями. Длинные γ-всплески, по-видимому, связаны с конечными стадиями эволюции массивных звезд и, следовательно, со взрывом звезды типа взрыва сверхновой — мысль, которая в 1998-99 гг. высказывалась уже многими (см. например Paczyński 1999; MacFadyen & Woosley 1999 и ссылки в этих статьях). В течение последующих 3-х лет сценарий (модель) "гиперновой", или "коллапсара" получил широкую поддержку и особенно потому, что длинные γ-всплески (вернее их оптические и радио транзиенты) были найдены в областях звездообразования их родительских галактик — единственное место, где массивные звезды проживают свою короткую жизнь (Fruchter et al. 1999, Hogg & Fruchter 1999, Bloom et al. 2000, Sokolov et al. 2001). Наблюдаемые малые отклонения в точных астрометрических положениях ОТ γ-всплесков или радио-транзиентов всплесков относительно звездного поля их родительских галактик, а также то, что эти положения, как правило, совпадают с областями UV излучения массивных звезд в этих галактиках, привели к тому, что лидирующим сценарием сейчас для длинных γ-всплесков стал катастрофический коллапс массивного и (скорее всего) быстро вращающегося ядра проэволюционировавшей звезды. Может быть, слияние (merging) нейтронных звезд все еще представляет некоторые возможности для объяснения коротких γ-всплесков, но этот сценарий (Lattimer & Schramm 1976) потерял свою привлекательность для объяснения длинных γ-всплесков, длящихся более 1 с. Главная причина — слишком большая временная шкала ($\sim 10^9$ лет), которая требуется для его реализации, в результате чего пара нейтронных звезд может оказаться далеко за пределами звездного поля родительскй галактики.

В этой главе будут более подробно рассмотрены возможные следствия сценария, объясняющего γ-всплески, если действительно их прародителями являются короткоживущие ($\sim 10^6$ лет) массивные звезды. В частности, во время эволюции массивных звезд на стадии звезды Вольфа-Райе (WR), которая характеризуется сильным звездным ветром, могут возникать довольно плотные оболочки вокруг них, как результат взаимодействия этого звездного ветра с межзвездной (или околозвездной) средой. Анализ ситуации с такими оболочками и возможное влияние их на наблюдательные проявления ОТ γ-всплесков проведен в этой главе на основе недавних расчетов звездных ветров и их взаимодействия с околозвезной средой на WR стадии, сделанных группой Ramirez-Ruiz et al. (2001) в контексте проблемы γ-всплесков.

Во 3-й и 4-й главах уже были рассмотрены некоторые особенности $BVRI$ кривых блеска такого хорошо изученного объекта, каким был ОТ γ-всплеска GRB 970508 (Sokolov et al. 1998, Galama et al. 1998, Sokolov et al. 1999). Астрофизическую интерпретацию $BVRI$ кривых блеска мы начали с самой последней фазы, когда блеск объекта перестал меняться и когда стал наблюдаться обычный ("рутинный") астрофизический объект — галактика на месте ОТ. Была исследована сначала эта галактика, а затем (в 5-й главе) и другие родительские галактики — галактики со вспышкой звездообразования. В результате была сформулирована основа утверждения, что массивные звезды действительно могут быть связаны с γ-всплесками. Но здесь хотелось бы обратить внимание и на другие, независимые и более прямые свидетельства в пользу массивных звезд-прародителей γ-всплесков: по крайней мере для некоторых (по наблюдениям 1998 г.) γ-всплесков сверхновые могли быть причиной, объясняющей происхождение красной компоненты (или красного "плеча") в многополосных кривых блеска их послесвечения (GRB afterglow), которое (плечо в I полосе) появлялось через 2-3 недели после самого γ-всплеска. В частности, в этой главе будет рассмотрен возможный вклад СН в кривые блеска $BVRI$ переменного оптического объекта, связанного с GRB 970508. Затем, на основании исследования кривой блеска ОТ GRB 970508 и транзиентов, связанных с другими всплесками, а также учитывая наблюдаемые величины ($> 21^m$) родительских галактик γ-всплесков, будет обоснована возможность сильной коллимации значительной доли γ-излучения при всплеске (хотя сама эта идея и возможные ее следствия на защиту не выносятся). В обсуждении результатов этой главы будут упомянуты эти оценки в связи с возможностью наблюдения так называемого эффекта "orphan afterglow" вследствие возможной существенно разной степени коллимации фотонов в гамма, рентгеновском, оптическом и в радио диапазонах.

В этой главе будет подчеркнуто, что возможно очень существенным для интерпретации наблюдательным фактом является присутствие значительной компоненты рентгеновской эмиссии в излучении γ-всплесков, регистрируемых спутником BeppoSAX, которая наблюдается одновременно с самими γ-всплесками. Это так называемая ранняя (prompt) рентгеновская эмиссия. Фактически, это короткие *вспышки* рентгеновского излучения, наблюдающиеся одновременно с γ-всплеском. В настоящее время они наблюдаются на рентгеновских камерах/телескопах типа BeppoSAX/WFC, например на HETE-2/WXM (Wide Field X-ray Monitor). Это позволяет быстро локализовать источник γ-всплеска и проводить дальнейшие поиски транзиентных источников в других диапазонах.

Миссия итало-голландского спутника BeppoSAX таким образом обеспечивала не только быструю локализацию γ-всплесков с точностью до нескольких угловых минут, но также и измерение их спектров в широкой (2 до 700 keV) энергетической полосе (Piro et al. 1998, Frontera et al. 2000, Amati et al. 2002). Наблюдаемые в рентгеновском спектре линии железа, также найденные и в спектрах рентгеновского послесвечения γ-всплесков на спутниках ASCA и Chandra, должны тоже довольно определенно указывать на массивный звездный прародитель всплеска, так как эти спектральные особенности могут быть прямым свидетельством существования плотных (WR) оболочек в окрестностях прародителей γ-всплесков — "пред-GRB" (пред-СН).

Здесь также хотелось бы обратить внимание на важность учета огромного давления излучением вследствие огромного (и возможно сильно коллимированного) потока γ-лучей и ранней рентгеновской радиации. Такая сила может действовать на довольно плотную газовую среду вокруг прародителя всплеска, а точнее — на среду, расположенную непосредственно вокруг самого источника γ-всплеска. Это может существенно уточнить наше понимание послесвечения γ-всплесков.

6.2. Четыре фазы в BVR_cI_c кривых блеска ОТ GRB 970508

Здесь сделан обзор всех особенностей временнóго поведения в четырех фотометрических полосах переменного оптического источника, связанного с γ-всплеском GRB 970508, вплоть до той стадии, когда блеск объекта (оптического компаньона всплеска) уже перестает меняться и мы видим только родительскую галактику. На Рис. 6.1 (**a** и **b**) показано поведение кривых блеска ОТ + родительская галактика GRB 970508, вплоть до 470-го дня после всплеска. На Рис. 6.1 **a** время отложено в логарифмической шкале для того, чтобы детально показать фазу быстрой переменности довольно яркого, в первые дни $I_c \approx 19$, источника. Более спокойное, на шкале в несколько месяцев, изменение блеска значительно более слабого (до 23^m) источника, с явно другой физикой, удобно изобразить (панель **b**), отложив время уже в линейной шкале в днях после γ-всплеска. При этом короткая и мощная вспышка — то, что обычно и называют "GRB afterglow" — на рисунке 6.1 **b** не показана полностью, все BVR_cI_c величины здесь больше 21.5^m. На Рис. 6.1 изображены наблюдаемые зв. величины с ошибками измерений в каждом из фильтров, наблюдения в каждом фильтре соединены толстыми ломанными линиями. Показаны также 4 независимых степенных закона (гладкие тонкие линии), определенные подгонкой (fitting) наблюдаемых кривых блеска BVR_cI_c с помощью некоторой простейшей двухкомпонентной модели (только с двумя источниками — "GRB afterglow" + родительская галактика). Об этой модели было сказано в Гл. 4. Это сумма ослабевающего по степенному закону потока ОТ GRB 970508 (начиная от момента максимума блеска на Рис. 6.1 **a**), плюс постоянный блеск родительской галактики: $F = F_o \times t^\alpha + F_c$. Тонкие кривые соответствуют разным значениям α.

Как уже было сказано выше, кривая блеска приводится здесь в разных масштабах (от десятков часов после всплеска и до сотен дней после него) для демонстрации всех существенных и необычных деталей в сравнении с кривыми блеска других ОТ γ-всплесков (см. ниже). Везде на Рис. 6.1 приведены результаты наблюдений, проведенных в САО в стандартных фотометрических полосах. Не показаны только самые ранние наблюдения медленно меняющегося объекта, т.н. фаза раннего "плато", или фаза медленного падения блеска в самые первые часы после всплеска по данным Galama et al. (1998) и Pedersen et al. (1998) (см. Рис. 3.1), до начала "второй" вспышки на Fig. 6.1 **a**. В одном только линейном масштабе времени будут просто не видны существенные (по энерговыделению) детали поведения блеска в первые несколько дней переменного оптического источника, связанного с этим γ-всплеском. А с другой стороны, если бы не короткая яркая вспышка, которая наблюдалась в первые дни, то BVR_cI_c кривые блеска транзиента вполне могли бы напоминать аналогичное поведение кривых блеска некоторых СН. Т. о., данные, полученные в САО на 1-м и на 6-м телескопах, позволяют разделить все изменения блеска ОТ со временем, по крайней мере, на 4 стадии, как показано на Рис. 6.1 **a,b**. Соответственно, и поток от переменного оптического объекта, измеряемый в разных частотных диапазонах, в разные периоды изменения блеска транзиента, мог содержать вклад и от разных по блеску и по временам переменности *более чем двух* (т. е.,"afterglow" + СН + родительская галактика) источников.

Итак, в САО через 0.5 суток после γ-всплеска GRB 970508 удалось наблюдать:
I) Быстрое увеличение блеска ОТ на шкале около одного дня. Хотя до этого момента, т. е. до начала *второй* оптической вспышки, блеск найденного через 2 часа после γ-всплеска нового объекта по данным других наблюдателей (*первая вспышка*, или самая ранняя фаза "плато" см. Рис. 3.1) оставался почти постоянным (или медленно падал от $R \approx 21$).
II) После достижения максимума (с $R = 19.70$), по нашим данным наблюдалось экспоненциальное падение блеска в течение ≈ 4 дней со стабильным широкополосным $BVRI$ спектром.
III) Дальнейшее падение блеска приблизительно можно описать неким средним степенным законом. Но надо отметить, что где-то на 31-36-е сутки после γ-всплеска оптический объект уже не показывал никакого *гладкого* степенного ослабления блеска. По крайней мере, это хорошо видно в фильтре I_c. Транзиентный источник стал *более красным* по $B-I_c, V-I_c, R-I_c$.
IV) После $\approx$200 дней изменения блеска закончились и вклад транзиентного источника в потоки от галактики во всяком случае уже меньше ошибок наблюдений. Т. о., приблизительно с этого времени наблюдается постоянный источник — родительская галактика γ-всплеска.

Самая ранняя фаза "плато" (она не показана на Рис. 6.1 **a**, см. Рис. 3.1) и первые две стадии — быстрый рост и затем падение блеска после максимума яркости ОТ — до сих пор остаются непонятыми явлениями в поведении этого источника. Об этом см. в цикле теоретических работ: Panaitescu & Kumar (2001), Panaitescu (2001), Panaitescu & Kumar (2002), посвященных объяснению кривых блеска ОТ γ-всплесков. В рамках "стандартной" модели послесвечения γ-всплесков, развиваемой этими авторами, не удается объяснить и другой случай — аналог второй оптической вспышки ОТ GRB 970508 — гораздо менеее яркую вторую вспышку ОТ, или небольшой подъем блеска на 3-й день, после другого γ-всплеска GRB 000301c. Без дополнительных, т.е. без выходящих за рамки модели, предположений, более-менее внятно объяснены только "простые" кривые блеска тех транзиентов, у которых наблюдалось монотонное (хоть и с изломами) падение блеска, начиная с момента обнаружения ОТ γ-всплеска. Сверх того, по нашим наблюдениям, как уже подчеркивалось в 3-й главе, в максимуме блеска ОТ GRB 979508 и сразу же после него все $BVRI$ потоки были измерены с наибольшей точностью, 0.03 – 0.07 зв. величины. Но из этих данных следовало, что какой-либо степенной закон для описания падения блеска сразу после максимума (Май 10.77 UT) не является наилучшим по χ^2 тесту в это время: наилучшим для описания наблюдений одновременно в 4-х фотометрических полосах $BVRI$ был один и тот же экспоненциальный закон уменьшения блеска объекта (Sokolov et al. 1998). Разумеется, что на фоне необъяснимости подобных "вторых" (ОТ GRB 970508 и ОТ GRB 000301c) оптических вспышек через $\sim$ 1-3 суток после γ-всплеска объяснение таких тонких деталей в поведении кривой блеска после странного второго максимума вообще не обсуждается в статье Panaitescu & Kumar (2002), равно как и странное поведение потока от рентгеновского транзиента GRB 970508 в то же самое время, отмеченное Piro et al. (1998).

Лишь ценой игнорирования этих деталей в поведении BVR_cI_c-потоков и начиная только со 2-го дня после γ-всплеска, т.е. начиная со второй вспышки в оптике, кривые блеска ОТ GRB 970508 в BVR_cI_c полосах могут быть как-то грубо описаны некими степенными зависимостями, но, все-таки, с различными α для разных полос. А начиная примерно с 31-го дня после γ-всплеска, ОТ вообще не показывал уменьшения блеска в фильтре I_c. Этот феномен длился не менее чем 51 день и может быть дольше, до 150 дней, судя по некоторому замедлению темпа падения блеска и в R_c полосе на уровне $R_c \approx 24.3$. В этот период (до $\approx$100-го дня) поток от объекта был почти постоянным и держался на уровне около $I_c = 23$. После 87 суток уклонение от некоторого среднего степенного закона (см. Рис. 3.5.а) достигало уже $\simeq 1$ звездной величины. Ошибками наблюдений это объяснить нельзя, поскольку поток в I_c соответствовал 23.04$\pm$0.14 по нашим наблюдениям на 87.085 UT сутки после γ-всплеска (блеск галактики в $I_c = 24.07 \pm 0.25$). Такое поведение можно объяснить только некими внутренними особенностями самого объекта (ОТ GRB), то есть явным проявлением в кривой блеска и в спектре еще одного, нового и медленно меняющегося, медленнее, чем

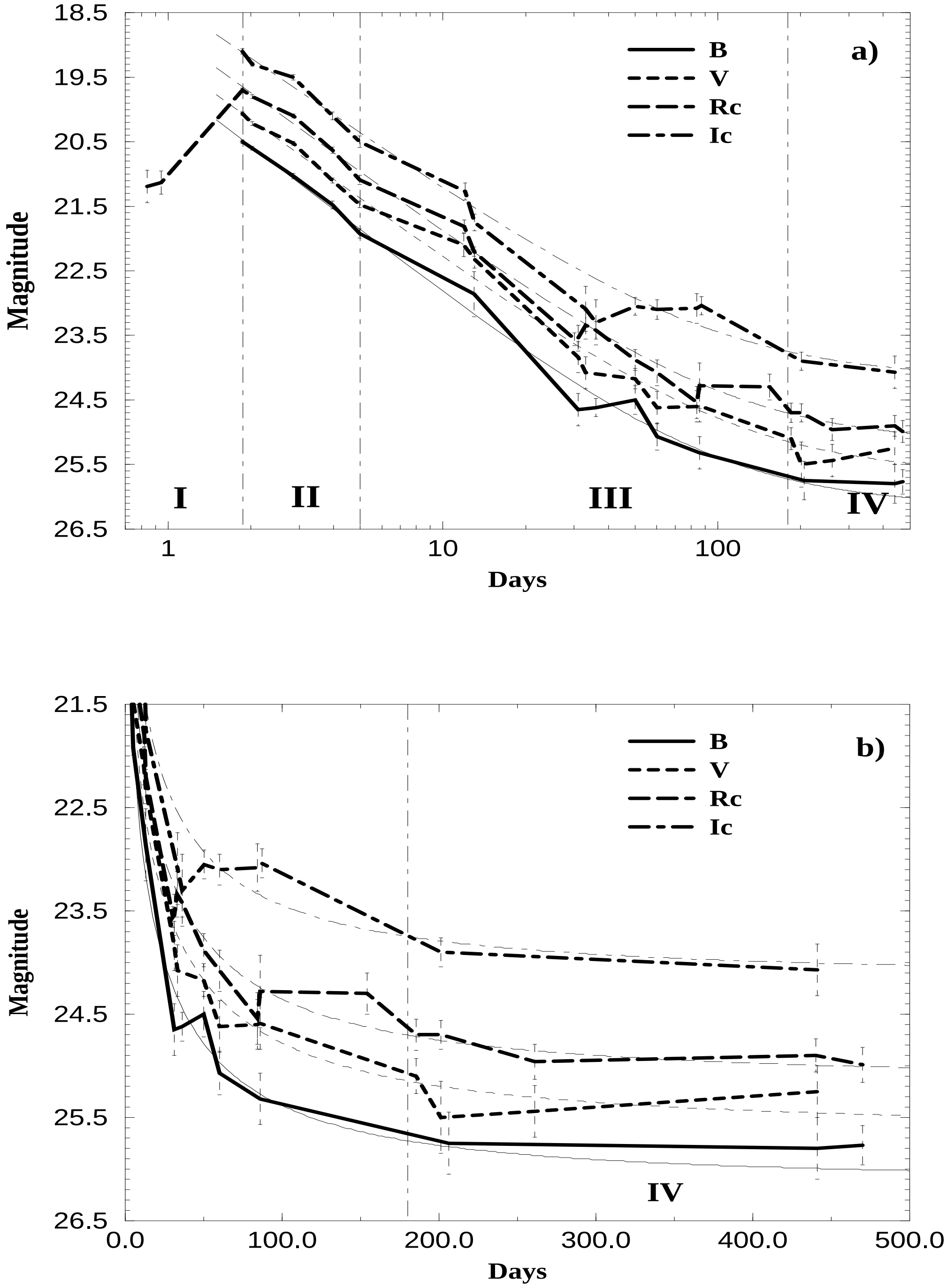


Рис. 6.1. Четыре фазы во временно́м поведении транзиентного источника в 4-х полосах BVR_cI_c (OT + родительская галактика GRB 970508) до $\simeq 470$ дня после γ-всплеска. Кривые блеска BVR_cI_c показаны в логарифмической шкале **a** ($I_c \approx 19$, яркая фаза OT и др.) и в линейной временной шкале **b** (BVR_cI_c больше 21.5^m — без "afterglow" в максимуме, фаза СН и затем галактика). Тонкими гладкими линиями изображены 4 независимых степенных закона, проведенных по данным BVR_cI_c с различными значениями α (см. текст). Показаны кривые блеска OT по результатам наблюдений на БТА. Самые ранние наблюдения 1-й фазы в первые часы после всплеска, по данным Galama et al. 1998 и Pedersen et al. 1998, показаны на Рис. 3.1.

стандартое послесвечение γ-всплесков (см. на Рис. 6.1 **b** в первые дни), переменного источника. Именно в этом временно́м и спектральном (красное "плечо") поведении этого транзиентного объекта можно усмотреть намек на аналогичное поведение некоторых типов сверхновых (см. ниже). Наши попытки подгонки всех данных сразу, то есть $BVRI$ кривых блеска после максимума блеска (с помощью χ^2-теста, см. Табл. 4.2), каким-то *одним* степенным законом показали, что для всех используемых фильтров такая единственная аппроксимация неприемлема (Sokolov et al. 1998, Zharikov and Sokolov 1999). То есть можно предположить, что действительно возможна некоторая собственная (внутренняя) переменность оптического остатка γ-всплеска, которая требует более сложного (чем только двумя источниками: "GRB-afterglow" + галактика) представления самого большого и однородного набора фотометрических данных в 4 полосах, полученных на одном и том же телескопе.

6.3. "Плечо" на кривой блеска и его интерпретация

Итак, после того, как было выяснено (в том числе и с учетом результатов наших исследований), что собой представляет родительская галактика γ-всплеска GRB 970508 (Гл.4) и вообще все родительские галактики γ-всплесков (Гл.5), можно снова вернуться к этому медленно меняющемуся источнику, который проявил себя в наших многополосных наблюдениях как выход на плато, наиболее заметное в полосе I_c. (Потом еще раз можно будет обратиться и к самому "GRB-afterglow" — яркой вспышке в первые дни.) Явное замедление падения блеска по сравнению с некоторым "стандартным" степенным законом, наметившееся было (см. Гл. 3, Fig. 3.5 a) в фильтре I_c, примерно через 100 дней прекратилось и блеск ОТ снова упал (Fig. 6.1 a,b) к 200-му дню после γ-всплеска. Более слабый эффект задержки падения блеска до 154-го дня после всплеска по сравнению со степенным законом виден и в фильтре R_c.

Количественно это иллюстрируется модельными аппроксимациями, о которых шла речь в 4-й главе, где исследовалась уже "чистая" (без вклада в наблюдаемый поток от какого-либо переменного источника) родительская галактика GRB 970508. То есть, можно увидеть эти же эффекты из результатов подгонки данных некоторым (наилучшим по χ^2) "средним" степенным законом $F = F_o \times t^\alpha + F_c$ с показателем $< \alpha >= -1.25$. Уклонения (χ^2/d.o.f) от этого "среднего" модельного степенного закона увеличи-

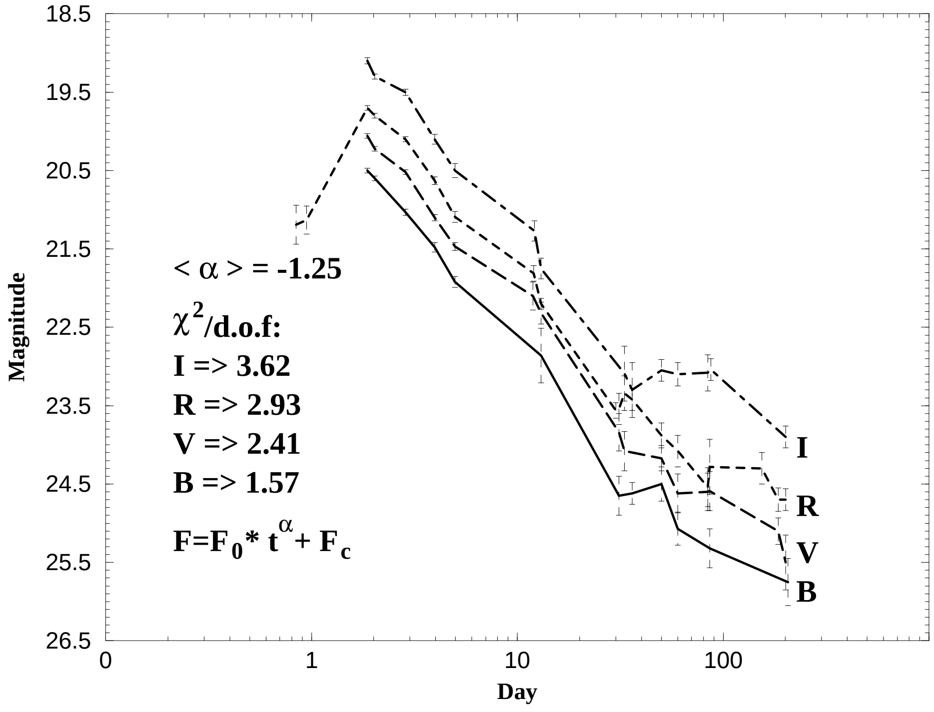


Рис. 6.2. Показаны отклонения (в единицах χ^2/d.o.f.) от некоторого "среднего" модельного закона с двумя источниками — "GRB-afterglow" + галактика: $F = F_o \times t^\alpha + F_c$ для $< \alpha >= -1.25$. Эта модельная подгонка $F(t)$ определена, начиная только с момента *максимума* блеска ОТ. Наибольший вклад в поток наблюдается в I_c-полосе от некоторого третьего источника примерно через 40-100 дней после всплеска. Эффект уменьшается в сторону голубой части спектра ОТ, как и должно быть в случае, если он действительно объясняется СН типа Ib/c сопровождавшей гамма-всплеск GRB 970508.

ваются в направлении красной части BVR_cI_c спектра этого переменного источника: χ^2/d.o.f $= 1.57$ для полосы B, 2.41 для полосы V, 2.93 для полосы R_c и 3.62 для I_c полосы соответственно (см. Табл. 4.2 и Рис. 6.2). Таким образом, из наблюдений следует, что кривая блеска в I_c полосе переменного источника, связанного с GRB 970508, явно показывает фазу некоторого поярчания, плато или "плеча" по аналогии со СН (хотя скорее это соответствует характерному широкому максимуму светимости СН I и СН II). Это свойство спектра переменного источника длится не менее чем 51 день и к концу этой фазы (а может быть к ее середине) показатель цвета $(V - I_c)$ увеличивается до $\approx 1.6^m$. В это время блеск объекта в фильтре $I_c = 23.04 \pm 0.14$ зв. величины, а отклонение от модельного "среднего" степенного закона $F(t)$ с показателем $< \alpha >= -1.25$ уже превышает 1 звездную величину.

Этот эффект уже (до 2000 г.) был замечен для ОТ других γ-всплесков и сразу же была предложена наиболее вероятная его интерпретация (Galama et al. 2000, Bloom et al. 1999): проявление оболочки СН, каким-то образом (тут еще спорят о деталях) связанной с источником γ-всплеска. Действительно, исследования последних 3-х лет показывают, что уже в нескольких случаях послесвечение γ-всплесков имеет необычные (новые) временные и VRI спектральные свойства: GRB 970228 (Galama et al. 2000), GRB 980326 (Bloom et al. 1999) , GRB 990712 (Bjornsson et al. 2001), GRB 991208 (Castro-Tirado et al. 2001), GRB 000911 (Lazzati et al. 2001a). Самый последний случай наблюдался для OT GRB 011121 на HST (Bloom et al. 2002) сразу в 4-х фотометрических полосах красной стороны спектра OT: F555W, F702W, F814W, F850LP ($z = 0.36$).

Все OT этих γ-всплесков имели временны́е и спектральные характеристики, похожие на те, что наблюдались и в случае OT GRB 970508, для которого кривая блеска в полосе I_c согласуется с предположением, что излучение СН в основном и определяет наблюдаемый поток OT в более поздней фазе III, то есть примерно через 31 день после γ-всплеска. Известно, что излучение всех СН Типа I показывает сильный дефицит потока в ультрафиолете из-за поглощения в линиях ниже 3900Å. (Примеры UV спектров сверхновых разных типов см. в статье Filippenko (2000).) Таким образом, для красного смещения $z = 0.835$ в фильтре R_c, соответствующем U_{rest} (3652Å) в собственной системе покоя, ожидаемый вклад в поток в фильтре R_c от предполагаемой СН должен быть малым. И наоборот, при $z = 0.835$ блеск СН должен быть максимальным на бо́льших длинах волн, то есть в полосе I_c, как это и наблюдалось в случае GRB 970508. Так же, как это наблюдалось и для GRB 970228 с $z = 0.695$ (Galama et al. 2000). И вообще, во всех случаях, когда, как и для OT GRB 970508, этот эффект удавалось наблюдать в нескольких фотометрических полосах — OT GRB 970228 ($z = 0.695$), GRB 990712 ($z = 0.434$), GRB 991208 ($z = 0.707$), GRB 000911 ($z = 1.059$) — всегда оказывалось, что эффект растет именно в красную и IR сторону спектра этого добавочного источника. Надо еще учитывать космологическое "растяжение" профилей (time profile stretching) кривых блеска СН на фактор $1 + z$. Таким образом, для наблюдаемости этого нового явления в оптике транзиентов связанных с γ-всплесками, если оно действительно связано со сверхновыми типа Ib/c, важно, при каких z оно происходит. При слишком больших красных смещениях $z > 1$ в оптическом диапазоне спектра от вклада сверхновой в блеск OT ничего не остается и этот эффект надо искать уже IR-диапазоне, как это было для OT GRB 000911 с $z = 1.0585$ (Lazzati et al. 2001a). Замечу, что оценка $z \sim 0.9$ для OT GRB 980326 (Bloom et al. 1999) была сделана именно по этому эффекту, т.е. по предполагаемому вкладу СН в поток ОТ, но измеренному только в одной фотометрической полосе. (В этом случае для проведения спектральных наблюдений для измерения z родительская галактика оказалась слишком слабой: $R > 27.3$.)

Так как при $z = 0.835$ полоса I_c в системе отсчета наблюдателя соответствует полосе B_{rest} (4448Å) в системе отсчета, где сам источник (точнее галактика GRB 970508) покоится, то наблюдаемый поток в фильтре I_c можно использовать для того, чтобы оценить голубую абсолютную величину (M_B), соответствующую максимуму кривой блеска предполагаемой СН. Наблюдаемый поток ОТ GRB 970508, соответствующий "плечу" на кривой блеска в фильтре I_c (Рис. 6.2), в свою очередь соответсвует максимуму светимости некоторой пекулярной СН с M_B около -19.5^m, поскольку для родительской галактики GRB 970508 мы нашли $M_{B_{rest}}$ около -18.5^m (Sokolov et al. 1999 и в Гл. 5). Но, как это следует из результатов предыдущей главы, надо еще учесть и внутреннее поглощение в самой родительской галактике, которое может достигать $A_V = 1.6^m$ в случае GRB 970508 (в среднем по всей галактике). Разумеется, мы точно не знаем величины внутреннего поглощения в оптике на луче зрения для ОТ GRB 970508 (т.е. в том месте, где находится сам источник), однако с учетом даже среднего A_V предполагаемая СН может быть еще ярче, и тогда она действительно оказывается среди *пекулярных* СН с наибольшей светимостью. Такими самыми яркими сверхновыми, прародителями которых считаются именно массивные звезды (они же прародители и GRB?), могут быть только СН типа Ib/c.

Таким образом, по-видимому, можно рассматривать СН типа Ib/c как некоторую предварительную модель "GRB/СН" γ-барстеров. Но надо помнить, что абсолютные величины M_B в максимуме блеска сверхновых типа Ib/c (или т.н. "core collapse" SNe) не постоянны и разбросаны от -16^m и до -20.5^m (Richardson et al. 2001). ("Core-collapse" сверхновыми называются СН, прародителями которых являются массивные звезды.) Следовательно, для наблюдаемости (по крайней мере, с угловым разрешением наземных телескопов) эффекта "GRB/СН" в далеких и слабых родительских галактиках γ-всплесков, блеск этих галактик должен быть слабее, чем пиковая величина СН (Sokolov 2001a, 2001b). (В Табл. 5.11 приведены и наблюдаемые, и абсолютные величины родительских галактик.) Причем нужно заметить здесь, что совсем не обязательно, чтобы γ-всплески были связаны именно с какими-то "особенно" пекулярными сверхновыми, которые надо выделять в какой-то новый отдельный подкласс, такой, как например, "hypernova" (Paczyński 1998, Iwamoto et al. 1998, 2000). Этот подкласс сверхновых (если он действительно существует) определяется пока довольно расплывчато (см., например, Fields et al. 2001): "взрыв, детали которого неизвестны, связан с коллапсом массивного ядра звезды, кинетическая энергия может быть много больше, чем обычно (?), в оболочке доминируют углерод и кислород...". Поэтому в данном случае, пока спектр и остаток СН (связанные с γ-всплеском) никому неизвестны, необходимо иметь в виду прежде всего возможный *эффект наблюдательной селекции*. Пекулярность СН — наблюдаемые непосредственно во время вспышки параметры самой СН (а не ее остатка): светимость, цвет ее в максимуме блеска и длительность этого максимума — все это скорее помогает обнаружить эффект покраснения ОТ γ-всплеска в далеких галактиках, чем "выделяет" сверхновые, связанные с γ-всплесками в какой-то отдельный, особый подкласс СН.

Для описания эффекта GRB/СН на Рис. 6.3 в качестве примера пекулярной СН можно взять такую "гиперновую", как SN 1997ef, которая была классифицирована прежде всего как СН типа Ic, пекулярная по своей кривой блеска (Iwamoto et al. 2000). Она показала очень широкий максимум и потом очень медленное падение блеска ("slow tail"). Но светимость ее ниже, чем, например, для другой известной "гиперновой" SN 1998bw. Тем не менее, учитывая упомянутый выше наблюдаемый разброс сверхновых Ib/c типа по светимостям (и по кривым блеска), для наших целей достаточна (как пример СН типа Ib/c) пока только форма кривой блеска этой СН Ib/c. Ведь мы не знаем точную кривую блеска (и спектр) настоящей СН, сопровождавшей γ-всплеск GRB 970508. Может быть, как раз в случае ОТ GRB 970508 это была пекулярная и по светимости, и по кривой блеска СН. (При этом надо помнить, что и кривая блеска послесвечения/afterglow этого γ-всплеска сама пекулярна по отношению к кривым блеска других ОТ, об этом еще будет сказано ниже.)

Итак, мы действительно можем ожидать, что происхождение γ-всплесков связано с массивными звездами, которые в результате эволюции потеряли свою водородную оболочку до взрыва звезды-прародительницы как сверхновой. (По крайней мере, потеря звездой до взрыва толстой водородной оболочки могла бы только способствовать выходу γ-излучения, возможно возникающего при коллапсе массивного ядра звезды.) Поэтому, если γ-всплески возникают в результате коллапсов массивных звезд в галактиках со звездообразованием, то, как неизбежное следствие этого, оптическая эмиссия от сопровождающей такое явление СН должна вносить свой вклад

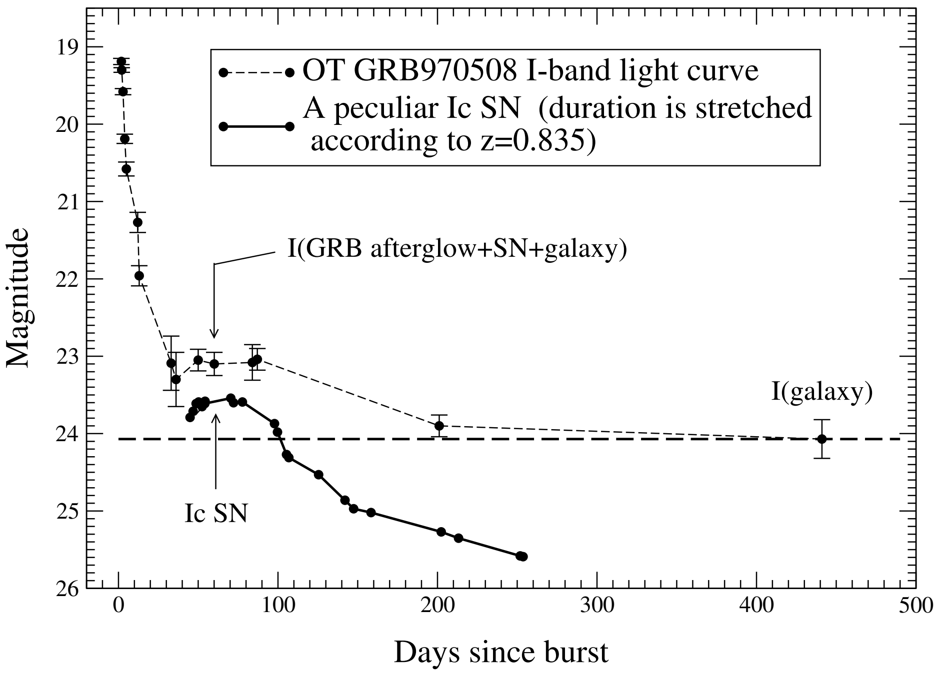


Рис. 6.3. Кривая блеска OT GRB 970508 в фильтре I с учетом вклада некоторой пекулярной СН типа Ic, похожей на СН 1997ef по форме своей кривой блеска и со светимостью в максимуме блеска, как у СН 1998bw.

в послесвечение γ-всплесков. Другое дело, *можно ли во всех случаях* мониторинга новых OT наблюдать такой эффект/явление, например, с Земли? Очевидно, что в одних случаях пекулярность сопровождающей γ-всплеск СН и подходящее красное смещение помогают обнаружить эту ("underlying SN") сверхновую в оптике с Земли, а в других случаях требуются наблюдения и отдельная аккуратная фотометрия самого транзиента "под галактикой" на телескопе с большим угловым разрешением, например, на Хаббловском телескопе, как это было сделано в случаях OT GRB 990712 (Bjornsson et al. 2001) и OT GRB 011121 (Bloom et al. 2002). Либо, как уже отмечалось выше, потребуются наблюдения в далеком IR-диапазоне при $z > 1$, как для OT GRB 000911 (Lazzati et al. 2001a).

6.4. Родительские галактики, сверхновые и коллимированные γ-всплески

Теперь, в рамках предположения о тесной связи γ-всплесков со сверхновыми, можно согласовать такие числа, как: число галактик, в которых могут наблюдаться γ-всплески, число обнаруживаемых γ-всплесков и число вспышек сверхновых в далеких галактиках. При этом (из экономии гипотез) всюду ниже мы будем придерживаться самого простого предположения, которое состоит в том, что так или иначе *все γ-всплески связаны со взрывами сверхновых.* То есть тогда все, или, по крайней мере, основная часть длинных γ-всплесков — явление, с которого начинается коллапс массивного ядра звезды и взрыв СН. Но это совсем не означает, что все наблюдаемые взрывы СН типа Ib/c должны сопровождаться γ-всплеском. И, конечно, дело тут не только в селекционных эффектах, о которых говорилось в предыдущем разделе. Ниже будет показано, что γ-излучение может выходить из источника в виде узко коллимированного луча и, следовательно, не каждая СН типа Ib/c может начинаться с γ-всплеска для наблюдателя на Земле.

Сначала мы начнем с галактик, которым было уделено много внимания в 2-х предыдущих главах. Из результатов наблюдений 1997-2000 гг. (и уже до 2002 г.) для наблюдаемых величин (см. Рис. 6.4) всех *надежно* отождествленных родительских галактик γ-всплесков справедливо:

$$21^m < m_{HostGal} < 28^m. \tag{6.1}$$

Такие слабые или даже еще более слабые (Djorgovski et al. 2001) галактики действительно ожидались из результатов исследования родительских галактик (см. Табл. 5.11). Соответственно и большинство сверхновых, связанных с γ-всплесками, тоже будут слабыми ($21 - 27$ зв. величины) объектами в очень далеких галактиках с $z \geq 0.3 - 4.5$. А с учетом очень малой средней частоты наблюдения всплесков в галактиках (см. ниже) это приводит к тому, что поиск прямой ассоциации "γ-всплеск-СН" в какой-нибудь близкой галактике — трудная задача. Другими словами, γ-всплески пока еще не удалось наблюдать со 100% уверенностью в более ярких и в близких галактиках локальной Вселенной. Гораздо чаще, чем γ-всплески, в них вспыхивают сверхновые.

Все результаты фотометрических и спектральных наблюдений родительских галактик на 6-метровом телескопе (см. предыдущие главы) и на других телескопах подтверждают и уточняют связь γ-всплесков с эволюцией массивной звезды, т. е. с релятивистским коллапсом и взрывом сверхновой в конце эволюции. Но, пожалуй, главный вывод, который следует и из нашего исследования этих галактик, это то, что *родительские галактики γ-всплесков ничем не отличаются от других галактик с близкими значениями z*: ни по цветам, ни по спектрам, ни по скоростям звездообразования, ни по светимостям, ни по поверхностной яркости. То есть, это такие же галактики ("рядовые" для своих z), которые составляют основу

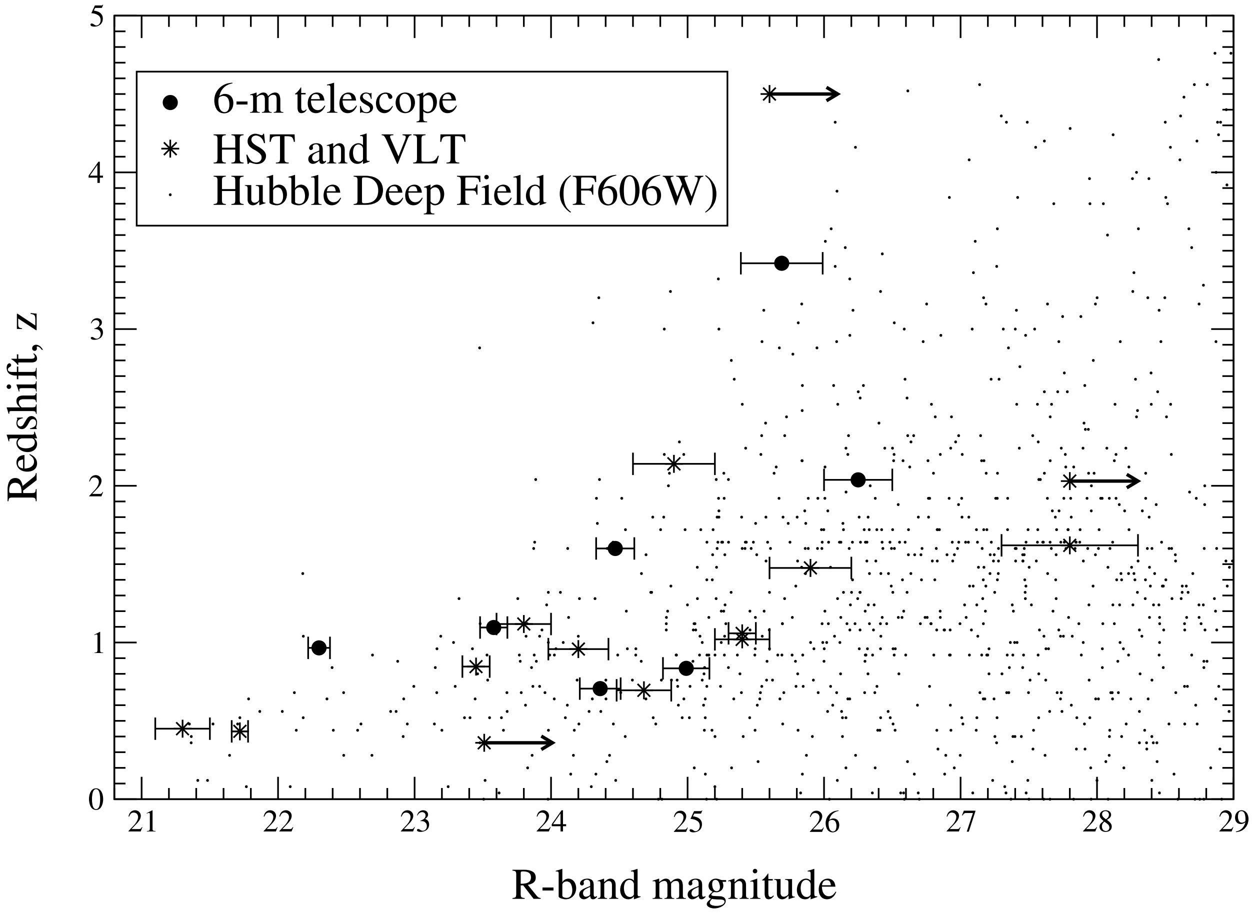


Рис. 6.4. Хаббловская диаграмма для родительских галактик γ-всплесков с известными (до июня 2002 г.) наблюдаемыми звездными величинами (или с верхними пределами по R) и спектроскопическими красными смещениями на фоне результатов процедуры фотометрического измерения z, примененной к галактикам из Hubble Deep Field (HDF) группой Fernández-Soto et al. (1999). Кружками отмечены родительские галактики γ-всплесков, фотометрия которых была сделана на БТА, звездочки — результаты других авторов (HST, VLT). Для галактики GRB 991208 измерения $z = 0.706$ и $R = 24.36$ сделаны на БТА. Точками на диаграмме показаны положения галактик из обзора HDF по результатам глубоких наблюдений на космическом телескопе имени Хаббла (HST). Наблюдаемые зв. величины родительских галактик в полосе R исправлены за поглощение в Галактике. На диаграмме отложены звездные величины в фильтре HDF F606W и соответствующие фотометрические красные смещения галактик из каталога F606W. С учетом эффектов наблюдательной селекции (уменьшение числа измеренных *спектроскопических* z после $z \approx 1.2$, значения z родительских галактик в основном получены по спектрам более ярких галактик, виден рост ошибки измерения блеска галактик с величиной) распределение родительских галактик γ-всплесков хорошо следует Хаббловскому ходу для всех остальных "нормальных" (непекулярных) галактик глубокого обзора. (При одном и том же z на этом Рис. видны галактики больших и малых светимостей, вплоть до карликовых.)

выборок всех глубоких обзоров слабых объектов. Фактически именно такие галактики из обзора HDF изображены на Рис. 6.4, на котором мы представляем все время обновляемую Хаббловскую диаграмму "зв.величина R от z" для всех родительских галактик γ-всплесков с известными z (и с верхними пределами по R) на фоне результатов фотометрических измерений z в Hubble Deep Field (Fernández-Soto et al. 1999).

Рис. 6.4 приводится здесь для иллюстрации того, что с учетом эффектов наблюдательной селекции распределение родительских галактик γ-всплесков хорошо следует Хаббловскому ходу для всех остальных "нормальных" (непекулярных) галактик из обзора глубокого поля. Как было не раз уже сказано выше, при таких z в оптический диапазон "выдвигается" далекая ультрафиолетовая часть спектра галактик, наблюдаемый поток в которой обеспечивается именно областями звездообразования. Другими словами, на Рис. 6.4 или в таких же глубоких обзорах, при больших z в оптике видны как раз те галактики, в которых чаще всего и наблюдаются γ-всплески. А это позволяет теперь (с 1997-99 г.) уже с учетом результатов прямых оптических отождествлений, т. е. *прямо из наблюдений*, оценивать среднюю годовую частоту γ-всплесков, приходящихся на каждую такую галактику.

Итак, считая установленным, что родительские галактики γ-всплесков это обычные слабые галактики на больших z, для числа таких галактик ярче 26-й зв. величины, обнаруживаемых на одном квадратном градусе неба, мы должны иметь $N_{gal<26mag} \approx 2 \cdot 10^5 \cdot gal \cdot deg^{-2}$. Здесь можно сослаться на результаты новейших подсчетов галактик в Хаббловских глубоких полях (Casertano et al. 2000), но и из числа галактик, фотометрируемых до этого же предела в исследованной нами на БТА до $B = 26.2$ зв. величины (см. Главу 2) центральной части поля γ-всплеска 13 Июня 1979 года, получается такой же результат. С учетом нескольких лет наблюдений γ-всплесков на BATSE для числа γ-всплесков $n_{GRB} \approx 0.01 \cdot deg^{-2} yr^{-1}$, можно считать, что средний темп появления γ-всплесков в "рядовой" галактике есть

$$N_{GRB} \approx 5 \cdot 10^{-8} \cdot yr^{-1} galaxy^{-1}, \qquad (6.2)$$

в отличие от того, что получали раньше ($2 \cdot 10^{-6} \cdot yr^{-1} galaxy^{-1}$) Mao & Paczyński (1992), которые использовали тогда еще плохо определенную функцию светимости самих γ-всплесков. Близкое к (6.2) значение ($\sim 10^{-7}$ yr^{-1} $galaxy^{-1}$) используют Bloom et al. (2000a). Это число (6.2), уже учитывающее результаты оптических отождествлений γ-всплесков после 1997 г., когда возникла астрономия γ-всплесков и когда началось исследование связанных с ними объектов во всех диапазонах, именно это число будет использовано далее.

(О возможных селекционных эффектах, которые могут влиять на эту оценку:) Гамма-излучение свободно выходит из довольно плотных областей звездообразования галактик до $z \sim 100$, поэтому число γ-всплесков, регистрируемых BATSE определялось в основном его чувствительностью и полосой пропускания. Потери из-за чувствительности уже учтены в числе $n_{GRB} \approx 0.01 \cdot deg^{-2} yr^{-1}$ (Fishman et al. 1994), но при слишком больших z γ-всплески все больше должны смещаться в рентген, поэтому на Хаббловской диаграмме R-z (Рис. 6.4) мы останавливаемся на 26-й зв. величине для галактик (до $z \sim 3$), до которой и их подсчеты можно считать полными (Casertano et al. 2000). Конечно, какие-то из этих галактик могут оказаться старыми эллиптическими и вообще без звездообразования. Но, по-видимому, это все-таки небольшая часть из всех далеких галактик, если учесть общую тенденцию к росту темпа звездообразования в галактиках с увеличением z (Glazebrook et al. 1999, Blain & Natarajan 2000), подтверждаемую новыми оценками уже по самим GRB (Ramirez-Ruiz, Fenimore, & Trentham 2000). Конечно, надо учесть еще и увеличение числа галактик (раза в 2) за счет скрытого звездообразования, которое может быть связано с "темными" γ-всплесками (Ramirez-Ruiz, Trentham, & Blain 2001) и то, что отождествлены пока что только длинные γ-всплески, из-за чего (6.2) может быть только верхней оценкой частоты. Таким образом, убедившись в том, что родительские галактики γ-всплесков ничем не отличаются от большинства галактик на тех же z на Рис. 6.4 — то есть это в основном те же галактики со звездообразованием, как правило, наблюдаемые на больших z — мы можем иметь новую (верхнюю) оценку (6.2) *среднего годового темпа встречаемости γ-всплесков* в каждой такой галактике (Sokolov 2001a, 2001b), полученную в результате накопления информации по оптическим отождествлениям γ-всплесков в 1997-2000 гг.

Теперь о *среднем темпе вспышек сверхновых* в далеких галактиках. Для темпа вспышек СН в локальных галактиках со вспышкой звездообразования

$$N_{SN} \approx 0.02 \cdot yr^{-1} galaxy^{-1}, \qquad (6.3)$$

если учитывать все типы сверхновых (Capellaro et al. 1999). Но точно так же, как γ-всплески не наблюдаются во всех типах галактик, а только в галактиках со звездообразованием, не все типы, а только СН типа Ib/c могут быть связаны с γ-всплесками. Т. о., для локальных галактик можно считать, что $N_{SN} \approx 0.001 \cdot yr^{-1} galaxy^{-1}$ для сверхновых, которые могли бы быть связаны с источниками γ-всплесков. Но γ-всплески пока что были обнаружены только в далеких галактиках с $z \sim 1$ и больше, в которых массивное звездообразование в среднем гораздо более энергичное, чем в таких же локальных галактиках (как это следует и из результатов Гл. 5). Очевидно, что темп взрывов ("core collaps") СН типов II и Ib/c пропорционален темпу массивного звездообразования. Тогда и это обстоятельство, и наши индивидуальные оценки SFR в родительских галактиках могут дать в итоге рост темпа взрывов СН до 10 раз и более, если и скорость взрывов сверхновых увеличена в этих галактиках вслед за средним темпом звездообразования в них.

Таким образом, с учетом всех этих оговорок, оценка числа γ-всплесков, которые могли бы быть связаны со сверхновыми оказывается порядка

$$N_{GRB}/N_{SN} \approx 5 \cdot (10^{-5} - 10^{-6}). \tag{6.4}$$

То есть совсем мало, и далеко не каждая СН должна начинаться с γ-всплеска. В то же время с самого начала было принято, что *все* длинные γ-всплески связаны или сопровождаются иногда наблюдаемыми, а иногда и ненаблюдаемыми (см. предыдущий подраздел) взрывами сверхновых (типа Ib/c). Но тогда, если какая-то связь между этими явлениями (γ-всплеск/СН) действительно существует, то мы имеем две возможности для интерпретации этого маленького числа:

1) Либо мы имеем дело с очень редким типом СН и термин "гиперновая" здесь вряд ли подходит, поскольку γ-всплески тогда оказываются связанными лишь с $10^{-5} - 10^{-6}$-й частью всех наблюдаемых СН в далеких галактиках. Это уже не просто пекулярные сверхновые, с которыми иногда отождествляют "гиперновую" Пачиньского (Fields et al. 2001). Пекулярных сверхновых, таких, как 1997ef и 1998bw, оказывается все-таки слишком много (см. Richardson et al. 2001).

2) Либо мы имеем очень жесткий "γ-ray beaming", при котором только *какая-то часть* γ-излучения источника распространяется на большие расстояния в пределах очень малого телесного угла

$$\Omega_{beam} \sim (10^{-5} - 10^{-6}) \cdot 4\pi, \tag{6.5}$$

если γ-всплески связаны с какими-то *асимметричными* взрывами СН. При этом γ-луч (beam) и затем узко коллимированный джет должны быть направлены на наблюдателя, отсюда и такая большая разница между числами N_{GRB} и N_{SN}. Но если к наблюдателю попадает только наиболее коллимированная часть/компонента излучения (например, вдоль оси вращения коллапсирующего ядра звезды с магнитным полем), освещающая лишь малую часть неба, то энергия каждого γ-всплеска должна быть сильно уменьшена, вплоть до нескольких порядков величины по сравнению с так называемым "изотропным эквивалентом" ($E_\gamma \sim 10^{51} - 10^{52} ergs$ и до $10^{53} ergs$) энергии γ-всплеска:

$$E_{beam} = E_\gamma \Omega_{beam}/4\pi \sim 10^{45} - 10^{47} ergs. \quad (6.6)$$

Если реализуется 2-й случай и распространяющаяся в виде узкого пучка энергия (6.6) γ-лучей, достигающих наблюдателя на Земле, действительно является лишь какой-то частью полной (излученной) энергии источника (от $\sim 10^{47} ergs$ до $\sim 10^{49} ergs$?), то другая часть его энергии может быть на самом деле излучается *изотропно* (или почти изотропно). Но при сферически симметричной светимости, соответствующей полной энергетике γ-вспышки, например, $\sim 10^{45} - 10^{47} ergs$, никакой, даже самый чувствительный детектор γ-лучей монитора BATSE не сможет обнаружить потоки, соответствующие такой низкой светимости γ-всплесков для объектов, расположенных на космологических расстояниях, и если наблюдатель окажется вне пределов конуса коллимированной компоненты излучения (6.5). То есть (6.6) может быть близко к нижней оценке полной (излученной) энергии источников γ-всплесков, соответствующей потоку, измеряемому в пределах телесного угла (6.5), в котором распространяется коллимированная компонента излучения источника. (При этом с самого начала предполагается, что *все всплески связаны со сверхновыми.*) Верхняя оценка полной (излученной) энергии источника γ-всплеска для такого варианта интерпретации отношения N_{GRB}/N_{SN} (6.4) будет обсуждена в следующем разделе.

В заключение этого раздела отметим, что, используя уточненную с помощью оптических отождествлений функцию светимости γ-всплесков, Porciani & Madau (2001) получили свою оценку $(1-2) \cdot 10^{-6}$, или $1-2$ γ-всплеска на миллион сверхновых II типа, что очень близко к нашей оценке (6.4) для сверхновых Ib/c типа (Sokolov 2001a, 2001b). Таким образом, учитывая общее количество наблюденных на сегодня сверхновых (2-3 тысячи) в близких галактиках, при отношении N_{GRB}/N_{SN} (6.4) наблюдениями не отвергается ни 1-я (очень редкая СН), ни 2-я (очень малый телесный угол) из возможностей. Хотя уменьшение энергии источника γ-всплеска на 4-6 порядков по сравнению с ее изотропным эквивалентом, если исходить из такого же малого угла коллимации γ-излучения при всплеске, может быть получено (Rhoads 1997) и из других соображений, без учета какой-либо связи "γ-всплеск/СН". Разумеется, такой маленький угол коллимации может привести к соответствующим наблюдательным следствиям для послесвечения γ-всплесков в рентгеновском, оптическом и в радио диапазонах, как это показано Д.Родсом (Rhoads 2001a, 2001b). В этом случае возможен новый наблюдательный эффект типа "Orphan Afterglows" — "послесвечение" без γ-всплеска (см. в седующем разделе).

6.5. Какие объекты являются прародителями гамма-всплесков и может ли быть "вторая" вспышка OT GRB 970508 прямым следствием эволюции массивной звезды - прародительницы?

Этот раздел касается уже самых нижних и самых трудных пунктов блок-схемы (Табл. 1.1 в Гл.1), которой мы придерживались в своих исследованиях явления γ-всплесков. В заключительной 7-й главе будут собраны только надежно установленные (устоявшиеся) факты. Здесь же автор попытается хотя бы "экстраполировать" эти факты дальше и высказать свое мнение о трудностях "стандартных" теоретических моделей. В частности, в этом разделе на основании данных наблюдений в рентгеновском диапазоне будет сделана попытка интерпретировать самый трудный для "стандартной" теории послесвечения случай OT GRB 970508 с *уникальной* кривой блеска, наиболее полный набор многополосной фотометрии которого (OT) был получен на БТА. Насколько эта ситуация была уникальной на самом деле, и почему этот случай ("вторая вспышка") ни разу еще не повторился? (Может быть, за исключением OT GRB 000301c.) Какой (все-таки) механизм обеспечивает рентгеновское и оптическое послесвечения γ-всплесков?

Как и окончательное утверждение интерпретации оптики с помощью сверхновых будет еще подкрепляться дополнительным накоплением данных по спектрам СН и фотометрии, так и сказанное ниже об интерпретации первых успешных наблюдений рентгеновских спектров сразу же (или даже одновременно) с γ-всплеском также еще будет дополняться и уточняться новыми данными. Несомненно то, что рентгеновские наблюдения действительно дают возможность видеть области, расположенные очень близко к самому источнику γ-вспышки, и уточнить ее (вспышки) связь с массивным прародителем и с самим явлением взрыва СН.

6.5.1. Рентгеновские спектры и среда в непосредственной близости от источника гамма-всплеска

Космические рентгеновские обсерватории BeppoSAX, ASCA и Chandra своими наблюдениями довольно убедительно подтвердили связь между γ-всплесками и коллапсом массивных звезд; на этих спутниках были обнаружены спектральные признаки железа для различных всплесков. Уже 4 γ-всплеска показали наличие эмиссионных линий железа в спектрах их рентгеновского послесвечения, которые наблюдались через 8-40 часов после самого события. И в этом списке первым стоит γ-всплеск GRB 970508. Доклад о спектральных наблюдениях рентгеновского послесвечения этого всплеска на BeppoSAX был сделан в Ноябре 1998 г. на первом Римском совещании по γ-всплескам группой Piro et al. (1999). На этом же совещании прозвучал и доклад о спектральных наблюдениях (ASCA) рентгеновского послесвечения другого γ-всплеска — GRB 970828 (Yoshida et al. 2001). Правда, обратили внимание на эти результаты только после того, как были проведены успешные наблюдения спектров еще в двух случаях: для GRB 991216 (Piro et al. 2000) на спутнике Chandra и для GRB 000214 (Antonelli et al. 2000) на BeppoSAX. Суть предложенной интерпретации состоит в том, что сама СН (или прародители СН) могут быть наиболее вероятными источниками линий железа в спектрах. В любом случае, эти новые данные очень важны потому, что все спектральные линии в оптике, которые упоминались до сих пор (и по которым измерялось z), возникают в родительских галактиках (и абсорбции и эмиссии), а не в том месте, где находится сам источник γ-всплеска.

Начнем со спектральных наблюдений на спутнике Chandra рентгеновского послесвечения γ-всплеска GRB 991216 (Piro et al. 2000) с прибором ACIS-S (Advanced CCD Imaging Spectrometer in the Spectroscopic configuration), в подготовке заявки на наблюдения для которого принимал участие и автор диссертации. Наблюдения на Chandra одного из самых ярких γ-всплесков GRB 991216 начались через 37 часов после срабатывания триггера на BATSE/GRBM. Спектр рентгеновкого послесвечения показал эмиссионную линию с энергией $E = 3.49 \pm 0.06$ keV. Эта эмиссионная особенность отождествлялась с энергией покоя 6.97 keV эмиссии водородоподобных ионов железа (FeXXVI) потому, что на бо́льших частотах спектр Chandra/ACIS-S показал присутствие соответствующей рекомбинационной полосы тоже в эмиссии при $E = 4.4 \pm 0.5$ keV. Отождествление этой полосы с рекомбинационной полосой железа (с энергией покоя 9.28 keV) дает

$z = 1.11 \pm 0.11$, что согласуется с $z = 1.02$, найденным по результатам оптической спектроскопии OT GRB 991216 (Vreeswijk et al. 2000).

Рекомбинационная полоса на 9.28 keV действительно ожидается, когда излучение железа обеспечивается его фотоионизацией и среда вокруг источника при этом уже сильно ионизована излучением рентгеновских квантов самого γ-всплеска или его послесвечения. Если эта среда оказывается на луче зрения, то полоса должна наблюдаться сначала в абсорбции в более раннее время, то есть до того, как она (среда) будет уже достаточно (фото)ионизована. (Именно такая абсорбционная особенность действительно была обнаружена в первые 10с в случае другого γ-всплеска GRB 990705, см. ниже.) Позже, когда окружающая источник среда становится сильно ионизованной и имеет место рекомбинация, эта полоса видна в эмиссии. В этих условиях рентгеновские линии формируются почти исключительно посредством рекомбинации электронов в водородоподобном ионе железа.

Из наблюдений γ-всплеска на спутнике Chandra расстояние, на котором находится ионизованная среда от источника всплеска, или размер области формирования этих эмиссионных линий вокруг места, где находится источник, есть $R > 2 \cdot 10^{15}$ см ($R = c \cdot t$). Последнее условие было выведено из присутствия линий в спектре через 1.5 дня (или > 37 часов) после γ-всплеска, что в космологической системе отсчета покоящегося источника всплеска короче, чем наблюдаемое время на фактор $(1+z)^{-1}$. То есть, нижняя оценка размеров области формирования этих спектральных особенностей в статье Piro et al. (2000) сделана прямо из возможной переменности источника на временах порядка 40 часов. (Никому даже в голову не пришло интерпретировать переменность этих линий как-то иначе, например, в предположении о каком-то движении области, где они формируются, с огромным лоренц-фактором.) Линии "стоят" при $z = 1.11 \pm 0.11$, т. е. образуются в медленно движущейся среде (— значительно медленнее, чем требуется для любого ультрарелятивистского движения или расширения) и уже довольно близко (около 140 а.е.) от источника γ-всплеска. Здесь автор предполагает самое простое — *излучение в таких линиях изотропно* должно уходить из области их формирования. (Надо отметить, что полная изотропия излучения рентгеновского "GRB-afterglow" в линиях железа никакого отношения к эффекту "Orphan afterglow" Д.Родса (Rhoads 2001a, 2001b) не имеет.) Хотя есть модель, в которой и это излучение в линиях пытаются сфокусировать специальным экраном — "optically thick slab" в сценарии Lazzatti et al. (2001), Lazzati, Ramirez-Ruiz & Rees (2002).

Различные сценарии были предложены для того, чтобы объяснить эти эмиссионные линии (см. Lazzatti et al. 2001, Vietri et al. 2001, Rees and Meszaros 2000, Weth et al. 2000). Наблюдения на спутниках BeppoSAX, ASCA и Chandra, по-видимому, должны указывать на большое количество железа вблизи источника γ-всплеска. Одно из объяснений, предложенное Vietri et al. (2001) и вытекающее из их трактовки всех наблюдательных свидетельств, состоит в следующем: массивный прародитель, подобный "гиперновой" (Paczynski, 1998) или "коллапсару" (Woosley, 1993), взрывается еще до γ-всплеска, например, за несколько месяцев до него, и при этом взрыве сбрасывает/теряет существенную часть своей массы. Коллапс быстро вращающегося ядра массивной звезды-прародительницы происходит позже и сопровождается наблюдаемым нами явлением γ-всплеска.

Но наблюдениями пока не исключаются и другие модели, в том числе и более простые сценарии, включающие **одновременный** с γ-всплеском взрыв звезды-прародительницы. То есть возможен сценарий, в котором γ-всплеск — это *начало* взрыва СН (типа Ib или Ic), ниже об этом будет сказано подробно.

Результаты рентгеновских наблюдений с Chandra/ACIS-S послесвечения γ-всплеска GRB 991216 существенно дополнили проведенные раньше (летом того же года) спектральные наблюдения на BeppoSAX/WFC другого γ-всплеска GRB 990705. В отличие от GRB 991216 и других γ-всплесков, которые тоже показали наличие эмиссий железа во время рентгеновского послесвечения, в случае γ-всплеска GRB 990705 и одновременно с ним наблюдалась явная *абсорбционная* деталь в спектре на 3.8 keV с соответствующей ей эквивалентной колонковой плотностью атомов водорода, которая исчезла через 13 с после начала γ-всплеска (Amati et al. 2000). Эта абсорбционная особенность в (BeppoSAX/WFC) спектре γ-всплеска была интерпретирована как полоса поглощения нейтральным (точнее — слабоионизованным) железом на 7.1 keV, сдвинутая в красную сторону до 3.8 keV, что соответствует $z = 0.86$. И что очень важно подчеркнуть: эта абсорбционная деталь, наблюдавшаяся в течение первых 13-ти секунд после запуска γ-детектора BeppoSAX/GRBM, перестала после этого обнаруживаться на спектрографе WFC (γ-всплеск длился 40 с). Прямая (или "простейшая") интерпретация этой абсорбционной особенности, которую предложили Amati et al. (2000), состоит в том, что *нейтральное железо уже присутствует на луче зрения* вспышки. Это железо очень быстро фотоионизуется огромным потоком ранних (до начала X-ray afterglow) рентгеновских фотонов из мягкой компоненты спектра самого γ-всплеска, до тех пор, пока все электроны в атоме железа не будут сорваны со своих оболочек, обеспечивая тем самым и быстрое исчезновение полосы нейтрального железа на 7.1 keV.

Но в этом случае размеры области вокруг источника γ-всплеска, где формируется эта переменная спектральная деталь, должны быть равны $(l = c \cdot t)$ $l \approx 2.1 \cdot 10^{11}\mathrm{cm} \approx 3R_{\odot}$, с учетом поправки на фактор $(1+z)^{-1}$. (Так размеры области, в которой поглощает нейтральное железо, определены здесь, а не в статье Amati et al. 2000). Это уже область, непосредственно прилегающая к окрестностям самого источника всплеска. Теперь, когда известно из наблюдений Chandra/ACIS-S для GRB 991216, что в окрестностях источника γ-всплеска действительно может быть какая-то неподвижная среда (неподвижная в том смысле, что в ней нет движений с ультрарелятивистскими скоростями), мы можем уже уверенно и без всяких априорных предположений о лоренц-факторе оценить размер области формирования абсорбции в этой среде в случае GRB 990705 просто по переменности этой линии. В данном случае $l = c{\cdot}t$ — это характерный размер (поглощающей) области вокруг неподвижного, относительно наблюдателя на Земле, источника рентгеновского излучения. Эта область включает и размеры самого источника γ-всплеска (или близка к ним), поскольку мягкий WFC-рентген это часть спектра самого γ-всплеска GRB 990705.

Здесь и дальше будут оцениваться размеры области формирования по переменному спектру с эмиссионными или с абсорбционными деталями, без априорной поправки на огромный лоренц-фактор, как это делается в модели файербола для определения размера движущейся ультрарелятивистски (относительно наблюдателя на Земле) области, создающей непрерывный синхроторонный спектр. (Непрерывный синхротронный спектр может быть так и образуется, но только не линейчатый — абсорбции и эмиссии.) Разумеется, всегда учитывается космологическое красное смещение, получаемое, в частности, по "неподвижным" абсорбционным линиям межзвездной среды родительской галактики. Абсорбция, создаваемая нейтральным железом на 3.8 keV в случае GRB 990705, образуется тоже на луче зрения, так же, как и межзвездные абсорбции (MgI, MgII, FeI, FeII), но в отличие от них *очень близко*, т. е. уже в непосредственной близости от источника. В этом и состоит главный смысл результата группы Amati et al. (2000) — впервые удалось "приблизиться" к самому источнику γ-всплеска.

Таким образом, наблюдение эмиссионных и абсорбционных особенностей в рентгеновских спектрах γ-всплесков и их послесвечений дают принципиально новый инструмент изучения физических условий в их близких (в ближайших) окрестностях, то есть условий непосредственно в ("circumburst medium") околовспышечной среде. Очень существенно, что это прямо связано и с проблемой прародителей γ-всплесков. Теперь можно попытаться понять, что это за неподвижная среда, которая может существовать вокруг источника γ-всплеска? Очевидно, что такая среда могла бы естественно возникнуть как результат эволюции массивной звезды, как в составе тесной двойной системы (ТДС), так и в случае одиночной массивной звезды-прародительницы. Давно уже проведенные классические расчеты эволюции одиночной массивной звезды $\sim 30 M_{\odot}$ показывают (Бисноватый-Коган и Зельдович, 1968; Bisnovatyi-Kogan and Nadyozhin, 1972), что на стадии сгорания гелия во внешних слоях звезды возникает большой инверсный градиент плотности, связанный с избыточной светимостью. И как результат — начинается короткая фаза истечения вещества с темпом до $\sim 0.5 M_{\odot}$ в год. В итоге образуется WR звезда, в окрестностях которой должны остаться большие ($\sim 15-20 M_{\odot}$) массы газа, сброшенного массивной звездой в ходе ее эволюции, начиная с Главной Последовательности. Обзор новейших данных по WR звездам и по эволюции звезд с потерей массы, как в составе ТДС, так и одиночных, есть в статьях Черепащука (2001), Черепащука и Каретникова (2002).

А совсем недавно проведенные, уже в контексте проблемы γ-всплесков, теоретические вычисления (Ramirez-Ruiz et al. 2001) показали, что только *плотная* массивная среда (или оболочка), которая находится близко к месту, где расположен сам источник γ-всплеска — такая, как ожидается в случае массивного звездного прародителя — может обеспечить формирование эмиссионных линий железа, детектируемых с помощью рентгеновских инструментов на орбите. Ramirez-Ruiz et al. (2001) показали своими расчетами, что околозвездные оболочки с большой плотностью могут быть созданы медленным звездным ветром низкой плотности, если массивный прародитель (массивная звезда) переживает эволюционную стадию звезды Вольфа-Райе (WR). Эта стадия характеризуется сильным звездным ветром, в результате чего звезда должна потерять достаточно газа из своих внешних слоев, и в результате чего содержание водорода на ее поверхности должно стать минимальным. Радиус звезды WR (радиус пред СН) становится достаточно маленьким до того, как внутренние источники энергии будут полностью исчерпаны.

Очень существенную роль может сыграть здесь межзвездная (околозвездная) среда, в которую была погружена массивная звезда с самого начала и во время своей эволюции. Из-за собственных вариаций темпа потери массы звездой до и во время стадии WR получаются оболочки с различной плотностью газа. Эффекты взаимодействия сброшенного звездой вещества на этой стадии с окружающей околозвездной средой могут наблюдаться в виде ветровых пузырей (wind bubbles) вокруг некоторых из этих объектов. Торможение звездного ветра пред-СН давлением окружающей околозвездной среды, или взаимодействие быстрых и медленных ветров, также могли бы создать оболочки вокруг звезд переменной плотности. Наконец, массивные звезды вообще имеют тенденцию находиться в ассоциациях, так что неоднородности околозвездной среды вокруг них могут быть совместным эффектом от ветров сразу многих звезд. Таким образом, состояние окружающей WR звезду среды *в конце ее эволюции* определяется главным образом эволюцией ее темпа потери массы (до коллапса массивного ядра). Здесь, на основании результатов расчетов в статье Ramirez-Ruiz et al. (2001), будут показаны некоторые интересные (для интерпретации кривых блеска OT GRB) особенности в структуре окружающей звезду-прародительницу среды, которая возникает, когда вещество звездного ветра взаимодействует с межзвездной (или околозвездной) средой в течение ($\sim 10^5$ лет) жизни звезды в стадии WR.

Плотность числа частиц во внешней среде, которая была создана в результате потери массы в виде звездного ветра прародителем, хорошо моделируется степенным законом $n = Ar^{-2}$, где расстояние r измеряется от самой WR звезды. На расстоянии $r \sim r_{dec}$ возникает сферическая оболочка большой плотности: сброшенное вещество здесь останавливается и сгребается, дальше фаза свободного распространения звездного ветра прекращается. Например, можно взять плотность окружающей околозвездной среды n_0, до начала активной фазы сброса массы на стадии WR, равной 1 cm^{-3}. Но если присутствует другая массивная звезда, то плотность n_0 окружающей звезду-прародительницу среды может оказаться значительно больше, достигая значений 10^6 cm^{-3}, что приведет к тому, что WR звездный ветер затормозится еще быстрее и на значительно меньшем расстоянии r_{dec}.

Результаты расчетов Ramirez-Ruiz et al. (2001), которые могут иметь непосредственное отношение к интерпретации наших данных по OT GRB 970508, в основном показаны на Fig. 2 и 4 из этой статьи. (Расчеты Fig.2 с солнечной металличностью приведены в самом конце этой главы на Рис. 6.5.) Здесь видно и влияние выбора начальной массы звезды M_0 на структуру окружающей прародитель среды. Гладкий степенной закон для плотности $n(r) = Ar^{-2}$ применим до $r < r_{dec}$. Величина $A = 3.0 \cdot 10^{35} A_*$ как функция M_0 показана на панели a. На этих рисунках показано (панель b) также положение r_{dec} оболочки с повышенной плотностью как функция начальной массы звезды на Главной Последовательности M_0 при различных величинах n_0 и различных металличностях. Эта оболочка, или область с повышенной плотностью, лежит ближе к звезде-прародительнице для более высокой плотности n_0 окружающей ее среды (или плотности окружающего вещества до стадии WR). Существенно, что эта оболочка оказывается ближе и для меньших значений начальной массы M_0. Все проэволюционировавшие WR звезды, потерявшие свои водородные оболочки, остаются в конце концов голыми гелиевыми ядрами (см панель c на Fig. 2 и 4 в статье Ramirez-Ruiz et al. 2001, или Рис.6.5 c.) до своего коллапса (или до возникновения явления γ-всплеска).

Важный результат этих вычислений состоит в том, что для *начальной массы звезды* $M_0 \approx 30M_\odot$ область, в которой сконцентрирована почти вся масса ($\sim 10-20M_\odot$), быстро теряемая звездой в течение стадии WR, действительно может иметь типичные размеры $\sim 10^{15}$cm. Этот же результат следует и из наблюдений BeppoSAX, ASCA и Chandra таких всплесков, как GRB 970508, GRB 970828, GRB 991216, GRB 000214. Во всех этих случаях в спектрах рентгеновского послесвечения через 8-40 часов после γ-всплеска наблюдались эмиссионные линии железа. Существует ли на самом деле область повышенной плотности ("bump") около звезды-прародительницы или нет, — это сильно зависит от плотности окружающей звезду материи n_0 до стадии WR. Заметим, что многие WR звезды должны быть одиночными объектами. Тем не менее, все-таки значительная доля наблюдаемых WR входит тесные двойные системы WR + OB (Халиуллин и Черепащук 1982, Черепащук 2001, Черепащук и Каретников 2002). Условия образования достаточно протяженных плотных оболочек вокруг одиночных звезд могут быть более предпочтительными, поскольку в ТДС теряемый звездой водород в основном перетекает на второй компонент системы и это может быть важным при интерпретации аномальных кривых блеска некоторых ОТ (таких, как например ОТ GRB 970508),

Внутри такой оболочки плотность числа частиц газовой среды вокруг прародителя γ-всплеска следует гладкому степенному закону (или "WR-закону"), то есть закону, характерному для WR-звездного ветра: $n = Ar^{-2}$ где $A = A_* \cdot 3 \cdot 10^{35}\mathrm{cm}^{-1}$ и значение A_* находится в интервале с примерно такими границами $0.2 < A_* < 1$ для WR звезд в самом конце их жизни. Значение A_* зависит еще от массы звезды на ГП. В частности, для начальной массы $M_0 \approx 30M_\odot$ ($A_* \approx 0.3$) вся оболочка имеет размеры около $2r_{dec} \sim 10^{15}$cm (при $n_0 \sim 10^2$ cm^{-3}) и более-менее резкую границу, внутри которой вся сброшенная звездой масса остановлена взаимодействием между WR ветром и околозвездной средой. По-видимому, такие оболочки вокруг WR, с заметным контрастом плотности на границе, должны возникать в типичных областях звездообразования с плотностями 10 - 100 cm^{-3}, по крайней мере, а может быть и со значительно большими плотностями, которые характерны для больших молекулярных облаков, если действительно γ-всплески ассоциируются с массивными звездами.

6.5.2. Интерпретация оптических и рентгеновских кривых блеска ОТ гамма-всплеска GRB 970508 с учетом данных рентгеновской спектроскопии

Теперь все есть для того, чтобы подвести итог, вернувшись к интерпретации результатов наших собственных наблюдений ОТ GRB 070508, изложенных в 3-й главе и учесть данные спектральных наблюдений в рентгене для этого γ-всплеска, а также учесть новые результаты рентгеновской спектроскопии других всплесков. Но сначала надо сказать о трудностях "стандартной" интерпретации кривой блеска ОТ GRB 070508. Panaitescu, & Kumar (2001) анализировали послесвечение 4-х *хорошо изученных* γ-всплесков (GRB 980703, GRB 990123, GRB 990510, **GRB 991216**), предполагая, что излучение транзиентов (рентген, оптика, IR, радио) возникает из-за взаимодействия коллимированной релятивистской ударной волны с окружающей средой. Они показали, используя свою детально разработанную модель послесвечения с ударной волной, что плотность среды для некоторых γ-всплесков может быть $\sim 10^{-1} - 10^{-4}$ cm^{-3}. То есть из теории следует, что плотность окружающей источник γ-всплеска межзвездной среды может быть очень низкой, что заметно контрастирует с плотностями 10 - 100 cm^{-3} (и по-видимому даже больше), которые типичны для областей звездообразования родительских галактик (см. предыдущие главы). Столь низкая плотность околозвездной среды может создать серьезную проблему для гипотезы массивных прародителей γ-всплесков.

Но нужно заметить, что выведенные таким образом парадоксально низкие плотности все-таки существенно зависят от модельных предположений. Сейчас мы имеем уже прямые наблюдения рентгеновских спектров, в частности, и для GRB 991216 из списка Panaitescu & Kumar исследованных ими послесвечений γ-всплесков. (Поиск спектральных особенностей γ-всплесков в рентгене был и остается одним из главных приоритетов наблюдательных программ на аппаратах BeppoSAX, Chandra, XMM-Newton.) При этом надо отметить, что Panaitescu & Kumar (2001) в свой анализ многоволновых данных 4-х γ-всплесков не включают транзиент, соответствующий GRB 970508 — наилучшим образом исследованный объект во всех диапазонах длин волн. В частности, его оптическая кривая блеска (+ренген и радио) не может быть полностью объяснена без выхода за рамки основных предположений в их модели послесвечения с ударной волной, так как этот транзиент показал необычное (а это был только 2-й ОТ) увеличение блеска (или вторую вспышку) через день после γ-всплеска, указывая на возможную задержку энерговыделения (γ-всплеска ?) или на сильную флуктуацию плотности среды, с которой взаимодействует ударная волна. В конце концов речь может идти в данном случае о флуктуации той же самой плотности окружающей среды (или n_0 ?). Как раз о влиянии флуктуации плотности в околозвездной среде звезды-прародителя GRB 970508 будет сказано ниже, но с учетом данных рентгеновской спектроскопии, которые могут существенно изменить всю картину (и которые Panaitescu & Kumar не используют в своих расчетах).

Piro et al. (1999) исследовали рентгеновский спектр послесвечения GRB 970508 с целью найти линию Fe в спектре полученном на BeppoSAX. И они нашли тогда такую линию, но с небольшой статистической значимостью (99.3 %), в раннем (первые 16 h) послесвечении. К тому же линия ослабела в более позднем сете наблюдений (через ~ 1 день после γ-всплеска) по крайней мере в 2 раза, т.е. достаточно, чтобы сделать ее недетектируемой с помощью той же аппаратуры. (Это сейчас понятно, что эти линии могут быть *переменными* и не всегда можно их успеть обнаружить.) Одновременно с исчезновением линии Fe рентгеновский поток возрос (см. Рис. 3.5 (c)) и спектр стал более жестким, что авторы интерпретировали как проявление какой-то новой ударной волны. (Может быть новая ударная волна без γ-всплеска, а может быть это результат прямого и обратного комптоновских рассеяний, обеспечивающих и полуширину линии.) В оптике тоже в это время наблюдается (вторая) вспышка. Затем, в конце этой вспышки рентгеновский спектр становится более крутым (мягким). Главное, что из переменности интенсивности и ширины линии в спектре рентгеновского транзиента GRB 970508 можно вывести, что эта загадочная "окружающая среда" должна быть расположена на расстоянии $c \cdot t \approx 1.5 \cdot 10^{15}$см или около 100 а.е. от источника γ-всплеска. (Для таких размеров оболочка должна иметь довольно большую плотность $n > 5 \cdot 10^9 \mathrm{cm}^{-3}$.) Наиболее вероятно, что эта линия в спектре транзиента образуется в процессе радиационной рекомбинации с последующим переходом электронов на нижние уровни в атомах Fe, ионизованных интенсивным потоком рентгеновского излучения самого γ-всплеска.

Судя по максимальным потокам рентгеновского и γ-излучения (Frontera et al. 2000) самая ранняя (prompt) рентгеновская радиация, *одновременно* детектируемая с помощью BeppoSAX/GRBM (40-700 keV) и BeppoSAX/WFC (1.5-26 keV), обычно может содержать в себе до 10% полной энергии всего γ-всплеска. Так что в эту самую раннюю фазу γ-всплеска поле излучения вблизи источника очень мощное, с потоками не меньше, чем $F_X \sim 10^{17} - 10^{18}$ erg cm^{-2} s^{-1} до расстояний $r \sim 10^{15}$cm или до 100-200 а.е. от источника. В этих условиях атомы железа могут почти полностью потерять все свои электроны. Если вспомнить об абсорбционной особенности в рентгеновском спектре GRB 990705 в первые 13 с , то можно предположить, что на гораздо меньших ($\approx 3R_\odot$) расстояниях от источника из-за еще бóльших потоков во время самого всплеска комптоновская температура становится очень высокой и рекомбинация еще не очень существенна в продуцировании линейных фотонов в первые минуты после всплеска. Когда же поток сильно уменьшается через $\sim\ 10^4$ с после всплеска или в гораздо большей по размерам области пространства вокруг источника, высвечивание (fluorescence) в результате радиационной рекомбинации становится эффективным процессом и через $\sim$0.5-1 суток после γ-всплеска мы можем наконец наблюдать эмиссионные линии Fe.

Это все, что можно сказать сейчас об интерпретации рентгеновских наблюдений до формулирования предположений той (или другой) модели, которой придерживаются сами авторы (Piro et al. 1999; см. также у Vietri et al. 2001). В частности, оценка массы Fe сделанная ими, может быть модельно зависимой. Они сами отмечают, что направленное излучение (рентген и гамма) при всплеске ("beaming") вводит в модель дополнительный геометрический фактор. Это должно сильно уменьшить требуемое число рентгеновских фотонов и, следовательно, уменьшить массу Fe, которая необходима для объяснения наблюдаемых абсорбционных и эмиссионных линий. В частности, в формировании линии поглощения нейтральным (в начале) Fe может принимать участие лишь небольшая часть оболочки вокруг *коллапсирующего ядра* звезды-прародителя — только то, что попало внутрь телесного угла, в котором сосредоточена основная часть энергии коллимированного излучения источника γ-всплеска (рентген + гамма), и только то, что создает достаточно (оптически) толстый экран для распространения рентгеновских квантов с частотой 7.1 keV *в этом* направлении. Это обстоятельство здесь будет учтено после сравнения рентгеновских и наших оптических данных для OT GRB 970508. Но можно сразу согласиться с авторами (Piro et al. 1999; Vietri et al. 2001) в главном, независимо от модели, в которой считается масса Fe: по контрасту с достаточно чистой средой, ожидаемой при слиянии двух нейтронных звезд, наблюдаемые свойства спектральных линий должны означать, что место, где возникает γ-всплеск (предполагается аксиально симметрично коллапсирующее ядро массивной звезды), погружено в какую-то оболочку *большой массы* в согласии с истечением такой большой массы газа, которое предшествует γ-всплеску (pre-GRB-explosion) в сценарии с массивной звездой-прародительницей в конце ее эволюции.

Кроме того, если такой сценарий: *"массивная звезда —> WR —> пред-СН = пред-GRB"*, с формированием оболочки вокруг WR, возможен, то можно предположить, что причиной возникновения релятивистского джета является мощное давление излучением источника γ-всплеска. Можно отвлечься сейчас от проблемы механизма возникновения самого источника γ-всплеска и пока не обсуждать здесь вопрос о том, как возникли эти коллимированные гамма (+ рентгеновские) кванты. (В конце концов, возможно только лишь часть $\sim 10\%$ или даже 1% от полной энергетики γ-вспышки $\sim 10^{47} - 10^{49}$ эрг может быть коллимированным излучением, которое доходит до Земли и детектируется как γ-всплеск.) Основное сейчас — это *направленный поток* излучения от некоторого источника и возможность существования *плотной газовой среды*, на которую давит излучение погруженного в нее источника рентгеновского и γ-излучения при том, что эта среда может быть наиболее плотной как раз очень близко к источнику, если $n = Ar^{-2}$.

Для *силы* светового давления, которая может действовать на газовую среду (плазму) вокруг источника γ-всплеска (WR-звезда?) имеем $L_{GRB}/(4\pi r^2) \cdot (\sigma_T/c)$. Где L_{GRB} — так наз. "изотропный эквивалент" *светимости* ($\sim 10^{50-51}$ erg$\cdot$ s^{-1} и $>$) источника, r — расстояние от центра (от источника), $\sigma_T = 0.66 \cdot 10^{-24}$cm^2 — Томсоновское сечение, c — скорость света. Даже без детальных вычислений ясно, что такая сила может превышать силу светового давления соответствующую *Эддингтоновскому пределу* светимости ($\sim 10^{38}$erg$\cdot$s^{-1} для 1 $M_\odot$) на 12-13 порядков. В принципе и изотропное излучение с такой огромной светимостью $L_{GRB} \sim 10^{50-51}$erg$\cdot$s^{-1} может привести к быстрому разгону (или к взрыву) прилегающей к источнику среды с помощью светового давления. Здесь важен только огромный *поток* излучения в данном направлении. (Так или иначе, но наблюдатель оказывается, по крайней мере, на одном из таких лучей, когда видит явление γ-всплеска.) Но если допустить, что излучение γ-всплеска (самое раннее рентгеновсое + γ-излучение) должно быть коллимировано, *или* мы имеем очень сильную коллимацию (strong beaming) с телесным углом $\Omega_{beam} \sim (10^{-5} - 10^{-6}) \cdot 4\pi$ для выходящего из источника излучения, то тогда формирование релятивистских или ультрарелятивистских джетов становится неизбежным уже только по причине такого огромного/гигантского светового давления, действующего на *плотную* газовую среду в непосредственной близости от источника. Все зависит от степени ионизации, плотности и температуры плазмы в непосредственной близости от источника — асимметрично коллапсирующего ядра массивной звезды.

Можно оценить размеры области, в которой такой джет может быть ускорен давлением излучения до релятивистских скоростей. Поток фотонов, ускоряющих плазму на расстоянии r от центра, есть $L_{GRB}/(4\pi r^2)$. В непосредственной близости от источника γ-всплеска такой поток может быть огромным, а на границе этой области он должен быть, по крайней мере, не меньше Эддингтоновского потока $L_{Edd}/(4\pi R_*^2)$, чтобы еще ускорять вещество до скоростей хотя бы $\sim 0.3c$. Здесь L_{Edd} — Эддингтоновская светимость $\sim 10^{38}$erg$\cdot$s^{-1} для 1 $M_\odot$ и R_* — размер $\sim 10^6$ cm. (По определению $L_{Edd}/(4\pi R_*^2)$ — поток излучения, *останавливающий* аккрецию, т. е. падающее из бесконечности с параболической скоростью вещество. Для нейтронной звезды это $\sim 0.3c$.) Из условия, что фотонный поток $L_{GRB}/(4\pi r^2)$ на некотором расстоянии r равен $L_{Edd}/(4\pi R_*^2)$ (или, во всяком случае, не меньше этого потока), и учитывая, что светимость (вернее ее *изотропный эквивалент*) излучения источника γ-всплеска есть $L_{GRB} \sim 10^{50-51}$erg$\cdot$s^{-1}, можно получить некоторый характерный размер $\sim 10^{12}$ cm $\approx 14R_\odot$. По крайней мере, на границе этой области световое давление может *еще* разгонять неподвижную в начале среду до субсветовых скоростей $\sim 0.3c$, *а на меньших расстояниях* от источника, скажем при $r \sim 10^9$ cm (т.е. где-то *внутри* области с размерами меньше, чем характерные размеры коллапсирующего ядра массивной звезды), ускорение светом разгоняет вещество *уже* до ультрарелятивистских скоростей с лоренц-фактором ~ 10 при "изотропной" светимости $L_{GRB} \sim 10^{50}$erg$\cdot$s^{-1}. Так или иначе, но это уже оказывается где-то совсем близко к характерным размерам $\approx 3R_\odot$, которые следуют из наблюдений переменной абсорбционной особенности, наблюдавшейся одновременно с γ-всплеском GRB 990705 в его BeppoSAX/WFC спектре (Amati et al. 2000). Где-то там, внутри этой области зарождается релятивистский джет и возникает яркий рентгеновский источник, ионизующий железо в оболочке $\sim 100 - 300$ а.е., образовавшейся в результате эволюции звезды-прародительницы. Эта ионизованная и разогретая до высоких комптоновских температур ранним рентгеном (во время всплеска) оболочка затем медленно высвечивается еще и после прохождения через нее ударной волны, возникающей от быстро *пролетающего* через эту оболочку релятивистского джета (или джетов).

Если учесть возможность образования таких джетов вблизи коллапсирующего массивного ядра звезды, окруженного оболочкой с размерами $\sim 100 - 300$ а.е., то поведение оптических и рентгеновской кривых блеска транзиента GRB 970508 (см. Рис. 3.1 и Рис. 3.5 a,c), необъяснимое *в рамках* модели послесвечения Panaitescu и Kumar (2001, 2002), становится естественным. На Рис. 3.3 видны отклонения от среднего (или от "стандартного") степенного закона во всех 4-х фотометрических полосах, соответствующие экспоненциальному падению блеска ОТ, которое наблюдается в B, V, R, I сразу же после максимума (Рис. 3.5 a). Как уже отмечалось в 3-й главе, максимум (вторая вспышка) и это экспоненциальное падение блеска коррелируют с кривой блеска рентгеновского транзиента GRB 970508 (Рис. 3.5 c) после явного минимума в рентгене, отмеченного Piro et al. (1998). Так же, как ОТ слабеет *только после* достижения своего максимума блеска (т.е. вообще не следуя какому-то степенному закону **сразу же после всплеска**), последующее уменьшение рентгеновского потока после своего минимума тоже отклоняется от степенного закона. (Можно думать, что вторая вспышка ОТ сопровождается вспышкой и в рентгене.) Во всяком случае, эти совпадения могут быть аргументом в пользу общего происхождения рентгеновских и оптических аномалий в кривых блеска. Более чем 16%: 6% (в оптике) + 10% от энергии всего γ-всплеска было выделено в этот период. То есть, это была какая-то активность транзиента с довольно высокой энергетикой, сравнимой с энергией самой γ-вспышки. И все это происходило на шкале времени ($\sim 10^5$ s) в 10000 раз длиннее, чем длился γ-всплеск, что может указывать на переизлучение или долгое высвечивание в рентгене и в оптике энергии (по крайней мере!) рентгеновского "хвоста" γ-всплеска ("the prompt X-ray radiation of the GRB"), который обычно сам содержит довольно много — $\sim 10\%$ полной энергии γ-всплесков (Frontera et al. 2000). Можно предположить, что часть этого самого раннего рентгеновского потока просто "застревает" в окружающей плотной оболочке и потом медленно высвечивается, обеспечивая хорошо наблюдаемую в оптике экспоненту (Рис. 3.3) с характерным временем около 2-х суток, которая *накладывается* на общее степенное падение блеска *после* максимума или после второй вспышки и в оптике, и в рентгене. Характерные времена изменения оптических и рентгеновских потоков в районе этой вспышки говорят все о тех же характерных размерах переизлучающей оболочки, какие дают времена появления и исчезновения рентгеновских эмиссий (имеется в виду не только GRB 970508) — это все те же размеры 100-300 а.е.

Вторая вспышка — это самая главная особенность кривой блеска OT GRB 970508, не объяснимая с помощью "модифицированной" (т.е. с бóльшим числом свободных параметров) теории Panaitescu & Kumar. Это загадочное увеличение блеска послесвечения GRB 970508 (и в оптике, и в рентгене) могло быть следствием столкновения джетов или фронтов ударных волн, возникающих при движении джетов в сферической оболочке с высокой плотностью. Такая оболочка с резкой (по плотности газа) границей, с размерами $2r_{dec} \sim 10^{15}$ cm могла возникнуть (как уже говорилось выше) вокруг источника на стадии WR звезды, когда теряемый звездой-прародительницей газ останавливается из-за взаимодействия звездного ветра с окружающей ее околозвездной средой с конечной плотностью n_0. Эта плотная оболочка с размером $\sim 10^{15}$ cm поглощает и существенную часть рентгена или рентгеновской части энергии γ-всплеска. Но, по-видимому, главное все-таки, что в этой оболочке (или в остатке от звезды- прародительницы) через ударные волны высвечивается некоторая часть (и, наверное, все-таки небольшая) механической энергии движения джета, возникшего как результат удара/ускорения плазмы мощным фотонным "поршнем" где-то в ближайших окрестностях быстро-вращающегося коллапсирующего ядра звезды-прародительницы. Высвечивается эта гигантская оболочка достаточно медленно и *изотропно*. В результате мы и имеем новый рентгеновский и оптический источник или "вторую вспышку" в послесвечении этого γ-всплеска, которая началась примерно через 0.7 дня после всплеска (Рис. 3.5 a, c).

Но, по-видимому, сам джет в это время не наблюдается. Наблюдается, особенно в максимуме яркости послесвечения GRB 970508, проявление ударных волн и их эффект — мощный рентгеновский источник, возникающий при движении джета через протяженную неоднородность плотности газа вокруг пред-СН (WR). По-видимому, как раз это экспоненциальное высвечивание оболочки (или сферического слоя толщиной $\sim 10^{15}$ cm) на фоне синхротронного излучения газа на фронте ударной волны мы наблюдали в течение нескольких дней после максимума (Рис. 3.1 и Рис. 3.5 a, c) для послесвечения этого γ-всплеска. После того, как этот новый рентгеновский источник (или оболочка вокруг звезды WR) полностью высветится (через 4-5 дней после γ-всплеска), остается только синхротронное излучение ударной волны при прохождении джета сквозь однородную межзвездную (околозвездную) среду с плотностью n_0, которая существовала вокруг прародителя еще на стадии эволюции звезды на Главной Последовательности. То есть характер (механизм) излучения действительно меняется после выхода джета из плотной оболочки в однородную среду с плотностью n_0 (примерно в это время на кривых блеска других γ-всплесков наблюдается знаменитый излом/укручение). По сути дела здесь могут работать примерно те же механизмы излучения, которые используют и Panaitescu & Kumar (2001), но при значительно (до миллиона раз) меньшей энергии γ-всплеска и, соответственно, в 100-1000 раз меньших поперечных размерах джета.

По-видимому, сильного торможения джета из-за взаимодействия релятивистской ударной волны с окружающей средой нет в таком сценарии даже при очень больших значениях плотности этой среды вокруг WR потому, что тормозится значительно более компактный релятивистский джет ("пуля"), а не ударная волна, как в модели Panaitescu & Kumar. Здесь нет такого широкого "бульдозера" — ударной волны, сгребающей вещество впереди себя и (соответственно) нет, или почти нет эффективного торможения "пули" при ее движении в направлении уменьшающейся плотности внутри оболочки вокруг WR. Поэтому из-за малого торможения и при небольших потерях на излучение (но с большим начальным импульсом) эта пуля может двигаться с релятивистской скоростью и с одним и тем же лоренц-фактором ~ 10 все время, пока транзиент наблюдается, т.е. "на протяжении" всей его кривой блеска с ее максимумами (или изломами). Ударные волны, возникающие при движении сквозь оболочку, только нагревают эту среду там, где она еще достаточно плотная, т.е. на расстояниях $< 10^{15}$ см от источника.

Таким образом, увеличение яркости OT GRB970508 (или вторая вспышка) и затем наблюдавшееся нами экспоненциальное высвечивание (+ рентгеновская 2-я вспышка на Рис. 3.5.c) — связанные явления в такой картине. А теперь можно предположить, почему этот случай был уникальным и почему не все OT показали такие эффекты, в частности, мощную вторую вспышку послесвечения, за исключением OT GRB 000301c. В случае OT GRB 000301c на 3-и сутки после γ-всплеска тоже наблюдалось некоторое увеличение блеска оптического послесвечения, хотя и не такое значительное, каким оно было для OT GRB 970508. (Но даже это небольшое поярчание приходится игнорировать при объяснении всей кривой блеска OT GRB 970508 в рамках самосогласованной модифицированной теории Panaitescu (2001).) По-видимому, не всегда достаточно плотная оболочка может возникать вокруг звезд-прародителей γ-всплесков, как в случае прародителя

GRB 970508. Это зависит прежде всего от величины n_0 и от других факторов (см. Ramirez-Ruiz et al. 2001). В частности, в тесных двойных (Черепащук и Каретников, 2002) только небольшая часть потерянного водорода может создать достаточно протяженную оболочку вокруг WR-звезды.

Но, по-видимому, сферы размером $\sim 10^{15}$ cm часто формируются с более или менее резким скачком плотности на их границах вокруг WR звезд. Тогда известные изломы и укручения, наблюдаемые в кривых блеска некоторых γ-всплесков через 3-4 дня (которые интерпретируются как эффект коллимации всплеска в моделях типа Panaitescu & Kumar), могут быть объяснены в таком сценарии *с малой энергетикой* и с сильно коллимированным γ-всплеском (с ускорением релятивистского джета рентгеновскими + γ-лучами) все тем же взаимодействием между джетом ("пулей") и неоднородной средой вокруг WR. Поведение кривой блеска в первые дни будет определяться вкладом (хотя и не таким большим, как для GRB 970508) этой оболочки вокруг WR-звезды до тех пор, пока она полностью не высветится и кривая блеска "пойдет" по степенному закону. Таким образом, подъемы и изломы в кривых блеска могут быть связанными только с неоднородностями в распределении $n(r)$ около прародителя γ-всплеска. (О наблюдаемых изломах в кривых блеска см. Pian et al. (2000), Dai & Cheng (2001) и ссылки там же.)

6.6. Обсуждение результатов главы

По-видимому, основной вопрос, который сейчас волнует исследователей феномена космических γ-всплесков (и наблюдателей и теоретиков, см. Таблицу-схему 1.1) — *какие реальные астрофизические объекты могут быть прародителями источников GRB?* Наблюдательные данные, полученные в последнее время, свидетельствуют скорее в пользу идеи, что длинные γ-всплески являются результатом коллапса массивных звезд, чем в пользу представления о слиянии двух компактных объектов (типа NS+NS), которое возникло еще до первых определений красных смещений, получения спектров и прямых изображений родительских галактик источников γ-всплесков. Наблюдаемое распределение положений переменных оптических источников или OT γ-всплесков относительно родительских галактик, показатели цвета этих галактик и их спектры заставляют считать, что источники всплесков связаны со звездообразованием в далеких галактиках: спиральных, иррегулярных, компактных голубых и других галактиках с транзиентной вспышкой звездообразования. По крайней мере, некоторые ОТ могут находиться прямо в областях или рядом с областями энергичного звездообразования этих галактик с темпами массивного звездообразования в десятки раз более высокими, чем то, что наблюдается в аналогичных по типу галактиках локальной Вселенной. Кроме характерного "плеча" на кривой блеска ОТ GRB 970508, обнаруженного по наблюдениям на 6-метровом телескопе в фотометрической I_c-полосе, еще в нескольких случаях (GRB 970228, GRB 980326, 990712, 991208, 000911, 011211) были найдены свидетельства в пользу связи GRB + СН типа Ib/c (или с т.наз. "core-collapse" СН), что может быть довольно веским аргументом в пользу представления о массивных звездах—прародителях источников космических γ-всплесков.

И все-таки спор о прародителях не утихает, а скорее только разгорается в связи с новыми результатами рентгеновской спектроскопии в первые несколько часов после или даже одновременно (GRB 990705) с самим γ-всплеском. Многими эти наблюдения просто игнорируются при объяснении кривых блеска в разных частотных полосах, как это сделано в цикле работ Panaitescu (2001) и Panaitescu, & Kumar (2001, 2002). Это и понятно, ведь расстояния, на которых объясняются кривые блеска в "стандартной" теории в 100 раз больше, чем те, на которых образуются эмиссии в рентгене (световой день) и тем более абсорбции. В этих статьях на основе детальных расчетов послесвечения γ-всплесков в модели ударной волны (с энергией γ-всплеска порядка $10^{51} - 10^{52}$ erg) сделана попытка объяснить существующие многоволновые данные по кривым блеска 10-ти более-менее хорошо изученных транзиентных источников, связанных с γ-всплесками. Хотя существуют и другие варианты таких расчетов в этой же модели, но в самосогласованных расчетах авторов (Panaitescu & Kumar 2002), учитывающих эффекты микролинзирования и другие модификации теории (до 10-ти свободных параметров), получаются довольно низкие плотности окружающей источник всплеска материи. В некоторых случаях плотность межзвезной среды, а речь здесь идет о расстояниях $\sim 10^{17}$ см, составляет всего $\sim 1 - 10^{-3}$ см$^{-3}$. В остальных случаях удается подбором свободных параметров "дотянуть" эти плотности до значений ~ 10 см$^{-3}$, в то время как в результате эволюции массивных звезд плотности среды вокруг них *уже* оказываются больше 100 см$^{-3}$, а в областях звездообразования, с которыми связаны источники γ-всплесков, плотности могут достигать значений $10^4 - 10^5$ см$^{-3}$. Для того, чтобы как-то согласовать результаты этих расчетов с наблюдениями, приходится, как, например, в случае GRB 990123 с наиболее низкой плотностью $\sim 10^{-3}$ см$^{-3}$ ISM, следующей из модели, предполагать существование (перед взрывом источника всплеска) огромных пустот — "superbubbles" — остатков более раннего массивного звездообразования (Scalo & Wheeler 2001).

Но проблема все равно остается, даже если предположить эти "superbubbles". Ведь и сами массивные звезды-прародители "засоряют" окружающую среду вокруг себя посредством звездных ветров на разных стадиях их эволюции. Да и все рентгеновские наблюдения говорят о большой колонковой плотности в направлении на источник всплеска ($N_H \sim 10^{22}$ см$^{-2}$). В частности, Galama & Wijers (2001) приводят эти данные и отмечают огромную разницу поглощений в рентгене и в оптике, что можно понять и так: уже в непосредственной близости от источника (а не просто на луче зрения в его родительской галактике) может быть довольно много газа. Есть совершенно естественная причина для этого: звездный ветер от самой массивной звезды-прародительницы, т.е. не нужны даже плотные молекулярные облака в областях звездообразования (хотя и они там должны быть, конечно). Таким образом, если не межзвездная, то уж ветровая среда ("wind medium") обязательно будет формировать довольно плотную околозвездную оболочку вокруг массивной звезды. Из расчетов звездного ветра Ramirez-Ruiz et al. (2001), которые подробно цитировались в предыдущем разделе, следует, что (невозмущенная) плотность $n = Ar^{-2}$, создаваемая звездным ветром, дующим с характерной скоростью v_8 порядка 10^8 см c^{-1}, темпом $\dot{M}_{-5}$ около 10^{-5} $M_\odot$ год$^{-1}$ и на характерном расстоянии r_{17} см от массивной звезды, можно записать так:

$$n = 30\text{см}^{-3}\dot{M}_{-5}v_8^{-1}r_{17}^{-2}. \tag{6.7}$$

То есть уже даже умеренный ветер массивной звезды "засорит" окружающее пространство до плотностей не меньше, чем ~ 10 см$^{-3}$ на расстояниях $\sim 10^{17}$ см. А поскольку массивная звезда в результате своей эволюции проходит стадию WR-звезды с интенсивной потерей массы ($> 10^{-4}$ $M_\odot$ год$^{-1}$), то существование оболочек вокруг этих звезд с плотностями порядка 100 см$^{-3}$ и более, становится просто неизбежным следствием их эволюции и любая теория, связывающая γ-всплески с массивными звездами, должна считаться с этим фактом. В частности, на еще меньших расстояниях $\sim 10^{15}$ см, там, где наблюдаются эмиссионные Fe-линии, плотность еще *невозмущенного* WR-звездного ветра (следующего WR-закону с $n = Ar^{-2}$) оказывается равной $n = 3 \cdot 10^6$ см$^{-3}$.

Теперь об энергетике γ-всплесков (6.6) и о связанном с такой энергией малом угле коллимации (6.5) γ-лучей. Впервые о возможности существенно меньшей (чем $\sim 10^{51} - 10^{52}$ ergs) энергетики для источников всплесков было сказано Джеймсом Родсом (Rhoads 1997) в рамках "стандартного" представления о релятивистском фаерболе с ультрарелятивистскими движениями, требующими больших лоренц-факторов ($\Gamma \sim 100$). Хотя автор (Д.Родс) ни слова не сказал о последствиях для самой теории фаербола (и величины Γ в частности) такого резкого уменьшения (на 6 порядков) ее самого главного параметра — энергии γ-всплеска, суть его справедливых (не только в рамках этой теории) соображений состоит в том, что независимо от того, изотропно излучение γ-всплеска полностью или нет, γ-лучи, которые мы наблюдаем, приходят к нам от излучающих где-то внутри источника частиц, движущихся *только* в пределах узкого конуса около луча зрения (источник — детектор) с тем же углом раствора: $\sim \Gamma^{-1}$. При этом мы не можем *apriori* утверждать *ничего* о том, есть ли вообще какое-либо γ-излучение за пределами этого узкого конуса.

С другой стороны, можно вообще не связывать себя заранее никакими априорными предположениями о величине Γ. Главное, что действительно невозможно заранее знать, изотропно ли излучение или же вся энергетика γ-всплеска сосредоточена только в узком конусе с телесным углом порядка (6.5), важен ведь только *измеряемый* поток. А он точно такой же, как в случае полностью сферически симметричного излучения с (*ненаблюдаемым* сферически симметричным эквивалентом) $E_\gamma = E_{beam} 4\pi/\Omega_{beam} \sim 10^{51} - 10^{52} ergs$, так и в случае телесного угла (6.5) с энергией, уходящей на бесконечность (6.6) $E_{beam} \sim 10^{45} - 10^{47} ergs$. (Этот сферически симметричный/изотропный эквивалент E_γ модет быть на самом деле даже еще больше $\sim 10^{52} - 10^{54} ergs$, см. Amati et al. (2002).) И если резко (до 6-ти порядков) уменьшить реальную (но тоже ненаблюдаемую) *полную* энергию γ-вспышки, доведя ее до значений $\sim 10^{47} - 10^{49}$ эрг, то в конце концов остается требовать чтобы *только часть* (6.6) $\sim 10\%$ или даже $\sim 1\%$ от этой полной энергии вспышки была (наиболее) коллимированным излучением, которое все-таки доходит до Земли и обеспечивает наблюдаемые потоки в виде γ-всплесков. Остальное просто не наблюдается современными детекторами. Поэтому желателен независимый (и от какой-либо трактовки кривых блеска в том числе) тест, который мог бы ответить на вопрос о коллимации или об истинной энергетике источников γ-всплесков. Такой рода тест ("orphan afterglows") уже был предложен и описан в нескольких публикациях (Rhoads 1997, 2001a, 2001b). Для этого требуется, чтобы γ-излучение уходило из источника сильно коллимированным пучком, а рентгеновское, оптическое и радиоизлучение (afterglow) было почти изотропным.

В сценарии, который предлагается в этом тексте (см. также Sokolov 2001b) для интерпретации кривых блеска ОТ GRB 970508 и рентгеновских спектров послесвечения GRB, тоже возможно изотропное рентгеновское, оптическое и радиоизлучение ОТ после γ-всплеска. (В рентгеновских эмиссиях оно наверняка таким и было.) При этом исходным предположением была как раз возможность маленького угла коллимации γ-всплеска (6.5), но к которому автор (диссертации) пришел из совершенно иных (чем у Д.Родса в модели фаербола) соображений: из сравнения частот γ-всплесков и взрывов СН в далеких галактиках. То есть за основу было взято предположение, что γ-всплески и СН — тесно связанные явления. *Все длинные γ-всплески всегда сопровождаются взрывами СН*, иногда наблюдаемыми, а иногда нет (см. разд. 6.2 и 6.3). При этом полное энерговыделение при всплеске в γ-лучах во всяком случае может быть не больше, чем вся энергия, *излучаемая* СН ($<$ или $\sim 10^{49} ergs$) за 10 — 100 дней. (Интересно, что полное энерговыделение в рентгеновских эмиссиях, наблюдавшихся на BeppoSAX, ASCA, Chandra для GRB 970508, GRB 970828, GRB 991216, GRB 000214, тоже такого порядка — см. сводку данных в статье Ghisellini et al. 2002.) Но если у Д.Родса (в модели файербола с энергетикой $\sim 10^{51} - 10^{52} ergs$ и более) такой малый телесный угол как (6.5) — это только одна из возможностей, *не запрещенная наблюдениями*, то при "маленькой" полной энергии "γ-взрыва" $\sim 10^{47} - 10^{49} ergs$ получается, что именно эта возможность и реализуется, если действительно длинные γ-всплески — это начало коллапса массивной звезды или начало взрыва СН и всегда γ-всплески должны сопровождаться взрывом СН (Ib/c типа). При такой низкой полной энергии "γ-взрыва" единственной возможностью "увидеть" γ-всплеск остается возможность детектировать хотя бы некоторую, наиболее коллимированную часть этой энергии ($1-10\%$), уходящую из источника в телесном угле $\Omega_{beam} \sim (10^{-5} - 10^{-6}) \cdot 4\pi$. Остальное может быть просто недоступно современным детекторам.

При энергетике "γ-вспышки" $\sim 10^{47} - 10^{49} ergs$ и при излученой в узком конусе (6.5) энергии γ-всплеска (6.6) и "файербол" выглядит совершенно иначе. Здесь автор нигде не упоминает известную "проблему компактности", решаемую моделью фаербола (Paczyński 1986) с энергиями γ-всплесков $10^{52} - 10^{53}$ ergs. При энергиях "γ-взрывов" $\sim 10^{47} - 10^{49} ergs$ в источниках γ-всплесков такой проблемы просто нет. В сценарии *"Массивная звезда —> WR —> пред-СН = пред-GRB"*, где лишь небольшая доля (наиболее) коллимированного излучения с углом коллимации (6.5) уходит на бесконечность и, соответственно, с полной энергетикой в 10^4-10^6 раз меньшей, чем в "стандартной" теории, источник действительно может иметь размеры $\sim 3{\cdot}10^8$ см. То есть здесь, при энергиях до $\sim 10^{49}$ ergs вполне справедливой может быть старая ("наивная") оценка размеров, следующая прямо из времен переменности γ-всплесков. Таким образом, все дело может быть в значительно меньшей, чем в "стандартной" модели, энергетике всплеска.

Ниже собраны вместе основные предположения сценария, описывающего источник γ-всплеска с энергетикой порядка $10^{47} - 10^{49}$ ergs, с другой шкалой расстояний и непустым пространством около массивной звезды-прародительницы:
1) Только (наиболее) коллимированная часть (γ+X-ray) излучения источника всплесков, распространяющаяся внутри телесного угла $\Omega_{beam} \sim (10^{-5}-10^{-6}) \cdot 4\pi$ sr, уходит на бесконечность, при этом полная энергетика источника либо такого же порядка, как и $E_{beam} = E_\gamma \Omega_{beam}/4\pi \sim 10^{45} - 10^{47}$ ergs, либо около $10^{49} ergs$.
2) Вокруг WR звезды-прародительницы источника γ-всплеска, начиная с расстояний $\sim$ или $< 10^9$ см (характерные размеры ядра массивной звезды) и до $r \sim 10^{15}$ см или больше (расстояния, на которых *начинается* взаимодействие WR-ветра с ISM), существует плотная (ветровая) среда — оболочка, возникшая в результате эволюции массивной звезды.
3) Огромное давление излучением — источник возникновения джета в области $\sim 10^9$ cm и до $\sim 2 \cdot 10^{11}$ cm, то есть там, где плотноть оболочки ($\sim 10^{15} - 10^{10}\ cm^{-3}$) самая большая, но оптическая толща по томпсоновскому рассеянию уже может быть меньше единицы ($\tau \sim \sigma_T \cdot n \cdot r < 1$).
4) При этом сама вспышка (возможно и почти сф. симм. "γ-взрыв") с полной энергией до $\sim 10^{49} ergs$ возникает где-то ниже (в объеме с размерами $\sim 3 \cdot 10^9$ см), поскольку нетепловые спектры γ-всплесков требуют прозрачности плазмы для выхода γ-излучения на еще меньших глубинах $\sim 10^8$ см (т.е. там, где WR-закон $n = A \cdot r^{-2}$ для звездного ветра уже перестает выполняться).
5) Конкретные механизмы возникновения γ-излучения при энергетике (6.6) здесь не обсуждаются, но главное наблюдательное следствие такого сценария — это изотропная оптика и рентген, то есть возможны транзиентные вспышки "без γ-всплесков" и (хоть и редко) возможны яркие (вторые) вспышки через день-три после всплеска, как для OT и рентгеновского транзиента GRB 970508 или OT GRB 000301c.

Таким образом, мы почти полностью выполнили свою программу наблюдений и интерпретации данных следуя Таблице-схеме 1.1 (по крайней мере) в отношении одного случая γ-всплеска GRB 970508. Окончательно спор о механизме γ-всплесков, выборе модели послесвечения и (самое главное по мнению автора) дискуссия о прародителях завершится, конечно, только при дальнейшем накоплении результатов спектральных наблюдений в рентгене или если будет найден достаточно убедительный тест (в оптике, в рентгене) в пользу *наблюдательного = правильного* выбора энергетики γ-всплеска. Не модельно-зависимое, а как можно более прямое определение истинной энергии γ-всплеска — в этом все дело, в этом корень проблемы γ-всплесков вообще и их прародителей в частности. Это может стать основной наблюдательной задачей современной эпохи "in the afterglow era" и первые наблюдательные шаги в этом направлении сделаны были как раз в известной программе исследований космологических СН — объектов с такими же z, как и наши длинные γ-всплески. По-видимому, первыми странные короткие вспышки в оптике заметила группа Schmidt et al. (1998), занимающаяся сверхновыми на $z \sim 1$ (см. препринт astro-ph/9805200 на стр. 16 — в конце 1-го абзаца). Они объяснили эти вспышки либо вспыхивающими звездами гало Галактики, либо это и есть "небимированные" (unbeamed) оптические компаньоны GRBs (со ссылкой на J.Rhoads astro-ph/9705163). Очевидно, что могут быть такими же и рентгеновские вспышки, если рентген тоже не коллимимирован (unbeamed) в послесвечении через часы/дни после γ-всплеска.

6.7. Основные выводы главы

(i) В этой главе уникальные $BVRI$-кривые блеска оптического транзиента (ОТ) γ-всплеска GRB 970508, полученные на БТА, интерпретированы в рамках идеи прямой связи явления сверхновых (СН) с "длинными" космическими γ-всплесками. Обоснован вывод: разные (фазы) законы падения блеска транзиента на протяжении всей кривой блеска соответствуют вкладу разных (3-х) по механизму высвечивания источников, вплоть до родительской галактики. Для γ-всплеска GRB 970508 максимальный эффект ("red bump") наблюдается в фотометрической полосе I_c, как и в случае других ОТ γ-всплесков (например, ОТ GRB 970228). Абсолютная величина (M_B) в максимуме кривой блеска предполагаемой сверхновой в случае ОТ GRB 970508 должна быть около -19.5^m (или даже на $1^m - 1.5^m$ ярче, учитывая поглощение в родительской галактике).

(ii) Во все более увеличивающемся списке случаев наблюдения характерного "плеча" в кривых блеска оптических транзиентных источников, связанных с длинными γ-всплесками (OT GRB 970228, 970508, 980326, 990712, 991208, 000911, 011121, ...), надо учитываить и OT GRB 970508. Он был одним из первых. Большое число таких совпадений ("γ-всплеск–СН") можно интерпретировать как проявление явной связи между γ-всплесками и СН Типа Ib/c или с так называемыми "core-collapse" сверхновыми. ("Core-collapse" сверхновыми называются СН, прародителями которых являются массивные звезды.) Эти совпадения (GRB/SN) могут быть еще одним, уже прямым (в отличие от того, о чем шла речь в Гл.5) аргументом в пользу идеи о массивных звездах — прародителях длинных γ-всплесков.

(iii) Отношение числа γ-всплесков, которые могли бы быть связаны со СН, к числу СН типа Ib/c порядка $N_{GRB}/N_{SN} \approx 5\cdot(10^{-5}-10^{-6})$. При условии, что *все* длинные γ-всплески действительно связаны с такими (core-collapse) СН, соответствующие фотометрические эффекты в кривой блеска OT GRB будут наблюдаемыми и с Земли, если родительская галактика γ-всплеска (с $z <$ или ≈ 1) по абсолютной величине, по крайней мере, оказывается не меньше, чем пиковая абсолютная звездная величина СН.

(iv) Далее показано, что если какая-то связь между GRB и СН действительно существует и если *все* или, по крайней мере, основная часть длинных γ-всплесков ассоциируется со взрывами СН (хотя и не всегда наблюдаемыми в оптике), то, как следствие, мы имеем очень жесткий "γ-ray beaming". Это может означать, что наблюдатель регистрирует только наиболее коллимированную часть/компоненту всего γ-излучения источника, распространяющуюся в пределах очень малого телесного угла $\Omega_{beam} \sim (10^{-5}-10^{-6})\cdot 4\pi$, при полной энергии такого (GRB/SN) взрыва до $\sim 10^{49} ergs$.

(v) Наблюдения K_α спектральных линий Fe в рентгеновских спектрах послесвечения некоторых γ-всплесков (**970508**, 970828, **991216**, 000214) и наблюдения красносмещенной абсорбционной особенности — линии нейтрального железа (7.1 keV) — в одном случае (GRB 990705) одновременно с γ-всплеском, тоже являются свидетельствами в пользу массивных звезд-прародитетей γ-всплесков, поскольку вокруг такой (WR) звезды-источника γ-всплеска существует плотная (ветровая) среда — оболочка, возникшая в результате ее эволюции — в которой возможно формирование линий Fe.

(vi) Выше был описан *возможный* сценарий, позволяющий понять причину возникновения мощной оптической и рентгеновской ("второй") вспышки послесвечения, наблюдавшейся на 2-й день после γ-всплеска GRB 970508. На основании интерпретации наблюдательных данных по ОТ GRB 970508 (оптика, рентген) приведены аргументы в пользу возможности наблюдения короткоживущих (часы, дни) оптических вспышек (со светимостями M_B до -24^m, "afterglow" без GRB). Это может быть связано с изотропным излучением в оптике (и в рентгене) у транзиентов с аналогичной ОТ GRB 970508 кривой блеска (т. е. ОТ со "второй" вспышкой) и с сильно коллимированным излучением самого γ-всплеска.

Некоторые выводы этой главы (iv, vi) основаны на предположении, что *все длинные γ-всплески связаны с (core-collapse) сверхновыми*, прямое подтверждение которого потребует, конечно, дальнейшего накопления наблюдательных данных. Фактически здесь сделана попытка (на основании уже имеющихся наблюдений) свести проблему γ-всплесков к старой проблеме механизма взрыва СН (с той же энергетикой). По мнению автора это только поможет в решении наблюдательных (и теоретических) задач — по крайней мере, число гипотез, объясняющих явление γ-всплеска, не возрастает. А наблюдательные тесты, подтверждающие (или опровергающие) такую точку зрения, очевидны: фотометрия, спектры в оптике и в рентгене. То есть это то, что сейчас уже делается как в наблюдательных программах по проблеме γ-всплесков, так и в программах наблюдений космологических сверхновых. (Все результаты этой главы опубликованы в статьях автора: Sokolov 2001a, 2001b.)

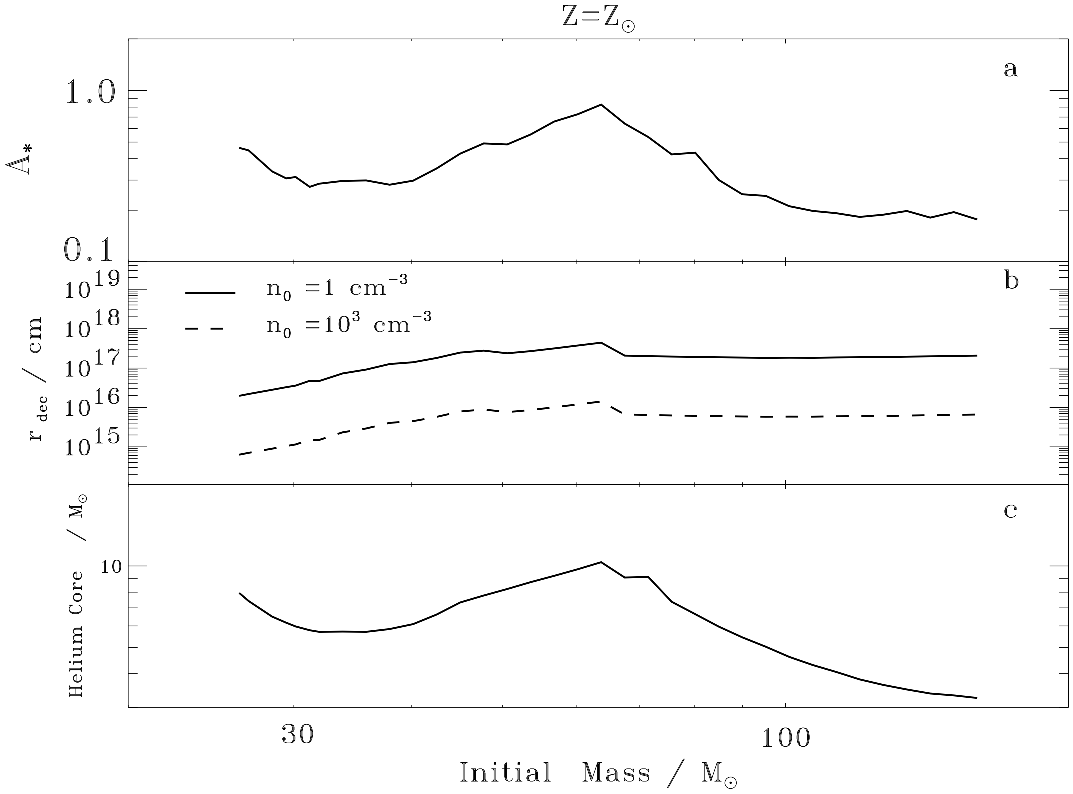


Рис. 6.5. Данные расчетов Ramirez-Ruiz et al. (2001) при солнечной металличности, см. разд. 6.5.1.

Глава 7

Заключение

Здесь приведены основные результаты диссертационной работы, одновременно являющиеся положениями, выносимыми на защиту. Затем коротко будет сказано об общем итоге к 2002-му году по проблеме γ-всплесков и о перспективах на будущее.

7.1. Основные положения, выносимые на защиту

1. Результаты исследования бокса ошибок короткого γ-всплеска GRB 790613:
По результатам фотометрического исследования бокса ошибок локализации короткого γ-всплеска GRB 790613 получены наблюдательные ограничения для галактической модели происхождения коротких всплесков. С использованием оригинальных данных BVR фотометрии и с учетом архивных рентгеновских данных показано, что в направлении этого γ-всплеска нет объекта ярче $B \approx 26$ (или до расстояний 70-90 пк) с показателями цвета и рентгеновским потоком, характерными для старой изолированной нейтронной звезды с чисто тепловым (чернотельным) спектром.

2. Результаты $BVRI$ фотометрии пульсара PSR B0656+14:
Отождествление изолированной нейтронной звезды — пульсара ($B \approx 25$) на основании его астрометрического положения и фотометрии в 4 фотометрических полосах. Для PSR B0656+14 были определены потоки в B, V, R и I, что подтвердило нетепловую природу излучения в оптической области спектра этой изолированной нейтронной звезды вплоть до ~ 8000Å. Наблюдаемый спектр от UV до IR диапазонов — сумма нетеплового и теплового спектра поверхности нейтронной звезды. Исследованы слабые ($B \approx 25$) протяженные объекты в окрестностях пульсара.

3. Результаты исследования оптического транзиента длинного γ-всплеска GRB 970508 в яркой фазе:
Исследованы изменения блеска ОТ GRB 970508 в первые и в последующие сутки (с мая по август 1997 г.) в 4 стандартных (BVR_cI_c) фотометрических полосах. По этим данным было обнаружено неожиданное и до сих пор окончательно не понятое увеличение блеска ("вторая вспышка") от $R_c = 21.19 \pm 0.25$ (Май 9.75 UT) до $R_c = 19.70 \pm 0.03$ (Май 10.77 UT). Проведены точные 4-полосные измерения блеска как в самом максимуме, так и после него. Исследована спектральная эволюция оптического источника, связанного с γ-всплеском. Обнаружено экспоненциальное падение блеска после максимума (май 10.77 UT) во всех $BVRI$-полосах в течение примерно 3 суток. Определен показатель (-1.10 ± 0.08) степенного спектра излучения объекта. Такой спектр сохранялся в течение по крайней мере 3 суток после максимума. Определен усредненный степенной закон падения блеска в R-полосе $F \propto t^{-1.171(\pm 0.012)}$ в течение 86 дней после этого же максимума. Проведено сравнение оптических и рентгеновских данных, подтверждающих активность источника (тоже 2-ю вспышку) в рентгене и в оптике с общей энергетикой более 16% от энергии γ-всплеска, наблюдавшуюся в первую неделю после самого всплеска.

4. Результаты исследования родительской галактики γ-всплеска GRB 970508:
Вывод об отсутствии вклада какого-либо переменного источника в наблюдаемые потоки этой галактики через 200 дней после всплеска. Получен широкополосный ($BVRI$) спектр/цвета родительской галактики GRB 970508 (с $z = 0.835$) и сравнен со средним распределением энергии в континууме для галактик различных хаббловских типов — исключены распределения энергии нормальных галактик более ранних типов, чем Sbc. Определена абсолютная B величина ≈ -18.5 и отмечено, что светимость родительской галактики γ-всплеска GRB 970508 приближенно соответствует колену локальной функции светимости $L_B \approx L^*_{\rm late}$ (или средней светимости) галактик поздних типов Sd-Sm-Irr. Проведено сравнение BVR_cI_c распределения энергии в спектре галактики GRB 970508 с ультрафиолетовыми спектрами близких по светимостям галактик локальной Вселенной со вспышкой звездообразования: наилучшее согласие распределений энергии соответствует спектру Scd HII галактики со звездообразованием NGC7793 ($M_B \approx -18$) и спектру голубой компактной галактики Mrk 1267. Сделаны оценки линейных размеров родительской галактики GRB 970508 (4-5 кпк) и величины ее центральной поверхностной яркости $\mu_0 \approx (19.1 - 20.4)$ mag/arcsec^2 у этого

объекта. Исследование $BVRI$-спектров 3 галактик в поле OT GRB 970508, оценка светимости и размеров (гало) для ближайшей галактики, объяснение дополнительного абсорбционного красного смещения $z = 0.767$.

5. Результаты фотометрии и спектроскопии других родительских галактик:
Приведены наблюдательные свидетельства в пользу ассоциации массивных звезд и γ-всплесков, основанные на *цветах* и других свойствах родительских галактик, предполагающих активное звездообразование. По $BVRI$-фотометрическим наблюдениям 6 GRB-галактик на одном телескопе и в одной и той же (стандартной) фотометрической системе получен самый большой набор данных по 4-хполосной фотометрии родительских галактик γ-всплесков. Изучены цвета этих галактик, подтверждена связь γ-всплесков с массивным звездообразованием. Для 5 родительских галактик γ-всплесков было учтено внутреннее поглощение. Предложена оригинальная методика определения внутреннего поглощения по $BVRI$- фотометрии. Многополосная фотометрия родительских галактик показала, что распределение энергии в их спектрах хорошо аппроксимируется спектрами близких галактик (в локальной Вселенной) со вспышкой звездообразования. Определены K-поправки и абсолютные величины $M_{B_{rest}}$ 6 галактик. С помощью методов популяционного синтеза показано, что UV часть спектра этих галактик описывается теоретическими моделями спектров галактик с недавней вспышкой звездообразования, оценены массы, возрасты, металличность, типы законов поглощения. Наблюдаемый в $BVRI$-спектре родительской галактики GRB 980703 дефицит потока в B фильтре, объяснен поглощением (в полосе графита) на 2200Å, что соответствует солнечной металличности и возрасту галактики $\sim 10^9$ лет, определяемым по моделям. Определены темпы звездообразования по распределению энергии (или по цветам) и по спектрам 3 родительских галактик. Сделан вывод о том, что индивидуальные оценки темпа звездообразования в родительских галактиках γ-всплесков соответствуют росту среднего темпа звездообразования галактик на тех же расстояниях (т.е. для z около 1 и больше), а светимости родительских галактик соответствуют средней светимости галактик для этих же красных смещений. Сделан вывод о том, что родительские галактики γ-всплесков ничем не отличаются от всех других таких же далеких непекулярных галактик при $z \sim 1$. На основании оценок плотности этих далеких галактик на небесной сфере определена средняя годовая частота (верхняя оценка): $\sim 10^{-8}$ γ-всплесков в "средней" галактике в год.

6. Результаты исследования эффекта покраснения ОТ GRB 970508:
Вывод о том, что разные фазы (законы) падения блеска на протяжении всей кривой блеска соответствуют вкладам в полный измеряемый поток от *оптического компаньона* γ-всплеска до 3 разных по механизму высвечивания источников: сначала вкладу послесвечения γ-всплеска, затем (возможно) излучения связанной с ним сверхновой, вплоть до проявления *постоянного блеска* родительской галактики. Обнаружение эффекта покраснения источника ("red bump") или "плеча" на кривой блеска в I_c полосе, наблюдавшегося примерно через 36 дней после γ-всплеска GRB 970508 и указывающего на связь γ-всплеска со сверхновой (СН), как это наблюдается теперь уже во многих других случаях ОТ GRB. Интерпретация оптических наблюдений ОТ GRB 970508 в рамках связи γ-всплеск/СН ("GRB/SN"). Сделан вывод о том, что отношение числа наблюдаемых в далеких галактиках γ-всплесков, которые могли бы быть связаны с коллапсом массивных звезд ("core-collapse SN"), к числу СН типа Ib/c равно $\approx 5 \cdot (10^{-5} - 10^{-6})$. При условии, что *все длинные γ-всплески действительно связаны с (core-collapse) СН*, соответствующие фотометрические эффекты в *многополосных* кривых блеска ОТ будут наблюдаемыми с Земли, если родительская галактика γ-всплеска (с $z <$ или ≈ 1) по абсолютной величине по крайней мере не меньше, чем пиковая абсолютная звездная величина СН.

7.2. Общий итог к 2002-му году и перспективы на будущее

Таким образом, наблюдательные свидетельства в пользу ассоциации массивных звезд и γ-всплесков основаны на цветах и на других свойствах родительских галактик, то есть на свойствах, предполагающих активное звездообразование: положение источника в галактике (Bloom et al. 2001b), возможные свидетельства СН в кривых блеска и прямые наблюдения линий железа в ренгене от нескольких всплесков (Piro et al. 2000, Antonelli et al. 2000). [Здесь *цвета* галактик (Sokolov et al. 2001) как индикатор этой идеи (*ассоциации массивных звезд и γ-всплесков*) указаны в первую очередь (Lloyd-Ronning, Fryer, Ramirez-Ruiz 2001).] И из всего сказанного выше следует, что прародителями источников (по крайней мере) длинных γ-всплесков действительно могли бы быть массивные звезды на стадии WR в далеких галактиках — уже часто повторяемый лейтмотив многих публикаций, начиная с 2000 г. Но ситуация все время менялась (с 1991 г. с запуском CGRO/BATSE и потом в 1997 г. после начала работы BeppoSAX). Это видно и из известных обзоров по теме (1975, 1983, 1987, 1966, и 1999 гг. — цитировались выше), и из текста этой диссертации. Мы начинали свои исследования в 1993 г. с попыток отождествления γ-всплесков со слабыми галактическими источниками, а пришли к задачам, которые решаются в наблюдательной Космологии (звездообразование в далеких галактиках, космологические сверхновые). В конце концов пришлось ждать, когда все более-менее "отстоится" сначала со шкалой расстояний до источников, а потом и с идеей о прародителях всплесков.

Итак, что же к 2002 г. можно считать "сухим остатком" по этой проблеме? Какие же пункты в итоге можно защитить сейчас как надежно установленные факты, а что все еще остается непонятым? В чем явный прогресс и что еще требует дальнейшего накопления наблюдательных данных? С учетом этих вопросов автором на защиту были вынесены только те положения, по которым среди исследователей к этому времени уже установился определенный "консенсус", на эти результаты либо есть ссылки, либо они подтверждены другими, независимыми работами. Общий итог такой: наши наблюдения (кривая блеска OT GRB 970508, фотометрия GRB-галактик и спектроскопия) подтверждают вывод о прародителях γ-всплесков как о массивных звездах в далеких галактиках с транзиентной вспышкой звездообразования. А с учетом рентгеновских данных (в заявке Л. Пиро и в статье по наблюдениям на обсерватории Chandra GRB 991216 принимал участие и автор диссертации) можно еще увереннее утверждать, что перед гамма-всплеском массивная звезда действительно находится на стадии WR.

Как видно из всего сказанного выше, не какая-либо стандартная теория оказалась главным аргументом в этой проблеме. Все решает рутинное (и медленное) накопление наблюдательных фактов, а не торопливая и иногда противоречивая интерпретация данных наблюдений, которые сами могут быть недостаточно полными. Этот "новый астрофизический объект" (GRB) может в итоге оказаться не таким уж и новым: поиск признаков СН в фотометрии и в спектрах оптических транзиентов γ-всплесков сейчас становится основным наблюдательным направлением как наземных телескопов, так и наблюдений на космических телескопах: HST, Chandra, XMM-Newton и других. В частности, в программе 11-го цикла наблюдений на телескопе Хаббла Э. Фрухтера (STSI) "The Origin of Gamma-Ray Bursts" (в которой принимает участие и "GRB follow-up" группа САО) основной задачей является поиск спектральных и фотометрических признаков СН при наблюдениях послесвечения γ-всплесков. Уже многие понимают (ссылки были в тексте), что требуется независимая от каких-либо модельных представлений оценка истинной энергии (total energy reservoir) этой γ-вспышки, если она действительно связана с коллапсом массивного ядра звезды.

И еще: новые это или не новые астрофизические объекты, но в процессе исследований по проблеме GRB, в частности, в связи с работами по родительским галактикам гамма-всплесков возник и *новый раздел наблюдательной Космологии.* Сами γ-всплески сейчас рассматриваются уже как инструмент исследования процессов звездообразования на очень больших расстояниях до $z \approx 10$ (и дальше) из-за прозрачности Вселенной для γ-лучей. Работы в этом направлении цитировались в 5-й главе. И независимо от конкретных моделей этого явления, наверняка можно сейчас говорить, что, наблюдая γ-всплеск, мы наблюдаем сам *релятивистский коллапс* массивного ядра звезды.

БИБЛИОГРАФИЯ

Бисноватый-Коган Г. С., Зельдович Я. Б. 1968, Астрон. ж., 45, 241

Лучков, Б. И., Митрофанов, И. Г., Розенталь, И. Л., 1996, УФН, 166, 743

Мазец, Е.П., Голенецкиий, С. В., 1987, в сб. "Итоги науки и техники" (под ред. Р.А. Сюняева, ВИНИТИ, Москва), 16-42

Постнов К. А., 1999, УФН, 169, 545

Прилуцкий, О. Ф., Розенталь, И. Л., Усов, В. В., 1975, УФН, 116, 517

Розенталь, И. Л., Усов, В. В., Эстулин, 1983, УФН, 140, 97

Соколов В. В., Курт В. Г., Копылов А. И., Жарикрв С. В., Березин А., 1996, "Поиск слабых голубых звездообразных объектов в центральной части области локализации гамма-всплеска 13 июня 1979 года", Письма в АЖ, 22/8: 563

Халиуллин Х. Ф., Черепашук А. М., 1982, "Итоги науки и техники" (Астрономия), Москва-ВИНИТИ, Том 21, 5

Черепащук, А. М., 2001, АЖ, 78, 145

Черепащук, А.М., Каретников В. Г., 2002, АЖ, to be published

Ahn, S. 2000, ApJ, 530, L9

Amati, L., Frontera, F., Vietri M., et al., 2000, SCIENCE, 290, 953

Amati, L., Frontera, F., Tavani, M., et al., 2002, A&A, 390, 81-89 (astro-ph/0205230)

Andersen, M.I., Hjorth, J., Pedersen, H., et al. 2000, A&A, 364, L54

Antonelli, A., Piro, L., Vietri M., et al., 2000, ApJ, 545, L39

Atteia J.-L., Barat C., Hurley K. et al., 1987, ApJS, 64, 302

Barat C., Hurley K., Niel M. et al., 1984, ApJ, 280, 150

Barthelmy S. D., et al., 1995, Astrophys. and Sp. Sci., 231, 235

Barthelmy, S. D., et al , 1996, in *Gamma-Ray Bursts* (AIP Conf. Proc., Vol.384, Eds C. Kouveliotou, M.S. Briggs, G J. Fishman) (Woodbury, N.Y.: AIP

Press , 1996) 380

Bartunov, O.S., Tsvetkov, D.Yu., & Filimonova, I.V., 1994 PASP, 106, 1276

Baryshev Yu.V., Sylos Labini F., Montuori M., Pietronero L., 1994, Vist. Astron. 38, 419

Berger, E., Kulkarni, S.R., Frail, D.A., 2001, ApJ, 560, 652 (astro-ph/0105081, http://xxx.lanl.gov)

Bessel, M.S. 1990, PASP, 102, 1181

Bignami G.F., Caraveo P.A., 1996, ARA&A, 34, 331

Binggeli B., Sandage A., Tammann G., 1988, ARA&A 26, 509

Binggeli B., 1994 in Proceedings of ESO/OHP Workshop "Dwarf Galaxies" (eds. Meylan G., Prugniel P.), p. 13

Bisnovatyi-Kogan G. S., Nadyozhin D. K., 1972, A&SS, 15, 353

Bisnovatyi-Kogan G. S., 1999, in Proceedings Workshop Volcano-99, astro-ph/9911275

Bisnovatyi-Kogan G. S., 2001, in Proceedings of 20th Texas Symposium on relativistic astrophysics, Austin, Texas, 10-15 Decem ber 2000, Melville, NY: American Institute of Physics, 2001, xix, 938 p. AIP conference proceedings, Vol. 586. Edited by J. Craig Wheeler and Hugo Martel. ISBN 0735400261, p.611 (asro-ph/ 0103319).

Bjornsson G., Hjorth J., Jakobsson P., Christensen L., Holland S., 2001, 552, ApJ, L121-L124 (astro-ph/0104174, http://xxx.lanl.gov)

Blain A.W. and Natarajan P., 2000, MNRAS, 312, L35-L38

Bloom, J.S., Frail, D.A., Kulkarni, S.R., Djorgovski, S.G., et al. 1998a, ApJ, 508, L21

Bloom, J.S., Djorgovski, S.G., Kulkarni, S.R., Frail, D.A. 1998b, ApJ, 507, L25

Bloom J. S. et al. 1999a, Nature, 401, 453

Bloom, J.S. 1999b, GCN #756

Bloom J. S., Kulkarni S. R., Djorgovski S. G., 2002a, AJ, 123, 1111-1148 (astro-ph/0010176, http://xxx.lanl.gov)

Bloom, J.S., Djorgovski, S.G., Kulkarni, S.R., 2001b, ApJ, 554, 678 (astro-ph/0007244, http://xxx.lanl.gov)

Bloom, J.S. 2000c, GCN #661

Bloom J. S., Kulkarni S. R., Price P. A., et al. 2002, ApJ, *572*, L45-L49 (astro-ph/0203391)

Boella, G., Bulter, R. C., Perolla, G. C., et al., 1997, A&AS, 122, 299

Boer M., Atteia J.-L., Gottardi M. et al., 1988, A&A, 202, 117

Boer M., Hurley K., Pizzichini G., Gottardi M., 1991, A&A, 249, 118

Boer M., Greiner J., Kahabka P. et al., 1993, A&A, 97, 69

Boer M., Pizzichini G., Hartmann D. et al., 1993a, A&A, 277, 503

Bond, H.E., 1997, IAU Circ No. 6654

Bondi H., Hoyle F., 1944 , MNRAS, 104, 273

Borovicka et al., 1992, A&A, 258, 379

Calzetti, D., Kinney, A.L., Storchi-Bergmann, T. 1994, ApJ, 429, 582

Calzetti, D., Armus, L., Bohlin, R., et al. 2000, ApJ, 533, 682

Capellaro, E., Evans, R., and Turatto, M., 1999, A&A 351, 459

Caraveo P.A., Bignami G.F., Mereghetti S., 1994, ApJ, 422, L87

Caraveo P.A., Mereghetti S., Bignami G.F., 1994b, ApJ, 423, L125

Cardelli, J.A., Clayton, G.C. & Mathis, J.S. 1989, ApJ, 345, 245

Casertano, S., de Mello, D., Dickinson M., et al. 2000, AJ, 120, 2747 (astro-ph/0010245)

Castro-Tirado, A. J. et al., 1997, IAU Circ No. 6657.

Castro-Tirado, A.J., et al., 1999, GCN #452

Castro-Tirado, A.J. 2001a, Invited talk given at the Fourth INTEGRAL Workshop: Exploring the Gamma-ray Universe (Alicante, Spain, 4-8 Sep 2000). ESA-SP Conf. Proceedings, p. 121 (astro-ph/0102122)

Castro-Tirado, A.J., Sokolov, V.V., Gorosabel, J., et al., 2001b, A&A, 370, 398

Chevalier et al., 1981, A&A, 100, L1

Chevalier, C. et al. 1997, IAU Circ No. 6663

Cline, D., Matthey, C., and Otwinowski, S., 1999, ApJ 527, 827

Cline, D., Matthey, C., and Otwinowski, S., 2001, astro-ph/0110276

Connoly, A.J., Szalay, A.S., Bershady, M.A., Kinney, A.L., Calzetti, D. 1995, AJ, 110, 1071

Costa, E. et al. 1997a, IAU Circ No. 6533

Costa, E. et al. 1997b, IAU Circ No. 6572

Costa, E. et al., 1997c, IAU Circ No. 6649.

Costa, E. et al., 1997d, Nature, 387, 783.

Dai, Z. G., and Cheng K. S., 2001, ApJ, 558, L109

Dar, A., 1997, astro-ph/9709231.

de Bernardis, P., Ade, P.A.R., Bock, J.J., et al. 2000, Nature, 404, 955

Dezalay, J.-P., Barat, C., Talon, R., Synyaev, R., Terekhov, O., and Kuznetsov, A., in Gamma-Ray Bursts, (Eds. W. Paciesas and G. Fishman, Huntsville, AL), AIP Conf. Proc. 265 (AIP Press- New York), 304, 1992

Djorgovski S.G., Metzger M. R., Kulkarni S. R., et al., 1997, Nature 387, 876

Djorgovski S.G., Kulkarni S. R., Sievers J., Frail D., Taylor D., 1998, GCN # 41

Djorgovski, S.G., A. Dierks, A., Bloom, J.S., et al. 1998a, GCN #481

Djorgovski, S.G., Kulkarni, S.R., Bloom, J.S., et al. 1998b, ApJ, 508, L17

Djorgovski, S.G., et al. (astro-ph/0008029)

Djorgovski S.G., Kulkarni S.R., Bloom J.S., et al., 2001, Invited review in proc. "Gamma-Ray Bursts in the Afterglow Era: 2nd Workshop", eds. N. Masetti et al., ESO Astrophysics Symposia, Berlin: Springer Verlag, p. 218 (asro-ph/0107535).

Djorgovski S.G., Frail D.A., S.R. Kulkarni S.R., et al., 2001a, to appear in: Proc. IX Marcel Grossmann Meeting, eds. V.Gurzadyan, R. Jantzen, and

R. Ruffini, Singapore: World Scientific, in press (astro-ph/0106574).

Dodonov, S.N., Afanasiev, V.L., Sokolov, V.V., et al. 1999a, GCN #461

Dodonov, S.N., Afanasiev, V.L., Sokolov, V.V., et al. 1999b, GCN #475

Eichelberger A. C., Kulkarni S.R., Djorgovski S. G., et al., 1998, GCN #33

Fernandez-Soto A., Lanzetta K.M., Yahil A., 1999, ApJ, 513, 34

Fields, B. D., Daigne, F., Cassé, M., and Vangioni-Flam E., 2001, submitted to ApJ, astro-ph/0107492,http://xxx.lanl.gov

Filippenko, A.V., to appear in "Cosmic Explosions" – eds. S. Holt and W. W. Zhang (New York: American Institute of Physics), 2000, asro-ph/0002264

Finley J.P., Ogelman H., Kizilogly U., 1992, ApJ, 349, L21

Fioc, M. & Rocca-Volmerange, B. 1997, A&A, 326, 950

Fishman, G.J. et al. 1989, in Proc. of the GRO Science Workshop, ed. W.N. Johnson, p. 2

Fishman G.J., Meegan C.A., Wilson R.B. et al., 1994, ApJS, 92, 229

Frail D.A., Halpern J. P., Bloom J. S., Kulkarni S. R., Djorgovski S.G., 1998, GCN circ. # 128

Frail, D.A. et al., 1997, Nature, 389, 261.

Frei Z., Gunn J., 1994, AJ, 108, 1476

Fried, J.W., von Kuhlmann, B., Meisenheimer, K., et al. 2001, A&A, 367, 788

Frontera, F., Amati, L., Costa, E., et al. 2000, ApJSS, 127, 59

Fruchter, A. et al., 1997, IAU Circ No. 6674.

Fruchter A., Pian E. et al., 1998, GCN circ. # 151

Fruchter, A.S., Ferguson, H., Pepper, J., et al. 1999a, GCN #386

Fruchter, A.S., Pian, E., Gibbons, R., et al., 1999b, astro-ph/9903236 (2000, ApJ, 545, 664)

Fruchter, A.S., Pian, E., Gibbons, R., et al. 2000a, ApJ., 545, 664

Fruchter, A.S., Metzger, M., Petro, L., et al. 2000b, GCN #701

Fruchter, A., Vreeswijk P., Sokolov, V., and Casto-Tirado, A., 2000c, GCN #872

Fruchter, A.S., and Vreeswijk P., 2001a, GCN #1063

Fruchter, A.S. 2001b, Proc. of the 2-nd Rome Workshop, Gamma-ray bursts in the afterglow Era, in press.

Fukugita, M., Shimasaku, K., Ichikawa, T. 1995, PASP, 107, 945

Fynbo, J. P. U., Moller, P., Dall, T., et al. 2000a, GCN #807

Fynbo, J.P.U., Moller, P., Burud, I., et al. 2000b, GCN #871

Fynbo, J.U., Jensen, B.L., Gorosabel, J., et al., 2001, A&A, 369, 373

Galama, T. et al., 1997a, Nature, 387, 479.

Galama, T.J. et al. 1997b, to appear in Conf. Proc. of the 4rd Huntsville Symposium on Gamma-Ray Bursts

Galama T. J., Vreeswijk P. M., Pian E., et al. 1998a, IAUC 6895

Galama, T.J., Groot, P.J., van Paradijs, J.,q et al. 1998b, ApJ, 497, L13

Galama T. J., Vreeswijk P. M., van Paradijs J., et al. 1998c, Nature, 395, 670

Galama, T.J., Tanvir, N., Vreeswijk, P.M., et al. 2000, ApJ, 536, 185

Garnavich P. M., Kirshner R. P., Challis P., et al., 1998, ApJ 493, L53

Garcia, M.R. , Callanan, P. J., Moraru, D. et al., 1997, ApJ Lett, submitted; astro-ph/9710346 (1998, ApJ, 500, L105)

Ghisellini, G., Lazzati, D., Rossi, E., and Rees, M. J., 2002, A&A, 389, 33 (astro-ph/0205227)

Glazebrook, K., Blake, C., Economou, F., Lilly, S., Colless, M. 1999, MNRAS, 306, 843

Golenetskii S.V., Mazets E.P., Aptekar R.L., 1986, A&SS, 124, 243

Gorosabel, J. & Castro-Tirado, A.J., 1998, A&A 337, 691.

Gorosabel, J., Fynbo, J.U., Hjorth, J., et al., 2001, astro-ph/0110007 (2002, A&A, 384, 11)

Greiner J., Boer M., Kahabka P. et al., 1995, in The Lives of the Neutron Stars, M.A.Alpar et al.(eds.), Kluwer Academic Publishers, Printed in the Netherlands., 519

Groot P.J., Galama T. J., van Paradijs J., et al., 1997a, IAUC 6584

Groot, P.J. et al. 1997b, IAU Circ No. 6588

Groot P.J., Vreeswijk P. M., Galama T. J., et al., 1998, GCN circ. # 32

Haensel P., Zdunik J.L., Schaeffer R., 1986, A&A, 160, 121

Halpern J., Thorstensen J., Helfand D., Costa E., 1997, IAUC 6788

Halpern, J.P., Tytler D., 1988, ApJ, 330, 201

Halpern, J.P., et al., 1999, ApJ, 517, L105 (astro-ph/9903418)

Hurley, K., 1992, in Gamma-Ray Bursts - Proceeding of the Gamma-Ray Burst Workshop - 1991, Hantsville, AL, (Eds. W. Paciesas and G. Fishman, AIP Conf. Proc. 265, (AIP Press- New York), p. 3

Harrison T.E., McNamara B.J., Klemola A.R.. 1994, AJ, 108, 600

Hartmann D., Pogge R.W., Hurley K. et al., 1989, ApJ, 336, 889

Hartmann D.H., 1994a, Science, 263, 47

Hartmann D.H., 1994, Proceedings of 2nd Huntsville GRB Workshop. AIP., 307, 359

Heise. J. et al. 1997a, IAU Circ No. 6610

Heise. J. et al. 1997b, IAU Circ No. 6654

Helfand D.J., Chanan G.A,, Novick R., 1980, Nature, 283, 337

Hjorth J., Andersen M. I., Pedersen H., et al., 1998, GCN circ. # 109

Hjorth, J., Andersen, M.I., Cairos, L.M., et al. 1999, GCN #219

Hjorth, J., Holland, S., Courbin, F., et al. 2000, ApJ, 539, L75; 534, L147

Hogg, D. W., & Fruchter, A. S. 1999, ApJ, 520, 54

Holland, S., Fynbo, J.P.U., Hjorth, J., et al., 2001, A&A, 371, 52

Hudec et al., A&A, 1990, 235, 174

In 't Zand, J. et al. 1997, IAU Circ No. 6569

Iwamoto K., Mazzali, P. A., Nomoto K., et al., Nature, 396, 672

Iwamoto K., Nakamura T., Nomoto K., et al., 2000, ApJ, 534, 660 (astro-ph/9807060)

Jager, R., Heise, J., In 't Zand, J., Brinkman, A.C. 1995, Adv. Space Res., 13, 315

Jaunsen A.O., Hjorth J., Andersen M.I., et al., 1998, GCN circ. # 78

Jaunsen A.O., Andersen M.I., Hjorth J., et al., 2002, to appear in A&A, astro-ph/0204278

Kelemen, J. 1997, Information Bull. Var. Star No. 4496

Kelson, D.D., Illingworth, G.D., Franx, M., Magee, D., & van Dokkum, P.G. 1999, IAU Circ. 7096

Kennicutt, R.C. 1998, ARA&A, 36, 189

Kinney A.L., Bohlin R.C., Calzetti D., Panagia N., Wyse R.F.G., 1993, ApJS 86, 5

Klebesadel, R.W. Strong, I. B., Olson, R. A., 1973, ApJL, 182, L85.

Klose, S, Stecklum, B., Masetti, N., et al. 2000, ApJ, 545, 271

Koptsevich A. V., Pavlov G. G., Zharykov, S. V., Sokolov, V. V., Shibanov, Yu. A., Kurt V. G., 2001, A&A, 370, 1004-1016

Kopylov, A. I., Sokolov, V. V., and S. V. Zharikov S. V., Feroci, M., Palazzi, E., 1997a, IAUC, Circular No. 6663, May 1997.

Kopylov, A. I., Sokolov, V. V., and S. V. Zharikov S. V., and the rest of the BeppoSAX GRBM team, 1997b, IAUC, Circular No. 6671, May 1997.

Kouveliotou C., et al., 1993, ApJ, 413, L101

Kouveliotou, C., et al. 1997, IAU Circ No. 6660

Kulkarni, S. R., Djorgovski, S. G., Ramaprakash, A. N., et al. 1998, Nature, 393, 35

Kulkarni, S. R., et al. 1998a, Nature, 395, 663

Kulkarni S., et al., 2000, in Proc. of the 5th Huntsville Gamma-Ray Burst Symposium; Proc. SPIE Vol. 4005, p. 9-21, Discoveries and Research Prospects from 8- to 10-Meter-Class Telescopes, Jacqueline Bergeron; Ed. (astro-ph/0002168)

Kurt, V. G., Komberg, B. V, Sokolov, V. V., Zharykov, S. V., 1997a, Astrophysics and Space Science (A&SS), v. 252, Issue 1/2, p. 451-460.

Kurt V.G., Komberg B.V., Sokolov V.V., Zharikov S.V., Pavlov G.G., 1997b, IAU Circ. 6533

Kurt, V.G., Sokolov V.V., Zharikov S.V., Pavlov G.G., Komberg B.V., 1998, A&A, 333, 547-556.

Kurt, V. G., Komarova, V. N., Fatkhullin T. A., Sokolov, V. V., Koptsevich A. V., Shibanov, Yu. A., 2000, Bull. Spec. Astrophys. Obs. 49, 5-13

Kurt, V. G., Komarova, V. N., Fatkhullin T. A., Sokolov, V. V., Koptsevich A. V., Shibanov, Yu. A., 2001, Bull. Spec. Astrophys. Obs. 51, 21-37

Lacarrieu C.T., 1971, A&A, 14, 95

Landolt, A.U. 1992, AJ, 104, 340

Laureijs, R. J. 1989, PhD-thesis, Groningen University

Lattimer, J.M., & Schramm, D.N. 1976, ApJ, 210, 549

Lazzatti, D., Ghisellini, G., Amati, L., 2001, ApJ, 556, 471 (astro-ph/0104062)

Lazzatti, D., Covono, S., Ghisellini, G., et al., 2001a, A&A, 378, 996 (astro-ph/0109287)

Lazzatti, D., Ramirez-Ruiz E. & Rees M. J., 2002, ApJ, 572, 57 (astro-ph/0204319)

Lloyd-Ronning, N. M., Fryer, C. L., Ramirez-Ruiz, E., 2001, accepted to ApJ, astro-ph/0108200

Lyne A.G., Lorimer D.R., 1994, Nature, 369, 127

Luginbuhl, C.B., Vrba, F.J., Hudec, R., et al., 1995, Ap&SS 231, 289.

MacFadyen, A. & Woosley, S.E. 1999, ApJ, 524, 262

Madau, P., Pozzetti, L., & Dickinson, M. 1998, ApJ, 498, 106

Mao, S., & Paczinśki, B. 1992, ApJ, 388, L45

Mazets, E. P., and Golenetskii, S. V., 1981, Ap & SS 75, 47

Mazets, E.P., Golenetskii, S.V., Ilyinskii V.N., Panov V.N., Aptekar R.L., Guryan Yu. A., Proskura M.P., Sokolov I.A., Sokolova Z.Ya., Kharitonova T.V., Dyatchkov A.V., Khavenson N.G., 1981, Ap & SS 80, 119

McNamara B.J., et al., 1995, Astrophys. and Sp. Sci, 231, 1/2, 251

McNamara B.J. and Harrison T.E., 1994, Astron. Journal, 107, 1825

McNamara B.J., Harrison T.E., Williams C. I., Wagner R. M., **Sokolov** V.V., Kopylov A. I., Zharykov S., 1995, Astron. Journal, 110, 232-237

McQuade K., Calzetti D., Kinney A.L., 1995, ApJS 97, 331

Meegan, C. A., et al., 1992, *Nature*, 355, 14

Metzger, M.R. et al. 1997a, IAU Circ No. 6588

Metzger M.R., Cohen J.G., Chaffe F.H. 1997b, IAUC 6676

Metzger, M.R., Djorgovski, S.G., Kulkarni, S.R. et al. 1997c, Nature, 387, 878

Metzger, M.R. 2000, GCN #733

Mignani R., Caraveo P. A., Bignami G. F., 1997, The Messenger, 87, 43

Mignoli, M et al., 1997, IAU Circ No. 6661.

Motch, C., Hudec, R., & Christian, C. 1990, A&A, 235, 185

Moskalenko, E. I., et al., 1989, A&A, **223**, 141

Natarajan P., Bloom J.S., Sigurdsson S., et al., 1997, New Astronomy 2, 471

O'Connell R.W., Callagher J.S., Hunter D.A., 1994, ApJ 433, 65

Oke, J.B. & Sandage, A. 1968, ApJ, 154, 21

Overgard T., Ostgaard E., 1991, A&A, 243, 412.

Paczyński B., 1986, ApJ, 308, L43

Paczynski B., 1990, ApJ, 348, 485

Paczyn'ski, B., 1997, astro-ph/9710086.

Pacziński, B., 1998, ApJ, 494, L45 (см. astro-ph/9710086)

Pacziński, B., Published in the Proceedings of the Space Telescope Science Institute 1999 May Symposium (13): "Supernovae and Gamma Ray Bursts; The Largest Explosions Since the Big Bang", p. 1; Eds.: M. Livio, N. Panagia and K. Sahu; Cambridge University Press, 2001 (astro-ph/9909048)

Panaitescu, A. & Kumar, P., 2001a, ApJ, 554, 667 (astro-ph0010257)

Panaitescu, A., 2001b, ApJ, 556, 1002

Panaitescu, A. & Kumar, P., 2002, ApJ, 571, 779 (astro-ph0109124)

Paresce F., 1984, AJ, 89, 1022

Paturel G., Bottinelli L., di Nella H., et al., 1997, A&AS 124, 109

Pavlov G.G., Shibanov Yu.A., Zavlin V.E., Meyer R.D., 1995, in: Alpar M. A., Kiziloğlu Ü., van Paradijs J. (eds). The Lives of the Neutron Stars. Kluwer, Dordrecht, p. 71

Pavlov G.G., Stringfellow G.S., Córdova, F.A., 1996a, ApJ, 467, 370

Pavlov G.G., Zavlin V.A., Trümper J., Neuhäuser R. 1996b, ApJ, 472, L3

Pedersen, H. et al., 1998, ApJ, 496, 311

Pence W., 1976, ApJ., 203, 39

Pettini, M., Steidel, C.C., Dickinson, M., et al. 1998, ApJ, 508, L1

Pian, E. et al., 1997, astro-ph 9710334 (1998, ApJ, 492, 103)

Pian, E., Fruchter, A.S., Bergeron, L.E., et al. 1998a, ApJ, 492, L103-L106

Pian E., Antonelli L. A., Daniele M.R., et al., 1998b, GCN circ # 61.

Pian, E., Soffitta, P., Alessi, A., et al., 2000, asro-ph/0012107 (2001, A&A, 372, 456)

Piro, L., Scarsi, L. and Butler, R.C. 1995, Proc. SPIE 2517, 169

Piro, L. et al. 1997a, astro-ph 9710355 (1998, A&A, 331. L41)

Piro, L. et al. 1997b, IAU Circ No. 6656

Piro L., Amati L., Antonelli L.A., et al., 1998, A&A., 331, L41

Piro, L., Costa, E., Feroci, M., et al., 1999, A&ASS., 138, 431

Piro, L., Garmire, G., Garcia, M., et al., 2000, SCIENCE, 290, 955

Pizzichini G., Gottardi M., Atteia J.-L. et al., 1986, ApJ, 301, 641

Popov, S., & Prokhorov, M. 2000, A&A, 357,164 (astro-ph/9908212)

Popov, S., Colpi, M., Treves, A., Turolla, R., Lipunov, V. M., & Prokhorov, M. E., 2000, ApJ, 530, 896 (astro-ph/9910114)

Porciani, C., & Madau, P., 2001, ApJ, 548, 522

Puche D., Carignan A., 1988, AJ 95, 1025

Ramirez-Ruiz, Fenimore, & Trentham, 2000, talk given at the CAPP2000 Conference on Cosmology and Particle Physics, Verbier, Switzerland, eds. J. Garcia-Bellido, R. Durrer and M. Shaposhnikov (AIP,2001) astro-ph/0010588

Ramirez-Ruiz, E., Dray, L.M., Madau, P., and Tout C.A., 2001a, MNRAS, 327,829 (astro-ph/0012396)

Ramirez-Ruiz, E., Trentham, N., Blain, A.W., 2001b, astro-ph/0103239 (2002, MNRAS, 329, 465)

Rees, M.J., and Mészáros, 1997, astro-ph 9712252 (1998, ApJ, 496, 1)

Rees, M.J. & Meszaros, P., 2000, ApJ, 545, L73

Rhoads, J. R., 1997, ApJ, 487, L1

Rhoads, J. R., 2001a, ApJ, 557, 943

Rhoads, J. R., 2001b, Invited review at Ninth Marcel Grossmann Meeting, astro-ph/0103028, http://xxx.lanl.gov

Richardson D., et al., 2001, astro-ph/0112051 (2002, AJ, 123, 745)

Ricker G.R., Vanderspek R.K., Ajhar E.A., 1986, Adv. Space Research, 6, 75

ROSAT X-ray Images, Volume 1 (The CDROM files), 1994a, Produced by the Lab. for High Energy Astrophysics and High Energy Astrophysics Science Archive Reserch Centre at NASA Goddard Space Flight Centre, Greenbelt, Maryland (Prepared by: B.O'Neel. et al. B.)

ROSAT Guest Observer Program, 1994b, Solicitation for AO5 Observing Proposals. Printed by the US ROSAT Science Data Center, NASA/Goddard Space Flight Center, Greenbelt, 75.

Ryan J., Bennett K., Collmar W. et al., 1994, ApJ, 422, 67

Sahu, K.C. et al., 1997, Nature, 387, 476.

Sahu, K.C. et al. 1997b, ApJl, 489, 127

Sari, R., Piran, T., 1999, ApJ, 560, 641 (astro-ph/9902009)

Scalo J. & Wheeler J.C., 2001, ApJ, 562, 664 (astro-ph/0105369)

Schaefer, B. E., et al. 1984, ApJ, *286*, L1

Schaefer, B. E., 1984, Nature, *294*, 722

Schaefer, B. E., et al., 1997, IAU Circ No. 6658.

Schmidt, B.P., Suntzeff, N.B., Phillips, M.M., et al., 1998, ApJ, 507, 46-63 (astro-ph/9805200)

Shearer A., Redfern, G,, Gorman, R., et al. 1997, ApJ., 487, L181

Smith, D., et al. 1997, to appear in Conf. Proc. of the 4rd Huntsville Symposium on Gamma-Ray Bursts

Sokolov V.V., Kopylov A.I., Kurt V.G., Zharikov S.V., 1994, Lecture Notes in Physics, in Proc. IAU Coll. 151, Flares and Flashes, held in Sonneberg,Germany, Dec. 5-9, 1994, eds.: J. Greiner et al., Springer, 389

Sokolov V.V., Kopylov A.I., Zharikov S.V., 1994a, Bull. Spec. Astrophys. Obs., **38**, 46

Sokolov V.V., Kopylov A.I., Kurt V.G., et al., 1995, Astrophys. and Space Sci., 231: 343,

Sokolov V.V., Kopylov A.I., Kurt V.G., et al., 1996, in proc. of 3th Huntsville Symp. on GRB, AIP, 697

Sokolov V.V., Kopylov A.I., Kurt V.G., et al., 1997, Bull. Spec. Astrophys. Obs., 43, 5

Sokolov, V. V., Kopylov A.I., Zharikov S.V., et al., 1998, 4rd Huntsville Symposium on Gamma-Ray Bursts, 1997, astro-ph/9709093.

Sokolov V.V., Kopylov A.I., Zharikov S.V., et al., 1998, A&A , 334, 117

Sokolov V.V., Zharikov S.V., Baryshev Yu.V., Hanski M.O., Nilsson K., Teerikorpi P., Nicastro L., and Palazzi E., 1999, A&A, 344, 43

Sokolov, V.V., Fatkhullin, T.A., Komarova, V.N. 2000b, Abstracts of JENAM-2000, 191 (полный текст доклада в astro-ph/0006207)

Sokolov, V.V., Fatkhullin, T.A., Komarova, V.N. 2000c, Bulletin SAO RAS, 49, 11, astro-ph/0001357, http://xxx.lanl.gov

Sokolov, V.V., Fatkhullin, T.A., Castro-Tirado, A.J., et al., 2001, A&A, 372, 438

Sokolov, V. V., 2001a, ESO Astrophys. Symposia (ser.ed.: B.Leibundgut) in "Gamma-Ray Bursts in the Afterglow Era", Eds. E. Costa, F. Frontera, J. Hjorh, Proc. of the Int. Workshop (Rome, 17-20 Ost. 2000), Springer, 136 p.

Sokolov, V. V., 2001b, Bull. Spec. Astrophys. Obs., 51, 38

Storchi-Bergmann, T., Kinney, A., Challis, P. 1995, ApJSS, 98, 103

Takeshima, T. et al. 1997, to appear in Conf. Proc. of the 4rd Huntsville Symposium on Gamma-Ray Bursts

Tavani, M. 1998, ApJ 497, L21

Taylor, G.B. et al., 1997, Nature, 389, 263.

Theureau, G., Hanski, M., Ekholm, T., et al. 1997, A&A 322, 730

Treves, A., Turolla, R., Zane, S., & Colpi, M., 2000, PASP, 112; 297-314

van Kerkwijk & Kulkarni, S. R., 2001, A&A, 378, 986

van Paradijs J., Groot P., Galama T., et al., 1997, Nature 386, 686

Vaucouleurs G. de, Vaucouleurs A. de, Corwin H.G. et al., 1991, Third Reference Catalog of Bright Galaxies, Springer-Verlag (RC3)

Venemans, B. P., and Blain, A. W., 2001, MNRAS, 325, No.4, p. 1477 (astrph/0104169)

Vietri, M., Ghisellini, G., Lazzatti, D., Fiore, F. & Srella, L., 2001, ApJ, 550, 43 (astro-ph/0011580)

Vrba F.J. et al., 1994, ApJ., 424, 68

Vrba, F.J., Hartmann, D.H., & Jennings, M.C., 1995, ApJ 446, 115.

Vreeswijk, P.M., Rol, E., Hjorth, J., et al. 1999, GCN #496

Vreeswijk, P.M., Fruchter, A.S., Fergusson, H, & Kouveliotou, C. 2000a, GCN #751

Vreeswijk, P.M., Fruchter, A.S., Kaper, L., et al. 2000b, ApJ, 546, 672

Vreeswijk et al., 2000c, GCN Circular #496

Vreeswijk, P.M., Fruchter, A., Kaper, L., et al., 2001, ApJ, 546, 672

Walters F.M, & Matthews L.D., 1997, Nature 389, 358

Weis E.M., 1991, AJ., 102, 1795

Welsh B.Y., Craig P.W., Vedder P.W., Vallerga J.V., 1994, ApJ, 437, 638

Weth, C., Meszaros, P., Kallman, T. & Rees, M.J., 2000, ApJ, 534, 581

Whitford, A.E. 1958, AJ, 63, 201

Wijers, R.A.M.J., Rees, M.J., and Mészáros 1997, MNRAS, 288, L51

Woosley, S.E., Wallace, R. K., 1982, ApJ., *258*, 716

Woosley, S.E., 1993, ApJ, 405, 273

Yoshida, A., Namiki, M., Yonetoku, D., et al., 2001, ApJ, 557, 27 (astro-ph/0107331)

Zapatero-Osorio M.R., Castro-Tirado A., Corosabel J., et al., 1998, GCN circ. #130

Zharykov, S.V., Kopylov, A.I., Sokolov, V.V., 1995, Ap&SS 231, 347.

Zharikov S.V., Sokolov V.V., Baryshev Yu.V., 1998, A&A 337, 356